

用不锈钢包裹建筑——可持续性幕墙和屋面

Wrapped with Stainless Steel: Sustainable Facade and Roof

撰文 Catherine Houska 建筑规范学会 (CSI)

摘要 恰当地选择和维护不锈钢，可延用几个世纪而保持其吸引力。在历经如此之长的使用寿命后，不锈钢具有的高废钢价值和低腐蚀率，保证它使用期结束后可以回收再利用，且回收利用率非常之高。本文阐释了不锈钢在可持续屋面和幕墙工程上的运用。

关键词 不锈钢 建筑 可持续 设计 幕墙 屋面

1 不锈钢在可持续设计方面的优势

(1) 抗腐蚀性很强

铜和铝暴露在盐和污染环境中的腐蚀率通常是不锈钢的10~100倍^[1]。对不锈钢进行适当的选择和维护，数十年甚至几个世纪后会依然安然无恙。

(2) 可回收成分高

不锈钢可以100%回收而不会降级循环利用，因此它可以无限期地进行循环利用来制造出更多的不锈钢。不锈钢在使用期间没有任何金属损失，不需要用纯新材料来替代，因此由金属劣化而对环境产生的负面影响得以最小化。鉴于其较高的残余价值，80%的不锈钢被从垃圾场分离出来用于再生新的不锈钢。设计师可以通过使用便于零部件材料分离的设计来提高使用寿命终止后的回收率。比如，在复合面板设计中将不同的金属结合在一起，如果在使用寿命终止后，材料不易于分离，会限制回收利用。相比之下，单一种类表皮的面板则不存在此问题。更详细的内容可见文[2]，[3]。

(3) 能耗低

不锈钢屋面和墙面板有助于减少建筑物的能量需求和城市热岛效应(UHI)。未经涂层处理的不锈钢成品能够满足斜面屋面太阳反射指数(SRI)降低热岛效应的要求，该要求是由美国绿色建筑理事会制定的能源和环境设计领先方案(LEED)提出的(可持续场地加分第7.2项，热岛效应屋面要求 $SRI \geq 29$ ，斜面 $> 2:12$)。

比如，现今流行的专有牌号低反射无涂层不锈钢产品的SRI值在中度风力时是39~45，在更高风力时是55~61，奥氏体(如304和316)以及经济型双相不锈钢适用。抛光的成品如符合ASTM国际A480的No.4表面要求板材成品，《扁平轧制不锈钢和耐热钢中厚板、薄板、带材通用要求的标准规范》有更高的SRI值。No.4表面成品中的某个专有品种的SRI值在中度风力时为60。

用在铝和镀锌钢材的相同高散射性和SRI值的专用涂层也可同样用于不锈钢。只要金属表面光滑，不同金属涂层的SRI值没有明显区别。因此，带有专用高SRI值涂层的不锈钢也可以满足LEED的斜屋面的要求(比如 $SRI > 78$)。使用涂层不锈钢相对于其他金属的主要好处是基层的抗腐蚀能力显著提高。这就是说不锈钢的性能与其他无涂层的金属相似，而且实质上比有些普通的屋面制品要好(表1)。此外，不锈钢的低腐蚀率有助于保存SRI值经久不变(要定期清理积聚的灰尘)。由于这些数值随着不锈钢表面类型和合金种类有所变化，应要求生产商提供产品的特定规格数据。对于所有的未经涂层处理的金属制品，SRI数值按照低、中、高风力强度级别生成。

有好几家公司生产涂层处理不锈钢卷板，他们都使用Kynar涂料(比如，马来西亚吉隆坡机场的屋面是Kynar涂层316型不锈钢)。如前面所述，当使用Kynar(或其他高SRI涂料)时，只要表面均匀光滑，与底层的金属就没有关系。只要简单地在订购涂层处理不锈钢卷板时提出要高SRI涂层的要求。

使用不锈钢的前期费用较高，但是为了让工程实现可持续设计的目标，寿命周期成本应放在首位。在工业污染及/或含盐的恶劣环境中，涂层的寿命会更短，而镀锌钢要依赖长时间严格的涂料维护。比如，在德克萨斯州沿海地区严重工业污染的环境中，一个经涂层处理的镀锌钢板屋面在3年后发生穿孔(现已换成不锈钢)。因此场地条件、建筑物设计寿命和适当的维护应该是选择材料时的主要因素，而不同类型的金属各有适合的用途。

(4) 保护环境

不锈钢在很多方面减少了对于环境的不利影响。无涂层的不锈钢板不产生任何排放物，如用于屋面、外墙和遮阳幕，能使建筑的能耗最低。不锈钢清洁工作既不会对环境造成危害也不需要危险的

表 1 太阳反射和屋面热性能

产品	太阳反射数据(SRI)
镀锌钢、新的无涂层	46%
铝, 新的无涂层	56%
金属, 有专门白色涂层	107%
粘土瓦, 红色	36%
水泥瓦, 红色	17%
水泥瓦, 白色	90%
沥青, 普通白	26%
沥青, 普通黑	1%
木头块, 棕色	22%

来源：Lawrence Berkeley国家实验室 凉爽屋面数据库

表 2 瑞典金属屋面径流研究

材料	平均年度径流
锌*	1 900~2 500 mg/m ² (1 588~2 090 mg/sq.yd)
铜	1 200~1 500 mg/m ² (1 003~1 254 mg/sq.yd)
304 型不锈钢**	
镍	0.12~0.52 mg/m ² (0.10~0.43 mg/sq.yd)
铬	0.18~0.57 mg/m ² (0.15~0.48 mg/sq.yd)
铁	10~140 mg/m ² (8.40~117 mg/sq.yd)

*以镀锌钢和锌板材的形态；**很多样本中，镍和铬的含量水平在可检测到的值以下。每升水平均浓度在饮用水标准限度之下很多。

表 3 澳大利亚、俄勒冈和华盛顿多种屋面的金属径流（浓度单位微克/升）

屋面类型	铜	铅	锌
生锈的镀锌板	20	302	12 200
胶合板加柏油纸	11	10	1 980
柏油屋面加铝漆	25	10	297
镀锌铁	未确定*	100	3 600
水泥瓦	未确定	90	1 600
水泥瓦	未确定	50	200

化学物质，如人们对旧时建造的克莱斯勒大厦和帝国大厦，使用温和的洗洁剂、水以及环境中性的细研磨粉末，使其恢复了原貌。

大量研究对从多种屋面材料流下的降雨径流（比如沥青、金属、瓦）是否有毒进行了检验。瑞典的一项研究将不锈钢与其他金属屋面材料进行了对比（表2）^[4]。不锈钢中的镍、铬径流释出率极低，在很多样本中低于可检测极限，所有样本均在典型饮用水浓度限制范围内。径流中锌和铜的释出水平要高很多，而很多说明书没有提到，锌是潜在的生物灭杀剂。在其他普通的屋面材料的径流中也发现了金属，表3归纳了在澳大利亚、华盛顿和俄勒冈州进行的几种屋面材料的研究数据^[5]。在干旱期，水的浓缩可致生态毒性，因此，某些屋面材料不建议在环境敏感的地区使用。

（5）长期性能优良

尽管不锈钢是相对较新的建筑材料，但它对国际建筑设计的影响是巨大的。不锈钢已经为很多著名建筑提供了40~80年的服务，而且外观没有劣化，也没有金属需要更换。

2 不锈钢型号的选择

长寿命、潜在标志性建筑设计要有吸引力、经济实惠和环保，不锈钢成为很好的选择材料。欧洲、澳大利亚和日本的建筑设计规范都对不锈钢进行了规定，在国际标准例如ASTM中也广泛使用。在建筑物中运用最为普遍的不锈钢是：1）304/304L型（UNS S30400/S30403，EN1.4301/1.4307，SUS304）；2）316/316L型（UNS S31600/S31603，EN1.4401/1.4404，SUS316）；3）2205（UNS S32205/S31803，EN 1.4462，SUS 329J3L）。

大量文章和行业协会所出的手册对不锈钢的选择有很大的帮助^[6]。304和316型不锈钢能提供良好的强度等级，易于成型及与建筑制品焊接。304适用于大多数室内用途和轻度城市污染的温和室外环境用途，而316在中低级沿海和除冰盐暴露的环境或在中度工业或高度城市污染级别的环境中使用最为广泛。304也可以在除冰盐或沿海海盐暴露的环境中使用，但要选择光滑的表面并进行定期的清理，以除去难看的表面锈蚀。在一些腐蚀性很强的沿海

地区，当表面锈蚀令人无法接受时，需要使用比316更具有抗腐蚀性的双相不锈钢，如目前最广泛使用的双相不锈钢2205。

但在情况最为严重的地区，就算2205也不能保证不生锈，除非可以定期清洁，否则为需要满足美观要求，就要选用一种耐腐蚀性能更好的不锈钢。如有疑问，应该向有建筑经验的不锈钢大气腐蚀专家寻求意见。

更光滑的表面（如R_a=12微米或更小）形成的腐蚀性沉淀物（如盐和污染物）更少。其特性提高了抗腐蚀效果并减少了生锈的可能性。对腐蚀性沉淀物的常规清理可以帮助避免表面生锈。在充满盐分的环境里，适于采用焊接方法或质量好的建筑密封剂来密封304和316型的机械接口，这对于防止缝隙腐蚀十分重要。

3 案例分析

近年来流行的先进创新的幕墙和屋面应用案例体现了当代设计师如何在可持续设计中利用不锈钢的优势。

（1）Wayne L. Morse 美国法院

DLR集团（波特兰，俄勒冈州）被选为尤金附近的Wayne L. Morse 美国法院的项目设计者。他们与设计师Morphosis（圣莫尼卡，加州）结成设计伙伴，创造出4级安全水平的设施，这一设施强调政府和社区的互动。

这座建筑面积24 805m²、有5层楼的建筑包含法院和政府办公室，设计中使用了大量的含高回收成分的材料，包括不锈钢拘押设施、家具和外部表面。304不锈钢外墙板共有6 500m²，另外，一种名为“天使发丝”的专有无方向表面具有的细小粒度最大限度减少了灰尘的存留和清理频率，并柔和地映射出周围的环境（图1）。尤金是一个内陆城市，污染等级也比较低，这使得304不锈钢成为合适的选择。Wayne L. Morse 美国法院在2006年获得了LEED的金奖。

（2）保利大厦

保利的总部位于中国北京，由SOM设计，为这个国有企业树立了城市形象，并使人联想起纽约的洛克菲勒中心。除了该公司的总部，100 000m²的建筑还包括办公区域、零售商店、餐厅和保利博



图1 304不锈钢的天使发丝



图2 保利大厦的外部大型索网幕墙



图3 太平洋路德大学Morken学习和技术中心



图4 德克萨斯大学大楼的304电化学着色外墙

物馆。这是一个简单的三角形单块巨石，有两面各自独立的缆索网面幕墙，分别面向南面（50m高）和东北方向（90m高）。东北方向的缆索网幕是世界上最大的缆索网幕墙之一（图2）。

传统设计使用大型构架，可能会影响城市的景观。与此相反，该墙体由新型V型缆索支撑，并通过使用特别设计的滑轮机制由博物馆的建筑物来实现重量平衡，该机制可补偿地震产生的移动。玻璃和不锈钢的墙体设计也可以抵御百年一遇的大风，实现在最大风力下不超过正负0.9m的最大偏离值。

北京是一个高度工业污染的城市，冬天使用除冰盐越来越多。不锈钢抗腐蚀的性能可避免使用需要高维护的涂层，未经涂层处理的不锈钢也成为雕塑式的结构设计元素。

索网幕墙由直径26mm的垂直方向和直径34mm的水平方向不锈钢缆索支撑而成，缆索材质为316型不锈钢。索网的交叉点用高强度、定制双相2205不锈钢铸造成的爪件连接。主缆和索网之间的连杆是316型不锈钢。支撑枢座是由高强度双相2205不锈钢铸成，玻璃珠喷丸处理表面。外板插到内板槽中，并用穿过玻璃与玻璃相接处的螺栓固定。

起初的设计计算表明，当受强风荷载时，缆索和玻璃的移动会产生大偏斜。SOM用铰接不锈钢玻璃支撑槽解决了这个问题，可以实现最多7°的自由旋转而不会使玻璃受力。互相铰链的槽又背接到面索上，并用2205双相不锈钢高强度连杆使斜拉桥索保持距离，它

们在其组件中可以进行旋转。

（3）大学建筑

位于波特兰的Zimmer Gunsul Frasca Architects（ZGF）设计公司通常在设计中使用不锈钢。

ZGF为位于华盛顿奥林匹亚的太平洋路德大学设计了几个建筑，包括4 900m²获得LEED金奖证书的Morken学习和科技中心（图3）。该大学设定了寿命为100年的目标。Morken中心的低维护砖块和不锈钢的外观十分现代，但与该大学20世纪早期的建筑很相配。该设计大量使用可再生的和循环利用成分高的材料，如304型不锈钢瓦片屋面和覆板，这对于该内陆温度区域是个合适的选择。

达拉斯的德克萨斯大学新的自然科学和工程研究大楼（2006）建筑外墙采用22 000个电化学着色的304不锈钢墙面板，帮助设计师实现了可持续设计的目标并创造出视觉效果惊人的外墙。这种着色方法不受紫外线辐射的影响，在整个建筑物寿命期，色彩不会改变，只需要最少的维护（图4）。

Kaneko 居住工程是在受托人董事会签发所有新建建筑和翻新工程的绿色建筑执行案之后，在俄勒冈州Salem建造的Willamette大学的第一个工程。建于2006年的该工程包含附加在既有的Kaneko大厅之外的大居住套间和公寓以及扩大的餐厅，并带有会议和活动空间。ZGF选择浮雕效果表面的304型不锈钢外部瓦片覆层实现了绿色设计，获得LEED金奖（图5）。



图5 Kaneko 学生公寓使用浮雕不锈钢瓦片



图6 牙买加车站大型低维护316不锈钢屋面

(4) 牙买加车站

纽约市皇后区的牙买加车站在2006年进行了较大的扩建，以连接一个新建的轻轨系统。这条轻轨使JFK国际机场连接到长岛铁路、纽约市地铁线路和地面道路。增建的工程为一个7层，2 323m²的建筑物结构。

作为通向城市的重要门户，设计必须既具吸引力又具有功能性。但是，耐用性也非常关键。该建筑使用了玻璃和铝材幕墙、水磨石地面、大理石、花岗石，不锈钢则用作对材料要求苛刻的内部和屋面面板。纽约和新泽西的港务局是该工程的设计方。终点站的大型不锈钢压缝屋面的接缝设计十分仔细，能够控制所有方向的延展和收缩，也可以抵御较强的风力。屋面的尺寸和形状使得内部排水系统很有必要（图6）。

任何靠近机场的大型屋面的表面必须有较低的反射性，这样飞

行员的视线才不会受到影响。选择316不锈钢的原因是它能够提供最理想的抗腐蚀性能以及耐用性。不锈钢不必涂覆保护性油漆，可以使维护最少化，因为油漆在长期受到喷气飞机残余燃料、污染和沿海盐分暴露的影响会劣化。一种专门的、无方向、低反射的织纹不锈钢表面被选择用于该工程项目，因为在类似工程中它的性能表现很好。

4 结论

不锈钢制成的产品是保护环境、创造舒适、有吸引力以及能耗低的建筑的理想选择。对于期望低维护和获得长使用寿命的项目来说，它是一种具备成本效益且对环境负责的选择。不锈钢同样适合脆弱的生态系统，这些地方必须避免污染，或者径流水要再次使用。但是，对于所有的建筑部件来说，性能表现取决于选择适当的材料和表面类型以及正确的设计。

致谢：

感谢国际钼协会、镍协会、A. Zahner 公司、Skidmore Owings & Merrill、Contrarian 金属资源公司、Zimmer Gunsul Frasca公司 对准备这篇文章所提供的帮助。

相关链接：

国际镍协会(Nickel Institute)于2004年1月正式成立，是由镍发展协会和镍生产者环境研究协会统一组合成的非盈利机构，总部设在加拿大的多伦多市并在欧洲、大洋洲、南美洲、亚洲等地设有办事机构。北京办事处长期和中外相关机构密切合作，共同推动不锈钢和其它含镍材料在中国的应用和发展。

参考文献

- [1] Catherine Houska. 建筑用不锈钢：防腐指南. 镍发展协会11024刊物，2001.
- [2] 不锈钢回收. 国际不锈钢论坛www.worldstainless.org.
- [3] 北美特钢协会 LEED实例：建筑市场用不锈钢板材. www.ssina.com.
- [4] C. Leygraf, I.O. Wallinder. 大气腐蚀造成的金属环境效应. 户外大气腐蚀（ASTM国际标准技术出版物（STP）1421）.
- [5] 流域保护技术的技术说明25. 屋面径流真的干净吗？. 1(2): 84-85.
- [6]. 更多背景资料见本作者其他论文和文章。包括《外部应用采用哪种不锈钢？》（国际钼协会），《建筑用不锈钢-防腐指南》（镍协会），《外部用不锈钢的选择》（The Construction Specifier 2003年1月号），《建筑金属腐蚀：除冰盐的威胁》（2006年12月号）。同时可访问www.stainlessarchitecture.org 和www.imoa.info。



作者简介

Catherine Houska，建筑规范学会（CSI）会员，TMR咨询公司的高级开发经理。作为一名冶金工程顾问，她专攻建筑金属选择、规格以及失效分析，并发表了100多篇文章及著作。作者邮箱chouska@tmr-inc.com。