



UNITED
BY OUR
DIFFERENCE



钼的效益：

芬兰麦丽斯塔大桥（Myllysilta Bridge）

I M O A[®]

INTERNATIONAL MOLYBDENUM ASSOCIATION
THE VOICE OF THE MOLYBDENUM INDUSTRY



芬兰图尔库市麦丽斯塔尔大桥

钼元素在外部构造和外墙的使用

钼是建筑行业 and 不锈钢生产中广泛使用的一种合金元素。钼能够提升钢材的强度、淬硬性、焊接性、韧性、耐高温强度和耐腐蚀性。

虽然铬元素的含量决定了某钢种是否“不锈”，但钼还能够提升所有不锈钢的耐腐蚀性。加入钼可显著提升钢的耐点腐蚀和缝隙腐蚀的能力，尤其适用于氯化物、除冰盐富集的严酷海岸环境。



美国西雅图南部联邦中心。图片来源：Kovach

建筑行业的方方面面都要用到不锈钢。虽然自 20 世纪 20 年代以来，不锈钢一直用于这些行业，可谓是一种传统材料，但不锈钢的应用范围仍在不断扩大。

建筑行业使用的不锈钢合金类型也越来越多。腐蚀性越强的环境对材料的耐腐蚀性要求越高，而领先的建筑、景观设计和结构工程公司也更倾向于选择高钼不锈钢。

选择不锈钢和其它建筑材料时，要综合考虑空气污染、周围盐分含量、气候、设计、清洁频率等因素，以确保良好的长久性能。

在沿海或存在除冰盐、工业污染、火山灰的地区或其它具有腐蚀性的环境中，适合选用表面光滑的含钼不锈钢，且无须经常清洁钢表面。

麦丽斯塔尔大桥的设计

麦丽斯塔尔大桥（字面意思为：磨坊大桥）是芬兰图尔库市跨越奥拉河（Aurajoki River）的一座大桥。2010 年，原有的大桥出现结构损坏，当地举行了一次新桥设计竞赛，新大桥于 2011 年 11 月落成。

新大桥由维思平（WSP）公司设计，采用细长的复合钢梁结构。大桥的另一个突出特点：桥的底面包覆了不锈钢覆层。这种材料是综合考虑了生命周期成本、美观性和实用性而选定的。

抛光处理的反射表面呈现出美观的视觉效果，特别是夜晚，LED 灯光投射到水面上，又反射到不锈钢覆层板上的景观特别漂亮。

另外，含钼不锈钢极佳的实用性能对于这项工程来说非常重要。该河流含盐度较高，而且在漫长的冬季里，路面上大量使用除冰盐，因此，覆层板的耐腐蚀性至关重要。还有很重要的一点是，覆层板的维护越少越好，因为维护工作非常复杂、昂贵，而且会面临严重的健康、安全和环境风险。

2205 双相不锈钢（EN1.4462）的钼含量为 3.1%，用它作为大桥覆层材料是明智的选择，因为该材料较为普遍，性价比高，并且在严酷环境中仍然非常耐用。



麦丽斯塔大桥的 2205 含钼不锈钢覆层

效益评估

我们对麦丽斯塔大桥所用的 2205 不锈钢覆层的相关环境影响进行了生命周期评估（LCA），与之对比的是可用于该桥的另一种标准材料：有防腐涂层的低碳钢。

本次 LCA 评估按照 ISO14040 标准展开，根据该标准的定义，LCA 是“对一个产品系统在生命周期内的输入、输出和潜在环境影响的总结和评价。”

本次评估为对比评估，重点对比不同金属覆层在生命周期内的表现，包括覆层材料制造（包括原料开采、炼钢和 4 毫米厚板材的压制加工）和必要的表面处理对环境产生的影响。同时还包括在 100 年设计寿命中，大桥维护和更换覆层产生的影响。还要评估生命周期终点覆层材料回收利用的相关影响（及效益）。含钼不锈钢的回收利用率和经济效应都很高。

LCA 能够对比两种材料的影响和生命各阶段的潜在得失，也能够考虑不同种类的环境指标。本评估的重点指标为：

全球变暖潜势

本指标衡量的是材料对气候变化的影响，考虑了所有形式的温室气体（GHGs）排放，并以二氧化碳当量作为计量单位。该指标对建筑行业和其它利益相关者是重要的性能指标。多家公司均被要求（或自愿选择）公布其“碳排放量”。

酸化潜势

本指标衡量的是大气中硫氧化物、氮氧化物排放形成酸雨而造成的影响。化石燃料的燃烧或用于发电会直接或间接导致此类硫氮氧化物的排放。酸化潜势以排放的二氧化硫当量作为计量单位。



评估一系列环境影响指标

富营养化潜势

某些产品和工艺会导致经空气或水传播的污染物排放，提高水体的营养水平，从而引起藻华。藻华会造成水生生物脱氧和死亡。富营养化潜势以排放的磷当量作为计量单位。

光化学臭氧生成潜势

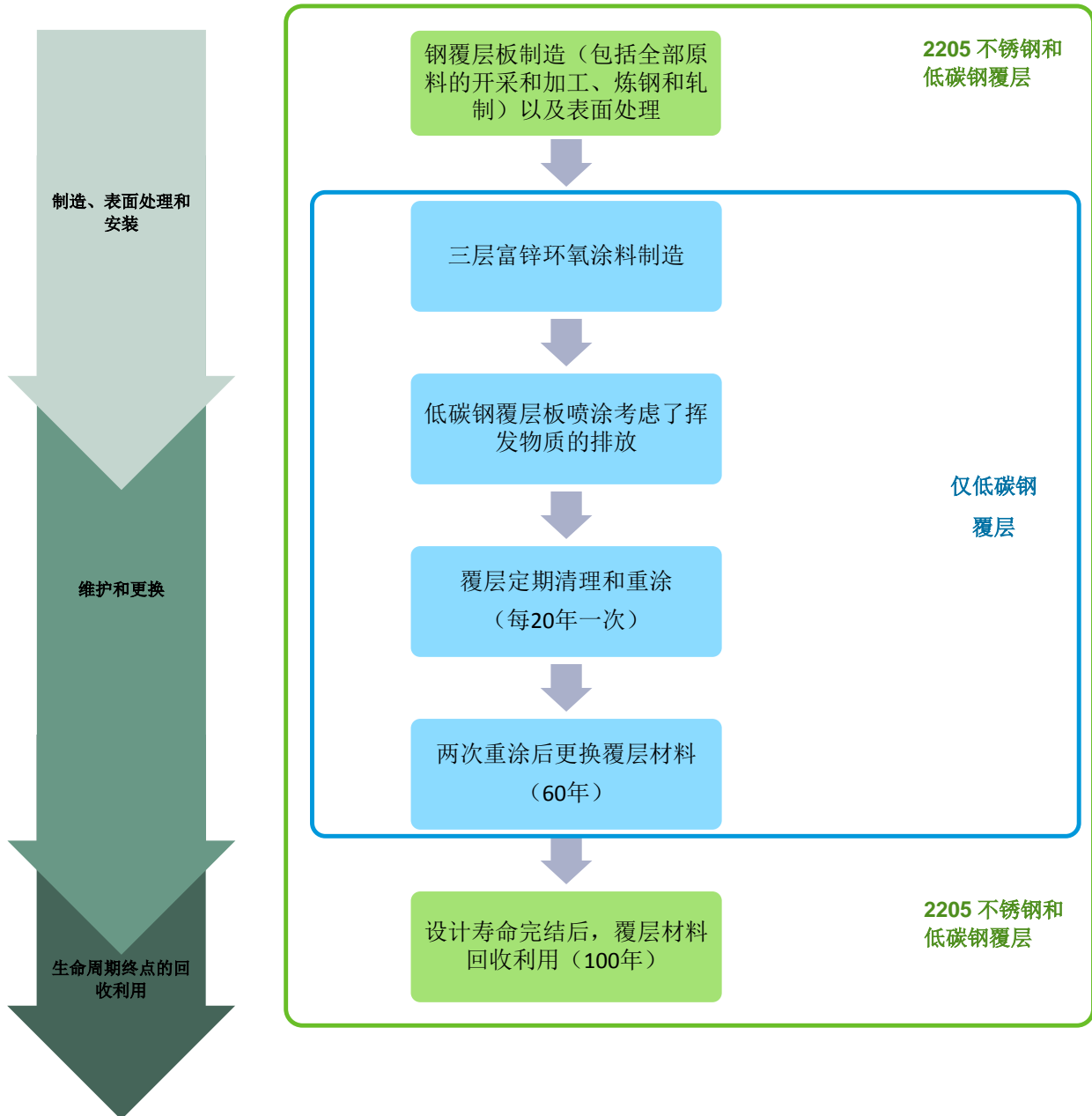
在大城市中，日光会与经空气传播的污染物（如氮氧化物、挥发性有机化合物）发生反应，从而在大气中形成“热雾”。臭氧在地平面是一种危险的物质，会导致呼吸困难、呼吸系统疾病和早亡。光化学臭氧生成潜势（POCP）以排放的乙烯当量作为计量单位。

原生能源用量（不可再生能源）

该指标衡量不可再生的天然能源的消耗量，如煤、天然气、石油等等，因此，该指标与全球变暖潜势相关联。本指标以兆焦耳为计量单位

数据和假设

LCA 清单涵盖了 2205 不锈钢和涂层低碳钢在生命周期各阶段的对比，如下图所示：



本研究并未考虑生命周期内两种材料相近之处，例如：

- 覆层板剪切和成型
- 第一年覆层板的首次运输和安装（已包含 60 年后低碳钢覆层更换材料的运输和安装）
- 生命周期终点覆层拆除：预计时间为 100 年（已包含 60 年后原始低碳钢覆层拆除）

采用了多项行业数据来评估两种覆层材料在生命周期内各个阶段产生的影响。

钢铁生产的影响

该项目需求 82 吨冷轧不锈钢（牌号：2205，钼含量 3.1%），生产这批钢材的影响数据由奥托昆普公司（Outokumpu）提供。奥托昆普公司是麦丽斯塔大桥覆层材料的供应商。数据基于该公司在其欧洲工厂（德国、瑞士、芬兰）使用的原料和炼钢工艺，即电弧炉炼钢，不锈钢废钢平均利用率为 61%

同样数量的冷轧低碳钢板的影响数据由国际钢铁协会提供，基于欧盟的平均生产数据，即高炉炼钢，炼每 1 千克的钢需要消耗 0.11 千克废铁和 1.36 千克铁矿石（即废钢利用率为 11%）。

防腐涂层产生的影响

使用低碳钢覆层，假设需要三层富锌环氧涂层 (Tiel4.20)，才能有足够的防腐蚀性，满足芬兰的桥梁标准。根据典型的成分参数对这种涂层的生命周期影响进行分析。

表面处理产生的影响

在不锈钢覆层方案中，表面处理的能耗对生命周期的影响也考虑在内。在低碳钢方案中，对钢板预处理和涂层产生的影响进行评估。喷丸处理和高压无气喷涂的能耗影响已考虑在内。防腐涂层的参数均来自于公开信息。

全部能耗的影响参数基于芬兰的电网和燃料数据。

维护影响

在低碳钢方案中，假设覆层外表面每 20 年需要清理和重涂一次防腐涂料。根据涂料参数和行业经验来看，20 年是一个保守的估计。因此，对环境的影响是按喷丸和无气喷涂整个流程来评估。在这个情况下，测算前提是在大桥上搭建脚手架，开展清理和重涂工作。同时也考虑了脚手架的运输和照明、有害涂料废弃物焚化处理带来的影响。

覆层更换产生的影响

即使清理和重涂了低碳钢覆层外表面，逐渐老化仍然会发生，表面最后会因边缘腐蚀和点腐蚀而不符合使用要求。因此，假设两次重涂后（60 年），覆层需进行拆除和更换。所以覆层更换（及必要的涂料）带来的生命周期影响也一并统计在内。

生命周期终点回收利用产生的影响

本研究一并提供了 2205 不锈钢、低碳钢在制造过程及生命周期终点进行回收利用时所产生的环境影响。按照欧洲标准，平均每种钢材在建筑行业使用后，其生命周期终点的回收率均为 95%。回收利用的材料能够补偿对原生资源的消耗，因此，生命周期终点对环境影响实际上为负，即，避免了对环境的影响，实为对环境的贡献。

对于麦丽斯塔大桥使用的不锈钢，它的“回收效益”十分显著，接近（有一项指标甚至超过了）原始制造过程带来的影响。原因在于欧洲钢厂具体回收计划尚不明确，相比欧洲平均不锈钢生产的回收效益而言，该供应商生产的不锈钢对环境的影响较低（电网和采矿机制较“清洁”）。

根据国际钢铁组织提供的数据，低碳钢在生命周期终点的回收利用同样产生了“回收效益”，虽然，该效益相对不锈钢较小。更换后的低碳钢覆层在生命周期终点的回收利用效益已与原覆层效益进行合并。

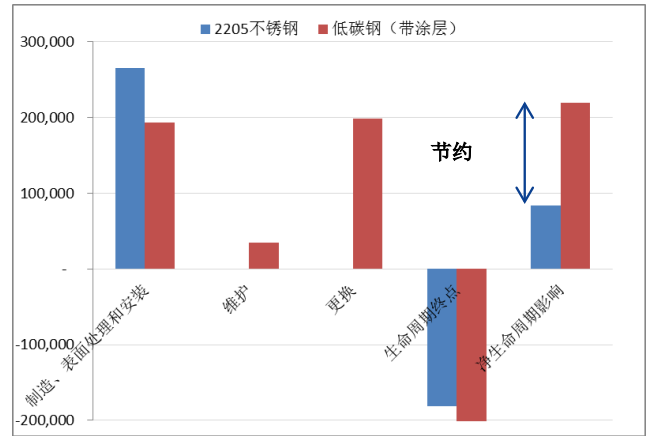
生命周期评估结果

针对麦丽斯塔大桥覆层材料的 LCA 评估显示，不锈钢（牌号：2205，钼含量 3.1%）在所有主要影响类别中产生的效益显著高于涂层低碳钢。

全球变暖潜势

在全球变暖潜势指标中，虽然 2205 不锈钢覆层在制造过程中产生的碳排放量影响高于低碳钢，但该影响已被其较高的生命周期终点回收效益以及低碳钢覆层重涂更换所产生的影响完全抵消并超越。

整体而言，大桥不锈钢覆层的净生命周期全球变暖潜势仅为低碳钢的 38%。该生命周期全球变暖潜势的节省空间如下图所示：

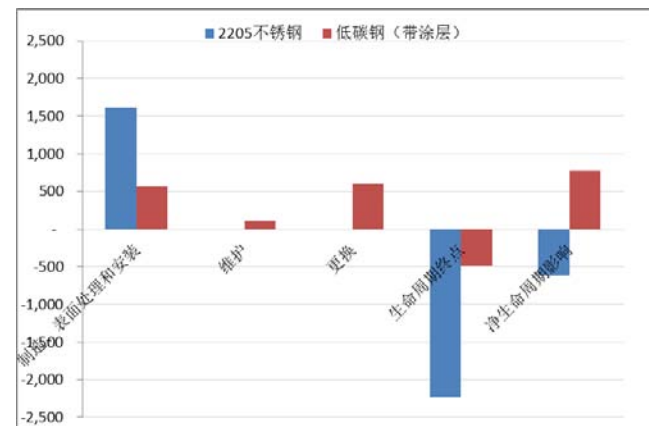


全球变暖潜势（千克二氧化碳当量）

酸化潜势

如上文提及，不锈钢覆层的生命周期终点回收效益十分显著，而且其净生命周期酸化潜势竟为负值。原因是麦丽丝尔塔大桥使用的不锈钢在制造中产生的环境影响低于欧洲平均标准（参见上文生命周期终点回收利用章节）。

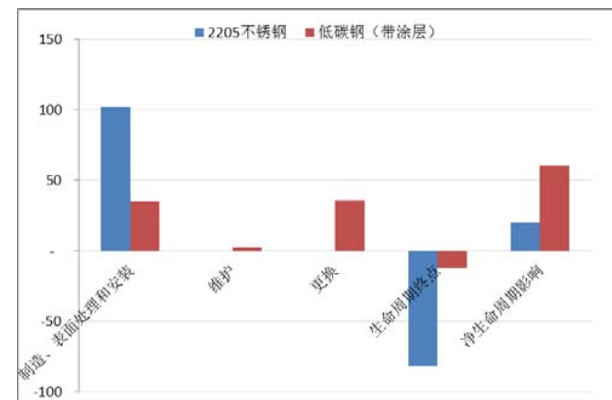
低碳钢覆层的回收效益也已包含在内，但是仍然存在（正值）净生命周期酸化潜势。



酸化潜势（千克二氧化硫当量）

富营养化潜势

不锈钢覆层净生命周期的富营养化潜势仅为低碳钢的 33%。

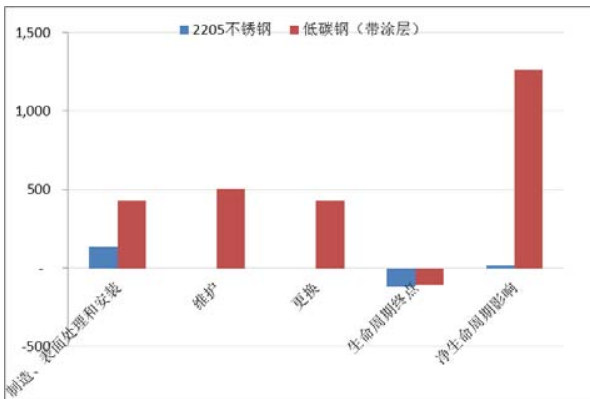


富营养化潜势（千克磷酸根当量）

光化学臭氧生成潜势

2205 不锈钢覆层的净光化学臭氧潜势 (POCP) 极低, 仅为低碳钢的 1%, 其中很大一个原因是低碳钢覆层防腐蚀涂料中的多种挥发性有机化合物 (溶剂) POCP 值极高。在涂料的使用过程中, 这些化合物发生挥发并可能加剧光化学烟雾的产生。

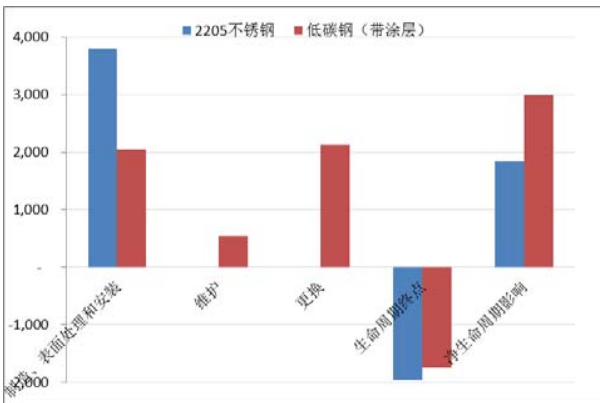
无论是覆层首次涂刷, 每隔 20 年重涂, 还是更换覆层后的涂刷, 均会散发这些挥发性有机化合物。而钢材 (不锈钢和低碳钢) 炼制过程产生的 POCP 效应较低。



光化学臭氧生成潜势 (千克乙烯当量)

原生能源用量 (不可再生能源)

此项指标与全球变暖潜势结果相关。不锈钢覆层的净生命周期原生能源用量 (不可再生能源) 仅为低碳钢的 62%。



原生能源用量 (不可再生能源) (千焦耳)

敏感性分析

敏感性分析基于一项关键性的假设: 低碳钢覆层经过两次重涂后 (60 年时) 需要更换。根据另一种假设: 每 20 年重涂一次, 大桥 100 年设计寿命内不需要更换覆层, 我们重新运行了 LCA 模型, 结果显示不锈钢 (2205) 在各大影响类别中仍然呈现显著的净收益。

敏感性分析还基于欧洲不锈钢 (2205) 生产过程的生命周期影响平均数据, 而不是麦丽丝尔塔大桥覆层材料供应商提供的数据。结果显示, 在全球变暖潜势、富营养化潜势、光化学臭氧潜势和原生能源用量 (不可再生能源) 等方面, 净生命周期影响仍然低于低碳钢。而采用欧洲制造平均数据时, 酸化趋势指标高于低碳钢, 原因可能是制造过程中可再生能源比例低于钢厂提供的数据。

总结和结论

针对芬兰麦丽丝尔塔大桥使用不锈钢 (牌号: 2205, 钼含量 3.1%) 和低碳钢覆层产生的环境影响进行了生命周期评估 (LCA)。本次评估涵盖了两种覆层材料生命周期内差异较大的几个阶段, 以大桥 100 年设计寿命为假设, 具体包括以下阶段:

- 覆层制造 (包括原材料提取加工和炼钢)、表面处理和安装
- 维护 (仅低碳钢需要维护)
- 更换 (仅低碳钢需要更换)
- 生命周期终点回收效益

结果显示, 不锈钢在所有主要影响类别中的净效益分别为:

- **全球变暖潜势约为低碳钢的 38%:** 由于较高的回收效益, 且无需维护和更换, 碳排放显著较低;
- **富营养化潜势约为低碳钢的 33%;**
- **光化学臭氧生成潜势为低碳钢的 1% (极低):** 不锈钢潜在“烟雾生成”很低的原因是低碳钢的防腐涂层含有大量挥发性有机化合物;
- **原生能源用量 (不可再生能源) 约为低碳钢的 62%**

由此可见, 在麦丽丝尔塔大桥案例中, 含钼 2205 不锈钢能够产生巨大的环保效益, 并且能够降低生命周期内在海岸环境或同等严酷环境中的维护成本、复杂性和安全风险。

发表时间：2015年3月31日

本报告由维思平公司（WSP）撰写。报告是在合同规定的范围内，并按照我们的业务惯例，充分发挥我们的技术专长，尽职尽责的基础上完成的。报告参考了依照我方与客户协议专门提供的资源。我们对客户及他方在上述范围之外的任何事务概不负责。本报告为客户用途所制，我方对知晓本报告或本报告任何部分的第三方不负有任何的责任。任何第三方使用本报告的风险自担。

本文系维思平（WSP）制作的英文原版之翻译版本。

WSP UK Limited（维思平英国有限公司）

WSP House

70 Chancery Lane

London（伦敦）

WC2A 1AF（邮编）

United Kingdom（英国）

电话：+44 (0)20 7314 5000

传真：+44 (0)20 7314 5111

www.wspgroup.co.uk

UNITED
BY OUR
DIFFERENCE

