



转载本集资料需注明出  
自 Nickel Institute 和  
IMO A 资料

NB2010-006

## 沿海地区建筑设计 - 避免金属的腐蚀失效

Designing on the Waterfront - Avoiding corrosion failures with metal

Nickel Institute 国际镍协会北京办事处



# 沿海地区建筑设计 – 避免金属的腐蚀失效

凯瑟琳·胡斯卡

由于高浓度的盐含量,海边地区常常面临着严峻的腐蚀问题。不论该地区是离海水很近,经常受到海水飞溅,还是偶尔受到潮汐的汹涌,材料的快速腐蚀都是相当令人担心的问题。紧邻海水的建筑物、栏杆、灯柱、雕塑面临的腐蚀风险包括外观的过早损伤及彻底的结构失效等等。

研究大气腐蚀的专家已经全面研究了沿海地区腐蚀的影响因素,但是设计师们通常不了解这些研究,或者不知道如何把研究成果运用于设计项目中。此外,关于材料腐蚀性能以及海盐能漂移到离海岸线多远的内陆等方面还存在一些错误的观念。这篇文章帮助设计师判断沿海地区的腐蚀状况,并用案例来说明相关材料的性能。



悉尼海边的雕塑

照片由国际镍协会提供,摄影 Catherine Houska

## 什么因素会影响腐蚀?

腐蚀发生的条件是,材料的表面肯定要被电解质弄湿,电解质就是一种能导电的水溶液。材料表面经常性地被弄湿与其腐蚀率之间有直接的相关关系,并且,盐会增加水导电的能力并加速腐蚀过程,盐还能破坏某些金属表面形成的保护性氧化物。例如,经常性地暴露于含盐环境会破坏金属铝的防护层。

引发腐蚀所必需的湿气,可来自于雨水、雾甚至是空气中的水蒸气(湿度)。大雨或者雷暴雨可帮助去除潜在的有害沉积物,而盐含量较高的小雨反而会由于潮湿气的增加和盐含量的增加而加剧腐蚀。在表 1 所示的临界湿度和温度组合条件下,材料表面的盐开始吸收水分,并形成腐蚀性氯化物电解质溶液。一个地区的天气情况数据有助于确定盐被温度和湿度条件激活的频率、盐雾是否存在以及沿海的降雨形式<sup>1</sup>。

表 1 海盐和除冰盐开始吸收水分形成腐蚀性氯化物溶液时的温度和湿度水平

温度 °C	临界湿度		
	氯化钠	氯化钙	氯化镁
25 °C	76%	30%	50%
10 °C	76%	41%	50%
0 °C	—	45%	50%

盐对水分的吸收延长了腐蚀发生的时间,增加了污染物和颗粒物的腐蚀性。粗糙的表面会造成较高的腐蚀率,因为粗糙的表面聚积更多的腐蚀性表面沉积物并使潮湿气长时间地停留。所以,在沿海腐蚀性环境中,最好采用表面光滑的材料,设计上要便于雨水冲刷,并 / 或制定人工清洗计划。

当建筑物非常接近盐水时,建筑物稍高一些的部位和直接受海风吹拂的部位一般腐蚀率最高。为了说明高

度的影响,将碳钢试样放置于距离佛罗里达州卡那维尔角海岸 55 米(180 英尺)处。样品在地面和距地面 18 米(60 英尺)高处年腐蚀率分别是 0.131 和 0.165 毫米(5.2 和 6.48 密耳),而在距地面 9 米高处(30 英尺)的年腐蚀率比地面处高 3 倍(0.44 毫米 /17.37 密耳)<sup>1,2</sup>。发生腐蚀最严重的部位的高度,随着海岸线形状,风速和地面和水温度的不同而不同。

## 海边含盐环境

当海浪到达海岸时,海盐(包括氯化钠,氯化钙和氯化镁)变成悬浮颗粒漂浮在空中。海边空气中的盐浓度取决于很多因素包括风速、海浪湍流、海岸线的曲折程度以及陆地和海水温度差异。天气条件和海浪情形经常每月都在变化,盐含量也有明显的季节性差异。

盐向内陆迁移的距离由天气情况、地理状况、水滴

尺寸以及悬浮盐颗粒的初始浓度等因素决定。在某些地方,海盐仅局限于距离海边约 1.6 公里(1 英里)的地方,而在另外一些地方,在距离海边 48 公里(30 英里)开外的内陆还有相当高的盐含量<sup>2,3</sup>。

图 A 和图 B 是美国国家大气沉降项目组(NADP)<sup>4</sup>在 1994 至 2006 年间收集的氯化物(盐)沉积数据。该图说明了盐沉积量如何随着时间以及气候的改变而变化。从图上可以清晰地看到加利福尼亚沿海区域和大西洋中部海岸盐含量的不同。其他国家也绘制了类似的氯化物沉积图,它是评估沿海地区腐蚀性的一个重要工具。如果能找到这样的腐蚀地图,了解一个地区多年来的氯化物浓度以及污染,酸雨和天气等情况是很有帮助的。

海浪冲击海岸时会形成悬浮盐颗粒,腐蚀率会增加。海浪的高度和方向,海浪区的宽度,底坡,延伸到海中的陆地,海岸以及悬崖等都会影响颗粒物的含量。海面相对平静的地区(如避风港或者河口),盐含量比较少<sup>5</sup>。

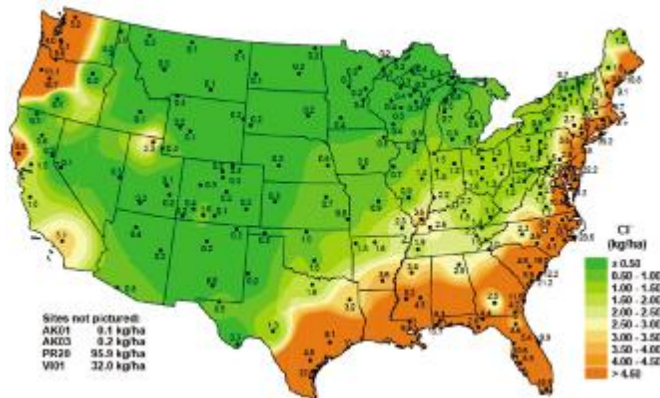


图 A 2006 年样品表面沉积的氯离子(湿盐)浓度,由美国国家大气沉降项目组(NADP)测定。

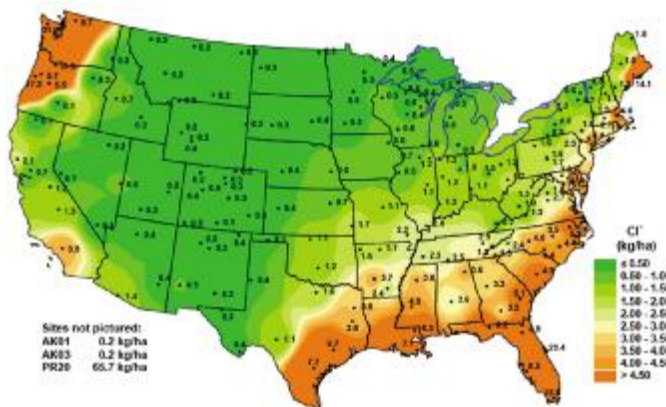


图 B 1994 年样品表面沉积的氯离子(湿盐)浓度,由美国国家大气沉降项目组(NADP)测定。



## 苛刻的沿海环境

世界上腐蚀性最强的沿海地区从外表看差别很大,包括:

- 中东和澳大利亚的部分海岸(高温,局部高湿度,降雨量很少);
- 加拿大新苏格兰省(经常性的低浓度盐雾和小雨);
- 从南非到夏威夷多岩石或海浪汹涌的海岸线。

研究表明腐蚀率最高的区域一般距离海岸线 400 至 600 米(1300 至 2000 英尺),到了距离海岸线最后 50 至 200 米(165 至 650 英尺)<sup>3</sup> 的地方,腐蚀率呈指数级增加。在海岸线或者超过海岸线的地方一般腐蚀性更强,因为那里有海潮汹涌飞溅。

对于经常浸泡在盐水(或者咸水)或受到盐水飞溅的用途,材料的选择需要听从腐蚀专家的建议,应当采用为浸没在盐水中的用途而开发设计的金属,例如“海水级”不锈钢(超级铁素体不锈钢,超级双相不锈钢,或者超级奥氏体不锈钢)。注意:316 不锈钢不是海水级不锈钢,不适合于完全浸泡在海水中或者经常受到海水飞溅的用途。另外,可采用一些腐蚀控制方法来延长耐腐蚀能力较差的材料的使用寿命,但是,使用寿命仍然是有限的,还需要定期检查。

## 金属的选择

对于建筑方面的应用,材料即使没有发生穿孔或者结构上的破坏,其外观随着时间的推移而衰退也被认为是一种失效。如果铝、锌和碳钢(阳极金属)没有和惰性较大的金属如不锈钢和铜仔细分开的话,电偶腐蚀会大大加快阳极金属的腐蚀率。右图中有一个镀锌钢螺栓,用来将 316 不锈钢梯子固定在栈桥码头上,镀锌钢螺栓正以较高的腐蚀率发生腐蚀,螺栓的失效会导致原本未受损的梯子发生倒塌。在含盐环境中,除了耐腐蚀性能最强的不锈钢,本文提到的所有金属都容易发生缝隙腐蚀(即在紧密的接头处的腐蚀),连接处一定要被密封以避免它过早失效。



连接固定 316 不锈钢梯子和栈桥的镀锌钢螺栓以较高的腐蚀率发生腐蚀。螺栓的失效会导致原本未受损的梯子在使用中失效。

照片由 Catherine Houska 提供

## 不锈钢

因为不锈钢是耐腐蚀性最好、最不活泼的建筑金属,常常被用于腐蚀性沿海地区,所以电偶腐蚀对不锈钢来说不是一个问题。不锈钢有很多不同的种类,它们有着各自不同的耐腐蚀性能和强度。应用范围最广泛的 304 不锈钢,因易产生表面锈蚀,通常不用于海边用途,即便如此,这种不锈钢的腐蚀率也是常用的建筑铝合金材料的 1/10 到 1/100<sup>67</sup>。即使它的表面发生锈蚀,它发生结构失效和穿孔也要花几百年的时间。

表面光滑、耐腐蚀能力更强的 316 不锈钢是沿海地区最常用的不锈钢牌号。如果建筑结构偶尔或有规律地受到盐水的飞溅,或者如果悬浮盐颗粒的含量特别高,可以考虑耐腐蚀性更强的不锈钢如 2205, 904L 和 317LMIN。常常利用双相不锈钢如 2205 的高强度来减小部件的截面尺寸,降低成本。



墨西哥普罗格雷索两个相邻的栈桥码头,显示了不锈钢和碳钢长期表现的差异。右后至今仍在使用的码头建于1941年,采用不锈钢钢筋建造,土芯试样显示不锈钢或结构没有发生损坏。旁边已完全损坏的码头是在1960年用碳钢钢筋建造的

照片由国际镍协会提供

## 铝合金

对于建筑常用的铝合金材料而言,含盐环境是破坏性最严重的环境。尽管距离会有不同,但一般而言,在距离大海0.8公里(0.5英里)内铝合金的腐蚀最严重。如果环境中还存在二氧化硫或酸雨,腐蚀率会显著增大。如果在距离海岸线至少3到8公里(2到5英里)的内陆使用铝,海盐对铝的腐蚀作用通常会大幅降低。即使在更靠近内陆的地方使用,也常常必须采用阳极氧化铝或表面应用保护性涂层,并且需要经常性的维护清洗,以便保持原本光洁的表面<sup>8</sup>。

在含盐环境中,除了锌以外,铝是最容易被氧化的建筑金属。所以必须注意使金属分开以避免快速的腐蚀失效。某些炼度的2xxx和7xxx铝合金非常容易发生晶间腐蚀,层状脱落或者应力腐蚀断裂,它们不应该用于沿海环境。结构用铝材在沿海环境可由于表面腐蚀而产生疲劳失效,应采用耐蚀性更好、高强度的铝合金。当一个地区盐含量较高时,选材应咨询专家的意见。

## 铜

铜合金有很多种,有些经常被用于盐水环境中。高纯度的铜合金常被用作屋顶和其他建筑用途。铜的腐蚀率低至与铝相似,高至比铝高10倍。一般认为铜的腐蚀

从美学上讲比较漂亮(不像不锈钢和铝那样)。铜在沿海环境下的腐蚀率差别很大,在腐蚀性最强的环境中,可能不到50年屋顶就发生穿孔。电偶腐蚀对铜来说一般不是问题。如果要在生态脆弱的沿海地区使用铜,必须谨慎,因为铜是潜在的生物杀伤剂。

## 碳钢

裸露碳钢和耐候钢在高盐含量的环境中会很快发生腐蚀。耐候钢在高盐或高二氧化硫环境中将不会形成保护性氧化物层,其腐蚀率类似于无保护层的碳钢。裸露碳钢的腐蚀率比铝高100多倍,比316不锈钢高8000多倍。此外,因为碳钢比不锈钢或铜更活泼,所以必须把碳钢与316不锈钢或铜仔细分开。

可采用含锌和铝(镀锌)的保护性涂层和/或多涂层系统来延长碳钢在沿海地区的使用寿命。涂层的定期维护是必不可少的。一旦涂层剥落,腐蚀将会加速。金属涂层的使用寿命随环境的恶劣程度的不同而明显不同。在一些地方,不到三年的时间就看见了红色铁锈,而有的地方20多年才发生腐蚀。在最苛刻的沿海环境下,一般采用金属涂层加多层涂料来延长使用寿命。即使采取了这些预防措施,盐水飞溅区的碳钢围栏也只能使用8年而不发生结构损害。锌是潜在的生物杀伤剂,而有时需要收集和净化来自锌合金和镀锌层屋面的径流水。





在苛刻的海洋气候下,南非开普敦海岸上的镀锌钢门和屋顶很快发生腐蚀

照片由 Catherine Houska 提供

## 开普敦的门

坐落在南非开普敦郊区的一个海边餐馆,侧面入口的门选用了镀锌钢,因为它初始成本很低。这座建筑在暴风雨中会受到海水喷溅,从而加剧腐蚀。可以看见旁边建筑物的镀锌钢屋顶发生了腐蚀。因为碳钢上的镀锌保护层已经剥落,如果不加保护性涂层,腐蚀就会加速。这个岩石嶙峋的海滨尽管污染程度很低,但是盐浓度很高。对该地区的腐蚀研究表明,不到三年,镀锌钢就会出现明显的红色腐蚀锈迹,门的继续腐蚀会对安全构成威胁。在这个环境条件苛刻的海岸地区,屋顶的穿孔可能很快会发生。

## 西雅图的栈桥码头

在华盛顿州西雅图市,镀锌钢用于制作金属罩和锚固系统,将木制的栈桥支柱与混凝土桥面连接起来。从图上可以看到,有一部分区域已经腐蚀掉了,结构已经变得不安全了。用于固定支柱和混凝土桥面的镀锌钢螺栓也发生了腐蚀。碳钢一旦发生腐蚀就会继续扩展,其中一个螺栓已导致混凝土桥面开裂。所幸其它一些支柱的锚固系统没有出现这么多的腐蚀,但是如果不采取加以修复,栈桥就将发生整体结构的失效。



华盛顿州西雅图一个由碳钢制成的栈桥锚固系统发生严重腐蚀

照片由 IMO A 提供, Catherine Houska 拍摄



## 大连雕塑

中国沿海城市大连在其海之韵公园建造了一座漂亮的不锈钢海滨雕塑,雕塑位于一个延伸到港湾的人造半道上。尽管曾提醒过雕塑的业主方,雕塑有必要采用耐腐蚀性更强的不锈钢以取得零腐蚀的完美表现,但为了省钱,业主方采用了镜面抛光的 304 不锈钢。虽然这个雕塑没有受到海水的冲刷,但它就在海边,环境中盐含量很高,所以虽然每年都清洗,但仍然看见表面的锈迹。

在每年清洗的间隔期,雕塑表面的锈迹很难看,但腐蚀率是很低的。为了保持表面无锈蚀,至少一个季度需要清洗一次,因为雕塑毗邻盐水。甚至表面光滑的 316 不锈钢也需要每年进行维护性清洗。如果选用耐腐蚀性更强的不锈钢如 317LMN, 904L 或者 2205, 光滑表面,则可以免清洗。



大连海边 304 不锈钢雕塑表面的锈蚀(右图特写), 通过采用耐腐蚀能力更好的不锈钢可避免腐蚀问题。

照片由 IMOA 提供, Nicole Kinsman 拍摄



加那利群岛的 2205 双相不锈钢栏杆使用 25 年后未见任何腐蚀的完美状态

照片由 Outokumpu 提供

## 加那利群岛的栏杆

加那利群岛(西班牙)海滨步行道栏杆的维护和更换成本很高。20 世纪 80 年代初,政府开始寻找更具成本效益的长期解决方案。由于栏杆受到盐水飞溅,所以用镜面抛光的 2205 双相不锈钢栏杆取代了镀锌钢栏杆。照片显示了这些栏杆在使用了 20 多年后仍然漂亮的外观。具有类似或更高耐蚀性的其它不锈钢栏杆也有同样好的表现。之所以选用 2205 双相不锈钢是因为它的强度高,有可能减小断面尺寸,降低成本。即使发生表面锈蚀,这些栏杆的设计寿命也将能长达数百年。



## 初始成本与环境成本

一些读者可能很想知道, 选用每五年需更换一次的价格较低廉的金属, 而不是 50 年才需要更换的较昂贵的合金, 是否更有经济效益?

每一种金属都有其适合的用途。本文的目的是使建筑设计 / 施工人员了解腐蚀性较强的环境中材料的应用, 以便做出明智的选择。如果一种腐蚀速度较快的金属用于短期用途(如临时建筑或设计寿命短的建筑), 此时选择使用寿命尚可而价格便宜的材料是一个成本效益较高的决策。这种设计方法在工业领域很常见。也就是说, 设计者在考虑环境的苛刻程度和金属可能的性能表现上必须较为现实。

在腐蚀性较弱的沿海环境, 涂漆碳钢屋顶可以提供 20 年的使用寿命, 铝屋顶大约可以使用 40 年, 这对于设计寿命较短的建筑来说也还不错。然而在寿命周期评估(LCA)中, 必须考虑与金属失效及更换费用有关的花费, 例如, 加工安装、先前部件的拆卸更换费用是很高的(超过了原材料的价格)。

如果材料的失效影响了其他建筑系统, 将会引起额外的损失。例如, 屋顶的渗漏可能会导致基体和保温隔热材料的更换, 以及可能的拆模或者天花板的修复。当然, 如果之前能仔细检查和更换部件, 这些二次花费能够被避免。但是从寿命周期成本评估的角度看, 必须将日常维护和监测较差的情况考虑进去。

环境问题也必须加以考虑。当发生失效时, 金属被腐蚀并进入环境; 只有残余的材料最后被回收再利用。新金属的开采、提炼以及产品(包括先前的和将要替换的)的生产会产生环境成本。如果其他材料受到影响, 则与每次更换有关的环境成本会增加。

如果耐腐蚀能力较差的金属被用于关键的结构用途, 铝材选用不当, 或者没有将金属隔开, 则有可能发生灾难性的事故, 此时增加的成本远远高于材料的更换费用。作者认为这样做的风险太高。在设计过程中, 特别是在进行长寿命建筑设计或者考虑 2xxx 或 7xxx 铝合金的时候, 如果采纳腐蚀专家的意见, 这些问题是可以避免的。

## 结论

要想成功地设计出长寿命的海滨建筑, 需要对建筑所在地区的盐浓度, 污染和天气情况进行仔细评估, 许多地方都有腐蚀程度的数据可供参考, 大气腐蚀专家也提出了很多建议。对于盐含量较高的沿海地区, 不锈钢是耐腐蚀性最好的建筑金属材料, 而为了实现零腐蚀的完美效果, 可能需要采用更高合金化的牌号。在含盐环境中, 如果没有把不同金属完全分开, 将缝隙密封, 某些金属的腐蚀率会明显增加。

## 其它资源

国际钼协会(IMOA)开发了一套评分体系(免费软件和文献资料见 [www.imoa.info](http://www.imoa.info))帮助选材人员评估含盐环境的苛刻程度。尽管是为不锈钢的选择而开发的, 但其它材料的选材人员也会觉得它很有帮助。还提供了国际气候, 污染和其他相关信息的链接。

## 感谢

作者要感谢国际钼协会(IMOA)为此文提供的帮助。

## 作者

Catherine Houska, 美国建筑规范学会(CSI)会员, TMR 咨询机构资深经理。建筑金属标准规范、选材、修复和失效分析方面的专家, 著有 80 多篇出版物。可通过电子邮件 [chouska@tmr-inc.com](mailto:chouska@tmr-inc.com) 联系

## 注释

1. Houska, C., "Stainless Steel in Architecture, Building and Construction: Guidelines for Corrosion Prevention", Nickel Institute, Reference book series No. 11 024, 2001
2. Houska, Catherine, Metals for Corrosion Resistance: Part II, The Construction Specifier, November 2000
3. Feliu, S., M. Morcillo, and B. Chico, "Effect of Distance from Sea on Atmospheric Corrosion Rate", Corrosion, Vol.

- 55, No. 9, Pages 883 – 891, 1999
4. Isopleth maps from the US National Atmospheric Deposition Program website (<http://nadp.sws.uiuc.edu/isopleths/>), NADP Program Office, Illinois State Water Survey, 2204 Griffith Dr., Champaign, IL 61820
  5. Slater, John E., Corrosion in Structures, Metals Handbook Ninth Edition, Vol. 13, Corrosion ASM International, page 1300.
  6. Southwell, C.R. and Bultman, J.D., Atmospheric Corrosion Testing in the Tropics, Atmospheric Corrosion, published by J. Wiley & Sons, 1982, Pages 943 – 967
  7. Callaghan, B.G., Atmospheric Corrosion Testing in Southern Africa: Results of a twenty year national exposure programme, Division of Materials Science and Technology, CSIR
  8. Schweitzer, Phillip A, Atmospheric Degradation and Corrosion Control, published by Marcel Dekker, Inc., New York, 1999







Nickel Institute 国际镍协会北京办事处

地址：北京东直门南大街 14 号保利大厦办公楼 677-678 号

邮编：100027

E-mail: [agao@ni-china.org](mailto:agao@ni-china.org)

电话：86-10-65533060

传真：86-10-65010261

网址： [www.ni-china.org](http://www.ni-china.org)