



奥氏体不锈钢 加工制造实用指南

奥氏体不锈钢加工制造实用指南

第二版 2020
© IMO A 2010 – 2020
ISBN 978-1-907470-12-7

出版：
国际钼协会(IMOA)，英国伦敦
www.imoa.info

联合出版：
国际铬发展协会(ICDA)，法国巴黎
www.icdacr.com
国际镍协会，加拿大多伦多
www.nickelinstitute.org

撰写：
美国匹兹堡TMR不锈钢咨询公司，国际镍协会，国际钼协会

编辑：
第二版，James Fritz博士，美国宾州匹兹堡
第一版，Curt Kovach，美国宾州匹兹堡，John Shield博士，
美国俄亥俄州克利夫兰

设计：
德国慕尼黑circa drei公司

致谢：
国际钼协会(IMOA)感谢奥托昆普提供技术数据。

国际钼协会(IMOA)竭力确保所提供的信息在技术上是正确的。但是，IMO A不保证本出版物所含信息的准确性或对任何一般或特定用途的适用性。本出版物所含内容仅供读者参考；不能代替个人的任何决策程序，未获得专业意见前，不应用于任何一般或特殊应用。对于使用本出版信息信息而造成的任何损失、损害或伤害，IMO A及其会员、员工和顾问不承担任何责任或义务。本出版物主要使用ASTM和EN国际标准规范；但是，各国的材料标准可能有所不同。

封面照片：不锈钢换热器内部焊接。© iStock.com/MEDITERRANEAN

目录

1	前言	4
2	奥氏体不锈钢的历史	5
3	冶金学	8
3.1	不锈钢种类	8
3.1.1	奥氏体不锈钢	8
3.1.2	铁素体不锈钢	9
3.1.3	双相不锈钢	9
3.1.4	马氏体不锈钢	9
3.1.5	沉淀硬化不锈钢	10
3.2	相组分	10
3.3	有害的二次相	11
3.3.1	二次相稳定温度	11
3.3.2	二次相形成动力学	12
4	合金元素的作用	15
4.1	铬(Cr)	15
4.2	镍(Ni)	15
4.3	钼(Mo)	15
4.4	碳(C)	15
4.5	氮(N)	15
4.6	锰(Mn)	16
4.7	铜(Cu)	16
4.8	硅(Si)	16
4.9	铌(Nb)和钛(Ti)	16
4.10	硫(S)和磷(P)	16
5	机械性能和物理性能	17
5.1	强度	17
5.2	延展性和韧性	19
5.3	高温强度	19
5.4	物理性能	20
6	耐蚀性	24
6.1	均匀腐蚀	24
6.2	局部腐蚀	24
6.2.1	点蚀和缝隙腐蚀	24
6.2.2	二次相对局部腐蚀的影响	26
6.2.3	应力腐蚀开裂	26
6.3	晶间腐蚀/敏化腐蚀	28
6.3.1	焊缝敏化/焊缝腐蚀	28
6.3.2	刀状腐蚀	29
6.4	电偶腐蚀	29

6.5	加工制作与耐蚀性之间的关系	31	11.1.2	温度	52	14.7	制造完成后对饰面的恢复和保护	80
7	工厂注意事项--保持表面光洁	32	11.1.3	退火时间	52	15	加工制作后的表面清理	81
7.1	最初交货和存放	32	11.1.4	气氛	53	15.1	常见的损伤和表面污染	81
7.2	可剥离保护膜	33	11.1.5	冷却	53	15.1.1	铁污染	81
7.3	避免铁污染	34	11.1.6	退火后清理	53	15.1.2	有机化合物污染	81
8	热成形和冷成形	35	11.2	消除应力	53	15.1.3	退火和焊接过程中形成的氧化皮	82
8.1	热成形	35	12	焊接、硬钎焊和软钎焊	55	15.1.4	其它缺陷	82
8.2	温成形	36	12.1	焊接	55	15.2	加工制作后的清理方法	83
8.3	冷成形	36	12.1.1	物理特性对焊接的影响	55	15.2.1	喷砂	83
8.3.1	弯曲	37	12.1.2	焊口及组对	56	15.2.2	玻璃珠喷丸	83
8.3.2	辊轧成形	38	12.1.3	填充金属	57	15.2.3	打磨和抛光	83
8.3.3	冲压拉伸	39	12.1.4	保护	57	15.2.4	不锈钢钢丝刷/不锈钢钢丝棉	84
8.3.4	旋压成形	40	12.1.5	焊接工艺	58	15.2.5	脱脂	84
8.3.5	冷墩	40	12.1.6	异金属焊接(DMW)	63	15.2.6	酸洗	84
9	切割	41	12.1.7	焊件质量注意事项	63	15.2.7	钝化	85
9.1	锯切	41	12.2	硬钎焊和软钎焊	66	15.2.8	电抛光	85
9.1.1	电动弓锯	41	12.2.1	硬钎焊	66	15.3	清理方法对耐腐蚀性的影响	86
9.1.2	带锯	41	12.2.2	软钎焊	67	参考文献	87	
9.2	砂轮片切割	41	13	机械连接方式	68	推荐阅读	89	
9.3	剪切	42	13.1	连接方式	68	ASTM标准	90	
9.3.1	设备要求	42	13.1.1	螺栓连接和螺丝连接	68	EN标准	92	
9.3.2	切口	42	13.1.2	铆接	68	注册商标和注册名称	93	
9.3.3	落料和冲孔	43	13.1.3	压铆	68			
9.4	水射流切割	44	13.1.4	咬接	69			
9.5	等离子切割	45	13.1.5	粘接	70			
9.6	激光切割	45	13.2	机械连接的腐蚀问题	70			
10	机加工	46	13.2.1	缝隙腐蚀	70			
10.1	通用指导意见	46	13.2.2	电偶腐蚀	71			
10.2	不锈钢切削性能指数	47	14	表面	72			
10.3	车削	48	14.1	表面与性能	72			
10.4	利用硬质合金进行平面铣削	48	14.2	钢厂交货表面	73			
10.5	用高速钢钻头螺旋钻孔	50	14.2.1	中板	73			
11	热处理-退火和消除应力	51	14.2.2	薄板和钢带	74			
11.1	固溶退火	51	14.3	机械加工表面	74			
11.1.1	准备	51	14.3.1	专用机加工表面	76			
			14.3.2	磨光	77			
			14.3.3	用于机械抛光的磨料	77			
			14.4	压花和浮雕表面	78			
			14.5	着色不锈钢	78			
			14.6	电抛光	80			

1 前言

奥氏体不锈钢有许多牌号，它们广泛用于室内装饰材料，如墙板、扶手等，还用于化工、电力等腐蚀环境中的管道和容器。标准牌号的奥氏体不锈钢消费量占据着市场主导

地位，如304和316。但是，合金含量更高的牌号已在多种苛刻的应用环境中表现出了良好的性价比。这些材料被称为“高性能奥氏体不锈钢(HPASS)”。与标准牌号相比，这

些钢中加入了较多的铬(Cr)、钼(Mo)、镍(Ni)和氮(N)等合金元素，从而具有了优异的性能。高性能奥氏体不锈钢的合金含量较高，与标准牌号不锈钢相比，加工和制作更加复杂，因此，要想正确选择材料并保证加工质量，工程师、设计师和加工企业必须充分了解它们的特性。本指南提供了高性能奥氏体不锈钢的基本信息，并将它们与标准不锈钢进行了比较。主要目的是对比两种钢的加工特性，明确它们之间的同异性。这些信息可以帮助标准奥氏体不锈钢和高性能奥氏体不锈钢加工企业制作出高性能优质产品。



应用于烟气洗涤塔的高性能奥氏体不锈钢。© Outokumpu

2 奥氏体不锈钢的历史

不锈钢起源于二十世纪初，是英国和德国的一项创举。在接下来的半个世纪中，钢铁厂开发了一系列不锈钢钢种，它们成功地应用于化工、能源、食品及其它行业。二十世纪七十年代初期，不锈钢进入了新时代，钢铁厂引入了最新的精炼和铸造技术。钢铁设计师和钢铁厂利用这些技术，不仅对已有的“标准牌号”进行了改良，同时还开发了性能更好的新牌号，其中包括新型高性能奥氏体不锈钢。

新的炼钢技术包括氩氧脱碳(AOD)和真空吹氧脱碳(VOD)工艺。这两种工艺可以有效地实现超低碳含量、高合金回收率及成分控制更精准的目标，特别是氮含量得到了精确控制。电渣重熔法(ESR)有时作为一种替代或补充工艺，可以更好地控制钢水洁净度，使显微组织更均匀，夹杂物减少。连铸技术提高了生产效率，从而降低了生产成本。

炼钢技术的进步降低了标准低碳牌号的成本，如304L和316L，使焊接构件的耐蚀性能得到提高。采用新炼钢技术诞生的第一个高性能奥氏体不锈钢的牌号是904L(N08904)，它是由现在的Outokumpu公司开发的。904L的碳含量超低，是现有铸造合金的可焊接锻造牌号，对强还原性酸有很强的耐蚀性。1973年，Allegheny Ludlum公司（现为ATI子公司）推出了第一个完全耐海水腐蚀的奥氏体不锈钢牌号



制造中的换热器管板。© Sandvik

AL-6X[®](N08366)，这种钢含有6%的Mo和非常低的碳，用于生产可焊接薄板和管材。七十年代中期，氮的使用和控制得到了发展，进一步改进了6%Mo合金钢的性能，实现了厚壁可焊接，阻止有损于耐点蚀性的有害金属间相的形成。这些6%Mo含氮钢种的UNS编号及生产厂的商标名称见第93页。

二十世纪九十年代，新兴的能源环保工业对高性价比、高性能合金的需求日益增长，对不锈钢的耐蚀性能提出了更高的要求。在这种情况下，开发了钼含量大约7%，氮含量较高的三个钢种，它们在

侵蚀性含氯水中具有特别高的耐点蚀性能。这组高合金钢的牌号为S32654、S31266和S31277。它们的性能与一些高耐蚀性镍基合金很接近，而成本却低得多。7%Mo钢的牌号及生产厂的商标名称见第93页。

表1列出了一些较为常见的标准300系和200系奥氏体不锈钢的化学成分见表2。高性能奥氏体不锈钢的铬、镍和钼的含量远高于标准的18%Cr - 8%Ni钢。很多牌号都添加了氮。

表1：常见的标准锻造300系和200系奥氏体不锈钢的化学成分*(重量%)和耐点蚀当量(PREN)**

牌号	UNS No.	EN No.	C	Mn	N	Cr	Ni	Mo	Cu	其它	PREN***
代表性标准牌号 – 300系											
304	S30400	1.4301	0.07	2.00	0.10	17.5 19.5	8.0 10.5	–	–	–	18–20
304L	S30403	1.4307	0.03	2.00	0.10	17.5 19.5	8.0 12.0	–	–	–	18–21
321	S32100	1.4541	0.08	2.00	0.10	17.0 19.0	9.0 12.0	–	–	Ti 5x(C+N)min 0.70 max	18–21
347	S34700	1.4550	0.08	2.00	0.10	17.0 19.0	9.0 13.0	–	–	Nb 10xC min 1.00 max	18–21
316	S31600	1.4401	0.08	2.00	0.10	16.0 18.0	10.0 14.0	2.00 3.00	–	–	24–26
316L	S31603	1.4404	0.03	2.00	0.10	16.0 18.0	10.0 14.0	2.00 3.00	–	–	24–26
–	–	1.4435	0.03	2.00	0.11	17.0 19.0	12.5 15.0	2.50 3.00	–	–	27–29
317L	S31703	1.4438	0.03	2.00	0.10	18.0 20.0	11.0 15.0	3.00 4.00	–	–	29–30
代表性标准牌号 – 200系											
201	S20100	1.4372	0.15	5.5 7.5	0.25	16.0 18.0	3.5 5.5	–	–	–	17–20
201L	S20103	–	0.03	5.5 7.5	0.25	16.0 18.0	3.5 5.5	–	–	–	17–20
201LN	S20153	–	0.03	6.4 7.5	0.10 0.25	16.0 17.5	4.0 5.0	–	1.0	–	17–20

说明：

* 选自现行的ASTM中厚板、薄板和带钢的技术规范或企业的数据表。完整的成分要求，请向他们咨询。

** 化学成分最大值，除非标出范围或最小值。EN的化学成分与ASTM的化学成分不完全一致。

*** 根据公式 $PREN = \%Cr + 3.3(\%Mo + 0.5\%W) + 16(\%N)$ 计算出的耐点蚀当量及该牌号预期的额定化学成分。

表2：常见的高性能奥氏体不锈钢的化学成分*(重量%)和耐点蚀当量(PREN)**

牌号	UNS No.	EN No.	C	Mn	N	Cr	Ni	Mo	Cu	其它	PREN***
Alloy 20	N08020	2.4660	0.07	2.00	–	19.0 21.0	32.0 38.0	2.00 3.00	3.00 4.00	(Nb+Ta): 8xC min, 1.00 max	25–27
317LM	S31725	–	0.03	2.00	0.20	18.0 20.0	13.2 17.5	4.00 5.00	–	–	30–32
317LMN	S31726	1.4439	0.03	2.00	0.10 0.20	17.0 20.0	13.5 17.5	4.00 5.00	–	–	31–33
904L	N08904	1.4539	0.02	2.00	0.10	19.0 23.0	23.0 28.0	4.00 5.00	1.00 2.00	–	33–35
–	S31727	–	0.03	1.00	0.15 0.21	17.5 19.0	14.5 16.5	3.80 4.50	2.80 4.00	–	33–35
–	N08028	1.4563	0.02	2.00	0.15 0.25	26.0 28.0	30.0 34.0	3.00 4.00	–	–	38–40
–	S34565	1.4565	0.03	5.00 7.00	0.40 0.60	23.0 25.0	16.0 18.0	4.00 5.00	–	–	45–47
–	N08026	–	0.03	1.00	0.10 0.16	22.0 26.0	33.0 37.2	5.00 6.70	2.00 4.00	–	41–43
–	S32053	–	0.03	1.00	0.17 0.22	22.0 24.0	24.0 26.0	5.00 6.00	–	–	41–43
–	N08926	1.4529	0.02	2.00	0.15 0.25	19.0 21.0	24.0 26.0	6.00 7.00	0.50 1.50	–	41–43
–	S31254	1.4547	0.02	1.00	0.18 0.22	19.5 20.5	17.5 18.5	6.00 6.50	–	–	41–43
–	N08367	–	0.03	2.00	0.18 0.25	20.0 22.0	23.5 25.5	6.00 7.00	0.75	–	43–45
–	S31266	1.4659	0.03	2.00 4.00	0.35 0.60	23.0 25.0	21.0 24.0	5.20 6.20	1.00 2.50	W: 1.5–2.5	48–59
–	S31277	–	0.02	3.00	0.30 0.40	20.5 23.0	26.0 28.0	6.50 8.00	0.50 1.50	–	47–49
–	N08031	1.4562	0.02	2.00	0.15 0.25	26.0 28.0	30.0 32.0	6.00 7.00	1.00 1.40	–	48–50
–	N08354	–	0.03	1.00	0.17 0.24	22.0 24.0	34.0 36.0	7.00 8.00	–	–	48–50
–	N08935	–	0.03	1.20	0.25 0.36	26.0 28.0	34.0 36.0	6.10 7.10	0.4	–	50–53
–	S32654	1.4652	0.02	2.00 4.00	0.45 0.55	24.0 26.0	21.0 23.0	7.00 8.00	0.30 0.60	–	54–56

说明：

* 选自现行的ASTM中厚板、薄板和带钢的技术规范或企业的数据表。完整的成分要求，请向他们咨询。

** 化学成分最大值，除非标出范围或最小值。EN的化学成分与ASTM的化学成分不完全一致。

*** 根据公式 $PREN = \%Cr + 3.3(\%Mo + 0.5\%W) + 16(\%N)$ 计算出的耐点蚀当量及该牌号预期的额定化学成分。

3 冶金学

3.1 不锈钢种类

不锈钢是铬含量不低于10.5%的铁基合金，添加铬的主要作用是使其具有耐蚀性和高温性能。当含铬量达到这个水平时，钢的表面会形成一层富铬氧化层，被称为钝化层或钝化膜。它对不锈钢起保护作用，使其不会像普通钢一样生锈。不锈钢的种类很多，但所有不锈钢都要满足最低含铬量的要求。

不锈钢分为五大类：奥氏体钢、铁素体钢、双相钢(兼含铁素体和奥氏体)、马氏体钢及沉淀硬化钢。这几个类别的划分与钢的晶体结构(原子排列)及其热处理有关。金属中，具有相同晶体结构的晶体群被称为相。存在于不锈钢中的相，主要有三种：奥氏体相、铁素体相和马氏体相。通过标准的金相检测流程和

光学金相显微镜可测定不锈钢显微组织的种类和数量。

奥氏体不锈钢的特点是显微组织以奥氏体相为主。奥氏体相的晶体结构为面心立方(fcc)结构，也就是说，在立方体的顶角和立方体面的中心各有一个原子。相比之下，铁素体相的晶体结构为体心立方(bcc)结构，立方体的顶角和立方体中心各有一个原子。马氏体相的晶体结构为高应变体心四方结构(图1)。

3.1.1 奥氏体不锈钢

奥氏体不锈钢具有无磁性、屈服强度中等、加工硬化率高、抗拉强度高、塑性好、低温韧性优良的特点。与其他不锈钢不同的是，奥氏体不锈钢的韧性随温度的下降而缓

慢降低(图2)。奥氏体不锈钢没有明确的韧脆转变温度(DBTT)，因此是低温应用的理想材料。

奥氏体不锈钢具有良好的焊接性，可制成各种复杂形状。这个系列的不锈钢不能通过热处理将其硬化或强化，但可以通过冷成型或加工硬化使其强化(见ASTM A666)。奥氏体不锈钢，特别是标准奥氏体不锈钢，有一个潜在的缺点，那就是与铁素体和双相不锈钢相比，容易产生氯化物应力腐蚀裂纹。

300系或标准奥氏体不锈钢一般含有8%~11%的镍和16%~20%的铬(见表1)。标准奥氏体不锈钢的显微组织以奥氏体晶粒为主，同时含有少量(一般为1~5%)的 δ 铁素体相(图3)。因为铁素体相的存在，奥氏体不锈钢有一点铁磁性。

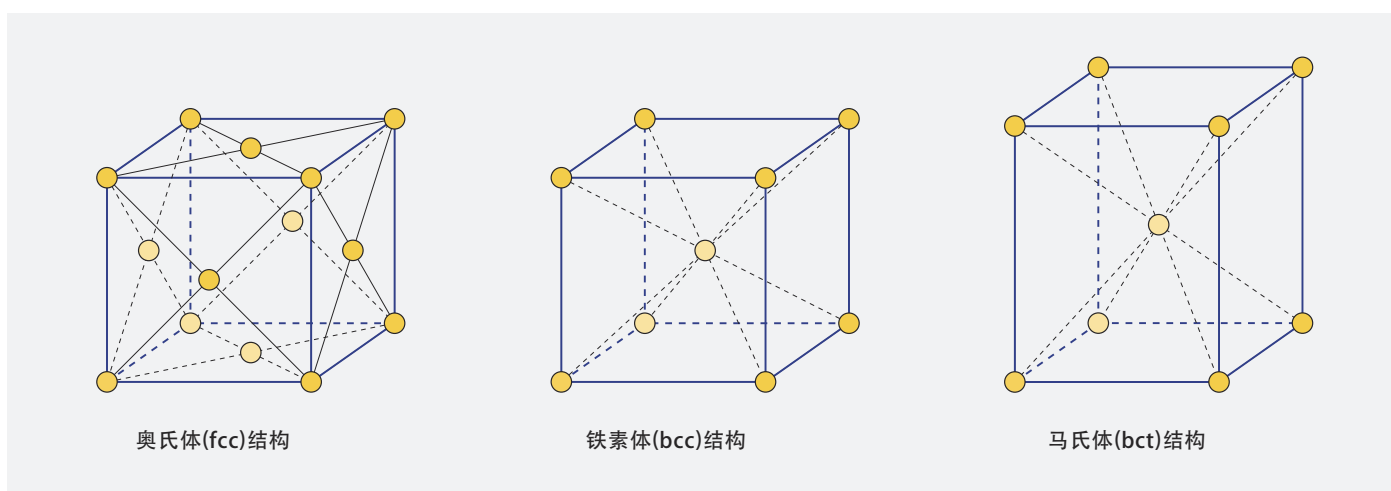


图1：奥氏体相的晶体结构为面心立方(fcc)晶格、铁素体相的晶体结构为体心立方(bcc)晶格、马氏体相的晶体结构为体心四方(bct)晶格。

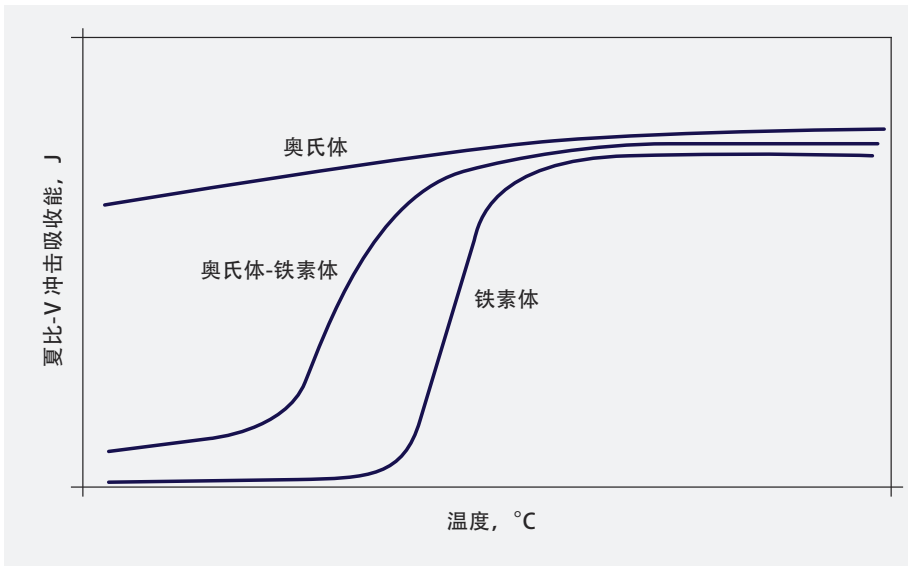


图2: 奥氏体、铁素体和双相(奥氏体-铁素体)不锈钢的韧脆转变温度(DBTT)示意图(1)。实际DBTT取决于断面厚度、化学成分和晶粒尺寸。铁素体不锈钢的DBTT一般为0至-25°C (32至-13°F)。

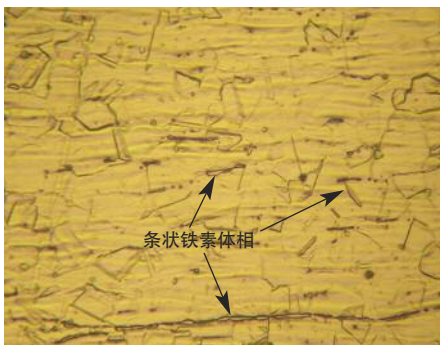


图3: 含有奥氏体晶粒和个别条状铁素体的典型304L不锈钢锻件的显微组织。
© TMR Stainless



图4: 全部由奥氏体晶粒组成的6%Mo高性能奥氏体不锈钢的显微组织。
© TMR Stainless

200系奥氏体不锈钢的Ni含量低于300系不锈钢，但锰(Mn)和N的含量较高。200系不锈钢比300系不锈钢具有更高的强度和更大的应变硬化系数。因为含镍量较低，有时，200系不锈钢被作为300系不锈钢的廉价替代品。

高性能奥氏体不锈钢的显微组织全部为奥氏体相，无铁磁性(图4)。与

标准奥氏体不锈钢相比，高性能奥氏体不锈钢含有更多的镍、铬、钼，而且都含有氮。这些钢在强酸、强碱等腐蚀性环境和包括半咸水、海水和卤水在内的氯化物含量较高的环境中具有很好的耐腐蚀性。与标准的奥氏体不锈钢相比，高性能奥氏体不锈钢的强度等级更高，耐应力腐蚀裂纹性能更好。

3.1.2 铁素体不锈钢

铁素体不锈钢的显微组织为铁素体相。铁素体不锈钢的镍含量很低，或者不含镍，具有铁磁性，不能通过热处理将其硬化。这种不锈钢的铁磁性能与碳钢相似。铁素体不锈钢强度高，耐氯化物应力腐蚀裂纹的性能比标准300系奥氏体钢种好很多。但是，它们的成型性和焊接性较差。与奥氏体不锈钢相比，它们的韧性也较差，而且会随着截面厚度的增加而降低。随着温度的下降，铁素体不锈钢会呈现出明显的韧脆性转变(图2)。受到这些因素的限制，铁素体不锈钢产品通常仅限于薄板、带钢和薄壁管材。

3.1.3 双相不锈钢

双相不锈钢是由铁素体相和奥氏体相组成，两相各占一半，双相不锈钢具有奥氏体和铁素体不锈钢的许多特性。虽然热处理不能使这种钢硬化，但它们的屈服强度一般是标准奥氏体不锈钢的两倍，而且它们的磁引力与铁素体相的体积分数成正比。与标准奥氏体不锈钢相比，这种钢的显微组织所具有的双相特性使其具有更好的耐应力腐蚀裂纹的性能。

3.1.4 马氏体不锈钢

马氏体不锈钢的显微组织以马氏体相为主，可能还夹杂有少量的二次相，如铁素体相、奥氏体相和碳化物等。马氏体不锈钢具有铁磁性，与碳钢相似。其最终硬度取决于特定的热处理。马氏体不锈钢强度高、耐磨性好、韧性差，韧脆转变

温度较高。它们很难焊接，一般需要进行焊后热处理。因此，马氏体不锈钢通常仅限于非焊接应用。马氏体不锈钢的铬含量不高，一些铬元素以碳化物的形式析出。由此造成耐蚀性较低，一般低于标准的304/304L奥氏体不锈钢。因其韧性和耐蚀性较差，马氏体不锈钢只用于对强度和硬度要求很高的应用，如餐具、紧固件和轴等。

3.1.5 沉淀硬化不锈钢

沉淀硬化(PH)不锈钢也可以通过热处理进行强化。这种不锈钢最典型的特性是通过沉淀达到强化。利用时效硬化热处理生成细小的金属间沉淀物，起到提高强度的作用。由于含铬量较高，沉淀硬化钢的耐蚀性超过马氏体钢，适用于要求良好耐蚀性能的高强度应用中。沉淀硬化钢主要用于弹簧、紧固件、飞机配件、轴、齿轮、波纹管 and 喷气发动机零件。

3.2 相组分

合金元素影响着各相的平衡关系，对奥氏体相、铁素体相和马氏体相的稳定性起着至关重要的作用。添加到不锈钢中的元素可分为铁素体相形成元素或奥氏体相形成元素。相平衡取决于钢的化学成分、退火温度和冷却速率。耐蚀性、强度、韧性、焊接性和成型性等性能都会受到相平衡的影响。

铁素体形成元素有助于铁素体相的形成，而奥氏体形成元素则促进奥氏体相的形成。表3列出了常见的铁

表3: 有助于形成铁素体相和奥氏体相的合金元素

铁素体形成元素	奥氏体形成元素
铬	镍
钼	氮
硅	碳
铌(钶)	锰
铝	铜
钛	钴
钨	

素体相和奥氏体相形成元素。不锈钢牌号及其应用决定了所需要的相

平衡。经过固溶退火，大多数标准奥氏体不锈钢都有少量铁素体相，焊接性和高温韧性得到改善。但是，如果铁素体相含量太大，则会降低耐蚀性和韧性等其它性能。高性能奥氏体不锈钢是按固溶退火状态下全部为奥氏体相设计的。

控制钢的相组分，从而控制钢的性能，需要使合金元素处于平衡状态。Schaeffler组织图(Schaeffler Diagram)(图5)反映了固态不锈钢化学成分与预期的相结构之间的关系，正如焊缝组织一样。这样，用户就可以根据给定的化学成分预测相平衡。通过化学成分计算“镍当量”和“铬当量”，并将其绘制在图

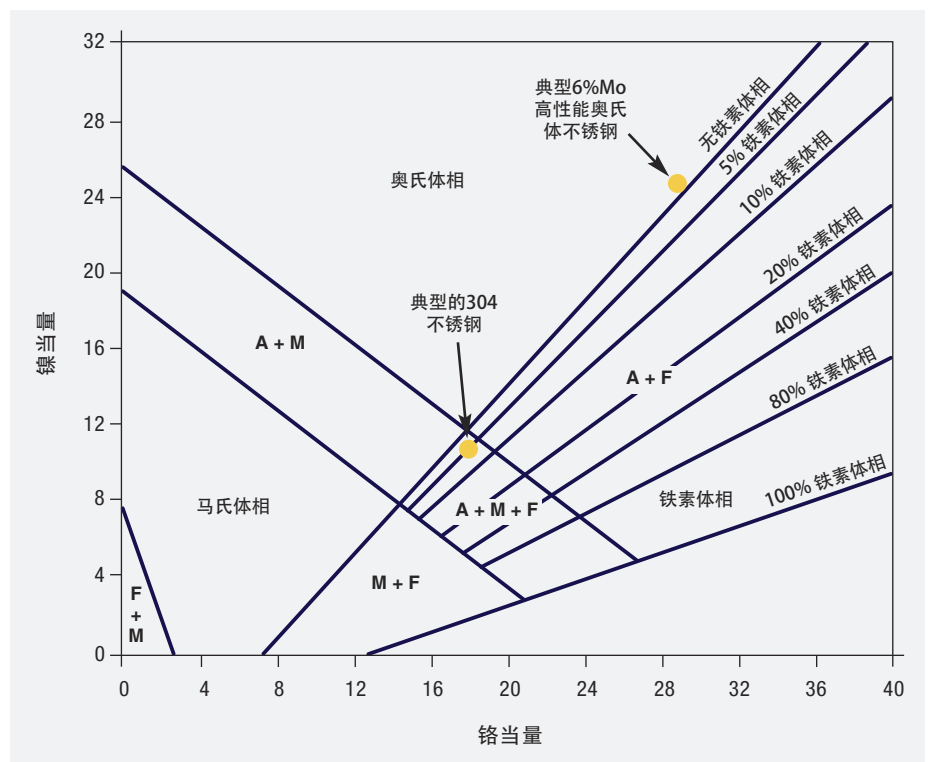


图5: Schaeffler组织图反映了化学成分对铸态焊缝金属显微组织中奥氏体相和铁素体相数量的影响(2)。

中。Schaeffler组织图常用参数的方程式如下：

$$\begin{aligned} \text{镍当量} &= \%Ni + 30\%C + \\ &\quad 0.5\%Mn + 30\%N \\ \text{铬当量} &= \%Cr + \%Mo + \\ &\quad 1.5\%Si + 0.5\%Nb \end{aligned}$$

含有约20%Cr、6%Mo、20%Ni和0.2%N的典型高性能奥氏体不锈钢位于图中的单相奥氏体相区，“无铁素体”线附近，镍当量约为24，铬当量约为26的地方。相比之下，标准不锈钢(如304)的化学成分位于只有少量铁素体相的奥氏体+铁素体(A+F)的双相区，(图5)。铁素体不锈钢在该图的铁素体相区，双相不锈钢在奥氏体+铁素体(A+F)双相区。

3.3 有害的二次相

高性能奥氏体不锈钢最理想的组织结构是奥氏体晶粒均匀排列，没有任何二次相。标准牌号的理想组织也是如此，可能出现的少量铁素体相除外。但是，在大多数情况下，这些理想状态并不是奥氏体不锈钢的平衡状态。另外，不锈钢遇到高温时，会有二次相析出，二次相通常会对钢的性能产生不良影响。因此，生产厂和加工厂必须严格控制焊接、热处理及其他加工参数，以免形成有害的二次相。所有奥氏体不锈钢都有不同程度的二次相析出。高性能奥氏体不锈钢的合金含量很高，特别容易形成二次相。因此，充分了解二次相的形成及其控制方法，对成功使用高性能奥氏体不锈钢至关重要。

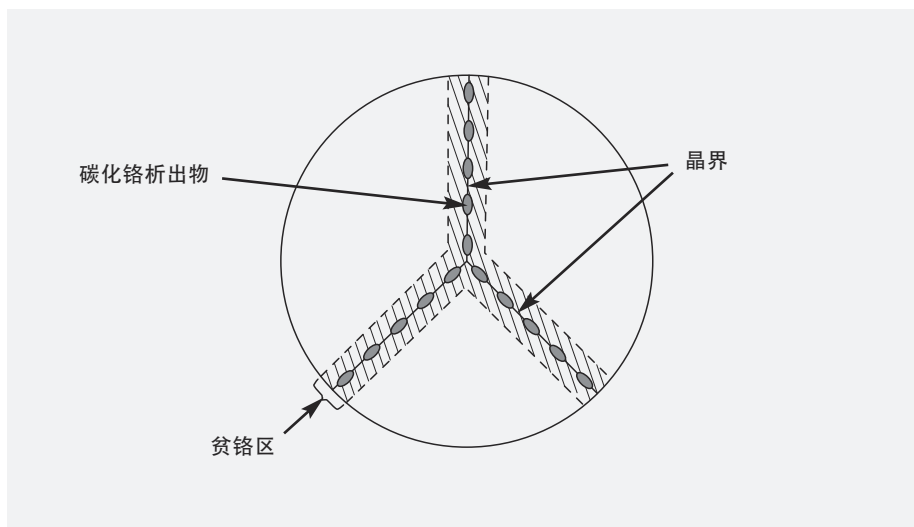


图6：奥氏体不锈钢敏化晶界示意图(3)。

不锈钢的化学成分及其热处理工艺决定了二次相的类型。对于标准的200系和300系不锈钢，二次相以碳化铬($Cr_{23}C_6$)为主。当温度在 $425^{\circ}C \sim 900^{\circ}C$ ($800^{\circ}F \sim 1650^{\circ}F$)范围内，碳化铬在奥氏体晶界处析出。大量的析出物在晶界处形成一张连续的碳化物网。为了形成碳化铬，不锈钢母材中的碳和铬相结合，并在晶界处析出(晶界更有利于碳化铬析出物成核、生长)。沿晶界的碳化物周边区域，铬含量低于母材，因此耐蚀性降低。这种现象被称为“敏化”。图6为敏化显微组织的示意图，标有晶界析出物和贫铬区。

其它二次相也有相似的现象，但涉及的温度和时间不同。影响高性能奥氏体不锈钢的两个重要的二次相是 σ 相和 χ 相。它们被称为金属间化合物，因为它们不像金属，更像化合物。除铁元素外，它们还含有

很多的铬和/或钼，呈脆性，由于周边区域的铬或钼被贫化，造成耐蚀性降低。下面的章节将讨论二次相形成的条件及控制方法。

3.3.1 二次相稳定温度

当达到或超过固溶退火温度时，碳化物和金属间化合物溶解在固溶体中。低于该温度时，根据不锈钢所含的化学成分，析出一种或多种二次相。比如说304不锈钢，当温度低于 $900^{\circ}C$ ($1650^{\circ}F$)，碳化铬开始形成。合金含量提高，形成其他二次相的可能性增大，二次相的形成温度也升高。对于一些合金含量非常高的高性能奥氏体不锈钢来说， χ 相可在 $1095^{\circ}C$ ($2000^{\circ}F$)的高温下形成。也就是说，为了优化耐蚀性，高性能奥氏体不锈钢必须在比标准牌号更高的温度下进行固溶退火，常用温度在 $1095^{\circ}C$ ($2000^{\circ}F$)以上。

3.3.2 二次相形成动力学

冷却过程中二次相形成的动力学或速率，是判断这些钢能否成功退火和焊接的一个非常重要的因素。无论什么牌号的不锈钢都需要快速冷却，避免形成二次相。为了说明冷却速率和钢种之间的关系，我们以标准304不锈钢为例，它最有可能形成的二次相是碳化铬。正如图7的晶界碳化铬开始析出的时间-温度-相变(TTT)曲线所示，当冷却到900°C(1650°F)以下时，碳化物开始形成。随着温度的下降，碳化物形成速率迅速加快，到850°C(1560°F)时，形成速率达到非常高的程度。当温度下降到850°C(1560°F)以下时，由于低温状态下铬原子扩散到晶界的速度放缓，因此碳化物的形成速度减慢，形成碳化物的起始时间推后。图7所示的时间-温度-敏化(TTS)曲线也反映了碳化铬析出导致的耐蚀性能下降。TTS曲线说明，要想不对耐蚀性能造成影响，304不锈钢必须快速冷却到远低于700°C(1300°F)。

图7所示的耐蚀性下降的时间-温度范围(TTS曲线)与碳化物析出的时间-温度范围(TTT曲线)有偏差，特别在高温段。TTT曲线和TTS曲线之间的这种差异与铬原子在高温段的扩散速率增大有关，在高温段，逆扩散将贫铬区修复，所以耐蚀性能没有下降。

图8示出了含碳量不同的几种304不锈钢的时间-温度-敏化(TTS)曲线，

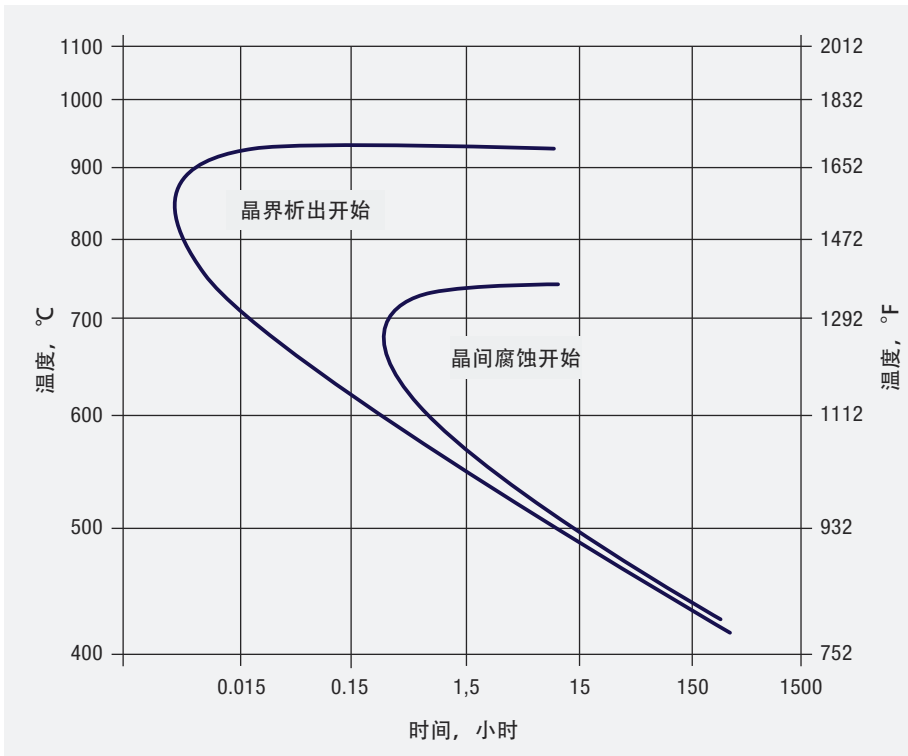


图7：304不锈钢(0.05%C)TTT曲线，示出晶界碳化物开始析出的时间和晶间腐蚀开始的TTS曲线，试验介质H₂SO₄-Cu₂SO₄。(4)

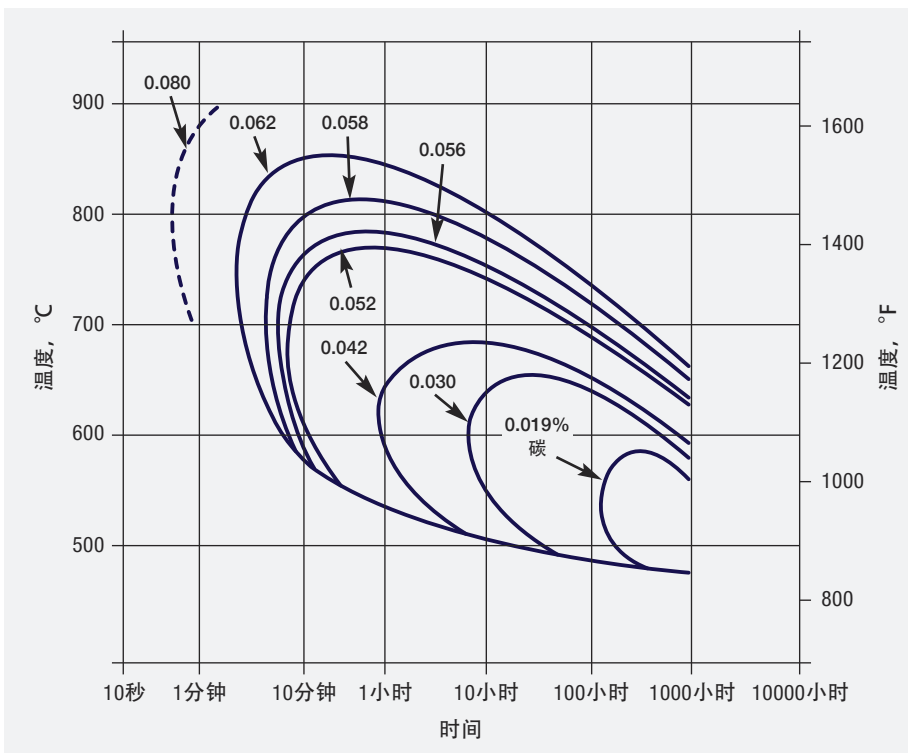


图8：含碳量不同的304不锈钢的时间-温度-敏化(TTS)图。(5)

反映了敏化的重要特性。钢的含碳量较低时，碳化铬析出速度很慢。曲线表明，在实际操作中，这些钢退火或焊接后，必须快速冷却到曲线突出部分以下，以避免敏化和由此产生局部腐蚀的危险。降低含碳量可延长冷却时间，有利于避免敏化的发生。

通过降低含碳量减少敏化已成为惯例，为此开发了“L牌号”，如201L、304L和316L，防止焊接过程中发生敏化。另一种对抗敏化的方法是用钛(Ti)或铌(Nb)作为不锈钢稳定元素。321或347都使用了这些元素，它们会优先与碳反应，生成碳化钛和碳化铌，使碳化铬析出得不到碳。在标准牌号的不锈钢中添加氮可降低碳化铬析出速率，提高抗敏化性能。

含有2%Mo和0.066%C的316不锈钢的TTT图(图9)表明，碳化铬在短短的5分钟内即可形成，但是，二次相，如 σ 相、 χ 相和Laves相，却要经过较长时间(通常为10小时或更长)才形成。相比之下，对于高性能奥氏体不锈钢 σ 相和 χ 相析出比碳化铬的影响更大。这是因为高性能奥氏体不锈钢的碳含量低，降低了碳化铬敏化的敏感性，由于其铬、钼含量高，促进了 σ 和 χ 金属间相快速形成。图10所示的6%Mo高性能奥氏体不锈钢的TTS图表示了 σ 相和 χ 相开始晶界析出，以及50%的晶界析出所需的时间和温度。

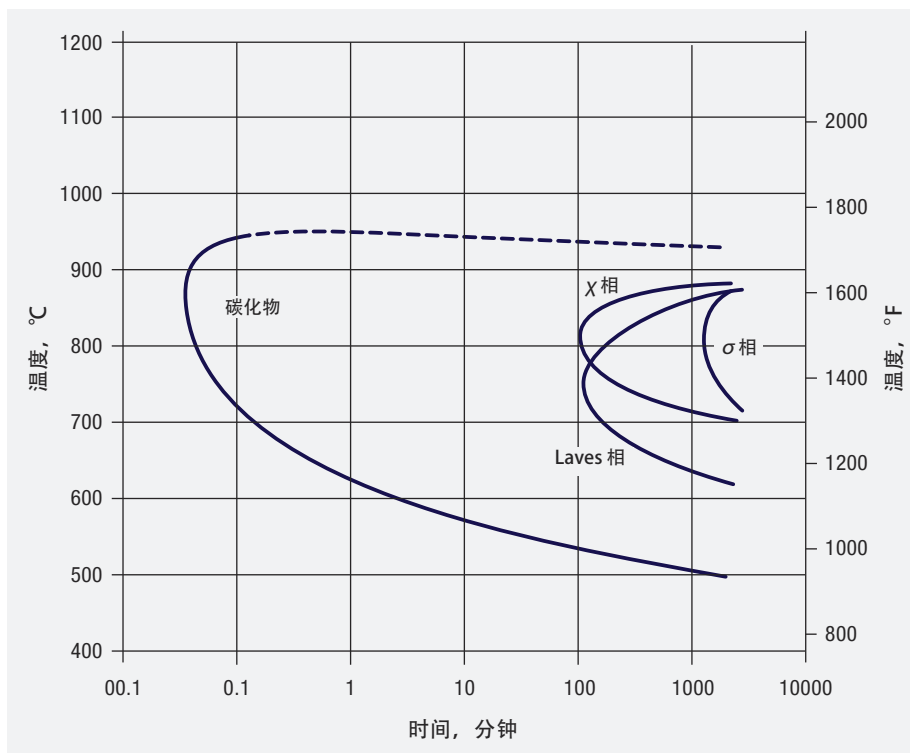


图9: 316不锈钢(碳含量0.066%)的TTT图。这个标准牌号的要经过很长时间才形成二次相(χ 相、 σ 相和Laves相)。(6)

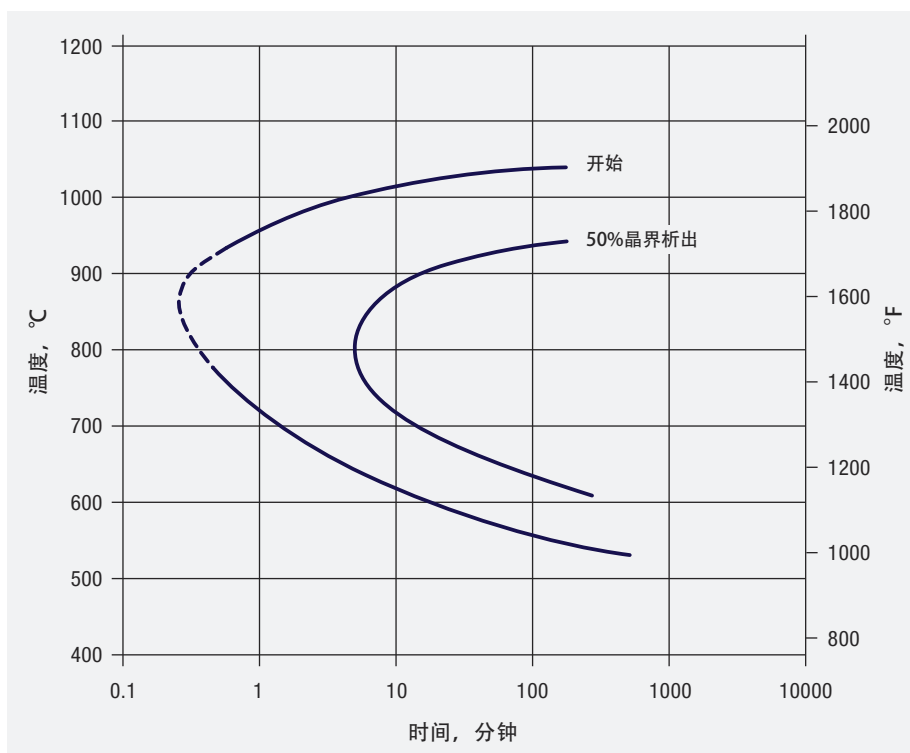


图10: 6%Mo不锈钢S31254的TTS图，在28°C(82°F)的3M HClO4 + 1M HCl溶液中电解腐蚀后出现晶界浸蚀沟。(7)

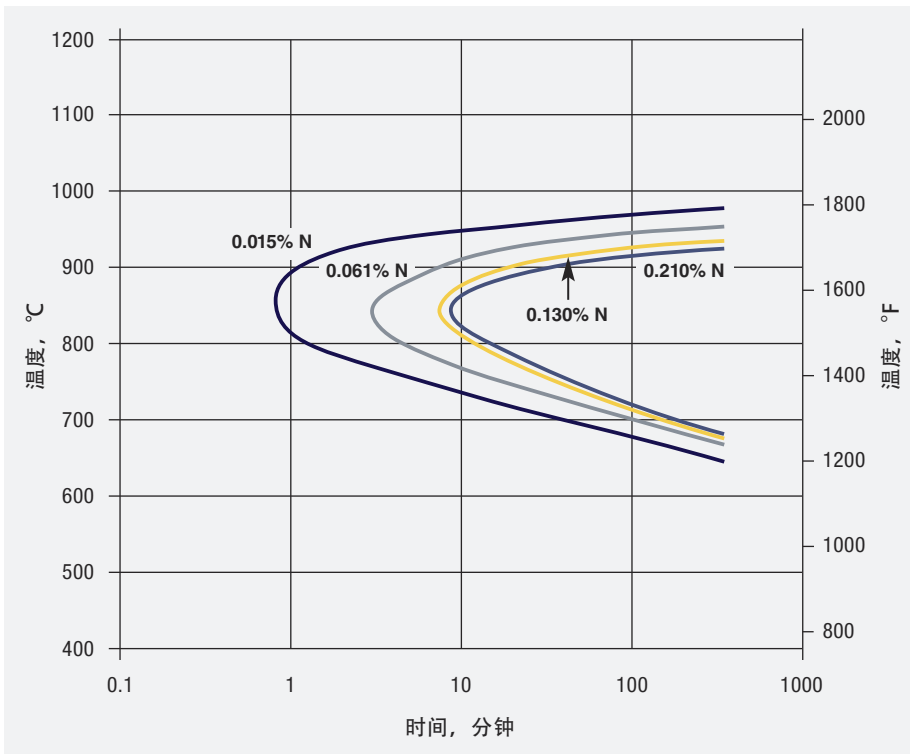


图11: 氮对草酸浸蚀904L不锈钢敏化动力学的TTS影响。(8)

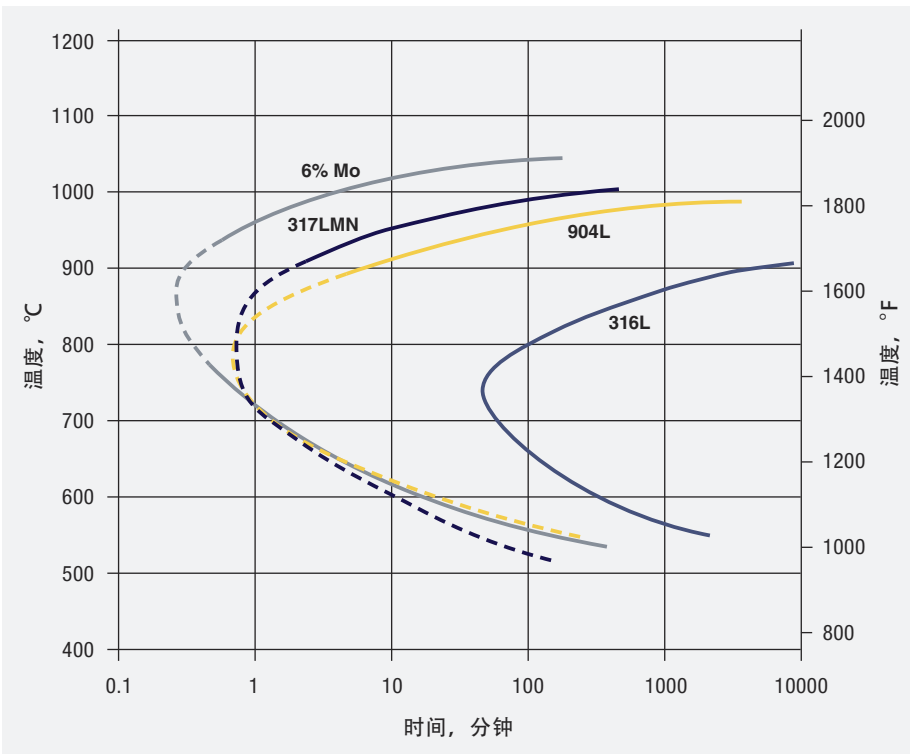


图12: 钼、氮含量不同的几种商用奥氏体不锈钢的TTS图。图中的316L是含0.021%C和2.6%Mo的衍生牌号, 6%Mo不锈钢与图10相同。(7)

前面已提到, 氮可延缓这些相的形成。它还降低了最大析出温度, 并减少了组织中金属间化合物的数量(8)。氮的作用见图11。从图中可以看出, 在904L基不锈钢中添加0.015%-0.210%的氮, 以确定氮含量对敏化动力学的影响。随着氮含量的增加, 二次相析出延迟, 可以考虑降低退火或焊后冷却速度, 减少敏化风险。

当高合金化高性能奥氏体不锈钢中的铬、钼含量增至很高时, 形成金属间相的时间进一步缩短。添加氮有帮助作用, 但即使氮含量高达0.20%-0.50%, 也不能将析出的开始时间推迟到我们希望的10分钟或更长。为阐明这一点, 图12显示了几种商用合金的典型TTS曲线, 这些曲线是利用电解浸蚀技术开发的(7)。增加高合金不锈钢中的钼含量加速了金属间相析出的开始, 提高了最高析出温度, 延缓了氮化物相的析出(8)。如图12所示, 大多数高合金化不锈钢在不到一分钟的时间内就可以形成金属间相。很明显, 这类合金在焊接过程中需要限制截面尺寸和热量输入, 并控制好快速冷却, 以避免二次相的形成。

4 合金元素的作用

化学成分对钢的金相组织、机械性能、物理性能和耐蚀性能的影响很大。不管是有意添加的，还是炼钢时无意带入的合金元素，都会对这些性能产生影响。

铬、钼、镍等合金元素在晶格中位于替换位置。即：它们替换奥氏体晶格顶角和立方体六面中心的铁。碳和氮由于体积小，位于晶格原子之间的空隙(间隙位置)。它们在晶格中产生巨大的应变，因此，成为有效的硬化元素。合金元素对钢的性能产生不同的影响，有时是有益的，有时是有害的。选择某个钢的成分或钢种经常需要设计师或材料工程师牺牲一部分某种性能来换取另一种性能的最大化。在下面的章节中将介绍奥氏体不锈钢的重要合金元素所具有的功能。

4.1 铬(Cr)

铬是一种可以使不锈钢“不生锈”的合金元素。至少需要添加10.5%的铬，才可以形成不锈钢所特有的表面钝化膜。该钝化膜可以使不锈钢有效地抵御腐蚀性水质、多种酸溶液以及强氧化性高温气体的侵蚀。当铬含量超过10.5%的阈值时，面对各种环境的耐蚀性都有所增强。因此，很多牌号的铬含量远远高于这个值。比如说，304不锈钢的铬含量为18%，高性能奥氏体不锈钢的铬含量高达20%-28%。

4.2 镍(Ni)

镍的主要作用是形成并稳定奥氏体相。如果没有8%Ni，304就不会成为奥氏体不锈钢，也不具备奥氏体应有的机械性能。那样的话，它就是强度和韧性不在同一级别的铁素体不锈钢。当更多的铬或其他铁素体形成元素添加到钢中时，需要增加镍保持奥氏体结构。高性能奥氏体不锈钢含有高铬和高钼，镍含量要达到20%左右才能保证奥氏体结构。镍可以改善对某些还原性酸的耐蚀性，镍含量大于约20%时，提高了耐应力腐蚀断裂性能。镍还可以降低冷变形过程中的加工硬化率，因此，用于深冲、旋压和冷弯的合金的镍含量普遍较高。

4.3 钼(Mo)

钼可以提高钢在氯化物环境中的抗点蚀和缝隙腐蚀性能。在钼与铬，特别是氮的共同作用下，钢在这些环境中的性能得到改善。这种协同作用使高性能奥氏体不锈钢具有很强的耐点蚀和缝隙腐蚀性能。钼还可提高钢在盐酸和稀硫酸等还原性环境中的耐蚀性。奥氏体不锈钢的最低钼含量为2%左右，比如316不锈钢。合金含量最高的高性能奥氏体不锈钢的钼含量高达7.5%。

钼有助于铁素体相的形成，会对相平衡产生影响。它参与几种有害二

次相的形成，而且会形成不稳定的高温氧化物，对耐高温氧化性能产生不利影响。在使用含钼不锈钢时必须考虑到这些因素。

4.4 碳(C)

碳对奥氏体相起到稳定和强化作用，所以，对于锅炉管等高温环境使用的不锈钢，碳是有用的合金元素。除此之外，碳没有其他的有用功能，而且在某些情况(如前所述)下，会对耐蚀性能产生不利影响。大多数奥氏体不锈钢的碳含量通常都限定在实际可达到的最低水平。用于焊接的标准低碳牌号(304L、201L和316L)的碳含量限制在0.030%。一些高合金高性能牌号的碳含量甚至限制在0.020%。

4.5 氮(N)

氮对奥氏体相起到稳定和强化的作用，并且可以减缓二次相的形成。标准牌号和高性能奥氏体不锈钢都含有氮。在低碳标准牌号(L钢)中，添加少量的氮(最高0.1%)可以补偿由于碳含量低而导致的强度损失。无论是标准牌号还是高性能奥氏体不锈钢，氮可以提供强度，减缓碳化物敏化和二次相形成。氮还有助于提高耐氯化物点蚀和耐缝隙腐蚀性能，所以，有些耐蚀性最好的高性能奥氏体不锈钢的氮含量高达0.5%。



奥氏体不锈钢广泛应用于制药行业。© iStock.com/4X-image

4.6 锰(Mn)

钢厂用锰进行钢水脱氧，所以，所有的不锈钢中都残存少量的锰。锰也可以稳定奥氏体相，提高氮在不锈钢中的溶解度。因此，用锰替代200系不锈钢中的一些镍，增加氮含量，提高强度和耐蚀性能。有些高性能奥氏体不锈钢中添加锰也是为了达到同样的效果。

4.7 铜(Cu)

铜可提高不锈钢在还原性酸中的耐蚀性能，例如某些硫酸和磷酸的混合溶液。铜作为一种合金元素添加在一些专门用于这些环境的高性能奥氏体不锈钢中。

4.8 硅(Si)

总的来说，硅是奥氏体不锈钢的有益元素，因为它可以提高钢在浓酸环境和高度氧化环境中的耐蚀性能。有报道称，UNS S30600等高硅特种不锈钢具有很好的耐点蚀性能。硅和锰一样，也可用于钢水脱氧，因此，钢中总会残留少量含有硅、锰和其他脱氧元素的氧化物杂质。如果夹杂物数量太多，会对产品的表面质量和抛光性产生不利影响。

4.9 铌(Nb)和钛(Ti)

这两种元素是非常有效的碳化物形成元素，具有降低碳含量，减轻敏

化的作用。碳化铌和碳化钛可以提高高温强度。含有Nb和Ti的347和321常用于锅炉和精炼设备，满足高温强度和焊接性的要求。它们还用于一些脱氧工艺，因此，有时会残留在高性能奥氏体不锈钢中。

4.10 硫(S)和磷(P)

硫对不锈钢性能的影响利弊参半。最重要的有益作用是提高机械加工性；主要危害是降低热加工性，增加硫化锰杂质的数量，导致不锈钢耐点蚀性能降低。高性能奥氏体不锈钢本身就很难进行热加工，因此，硫含量尽可能控制在最低水平，约0.001%。通常情况下，硫不会作为合金元素添加到高性能奥氏体不锈钢中。但是，标准牌号不锈钢的硫含量普遍较高(0.005%~0.017%)，目的是提高自熔焊的焊缝熔深，改善机械加工性。

磷是一种有害元素，会对锻造和热轧的热加工性产生不利影响。焊后冷却过程中，它还会增加热裂的发生几率。因此，磷含量总是被控制在可实现的最低水平。

5 机械性能和物理性能

奥氏体不锈钢强度高、韧性好。奥氏体不锈钢的强度来自于置换型合金元素和填隙原子氮和碳的固溶强化。奥氏体不锈钢不能通过热处理将其硬化或强化；如果需要提高强度，只能通过冷加工实现。奥氏体不锈钢的加工硬化系数较高，而且加工硬化速率高，因此冷加工可以大大提高其强度。奥氏体不锈钢具有很好的成型性，在断裂前可吸收大量的能量。这种合金在低温和高温情况下都具有良好的机械性能。

5.1 强度

表4总结了标准奥氏体和高性能奥氏体不锈钢的常温机械性能。与300系标准奥氏体不锈钢相比，200系和高性能奥氏体不锈钢具有更高的屈服强度和抗拉强度，这在很大程度上是由于氮和碳的固溶强化作用所致，还跟钼、镍和铬等置换型元素合金化程度高有直接关系。图13说明了氮合金化如何提高这些钢的强度。比如说，当含氮量从常规的0.05%增加到0.20%时，屈服强度从270Mpa(39ksi)提高到了340Mpa(49ksi)。这对材料规范中强度的最低限值影响很大。比如说，ASTM A240要求304L(约0.05%N)屈服强度的最低限值为170Mpa(25ksi)，304N(0.15% N)屈服强度的最低限值为240Mpa(35ksi)。高性能奥氏体不锈钢则

更高，比如说，S31254(0.20%N)屈服强度的最低限值为310Mpa(45ksi)，S31266(0.50% N)屈服强度的最低限值为420Mpa(61ksi)。

因为奥氏体不锈钢不能通过热处理进行硬化，所以通常的处理方式是固溶退火。如果需要更高的强度，有些钢厂可提供冷压延产品。成型、旋压、型锻、冷拔等冷加工工艺可以大幅提高强度。加工硬化率高会增加某些成型操作的难度，工件的断面尺寸要符合设备的功率要求。有时还需要通过中间退火软化

不锈钢，才能进行进一步的成型加工。如果切削刀具造成工件表面硬化，加工硬化速率高会带来机加工方面的问题。因此，对奥氏体不锈钢进行机加工时，建议放慢切削速度，加大切削深度。冷加工对300系、200系和高性能奥氏体不锈钢的强度影响见图14。

冷加工提高的强度只能在中等温度下保持，在高温下无法持续。因此，经过冷加工的材料在退火或焊接后不能继续保持其原有的强度。

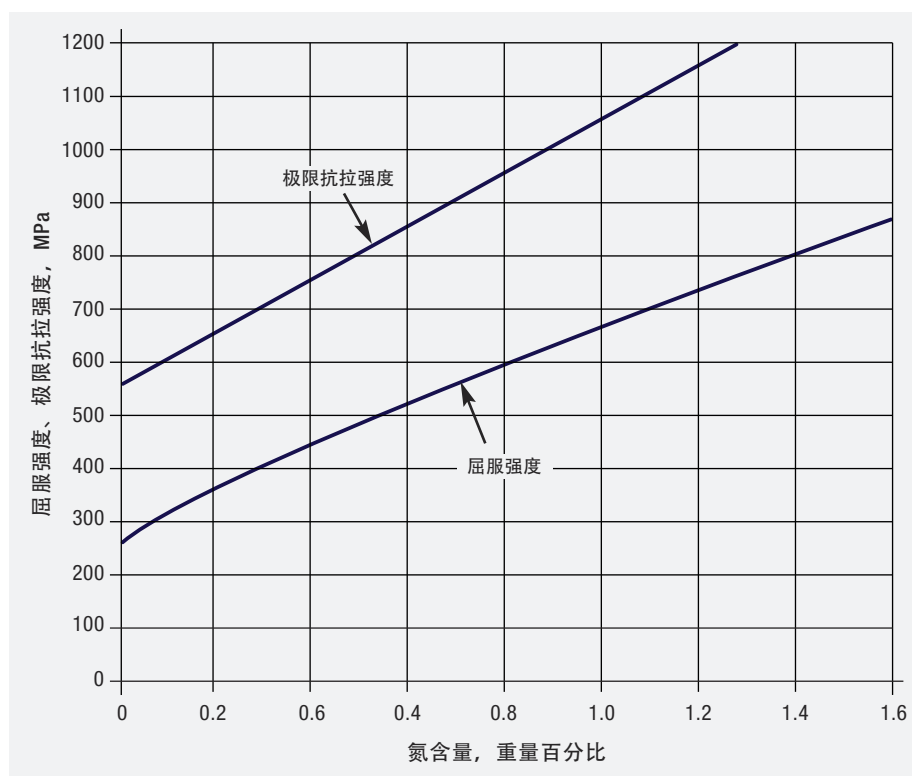


图13: 氮对奥氏体不锈钢强度的影响。(9)

表4：标准300系和200系奥氏体不锈钢和高性能奥氏体不锈钢机械性能的最低限值

牌号	UNS No.	EN No.	屈服强度0.2%		抗拉强度		延伸率(2")	最大硬度	
			MPa	ksi	MPa	ksi		%	布氏硬度
标准奥氏体不锈钢 – 300系									
304	S30400	1.4301	205	30	515	75	40	201	92
304L	S30403	1.4307	170	25	485	70	40	201	92
321	S32100	1.4541	205	30	515	75	40	217	95
347	S34700	1.4550	205	30	515	75	40	201	92
316L	S31603	1.4404	170	25	485	70	40	217	95
317L	S31703	1.4438	205	30	515	75	40	217	95
标准奥氏体不锈钢 – 200系									
201	S20100	1.4372	260	38	515	75	40	217	95
201L	S20103	–	260	38	655	95	40	217	95
201LN	S20153	–	310	45	655	95	45	241	100
高性能奥氏体不锈钢									
Alloy 20	N08020	2.4660	240	35	550	80	30	217	95
317LM	S31725	–	205	30	515	75	40	217	95
317LMN	S31726	1.4439	240	35	550	80	40	223	96
904L	N08904	1.4539	220	31	490	71	35	–	90
–	S31727	–	245	36	550	80	35	217	–
–	N08028	1.4563	500	73	214	31	40	–	90
–	S34565	1.4565	415	60	795	115	35	241	100
–	N08026	–	241	35	551	80	30	217	95
–	S32053	–	295	43	640	93	40	217	96
–	N08926	1.4529	295	43	650	94	35	–	–
–	S31254	1.4547	310	45	655	95	35	223	96
–	N08367	–	310	45	655	95	30	241	–
–	S31266	1.4659	420	61	750	109	35	–	–
–	S31277		360	52	770	112	40	–	–
–	N08031	1.4562	276	40	650	94	40	–	–
–	N08354		295	43	640	93	40	217	96
–	N08935	–	425	62	750	109	35	–	–
–	S32654	1.4652	430	62	750	109	40	250	–

说明：这些机械性能对应的是按照UNS生产的ASTM牌号。第二列中的欧标牌号与之类似，但可能不完全相同。满足一种规范(如：ASTM)要求的材料，不一定满足其它规范(如：EN或JIS)对类似材料的要求。

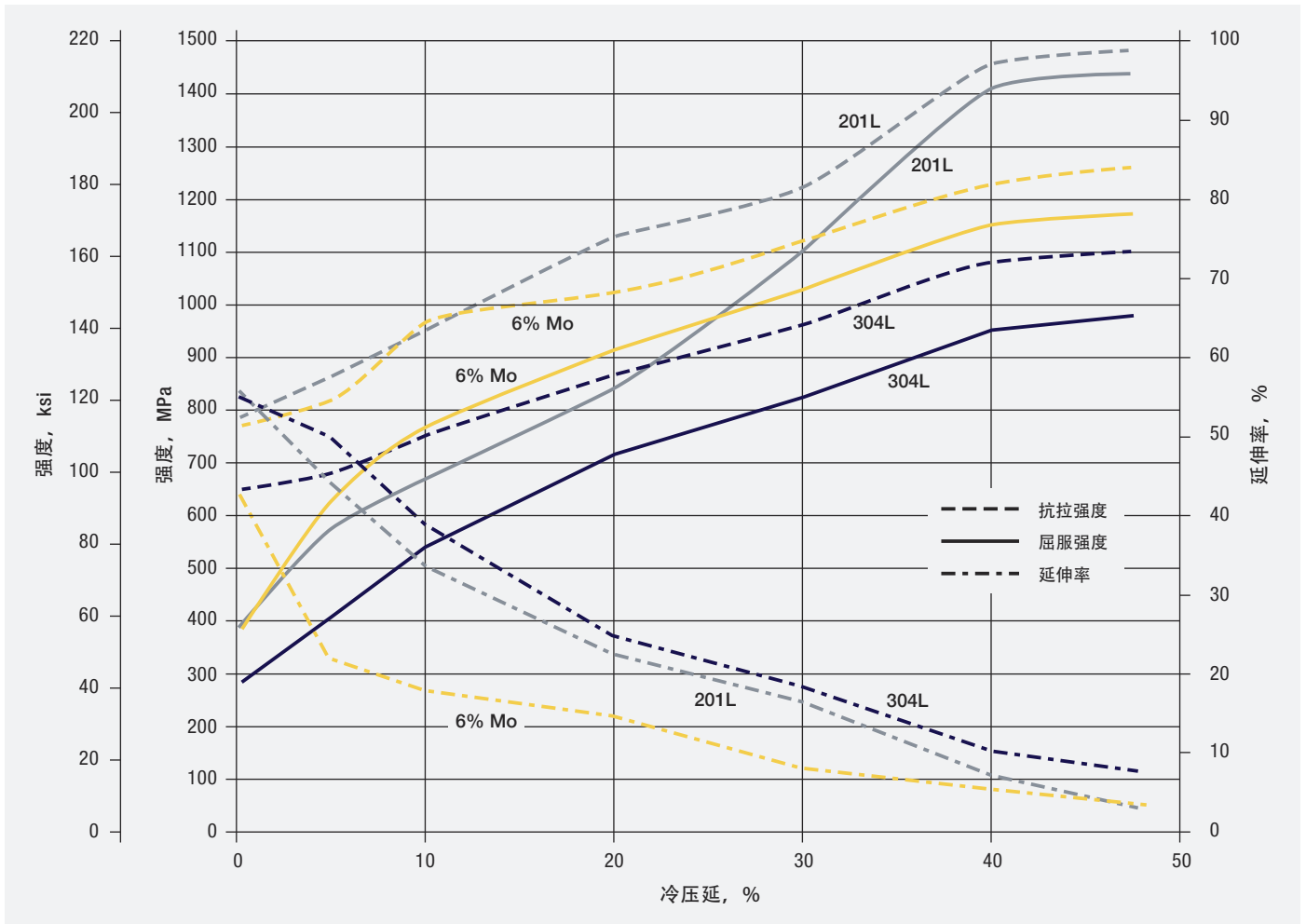


图14: 冷加工对201L、304L和6% Mo高性能奥氏体不锈钢N08367的强度和塑性的影响。

5.2 延展性和韧性

奥氏体不锈钢具有很好的延展性，其延伸率在60%~70%之间，远远高于规定的最低限值。一些合金通过添加氮元素提高强度，这样做不会降低延展性。奥氏体相的面心立方晶体结构提供了良好的延展性，所以，环境温度和低于环境温度的韧性也非常好。奥氏体不锈钢与碳钢和其他材料的不同之处在于，低温环境下，它们不会出现明显的延-脆转变，可以在低温环境使用。

虽然冷加工会降低延展性和韧性，但延展性减弱需要缓慢的过程，因此，冷加工率20%的奥氏体不锈钢仍然会有15%或更高的延伸率(图14)。冷加工提高了退火材料的位错密度，使延展性降低。退火则是通过复原和再结晶来消除冷加工的影响，降低强度，并将延展性和韧性恢复到高位。

5.3 高温强度

奥氏体不锈钢具有良好的高温强

度。大多数标准奥氏体不锈钢都被核准用于压力容器。ASME(美国机械工程师协会)压力容器规范给出了高达427°C(800°F)温度下的允许设计值。在不考虑压力的炉子应用中，标准和一些特殊耐热不锈钢可用于1100°C(2010°F)。高性能奥氏体不锈钢主要用于耐腐蚀环境，它们在常温下胜过标准牌号的强度优势，在高温环境依然没有改变。例如，ASME规范规定，温度为427°C(800°F)时，高性能奥氏体不锈钢N08367的许用应力为

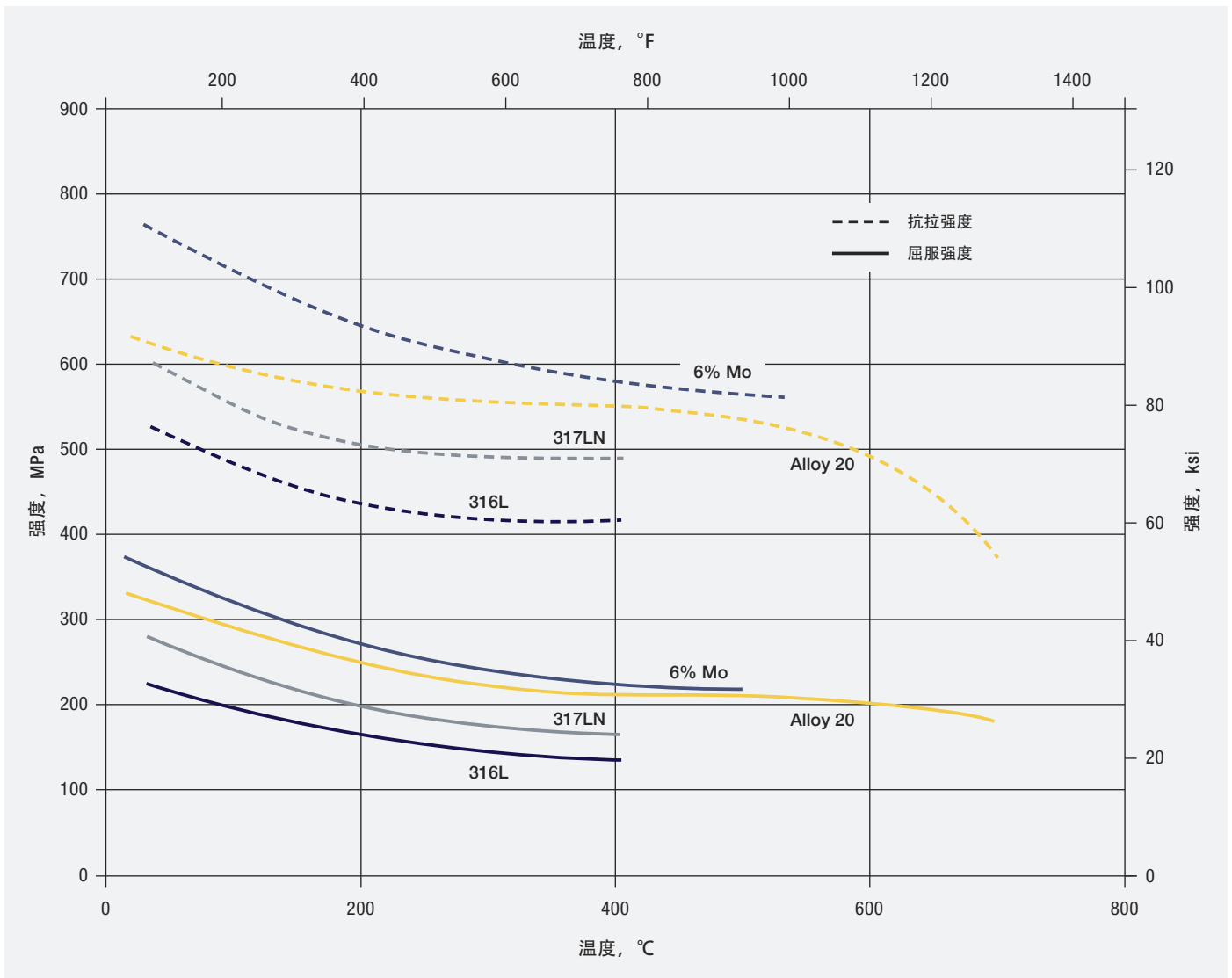


图15：三种高性能奥氏体不锈钢(Alloy20, 317LN和UNS N08367)和316L不锈钢的高温强度对比(10)

18ksi(124MPa)，316不锈钢为9.6ksi(66MPa)。图15是316不锈钢和三种高性能奥氏体不锈钢的高温强度参数的对比。

除了具有良好的高温强度，奥氏体不锈钢还有一个优点，那就是温度高于300°C(570°F)时，它们不会像铁素体和双相不锈钢那样形成 α' 脆化相。但是，高性能奥氏体不锈钢

在500°C-1050°C(930°F-1925°F)之间会形成 χ 和 σ 脆化相。

良好的高温强度会对加工制作产生正、负双向影响。当成品工件进行退火处理时，高强度可防止工件在重力作用下变形。但是，如果工件发生变形，比如说在焊接过程中，高强度会使工件更难矫直。如前所述，高强度合金可能会超出现有成

型设备的加工能力，所以，断面尺寸受到成型设备的限制。

5.4 物理性能

奥氏体不锈钢的物理性能基本相同。与碳钢相比，它们的杨氏模量略低，热膨胀系数(CTE)较高，导热性较差。表5和表6汇总了奥氏体不锈钢物理性能的详细参数。

表5：标准奥氏体和高性能奥氏体不锈钢的常温物理性能

牌号	UNS No.	密度		比热		电阻率		杨氏模量	
		g/cm ³	lb/in ³	J/kg·K	Btu/lb/°F	Ω·mm ² /m	micro Ω in	GPa	10 ⁶ psi
代表性标准牌号 – 300系									
304L	S30403	8.03	0.290	500	0.120	0.72	28.3	193	28.0
321	S32100	7.89	0.285	500	0.120	0.72	28.3	193	28.0
347	S34700	7.97	0.288	500	0.120	0.73	28.7	200	29.0
316L	S31603	7.95	0.287	469	0.112	0.74	29.1	193	28.0
317L	S31703	7.95	0.287	460	0.110	0.79	31.1	200	29.0
代表性标准牌号 – 200系									
201	S20100	7.86	0.284	502	0.120	0.67	26.4	207	30.0
高性能奥氏体不锈钢									
Alloy 20	N08020	8.08	0.292	502	0.120	1.08	42.5	193	28.0
Alloy 825*	N08825	8.14	0.294	440	0.015	1.13	44.5	193	28.0
317LM	S31725	7.95	0.287	460	0.110	0.79	31.1	200	29.0
317LMN	S31726	8.02	0.290	502	0.112	0.85	33.5	200	29.0
904L	N08904	7.95	0.287	461	0.110	0.95	37.4	190	28.0
–	S31727	8.02	0.290	460	0.109	0.86	33.9	203	29.4
–	N08028	8.00	0.290	460	0.109	0.99	39.0	105	28.3
–	S34565	8.00	0.290	510	0.122	0.92	36.2	190	28.0
–	N08026	8.13	0.294	461	0.110	1.08	42.5	186	27.0
–	S32053	8.06	0.291	460	0.109	0.93	36.6	188	27.3
–	N08926	8.15	0.294	461	0.110	0.88	34.6	192	27.8
–	S31254	7.95	0.287	498	0.119	0.85	33.5	200	29.0
–	N08367	8.06	0.291	461	0.110	0.89	35.0	195	28.2
–	S31266	8.20	0.297	450	0.113	1.00	39.4	195	28.3
–	S31277	8.02	0.289	454	0.109	1.00	39.4	191	27.7
–	N08031	8.03	0.290	440	0.105	1.00	39.4	195	28.3
–	N08354	8.16	0.295	440	0.105	1.03	40.6	193	28.0
–	N08935	8.06	0.291	450	0.110	1.05	41.3	192	27.8
–	S32654	8.00	0.290	510	0.122	0.78	30.7	188	27.6

* Alloy825是镍基合金，不是不锈钢

表6：标准和高性能奥氏体不锈钢在常温和高温条件下的物理性能

牌号	UNS No.	20°C (68°F)	100°C (212°F)	200°C (392°F)	300°C (572°F)	400°C (754°F)	500°C (932°F)
杨氏模量, GPa(10 ⁶ psi)							
201	S20100	200 (29.0)	194 (28.1)	186 (27.0)	179 (26.0)	172 (24.9)	165 (23.9)
304	S30400	193 (28.0)	193 (28.0)	193 (28.0)	187 (27.1)	183 (26.5)	179 (26.0)
321	S32100	193 (28.0)	193 (28.0)	193 (28.0)	188 (27.3)	183 (26.5)	178 (25.8)
316L	S31603	200 (29.0)	194 (28.1)	185 (26.8)	177 (25.7)	169 (24.5)	160 (23.2)
317LMN	S31726	200 (29.0)	194 (28.1)	186 (27.0)	179 (26.0)	171 (24.8)	163 (23.6)
–	S34565	193 (28.0)	187 (27.1)	180 (26.1)	173 (25.1)	165 (23.9)	157 (22.9)
–	N08926	193 (28.0)	186 (27.0)	179 (26.0)	173 (25.1)	168 (24.4)	162 (23.6)
–	S32053	188 (27.3)	184 (26.7)	178 (25.8)	172 (24.9)	165 (23.9)	–
–	N08367	195 (28.3)	189 (27.4)	180 (26.1)	172 (24.9)	163 (23.6)	158 (23.0)
–	S31266	190 (27.6)	185 (26.8)	179 (26.0)	174 (25.2)	166 (24.1)	158 (23.0)
–	N08354	198 (28.7)	194 (28.1)	189 (27.4)	183 (26.5)	177 (25.7)	172 (24.9)
–	N08935	192 (27.8)	187 (27.1)	180 (26.1)	174 (25.2)	168 (24.4)	161 (23.4)
–	S32654	189 (27.4)	184 (26.7)	177 (25.7)	170 (24.7)	163 (23.6)	–
平均热膨胀系数 - 温度20°C(68°F)至T - 10 ⁻⁶ /K(10 ⁻⁶ /°F)							
304	S30400	–	16.6 (9.20)	16.9 (9.40)	17.4 (9.65)	17.6 (9.75)	18.0 (10.00)
321	S32100	–	16.0 (8.89)	16.5 (9.17)	17.0 (9.44)	17.5 (9.72)	18.0 (10.00)
316L	S31603	–	16.5 (9.17)	16.9 (9.38)	17.3 (9.61)	17.6 (9.78)	18.0 (10.00)
201	S20100	–	16.6 (9.20)				
Alloy 20	N08020	–	14.9 (8.27)	15.2 (8.44)	15.5 (8.61)	15.9 (8.83)	16.1 (8.94)
317LMN	S31726	–	16.6 (9.22)	17.2 (9.55)	17.8 (9.89)	18.5 (10.30)	
904L	N08904	–	15.3 (8.50)	15.7 (8.72)	16.1 (8.94)	16.5 (9.17)	16.9 (9.39)
–	S31727	–	15.9 (8.83)	16.4 (9.11)	16.7 (9.28)	17.0 (9.44)	17.2 (9.55)
–	S34565	–	14.5 (8.00)	15.5 (8.60)	16.3 (9.00)	16.8 (9.30)	17.2 (9.50)
–	N08026	–	14.8 (8.22)	14.9 (8.29)	15.3 (8.52)	15.7 (8.73)	16.0 (8.89)
–	S32053	–	14.5 (8.00)	15.0 (8.28)	15.4 (8.55)	15.8 (8.78)	
–	N08926	–	15.0 (8.33)	15.7 (8.72)	16.1 (8.94)	16.4 (9.11)	16.7 (9.28)
–	S31254	–	16.5 (9.17)	17.0 (9.44)	17.5 (9.72)	18.0 (10.00)	18.0 (10.00)
–	N08367	–	15.3 (8.50)	15.5 (8.60)	15.7 (8.80)	16.0 (8.90)	16.0 (8.90)
–	S31266	–	15.0 (8.33)	15.5 (8.61)	16.0 (8.90)	16.3 (9.06)	16.5 (9.17)
–	N08354	–	14.1 (7.83)	14.6 (8.11)	14.8 (8.22)	15.1 (8.40)	15.4 (8.55)
–	N08935*	–	14.1 (7.81)	14.7 (8.15)	15.1 (8.37)	15.4 (8.56)	15.7 (8.71)
–	S32654	–	15.0 (8.33)	15.4 (8.55)	15.8 (8.78)	16.2 (9.00)	–

表6(续)：标准和高性能奥氏体不锈钢在常温和高温条件下的物理性能

牌号	UNS No.	20°C (68°F)	100°C (212°F)	200°C (392°F)	300°C (572°F)	400°C (752°F)	500°C (932°F)
导热率 - W/m·K (Btu in/hr ft ² °F)							
304	S30400	14.6 (100)	16.2 (112)	17.0 (117)	19.6 (135)	20.3 (140)	21.4 (148)
316L	S31603	14.0 (97)	14.9 (103)	16.0 (111)	17.3 (120)	18.6 (129)	19.9 (138)
317LMN	S31726	14.0 (97)	14.4 (100)	–	–	–	–
201	S20100	15 (104)	16.2 (112)	–	–	–	21.4 (148)
Alloy 20	N08020	11.6 (81)	13.1 (91)	15.0 (104)	16.6 (115)	18.2 (126)	19.6 (136)
904L	N08904	11.5 (80)	13.1 (91)	15.1 (105)	–	–	–
–	S31727	12.5 (87)	14.1 (98)	16.2 (112)	18.2 (126)	19.9 (138)	21.8 (151)
–	S34565	14.5 (101)	14.5 (101)	–	–	–	–
–	N08026	11.6 (81)	13.1 (91)	15.0 (104)	16.6 (115)	18.2 (126)	19.6(136)
–	S32053	11.6 (81)	12.5 (87)	14.4 (100)	16.1 (112)	17.6 (122)	–
–	N08926	12.0 (83)	12.9 (89)	14.4 (100)	16.5 (114)	18.5 (128)	20.1 (139)
–	S31254	13.4 (92)	14.5 (100)	15.9 (110)	17.3 (119)	18.7 (129)	20.2 (139)
–	N08367	11.5 (80)	13.0 (90)	15.1 (105)	17.2 (120)	19.3 (134)	21.2 (147)
–	S31266	12.0 (83)	–	13.0 (90)	–	14.0 (97)	–
–	N08354	11.3 (78)	13.2 (91)	15.3 (106)	17.6 (122)	19.1 (132)	20.8 (144)
–	N08935	10.1 (70)**	11.8 (82)	13.7 (95)	15.4 (107)	17.2 (119)	18.7 (130)
–	S32654	8.6 (59)	9.8 (68)	11.3 (78)	12.6 (87)	14.5 (100)	–

* 温度30°C(86°F)至T
 ** 检测温度23°C(73°F)

6 耐蚀性

虽然标准牌号不锈钢的耐蚀性可以满足很多环境的需求，但高性能奥氏体不锈钢的耐蚀性是所有不锈钢中最强的。每一种高性能奥氏体不锈钢有不同的特性，但是，它们在应对均匀腐蚀、点蚀和缝隙腐蚀，以及应力腐蚀开裂这三种主要腐蚀行为时，均有出色表现。

所有不锈钢的耐蚀性均取决于表面那层非常薄的氧化铬膜，即钝化膜。要想使不锈钢在所处环境中耐侵蚀，钝化膜必须为不锈钢提供稳定的环境屏障。一旦钝化膜被划伤或损坏，必须快速修复或重新钝化。高性能奥氏体不锈钢含较高的铬和钼，提高了钝化膜的保护性能，所以，它们的耐蚀性更强。钝化膜可以保护不锈钢免遭锈蚀，但是，在苛刻的环境下钝化膜会受损。钝化膜大面积受损会导致均匀腐蚀。钝化膜局部受损会导致点蚀等局部腐蚀。由于高性能奥氏体不锈钢钼含量较高，所以，它们的钝化膜比标准奥氏体不锈钢的更耐损伤。

材料工程师应根据使用环境，选择最经济的不锈钢牌号。加工厂家和用户必须明白，不当的加工制作会降低合金的基本耐蚀性。本章将介绍一些与不锈钢耐蚀性相关的基本原则。关于不锈钢在特定环境下所具有的腐蚀性能，详见附件所列的参考资料；各种牌号的不锈钢在一

般环境中的腐蚀性能参数见参考文献(11-13)。

6.1 均匀腐蚀

均匀腐蚀是指表层金属均匀损耗、横截面均匀减薄的腐蚀现象。不锈钢的均匀腐蚀，最常发生于热的强酸介质中。发生均匀腐蚀说明对于所选的牌号而言，环境腐蚀性过强。在氧化性环境中，铬含量高的牌号性能较好。在还原性环境中，高铬、镍、钼和铜的牌号表现更好一些。少量的卤化物或氧化性物质的污染会大大地改变酸性环境的侵蚀性，影响它们的相对氧化或还原能力。这些变化会对不锈钢的耐蚀性能产生相应的影响。请记住：没有一种合金适用于所有环境，高合金不锈钢的性能并非在所有环境下都优于低合金不锈钢。

6.2 局部腐蚀

6.2.1 点蚀和缝隙腐蚀

点蚀和缝隙腐蚀发生在金属表面的局部区域。钝化膜遭到局部破坏的方式有很多种，这两种局部腐蚀是不锈钢最常见的腐蚀形式。点蚀发生在相对干净和裸露的表面，蚀坑周围不腐蚀或轻微腐蚀。缝隙腐蚀发生在不锈钢表面无法接触到主体溶液的缝隙和隐蔽区域。容易产生缝隙的部位包括螺纹连接处、搭

接头、O环密封圈、垫片、连接件、管接头，污垢，油脂，标记笔迹，胶带，表面保护膜、结垢和腐蚀沉积物。有缝隙存在时，缝隙内的局部环境发生变化，与缝隙外主体溶液的化学成分有所不同。这是因为溶液与缝隙内的金属表面发生反应，以及缝隙内外的质量输送效应。因此，缝隙内氯化物浓度增高，pH值降低，产生电池效应，使缝隙内腐蚀增加，缝隙外金属表面腐蚀较少。

局部腐蚀是特别危险的腐蚀形式，因为其发展速度快，在相对短的时间内会导致穿孔甚至泄漏。

铬、钼和氮是高性能奥氏体不锈钢的主要合金元素，这三种元素含量越高，耐点蚀和缝隙腐蚀的能力就越强。为了说明不锈钢化学成分与耐点蚀性之间的关系，人们总结出了一个被称为“耐点蚀当量”或PREN的经验公式。奥氏体不锈钢和双相不锈钢的PREN为：

$$\text{PREN} = \%Cr + 3.3(\%Mo + 0.5\%W) + 16(\%N)$$

PREN对于选择应对氯化物环境的不锈钢很有用。如果一种不锈钢在某一使用环境下由于点蚀或缝隙腐蚀导致失效，那么就需要选择PREN更高的牌号。目前还无法确定PREN值提高多少就能避免腐

蚀，但是，选择PREN值低的不锈钢肯定失效。如果某个牌号的不锈钢适用于某种氯化物环境，但市场上买不到，那么，选择市场上有的，而且PREN值相当或更高的牌号，是寻找最经济替代方案的可行策略。

这个关系式是为了给耐点蚀性排序，但同时也反映出不锈钢耐缝隙腐蚀性能的强弱。PREN值表示的是理想条件下合金的耐蚀性，并没有考虑金属间相、热处理不当、表面状况不佳或制作后清理不彻底等因素。因此，PREN值只能说明一种合金所具有的潜在性能。对于最

有可能发生均匀腐蚀的环境，PREN值不能作为选择不锈钢的依据。

点蚀和缝隙腐蚀的诱因包括环境中的卤化物(特别是氯化物)和氧化剂含量增多、温度升高，以及酸性更强，但又不足以造成均匀腐蚀。不好的设计或不利的运行环境包括固有缝隙(如：螺丝连接处)和系统清洁度差造成的沉积物残留(如：表面结垢)。加工时的粗心大意也会导致局部腐蚀，打磨粗糙的表面容易发生腐蚀。焊接缺陷(如：夹渣、咬边、起弧/断弧等)和回火色都是易发生点蚀的部位。有时，冶炼、焊

接中的不当操作也会导致有害的非金属夹杂或金属间相，它们都会影响耐局部腐蚀性能。

实验室在强腐蚀性试验溶液中进行点蚀和缝隙腐蚀试验，是为了给不同合金的耐蚀性排序，为开发改良型合金提供帮助。在给定的试验条件下，大多数试验都以温度为排序标准。用临界点蚀温度(CPT)或临界缝隙腐蚀温度(CCT)来排序。临界温度是指随着温度的升高，开始发生腐蚀的最低温度(因此，临界温度高比临界温度低好)。同一合金的CCT总是比它的CPT低，因为缝隙腐蚀比点蚀易于发生。图16给出了

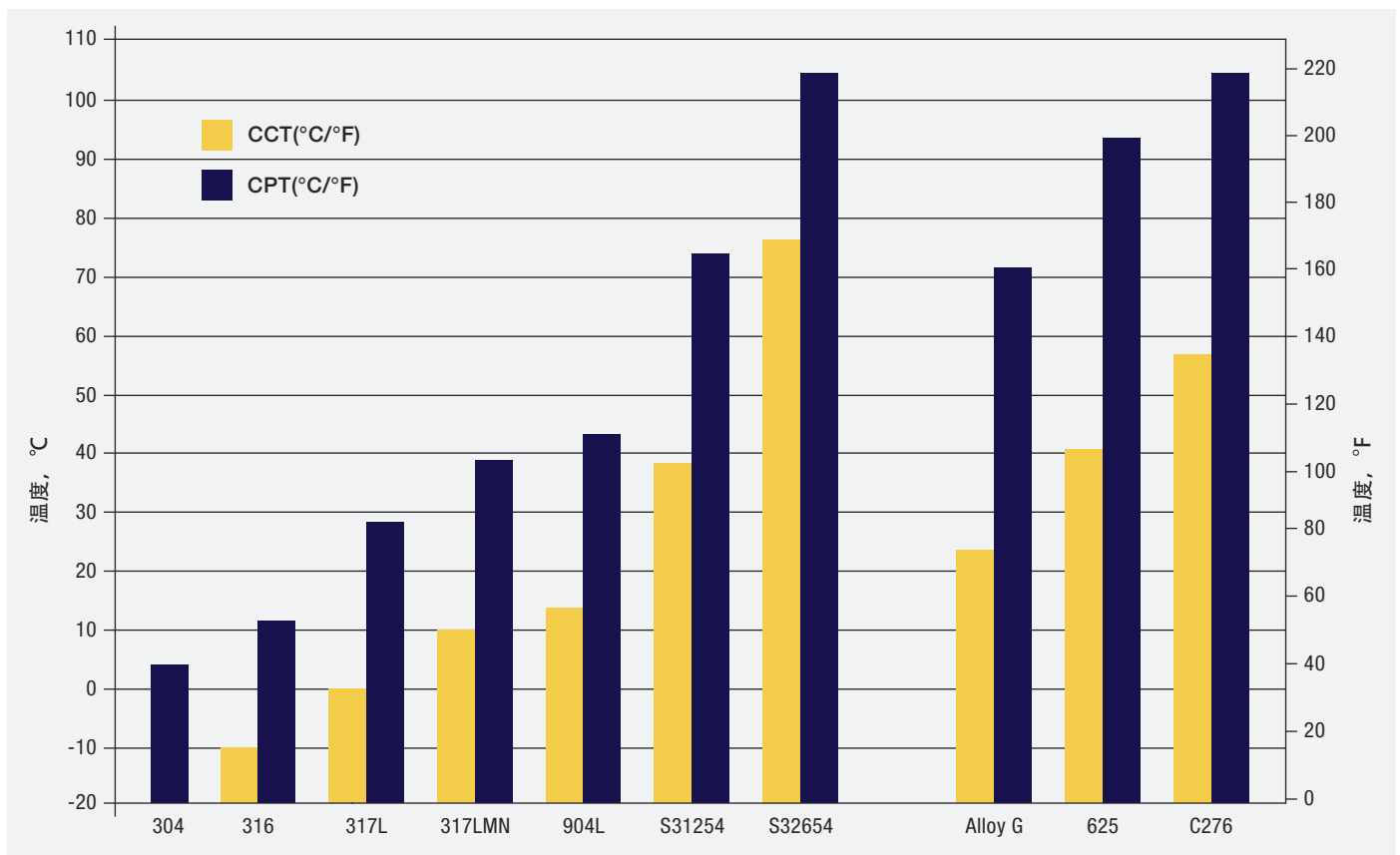


图16：不锈钢和镍合金的临界点蚀温度和临界缝隙腐蚀温度，检测溶液为6%(重量)氯化铁溶液。(10)

几种不锈钢和三种镍合金在标准氯化铁试验溶液中的临界缝隙腐蚀温度和临界点蚀温度。从图中可以看出，高性能奥氏体不锈钢的性能好于标准316不锈钢，某一合金的CCT和CPT相差很大。

排序试验及试验所得的临界温度不能具体地预测一种合金在与试验溶液不同的环境下具有怎样的表现，但是，CCT或CPT高的合金在现实环境中一般都具有较好的耐蚀性。实践经验告诉我们，临界温度和实际使用性能之间存在一定关联性。比如，316L在ASTM G48中的CPT为10°C(50°F)，不适用于海水蒸汽冷凝器管；高性能奥氏体不锈钢S31254的CPT为75°C(167°F)，很适合在该环境中使用。

6.2.2 二次相对局部腐蚀的影响

尽管奥氏体不锈钢的主要成分为奥氏体相，但它们总会含有少量的其他相，它们是炼钢过程中的正常产物，包括钢水精炼过程中产生的少量氧化物和硫化物夹杂，以及第3.1.1节中提到的铁素体相。除了这些对耐蚀性没有太大影响的常见相外，还有可能形成影响耐蚀性的有害二次相，如：碳化铬、 χ 相和 σ 相(见3.3)。尽管没有必要或者不可能使不锈钢完全摆脱有害二次相，但必须控制它们的含量。如果这些有害相过多，会破坏钝化膜，助长点蚀或缝隙腐蚀。

高性能奥氏体不锈钢中的 χ 相和 σ 相，或因为钢在初始固化过程中合金元素的偏析而在板材中心线形

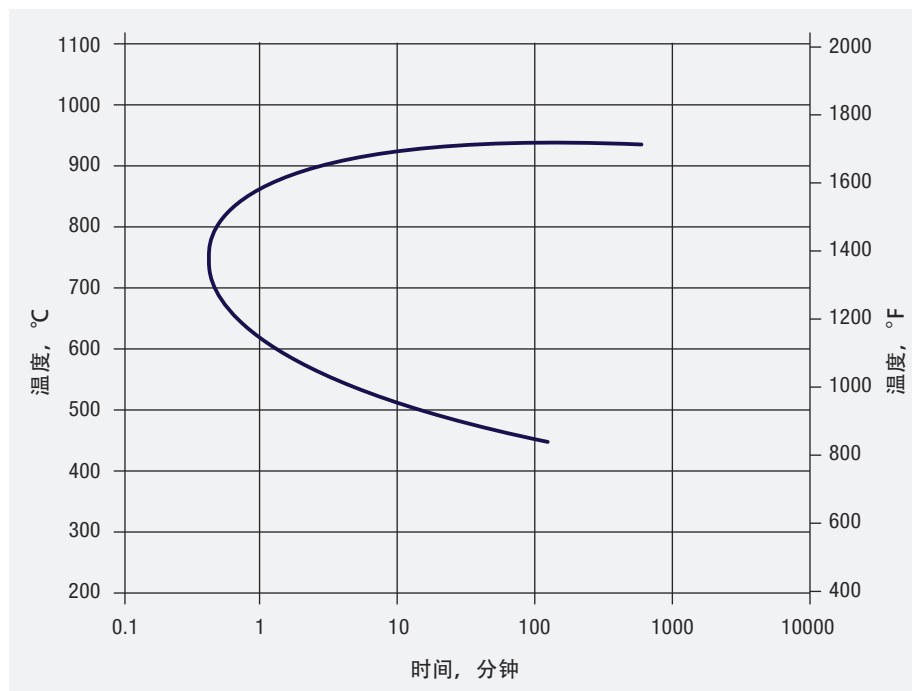


图17：6%Mo高性能奥氏体不锈钢S31254的等温析出动力学。(10)

成，或是在退火或焊接等热处理过程中，形成于晶界处，如第3.3节所述。这些相含有大量的铬和钼，消耗了周边区域的合金元素，导致耐蚀性降低。炼钢时中心线上形成的 χ 相和 σ 相，一般是无害的，因为后续的轧制和退火会使组织均质化，并将金属间相溶解。但如果它们在焊接或退火过程中在晶界处形成，则非常有害。

图17为6%Mo高性能奥氏体不锈钢中 σ 相和 χ 相开始析出的温度和时间。由此表明，在700°C(1290°F)温度下，有损于耐点蚀性的有害相开始析出的时间窗口很小。所以，必须严格控制退火和焊接周期，最大限度地缩短暴露在这些温度下的

时间，避免影响耐蚀性的二次相析出。对于已经存在的二次相，可采用完全的固溶退火和快速淬火将它们溶解并恢复合金的耐腐蚀性能。

6.2.3 应力腐蚀开裂

拉伸应力、特定环境和敏感的不锈钢，这三个要素同时存在会导致一种腐蚀形态，即应力腐蚀开裂(SCC)。对于奥氏体不锈钢来说，SCC失效最常发生在含有氯化物的环境中，因此也被称为“氯化物应力腐蚀开裂(CSCC)”。虽然CSCC是SCC中最常见的，但是，其他物质也会使奥氏体不锈钢发生应力腐蚀开裂，如：苛性钠、硫化氢和连多硫酸。

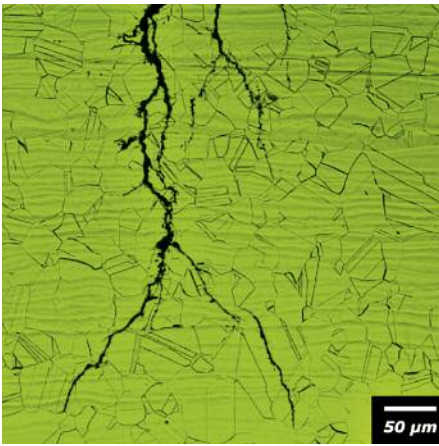


图18: 暴露在高温和高氯化物环境中的6%Mo奥氏体不锈钢的枝状穿晶应力腐蚀裂纹

发生SCC需要同时具备某种形式的拉伸应力和特定的腐蚀环境。应力来源可以是施加的应力，也可以是焊接或弯曲等过程中产生的残余应力。残余应力往往都很大，所以它们常常是造成SCC的一个因素。

6.2.3.1 氯化物应力腐蚀开裂(CSCC)

当退火态奥氏体不锈钢出现CSCC时，通常是枝状穿晶裂纹(图18)，其形态由应力的方式所决定。敏化增加了SCC的敏感性，助长晶间裂纹的形成。高应力、高温、高氯化物和低pH值都会增大应力腐蚀开裂的可能性。标准奥氏体不锈钢，包括304/304L、316/316L，和200系不锈钢，都非常容易发生这种腐蚀，即便在温度和氯化物含量都比较低的情况下也如此。虽然高性能奥氏体不锈钢耐氯化物应力腐蚀开裂性能很好，但是并不能完全避免，在高温和高氯化物环境下，也会出现氯化物应力腐蚀开裂。图19汇总了304和316在中性水中的CSCC数据。在温度接近沸点或更高

时，氯化物含量不足1ppm就会造成这些合金开裂。试样完全浸没在近中性溶液中，温度低于50°C(122°F)时，几乎看不到CSCC。但是，随着氯化物的浓缩，例如：保温层底下的干湿交替或不锈钢表面的蒸发，在温度远低于50°C(122°F)的情况下，也会出现CSCC。

304和316不锈钢的镍含量为8%-12%，镍含量更高的奥氏体不锈钢，耐氯化物应力腐蚀开裂的性能更好。高性能奥氏体不锈钢含有更多的铬、钼和镍，所以，耐氯化物应力腐蚀开裂的性能特别好。例如，6%Mo不锈钢(图19)，只有在温度和氯化物含量非常高的情况下才会出现开裂。温度阈值远远高于100°C(212°F)，说明在大气压力

下，沸腾的中性氯化物溶液不会使6%Mo和类似的高性能奥氏体不锈钢出现CSCC，比304和316不锈钢有了很大的改进。

6.2.3.2 其他环境下的应力腐蚀开裂

强碱环境会使不锈钢产生一种叫做“碱性开裂”的应力腐蚀。在温度达到或超过100°C(212°F)时，304、316和类似的标准牌号很容易发生碱性开裂。碱性开裂实质上是晶间裂纹，也可能有枝状穿晶裂纹，很难与CSCC区分。提高镍含量可改善耐碱性开裂性能，因此，所有高性能奥氏体不锈钢的表现都好于标准牌号。但是，对于烧碱蒸发器这类在非常苛刻环境下运行温度接近150°C(300°F)的应用，只有镍合金方可胜任。

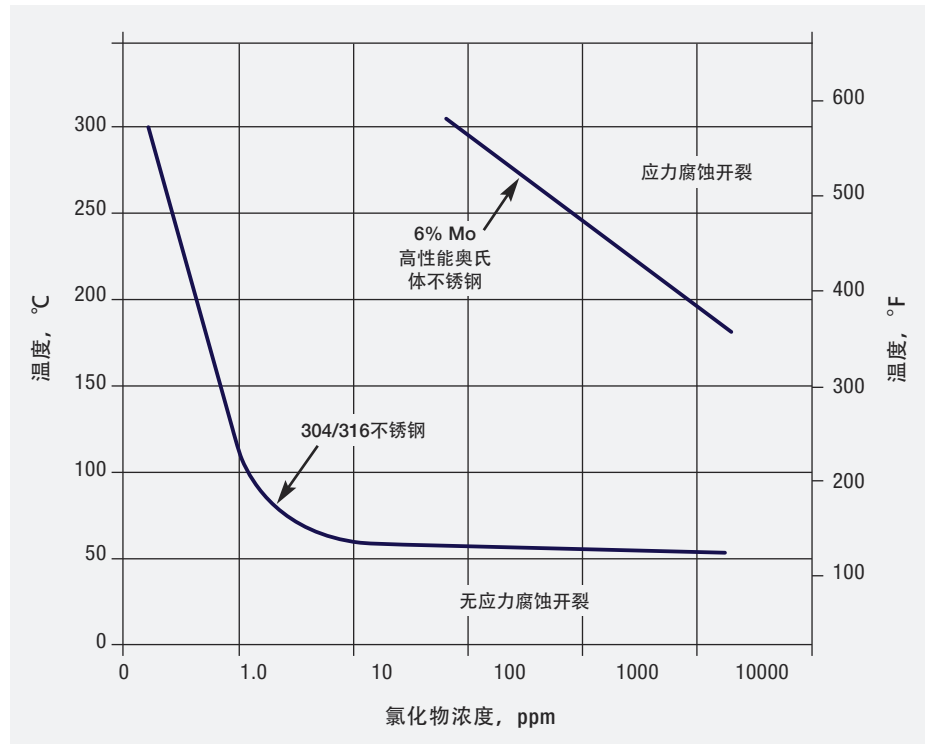


图19: 304、316和6%Mo高性能奥氏体不锈钢在近中性氯化物水中的氯化物应力腐蚀开裂阈值

环境中的氢含量较高时，会产生一种叫“氢脆”的裂纹。这样的环境包括高压氢气、强酸和含有氰化物、砷、锑或硫化物的酸性溶液，它们会破坏氢的再结合反应并促使氢离子进入金属中。涉及电偶电流的应用也会产生氢脆，如电镀和阴极保护。进入金属中的氢造成的开裂一般都是晶间裂纹。除含有马氏体相的301和201等亚稳定不锈钢外，所有退火态的标准奥氏体和高性能奥氏体不锈钢的耐氢致开裂性能都很强，不过，任何经过深度冷加工提高强度和硬度的牌号都容易产生这种裂纹。

有硫化物存在的氢脆是油气生产环境中的一个常见问题，这种SCC被称作“硫化物应力开裂”。NACE MR0175 和 ISO 15156针对硫化物开裂核准的牌号和允许的硬度等级做了详细说明。

连多硫酸($H_2S_4O_6$)会使敏化的奥氏体不锈钢发生应力腐蚀开裂，开裂形态为晶间裂纹。采用固溶退火的304L和316L或抗敏化牌号321和347可避免这种危险。但是，即使是低碳牌号，如果长期暴露在敏化环境中，也会发生敏化并产生裂纹。为了防止开裂，稳定化牌号可能需要进行最终的稳定化退火(温度低于固溶退火温度)。

6.3 晶间腐蚀/敏化腐蚀

晶间腐蚀在晶界或晶界周围迅速形成，对晶粒无影响或影响甚微。对于标准奥氏体不锈钢来说，这种

腐蚀通常与焊接或热处理过程中发生的敏化有关(见3.3)。不同的敏化程度和环境的腐蚀性，会出现多种形式的腐蚀。如果是中等敏化，可能形成点蚀。如果沿晶界形成一个连续的碳化铬网，则会形成晶间腐蚀，导致表面晶粒脱落。敏化组织、腐蚀环境和拉伸应力的合力作用会产生晶间应力腐蚀开裂。设计人员和加工厂家可以通过以下三种方法减少敏化及后续的晶间腐蚀：

- 采用低碳牌号(如：201L、304L、316L或317L)。高性能奥氏体不锈钢均为低碳牌号。碳含量低可以推迟冷却过程中碳化铬析出(敏化)的起始时间(图8)。这样，在热成型和焊接时，材料不会发生敏化，大断面工件同样如此。但是，如果长期暴露在临界敏化温度区间，L牌号也做不到耐敏化。
- 采用稳定化奥氏体牌号，如321或347。它们含有一种稳定化合金元素，把碳元素牢牢地锁住。通常采用钛(Ti)和铌(Nb)。这些牌号需要进行适当的稳定化热处理，优先形成碳化钛或碳化铌，避免形成铬的碳化物，这样，铬依然保留在固溶体中，起防腐作用。
- 固溶退火可以使敏化材料恢复耐蚀性。推荐的固溶退火温度范围为1040°C-1175°C(1900°F-2150°F)之间。固溶退火及后续的快速淬火必须是部件的最后一道热处理工序。对

于长期暴露于高温的部件，固溶退火并不能消除发生敏化的危险。

高性能奥氏体不锈钢为低碳合金，一般都含有足量的氮，所以，不必担心碳化铬敏化。但是，如前所述，在类似于标准牌号发生敏化的温度条件下，这些合金中可能会形成金属间相。金属间相的析出会导致耐点蚀性和韧性降低。

6.3.1 焊缝敏化/焊缝腐蚀

焊接时，焊缝及焊缝周围的金属被加热到了液态金属温度或接近液态金属温度。加热和冷却过程中，焊缝金属和热影响区有一段时间处于敏化温度范围。焊接是否会造成钢敏化，取决于合金本身、断面厚度及热输入量。图20是典型的焊接热循环及容易产生焊缝腐蚀区域的示意图。图中标出了焊缝两侧的敏化材料带。通过控制焊接工艺条件，结合上述避免敏化的方法，可最大限度地降低焊缝腐蚀。

正如第6.3节所述，高性能奥氏体不锈钢在焊接时一般不会发生碳化铬敏化。但是，焊接热循环会促使金属间化合物的形成，造成耐点蚀性能降低。因此，应通过调整热输入量和层间温度等焊接参数，最大限度地缩短处于临界温度的时间，还要尽量避免多道次焊接(见第12章)。较低热输入量和层间温度有助于快速冷却，最大限度地缩短了临界温度的暴露时间。

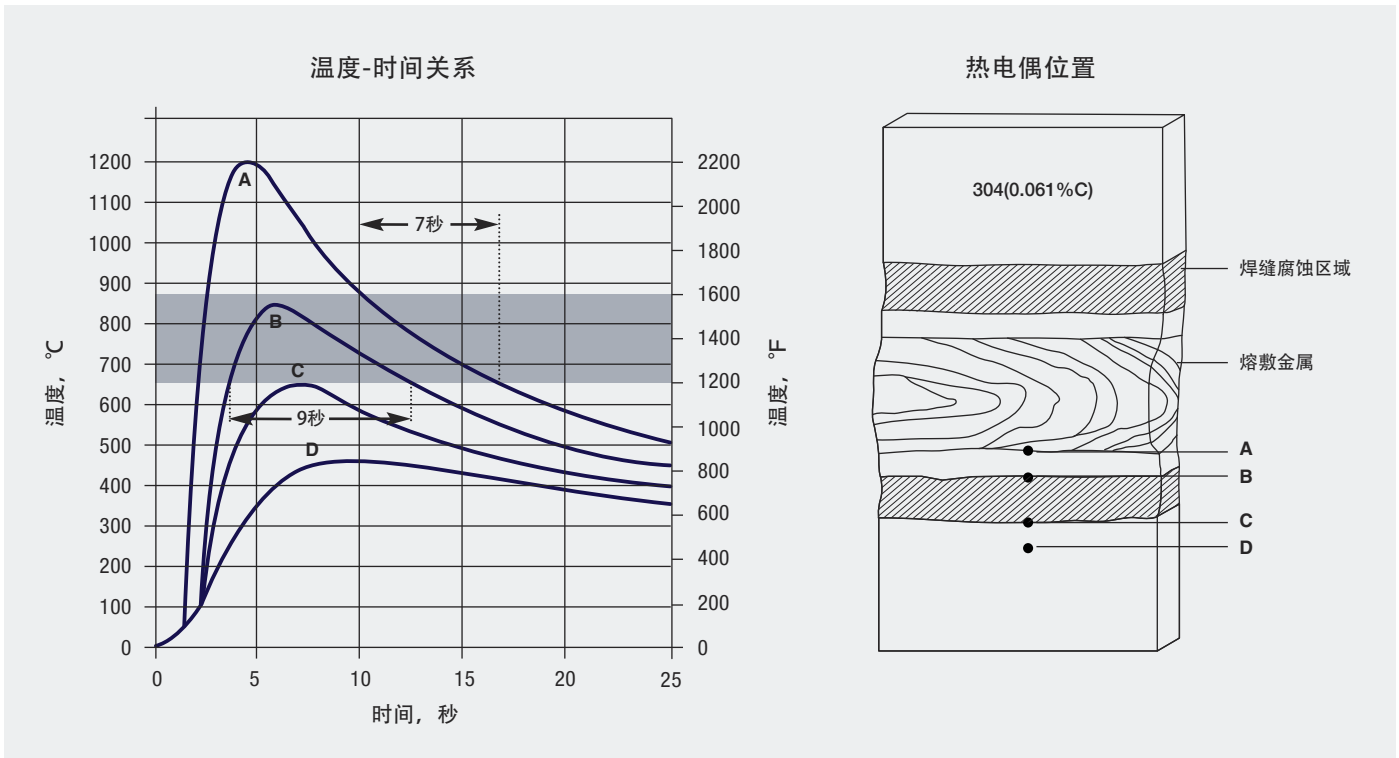


图20：电弧焊304不锈钢的时间-温度曲线以及发生敏化和焊缝腐蚀的区域。左图灰色部分表示快速敏化的温度区间。(14)

6.3.2 刀状腐蚀

刀状腐蚀是一种独特的敏化形式，只发生在经过稳定化处理的牌号，如：321和347。如果焊接工艺使碳化钛或碳化铌溶解，后续热处理过程中可能会形成碳化铬。在这种情况下，焊缝周边会出现一个狭窄的敏化区，刀状腐蚀由此而得名。大多数奥氏体不锈钢和高性能奥氏体不锈钢都未经过稳态化处理，因此不易产生刀状腐蚀。

6.4 电偶腐蚀

金属浸没在腐蚀性环境时，会产生

腐蚀电流，腐蚀电流直接关系到该金属在该环境下的腐蚀速率。腐蚀速率很低的金属具有更正向或更惰性的腐蚀电位，腐蚀速率高的金属具有更负向或更活跃的腐蚀电位。图21显示了海水中测量的各种金属和合金从活性到惰性的腐蚀电位图。这种排序被称为电偶序列，该图显示的是海水电偶序列。如果两种或两种以上不同的金属或合金浸没在腐蚀环境中，相互接触或电连接(耦合)，而且金属在所处环境中腐蚀电位有很大差异，则极有可能发生电偶腐蚀。当电偶腐蚀发生时，较活泼的金属会以更快的速度腐蚀，惰性金属往往会受到保护，腐蚀速率

低于该金属独自在该环境中的腐蚀速率。例如，如果碳钢与钝化不锈钢相连接，碳钢的腐蚀速度快，即碳钢将发生电偶腐蚀，因为碳钢较活跃，它们之间的腐蚀电位差很大。

该电位序可用于预测异种金属相连接是否会导致电偶腐蚀。在电位序中彼此非常接近的金属和合金(腐蚀电位差小)可以连接在一起，发生电偶腐蚀的风险极小或者不存在。由此类推，金属在电位序中相距越远，电偶效应就越明显，较活泼金属的腐蚀速率越高。在使用电位序进行预测时，关键是使用与环境相

关的电位序。例如，图21所示的海水电位序不适用于预测酸性环境中的电偶腐蚀。

用于评估电偶腐蚀预期强度的另一重要参数是两种金属暴露表面的相对尺寸。随着较稳定金属的相对表面积增大，阴极反应的面积随之增

大，由此导致较活跃金属表面的金属溶解或腐蚀的速率更高。由于该表面面积效应，电偶腐蚀速率随着惰性金属与活性金属面积比的增加

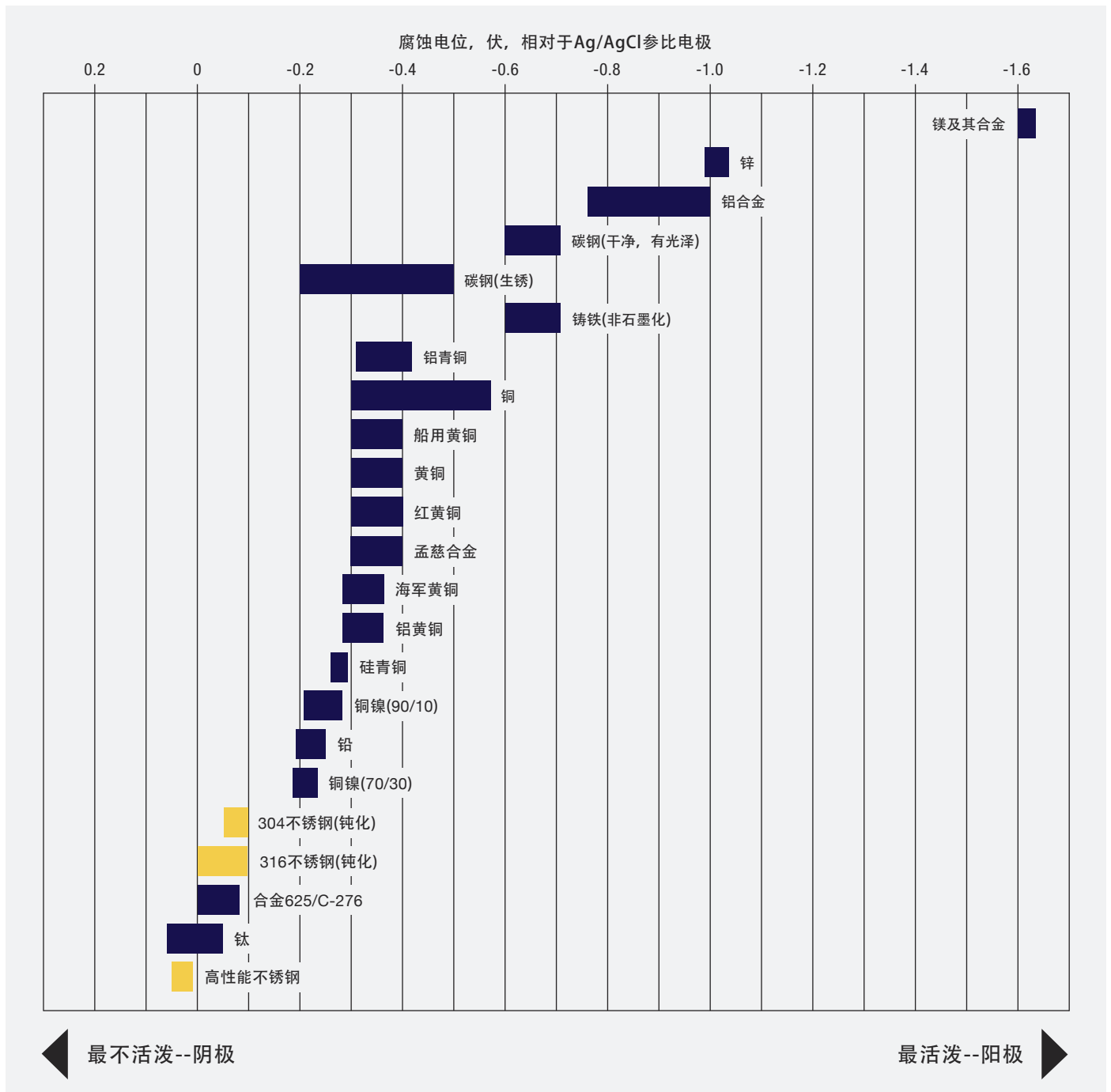


图21：常用金属和合金的电位序列，表示在室温海水中，用Ag/AgCl参比电极测量的腐蚀电位。数据源自(15)

表7：加工工艺对腐蚀形式产生的潜在影响(实际影响与许多因素有关)

加工工艺	常用不锈钢牌号			
	304, 316	304L, 316L	321, 347, 316Ti	HPASS
热成型(假设已去除热处理氧化皮)	IGC	IGC	IGC	IGC, P, CC
冷成型	SCC	SCC	SCC	SCC
机加工	SCC	SCC	SCC	SCC
焊接				
热效应	IGC		KLA	P, CC
应力效应	SCC	SCC	SCC	SCC
回火色	P, CC	P, CC	P, CC	P, CC
粗磨表面	P, CC	P, CC	P, CC	P, CC
机械连接(螺栓连接、铆接、卷边接缝)	CC, GC	CC, GC	CC, GC	CC, GC
表面铁污染(来自不同的加工工序)	P, CC	P, CC	P, CC	P, CC

注释：IGC=晶间腐蚀；P=点蚀；CC=缝隙腐蚀；SCC=应力腐蚀开裂；KLA=刀线腐蚀；GC=电偶腐蚀

而增加。用碳钢铆钉(表面积小)连接不锈钢板(表面积大)就是一个面积比错误的常见实例。

尽量减少电偶腐蚀的措施包括：避免异种金属相连接，使用绝缘材料将异种金属分隔开，选择电位序中接近的异金属(见图21)，调整异金属的表面积，加大最有可能发生腐蚀的金属的暴露面积。如果异种金属连接不可避免，那么，对连接处附近的较稳定金属表面进行喷涂可以防止电偶腐蚀。不宜在较活跃的金属表面喷涂防电偶腐蚀的涂层，因为任何涂层缺陷都会产生非常不利的惰性金属/活性金属表面积比，并导致涂层缺陷处加速腐蚀。

6.5 加工制作与耐蚀性之间的关系

本章主要论述影响耐蚀性的冶金因素和环境因素。但是，加工方法不当也是造成很多现场腐蚀的原因。不锈钢的耐腐蚀性能源于其完好无损的钝化膜。遗憾的是，很多标准化加工方法会使钝化膜受损，造成合金的耐蚀性降低。钝化膜损伤主要分为两大类：表面条件和表面污染。表面条件包括粗糙度过大、残余应力和贫铬。表面污染指的是沉积在表面的外来物质。污染物有很多种，常见的有含氯化物的标记笔或溶剂、工具造成的铁污染，以及退火或焊接的氧化皮。

第7章和第14章将就这些问题进行进一步的论述并提出建议，帮助加工厂家消除或尽量减少它们的影响。

加工不当引起的腐蚀是可以避免的，查明原因并采取有效措施可以解决加工问题。好的现场管理和加工后的彻底清理缺一不可。表7汇总了一些典型的腐蚀问题及造成这些问题的加工工艺。

7 工厂注意事项--保持表面光洁

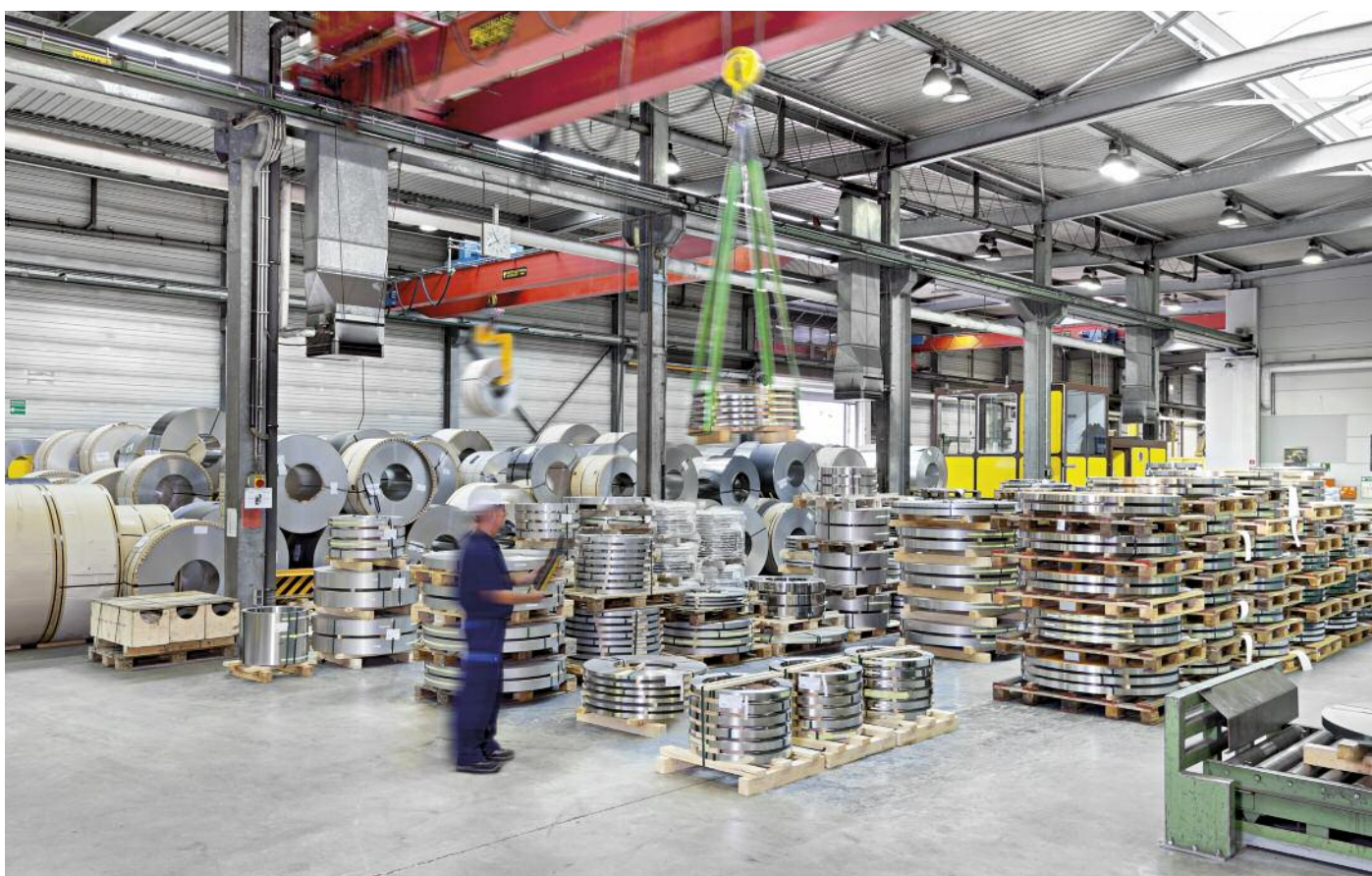
保持不锈钢表面光滑干净是不锈钢加工厂要遵循的最重要的规则。搬运和制作时的不小心会破坏不锈钢表面的钝化膜，使钢的耐腐蚀性能降低。运输或作业现场造成的表面污染，特别是碳钢颗粒和铁鳞，以及表面不光滑或划伤，是钝化膜被破坏的常见原因。不锈钢表面经过修磨后粗糙度 $Ra > 0.5$ 微米(20微英寸)会降低耐点蚀性。通过酸钝化处

理可将粗磨造成的耐蚀性损失降至最低。

加工厂应制订厂内保护钢表面的操作规程。其中包括原料收货存放、所有的搬运和加工操作，以及成品存放、发运和预组装。规程中还要有原料出厂信息，保证从原料收货存放至成品发运的可追溯性。

7.1 最初交货和存放

订购不锈钢时，应要求防水包装和尽量用厢式货车运输。如果运输过程中不锈钢可能受到卤化物(盐)污染的话，这尤为重要。例如，海上运输或冬季运输暴露于除冰盐。普通货车运输的不锈钢应进行查验；如果外包装有可能进水，应打开包装晾干。如果不锈钢表面有盐，应



不锈钢卷和切割件存放在干净的配送中心。© Vogel-Bauer

拆掉包装彻底冲洗表面。带包装的不锈钢应存放在室内清洁干燥处。

钢板、钢管和其他大件产品可以在室外存放，必要时应放在带顶棚的仓库。避免接触海盐和除冰盐，以及酸雾和修磨粉尘等空气污染物。货架的设计和制作要防止碳钢污染，还要避免接触死水。存放期间或加工制造过程中，不应当用油、油漆或其它涂料保护不锈钢。

不锈钢应存放在干净的场地，与碳钢隔离，而且要远离碳钢加工区。如果不锈钢和碳钢在同一车间加工，碳钢粉尘会落到不锈钢表面，很容易造成不锈钢表面铁污染。这一点非常重要，因为被碳钢颗粒(即游离铁)污染的不锈钢表面很容易生锈，使用过程中会出现点蚀。

定尺剪切的薄钢板应水平摆放在木箱中，以保持平直度，并避免边部受损；为了保证表面质量和光洁度，钢板与钢板之间应垫衬纸或塑料膜。可能会在钢板表面留下印痕的硬纸板或其它材料不能用于高度抛光表面。包装箱一定要有盖，防止大气污染。较厚的钢板直立或接近直立干燥有顶棚的架子上，最大限度地降低大气污染，避免脚印污染钢板表面。

不锈钢不能与镀锌钢或铜接触，也不能存放在同一区域。铜、锌或类似的低熔点金属造成的表面污染会使不锈钢在焊接或热处理过程中发生脆化(液态金属致脆)。

7.2 可剥离保护膜

订购不锈钢板材时，可要求加塑料保护膜，这是为后期激光切割、折弯、成型、标记及运往现场专门设计的保护膜。在整个加工过程中，保护膜可以减少或防止表面被划伤刻痕和受到其它金属颗粒的污染。对外观或表面质量要求严格的应用，如建筑构件、家用电器和与食品接触的表面，都离不开可剥离保护膜。短期存放和加工制作过程中，不用揭掉保护膜。

这种用于加工过程的保护膜通常经不住紫外线(UV)照射，例如暴露在太阳下，如果不能避免紫外线照射，则有必要在成品安装运输之前，揭掉并更换保护膜。不适合紫外线环境的保护膜，即使是短时间暴露于紫外线也会导致粘合剂劣化。这会使保护膜变脆，几乎不可能毫无痕迹地从金属表面揭掉。防紫外线保护膜一般也能经受温度的极端变化。UV级保护膜适用于在施工现场会受到日光照射的部件。

所有保护膜都有有效期，视生产日期和所处环境而定，包括最高存放温度和其它限制使用寿命的因素。根据所处环境，保护膜的有效期为3-9个月不等。根据保护膜的使用期限，到期前应揭掉保护膜。采购有可剥离保护膜的产品时，应该索要有关使用期限、存放温度和紫外线照射等方面的资料。

如果去除方法不当，保护膜上的粘



可剥离膜保护不锈钢表面，避免在制造和运输过程中划伤和沾污。© IMO A

合剂会残留在不锈钢表面，很难清理干净。粘合剂的种类很多，清理残余粘合剂之前应向保护膜生产商咨询。有些通过家用清洁剂和水可以清除干净，有些则需要专用脱粘剂。残留粘合剂要尽快清理干净。

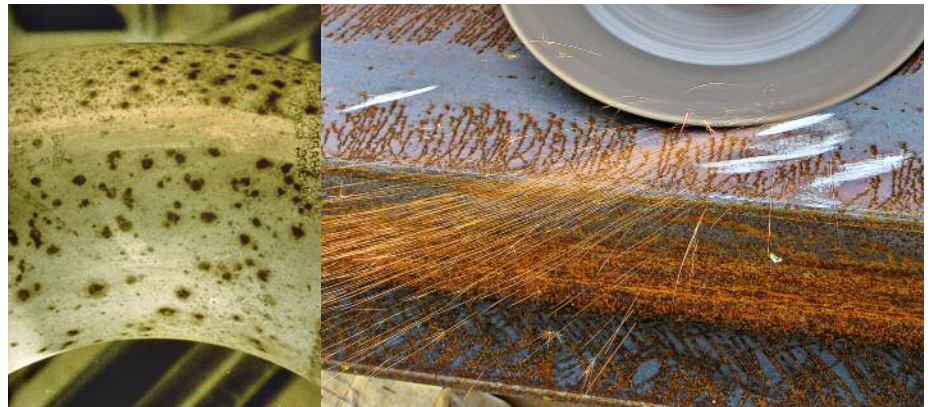
有保护膜的不锈钢也要存放在控温低湿环境。所有的保护膜都不隔潮，雨水、雾和湿气以及溶解盐和其它污染物会渗透进保护膜。这样可能会导致缝隙腐蚀，如果是沿海地区或使用除冰盐的区域，氯化物含量高，更容易造成缝隙腐蚀。因此，如果不锈钢将安装在室外有可能受到氯离子污染的地方，应先将不锈钢离场存放，安装时再运到现场，面板安装到位后，揭掉保护膜。

7.3 避免铁污染

在制作和运输过程中应避免与碳钢接触。运输夹具、捆带、链条、钩子和其他装置应是不锈钢的，或用塑料或纸板保护，防止碳钢污染。特殊工具应该是不锈钢专用。采用不同的颜色有助于区分碳钢工具和不锈钢工具。

只有干净，无铁污染的砂轮、砂带及磨料(玻璃或陶瓷珠、金刚砂和不锈钢丸)才能用于不锈钢。在碳钢上用过的磨料不能再用于不锈钢。不干净的磨料中的铁粒子会嵌在不锈钢表面产生锈蚀。不能用碳钢珠清理不锈钢。由于同样的原因，只能用不锈钢钢丝刷和不锈钢钢棉，而且是绝对没有在碳钢上用过。

加工过碳钢的辊子、冲压机和模具，必须彻底清理干净，将上面的颗粒物或铁鳞清除后，方可用于不

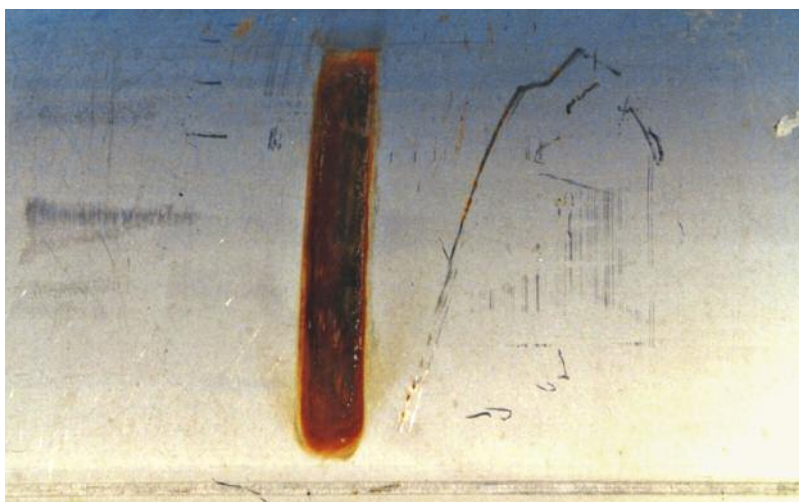


左侧不锈钢弯头表面被碳钢颗粒污染。原因可能是附近打磨碳钢的火花飞溅到不锈钢表面。

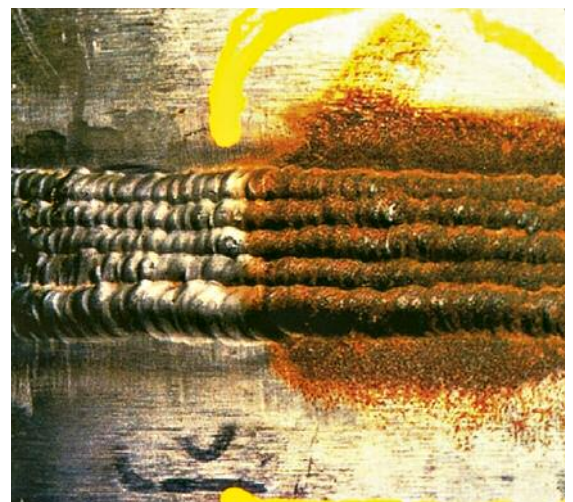
锈钢。用衬纸或塑料膜可防止成型工具上碳钢颗粒的污染。

如果不锈钢受到碳钢污染，必须进行酸钝化处理，去除污染物，使表面复原(见15.1.1节)。如果不锈钢表面嵌入大量碳钢颗粒，可能需要用较强的酸进行酸洗(见15.2.6

节)，及时去除所有的铁污染物。然而，全面避免碳钢污染才是性价比最佳的解决方案。



碳钢捆带在不锈钢管表面留下锈迹。



用碳钢钢丝刷“清理”不锈钢焊缝，使表面退色并出现锈迹，必须使用不锈钢钢丝刷。© Outokumpu Stainless

8 热成形和冷成形

8.1 热成形

在热轧，锻造和挤压操作中，奥氏体不锈钢具有良好的成形性。标准奥氏体不锈钢的高温强度优于碳钢，而高性能奥氏体不锈钢的高温强度又远高于标准奥氏体不锈钢。因此，每道次的压下量都比碳钢小，并且可能受到设备能力的限制，尤其是高性能奥氏体不锈钢。对不锈钢进行热加工时，全程加热很重要。由于高性能奥氏体不锈钢的导热性比碳钢差，所以加热时间要比碳钢长。另一方面，高钼高性能奥氏体不锈钢产生氧化皮的速度非常快；因此，在加热过程中操作员必须尽可能缩短保温时间。

因为高温下奥氏体不锈钢的延展性迅速损失，所以，不锈钢热加工温度的上限远低于熔化温度。 δ 铁素体相变是造成标准奥氏体不锈钢延展性受损的原因。而对高性能奥氏体不锈钢而言，延展性损失与显微组织中的低熔点硫化物或磷化物相关。为了减少成形过程中形成厚氧化皮，热加工温度不宜过高。热成形温度下限应控制在再结晶和软化范围内，如果低于该温度，工件会迅速加工硬化。由于可能会造成韧性损失，尤其是高性能奥氏体不锈钢，温度下限应高于形成有害相(如 σ 相)的温度。

表8所示为各类奥氏体不锈钢的热成形温度范围。所有牌号的上限温

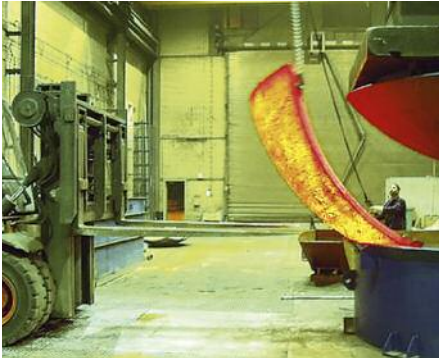
度都在1175-1200°C(2150-2200°F)之间，下限温度则完全取决于具体牌号。标准不锈钢的温度下限相当低，而高合金不锈钢的温度下限较高，这是因为它们强度高，有形成金属间相的趋势。钢种与温度下限的依存关系表明，合金含量越高，热加工窗口越小，高性能奥氏体不锈钢的热加工窗口最小。

在热成形过程中，保持工件温度均匀，避免出现低温区(例如，工件边缘比工件主体的颜色暗，甚至与赤热表面相比，边缘发黑)至关重要。温度较低的区域可能会低于最低成形温度，那个区域的延展性无法承受进一步的变形，会产生裂纹或撕裂。

表8：奥氏体不锈钢热成形温度范围和固溶退火温度

牌号	热成形温度范围		固溶退火温度 ¹	
	°C	°F	°C	°F
标准牌号 201, 304, 316, 321	870-1200	1600-2200	1040 min.	1900 min.
高温牌号 309, 310	980-1175	1800-2150	1050 min.	1925 min.
6% Mo-0.2% N S31254, S31266, N08367, N08926	980-1150	1800-2100	1150 min.	2100 min.
	900-1200	1650-2190	1150 min.	2100 min.
	1000-1260	1830-2300	1105 min.	2025 min.
	900-1200	1650-2190	1100 min.	2010 min.
7% Mo-0.5% N S32654	1100-1200	2000-2200	1150 min.	2100 min.

1 ASTM A480/A480M规定的固溶退火温度。要想在合理时间内去除某些合金的二次相，温度必须高于温度下限



热压成形压力容器封头板。© Antonius Vesselheads BV

为了确保显微组织均匀，无敏化、无有害二次相和过量的残余应力，热成形的工件需要进行固溶退火和水淬。经过全固溶退火的标准不锈钢，焊接时敏化风险降低，还可以延长 χ 相和 σ 相析出前高性能奥氏体不锈钢的可焊接时间。固溶退火还可以使可能导致后续加工尺寸不稳定的残余应力最小化。

如果工件温度从未低于固溶退火温度下限，该热成形过程可被看作是“中间退火”，在此期间，达到热成形温度后快速冷却，可用于替代单独的一个固溶退火周期。然而，采用中间退火时，温度控制是关键，要确保整个工件处于合适的固溶退火温度。

为了避免碳化物或有害二次相析出，奥氏体不锈钢热加工后需要快速冷却。冷却介质的选择取决于断面厚度和化学成份，标准牌号不锈钢取决于碳含量，高合金化不锈钢主要看钼含量。碳含量高于0.030%的非稳定化牌号应采用水淬，以防止敏化。碳含量低于0.030%的标准牌号或321，347或316Ti等稳定化牌号，可采用空气

冷却。Mo含量高于3%应采用水淬，以防止形成金属间相。随着断面尺寸的增大，所需的冷却能力也要随之增加，这样才能保证中间部分的冷却速率足够快，避免二次相析出。

8.2 温成形

大断面奥氏体不锈钢中厚板通常进行温成形，因为温度升高强度下降。奥氏体不锈钢与铁素体和双相不锈钢不同，温度不超过480°C (900°F)不会形成二次相。这个温度是奥氏体钢的温成形上限温度。低碳或稳定化牌号，以及温成形后需进行固溶退火及淬火处理的材料，温度上限会更高。

8.3 冷成形

环境温度下，奥氏体不锈钢的延展性非常好，在冷成形过程中，无论是简单弯曲还是复杂的深冲拉

伸，这种延展性可转化为良好的成形性。不同牌号的成形性与它们的强度和加工硬化性能相关。在冷加工成形时，高强度牌号如高性能奥氏体不锈钢和200系不锈钢需要的较大的冲压功率，或限制断面尺寸。加工硬化率高的牌号，如301和201，非常适于拉伸。

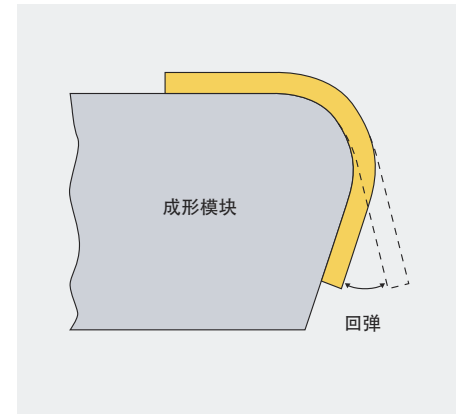


图22：通过成形模块进行成形或弯曲的金属都会有回弹。制定成形方案时必须考虑回弹量，才能确保最终尺寸正确。(16)



联运罐式集装箱通常由316型不锈钢制成。冷成型制成圆柱体。© IMO A

金属冷成形时，移开成形工具后工件有部分恢复原状的趋势(见图22)。这种趋势被称为“回弹”，为了实现期望的最终形状，冷成形操作必须补偿这种回弹(关于弯曲回弹详见8.3.1)。钢的强度和加工硬化率越高，回弹量越大。奥氏体相稳定性低的牌号(如301)和氮合金化牌号如大多数高性能奥氏体不锈钢屈服强度和加工硬化率较高，造成回弹量较大。奥氏体相稳定性低且氮含量较高的200系不锈钢的回弹量最大。氮含量在规定成分范围内的变化会显著改变成形性和预期的回弹量，即使是最大氮含量为0.10%的标准牌号也是如此。

8.3.1 弯曲

经过退火的奥氏体不锈钢可以成形为急弯弯头。例如，利用自由弯曲，即在不对弯曲处施加任何力的情况下把试样的末端推到一起，180°弯曲以材料厚度的1/2为半径(1/2t 180°弯曲)，与轧制方向无关，这是标准奥氏体不锈钢的通用验收标准。如表9所示，对于强度较高或回火轧制的钢种，该标准有所放宽。

在弯曲操作中，通过加大弯曲角度，使金属“过弯”补偿回弹，消除弯曲力后就得到所需的最终角度。回弹量取决于几何因素和不锈钢特性。影响回弹量的几何因素包括零件壁厚和弯曲半径。弯曲半径与截面厚度之比越大，屈服强度和加工硬化率越大，回弹量就越大。

图23显示模具半径和退火300系不锈钢的厚度和零件角度之间的关系。(16)

表9: 180°自由弯曲最小弯曲半径

钢种及加工硬化状态	弯曲半径
经过退火的标准奥氏体不锈钢	0.5 t*
高性能奥氏体不锈钢	1.0 t*
加工硬化的标准奥氏体不锈钢	0.5-1.0 t* 1.0 t* 3.0 t*
1/4硬化	
1/2硬化 全硬化	

*t = 材料厚度

关系。例如，零件的模具半径与厚度的比值为10时，模具角度与零件角度的平均比值应为1.12。在这个例子中，如果零件的最终弯曲角为90°，则该零件必须弯曲至100.8°，相当于留出10.8°的回弹量。

对于不同强度特性的钢种，回弹量比例关系通常为(17):

$$[0.2YS + UTS]/2$$

其中，YS和UTS分别为屈服强度和极限抗拉强度。

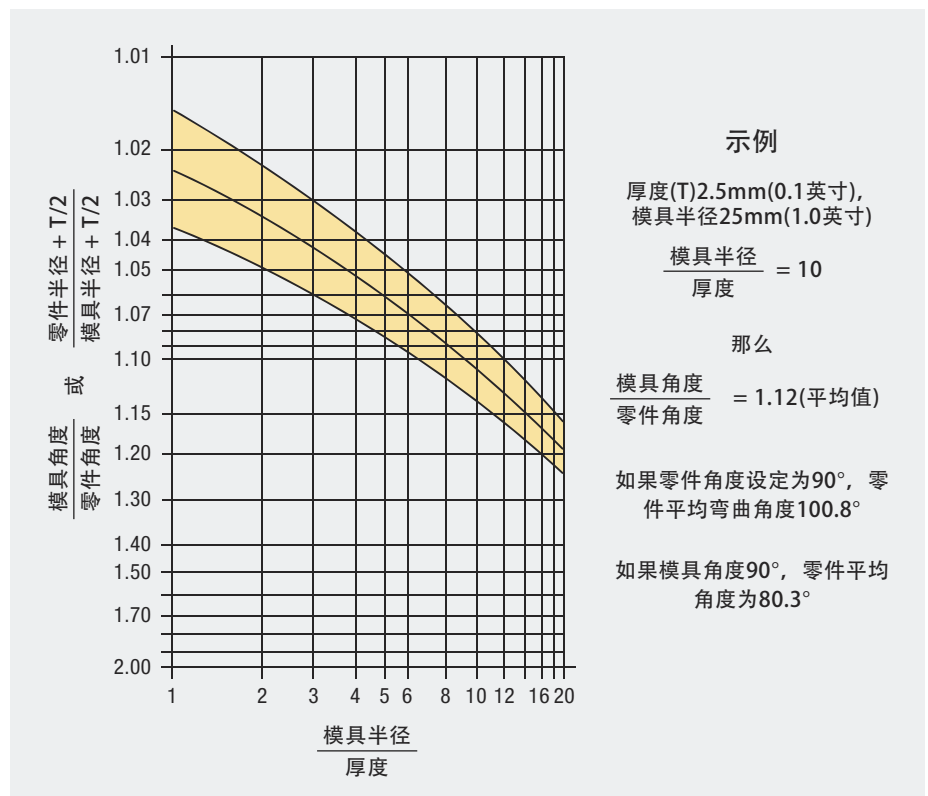


图23: 退火300系奥氏体不锈钢弯曲操作的模具角度/材料厚度、零件半径、零件弯曲角度之间的关系。(16)

这个关系式可以用来比较不同强度等级的不锈钢的回弹量。假定图23所示的300系不锈钢的屈服强度和抗拉强度分别为275MPa(40ksi)和655MPa(95ksi)，300系不锈钢的预期回弹量按10.8°，上述表达式可用于估算更高强度的不锈钢的回弹量。例如，屈服强度和抗拉强度分别为345MPa(50ksi)和790MPa(115ksi)的高性能奥氏体不锈钢，回弹量计算如下：

$$\frac{A}{B} = \frac{10.8^\circ}{x}$$

其中

$$A = [0.2(275) + 655]/2 = 355$$

$$B = [0.2(345) + 790]/2 = 429.5$$

$$\frac{355}{429.5} = \frac{10.8^\circ}{x}$$

$$x = 13.1^\circ$$

表10：压弯成形的最小弯曲半径(16)

钢种及加工硬化状态	弯曲半径
经过退火的标准奥氏体不锈钢	0.5-1.5 t*
加工硬化不锈钢	
1/4硬化	1-2 t*
1/2硬化	2.5-4 t*
全硬化	4-6 t*

*t = 材料厚度

基于这个近似值，如果在图23的例子中使用高性能奥氏体不锈钢，那么，材料必须弯曲到大约103.1°，才能使最终弯曲角度达到90°。

8.3.1.1 压弯机折弯

压弯机将板料夹紧在冲头和模具之间，将金属板弯曲成精准形状。选择冲头和模具的尺寸时，要考虑回

弹量，消除弯曲力后获得具有所需弯曲角度的最终形状。奥氏体不锈钢压弯方式与碳钢相同，但不锈钢的强度较高，回弹量较大。标准的退火和加工硬化不锈钢压弯成形的最小弯曲半径见表10。

8.3.1.2 辊压弯曲

辊压弯曲是制造容器、罐体和其它空心圆形型材常用的加工方法。薄厚板料的弯曲一般都是由三辊成形机完成。成形机的顶辊是固定的，底辊可根据板料厚度上下调整。第三支辊的作用是调整角度，确定弯曲直径。

8.3.2 辊轧成形

辊轧成形是生产槽钢和角钢等长材产品经济有效的方法。而且还可以利用辊轧成形工艺在板材上轧出强化脊槽，降低建筑或运输用途所需材料的厚度。奥氏体钢很容易辊轧成形，但是，由于牌号和成分不同，它们的强度和加工硬化率有很大差异，造成辊轧成形产品的尺寸公差发生变化。冶炼厂可以通过控制钢中镍，碳和氮的含量变化，最大限度地减少可变性。



压弯机弯曲不锈钢板。© IMO A



三辊弯曲机。© IMO A



辊轧成形机加工的槽形不锈钢。© Warut Sintapanon/Dreamstime.com

8.3.3 冲压拉伸

冲压冷成形操作，是指将材料冲压到模具中，产生所需形状介于以下两个极端操作之间：

纯冲压操作：金属材料的边缘不受限制，金属被冲入模具中。冲压用的材料应具有足够的延展性，以便在夹边最小的情况下，材料在模具中均匀延伸，而且在冲压过程中加

工硬化率不能太高。专门用于深冲的不锈钢牌号，如305，具有高延展性，非常稳定的奥氏体相和低加工硬化率。

纯拉伸操作：金属材料周边硬性固定，仅通过拉伸使金属入模，达到冲压的效果。该操作同时伴随着工件壁厚度相应减薄。拉伸用的材料要有高加工硬化率，例如，301，这样可以在无断裂情况下加大成形深度。

为了通过形变马氏体相提高加工硬化率，有些牌号的成分经过均衡处理，增强了拉伸性能。例如，高碳低镍301不锈钢，它的加工硬化率非常高，强化了加工成形变薄的区域。这样可以将应变转移到周边较软的区域，以便变形继续且不发



造型复杂，冲压拉伸的奥氏体不锈钢水槽。© Outokumpu



冷成型换热器板的复杂图案。© Graham Sussex



旋压成形奥氏体不锈钢封头利用了钢的高延展性。© IMOA

生断裂。上图所示为采用大拉伸能力成形的热交换器板。成形后的长度远远大于原始长度。奥氏体不锈钢优异的加工硬化性使其可以加工成槽型，而且折弯处不发生断裂。

实际成形操作中，更多是采用冲压和拉伸相结合的方法。因此，坯料的性能需要与零件所涉及的冲压拉伸量相匹配。由于不锈钢牌号很多，力学性能范围较为宽泛，因此，可以根据具体操作优化选材。不过，先进的钢板成形技术也催生了许多标准化学成分范围允许的专用钢种，以满足成形操作的特定需要。

8.3.4 旋压成形

旋压成形是一种冷成形工艺，当金属盘或管快速旋转时，圆形旋压头

或旋压辊施加压力形成轴对称零件(见上图)。旋压成形要求材料延展性好，加工硬化率低，所以，限制了那些加工硬化率高的标准奥氏体不锈钢的应用。改变钢的成分可解决这个问题。305，309，310和904L不锈钢镍含量高(有时还添加少量的铜)，降低了有效加工硬化率，更适用于深冲和旋压成形。即使是使用延展性好的钢种，由于旋压变形量大，可能需要进行中间退火，才能防止开裂，确保最终形状。

8.3.5 冷镦

用冷镦(模具内的轴向模压)生产制造不锈钢螺栓和其它紧固件很容易。为了提高螺栓头的强度，适度加工硬化是必要的，但是，高延展性和低加工硬化率更易于完成冷

镦并减少工具磨损。增加镍含量的304不锈钢(305)或增加铜含量的304不锈钢(S30433，有时也称之为“302HQ”)具有良好的流动性，最大限度地降低了边部裂纹风险。图24为冷镦示意图。

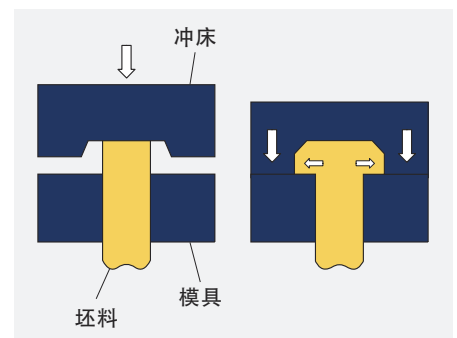


图24：冷镦不锈钢螺栓要求金属在模具内有良好的流动性。

9 切割

奥氏体不锈钢易于锯切，剪切，冲孔，也可以用水射流、等离子或激光技术切割。用这些方法切割出的中厚板或大型部件，其尺寸精度和表面质量有时能达到最终要求。用于标准奥氏体不锈钢的切割方法同样可以切割高性能奥氏体不锈钢。不能用氧乙炔焊炬切割不锈钢。

9.1 锯切

用带锯和弓锯切割不锈钢时，要使用锯齿锋利的优质高速钢锯片，正进给率和精确对准。强冷却剂/润滑剂射流要对准切割点。最好使用合成乳液。

由于奥氏体不锈钢的加工硬化率高，所以在切割时，正进给和控制锯片摆动非常重要。锯机需要有足

够的功率驱动锯片在之前的硬化切割层下面进行锯切。如果锯片在钢板表面打滑而不是切割，表面就会硬化，阻碍后续的锯切，造成锯片快速磨损，降低切割能力。

9.1.1 电动弓锯

用电动弓锯对奥氏体不锈钢锯切时，需要适当的冷却，即在切割区注入切削液。任何时候都要有一个以上的锯齿与工件接触，被切割料较薄或直径较小时，必需使用齿距较小的锯片(表11)。随着材料厚度或直径的增加，齿间距随之增大，合理的间隙可以尽量减少切屑堵塞(18)。

无论是添加氮，还是添加钼和氮的高强钢都需要大功率弓锯，因为它

表11：推荐的弓锯锯齿间隙(18)

工件-厚度/直径	齿数/25 mm
< 6 mm	10
6-10 mm	10-8
10-25 mm	4-6

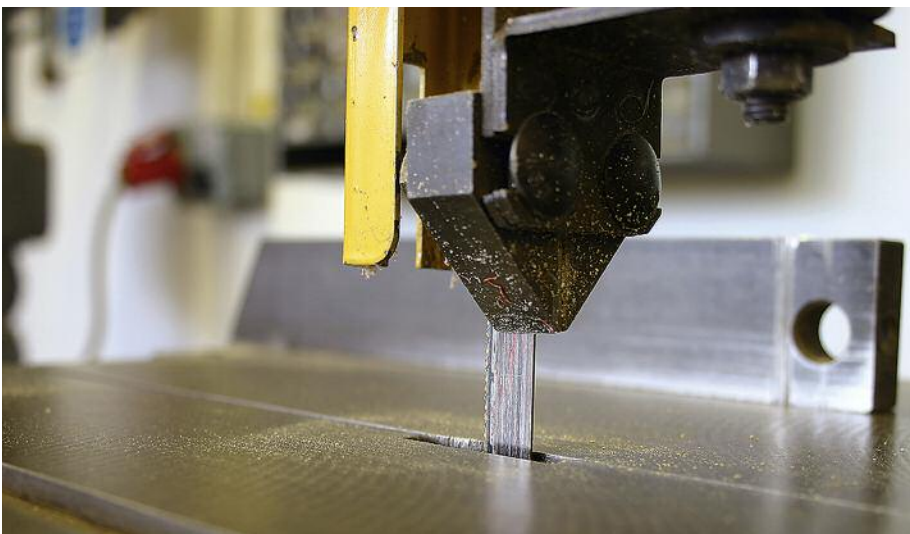
们的强度和加工硬化率都很高。如果不能保持正进给，应考虑更换切割方法。

9.1.2 带锯

低速带锯与弓锯非常相似，9.1.1节推荐的齿间距和切削液也适用于带锯。高速带锯在锯片前方摩擦发热，从而使金属软化，容易切割。奥氏体不锈钢的导热率相对较低有利于保持锯片前方的热量，这种切割方法非常适合奥氏体不锈钢。由于该方法涉及到发热，因此有可能降低切口的耐腐蚀性。

9.2 砂轮片切割

砂轮片是指用粘合剂和磨料制成的切割片，通过高速旋转实现切割，这方法常用于小截面切割和薄规格钢板直线切割。氧化铝切割片常用于不锈钢的砂轮切割。砂轮切割可以是干切，也可以使用可溶性油脂乳液。使用砂轮切割时，必须注意避免切口过热。



用于切割不锈钢的典型带锯。

9.3 剪切

直线剪切是一种快速、精准和高效的切割金属和合金的方法。由于奥氏体不锈钢的延展性和加工硬化速率都高，所以，剪切机的功率要大于剪切普通低强度碳钢所需的功率。例如，剪切6.35mm(0.25英寸)厚碳钢的剪切机，只能剪切4.75mm(0.187英寸)厚的304不锈钢(19)。先进的高强度剪切机可以剪切25mm(1英寸)以内的标准奥氏体不锈钢板，剪切形状和尺寸精度非常好。为了剪切强度更高的高性能奥氏体不锈钢，剪切机的额定剪切厚度必须随着它们相对于304不锈钢强度的增加而减小。

9.3.1 设备要求

剪切奥氏体不锈钢对剪切机的刚度、剪刀锋利度和参数设定提出更高的要求。剪刀应采用优质工具钢，经过淬火和回火处理达到强度

和韧性的合理组合。剪刀要免受车间粉尘的污染，经常检查，避免磨损造成金属积聚。剪切奥氏体不锈钢的剪刀间隙应小于碳钢。直线剪切时，间隙通常为材料厚度的5%。为了对抗奥氏体不锈钢所需的更大的剪切力，夹具的夹紧力必须增加。直线剪切通常不需要润滑剂，但是，可以用可剥离薄膜保护表面。

倾角/剪切角(图25)影响剪机的功率要求。较小的角度要求较大较大的功率/力，但变形小。剪切角度不应小于 $1/2^\circ$ 。较大的倾角/剪切角(例如 3.5°)可以降低所需的功率/力，但是会增大变形。角度增大还需要加大夹具的夹紧力(16)。

9.3.2 切口

切口有明显的分区，包括切口表面塌角、磨光区或剪切区、断裂区和切口底面的毛刺(图25)。磨光区

和断裂区的深度取决于合金、金属厚度、剪切间隙、润滑和刀具涂层。磨光区的理想深度取决于金属和切割类型。

操作人员必须明白，剪切间隙、理想落剪速度和理想的剪切深度随金属变化，一定要进行调整。低碳钢，不锈钢，铝和黄铜的理想设定值各不相同，各系列的不锈钢，有时本系列的不锈钢都不相同。例如，在一定的间隙下，低碳钢的剪切深度可能为50%，不锈钢为30%，铝为60%。如果磨光面的目标值是50%，那么，剪切不锈钢的间隙必须缩小。

紧密的间隙可以产生一个完全或几乎完全剪切的切口，表面更加平滑，但是会缩短刀具的寿命。间隙过大会导致应变硬化，对设备提出不必要的要求，甚至会导致较大的粗边毛刺和微裂纹。

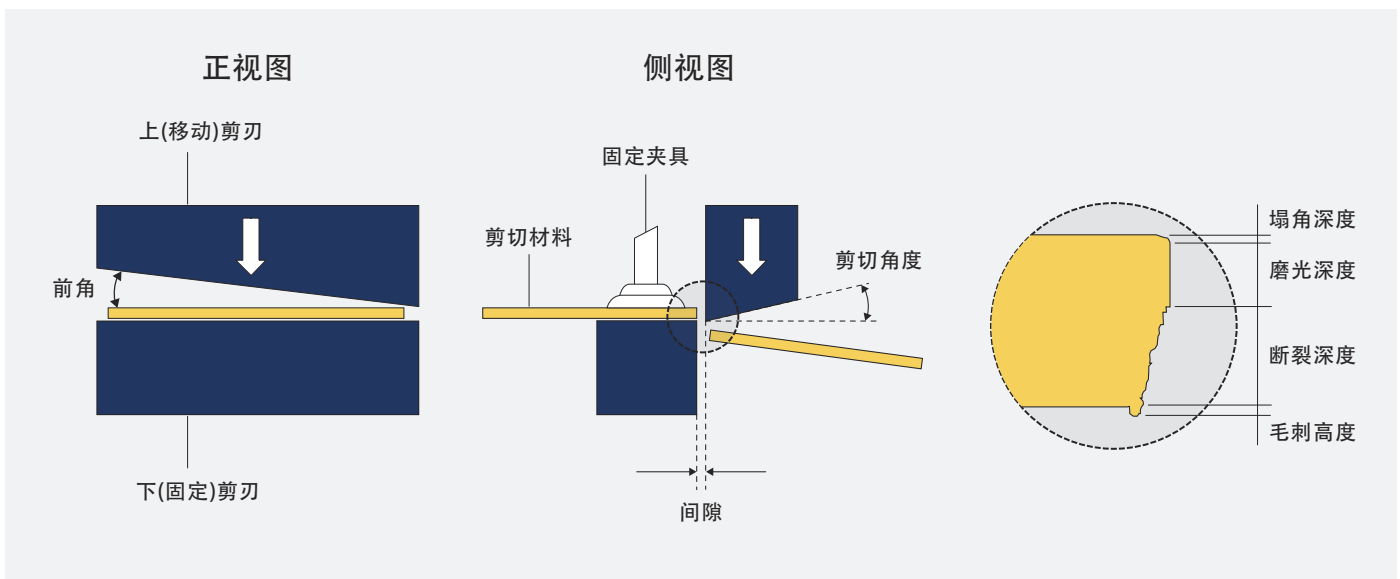


图25：剪切参数(16)和显示切割边缘不同区域的横截面图。



剪切不锈钢板。© IMO A

切口冷作效果明显，硬度增加，毛刺可能会出现边部撕裂和微裂纹。因此，剪切后进行成形加工时容易开裂。这种缺陷可以通过磨削、锉削、机械抛光或电抛光进行弥补，去除毛刺和加工硬化层。

在磨光面和断裂面的交界处，如果剪刀钝化或不干净，可能会有被污染的叠料区，这些区域很容易发生缝隙腐蚀。清洁、光滑的磨光面和断裂面可以提供最佳的腐蚀性能。粗糙区域更容易发生腐蚀，因为它保持水分的时间更长，并积累了腐蚀性的沉积物。当美观性、耐蚀性或清洁度要求较高时，电抛光是消除断裂界面上毛刺和叠料区的一种常见方法。

9.3.3 落料和冲孔

落料和冲孔是使用冲头和模具而非直边剪刀剪切材料的形式。落料用于冲裁分离出所需要的工件，留下的板材为废料。冲孔类似于落料，是在工件上冲孔，冲裁去掉的部分

为废料。使用润滑剂或专用可剥离薄膜有助于落料和冲孔操作。如果需要扁平的落料件，使用冲头和带刃口的冲裁模。冲孔操作时，冲掉部分是废料，刃口应该在冲头上，模具应放平。

对于孔洞和弧形，间隙约为总冲裁厚度的10%，或一侧5%。公差取决于工厂的设备、精度要求和其它变量。

冲孔时使用锋利的刃口和紧密的间隙，可以减少或避免冲孔切口处的叠料现象。开口(即穿孔)面积的百分比随孔型(六角形、圆形或方形孔，长孔等)的不同而变化。孔的布局可以是队列式，也可以交错排列。为了防止损坏冲床，不锈钢的孔径应大于板厚至少一个尺寸。孔洞和弧形区域将有一个较大的断裂面。



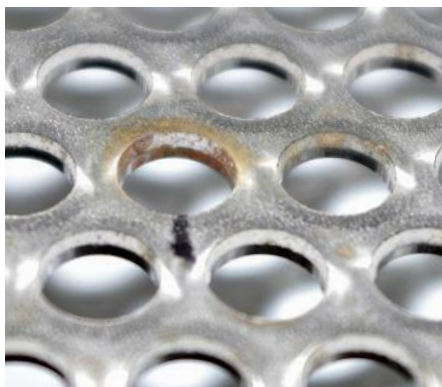
生产不锈钢孔板的冲孔操作。

冲孔或落料时，还有几个减少变形的重要因素。奥氏体合金的特点及其冷加工水平会影响孔形和工艺。孔间的最小距离至少是孔径的一半。如果使用退火处理的薄规格钢板，孔间距可能要更大。调整设定值或工具结构，或使用强度较高的冷轧板可以减少变形。

对于孔洞和弧形，可使用润滑剂或专用的可剥离薄膜，因为这样可以减少功率需求，延长模具使用寿命。如果使用了润滑剂，发货前一定要把钢板表面残留的润滑剂清理干净。

9.3.3.1 穿孔

冲孔是最常见和性价比最高的标准圆孔、椭圆穿孔和其他同一形状穿孔加工方法。冲孔变形可能是工具钝了、模具间隙、冲头偏差、润滑不足或冲孔方法等原因造成的。工具钝了需要更大的冲压力，从而产生更多的应力和变形。模具间隙过大会拉伸钢板，影响平直度。冲头偏差对小孔(孔径与厚度之比 $\leq 2:1$)有影响，会造成变形。



采用冲孔来穿孔会产生可见的磨光面和断裂面。钝工具造成的断裂面更粗糙，抛光面和断裂面的交界处出现金属重叠，这些孔更容易受到腐蚀。© Catherine Houska



水射流切割不锈钢板。© Lubos Chlubny/Shutterstock.com

集群冲头、全导向工具和定制模压工具有助于减少变形，但也会加大制造成本。当其他可能影响平直度的原因被排除后，应考虑增大孔径和孔间距。即使注意了所有细节，冲孔后可能还需要平整。

如果设计提出更高的孔密度，不同的孔尺寸，特殊的孔形，钢板厚度超出常规，以及其他一些涉及穿孔板平整度的要求，建议采用钻孔。



钻孔可以根据板材的厚度和其他要求进行设定。很多时候，水射流切割法可以在薄钢板上切割出精美的孔形。

9.4 水射流切割

水射流切割是利用喷嘴产生携带细磨料颗粒的高压水射流进行切割。这种方法切割金属和非金属材料都非常有效。该工艺使用大容量泵，水和电的需求量非常大。该方法可以在不产生热影响区(HAZ)，也不改变工件冶金组织的情况下，切割厚规格不锈钢($>100\text{mm}$)。虽然水射流切口质量好，但切割断面较厚时，切面的坡口角较大。用该方法切割薄钢板不经济，但是把多张薄钢板摞起来，一次可以切割多个工件。



用于卫生用途的GTA焊接和液压成型的奥氏体不锈钢容器封头在进行等离子修整。
© DCI, Inc, St. Cloud, MN USA

9.5 等离子切割

等离子切割是切割厚度25mm(1英寸)以上的所有牌号奥氏体不锈钢中厚板最常用的方法。等离子枪的设计明显地提高了精度和切口质量，是进行直线或特殊形状切割的理想工艺。在有些情况下，等离子切割的切口质量非常好，无需进一步处理就可以直接使用或作为焊接接头。由于等离子切割确实涉及到高温和金属局部熔化，因此切口的耐蚀性降低。手提式等离子切割机可切割成形工件或试样。水下等离子切割可减少烟尘。

在等离子切割中，不锈钢的牌号和切割厚度是选择等离子体气体时必须考虑的重要因素。避免使用含氧气体，因为氧会导致表层形成氧化铬层，从而消耗表层以下的铬，降低耐蚀性。切口表面轻微变色，表明铬氧化。如果发生严重变色，则需要后续酸洗或磨边以恢复耐蚀性。氮气辅助气体的认

证纯度至少要达到99.95%，最高含氧量200ppm。除N₂外，其他常用于不锈钢等离子切割的气体还有N₂和H₂或Ar和H₂的混合气体。

气体流速、电弧电流、喷嘴设计、切割速度等变量都会影响切口的宽度、形状和质量。对于不同牌号和



利用激光切割工艺快速切割不锈钢板。

不同厚度的不锈钢，应咨询等离子切割设备制造商的具体建议。

9.6 激光切割

在激光切割中，激光束熔化材料，同时氮气射流将熔融液从切口吹开。氮气可防止氧化，避免耐腐蚀性损失。采用激光切割不锈钢时，氮气压力要大于切割碳钢时的氧气压力，为了有效地吹走熔融金属，氮气压力需随着材料厚度的增加而增大。与等离子切割相比，激光切割速度更快、切口宽度窄，切口质量高，通常可以直接使用，无需对切口做进一步处理。相对于等离子切割，激光切割的缺点是切割厚度有限。目前的激光切割设备只能切割最大厚度不超过12毫米的不锈钢。激光切割机可将高性能奥氏体不锈钢和标准奥氏体不锈钢切割成最终尺寸，不需要再进行额外的机加工处理。高性能和标准奥氏体不锈钢的激光切割特性差异很小。

10 机加工

在奥氏体不锈钢家族中，不同牌号的机加工性能差别很大，同一牌号也会有很大不同。奥氏体不锈钢的高强度、高延展性和高加工硬化率对机加工设备的功率提出了高要求。这些性能会对刀-屑接触面造成明显磨损。由于奥氏体不锈钢的导热率低，所以通过工件无法有效地去除变形和磨损产生的热量。这些因素造成奥氏体不锈钢的机械加工比碳钢困难。高性能奥氏体不锈钢的强度更高，带来的挑战更大。不过，采用基本的不锈钢机加工原则（大功率机床，牢固的固定夹具，在原加工硬化层下正向进刀）可以成功地对这些不锈钢进行机加工。

按机加工性能奥氏体不锈钢可分为四类：

- 标准不锈钢，包括304L和316L中厚板和薄板。
- 切削性能优化的标准不锈钢，以棒材产品为代表。例如，少量增加硫含量提高切削性能的改良牌号。
- 易切削不锈钢，通常为棒材，如303或改良的304，经过先进钢包处理，钢中的硫化物和氧化物夹杂的成分、尺寸、形状和分布得到控制，实现切削性能最大化。
- 高合金牌号和高强度不锈钢，包括高性能奥氏体不锈钢。

标准不锈钢的中厚板和薄板是为最佳的耐蚀性、表面质量和加工性

能设计的，但切削性能不包括在内。切削性能经过优化的标准牌号可满足所有规范要求，但是，为了获得最佳的切削性能，要通过特殊的工艺手段（通常是专有技术）调整合金成分。优化处理通常包括严格控制成分和显微组织，特别是硫化物和氧化物等非金属夹杂的尺寸、形状和分布。

易切削牌号的切削性能最好。具有最佳切削性能的牌号，如303不锈钢，硫含量下限相对较高，从而提高了可切削性能。303的硫含量最高可达0.3-0.4%，而304的硫含量普遍低于0.005%。硫生成的硫化物夹杂会降低切削力，有助于切屑形成。虽然增加硫含量可以改善切削性，同时也会产生有害后果。例如，硫化物夹杂可显著降低耐腐蚀性、韧性和延展性，还会提高焊缝凝固开裂的敏感性。例如，303的耐点蚀能力明显下降，而且被认为是不可焊接的。

高性能奥氏体不锈钢比标准奥氏体不锈钢切削难度大的原因很多。最为重要的是，为了改进热加工性能和耐腐蚀性能，它们的硫含量非常低（0.001%或更低）。它们的高钼含量造成工具磨损更严重。最后一点，氮对切削性能特别不利，因为氮大幅提高了强度、加工硬化率和韧性。

10.1 通用指导意见

下列机加工原则适用于所有不锈钢：

- 使用大功率、刚性好的加工设备，配以高强度和高刚性刀具和工件夹具，以便在前道次加工硬化层以下进行深度切削。加工高合金钢时，这一点非常重要。由于奥氏体不锈钢加工硬化率高，会产生额外载荷，刀尖圆弧半径不应大于刀具合理寿命所需的半径。
- 刀具合理使用寿命期内，刀刃要始终保持锋利。加工优化切削钢和易切削钢工件时，可实现高水准几何形状，但是，切削高合金钢时，锋利的刀刃不可能使刀具具有足够的强度。
- 在前一道次切削造成的加工硬化层下进行切削时，进刀量要足够大（图26），一般不要小于0.076mm（0.003英寸）。
- 为了避免形成加工硬化层，切削速度要低于刀具刚性和振动参数允许的下限。
- 定期更换或研磨刀具，避免其钝化。刀刃不锋利容易形成加工硬化层。
- 一定要在切削点注入大量的冷却剂/润滑剂。最好使用具有极压（EP）添加剂的乳液。
- 在加工标准不锈钢和不易加工的高合金钢时，使用涂层硬质合金刀片，特别是有断屑槽的涂层硬质合金钢刀片，可以获得好的切削效果。
- 使用优质高速钢刀具。

10.2 不锈钢的切削性能指数

不锈钢的切削性能很宽泛，取决于不锈钢牌号的性能和可能的切削条件。没有哪个切削性能指数可以完全适用于所有牌号或条件，但是，在比较不同牌号时，该指数具有参考价值。对一个新牌号进行切削加工时，指数可帮我们确定起始条件。图27利用切削性能指数对几个不锈钢牌号进行了对比。

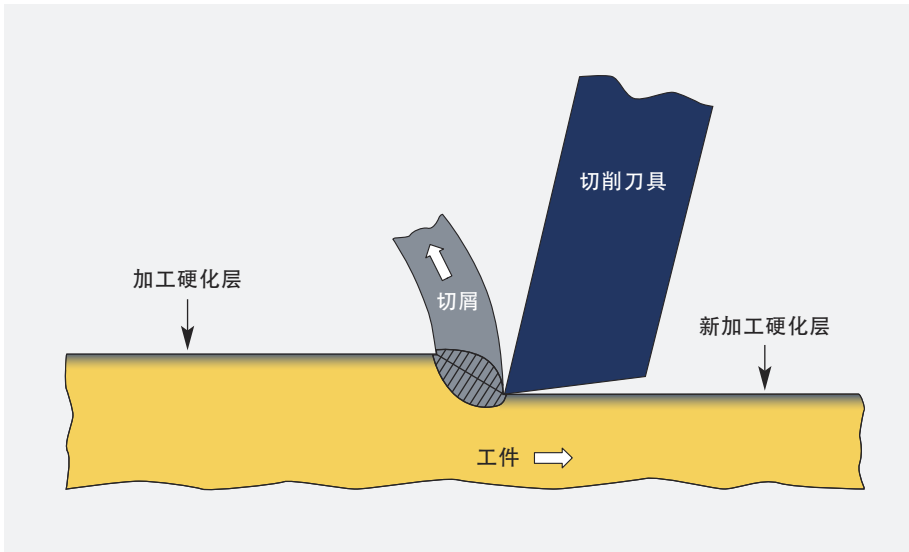


图26：正向切削去除前道次加工硬化层下方的材料。(基于参考文献20)

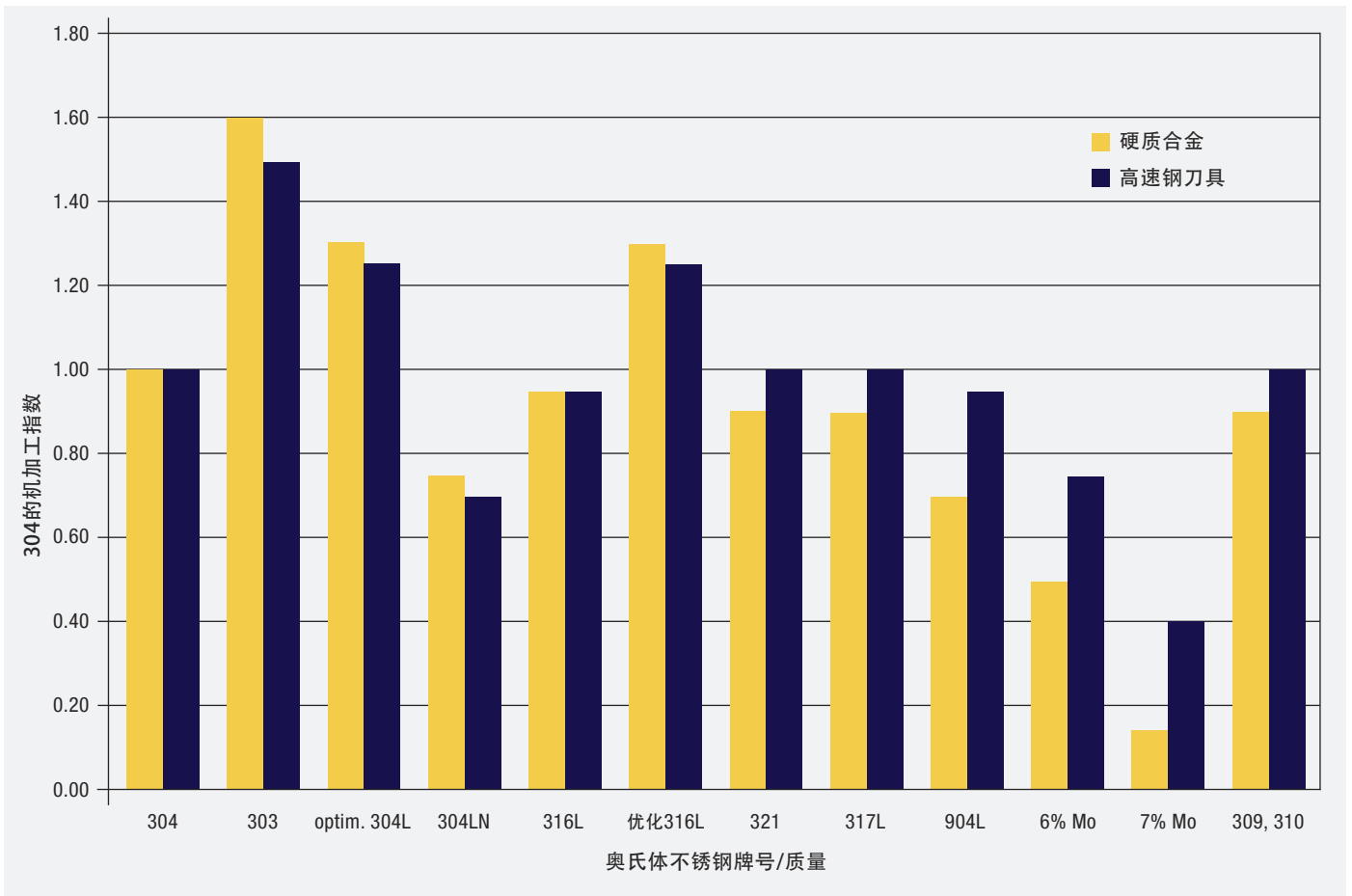
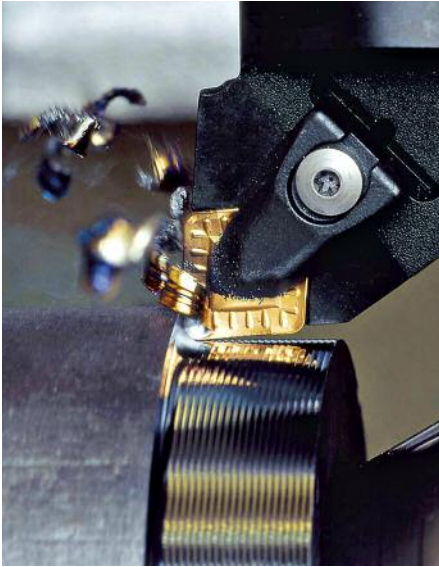


图27：标准304不锈钢与其它奥氏体不锈钢切削性能对比。硬质合金刀具和高速钢刀具的相对切削性相似。(21)



采用有断屑槽的硬质合金刀具车削不锈钢。
© Seco Tools

10.3 车削

车削奥氏体不锈钢需要刚性最佳，振动量最小的车床。还要有断屑槽。表12为奥氏体不锈钢车削指导意见。

10.4 利用硬质合金进行平面铣削

利用硬质合金进行铣削时，按照以下原则能获得最佳效果：

- 粗加工和切削深度超过0.5 mm (0.020英寸)时，使用涂层刀片或未涂层高韧性镶装刀片。铣削精细表面时，使用更坚硬的未涂层镶装刀片，更高的速度和更小的进刀量。
- 进行同向铣削时，每齿进刀量应在0.10-0.25mm(0.004-0.010英寸)之间，采用高正轴向前角，微负径向前角，切削宽度为所用铣削刀具直径的1/2-3/4。

表12：奥氏体不锈钢车削指导意见

指导意见	硬质合金刀具		高速钢刀具
	粗削	精削	
标准牌号			
速度, m/min (feet/min)	120–150 (395–490)	150–210 (490–690)	20–25 (65–82)
进给量, mm (in/turn)	0.3–0.6 (0.012–0.024)	0.05–0.30 (0.002–0.012)	0.05–0.20 (0.002–0.008)
切削深度, mm (in)	2–5 (0.080–0.20)	0.5–2.0 (0.020–0.080)	0.5–2.0 (0.020–0.080)
ISO等级	P20–P35	P10–P15	
优化牌号			
速度, m/min (feet/min)	170–180 (560–590)	230–250 (750–820)	25–35 (82–115)
进给量, mm (in/turn)	0.3–0.5 (0.012–0.020)	0.1–0.3 (0.004–0.012)	0.3–0.5 (0.012–0.020)
切削深度, mm (in)	2–5 (0.080–0.20)	< 2 (< 0.080)	2–5 (0.080–0.20)
ISO等级	P20	P10	
高性能牌号			
速度, m/min (feet/min)	60–80 (195–262)	80–100 (262–307)	4–6 (12–19)
进给量, mm (in/turn)	0.3–0.6 (0.012–0.024)	0.05–0.30 (0.002–0.012)	0.05–0.20 (0.002–0.008)
切削深度, mm (in)	2–5 (0.080–0.20)	0.5–2.0 (0.020–0.080)	0.5–2.0 (0.020–0.080)
ISO等级	P30–P50	P25–P35	

- 断续切削最重要的是及时排掉切屑，以免粘在刀具上受到二次切削。切削速度足够快，切屑/刀具界面温度适当，切屑就不会粘在刀刃或刀片表面。粗加工时，最好不要为此使用冷却剂。精加工时，冷却剂有助于切屑脱离刀具，但为了确保切屑不粘在刀具上，需要提高速度，减少进刀量。

表13为平面铣削参数指导意见。



使用硬质合金刀具侧铣。© Seco Tools



用硬质合金刀具对奥氏体不锈钢进行平面铣削。© Seco Tools

表13：奥氏体不锈钢平面铣削参数指南

指导意见	硬质合金刀具		高速钢刀具
	粗削	精削	
标准牌号			
速度, m/min (feet/min)	160–190 (525–625)	190–220 (625–720)	15–20 (50–65)
进给量, mm (in/tooth)	0.2–0.4 (0.008–0.016)	0.1–0.2 (0.004–0.008)	0.10 (0.004)
切削深度, mm (in)	2–5 (0.080–0.20)	1–2 (0.040–0.080)	0.1 x 刀具直径
优化牌号			
速度, m/min (feet/min)	180–210 (600–700)	305–350 (1000–1150)	25–30 (80–100)
进给量, mm (in/tooth)	0.2–0.4 (0.008–0.016)	0.1–0.2 (0.004–0.008)	0.10 (0.004)
切削深度, mm (in)	2–5 (0.080–0.20)	1–2 (0.040–0.080)	0.1 x 刀具直径
高性能牌号			
速度, m/min (feet/min)	40–60 (130–195)	60–80 (195–262)	6–8 (20–25)
进给量, mm (in/tooth)	0.2–0.4 (0.008–0.016)	0.1–0.2 (0.004–0.008)	0.10 (0.004)
切削深度, mm (in)	2–5 (0.080–0.20)	1–2 (0.040–0.080)	0.1 x 刀具直径

10.5 用高速钢钻头螺旋钻孔

当使用高速钢刀具时，防止刀尖过热非常重要。奥氏体不锈钢导热率低，容易过热，导致钻头软化，钻刃受损，温度进一步快速升高，最终毁坏钻头。因此，钻尖冷却至关重要。持续冷却和定期提起钻头使冷却液进入钻孔是防止过热的有效方法。

给不锈钢钻孔时，进刀量要大，但这样会加大轴向载荷，考验钻头的

扭曲极限。保持钻头稳定垂直对准工件可有效地防止振动和扭曲。钻头不宜超过钻孔所需的长度，以保持操作稳定性。标准、优化和高性能奥氏体不锈钢的钻孔速度和进给量，建议参见表14a和14b。

不锈钢螺旋钻孔指导意见：

- 为达到最佳的断屑效果，钻尖角应为130°。如果钻尖角偏小，比如109°，孔壁会更加平滑，但是，屑片会更长。

- 钻孔直径较大时，使用自动定心横刃钻头。
- 冷却和润滑都需要。10%乳液冷却剂要充分流到钻尖。对于实心钻头，当加工深度大于钻头直径两倍时，应把钻头从钻孔中抽出，让冷却剂流入钻孔中。持续冷却则不需要抽出钻头，清理碎屑时除外。
- 采用TiN涂层钻头可以提速10%，采用持续冷却可以提速10-20%。

表14a：用高速钢钻头对奥氏体不锈钢进行螺旋钻孔的建议参数(公制单位)

钻头直径(mm)	速度(m/min)/进给量(mm/rev)		
	标准牌号	优化牌号	高性能牌号
1-3	6-10/0.05	10-12/0.10	5-8/0.04
5	10-12/0.10	12-14/0.20	8-10/0.08
10	10-12/0.20	12-15/0.30	8-10/0.15
15	10-12/0.25	12-15/0.40	8-10/0.20
20	10-12/0.30	12-15/0.45	8-10/0.25
30	10-12/0.35	12-15/0.55	8-10/0.30
40	10-12/0.40	12-15/0.60	8-10/0.35

表14b：用高速钢钻头对奥氏体不锈钢进行螺旋钻孔的建议参数(英制单位)

钻头直径(in)	速度(ft/min)/进给量(in/rev)		
	标准牌号	优化牌号	高性能牌号
0.040-0.120	20-33/0.002	33-40/0.004	16-26/0.0015
0.20	33-40/0.004	40-46/0.008	26-33/0.003
0.40	33-40/0.008	40-49/0.012	26-33/0.006
0.60	33-40/0.010	40-49/0.016	26-33/0.008
0.80	33-40/0.012	40-49/0.018	26-33/0.010
1.20	33-40/0.014	40-49/0.022	26-33/0.012
1.60	33-40/0.016	40-49/0.024	26-33/0.014

11 热处理-退火和消除应力

奥氏体不锈钢不能通过热处理硬化。对这些合金进行热处理的目的是去除冷加工硬化效应，再次溶解有害的二次相，将残余应力降低到可接受的水平。热处理还可以使冷加工后的不锈钢产生晶粒度更小的再结晶组织。

固溶退火可以软化冷加工后的材料，溶解热加工或焊接过程中可能析出的二次相。术语“完全退火”通常指的是材料处于最佳冶金状态，二次相完全溶解，金相组织完全均质化。完全退火态的不锈钢，耐腐蚀性能和延展性最好。由于固溶退火是在高温下进行，空气环境下退火会在表面产生氧化皮，必须通过除鳞或酸洗去除氧化皮，恢复表面的耐腐蚀性能。

消除应力处理降低成形和焊接过程中产生的残余应力，降低变形和应力腐蚀开裂的风险。应力处理的操作温度低于完全固溶退火温度，一般只会形成少量的氧化铁皮。全固溶退火热处理也可以减少残余应力，可作为低温消除应力热处理的替代方法。该方法特别适用于采用低温消除应力热处理容易析出有害相的合金。

11.1 固溶退火

11.1.1 准备

退火前，必须要去除表面的油脂，油，切削液，成型润滑剂，彩笔标记和其它污染物。退火可使污染物“燃烧”嵌入表面，必须进行修磨，否则很难去除。含碳污染物渗

入表面会产生碳化或敏化，使用过程中易产生晶间腐蚀。因此，热处理前的表面清理对保证产品质量至关重要。清理方法有浸泡或喷洒化学试剂。不锈钢脱脂用的清洗剂包括热碱性溶液和化学溶剂。有关正确清理不锈钢的更多信息，请参阅第15章。



在任何热处理之前，表面脱脂是必不可少的清洁步骤。© Sandvik

表15：ASTM A480规定的几种奥氏体不锈钢的热处理温度

UNS No.	牌号	退火温度*	
		°C	°F
S20101, S30400, S30403, S30409, S31600, S31603, S34700	201, 304, 304L, 304H, 316, 316L, 347	1040	1900
N08020	Alloy 20	925-1010	1700-1850
N08904	904L	1095	2000
N08367	6% Mo	1105	2025
S31254	6% Mo	1150	2100
S31266	6% Mo	1150	2100
N08926	6% Mo	1100	2010

* 最低温度，除非另有说明

必须避免铅、铜、锌等低熔点金属污染表面。退火时它们会造成晶界渗透，导致所谓的液体金属脆化和晶间开裂。因此，在退火和焊接等高温处理前，必须把表面残留的这些污染物清理干净。

11.1.2 温度

最低退火温度是指组织均质化和溶解碳化物和金属间析出物的最低温度。为了确保析出物完全溶解并恢复耐腐蚀性，退火温度必须高于此温度。退火温度的上限以无翘曲、避免晶粒过度生长和尽量把难以清理的氧化皮数量降至最低为基准。表15列出了一些奥氏体不锈钢的最低退火温度。高性能奥氏体不锈钢需要在高温下对显微组织进行均质

化，所以它们的固溶退火温度高于标准奥氏体不锈钢。

11.1.3 退火时间

在固溶退火温度保持2-3分钟足以

溶解少量的碳化物和其它二次相，也可以使冷成形材料软化。固溶退火时，为了确保工件从外到内全部达到固溶退火温度，保温时间通常是2-3分钟/毫米厚度(3分钟/0.1英寸厚度)。如果析出物量大，特别是有 χ 和 σ 相时，需要延长保温时间。

固溶退火时间过长或温度太高都会产生大量氧化皮，清理难而且成本高。长时间的退火还会增加热处理过程中尺寸变形不合格的可能性。高钼高性能奥氏体不锈钢在自然通风炉内迅速形成氧化皮。三氧化钼通常会挥发，以气体形式离开表面。如果挥发受到抑制，液态三氧化钼就会累积在表面，使氧化过程加速。这就是所说的“剧烈氧化”。最大限度减少高钼钢氧化的措施有：

- 避免产生抑止挥发的条件(装填太紧密，炉子密封过严)。



不锈钢部件批量热处理。© Fondinox

- 不能对氧化皮严重的材料进行重新退火。
- 避免长时间暴露在高于最低退火温度的环境。
- 使用可操作的最低退火温度。
- 使用保护气氛

11.1.4 气氛

空气和氧化燃烧气体形成最为经济而且效果好的不锈钢退火气氛。不过，空气退火产生的氧化皮必须去除，以恢复耐腐蚀性。氩气，氮气，氢气，裂解氨气，氢/氮混合气体等保护性气氛，还有真空，可减少氧化皮形成，但成本较高。光亮退火一般是在露点为 -40°C (-40°F)或更低的氢气或裂解氨气中进行。正常操作情况下，保护气氛退火不会产生肉眼可见的氧化皮，所以退火后无需清理。

11.1.5 冷却

为了防止碳化铬或其它金属间相(见3节)的析出，奥氏体不锈钢可能需要在退火后进行快速冷却。是否需要进行快速冷却和选择何种冷却方式取决于断面尺寸和牌号。

在绝大多数情况下，薄断面的304L和316L经过空气冷却不会析出有害相。随着断面尺寸、碳含量和合金含量的增加，进行快速冷却的必要性也随之增加。高性能奥氏体不锈钢不论薄厚都需要进行快速冷却。常用的冷却方法有强制空气冷却，喷水冷却或水淬冷却。真空退火后，进行惰性气体淬火不会产生氧化皮。

如果退火后的材料还要继续进行热



锻件在固溶退火炉出口水淬。© Officine Ambrogio Melesi

加工，例如焊接，那么，退火后最好进行最大程度的冷却，例如水淬。这样可以使材料更好地抵御接下来的热周期所产生的不良影响。在选择冷却方法时，应考虑可能发生的变形和新的残余应力。

11.1.6 退火后清理

由于热处理氧化皮富含铬，所以紧挨氧化皮的金属的铬含量减少，耐腐蚀性能降低。要完全恢复耐腐蚀性，必须要去除氧化皮和贫铬金属层。

最常用的清理方法是喷丸去除氧化皮，然后通过酸洗清除贫铬金属。酸洗不锈钢最常用的方法是浸没式酸洗，也可利用喷淋，凝胶和软膏进行酸洗。

酸洗用的酸液非常有害，必须按照安全规程使用(通风，佩戴护目镜和手套，穿安全服等)。酸洗后的工件必须用大量清洁的低氯水进行中和彻底漂洗。按照当地危险废物管理规定单独收集和处理废液。

15.2节详细介绍了清理方法。请读者在进行清理前，仔细地阅读该节内容。

11.2 消除应力

消除应力的温度低于退火温度，而且不足以溶解析出物。消除应力不能将残余应力全部消除，只能去除部分，对材料硬度的影响极小。由于温度较低，消除应力进程缓慢，以小时计算，固溶退火过程是按分钟计算。消除应力的温度通常

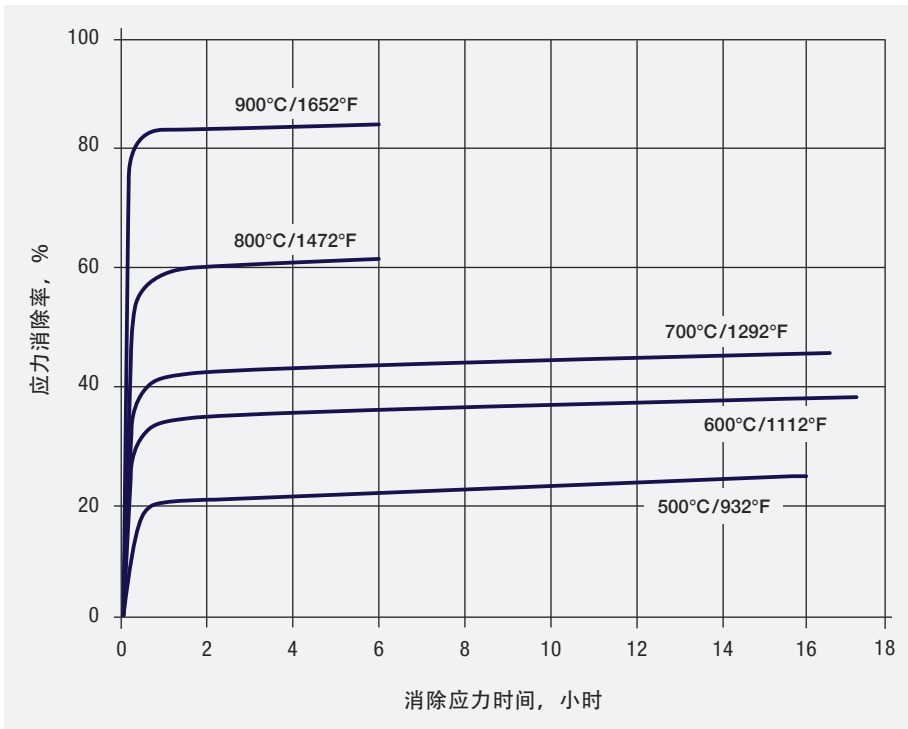


图28: 347不锈钢消除残余应力的温度和时间。退火前残余应力为230 MPa(33ksi)(22)

会降至二次相析出温度的下限。在这些温度下，为了防止降低耐腐蚀性能的析出相产生，必须谨慎选择退火时间。退火时间关系到应力消除量的多少。当决定是否采用低温消除应力、中温消除应力还是全固溶退火时，必须仔细权衡消除应力的潜在优点与敏化风险。

许多使用不锈钢，碳钢或合金钢混合结构的情形都要求对碳钢进行应力消除。在这种情况下中，以碳钢规范要求的退火时间和温度为准。工程技术人员必须确认碳钢所需的热周期是否会对不锈钢造成负面影响。如果会造成负面影响，可能需要采用其它不锈钢牌号。

低温消除应力通常在“安全”温度区间内进行，上限不超过540°C (1000°F)。图28表明经过该处理，原始应力可减少近40%。低温处理的最大优点是没有敏化风险。该图还表明540-900°(1000-1650°F)中温处理可消除更多的应力。但是这个温度区间是碳化物和二次相析出的温度区间。因此，必须严格控制保温时间。所幸绝大多数应力都是在达到中等温度的头半个小时消除的。

当采用中温消除应力时，必须要考虑所有热周期对工件产生的累积效应。消除应力周期本身包括加热，保温和冷却。在消除应力前，多道

次焊缝的热影响区(HAZ)可能已在该温度下暴露相当长的时间。在临界TTS区域内消除应力增加了热暴露时间，会造成二次相的意外析出，降低热影响区的耐腐蚀性能和机械性能。绝大多数高铬或高钼高性能奥氏体不锈钢会在相当短的时间内形成金属间相，所以它们只能进行低温消除应力处理。

消除应力后的部件采用何种冷却值得深思。由于热收缩的差异，高冷却速率，如水冷却，可能会重新产生应力。要冷却不同截面的大型复杂部件又不产生新应力是非常困难的。对于在敏化时间和温度区间进行的处理而言，强制空气冷却到析出温度的下限，接着进行自然空冷是不错的选择。一般情况下，低温消除应力处理后进行自然空冷就可以。

消除应力处理前，不锈钢的表面处理和固溶退火的要求一样，要彻底去除污染物。低温消除应力处理不会像固溶退火那样，产生大量的氧化皮，但是会造成表面氧化。如果处理后表面呈现金色或蓝色，就需要进行酸洗，恢复其耐腐蚀性能。

12 焊接、硬钎焊和软钎焊

焊接，硬钎焊和软钎焊广泛应用于不锈钢连接。不锈钢的连接工艺必须保护母材原有的耐腐蚀性和机械性能。接头和母材的性能差异可以通过接头制备、连接方法和最终清理尽量缩小。本节提供关于不锈钢连接和焊接的指导意义。虽然高性能奥氏体不锈钢的连接技术与标准奥氏体牌号相同，但需要采取一些额外的预防措施。



乳品厂的不锈钢焊接储罐。© iStock.com/Bim

12.1 焊接

12.1.1 物理特性对焊接的影响

热膨胀系数、电阻率和导热系数都是影响焊接性能的重要物理参数。表16汇总了一些碳钢和标准不锈钢的参数。请注意，奥氏体不锈钢的物理性能与碳钢的物理性能有很大不同。

由于热膨胀系数(CTE)较大，奥氏体

不锈钢的变形趋势增加。因此，为了减少变形，奥氏体构件定位焊点的间距应小于碳钢。

由于奥氏体不锈钢电阻率比碳钢大，产生同等热量所需的电流较低。再加上熔点较低，所以，焊接

奥氏体不锈钢所需的焊接电流也比焊接碳钢低。

低导热率使热量集中在奥氏体不锈钢的焊缝附近。与碳钢相比，温度梯度更陡，产生收缩应力和变形的趋势增大。导热率低导致散热慢，

表16：奥氏体不锈钢和碳钢的物理性能

物理性能	碳钢	奥氏体不锈钢 19 Cr - 9 Ni	说明
热膨胀线性系数	11.7 6.5	17.6 9.8	20-628°C (20-500°C 用于不锈钢): [x 10 ⁻⁶ /K] 68-1162°F (68-932°F 用于不锈钢): [x 10 ⁻⁶ /°F]
相对导热性	100 100	28 66	%，相对于碳钢 100°C %，相对于碳钢 650°C
电阻率	0.125 1.25	0.72 1.26	20°C (68°F) Ω·mm ² /m 885°C (1625°F) Ω·mm ² /m
熔点(大约)	1540 2800	1425 2600	°C °F

焊缝金属和热影响区持续高温的时间更长。因此，焊件较长时间处于形成碳化物和金属间相的临界温度区间。

12.1.2 焊口及组对

和碳钢相比，不锈钢焊缝熔融金属的流动性较差，焊接参数相同的情况下，不锈钢焊接熔深偏浅。为了弥补这些缺陷，不锈钢接头的坡口更大，焊缝根部钝边更薄，间隙更宽。设计和制备接头时一定要考虑这些要素，有助于焊缝焊透，又避免焊穿。焊缝接头可以有多种不同的设计形式。Nickel Institute(国际镍协会)的出版物No.11007(5)给出了不同焊缝接头的详细图示。

12.1.2.1 焊口制备

认真清理焊口边部是成功焊接奥氏体不锈钢的重要环节。平直，干净，无毛刺的焊口便于接头组对，有助于电弧稳定，使焊缝熔透深度均匀。简单地说，做好焊口制备有助于焊工焊出优质焊缝。机加工焊口最理想，如果修磨能去除毛刺，并做到间隙均匀，也可以采用砂轮修磨。

12.1.2.2 焊口清理

氧化物：不锈钢在等离子或激光切割过程中形成高熔点氧化物。如果焊接前不把切口氧化物清理干净，它们就会污染焊缝金属，成为内应力集中源和腐蚀发生点。焊接前须通过机加工或细砂轮去除所有氧化物，露出母材。钢丝刷，即使是不锈钢钢丝刷，也不能保证把粘得很紧的氧化物清除掉。建议用非金属

磨料进行焊前表面清理。

有机污染：如果焊接前未把有机污染清理干净，会造成焊缝裂纹和气孔。有机污染物中的碳在不锈钢中溶解，造成碳化铬敏化。油污，切削液或彩笔标记等有机污染物必须用相应溶剂清除。

金属污染：被焊接热熔化的铜，铅和锌渗透到晶界，使不锈钢变脆。这些金属污染通常是由于与刀具和衬板接触，或在运输储存过程中接触到这些金属而造成的。焊接前必须把它们清理干净，避免所谓的液态金属脆化。去除金属污染的最好方法是修磨和酸洗。

12.1.2.3 组对，定位和夹持

对于高性能奥氏体不锈钢，焊接前认真组对很关键，因为是全奥氏体，所以需要低热量输入，以防止产生热裂。焊工不必为了连接较大或不规则的根部间隙而“摆动”。组对良好可以使整个焊缝的间隙宽度一致且对齐。这可以通过精准的焊口制备和焊缝夹持或定位来实现。

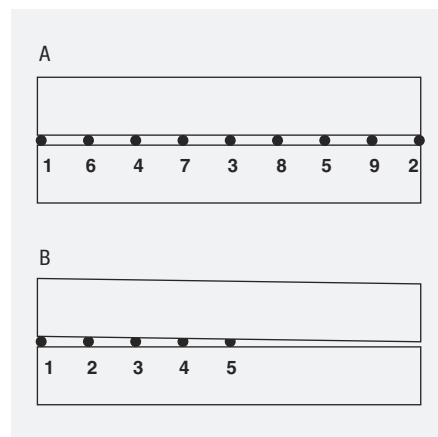


图29：正确的定位顺序，避免焊接过程中间隙闭合，A正确，B不正确。(5)

表17所示为奥氏体不锈钢定位焊的适当间距。图29给出了保持直焊缝间距宽度一致的点焊定位顺序。焊接管道时要纳入最终焊缝的点焊不能全熔透，而且要确保没有氧化。大厚度工件的定位焊点不能对最终焊缝造成缺陷，这一点非常重要。定位焊点凸出部分、焊缝起头和结尾处要修磨光滑。焊工应避免在定位焊焊缝上引弧或熄弧。定位焊焊缝应采用惰性气体保护，并使用与母材匹配的填充金属。

表17：钢板厚度与推荐的定位焊间距(23)

钢板厚度		定位焊间距	
mm	inch	mm	inch
1-1.5	0.04-0.06	30-60	1.2-2.4
2-3	0.08-0.12	70-120	2.8-4.7
4-6	0.16-0.24	120-160	4.7-6.3
>6	>0.24	150-200	5.9-7.9

表18：焊接常用不锈钢建议使用的填充金属

母材			涂药电焊条(AWS)	裸电焊条/棒(AWS)
牌号	UNS No.	EN No.	A5.4(不锈钢) A5.11(镍合金)	A5.9(不锈钢) A5.14(镍合金)
201	S20100	1.4372	E 308/E 308L ¹	ER 308/ER 308L ¹
201L	S20103		E 308L	ER 308L
304	S30400	1.4301	E 308/E 308L	ER 308/ER 308L
304L	S30403	1.4307	E 308L	ER 308L
316L	S31603	1.4404	E 316L	ER 316L
317L	S31703	1.4438	E 317L	ER 317L
317LM	S31725		参见用于6%Mo不锈钢的填充金属	参见用于6%Mo不锈钢的填充金属
317LMN	S31726	1.4439	参见用于6%Mo不锈钢的填充金属	参见用于6%Mo不锈钢的填充金属
904L	N08904	1.4539	E385或参见用于6%钼不锈钢的填充金属	E385或参见用于6%钼不锈钢的填充金属
Alloy 20	N08020	2.4660	E 320 or E 320L	ER 320 or ER 320L
	N08028	1.4563	E 383	E 383
6%Mo不锈钢				
	S31254 ²	1.4547	E NiCrMo-3, E NiCrMo-4, E NiCrMo-10, E NiCrMo-12, E NiCrMo-13, E NiCrMo-14.	ER NiCrMo-3, ER NiCrMo-4, ER NiCrMo-10, ER NiCrMo-13, ER NiCrMo-14.
	N08367 ²			
	N08926 ²	1.4529		
CN3MN ²	J94651			

1 低碳(“L”)或稳定型不锈钢通常用于焊接制造，除非在某些情况下，对于常规牌号而言，稍高的强度比最佳耐腐蚀性更重要。

2 任何一种钼含量不低于9%的填充金属都适用

12.1.3 填充金属

表18列出了焊接奥氏体不锈钢常用的填充金属。该表仅为指导意见，因为市场上还有其它或专用填充金属。对于6%钼以上的高合金钢，一定要查阅合金生产企业的数据库，并从耐腐蚀和机械性能两个方

面确定填充金属是否匹配。

12.1.4 保护

为了防止焊缝和热影响区(HAZ)氧化，焊接时要对不锈钢采用保护措施。焊接产生的氧化作用会降低耐腐蚀性，增加焊缝金属中

氧化物杂质数量，对机械性能造成不利影响。根据焊接方法的不同，焊接保护可以通过使用焊剂(如：SMAW和SAW)、惰性气体(如GTAW和GMAW)或两者结合(如FCAW)来实现(见12.1.5)。保护气体还可以稳定电弧，对熔透性和焊道轮廓产生作用。表19列出了用于不

同焊接工艺的保护气体。需要气体保护的GTAW和GMAW等焊接方法不适合现场或室外焊接，也不适用于有气流的场地，它们会干扰保护气体，而且气流中的氧会污染焊缝。

为了最大限度地保证焊后的耐腐蚀性，焊缝背面也应进行保护。背面保护气体一般使用氩气、氮气和90%氮气-10%氢气混合气体。氮可在熔池中溶解，增加焊缝的氮含量。氮可提高焊缝强度，还能提高耐点蚀性和耐缝隙腐蚀性。

焊接薄板时，通常使用铜衬板。衬板降低焊缝的温度，防止焊穿，有助于避免惰性气体扩散，保护焊缝背面。重要的是避免不锈钢与铜摩擦，因为相互摩擦会使铜附着在不锈钢表面，一旦熔化会造成液态金属致脆开裂。

12.1.5 焊接工艺

12.1.5.1 气体保护钨极电弧焊 (GTAW, 也称TIG)

气体保护钨极电弧焊主要用于薄板和管道焊接，以及管道焊缝的根部

焊道的焊接。它的焊接速度较慢，但焊缝质量高，没有焊渣和焊接飞溅等有害物质。GTAW不受焊接位置限制。

GTAW通过非自耗钨电极产生电弧，熔化母材。钨极电弧焊有自熔焊(不使用填充金属)，或手工裸焊条和自动喂丝。惰性保护气体通过焊炬送入，保护熔池和钨电极。自熔GTAW可用于焊接标准牌号的不锈钢薄板或为其它焊接方法做打底焊。如果不能进行焊后固溶退火，自熔焊不适用于高性能奥氏体

表19: 各种焊接工艺用的保护气体(24)

工艺	保护气体	优点/缺点
GTAW	99.95% Ar	焊透性好，气体流量低，低烧透风险，优质焊缝，成本高
	Ar + 1-3% N ₂	减少含氮牌号的氮损失，提高耐蚀性，可能使钨电极退化
	Ar + 1-5% H ₂ + 10-30% He	提高渗透性和焊接速度
	Ar + 2% N ₂ + 10-30% He	改善含氮牌号的表面外观
	Ar + 2-5% H ₂	提高熔透性和焊接速度
GMAW	Ar + 2-2.5% CO ₂	稳定性和润湿性好于纯氩气
	Ar + 1-2% O ₂	稳定性和润湿性好于纯氩气
	Ar + 30-40% He + 1-3% CO ₂	改善流动性和焊道外观
	99.95% Ar	适用于全奥氏体不锈钢
FCAW	Ar + 15-25% CO ₂	表面外观、电弧稳定性和机械性能最佳，可用于全位置焊接
	100% CO ₂	增强熔透性和侧壁熔合，可用于平焊和横焊，焊位不当时使用受限

表20: GTAW的典型焊接参数(23)

钨极直径		电流	电压	典型截面厚度	
mm	inch	A	V	mm	inch
1.6	0.063	50-120	10-12	<1.0	<0.040
2.4	0.094	100-230	16-18	1.0-3.0	0.040-0.120
3.2	0.13	170-300	17-19	>2.0	>0.080

不锈钢，因为钼的微偏析可能会导致耐腐蚀性能降低。

GTAW使用恒流电源和 高频起弧效果最好。焊接应采用直流正极性(DCSP)，焊条为负极，因为直流反极性(DCRP)会导致电极退化。

常用的电极为2%钍钨电极EWT_h-2和2%铈钨电极EW_{Ce}-2(见AWS A5.12, EN ISO 6848)。为了更好地控制电弧，焊接薄板时，电极端部磨成顶角20°的锥形，焊接厚板时，电极端部磨成65°小圆形锥点。“正确”的电极端部制备取决于操作员的喜好。对于GTAW自动焊，在实际生产条件下试焊几次，有助于确定理想的几何形状以获得所需要的熔深。

气体透镜和喷嘴盖可以改善保护气体的覆盖性，防止湍流，最大限度地减少保护气体吸入的空气。为防止氧气污染，应在引弧前几秒打开保护气体，灭弧后保持几秒钟再关闭保护气体。表20总结了GTAW工艺的典型焊接参数。

12.1.5.2 熔化极气体保护焊 (GMAW, 也称熔化极惰性气体保护焊或MIG)

熔化极气体保护焊(GMAW)可以使大量焊接金属快速沉积。与气体保护钨极电弧焊(GTAW)或手工电弧焊(SMAW)相比，其焊接速度更快，成本更低。

在GMAW中，自耗裸焊丝也是电

极，焊丝来自丝卷，通过焊炬自动喂入。一般来说，这种焊接属于半自动焊接工艺，焊炬由焊工手动操作。但是在焊缝形状简单时，也可进行自动操作。保护气体通过焊枪送入，保护焊接熔池。

GMAW需用专用设备，包括可变斜率和可变电感控制或具有产生脉冲电弧电流能力的恒压电源。GMAW



人工GTA(TIG)焊。© iStock.com/Lekyum

应采用直流反极性(DCRP)，焊条为正极。GMAW有三种电弧过渡方式：

- 短路过渡：这种方式需要单独的斜率和二次电感控制，适用于焊接厚度厚达约3毫米(1/8英寸)左右的材料。通过从自耗电极反复短路过渡的金属过渡方式，熔敷率相对较低。该方式的热输入最低，特别适用于焊接有变形风险的薄材。也可用于非正常位置焊接。
- 脉冲电弧过渡：这种方式需要产生脉冲焊接电流和电压的专用电源。这种组合的好处是金属熔敷率高于短路过渡，同时热输入适中。也可用于非正常位置焊接。
- 喷射过渡：这种方式电弧稳定，熔敷率高，但热输入大。金属以细液滴的形式过渡。这种方式仅限于平焊，可焊接薄板和3mm (0.120英寸)及以上的中板。采用这种方式进行中等至较深焊缝的长、直焊道焊接是比较经济的。

表21列出了以纯氩气为保护气体，不同焊接过渡工艺的典型焊接参数。这些参数会因混合气体成分不同而变化，最好咨询气体供应商获得针对特定混合气体的参数。

12.1.5.3 药芯焊丝电弧焊(FCAW)

药芯焊丝电弧焊的熔敷率高于GMAW。适用的金属厚度范围广，可用于非正常位置焊接。

FCAW使用与GMAW相同的设备，通过焊炬自动供给填充助焊剂的焊丝。焊丝中的助焊剂产生焊渣，保护焊缝免受空气氧化。焊渣可作

表21：GMAW的典型焊接工艺参数，焊丝直径和焊接工艺(23)

工艺	焊丝直径		电流	电压
	mm	inch		
GTAW短弧	0.8	0.031	90-120	19-22
	1.0	0.039	110-140	19-22
GTAW喷弧	0.8	0.031	150-170	24-27
	1.0	0.039	170-200	25-28
	1.2	0.047	200-270	26-29
	1.6	0.063	250-330	27-30
GTAW脉冲弧	1.2	0.047	75-350	24-30

表22：FCAW的典型焊接参数(25)

工艺	焊丝直径		电流	电压
	mm	inch		
FCAW平焊	0.9	0.035	80-160	22-28
	1.2	0.047	150-280	24-32
	1.6	0.063	200-320	26-34
FCAW立焊	0.9	0.035	80-130	22-26
	1.2	0.047	140-170	23-28
FCAW仰焊	0.9	0.035	80-150	22-27
	1.2	0.047	150-200	24-29

为气体保护的补充，对热影响区起到保护作用。采用自保护FCAW焊条时，助焊剂同样产生保护气体，尽管它从不用于苛刻的耐腐蚀用途。和GMAW焊接一样，该方法分为半自动和全自动两种。不锈钢药芯焊丝电弧焊耗材被纳入AWS A5.22，但是，适用于高性能奥氏

体不锈钢的FCAW焊丝极少。用于不锈钢FCAW的两种主要气体是：含15-25%二氧化碳的氩气，这种气体的焊接性能最好，或100%二氧化碳气体，这种气体的熔透性较好。气体流速一般为20-25升/分钟(0.7-0.9cfm)。FCAW典型的焊接参数见表22。

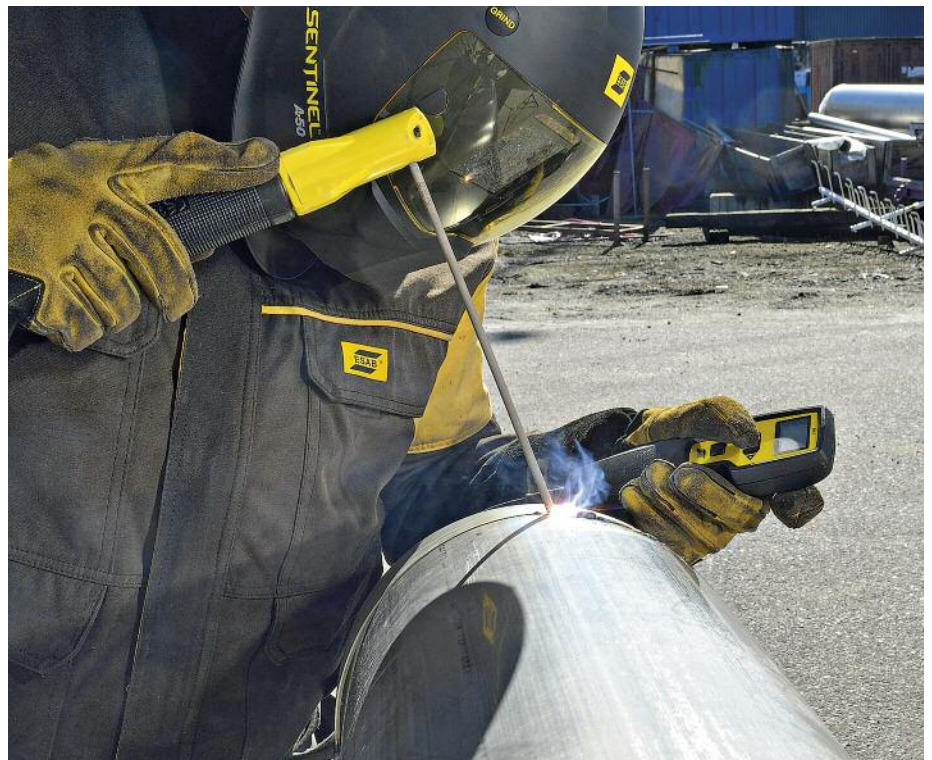
12.1.5.4 手工电弧焊(SMAW也称为焊条电弧焊)

手工电弧焊(SMAW)使用涂有助焊剂的金属丝制成的直焊条,其作用相当于自耗电极。助焊剂保护焊缝免受氧化,形成的焊渣吸收污染物。该焊接工艺通常用于现役设备的补焊和四周不易清理的焊缝。由于不需要保护气体和吹扫气体,手工电弧焊适用于现场焊接。这种用助焊剂的方法不容易受到气流造成的空气污染的影响,所以SMAW适用于户外焊接。SMAW需使用恒电流电源,通常采用直流反极性(DCRP),焊条为正极。

SMAW用途广泛,可以在困难地点及困难位置焊接复杂形状。在焊接长直焊缝时,使用SMAW不经济,应使用自动或更高效的焊接方法。

焊条药皮,含有气体形成成分,基础成分是造渣剂。特定的化学成分影响电弧稳定性,焊道轮廓和焊缝清洁度。助焊剂的化学成分还决定该方法在非正常位焊接的成功程度。焊条有各种不同的助焊剂配方,专门针对特定的焊接位置设计,包括非正常位置焊、向下立焊及其它焊接位置。

药皮会把合金元素带入焊缝。在这种情况下,当中的裸焊丝可以是标准不锈钢。因此,不得把SMAW焊条的涂层剥掉,把里面的金属丝当作GTAW焊的裸丝焊条使用,因为核心金属丝可能缺少表面涂层所含的合金元素。在下一道焊接前和设备投入使用前必须将焊渣清理干净。



不锈钢SMA焊接。© ESAB Welding & Cutting

焊条装在气密容器内出售,一旦开封,焊条须存储在干燥、低湿度的地方。如果焊条长时间暴露在高湿度环境,使用前应在焊条烘干箱中烘干,烘干温度250-280°C(480-535°F),去除可产生焊缝气孔的水分。推荐的焊接参数因生产厂家和合金成分而异。表23提供了一般性指导意见,但最好还是使用焊条包装上建议的电压和电流。对于大多数高性能奥氏体不锈钢而言,电流值应低于表中所示。

12.1.5.5 埋弧焊(SAW)

SAW使用的自耗焊条是裸焊条,一般来说,其成分与GMAW用的焊条相同。在焊缝处施加焊剂。起弧时,焊剂熔化并在焊缝金属上形成保护渣覆盖层,未熔化的焊剂一般可重复使用。电弧在覆盖层下面,

肉眼看不到,所以SAW是全自动焊接。

SAW的熔敷率比其它焊接方法的熔敷率高很多。该工艺非常适用于厚壁容器和管道的焊接。在平焊位置可进行对接焊和角接焊,或用于横向垂直角焊。SAW焊缝表面非常好,基本不需焊后清理。

目前还没有不锈钢SAW助焊剂规范,但市场上有许多种专用助焊剂。从冶金角度来说,助焊剂对焊缝金属的作用可分为中性,酸性和碱性。在为特定的焊接作业选择正确的焊丝和助焊剂组合时,应咨询助焊剂生产厂。高性能奥氏体不锈钢用的助焊剂属于强碱系列,而标准合金用的助焊剂属于中性到弱碱系列。

表23：不同焊接位置使用碱性焊条和氧化钛药皮焊条进行SMAW的典型参数(23)

焊条			电流			
类型	直径		电压	平焊	向上立焊	仰焊
	mm	inch		A	A	A
氧化钛	1.6	0.063	22-24	30-40	30-35	30-40
	2.0	0.078	22-24	35-55	35-40	40-50
	2.5	0.098	22-24	50-75	50-60	60-70
	3.25	0.128	22-24	70-110	70-80	95-105
	4.0	0.157	22-24	100-150	100-120	120-135
	5.0	0.197	22-24	140-190		
碱性	2.0	0.078	24-27	35-55	35-40	35-45
	2.5	0.098	24-27	50-75	50-60	55-65
	3.25	0.128	24-27	70-100	70-80	90-100
	4	0.157	24-27	100-140	100-115	125-135
	5	0.197	24-27	140-190		



埋弧焊。© ESAB Welding & Cutting

虽然SAW熔敷率高很有吸引力，但热输入量大，焊道大，冷却和凝固慢也会带来问题。对接焊时，304L和316L等标准牌号最容易焊接（热输入量大时，首选低碳钢种）。当使用SAW焊接高性能奥氏体不锈钢时，应严格控制热输入量和层间温度。见本指南12.1.8.3节。正如表18所示，这些合金通常采用Ni-Cr-Mo填充金属进行焊接。SAW特别适用于在平焊位置对碳钢基材进行不锈钢堆焊。目前已有满足焊缝成分要求的填充金属/助焊剂的正确搭配(5, 23)。表24给出了一些典型的焊接参数。

表24：使用中性或微碱性焊剂SAW焊接标准不锈钢的典型焊接参数(23)

焊丝直径		电流	电压	焊接速度	
mm	inch	A	V	cm/min.	in/min.
2.4	0.094	200-350	27-33	30-60	12-24
3.2	0.125	300-600	30-36	30-60	12-24
4.0	0.157	400-700	30-36	30-60	12-24

12.1.6 异金属焊接(DMW)

奥氏体不锈钢可容易地与不同牌号的奥氏体不锈钢、双相不锈钢、碳钢和低合金进行焊接。异种金属焊接即要考虑要连接的两种金属的性能，还要考虑填充金属的性能，因为焊接形成了母材和填充金属组成的新合金。有关异种金属焊接的详细内容请见国际镍协会(Nickel Institute)出版物No.14018(26)，以下是一些背景资料。

当不锈钢与碳钢或低合金钢焊接在一起时，混合焊缝成分不应当形成大量的马氏体。马氏体降低焊缝延展性，易产生与氢相关的缺陷。为了具有良好的耐热裂性能，稀释后，焊缝应含有奥氏体和最少5%的铁素体。假设焊缝由大约70%的填充金属和30%的母材(15%不锈钢，15%碳钢)构成，可估算出焊缝成分。Schaeffler图(图5)可用来预测焊缝中的相。使用铁素体含量高的不锈钢填充金属(E309L, E309MoL或312)是焊接标准不锈钢和碳钢的正确选择。如果使用诸如308等经济型填充金属，再加上普

通钢的稀释率，形成的马氏体会使焊缝脆化。高性能奥氏体不锈钢与碳钢焊接时，填充金属的选择应该以高性能奥氏体不锈钢的牌号为准，具体建议请见参考资料23和26。

异种金属焊缝要满足使用环境所要求的耐腐蚀性能和机械性能。焊缝金属的强度须等于或高于两种母材中较差的。焊缝的耐腐蚀性须等于或好于两种母材中较差的。如果使用环境还涉及热循环，焊缝和母材的热膨胀系数应尽量相同，最大限度地减少热疲劳失效。然而，当使用温度为425°C(800°F)或更低时，碳钢或合金钢与奥氏体不锈钢焊缝的热膨胀差异并不明显。

在焊接两个不同的含钼奥氏体不锈钢时，填充金属的钼含量应与母材中较高的钼含量相等。奥氏体和双相不锈钢的焊接也应如此。

12.1.7 焊件质量注意事项

不锈钢焊件(焊缝件和热影响区)必须耐腐蚀且结构可靠，以满足特定

应用的需求。通常情况下，焊缝的耐蚀性至少应与母材相同，强度等级最好能稍高一些。我们可以将焊缝质量分为两个不同的方面—焊缝物理缺陷(12.1.7.1 - 12.1.7.5)和冶金问题(12.1.7.6 - 12.1.7.9)。它们都会降低耐腐蚀性或强度，因此，必须避免这些缺陷。不合格的焊接件要进行修复处理，保证所需的性能。大多数物理缺陷在碳钢焊接中已经很常见，而冶金问题则是不锈钢独有的。以下章节提供了有助于确保焊件质量的实用指南。

12.1.7.1 未焊透

焊缝未焊透通常发生在管子对接焊缝或其他非双面焊接的对接焊缝。未焊透是指焊缝存在一个缝隙，会引发腐蚀，藏污纳垢。缝隙会降低焊缝的强度和耐腐蚀性，而且很难消毒(清洁)。高质量对接焊缝要求全焊透。否则焊缝的机械强度和抗疲劳性会显著降低。为了避免这些问题，合适的焊缝设计或背部清根很重要，而且尽可能焊接背面。

12.1.7.2 气孔

表面气孔是污垢的理想藏身之处，也是腐蚀的发源地。由于表面气孔吸附污垢和细菌，很难清理消毒。气孔多由湿气造成，湿气可能来自于焊条助焊剂，保护气体或工件表面。要想最大限度地减少气孔，要对焊条干燥度，气体化学成分和清理操作给予足够重视。同时，还要确定孔隙率验收等级，以指导焊接件的射线探伤和目检。

12.1.7.3 起弧和焊接飞溅

起弧和焊接飞溅造成缝隙并引发缝隙腐蚀。为了尽量减少这种缺陷，焊工应在焊缝内起弧，而不是在焊缝旁边起弧。如果有起弧和焊接飞溅，应该用细砂轮打磨去除。



避免焊接飞溅和不平整焊缝。© Outokumpu

12.1.7.4 微裂和热裂

微裂是小而短的裂缝或裂纹，奥氏体不锈钢焊缝会出现这种缺陷。它们很少扩展，很少造成焊缝结构失效，但在某些环境中，它们会引发局部腐蚀。热裂，更准确的名称是焊缝凝固裂纹，是一种严重的焊缝缺陷，必须避免。

调整常用填充金属308(L)和316(L)的成分，使铁素体含量达到5-10%，可以明显改善耐微裂和耐热裂性能。铁素体吸收收缩应力，并对造成奥氏体脆化的硫、磷及其它杂质的溶解度更高。铁素体达到建议含量的标准不锈钢焊缝一般不会产生微裂和热裂，但是，当热输入非常大，焊缝约束应力大或焊缝呈凹形时，也会产生微裂和热裂。美国焊接协会(AWS A5.4)定义的铁素体数(FN)表示焊缝中的铁素体量。铁素体数(FN)大体上相当于奥氏体

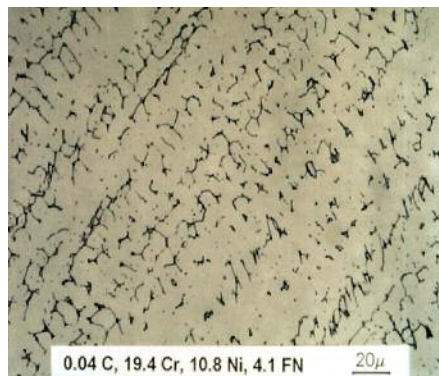
不锈钢焊缝中铁素体的体积百分比。下面的图显示了两种铁素体含量不同的焊缝金属。

用于焊高性能奥氏体不锈钢的填充金属不会产生含铁素体的焊缝，所以它们的焊缝易产生微裂和热裂。为了尽量减少微裂和热裂，焊接高性能奥氏体不锈钢的填充金属的磷、硫含量极低。焊接时必须严格控制热输入和其它焊接参数。热输入的上限一般是1.5 KJ/mm(38 kJ/in)。

焊接高性能奥氏体不锈钢时，应避免导致熔池尺寸增大的任何操作(例如，过度横摆)。大熔池会增大凝固收缩应力。大熔池也会增大焊缝和热影响区内的晶粒尺寸。粗晶粒材料的晶界面积小于细晶粒材料的晶界面积。这会导致晶界的杂质浓度增高，可能会降低耐腐蚀性。晶界中的收缩应力过大和微量元素浓度过高都会导致热裂。

12.1.7.5 其它缺陷

其它焊接缺陷，如熔合不充分和焊道之间的夹渣，无论对于碳钢还是

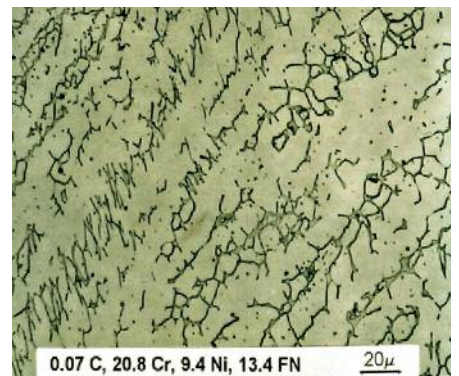


奥氏体不锈钢都是不可接受的，焊件暴露在腐蚀环境时，表面夹渣会引发点蚀。同样，焊缝的粗糙表面会降低其耐腐蚀性。咬边会显著降低焊件的疲劳性能。焊缝根部或焊帽的过度强化也会对焊缝性能造成不利影响。

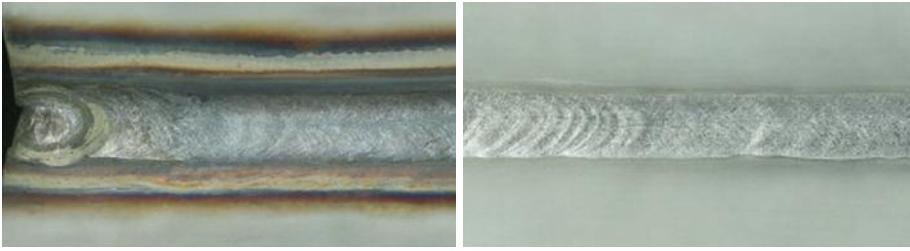
12.1.7.6 表面氧化物

对许多应用而言，管道焊缝内表面的回火色令人担忧。消除或尽可能减少回火色氧化物有许多种方法。一种是管内充分喷吹惰性气体。当使用轨道GTAW进行对接焊时，要想使焊缝基本没有回火色，必须把接头装配好并用惰性气体吹扫。当进行手工GTAW打底焊时，通常会产生一定程度的回火色。根据回火色的程度和预期用途，利用酸洗或机械抛光去除氧化物。

回火色大幅降低耐点蚀和耐缝隙腐蚀性能，对标准奥氏体不锈钢影响尤其明显。另一个潜在问题是微生物腐蚀(MIC)。有回火色的区域易产生微生物腐蚀，在未经处理的水中，特别是在流速低或滞流状态都发现微生物腐蚀。用普通水进行水



奥氏体不锈钢焊缝金属不同的铁素体含量。© Lincoln Electric



高质量GMA焊缝和热影响区的回火色(左图)。焊后酸洗恢复了焊缝的耐蚀性(右图)。
© Outokumpu

压试验后，未对系统进行排空和干燥处理也会引起微生物腐蚀。

对回火色无法去除的焊缝制定验收标准面临着两个挑战。一是如何量化焊件上的回火色。许多行业利用回火色的彩色对照图表，直观对照判定回火色等级。AWS D18.1和AWS D18.2中有该图表。二是确定在具体应用中能接受回火色的程度。

与高性能奥氏体不锈钢相比，回火色对标准不锈钢(例如：304L和316L)耐腐蚀性造成的影响更明显。当清除回火色极为困难或成本太高时，设计人员应考虑采用耐蚀性更好的钢种，更好地发挥它们的作用。

12.1.7.7 敏化

高碳标准牌号短时暴露在480-900°C(900-1650°F)环境下会产生敏化(图8)，在水性和酸性环境中易发生晶间腐蚀(见6.3)。不过，先进型标准牌号通常为“L-级”，碳含量低于0.03%。因此，它们在正常制作焊接，没有后续热处理的情况下，具有耐敏化性。例如，在最

快敏化温度下，碳含量0.042%的304不锈钢发生敏化大约需要一小时。该时间比焊接敏化温度的时间长很多。即使这样，也要限制大型焊件在临界温度区间的暴露时间。

使用低碳牌号有助于避免厚断面焊件和焊后需要热处理的部件的敏化。304L在敏化温度下的耐受时间很长，所以，大厚度部件(图8)也能安全冷却。使用L牌号的话，甚至可以对不锈钢和碳钢混合构件进行消除应力热处理。

为了提高高温强度，高温牌号的碳含量通常不少于0.04%(304H)。幸运的是，高温应用一般不担心敏化造成的水溶液腐蚀。这些牌号通常需用高碳填充金属以提供足够的焊缝高温强度。

在焊接过程中，经过稳定化处理的321和347不锈钢如果暴露在480-900°C(900-1650°F)温度下，容易产生窄的刀状腐蚀。如果担心刀状腐蚀，就要明确规定焊后固溶退火及稳定化热处理。有关刀状腐蚀机理的讨论，见6.3.2节。

绝大多数高性能奥氏体不锈钢的碳含量上限低于常规的“L”牌号，碳含量相同的情况下，高性能奥氏体不锈钢的敏化速度比常规牌号更快。不过，对于高性能奥氏体不锈钢焊接而言，二次相的形成比敏化更令人头痛。

12.1.7.8 金属间相

形成 σ 相和 χ 相的温度区间为500-1050°C(930-1925°F)。含有 σ 相和 χ 相的不锈钢的耐腐蚀和韧性明显降低。5%的 σ 相会使冲击韧性降低50%。

增加铬、钼含量大大促进了金属间相的析出，临界温度下，高性能奥氏体不锈钢中 σ 相和 χ 相的形成时间不足一分钟。因此，这些材料的焊接参数必须包括低热量输入(低于1.5 kJ/mm[38 kJ/in])和层间温度不超过100°C(212°F)，尽量缩短临界温度的时间。应当在一道焊接结束时测量焊道的层间温度，用热电偶测量保证精度。禁止使用对温度敏感的彩色笔，因为它们会污染焊缝。

在非理想温度下，标准牌号中任何金属间化合物的析出时间通常需要100小时或更长。由于它们的动力学缓慢， σ 相和 χ 相析出在标准牌号的加工制造期间不是问题，但是长期高温服役不容乐观。

12.1.7.9 焊缝偏析

高钼高性能奥氏体不锈钢的焊缝金属尤其容易发生钼的微观偏析。微观偏析发生在固化过程中，因为先

凝固的金属钼含量较低，后凝固的金属钼含量较高，钼含量出现微梯度。在6%Mo不锈钢中，低钼区域可能耐腐蚀性明显降低。

因此，为了补偿微观偏析，焊接高性能奥氏体不锈钢需要使用过匹配填充金属。焊接6%Mo不锈钢时，最好使用钼含量不低于9%的镍基填充金属，这样可以确保先凝固区域的钼含量不低于6%，使焊缝金属保持良好的耐腐蚀性能。

由于微观偏析问题，不能进行焊后退火处理的高性能不锈钢构件不能采用自熔焊(不使用填充金属)。自熔焊只适用于要进行焊后固溶退火的焊件，固溶退火可以使焊缝均质化，减少微观偏析，使耐腐蚀性得到恢复。

12.2 硬钎焊和软钎焊

硬钎焊和软钎焊是通过熔点远低于母材熔点的可熔填充合金将母材部件连接在一起。钎焊时母材始终处于固态。软钎焊和硬钎焊的区别主要在于焊接温度。美国焊接协会把软钎焊定义为427°C(800°F)以下的金属熔合方法。427°C(800°F)以上的钎焊连接被称为硬钎焊，而术语“硬钎焊”已经用于银钎焊，温度区间在595-705°C(1100-1300°F)之间。

所有的不锈钢均可进行硬钎焊和软钎焊。无论是什么牌号的不锈钢，钎焊要求基本相同。表面应当清洁，应使用无腐蚀性的钎剂，如果焊接是在敏化温度区间进行，一定要注意防止敏化。不同牌号不锈



不锈钢钎焊并不难，但需要专用助焊剂。© BRANDT Edeltahldach GmbH

钢的差异主要与它们的耐氧化性有关。一般来说，不锈钢的耐氧化性越好，往往需要更具侵蚀性的助钎剂。

12.2.1 硬钎焊

大多数不锈钢钎焊都是使用以下类别的钎料：

- 银基合金-BAg组
- 镍基合金-BNi组
- 铜基合金-Bcu组
- 金基合金-BAu组

根据服役环境所要求的机械性能、耐腐蚀性和高温性能选择钎料。

银基合金(Ag-Cu-Zn和Ag-Cu-Zn-Cd)用途最广，可用于所有奥氏体不锈钢。由于镉有毒，所以，乳品

和食品行业严禁使用含镉合金。从健康和安全角度考虑，要尽量使用不含镉的合金。

大多数银基钎料的钎焊温度是在敏化温度区间，所以钎焊会导致碳化铬析出和敏化。为此，347或低碳牌号最适用于银钎焊。由于大多数银基合金含铜和/或锌，所以为了避免不锈钢的液体金属脆化，不能延长过热时间。

镍基合金通常因其优异的耐蚀性和良好的高温强度而被选用。镍基合金主要是Ni-Cr-B-Si合金。大多数镍基合金需要高钎焊温度(927-1204°C, 1700-2200°F)。虽然该温度区间高于敏化温度，但是钎焊温度和冷却周期对母材的冶金影响，特别是对高性能奥氏体不锈钢的影响，必须进行评估。

铜基合金主要是纯铜。铜基合金钎焊温度高，流动性优于镍基填充合金，接头连接更紧密。遗憾的是，铜基合金的耐腐蚀性和抗氧化性较差，限制了它的应用。

金合金有其特殊用途，即对耐腐蚀性和接头延展性的要求其它合金无法满足。金合金主要包括Au-Cu合金和Au-Pd-Ni合金。金合金成本高，仅限于某些特定应用，如航天设备。

不锈钢部件通常在可控的惰性气氛炉或真空炉内进行钎焊。在强还原或惰性气氛焊接时，不需要钎剂。火焰钎焊离不开钎剂。如果感应钎焊和电阻钎焊不在保护气氛或真空炉中进行，需要使用钎剂。

许多特殊钎剂成分可用于不锈钢。AWS 3A和3B的焊剂都适用。这些钎剂含硼酸，硼酸盐，氟化物，氟硼酸盐和润湿剂。为了避免残余钎剂造成腐蚀，钎焊后要彻底清除钎剂。

12.2.2 软钎焊

不锈钢软钎焊一般采用锡-铅焊料或锡-银焊料，不过焊接行业正在淘汰含铅焊料。软钎焊的主要作用是连

表25：钎焊接头的优点和局限性

优点	局限性
在低温下产生液密和气密接头	接头的耐蚀性可能降低
避免高温冶金效应	温度升高，强度迅速丧失
热变形最小	强度低于不锈钢母材和焊接接头
与其他方法相比成本较低	可能会影响外观
填满缝隙，接头光滑	与焊接相比速度较慢

接，但它也可以消除缝隙和锐角。大多数标准奥氏体不锈钢具有良好的钎焊性能，Ti稳定牌号(如321)和抗氧化牌号除外。高铬含量高性能奥氏体不锈钢属于抗氧化钢，软钎焊较为困难。标准钎剂不能去除高性能奥氏体不锈钢上坚固的氧化物，阻碍表面润湿。要想成功地钎焊这些合金，需要使用增强型助焊剂。

为了确保工件润湿，钎剂必须去除不锈钢的钝化膜。最常用的钎剂是酸基钎剂，目前市场上有不锈钢专用钎剂。标准牌号不锈钢采用磷酸和盐酸钎剂效果很好。Cr, Mo, Al, 或Ti含量高，抗氧化较强的牌号需要使用含氢氟酸的钎剂。焊接后，必须彻底清理并对表面进行中

和处理，以防止高腐蚀性钎剂残留物造成未来的腐蚀问题。这些焊剂含有氢氟酸，需采用特殊防护措施，以确保运输和使用安全。

表面光洁度对润湿有一定作用。酸洗表面(No.1和2D)的钎焊性优于2B或BA(光亮退火)表面。

钎焊的接头涉及异金属，易发生电偶腐蚀。由于钎料是低熔点“软”材料，所以接头强度就是钎料强度。由于绕接和套筒接头的熔合区较大，接头强度大于简单的对接接头。表25总结了不锈钢软钎焊的优点和局限性。

13 机械连接方式

常用的机械连接方式都可以用于不锈钢。机械连接基本上都在常温下进行。除热铆外，一般不必担心高温连接可能出现的氧化或有害相析出。不过，机械连接也有它的问题，应该引起重视。一是机械连接固有的缝隙，这些缝隙在含氯化物的介质中容易造成缝隙腐蚀(见13.2.1)。二是异金属连接可能发生的电偶腐蚀(见13.3.2)。机械接头的强度也往往低于焊接接头，不建议用于必须保持清洁卫生的应用环境。

13.1 连接方式

13.1.1 螺栓连接和螺丝连接

虽然双相不锈钢和沉淀硬化不锈钢的强度和咬合性能更适合紧固件应

用，但是奥氏体不锈钢也常用于此用途。标准不锈钢牌号的螺栓和螺丝很容易买到，但高性能奥氏体不锈钢的螺栓和螺丝就不那么容易了。经过退火处理的奥氏体不锈钢紧固件易锁死，所以，最好使用冷加工、高强度或防锁死的牌号。一些200系奥氏体牌号，如S24000和S21800，比其他奥氏体牌号防锁死的性能更好，通常用作紧固件。螺栓连接存在的重要机械问题包括螺栓孔的位置和连接件要承受的张力和剪切力。螺栓接头的强度普遍低于焊接接头的强度。螺栓连接件设计指南见参考资料27。

13.1.2 铆接

标准牌号不锈钢已用于最常用的铆钉头和标准杆径的铆钉。铆钉所受



采用奥氏体不锈钢铆钉的折叠刀，增加连接点的强度和耐蚀性。© Victorinox

的力是剪切力，不是张力，所以，为了保证铆接质量，接触面必须干净无毛刺，铆钉孔要严丝合缝。铆钉压入和铆钉头成型会使铆钉材料发生冷变形。由于奥氏体不锈钢的加工硬化率比碳钢高，所以铆接设备的功率要更大。

铆接分为热铆接和冷铆接两种。冷铆接可以避免氧化层，节省加热费用。热铆接会在铆钉杆冷却收缩时，增加压缩收紧力。热铆接前，奥氏体不锈钢铆钉一般要加热到1065-1150°C(1950-2100°F)。铆接要在温度降至930°C(1700°F)之前完成。

13.1.3 压铆

压铆时，基体材料发生周期性变形从而实现压接。压铆是铆接或点焊



螺栓法兰连接。© Super8/Shutterstock.com

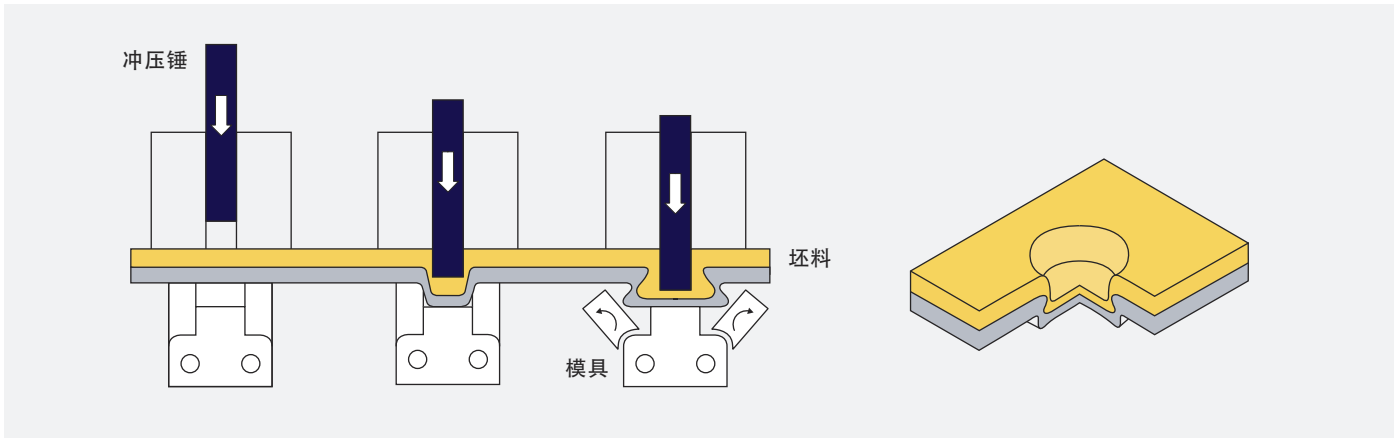


图30: 压铆工艺(基于参考文献28)

的替代方法，可用于任何薄规格韧性材料。经常把压铆和粘接结合在一起使用，形成密封接头，防止液体进入缝隙中。

13.1.4 咬接

咬接法是将两张钢板的边部折叠180°，压紧形成紧密封缝(图31)。该方法常用于厚度不超过1.6mm (0.062英寸)的不锈钢板带。这种连接方式广泛用于不锈钢屋面和家用电器。接头表面涂接缝粘合剂可以增强密封效果。这种接头的缝隙非常小，难清理，而且增加了缝隙腐蚀的风险。如果使用环境允许，可用焊料将缝隙焊接密封，避免缝隙腐蚀。



不锈钢直立锁边屋顶采用双锁技术实现永久性密封，以适应山区大风、大雪和极端温度等恶劣环境。© Roofinox

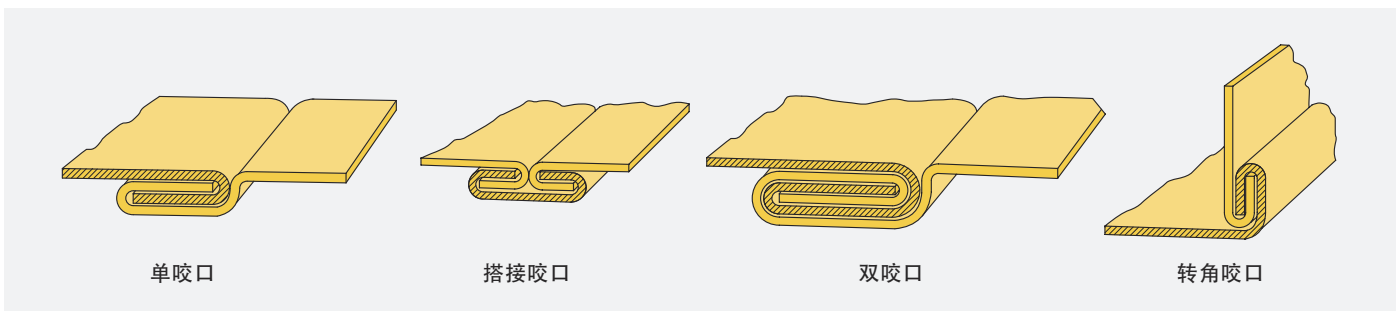


图31: 典型的咬口设计(19)

13.1.5 粘接

粘接是指使用粘合剂将材料连接在一起。与机械接头相比，粘接接头可将应力更均匀地从一个构件传递到另一个构件，应力承载面积较大。所以，这种连接在强度上与传统的连接相当或更好，且成本更低，重量更轻。为了做到有效粘接，粘接剂必须能够完全润湿基材表面，并在粘合剂和基材之间产生强劲的粘合作用。奥氏体不锈钢可以用多种粘合剂连接，包括硅酮、环氧树脂、丙烯酸和聚氨酯胶粘剂。粘合剂的选择取决于所需的接

头强度和预期的使用环境。表26总结了粘接的优点和局限性。

粘接接头的设计非常重要。应当增加粘合面积，减少由力矩和边缘效应引起的应力集中(推荐的接头设计见参考文献29)。基材表面处理是为了清洁表面并使粘合强度最大化。表面预处理包括使用机械、化学或物理方法去除强吸附表层并激活底层。有些商用粘合剂还要用底层涂料或其他粘合促进剂进行特殊表面处理。用户应向粘合剂生产商咨询使用建议。

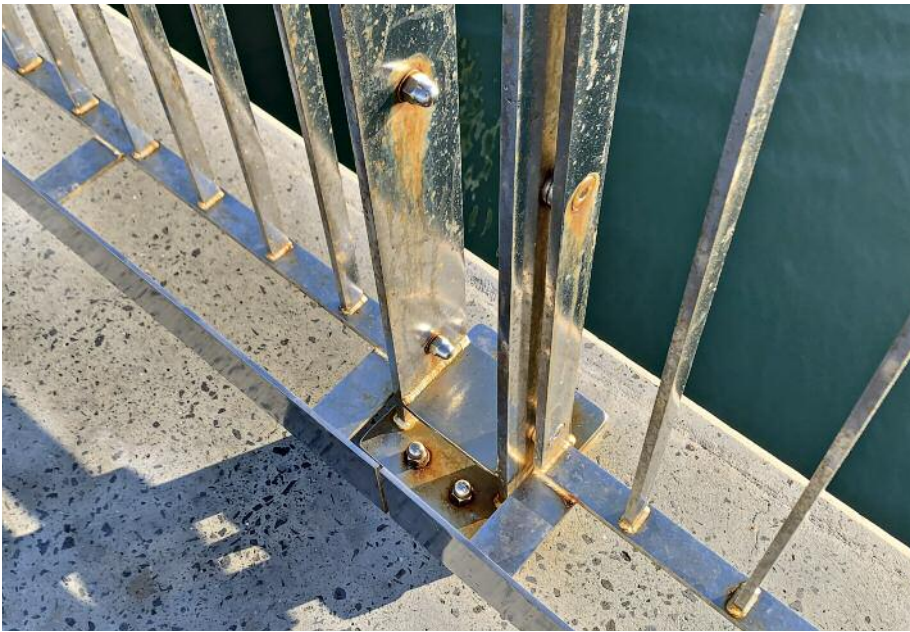
13.2 机械连接的腐蚀问题

13.2.1 缝隙腐蚀

咬接的接缝或螺栓连接的螺栓头、垫片和螺母下面的缝隙容易发生缝隙腐蚀(见6.2.1)。潮湿环境下，即使是最紧密的接头，也会有潮气渗入，使大多数机械接头发生缝隙腐蚀。缝隙腐蚀的几率与缝隙密封性、垫圈材料优劣和腐蚀环境的严重程度成正比。正常的大气环境通常不会对304不锈钢螺栓连接造成威胁。而高性能奥氏体不锈钢螺栓连接的构件在温暖海水环境中使用

表26：粘接的优点和局限性

优点	局限性
接头隐秘，外观效果好	粘接区域不能目检
应力分布均匀，应力承载面积更大	固化时间可能较长，特别是低温固化
不限形状，薄、厚均可	表面需要认真制备，通常使用腐蚀性化学品
同种材料和异种材料均可	可能需要紧固装置，压块、烤箱和高压釜等，其它紧固方法通常不需要。
减少或阻止异种材料电偶腐蚀	工作温度不得高于180°C/350°F
抗疲劳和周期载荷	需要严格的工艺控制，大多数粘合剂都强调清洁度
接头轮廓平滑	使用寿命取决于使用环境
密封接头应对多种环境	材料之间必须紧密配合
隔热，绝缘	时间可能改变性能
无热致变形	接触化学物质或溶剂会产生影响
抑制振动，吸收冲击	化学物质可能从粘合剂中渗出
强度/重量比佳	
比机械紧固更快更便宜	



海水飞溅造成扶手螺栓连接处出现缝隙腐蚀。© Graham Sussex

可能会出现问题。如果环境的腐蚀性接近接头材料耐蚀性阈值，很难通过优化设计解决缝隙腐蚀问题。避免缝隙腐蚀最常见的方法是避免机械连接，或选择耐缝隙腐蚀性足够强的材料应对腐蚀环境。

13.2.2 电偶腐蚀

在腐蚀环境下，只要两种不同的金属存在电连接，都可能出现电偶腐蚀。当两种不同的金属连接在一起时，活性更强或耐蚀性较弱的合金会加速腐蚀，而惰性较强或耐蚀性更强的合金则会受到保护(见6.4)。

有四种方法可以解决机械接头中的电偶腐蚀问题：

- 机械连接中，避免异金属接合，例如，铝紧固件用于不锈钢板。

- 连接时，用绝缘材料将两种金属隔离开(图32)。
- 如果必须使用异金属，选择电位序中距离相近的两种金属(见6.4节图21)
- 调整两种金属的相对表面积，使最可能发生腐蚀的金属(活性金属)具有比另一方大得多的暴露表面。

高性能奥氏体不锈钢相对不活泼(耐腐蚀)，如果在连接中使用不当，会导致较活泼的金属如碳钢、铝、多种铜合金和相对于所处环境耐蚀性较差的不锈钢等发生腐蚀。但是，它们可以作为紧固件连接较为活泼的材料(例如高性能奥氏体不锈钢螺栓连接316钢板)，因为在这种情况下，较活泼金属的表面积比紧固件大很多。附录阅读列表中的设计手册提供了优化接头设计避免电偶腐蚀的方法。

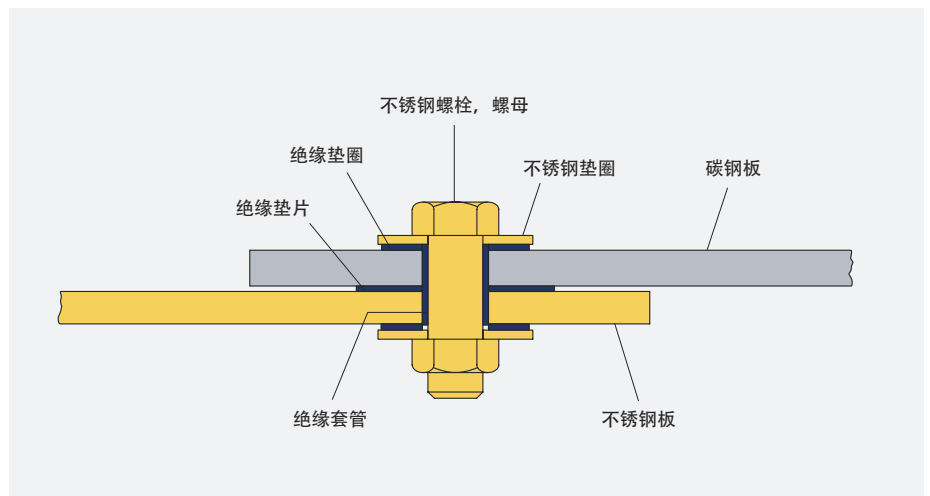


图32：滤水装置中防止螺栓连接处产生电偶腐蚀和缝隙腐蚀的绝缘垫圈。(基于参考文献27)

14 表面

标准奥氏体不锈钢304和316的表面种类最多。与其它不锈钢系列相比，奥氏体不锈钢更容易获得高质量的表面加工。高合金不锈钢的表面加工成本较高，因为它们不易于酸洗、研磨和抛光，而且可选择的表面种类较有限。不过，与耐腐蚀性相当的铁素体和双相不锈钢相比，高合金奥氏体不锈钢表面加工相对容易。

表面加工的技术规范是设计的一个重要方面，因为它关系到耐蚀性、表面沉积物聚积速率、平整度、室外应用的反射率和吸热程度、清洁性和外观效果。目前有许多种工业和装饰用表面。部件的产品形式和尺寸决定了哪些表面易于生产和可供使用。例如，像三通、工字钢和其它形状的结构型材通常以轧制或喷砂表面交货，而圆形空心型材的外表面可以进行线性抛光。当薄钢板需要光滑表面时，光亮退火(BA或2R)、2B和2D轧制表面是高性价比的选择，但是，如果不进行进一步加工，它们可能无法满足美观要求。一些特殊表面，如着色、镜面抛光、浮雕、压花和特殊的机械加工表面只能用于薄钢板。中厚板表面可进行纹路较细的线性抛光或镜面抛光，但是加工成本更高，因为原始表面较粗糙，每块钢板要逐张抛光，不像卷板可以在线抛光。

轧制、抛光和花纹(浮雕或压花)表面已经纳入国际标准。订购这些表面时，一定要依据标准。不过，国际标准对表面的要求很宽泛，可以有不同的解释。如果项目对表面匹配度、反光率、特定的粗糙度值或其它可量化的特性有严格要求，标准要求的内容应在项目规范要求的范围内严格执行。需要注意的是，标准规定的外观效果、加工步骤以及轧制表面和线性抛光表面的粗糙度，在各国的实际应用中会存在差异。采用样板和表面特性量化指标有助于避免误解。对于一些装饰用的特殊表面，没有国际统一标准，

因此，其特性应根据外观和量化特性(如可接受的表面粗糙度、光泽和颜色范围)进行定义。

成品的表面反映出产品从钢厂和制造车间的生产过程。最终用户通常指定满足其设计标准的表面，这也就确定了特定的表面加工工艺。

14.1 表面与性能

表面的微观形貌或纹理对腐蚀性能有很大影响，特别是当它们暴露在大气环境中。机械抛光表面的纹理取决于磨料类型和抛光技术。为了



葡萄酒罐通常使用小圆形花纹抛光饰面，这种饰面具有卫生、易清洁，装饰性好，可隐藏凹痕和划痕。表面加工要求是设计的重要组成部分。© iStock.com/Josef Mohyla



316不锈钢路柱暴露于过往车辆飞溅的道路盐中。底部为粗磨表面，顶部为更光滑的抛光表面，由此造成性能差异。© IMO A

获得最佳的腐蚀性能，抛光表面必须避免金属重叠，因为重叠在一起的金属可以成为缝隙腐蚀的起始点。一条新抛光带在表面留下清晰的纹路，在放大镜下看就像新犁过

的田地，整齐划一。而磨损严重的抛光砂带会使表面纹理混乱，造成重叠区域(即缝隙)。喷砂常用的几种磨料，如砂粒和碳化硅，会造成深窄的凹陷。虽然滚压花纹(即浮雕和压花)通常应用在非常光滑的表面上，有些图案很容易被雨水冲洗或人工清洗，而有一些则更容易积污。

粗糙的表面会聚积更多的污垢和腐蚀性物质，表面张力越高，保持水分的时间越长。腐蚀离不开水分和腐蚀性物质。与没有缝隙的光滑表面相比，有微缝隙的表面发生腐蚀的温度和氯盐浓度更低。把同一牌号不锈钢制成的两个部件并排放，由于表面粗糙度的不同，其性能会有很大不同。

随着合金含量的增加，不锈钢的耐腐蚀性增强。如果服役环境较恶劣或表面较粗糙，则应选用耐腐蚀性能更强的不锈钢牌号。在建筑、

食品加工、制药、医疗、气体处理和其它行业的许多应用中，都需要使用易于清洁、不易吸附或留存异物的表面。表面清洁度不足会污染产品，并成为健康安全隐患。同样，难清洁的表面需要更多的侵蚀性清洁剂，增加维护成本。卫生领域对不锈钢表面有特殊要求，奥氏体不锈钢很容易加工成高质量光滑表面，因此，它们成为这些高标准应用的理想材料。

14.2 钢厂交货表面

14.2.1 中板

中板属于平轧或锻造产品，根据ASTMA480/A480M，厚度 $\geq 4.76\text{mm}$ (3/16英寸)，宽度 $\geq 254\text{mm}$ (10英寸)。中板的生产是将钢坯或钢锭经过热轧或锻造，再经过退火除鳞。这种钢板的标准表面见表27。

表27：ASTM A480/A480M和EN10088规定的中板表面

ASTM状态和表面	对应EN10088表面	说明和备注
热轧或冷轧退火，或热处理，未除鳞	1C	高温应用或作为中间表面，氧化铁鳞的存在使钢板表面粗糙、发黑、不均匀，耐蚀性下降
热轧或冷轧，退火或热处理，喷丸清理或酸洗	1D(酸洗)或1E(喷丸)	常用于腐蚀应用和多数高温应用。类似于No.1表面
热轧或冷轧，退火或热处理，表面清理和抛光	1G, 1J或1K	抛光表面，一般是No.4表面
热轧或冷轧，退火或热处理，除鳞和平整		表面更光滑，用于指定用途
热轧或冷轧，退火或热处理，除鳞，冷轧，退火或热处理，除鳞或平整		表面光滑，表面缺陷比处理前减少

表28：薄板和钢带标准轧制表面分类，ASTM A480/A480M和EN10088.

ASTM表面	EN10088对应表面	说明	对应的精整操作
薄板：钢卷和钢板，厚度<4.76mm(3/16英寸)，宽度>610mm(24英寸)			
1	1E	粗糙，无光泽，不反光， 热轧表面	热轧，退火，除鳞
2D	2D	光滑，无光泽，不反光， 冷轧表面	冷轧后退火除鳞，也可用毛面辊进行最后一道轻轧。
2B	2B	光亮冷轧表面	工艺同2D，用抛光辊进行最后一道轻轧
BA	2R	光亮退火表面	冷轧后进行惰性气体退火，然后再用高光辊冷轧，表面比2B更光亮。镜面表面需要进行抛光(即抛光2B)。
TR		冷作，以获得特殊性能	对退火除鳞或光亮退火产品进行冷轧以获得比退火产品更高的强度等级。外观效果随初始表面、冷加工量和合金的不同而变化。
钢带：冷精轧钢卷和钢板，厚度0.127-4.76mm(0.005-3/16英寸)，宽度<610mm(24英寸)			
1	1E	无光泽，灰暗，亚光 至反光表面	冷轧至指定厚度，退火并除鳞
2	2B	比No.1表面更光滑， 反光性更好	工艺与No.1表面相同，冷轧增加最后一道次轻轧，一般使用高光辊
BA	2R	光亮退火	光亮冷轧表面，在可控惰性气体气氛下进行最终退火
TR		冷作，以获得特殊性能	对退火除鳞或光亮退火产品进行冷轧以获得比退火产品更高的强度等级。外观效果随初始表面、冷加工量和合金的不同而变化。

14.2.2 薄板和钢带

薄板和钢带的厚度都比中板薄。它们的生产要经过多个工艺过程：热轧，有时还有后续冷轧，退火或热处理，精整和清理。交货方式有钢卷或定尺剪切的钢板。标准表面和特殊表面均有特定的工艺步骤。表28介绍了标准的ASTM轧制表面及对应的EN表面。薄板或钢带最常见的表面为2B。

14.3 机械加工表面

线性抛光和镜面抛光表面的加工方式是用磨料进行抛光或磨光。有些类似于线性抛光表面的滚压表面，在某些标准中被列为可接受的替代品。有些国家用“Linished”表示线性抛光。影响最终外观效果的因素很多，包括最终磨料目数、打磨带更换频率、磨料类型、是否使用润滑剂(干抛光还是湿抛光)及其它

加工变量。No.3和No.4表面是使用最广泛的抛光表面。机械加工表面的耐腐蚀性参差不齐。不同厂家生产的同一表面，例如No.4表面，在外观效果和耐局部腐蚀性方面会有明显差异。这些差异与具体的抛光程序 and 使用的抛光磨料类型有关。当腐蚀性能是重要因素时，评估抛光样品的耐腐蚀性应成为材料选择的一项内容。

在项目规范中，量化表面要求最常用的方法是，通过样品，确定表面粗糙度(即Ra)和光泽度(即反射率)。但是，如果不同供应商的产品匹配程度是关键考虑因素的话，例如，家电行业或对反光率有严格的要求时，还要对其它特性做出规

定，如Rz或Ry值或3D剖面分析。反光率对有些应用是一个重要指标。例如，建筑物外表面须避免使用高反光表面，因为可能会产生眩光。反光率由表面的纹理和方向性决定，不要一概认为较光滑的表面更具反光性。

抛光产品生产企业经常试图使自己的产品与众不同，所以，不同供应商生产的相同编号的表面，外观效果不会完全一样。表29汇总了常用的ASTM和EN抛光表面。

表29：ASTM A480和EN10088抛光板表面光洁度对照表¹

ASTM 表面	EN10088 表面	ASTM 描述	EN10088 描述	ASTM 说明 ²	EN10088 说明 ²
	2G		磨光表面	没有对应的ASTM	可以指定目数或表面粗糙度，单向纹理，不太反光
No. 3	2J	中间表面，单面或双面	拉毛或无光泽抛光	线性纹理表面，机械抛光或冷轧。平均表面粗糙度(Ra)上限1.0μm(40μin)，但不是强制性限制。ASTM No.3和No.4表面通常是双重认证	比打磨表面更光滑。可以指定刷子、抛光带或表面粗糙度等级。单向纹理，反射度不很高，典型Ra0.2-1.0μm(8-40μin)
No. 4	2K	通用抛光表面，单面或双面	缎面抛光	线性纹理表面，机械抛光或轧制。平均表面粗糙度(Ra)上限0.64μm(25 μin)，但不是强制性限制。ASTM No.3和No.4表面通常是双重认证。	是不反射表面中最光滑的。横向Ra<0.5μm(20μin)，表面纹理清晰。
No. 6		亚光缎面，坦皮科刷光，单面或双面		通常用于No.4抛光表面，外观呈缎面。使用坦皮科植物刷、油和磨料。	EN10088无对应标号
No. 7	2P	高光泽表面	光亮抛光	对精磨表面进行磨光，获得高反光率光泽，但研磨的线条无法去除。	非定向机械抛光和磨光表面，反光，图像清晰度高。可指定工艺或表面粗糙度。
No. 8	2P	镜面	光亮抛光	高反光、光滑表面，连续用更细的磨料抛光，然后磨光。成品表面仍可见非常模糊的抛光线痕迹。	非定向机械抛光和磨光表面，反光，图像清晰度高。可指定工艺或表面粗糙度。

¹ 这些表面相似，但要求不一样

² 说明旨在深入了解典型产品，但不是必备条件

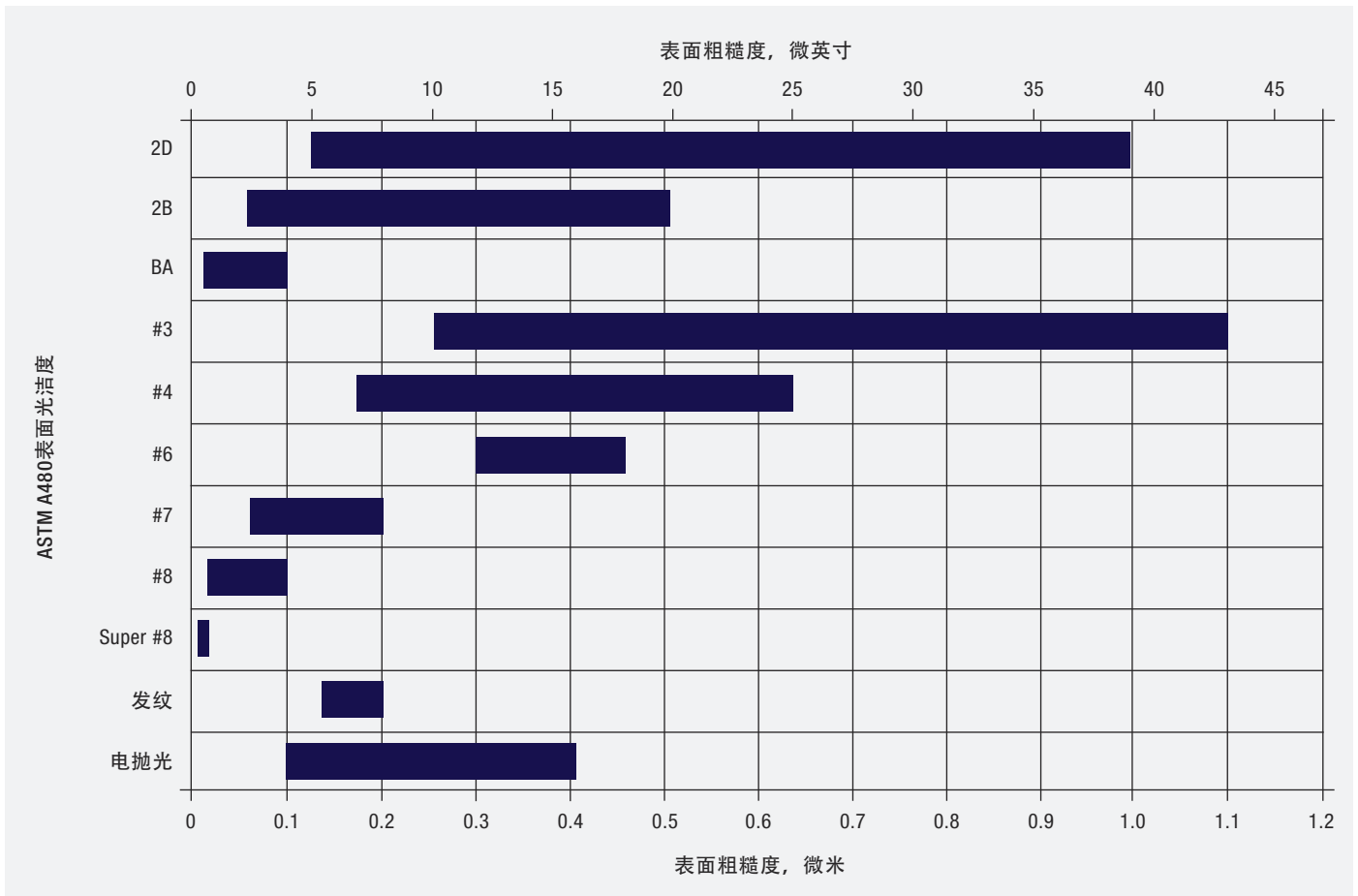


图33 北美和欧洲供应商不锈钢薄板平均表面粗糙度(Ra)(30)

注：表面粗糙度范围基于调研期间得到的最高值和最低值，包括薄板和厚板。薄板的表面通常比厚板的更光滑，排在表格的底部。板材宽度和长度方向的表面粗糙度会有所不同。

当表面粗糙度对产品性能很重要时，例如应用于腐蚀性环境，应规定最大限值，并与供应商讨论确定工艺参数，如湿抛光和打磨带更换频率等。图33和表29给出了抛光表面和轧制表面平均表面粗糙度(Ra)的典型范围。

如果需要均匀的表面光洁度而且部件生产步骤会影响表面光洁度，如焊接或折弯，最好的办法是指定基材的抛光表面。制作过程中，尽可能保留钢板表面的保护膜。受到加

工影响的区域在安装期间进行连续打磨和抛光，达到与初始表面看起来差异的效果。

14.3.1 专用机加工表面

机加工定制表面的范围很广，从细滑、无方向的乱纹图案到粗糙、粗磨表面应有尽有。小项目用的表面可以手工加工，但是，要想每张钢板的外观效果一致，只能通过特殊的计算机控制程序实现。对于纹理较粗的图案，面板背面同样要进行

打磨，以防止表面应力不均造成面板翘曲。

粗纹理图案包括打磨的圆圈和无方向性图案，它们可以隐藏蓄意造成的轻微损坏并展示装饰效果。粗纹理图案容易藏纳污垢，设计和选材时一定要加以考虑。超精细非定向表面，例如，抛光非常精细、无方向性的乱纹表面，在腐蚀性较强的环境中其性能表现与有方向性的精细抛光表面一样好。



磨光工艺增加不锈钢表面光泽。©MagicDisc

14.3.2 磨光

说到磨光，有必要弄清“切削”和“出光”这两个术语。“切削”是指工件在中、高压作用下与旋转的磨光轮逆向行进。通过侵蚀性较强的磨料去除金属，使表面均匀、平滑、半光亮，同时消除残留的划痕和其它缺陷。“出光”是指工件在中-低压力下与旋转的磨光轮同向行进，使用的磨料更细、侵蚀性更小，使表面明亮，有光泽。

低硫奥氏体不锈钢(硫含量 $\leq 0.002\%$ 重量)可加工成最均匀的无瑕疵磨光表面。如果不锈钢的硫含量高，最终的镜面表面可能会有硫化物产生的微小凹痕。

最高质量等级的磨光不锈钢表面的加工方法是通过打磨去除表面缺陷，然后依次使越来越细的砂带进行线性抛光。为了提供光滑的起磨表面，磨光前的最后一道工序是用细颗粒打磨带进行湿法线性抛光。ASTM A480有两种磨光表面。No.7表面经过一定的打磨，表面更光滑，但细抛光线仍然明

显。ASTM No.8表面打磨更充分，只有在仔细检查样品时，才能看到细抛光线的痕迹。

在有些应用中，轧制表面经过磨光可以达到镜面效果，而且加工成本较低。技术规范是这样描述的“磨光光亮退火”(ASTM BA或欧洲2R)压光表面。不过，磨光不可能彻底消除轧制表面的缺陷。因此，对卫生条件要求不严格的应用、小面积或位置较高的装饰应用(较小的缺陷不太明显)，可以使用经过磨光处理的轧制表面。

14.3.3 用于机械抛光的磨料

抛光从较粗的磨料开始，以去除粗糙的划痕和缺陷，然后依次使用更

细的磨料将表面磨光。使用的磨料类型决定了研磨效率和成本。根据磨料类型和目数，选择正确的抛光速度非常重要。速度过快会造成热量聚积，导致变形和氧化所致的表面变黄。磨料生产商提供的工艺图表可以帮助用户根据实际情况确定正确的磨料和研磨速度。下面简单介绍可用的磨料类型。使用抛光润滑剂(即湿抛)，表面的纹理更清晰。

14.3.3.1 涂附磨具

涂附磨具(如砂纸)是指用粘结剂把磨料粘附在纸、布或其它基材上的磨具。磨料一般是由研磨矿物制成，常用的磨料有氧化铝、氧化硅或氧化锆。氧化铝为棕色，氧化锆为蓝色或绿色。



人工抛光不锈钢管，使焊缝与钢管饰面相融合。© Olya Humeniuk/Shutterstock.com

涂附磨具有多种规格、形状和目数。“目”表示磨料的粗糙度，与磨具上粘附的磨料粒度有关。大颗粒比小颗粒的研磨力度大。目数从36到400，目数越大，颗粒度越小。从粗至细抛光时，会用到目数不同的磨具，但不必逐级打磨。实践经验告诉我们，在更换磨料时，不超过前面所用目数的两倍，例如，使用目数40的磨料抛光后，下一道次用的目数不能超过80。

在抛光操作允许的情况下，改变磨料目数的同时改变抛光方向是一个好办法，可以使每一道次都与前一道次垂直。这样做的好处在于，不会把纹路越磨越深，而是将凸起处磨平。该方法可以让操作员知道前一道次留下的磨痕何时被清除。如果没有清除干净，抛光后可能会留下痕迹，导致外观有差异。

14.3.3.2 无纺布磨具

无纺布磨具是用充满磨料的尼纶纤维制成，磨料的目数决定磨具的“粗糙度”。无纺布磨具与涂附磨具不同，无纺布磨具只是把表面磨光，金属的去除量很少。因此，它们的命名与涂附磨具不一样，涂附磨具是用磨料的目数表示，而无纺布磨具是用“粗”、“中粗”、“细”、“很细”或“超细”表示。

14.3.3.3 抛光剂

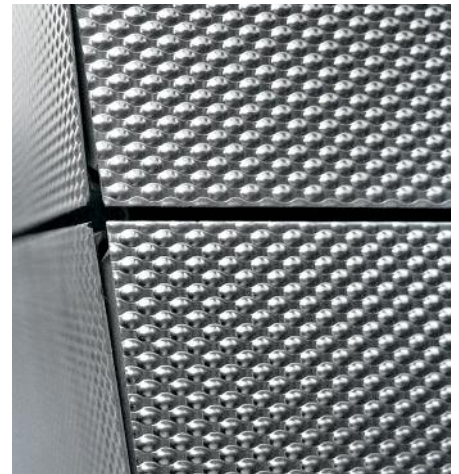
抛光剂分为液态或固态。根据抛光工件的强度和硬度选择合适的磨光剂。专业生产厂家开发的专利产品的保质期取决于粘合剂。磨光轮或“布轮”通常由棉布或羊毛布制成，种类很多。磨光轮和磨光剂的

最佳组合应根据磨光阶段和生产厂家的建议。对于不锈钢的大规模工业抛光，黑色抛光剂(金刚砂磨料)通常用于粗磨，以去除更多金属(切削)。绿色抛光剂(氧化铬或氧化铝)是专为不锈钢的最终“切削”和“出光”打磨开发的。有时也用其它的矿物质作为不锈钢抛光剂，但绝对禁止使用氧化铁(红铁粉)。

14.4 压花和浮雕表面

压花和浮雕表面也被称为花纹表面，因为图案是辊压在板材表面。由光面辊和花纹辊压出的单面图案，被称为“压花”表面。压花表面包括无光泽、低反光率屋面，类似机械抛光的图案，以及适合幕墙的亚麻布纹。这些浅花纹有效地将光线漫反射，使眩光最小化，使面板看起来更平坦，例如在建筑物的应用。两根花纹辊压出的双面图案，称为“浮雕”表面。浮雕图案包括波纹、外胎花纹、用于地板的方格或菱形图案，还有均匀分布的小凹坑和泪滴图案。它们用于传送带、防滑耐磨地板和楼梯、公共区域耐撞击墙板和浴室隔墙等。压花奥氏体不锈钢板强度得到提高，更坚硬，更耐划伤和撞击。

订购压印和压花表面时，请参照国际标准。ASTM A793是不锈钢地板的标准。ASTM A947M是不锈钢花纹板标准。欧洲标准EN10088包括波纹表面(2W表)和花纹表面(1M为地板，2M为较浅的压花或浮雕)。



不锈钢压花板。© Martina Helzel

公共交通、护理设施和公园的防滑栏杆、柱子和扶手很多都采用这些表面的激光焊管。一侧有可见的细焊缝。

14.5 着色不锈钢

不锈钢表面着色有三种主要方法。不锈钢可以喷涂标准金属漆和底漆或涂瓷釉，但必须提前几个小时去除钝化膜，才能保证底漆的附着力。用活化溶液除去钝化膜，也可以使用含有侵蚀剂的底漆。与所有涂料一样，涂层最终会损坏；不过，不锈钢基材的耐腐蚀性通常会延长其使用寿命，比耐蚀性较低金属更耐用。

不锈钢的电化学着色方法类似于铝或钛的着色。都是利用电化学方法使这些金属上的钝化膜变厚，使其呈现出色彩。尽管这种表面处理和钝化表面的效果一样好，但任何腐蚀都会导致变色。因此，对于有腐



西雅图多普勒大楼上的电化学着色不锈钢“鳞片”。© IMOA

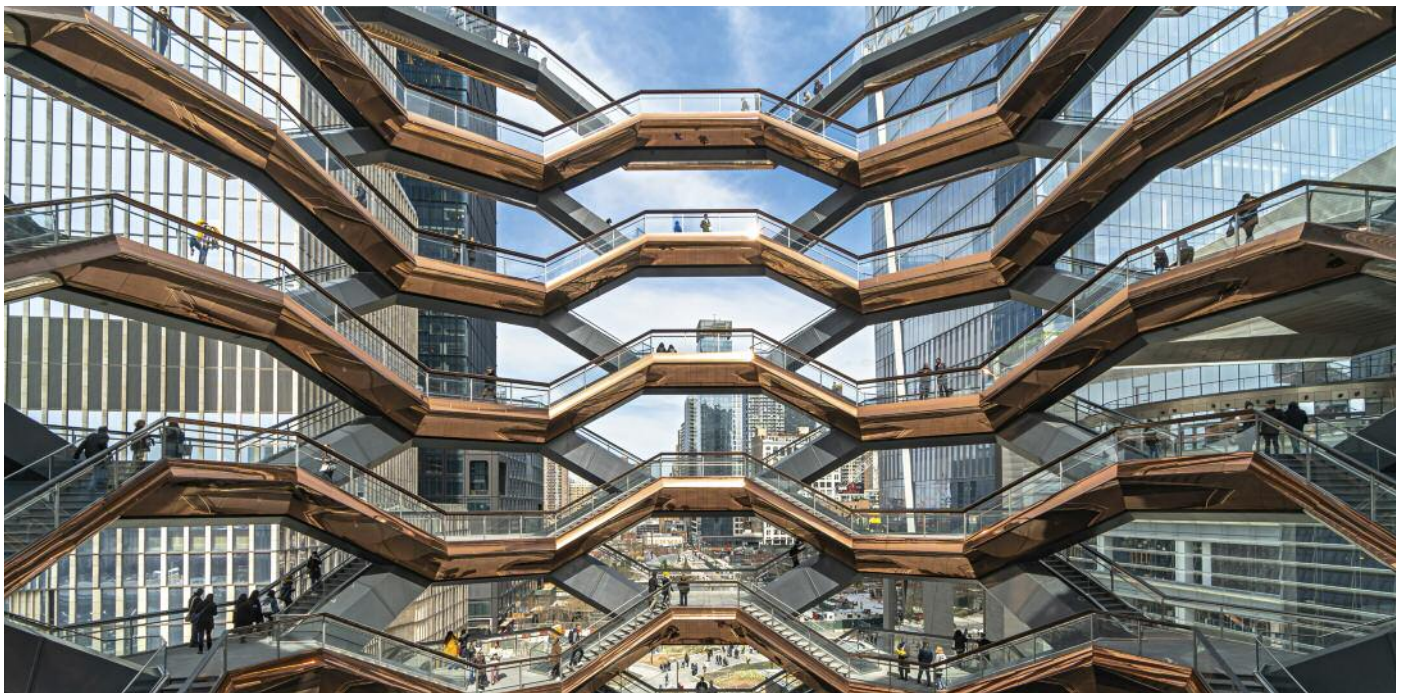
蚀性盐或污染性环境，选择合金时要留有余量或安排定期清洗。这种表面很容易被划伤和损坏，但不会因紫外线照射而褪色。它们在屋顶

和幕墙上的应用已有40多年，未发现明显变色。有多种颜色可供选择，这种着色工艺可用于任何表面。压花和着色表面尤其受欢迎。

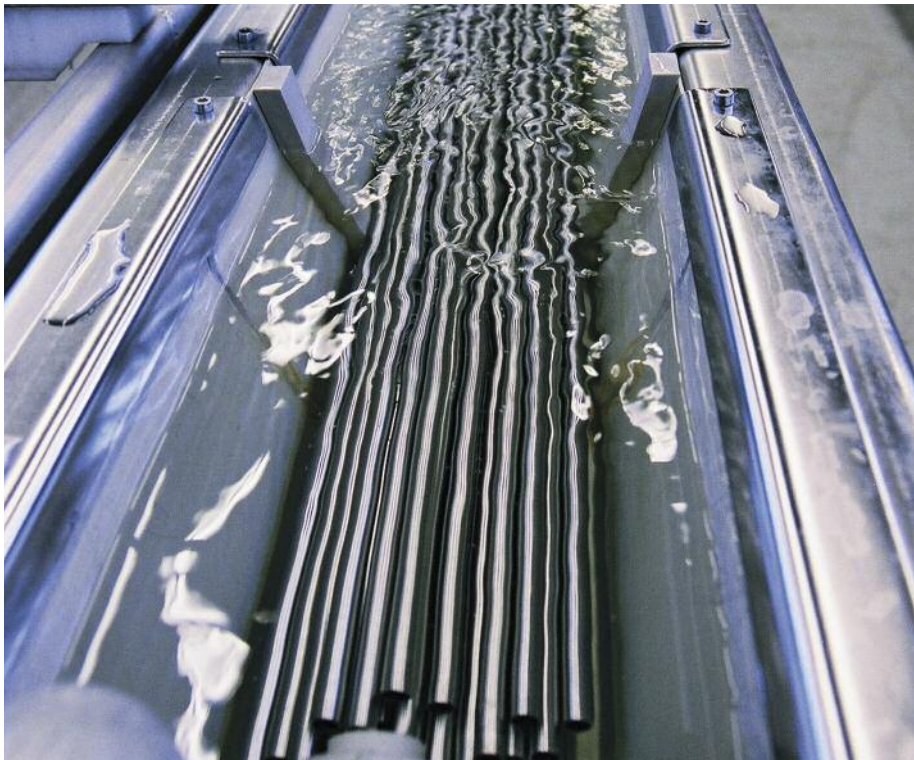
透过半透明的颜色可以看到下面的纹理，从不同角度观察，有不一样的外观效果。

物理气相沉积(PVD)或溅射可以将非常薄的陶瓷涂层涂覆在不锈钢表面。有多种颜色可供选择。这些涂覆饰面不透明，但底层的纹理会影响其光泽度。它们比电化学着色饰面更耐划伤，颜色更均匀。但是，它们有气孔，如果使用不当，会发生脱落、颜色不一致，并存在缝隙腐蚀问题。建议供应商对产品进行检测。

其它化学着色方法也曾用于不锈钢，但大多数方法都不如上面这几种耐用。对于室内外人流量大和有风沙的环境，建议测试着色方法的耐久性。



PVD彩色不锈钢用于纽约市的建筑物“容器”。© Shutterstock.com/TZIDO SUN



不锈钢管的电抛光。© Sandvik

14.6 电抛光

电抛光(EP)是一种电化学抛光方法，即在特殊的抛光电解液中，让电偶电流在金属加工表面和惰性阴极之间通过。电抛光工艺使表面光滑平整，形成高反光镜面饰面。通常，电抛光是在经过机械抛光的非常光滑的表面上进行。

电抛光可以将工件浸入一个大的抛光液槽中并施加所需的阳极电流，也可以使用手持式阴极进行局部电抛光，手持式阴极包裹着一个吸满

抛光液的软垫。电抛光可以消除表面缺陷，形成非常光滑的钝化表面，耐腐蚀性超过其它饰面。由于提高了耐蚀性和清洁性，电抛光表面常用于食品、制药、医疗和半导体行业的工艺设备。涉及不锈钢电抛光的标准包括：

- ISO 15730:2000，金属和其它无机涂层-电抛光，使不锈钢光滑、钝化的方法
- ASTM B912，电抛光钝化不锈钢标准
- SEMI F19，不锈钢部件湿润表面的表面状况规范

14.7 制造完成后对饰面的恢复和保护

大多数制造工序甚至简单的加工都会划伤和损坏不锈钢饰面。修复可以消除不连续性，并使工件的抛光表面均匀一致。修复焊缝或其它表面缺陷的步骤与上述抛光表面的加工步骤相同。首先，根据工件的几何形状，选用粗磨盘、百叶轮或砂带清理焊缝和变色处。然后，用细磨料对粗磨表面进行抛光，直至其光滑并与周围的外观效果匹配。完全隐藏焊缝有些困难。

不锈钢表面有粘胶保护膜，在大多数制造过程中，保护膜可以留在不锈钢表面。如果涉及到局部加热，应将加热部位的保护膜撕掉。只有当部件具备安装条件或者安装完成后，才可以将保护膜全部撕掉。这样可以尽可能地保护表面，减少修复工作。不是所有的保护膜都适用于户外(紫外线)环境，长期置留在表面会老化，当去除保护膜时会产生问题。

15 加工制作后的表面清理

不锈钢表面应该保持清洁、光滑，不能有大块的表面氧化物和污染物。加工制作，如切削或焊接，会使表面发生变化，降低耐蚀性。加工制作会在表面留下游离铁、氧化物和其它沉积物，它们消耗铬，造成钝化膜受损。加工制作也会造成机械损伤，例如，粗糙的打磨痕迹(加工制作造成的表面受损示例见图34)。因此，加工制作后，必须将部件清理干净，通过补救措施恢复耐蚀性。下面介绍表面损伤及解决措施。

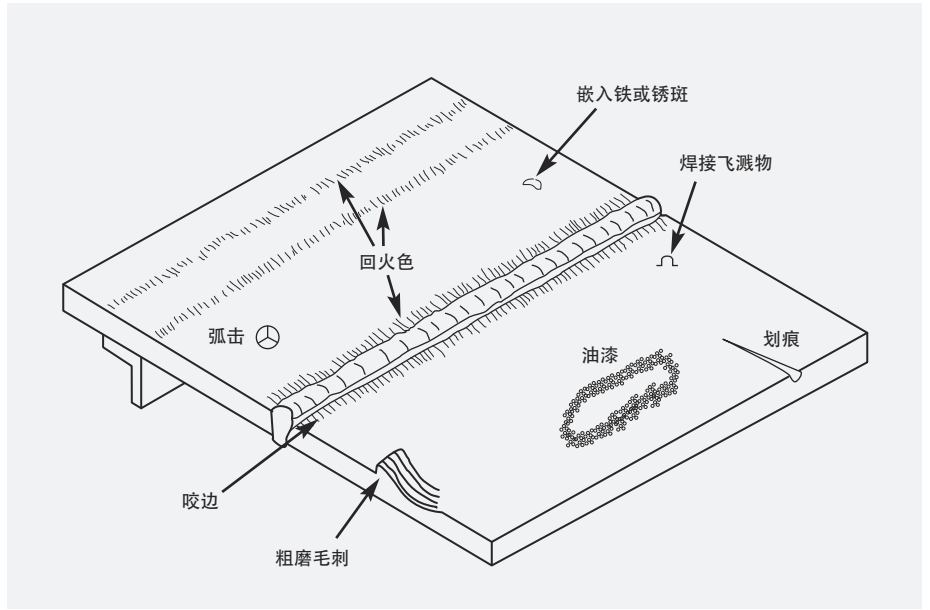


图34：加工制作中可能造成的表面损伤和污染(5)

15.1 常见的损伤和表面污染

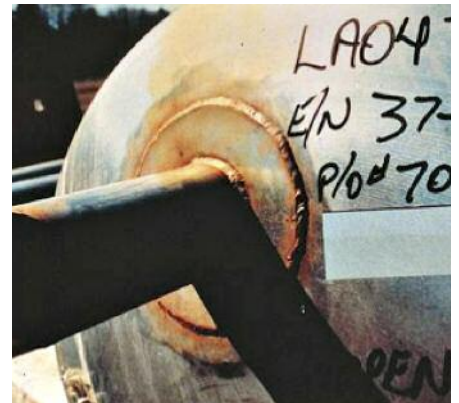
15.1.1 铁污染

每当不锈钢与碳钢发生接触，就可能产生铁污染。这是一个普遍关注的问题，因为所有制造车间都会用到碳钢工具和夹具。沉积在不锈钢表面上的铁颗粒会在潮湿环境中腐蚀并形成锈渍。右图显示了碳钢与不锈钢表面发生不当接触的一个常见例子。如果不锈钢所处的应用环境接近它的耐蚀性极限，锈渍也会导致不锈钢发生腐蚀。虽然铁污染对高性能奥氏体不锈钢的影响没有像对标准牌号那么严重，但也不能避免这种情况。图35通过比较几种铁污染对316型和6%钼不锈钢耐腐蚀性的影响说明了这一点。

制造车间的铁污染源通常来自：

- 在不锈钢附近打磨碳钢的粉尘

- 碳钢工具或曾用于碳钢的设备或工具
- 曾用于碳钢的砂轮
- 钢丸喷砂介质
- 曾用于碳钢的喷砂磨料
- 碳钢夹具和吊钩、吊链
- 加工碳钢用过的成型辊，压力机和模具
- 钢刷和钢丝棉
- 碳钢和不锈钢之间的任何其它物理接触



用碳钢丝刷清理不锈钢焊缝造成的变色和锈迹。© Outokumpu Stainless

15.1.2 有机化合物污染

有机化合物包括成型润滑剂、油基冷却液、标记笔痕迹和污垢。这些污染物会在不锈钢表面形成缝隙，

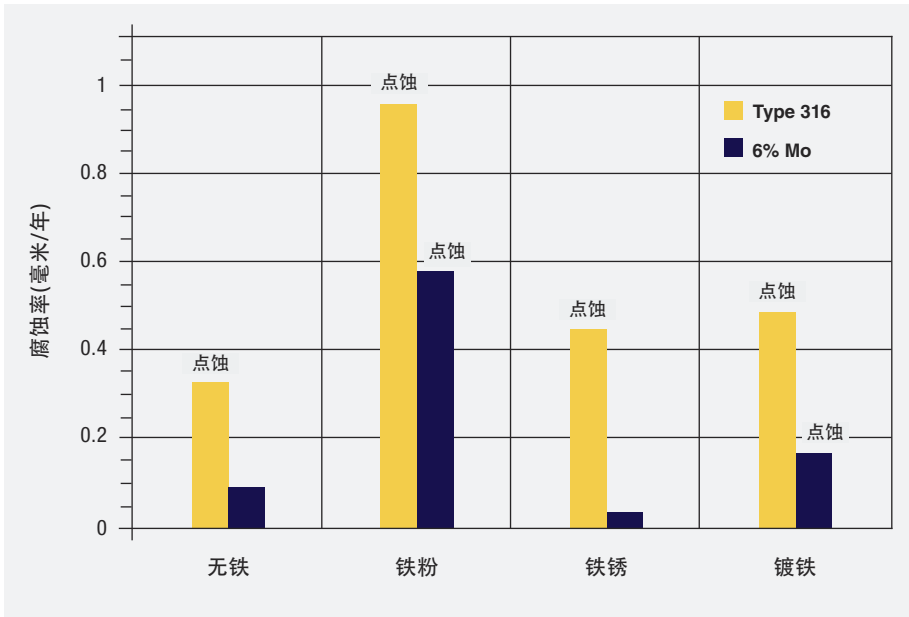


图35: 各种铁污染对316和6%钼不锈钢耐点蚀性的影响。试样在3%CaCl₂, 3%NaCl, 0.5%FeCl₃溶液和80%空气/20%SO₂气氛中暴露24小时。(31)

并在某些使用环境中引发缝隙腐蚀。它们还可以屏蔽已经嵌入的铁或焊接氧化物，造成酸洗或钝化用的酸液无法到达金属表面，使不锈钢得不到清洗和钝化。此外，如果不清除有机化合物，它们会在随后的焊接或热处理操作中使不锈钢表面碳化。

15.1.3 退火和焊接过程中形成的氧化皮

当不锈钢暴露在退火、应力消除或焊接的高温环境时，有氧气存在，不锈钢就会形成氧化皮。不锈钢在空气中加热和在炉内氧化气氛下都会形成氧化物。在较高温度下形成的氧化物不能有效地阻止水溶液腐蚀，它们的存在会降低耐腐蚀性。这些氧化物是多孔的，而且厚度比干净不锈钢表面通常在较低温度下

形成的保护性钝化层要厚的多。随着氧化层从薄到厚，氧化物的颜色从透明的淡稻草色到深蓝色和暗黑色。氧化皮的颜色和厚度取决于暴露温度和时间，温度越高，时间越长，氧化层越厚，例如，焊接氧化层比退火氧化层更薄，颜色更浅。

焊接时用低氧保护气体或在保护气氛下退火，可将氧化程度降至最低，即使非常注意，也很难完全避免氧化变色。只要有肉眼可见的氧化物就说明清理工作势在必行。

氧化层下面的不锈钢比基材的耐腐蚀性低。因为在氧化层形成和生长过程中，金属中的铬优先离开不锈钢表面进入到氧化物中，使紧靠氧化物下面的不锈钢出现贫铬。图36显示了焊接变色层和下面不锈钢的铬含量变化。氧化物下面的金属的最低铬含量达不到使铁合金成为不锈钢所需的10.5%。因此，在制作加工后清理期间，必须清除氧化皮和贫铬金属，才能完全恢复耐腐蚀性。

15.1.4 其它缺陷

焊接缺陷(咬边、焊接飞溅和弧坑)会造成导致腐蚀的缝隙。划痕、凿口和特别粗糙都会导致微裂缝和表面严重变形，这样的表面会聚积侵蚀性污染物。如果不清除这些

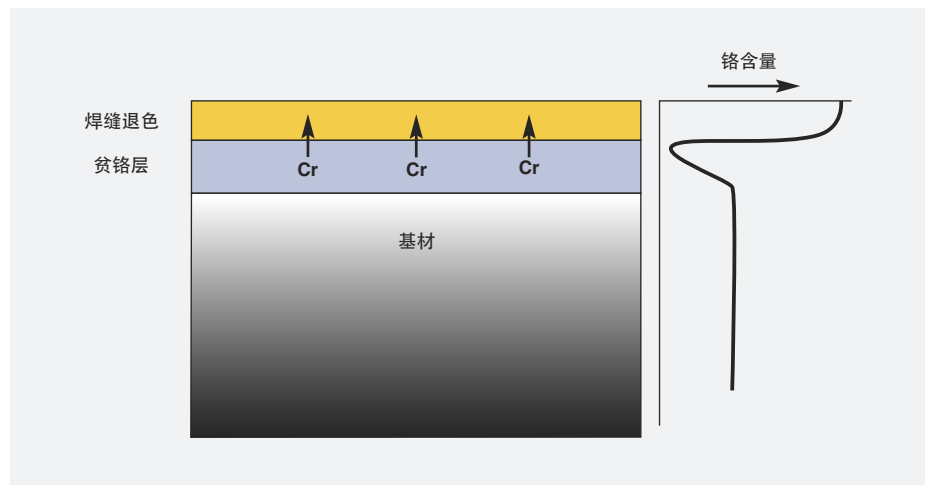


图36: 氧化表皮铬浓度示意图

缺陷，它们会成为局部腐蚀的的发源地。像铜这样的低熔点金属造成的表面污染会在后续的加热过程中导致液态金属脆化(一种晶间腐蚀)。

15.2 加工制作后的清理方法

许多机械和化学方法都可用于加工后清理。采用哪种清理方法要考虑污染的性质和严重程度，以及不锈钢的用途。最好的方法都包括最后的化学处理，这样可以恢复钝化状态和耐蚀性。表30总结了常用的清理方法并对每种方法做了简要说明。

15.2.1 喷砂

喷砂是清理大面积厚氧化皮经济有效的方法。砂粒必须干净，而且不能在碳钢上用过。砂粒很容易嵌入污垢或铁粒子等污染物。为了获得最佳的耐蚀性，喷砂后有必要进行钝化处理。对于污染物嵌入比较严重的情况，有必要在喷砂后进行酸洗。

15.2.2 玻璃珠喷丸

玻璃珠喷丸比喷砂更为可取，因为玻璃珠喷丸处理后的表面较光滑。在这个过程中，初始清洁度很重要。喷丸处理后也需要最终钝化，

在污染物嵌入严重的情况下，还需要进行酸洗。

15.2.3 打磨和抛光

粗磨可以去除深度缺陷，比如，焊缝咬边和深度划痕。打磨轮或打磨带一定要用新的，或者只在不锈钢上用过的。打磨时要避免表面温度升高到形成黄色氧化层的程度。为了获得具有良好耐腐蚀性的光滑表面，粗磨后必须依次使用更细的磨料进行精磨，磨料粒度在180-220目之间可产生光滑表面，具有良好的耐腐蚀性。打磨后钝化可以提供更好的耐腐蚀性。

表30: ASTM 加工制造后的清理方法

缺陷或污染	清理方法	说明
油，切割剂、有机化合物	溶剂， 热蒸汽， 高压水， 碱性清洗剂	酸洗或钝化前和高温暴露(如焊接)前， 去除有机化合物
钢和铁	钝化	钝化剂必须具有足够的腐蚀性，以去除铁污染。 如果有大量的嵌入铁，则有必要进行酸洗。
	酸洗 电抛光 精磨	如果酸洗，一般不必进行钝化。打磨后进行酸洗或钝化，确保所有的铁粒子均被清除。
颜料	喷玻璃珠或溶剂	用干净的打磨料
退火氧化皮	喷砂或喷玻璃珠， 然后酸洗和/或钝化	用干净的打磨料
咬边，粗磨痕迹，划痕 焊接飞溅物	精磨	只能用干净、无污染的介质 粗磨不能作为精整，用细磨料精磨至表面光滑
焊接变色	打磨/抛光 酸洗 喷丸 电抛光 刷光	打磨和酸洗相结合是恢复耐蚀性最有效的方法。 如果采用刷光，刷光后要进行酸洗或电抛光， 才能完全恢复耐腐蚀性。

15.2.4 不锈钢钢丝刷/不锈钢钢丝棉

不锈钢钢丝刷或不锈钢钢丝棉可以去除表面回火色、表面污染物和污渍。它们无法去除贫铬层。钢刷或钢丝棉清理后表面会有轻度氧化，需要通过酸洗才能完全恢复耐蚀性。

15.2.5 脱脂

有机污染物，如切削油、深冲润滑剂或标记笔印迹，都会使耐蚀性下降并导致腐蚀。在酸洗或用酸进行

钝化时，它们阻挡酸液与不锈钢表面接触。因此，在交付用户使用前或化学清理前，必须用碱性清洗剂或不含氯化物的溶剂清理干净。

15.2.6 酸洗

酸洗表面具有很好的耐蚀性。酸洗利用强酸去除氧化皮和下面的贫铬层。由于酸洗会溶解不锈钢表层，所以必须严格控制，避免过度浸蚀表面。酸洗后产生钝化良好的哑光暗灰色清洁表面。

酸洗液的种类很多。它们通常含有

少量的硝酸、氢氟酸和硫酸，有的酸洗液含一种酸，有的含有多种酸。根据不锈钢牌号、氧化皮厚度、喷丸或其它预处理程度，选择最适合的酸洗液成分、溶液温度和浸泡时间。

酸洗速度因合金而异。例如，304和316不锈钢使用的酸洗参数不能满足6%Mo-高性能奥氏体不锈钢等高耐腐蚀合金的需要。图37显示，在硝酸/氢氟酸酸洗槽中，各种不锈钢的金属去除率在很大程度上取决于其合金含量(注意：去除率的对数刻度)。该曲线图表明，合金含量较高

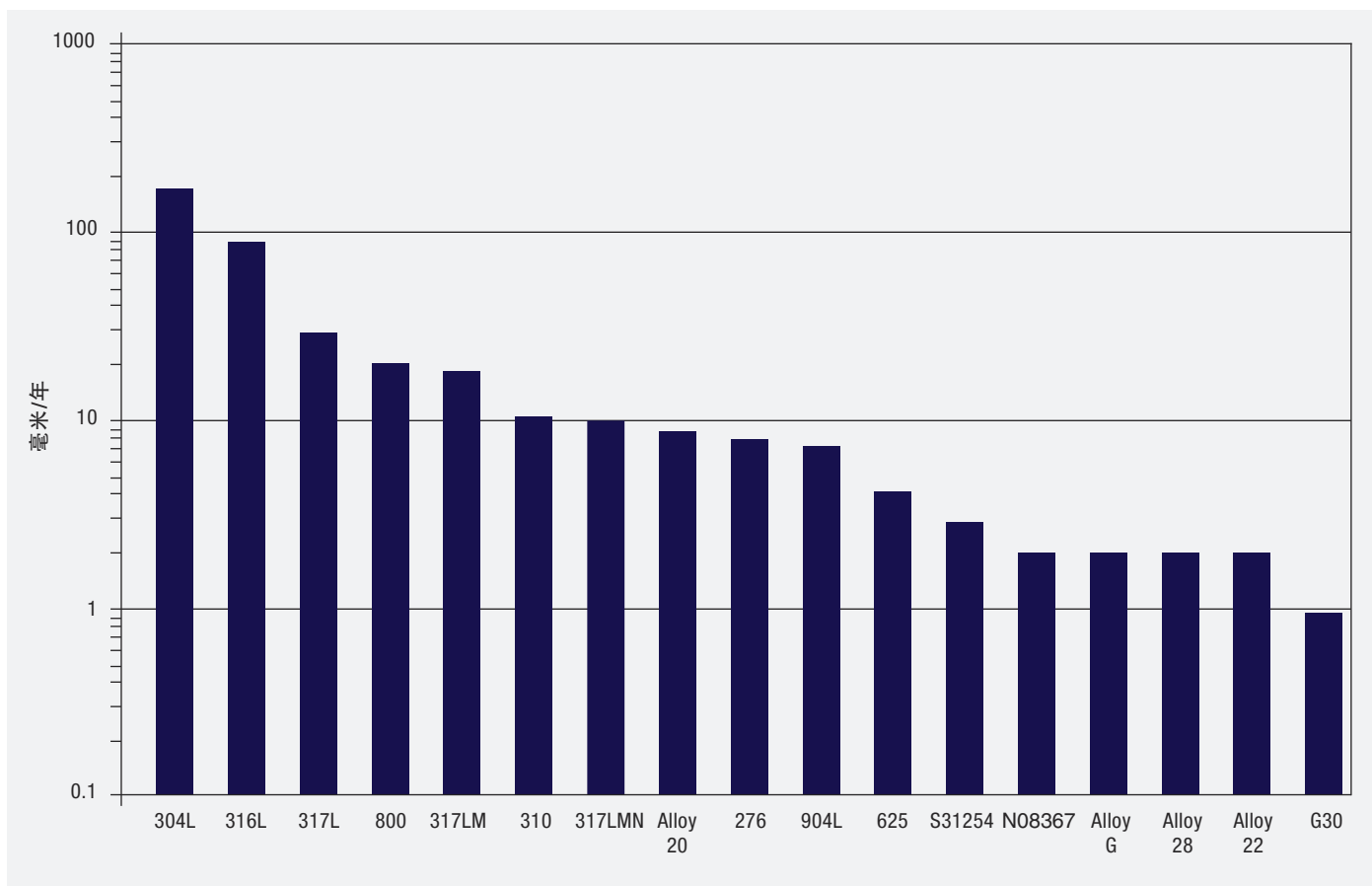


图37：不锈钢和镍基合金在模拟酸洗溶液中的金属去除率，(10% HNO_3 +3% HF)，21°C(70°F)。(32)



焊接部件制作后清理：左：焊后，中：酸洗，右：电抛光。© Calamo AB

的奥氏体不锈钢比标准牌号的酸洗时间长很多。在大多数情况下，先喷砂再酸洗可以合理缩短酸洗时间。如果想更快速地去掉高合金不锈钢的氧化皮，可使用熔盐浴去除氧化皮。

不采用机械预处理的酸洗程序，必须先对表面进行脱脂，以确保酸洗剂能够顺利到达不锈钢表面，有效去除氧化皮和贫铬层。

进行酸洗时，可将工件浸泡在酸洗槽中，或将酸洗液喷洒在工件表面。专利酸洗产品有喷涂液、凝胶或软膏，可以局部使用。酸洗膏可以用刷子涂在整个制件上，也可以局部涂抹，例如，只涂在焊缝处。

酸洗后，用溶液彻底冲洗部件，中和表面残留的酸洗液，最后再用低氯清水冲洗，自然晾干。另外，可以对最终冲洗后的表面进行检测，确定表面的酸和氯化物离子是否全部清除。

用过的酸洗液和冲洗液应按照废液排放条例进行处理。阅读和遵守安全规程非常重要(例如：使用护目镜、手套和其它防护装备)。氢氟酸尤其危险，因为它可以渗透皮肤，留在体内。会对人体造成长期、严重损害，甚至致人死亡。务必遵守所有涉及酸洗安全和环保的预防措施。

15.2.7 钝化

钝化用于去除不锈钢表面的轻度铁污染。钝化的侵蚀性比酸洗弱，因此，不能去除氧化皮或贫铬层。酸钝化形成钝化保护膜，使不锈钢表面在空气中具有钝化膜自修复能力。这种方法对保证未经酸洗的不锈钢得到彻底清理非常有效。经过喷丸、打磨或刷光预处理后，酸钝化处理可以保证表面的铁完全被清理掉。

ASTM A967和A380提供了多种不锈钢钝化处理的信息。市场上也有

多种钝化产品。硝酸钝化处理通常使用20-45%体积%的硝酸水溶液。将零件放入20-30°C(70-90°F)的钝化液中浸泡约30分钟，然后用水冲洗。柠檬酸也可以非常有效地钝化不锈钢，当使用硝酸可能会带来安全或环境隐患时，柠檬酸常常是首选。氢化柠檬酸去除表面铁污染效果非常好。钝化前必须先对表面进行脱脂处理，以确保钝化剂能够到达不锈钢表面并把铁清除干净。

15.2.8 电抛光

电抛光是一种电化学方法，可以去除嵌入的铁、焊接回火色和非金属杂质，使表面平滑有光泽。电抛光属于精加工，常用于洁净度和卫生条件非常重要的应用中。电抛光表面方便检验，更便于清理，因为污物不容易附着在光滑的表面上。这些特性使其成为制药、半导体、气体处理和食品饮料行业设备部件的首选精加工工艺。

表31：制作后清理方法汇总

缺陷或污染	化学处理				机械处理		
	脱脂	酸洗	电抛光	钝化	喷丸	钢丝刷	打磨/抛光
油脂和油	E	N	N	N	N	N	N
焊接回火色	N	E	E	N	E	(E)1	E
焊缝贫铬区	N	E	(E)2	N	N	N	(E)3
焊渣	N	E	(E)	N	(E)3	(E)	E
表面轻度铁污染	N	E	E	E	(E)4	(E)4	(E)4
嵌入式铁污染	N	E	(E)	(E)	(E)4	N	(E)4
表面焊缝缺陷， 机械划痕染	N	N	N	N	N	N	E

E = 有效
(E) = 可能有效
N = 无效

1 = 只能去除焊缝变色
2 = 由于该区域非肉眼可见，很难确定该区域是否被清理干净。
3 = 死角有难度
4 = 铁污染易形成污渍

15.3 清理方法对耐蚀性的影响

制作后的清理方法对耐蚀性影响非常大。研磨垫打磨、不锈钢钢丝刷清理和粗磨对于恢复基材耐蚀性效果最差(17)。机械清理+酸洗或钝化可以使耐蚀性最大化。表31列出了几种加工制作后清理方法的有效性。图38显示了根据最终的耐蚀性能(即临界点蚀温度)，用几种方法清理焊缝、热影响区和母材的相对有效性。

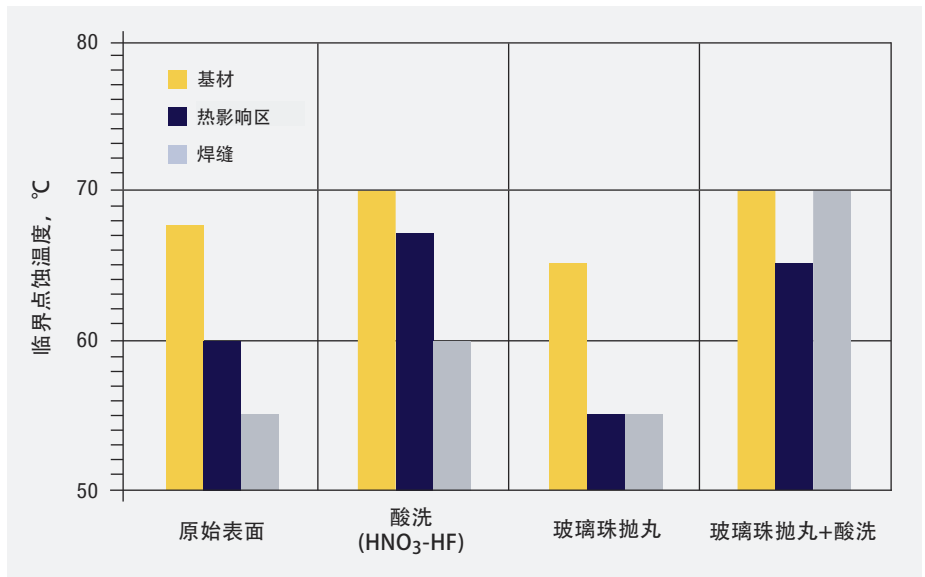


图38：不同的清理方法对6%钼不锈钢耐点蚀性的影响，以临界点蚀温度CPT为衡量指标。(33)

参考文献

- 1 Antero Kyrolainen, Martti Vilpas, and Hannu Hanninen, *J of Materials Engineering and Performance*, Vol. 9 December 2000, p 669.
- 2 *Welding of Stainless Steels and Other Joining Methods*, American Iron and Steel Institute, Washington DC and Nickel Institute, Toronto, 1979. Available as Nickel Institute Publication No. 9002.
- 3 M. G. Fontana and N. D. Greene, *Corrosion Engineering*, 2nd Edition, McGraw-Hill, Boston, p 59, 1978.
- 4 Novak, C. J., "Structural and Constitution of Wrought Austenitic Stainless Steels", Chapter 4 of *Handbook of Stainless Steels*, Peckner, D. & Bernstein, I. M., Eds, McGraw-Hill, 1977, p 4-45.
- 5 *Guidelines for the Welded Fabrication of Nickel Stainless Steels for Corrosion Resistance Service*, Nickel Institute Toronto, rev. 2020. Available as Nickel Institute Publication No. 11007.
- 6 Weiss, B. and Stickler, R., *Metallurgical Transactions*, Vol. 3, 1972, p 851.
- 7 Unpublished data, provided by Outokumpu.
- 8 The influence of N, Mo, and Mn on the microstructure and corrosion resistance of austenitic stainless steels, R.F. A. Jargelius-Petersson, Doctoral Thesis, Dept. of Materials Science and Engineering, Royal Institute of Technology, S-100 44 Stockholm, Sweden, Loharad, 1998.
- 9 M. O. Speidel and P. J. Uggowitzer, "High Manganese, High Nitrogen Austenitic Stainless Steels: Their Strength and Toughness", in *Proceedings of Two Conferences on High Manganese Austenitic Steels: the First Conference Held in Conjunction with ASM International's Materials Week '87*, Cincinnati, Ohio, 10-15 October 1987; the Second Conference Held in Conjunction with ASM International's Materials Week '92, Chicago, Illinois, 2-4 November 1992, R. A. Lula, ed., American Society for Metals, Metals Park, 1992.
- 10 *High Performance Stainless Steels*, Nickel Institute, Toronto, 2000. Available as Nickel Institute Publication No. 11021.
- 11 *Corrosion Resistance Tables: Metals, Nonmetals, Coatings, Mortars, Plastics, Elastomers, and Linings and Fabrics*, CRC Press, 5th edition (2004), Philip A. Schweitzer (editor).
- 12 Sandvik, on-line corrosion tables.
- 13 *BAM Dangerous Goods Database* version 12.1.
- 14 M. G. Fontana and N. D. Greene, *Corrosion Engineering*, 2nd Edition, McGraw-Hill, Boston, p 62, 1978.
- 15 American Boat & Yacht Council, *Electric Division Standard ABYC E-2 Cathodic Protection*, p 9, July, 2013.
- 16 *Designer Handbook Stainless Steel Fabrication*, Specialty Steel Industry of North America.
- 17 *ASM Specialty Handbook, Stainless Steels*, Edited by J. R. Davis, ASM International 1994, p 261.
- 18 *Stainless Steel Informational Series, The Fabrication Of Stainless Steel*, Southern Africa Stainless Steel Development Association (SASSDA), 2017.
- 19 *Stainless Steel Fabrication*, Allegheny Ludlum Steel Corp, 1959.
- 20 Curtis W. Kovach, "Sulfide Inclusions and the Machinability of Steel", in *Sulfide inclusions in steel: Proceedings of an International Symposium*, 7-8 November 1974, J. J. deBarbadillo and Edwin Snape, Eds., American Society for Metals, Metals Park, 1975.
- 21 Compiled from Avesta Sheffield Machining Guidelines, now out of print and replaced by *Machining Handbook*, Outokumpu, 3rd Edition, 2019
- 22 "Heat Treating of Stainless Steels", *ASM Handbook*, Vol. 4, Heat Treating, p 774, ASM International, Materials Park, 1991.
- 23 *Welding Handbook*, Outokumpu, 2nd Edition, 2019
- 24 *Matchless in Stainless, Practice and Products for Stainless Steel Welding*. voestalpine Böhler Welding Group GmbH.
- 25 *The Avesta Welding Manual*, Practice and products for stainless steel welding, Avesta Welding AB, Avesta Sweden (2004).

- 26 Richard E. Avery, "Pay Attention to Dissimilar Metal Welds: Guidelines for Welding Dissimilar Metals", Chemical Engineering Progress, May 1991, American Institute of Chemical Engineers, Danbury. Available as Nickel Institute Publication No. 14018.
- 27 Design Manual for Structural Stainless Steel, 4th Ed., The Steel Construction Institute, 2017. Available from www.steel-stainless.org/designmanual
- 28 Working With Stainless Steels, Pierre-Jean Cunat, Brussels, Euro Inox, p 117.
- 29 Euro Inox, Adhesive Bonding of Stainless Steels, Materials and Application Series, Volume 21.
- 30 Stainless Steels in Architecture, Building and Construction – Guidelines for Corrosion Prevention, Nickel Institute, Toronto, 2001. Available as Nickel Institute Publication No. 11024.
- 31 W. L. Silence, P. Cook, J. R. Dillman, and F. G. Hodge, "The Effect of Surface Iron Contamination on the Corrosion Resistance of Alloys in Simulated FGD Environments", Paper 482, Corrosion 98, National Association of Corrosion Engineers, Houston, TX, 1998.
- 32 J. F. Grubb, "Pickling and Surface Chromium-Depletion of Corrosion Resistant Alloys", Stainless Steels '91, Proceedings of the International Conference on Stainless Steels, 1991, Chiba, p 944-951 ISIJ, 1991.
- 33 A. Tuthill and R. E. Avery, "Specifying Stainless Steel Surface Treatments", Advanced Materials and Processes, December 1992. Available as Nickel Institute Publication No. 10068.

推荐阅读

规范

Specifying Stainless Steel Surface Treatments, Nickel Institute Publication No. 10068

冶金

Handbook of Stainless Steels, Peckner, D. & Bernstein, I. M., McGraw-Hill, 1977

High Performance Stainless Steels, Nickel Institute Publication No. 11021, Nickel Institute, Toronto, Canada

腐蚀

Corrosion of Stainless Steels, 2nd edition, A. John Sedriks, John Wiley & Sons, Inc., 1996

Corrosion Resistance Tables, 5th edition, Philip A Schweitzer, Marcel Dekker, Inc., 2004

Corrosion Handbook, 11th edition, Outokumpu, 2015

Experience Survey – Stress Corrosion Cracking of Austenitic Stainless Steels in Water, MTI Publication No. 27, Materials Technology Institute of the Chemical Industry

加工制作

Fabrication of Chromium-Nickel Stainless Steels (300 series), Nickel Institute Publication No. 428, Nickel Institute, Toronto, Canada

Fabrication and Post-Fabrication Cleanup of Stainless Steels, Nickel Institute Publication No. 10004, Nickel Institute, Toronto, Canada

Practical guide to Using 6Mo Austenitic Stainless Steel, Nickel Institute Publication No. 10032, Nickel Institute, Toronto, Canada

Fabrication Options for Nickel Containing Alloys in FGD Service: Guidelines for Users, Nickel Institute Publication No. 14029, Nickel Institute, Toronto, Canada

Handbook of stainless steel, 2nd edition, Outokumpu, 2017

Machining Handbook, 3rd edition, Outokumpu, 2019

Sheet Metal Forming Handbook, Outokumpu, 2017

Practical Guidelines for the Fabrication of Duplex Stainless Steels, 3rd edition, International Molybdenum Association Publication, London, UK, 2014

Pickling and Passivating Stainless Steel (Materials and Applications Series, Volume 4), Euro Inox, Brussels, Belgium, 2004

Stainless Steel in Contact with Other Metallic Materials, (Materials and Application Series, Volume 10), Euro Inox, Brussels, Belgium, 2009

Electropolishing Stainless Steels, (Materials and Application Series, Volume 11), Euro Inox, Brussels, Belgium, 2010

Designer Handbook Stainless Steel Fabrication, Specialty Steel Industry of North America

焊接

EN Standard: Welding Recommendations for Welding Metallic Materials, Part 3, Arc Welding of Stainless Steel (EN 1011-3)

Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels, John C. Lippold and Damain J. Kotecki, John Wiley & Sons, Inc., 2005

Stainless Steels Welding Guide, Damian Kotecki and Frank Armao, The Lincoln Electric Company, 2003.

Welding Metallurgy, 2nd edition, Sindo Kou, John Wiley & Sons, Inc., 2002

Welding Handbook, 2nd edition, Outokumpu, 2019

Stainless Steel and Nickel-base Cored Wires to Join Stainless Steel, Voestalpine Böhler Welding, 2018

Welding of Stainless Steels (Materials and Applications Series, Volume 3), Euro Inox, Brussels, Belgium, 2001

Guidelines on the Welded Fabrication of Stainless Steels (Materials and Application Series, Volume 9), Euro Inox, Brussels, Belgium, 2007

Weld Fabrication of a 6% Molybdenum Alloy to Avoid Corrosion in Bleach Plant Service, Nickel Institute Publication No. 14020, Nickel Institute, Toronto, Canada

Guidelines for Welding Dissimilar Metals, Nickel Institute Reprint Series No. 14018, Nickel Institute, Toronto, Canada.

ASTM标准

不锈钢板材产品	
A480/A480M*	General requirements for flat-rolled stainless and heat-resisting steel plate, sheet, and strip
A240/A240M*	Chromium and chromium-nickel stainless steel plate, sheet, and strip for pressure vessels and for general applications
A666	Annealed or cold-worked austenitic stainless steel sheet, strip, plate, and flat bar
不锈钢长材和锻造产品	
A484/A484M*	General requirements for stainless steel bars, billets, and forgings
A555/A555M	General requirements for stainless steel wire and wire rods
A276/A276M	Stainless steel bars and shapes
A479/A479M*	Stainless steel bars and shapes for use in boilers and other pressure vessels
A564/A564M	Hot-rolled and cold-finished age-hardening stainless steel bars and shapes
A314	Stainless steel billets and bars for forging
A473	Stainless steel forgings
A313/A313M	Stainless steel spring wire
A368	Stainless steel wire strand
A492	Stainless steel rope wire
A580/A580M	Stainless steel wire
不锈钢管材产品	
A999/A999M*	General requirements for alloy and stainless steel pipe
A1016/A1016M*	General requirements for ferritic alloy steel, austenitic alloy steel, and stainless steel tubes
A312/A312M*	Seamless and welded austenitic stainless steel pipe
A358/A358M*	Electric-fusion-welded austenitic chromium-nickel stainless steel pipe for high-temperature service
A409/A409M	Welded large diameter austenitic steel pipe for corrosive or high-temperature service
A778/A778M	Welded, unannealed austenitic stainless steel tubular products
A813/A813M	Single- or double-welded austenitic stainless steel pipe
A814/A814M	Cold-worked welded austenitic stainless steel pipe
A249/A249M*	Welded austenitic steel boiler, superheater, heat-exchanger, and condenser tubes
A269/A269M	Seamless and welded austenitic stainless steel for general service
A270/A270M	Seamless and welded austenitic stainless steel sanitary tubing
A688/A688M	Welded austenitic stainless steel feedwater heater tubes

接头、螺栓和锻件

A960/A960M	Common requirements for wrought steel pipe fittings
A962/A962M	Common requirements for steel bolting intended for use at any temperature from cryogenic to the creep range
A182/A182M	Forged or rolled alloy-steel pipe flanges, forged fittings, and valves and parts for high-temperature service
A193/A193M	Alloy-steel and stainless steel bolting materials for high-temperature service
A194/A194M	Carbon, and alloy steel nuts for bolts for high pressure and high-temperature service
A403/A403M	Wrought austenitic stainless steel pipe fittings

对于每类不锈钢产品，表中先列出通用要求规范，然后是特定产品规范。通用要求被纳入每种产品规范中，因此，只注明产品规范即可。例如，订购A240薄钢板，A480的所有要求自动被采用。

* 在ASME锅炉和压力容器规范第二卷中有对应的编号相同的“SA-”规范

EN标准

EN ISO 3581:2016	Welding consumables. Covered electrodes for manual metal arc welding of stainless and heat-resisting steels – Classification
EN 10028-7:2016	Flat products made of steels for pressure purposes – Part 7: Stainless steels
EN 10088-1:2014	Stainless steels – Part 1: List of stainless steels
EN 10088-2:2014	Stainless steels – Part 2: Technical delivery conditions for sheet/plate and strip of corrosion resisting steels for general purposes
EN 10088-3:2014	Stainless steels – Part 3: Technical delivery conditions for semi-finished products, bars, rods, wire, sections and bright products of corrosion resisting steels for general purposes
EN 10151:2002	Stainless steel strip for springs – Technical delivery conditions
EN 10213:2007+A1:2016	Steel castings for pressure purposes
EN 10222-5:2017	Steel forgings for pressure purposes – Part 5: Martensitic, austenitic and austenitic-ferritic stainless steels
EN 10250-4:1999	Open steel die forgings for general engineering purposes – Part 4: Stainless steels
EN ISO 9445-1:2010	Cold-rolled stainless steel narrow strip and cut lengths – Part 1: Tolerances on dimensions and shape
EN ISO 9445-2:2010	Cold-rolled stainless and heat resisting steel wide strip and plate/sheet – Part 2: Tolerances on dimensions and shape
EN 10269:2013	Steels and nickel alloys for fasteners with specified elevated and/or low temperature properties
EN 10270-3:2011	Steel wire for mechanical springs – Part 3: Stainless spring steel wire
EN 10272:2016	Stainless steel bars for pressure purposes
EN 10283:2010	Corrosion resistant steel castings
EN 10312:2002/A1:2005	Welded stainless steel tubes for the conveyance of water and other aqueous liquids – Technical delivery conditions
EN ISO 14343:2009	Welding consumables – Wire electrodes, strip electrodes, wires and rods for arc welding of stainless and heatresisting steels – Classification
EN 10216-5:2013	Seamless steel tubes for pressure purposes – Technical delivery conditions – Part 5: Stainless steel tubes
EN 10217-7:2014	Welded steel tubes for pressure purposes – Technical delivery conditions – Part 7: Stainless steel tubes

注册商标和商品名称

UNS No. (牌号)	通用生产商注册商标和商品名称	公司
N08020	20Cb-3 [®]	Carpenter Technology Corporation
N08904 (904L)	ATI 904L [™] UR [™] 904L Ultra [®] 904L	ATI Properties, Inc. Industeel - ArcelorMittal Outokumpu
N08028	Sanicro [®] 28 INCOLOY [®] Alloy 28 UR [™] 28	Sandvik AB Special Metals Corporation Industeel - ArcelorMittal
S34565	ATI 4565 [™] UR [™] 4565	ATI Properties, Inc. Industeel - ArcelorMittal
N08026	20Mo-6 [®] INCOLOY [®] alloy 25-6MO	Carpenter Technology Corporation Special Metals Corporation
S32053	NAS 254N	Nippon Yakin Kogyo Co.
N08926	VDM [®] Alloy 926, Cronifer [®] 1925 hMo NAS 255NM UR [™] 926 Ultra [®] 6XN	VDM Metals International GmbH Nippon Yakin Kogyo Co. Industeel - ArcelorMittal Outokumpu
S31254	254 SMO [®] UR [™] 254	Outokumpu Industeel - ArcelorMittal
N08367	AL-6XN [®] UR [™] 367 Ultra [®] 6XN	ATI Properties, Inc. Industeel - ArcelorMittal Outokumpu
S31266	UR [™] 66	Industeel - ArcelorMittal
S31277	INCOLOY [®] alloy 27-7MO	Special Metals Corporation
N08031	VDM [®] Alloy 31, Nicrofer [®] 3127 ATI 31 [™] UR [™] 31	VDM Metals International GmbH ATI Properties, Inc. Industeel - ArcelorMittal
N08354	NAS 354N	Nippon Yakin Kogyo Co.
N08935	Sanicro [®] 35	Sandvik AB
S32654	654 SMO [®]	Outokumpu

联合出版：

INTERNATIONAL
CHROMIUM
DEVELOPMENT
ASSOCIATION 

ISBN 978-1-907470-12-7