

不锈钢——高耐用性、防火性和安全性解决方案

Stainless Steel for Durability, Fire-resistance and Safety

撰文 G. Waller, D.J. Cochrane

1 不锈钢的经济性和安全性

火灾是最危险的风险之一，特别是在规划工业建筑厂房时，必须密切注意防止和消除火灾的问题，包括研究现有的材料等。

1.1 对比性防火试验

国际镍协会、国际钼协会及三家不锈钢生产商（前阿维斯塔公司、英国不锈钢公司和法国优金公司）资助了一个独立的防火试验项目，选择了4种在建筑结构包括海上结构中常用的材料：镀锌钢、玻璃钢、铝和奥氏体不锈钢316（UNS S31600）。结果表明，不锈钢仍能保持结构完整性。

1.2 寿命周期成本研究

在进行实验的同时，英国钢结构研究所也研究考察了不锈钢相对于其他材料的经济性，包括计算初始成本以及更重要的运行成本，运行成本来自于整个寿命期的维护、修理和更换。计算结果显示，不锈钢相对较高的材料成本被其长使用寿命、免维护免修理，使它们真正的经济性比初看上去要更有吸引力。的确，在10~30年的使用寿命中，与碳钢（试验中除不锈钢外唯一具有有效耐火性能的材料）相比，不锈钢显然并不昂贵。在建筑结构包括海洋结构的相关部位增加不锈钢的使用，将会以适当的成本投入大大提高防火安全性（图1）。

2 不锈钢的广泛使用

一百年前当研究钢中添加足量的铬对钢耐腐蚀性的影响时，首次开发出耐锈蚀的钢，它们具有光亮的外表和在当时看来很突出的耐

腐蚀性，但不容易进行冷热加工，不能很容易地成形为棒材、中厚板、薄板和建造工业设备所需要的其他产品形式，因此其用途受到限制。通过向这些含铬钢中添加镍，大大改善了这些钢的加工性能，并进一步提高了它们的耐腐蚀性。

20世纪20年代这种不生锈的钢的成分被确立，就是我们今天熟悉的18-8——含有18%的铬和8%的镍，不久就进行了工业化生产，不锈钢就成为这种钢的通俗名称。不锈钢的首批主要应用之一是用作1929年纽约克雷斯勒大厦富有装饰艺术风格的尖塔，这座320m高的建筑，其上部88m采用不锈钢包覆。在80多年后的今天，这座尖塔依然是这座城市最精致的景观之一，它捕捉并反射着不断变化的太阳光线，成为不锈钢长寿命和视觉吸引力特质的有力证明。

20世纪30年代18-8不锈钢的应用显著扩大，被应用于石化、电力、食品加工和储运、交通运输和建筑。二战期间不锈钢应用进一步扩大。现在有很多牌号的铬镍不锈钢可满足特定需求，但基本的18-8型不锈钢（304或UNS30400）仍然是使用最广泛的，304不锈钢凭借良好的耐腐蚀性、易清洁性、既耐热又耐严寒的能力、良好的强度、韧性和加工性能成为各类用途的标准材料。

当设施服役条件很苛刻时，可采用一种或多种特定牌号的不锈钢来获得更好的性能。例如316不锈钢（UNS S31600）特别适用于在腐蚀性氯化物条件下的海洋设施。从不锈钢生产商或国际镍协会可以获得如何选用最适合牌号的建议。

3 试验证明了不锈钢优异的防火性能

为了获得人们熟悉的4种结构材料暴露于严重火灾条件下的比较性数据，委托Darchem工程有限公司（英国国家测量鉴定系统批准认证的测试实验室）在电缆梯架（从市面上购买）上进行一系列受控实验。试验的4种材料为玻璃钢、铝、镀锌钢和316（UNS S31600）奥氏体不锈钢。

3.1 防火试验（图2~6）

现代电缆一般都有膨胀防火涂层来为导体提供防火自我保护。这种涂层遇火会膨胀、变脆，无法经受很多弯曲操作，因此电缆梯架应采用高温下不会过度变形的材料制造，避免损伤涂层。实验步骤包括：3m长梯架受到均匀的负荷，负荷大小模拟电缆的重量，用18个液化石油气炉子直接加热，平均温度为1 000°C~1 050°C，加热时间为5分钟。按照与其他三个梯架相同的标准规范采购的铝梯架断



图1 英国莫克姆湾的这座天然气平台采用不锈钢包覆层来确保平台的长期无故障运行（照片由英国天然气公司提供）



图2 防火试验前后的铝梯架



图3 防火试验后的玻璃钢梯架



图4 防火试验后的镀锌钢梯架



图5 防火试验后的不锈钢



图6 防热辐射试验后的铝梯架

面尺寸较薄，因此为达到和其他材质梯架类似的初始弯曲程度，试验时的负荷仅为455kg，而其他材质梯架负荷为609kg，结果见表1。

3.2 防热辐射试验

发生火灾时，建筑结构可能要经受热辐射的考验而不是直接受火焰灼烧。为了模拟这种条件，每个梯架承受均匀负荷（同前述的试验），然后在电热箱中直接受到上方的热辐射。试验进行到梯架温度稳定或发生结构失效为止，结果见表2。

表 1

金属	结果	说明
铝	26 秒后失效	倒塌（图 2）
玻璃钢	30 秒后失效	倒塌并开始燃烧，冒烟（图 3）
镀锌钢	通过	5 分钟后弯曲变形量 166.5mm，观察到部分熔融锌（图 4）
不锈钢	通过	试验延长到 45 分钟，直到燃气耗尽。未发生失效，45 分钟后弯曲变形量 80.5mm（图 5）

表 2

金属	结果	说明
不锈钢	3 小时后温度达到稳定	试验结束时平均温度为 556°C，变形量是碳钢的 1/3
镀锌钢	2 个小时后温度达到稳定	试验结束时平均温度为 552°C，变形量是不锈钢的 3 倍
铝	12 分钟后失效（图 6）	失效时梯架平均温度为 238°C
玻璃钢	6 分钟后失效	失效时梯架平均温度为 185°C

3.3 部件导热试验

观察实际安装的梯架发现，尽管电缆梯架受到防火保护，但支撑腿是不隔热的，可以导热。试验在包覆100mm陶瓷纤维隔热层的铝和不锈钢梯架上进行，梯架靠没有隔热保护的支撑腿支撑。每个梯架安装一个不锈钢腿和一个镀锌钢腿。没有进行铝支撑腿的试验，因为不可能固定到带隔热层的梯架上。每个梯架上有12根电缆分成两组接到梯架两侧，梯架还承受一定负荷模拟其它电缆。每侧三根电缆连接到一个电缆测试仪上，测试仪可指示三种故障情况：

断路、接地故障和电缆故障即电阻击穿。每侧的电缆连接热电偶。

实验步骤包括：控制炉子的火焰温度在1 000°C~1 050°C，检测电缆的结构完整性和温度。判断失效的两个标准为：a) 电缆的完整性保持15分钟；b) 电缆温度在95°C以下的时间保持15分钟。结果如下：

铝：铝梯架逐渐坍塌，结果电缆不到5分钟就损坏了。镀锌钢支撑腿一侧2分钟就开始倒塌，又过了1分钟多不锈钢腿出现部分变形，梯架整体倒塌用时4分41秒。

不锈钢：完全符合测试标准，试验持续进行超过了规定的15分钟。不锈钢支撑腿一侧的电缆26分钟后发生损坏，镀锌钢支撑腿一侧的电缆33分钟后发生损坏。不锈钢支撑腿一侧的电缆温度上升超过规定的95°C的时间是21分钟后，镀锌钢支撑腿一侧的电缆温度上升超过规定的95°C的时间是26分钟后。

3.4 穿墙导热试验

有时电缆梯架是穿墙安装的，如果墙的一侧着火，热可能会从着火的这一侧传到墙的另一侧，造成危险。因此在一个模拟空心墙的设备上进行试验，电缆梯架从经过隔热处理的空心墙穿过，大火仅在空心墙的一侧燃烧。

对铝和不锈钢梯架进行了试验。每个梯架2m，中间接头处装有拼接板，每个梯架的拼接板位于穿墙处。火焰温度在1 000°C~1 050°C，试验持续到墙没有着火的那一侧温度趋于稳定，结果见表3。研究表明，在800°C（1 472°F）的高温下，不锈钢保持刚度的能力非常好，是碳钢的7倍（图 7），因此作为结构用途时可以不使用隔热保护材料。

4 评估不锈钢结构的实际成本

英国钢结构研究所进行了一项关于不锈钢用于海上结构的独立研究，分析了采用不锈钢代替碳钢或铝所获得的经济效益，它是对前述防火试验项目的补充。相关图片见图8，9。

表 3

金属	结果	说明
不锈钢	90 分钟后温度达到稳定	试验过程中梯架未发生变形,冷侧支撑臂温度稳定在 80°C 和 58°C
铝	37 分钟后温度达到稳定	1 分 8 秒后由于熔化而全部坍塌,试验继续在从墙伸出的部分进行。冷侧支撑臂温度稳定在 134°C 和 15°C



图8 Hutton 张力腿平台(TLP)的生活模块覆盖了不锈钢 (Conoco 英国公司提供)

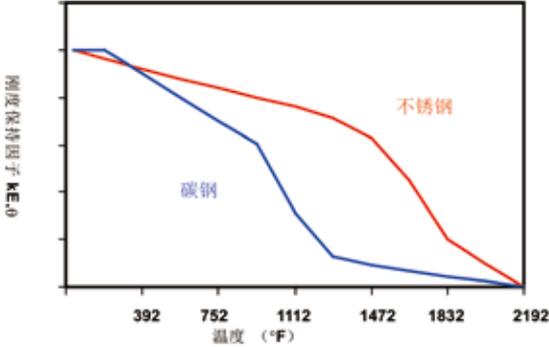


图7 碳钢和不锈钢高温下刚度对比



图9 不锈钢压型板包覆层制造的防火墙 (Darchem 公司提供)

被选出进行详细评估的结构包括楼梯、梯子、走道、栏杆、格栅、地板、防火墙、防爆墙以及各个模块组件和走廊的包覆层。电缆梯架未被包括,因为不锈钢已成为该用途的既定材料。其他提出建议但未进行成本估算的用途有直升机甲板和火炬臂。所研究的直接成本因素为材料采购、加工、表面保护、维修、更换和清洗,同时也考虑间接成本特别是使用免维护材料带来的显著的费用节约。

4.1 平台上部结构的成本估计

考虑的三种材料为BS 4360 43C或相当牌号的低碳钢, 6082TF 铝和316L不锈钢。利用来自海上石油平台行业的供货商和加工商的信息, 在全寿命成本的基础上进行估算。考虑到以下的情况: 对于海上设施的加工, 其标准规范十分严格, 对焊缝检验和焊接修补的要求比陆上设施的要求高; 海上设施的劳动力价格也比陆上要高得多, 主要是由于运输及提供海上平台生活区的成本高。

4.2 维护和腐蚀

在估计维护的频率和维护费用时, 关键因素是结构材料在海上设施严酷的运行条件下的腐蚀行为。幸运的是, 这方面有大量的长期经验可供利用。

低碳钢: 已知无保护层的低碳钢在含氯化物的海洋环境中的腐蚀率为单位面积每年0.15mm, 一个6mm厚的工字梁仅10年就会损失一半的负载量, 因此低碳钢的保护涂层必须在整个设施寿命期内保持完好。而负责海上设施维护的各个承包商的维护计划有所不同, 本研究较保守地假定保护涂层每隔5年就要全部重新喷涂。如果低碳

钢能经常性地重新喷涂, 其寿命预计可以和整个设施相仿, 不需要更换。而镀锌钢根据环境严酷程度可使用10~15年, 然后需要彻底更换。本研究给出了10年和15年寿命的更换费用。

铝: 铝的腐蚀率低, 且一般局限于表面点蚀。本研究假定每6个月进行一次冲刷以减小腐蚀率。对铝合金的担心主要是电偶腐蚀, 铝相对于低碳钢和不锈钢而言为阳极。铝如果和低碳钢模块、不锈钢管道系统相连接, 则必须使两种金属电绝缘, 否则铝将发生腐蚀。如果铝与镀锌钢相连接, 则铝会先造成镀锌层发生腐蚀, 然后自己发生腐蚀。

不锈钢: 对于海上平台用途, 推荐的不锈钢牌号并非最熟悉的18-8不锈钢, 而是较高合金化的316不锈钢, 一般是低碳的316L。316不锈钢能够在苛刻的含氯化物的大气环境中保持其保护性富铬氧化膜的完整, 对点蚀和缝隙腐蚀具有高的耐蚀能力, 使用寿命长。实际上它可被看作是零腐蚀和免维护的材料。本研究假定每隔6个月进行一次清洗以减少表面锈斑和褪色, 但实际上这不是必要的。

4.3 直接成本比较

研究发现, 仅比较直接成本, 当把整个寿命期的维护和更换费用考虑在内时, 低碳钢结构相对较低的初始费用优势很快被抵消。当低碳钢不得不进行第一次更换时, 这正是其成本优势的转折点。铝结构尽管比低碳钢价格高很多, 但在当时(1989年)比不锈钢略便宜。铝和不锈钢一般都被看做免维护材料(除了需要进行不太经常的冲洗)。相关图片见图10, 11。

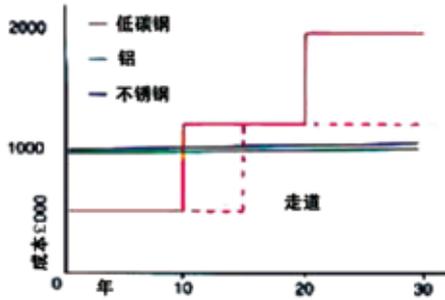


图10 北海海上平台防火墙30年寿命期成本估计，防火等级为H120（生产区）和A60（生活区）

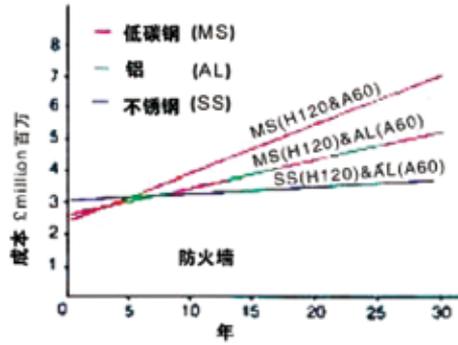


图11 防火墙 照片由Rocco产品公司提供



表 4

	模块化	一体化
低碳钢	811.525	444.825
不锈钢	604.480	308.680
减轻重量 /t	207.045	136.145
重量减轻 /%	25.5%	30.6%



图12 皇家海军22型护卫舰“谢菲尔德号”，1988年投入使用，不锈钢用作四个楼梯和大量其他功能性和装饰性部件。照片由Crown提供。

4.4 维护期间的生产损失

不太容易被定量研究的一个间接成本因素是维护工作，如焊接、喷砂处理和重新喷涂对生产的影响。每当在危险区域进行焊接时，油气的生产须停止，还要在焊接前检查环境中是否有爆炸性气体。这样一个大型平台每天的损失达数百万美元。

一个中型的采油平台一般每年的停机检修维护时间是10天，每天的生产损失相当于126万美元。因此，停机维护的时间减少一天就能大大补偿由于采用免维护的不锈钢而不是低碳钢制造梯架和走道而增加的费用。

4.5 其他潜在的成本节约

如果采用了免维护部件，就有可能按比例缩减维护人员的生活区和设施，降低平台的重量和建造成本。另一个平台减重的因素是不锈钢不需要像低碳钢那样留腐蚀余量，因此可使用较薄尺寸规格的部件。免维护无故障的材料对于遥控的卫星平台尤为重要，因为这种平台上维护人员的活动范围很有限。

钢结构研究所的研究考虑了北海的两类平台，一种是模块化建造，另一种是一体化结构。表4是两种材料部件总重量的比较，可以看出，采用不锈钢大大减轻了重量。相关照片见图12。

5 防火性能

该研究显示了低碳钢初期成本最低，但寿命周期成本最高；铝结构当时比不锈钢结构便宜，但防火性能极差，其熔点低

（660℃），在温度仅达200℃时强度就严重丧失。与之相对比，不锈钢的熔点为1400℃，其有效强度可保持到碳氢化合物火焰所能达到的最高温度。

研究使人们注意到火灾中熔融铝有从平台上部结构滴落的潜在危险，以及熔融锌（熔点420°）从镀锌钢滴落的风险。不锈钢不需要涂漆，因此不会释放出低碳钢涂层燃烧可能放出的毒烟。总体结论是，不锈钢表现出比铝和低碳钢优越的防火性能，成为火灾中安全性较好的材料。

6 结论

防火试验和寿命期成本研究都说明，不锈钢是具有成本效益的材料，其防火安全性显著优于玻璃钢、铝或低碳钢（镀锌或涂漆）。

与低碳钢相比，轻量化的不锈钢结构减轻了平台上部结构的重量，提高了防火性能，减少了维护需要。

陆上和海上设施的维护费用昂贵，维护时需要中断生产且有时具有危险性。因此，广泛使用不锈钢将具有明显的经济效益，同时还提供其它材料不具备的火灾安全性。AT

（本文作者为G. Waller和D.J. Cochrane，镍协会顾问、TMR公司的Catherine Houska亦协助对文章进行了更新）