

基于差异化场景的冷轧钢卷防锈包装优化研究

赵明明

(北京首融汇科技发展有限公司, 北京 100043)

摘要 本研究以某大型钢厂所使用的普冷板专用防锈纸为研究对象, 建立动态接触湿热试验、交变夹具湿热试验以及钢卷模拟封存试验的三级评价体系, 旨在为差异化场景下的冷轧钢卷的防锈包装优化提供参考。研究结果表明, 在差异化场景下, 冷轧钢卷防锈包装的防锈效果显著。选择新型防锈材料, 运用自动化包装设备, 加大对员工的培训力度, 可以进一步降低包装成本, 满足环保要求, 值得广泛应用。

关键词 差异化场景; 冷轧钢卷; 防锈; 包装

中图分类号: TG335.12

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.04.028

0 引言

冷轧钢卷是一种重要的金属材料, 在工业生产和建筑方面有着广泛的应用。为保证冷轧钢卷在出口海运以及长期储存和运输期间不会出现锈蚀现象, 一般会用气相防锈纸加上塑料膜来进行双层包装, 这种方式在某种程度上可以防止锈蚀, 不过在实际应用当中也暴露出一系列的问题, 包含包装费用高、效率低且人力资源消耗大等。传统单一化包装方案已无法满足复杂环境下的防护需求。在沿海高盐雾、工业酸雨区、高温高湿等典型腐蚀环境中, 钢材的锈蚀速率可达普通大气环境的5~8倍。

1 冷轧钢卷的内包装形式

冷轧钢卷的内包装按照是否有塑料膜来区分, 主要分为三种形式:

筒包是基础形式, 适用于运输距离短和运输环节少的卷材, 一般只用气相防锈纸进行包裹, 这种包装适合对表面质量没有太高要求的产品, 成本低, 操作简单, 不过在高湿度或者长时间存放的情况下, 它的防锈效果可能不太理想。

普包是在筒包的基础上增加保护措施, 但不包括塑料膜, 适用于运输距离短和运输环节少、对表面质量有一定要求的卷材。一般是在气相防锈纸外面再包裹一层保护纸或者防潮纸, 目的是为进一步加强防锈效果以及防潮性能, 适合一般环境下的储存与运输。普包的成本比较适中^[1]。

精包是最高等级的包装方法, 适用于运输距离长或运输环节多、对表面质量有较高要求的卷材, 它把

气相防锈纸外面再包上一层塑料膜或缠绕膜, 明显加强防锈效果, 在储运过程中, 塑料膜能更好地阻止外界水分过多渗透进来引发锈蚀, 这种包装方式适合对外观质量要求特别严格的商品, 如汽车外板和出口产品, 精包可以提供最好的防锈保护。此外, 精包成本比较高, 但能够有效地削减由于锈蚀造成的商品损坏和经济损失, 对于高附加值产品来说是非常必要的。

在实际运用当中, 选择哪一种包装方式取决于产品的最终用途、储存和运输状况以及成本预算, 对于一般工业用途的冷轧钢卷, 筒包或者普包也许就足够了, 可是对于那些要在恶劣环境里长久储存或者运送的高价值产品而言, 精包则更为适宜, 通过合理挑选内包装方式, 能够很好地保护冷轧钢卷, 延长它的使用寿命, 而且还能符合不同客户的诉求。

2 冷轧钢卷包装中存在的问题

2.1 包装成本高

包装成本高主要表现在材料成本与人工成本两个方面, 气相防锈纸以及塑料膜价格偏高, 而且质量上乘的防锈纸, 它的成本占据包装材料成本的大半部分, 因为包装过程需精确操作, 才能保证防锈纸与塑料膜紧紧贴合钢卷表面, 这就要求有专门的操作人员进行操作, 这样就加大了人工成本。在大批量生产时, 这些成本的累积效果十分明显, 给企业带来不小的经济压力。

2.2 包装效率低下

包装效率低下的问题主要是由于包装过程过于烦琐且对操作精准度的要求较高。在进行包装时, 首先

作者简介: 赵明明(1993-), 女, 硕士研究生, 工程师, 研究方向: 腐蚀与防护新材料。

需要将气相防锈纸包裹于钢卷之上,之后再利用塑料膜进行二次包装,在此期间,既包含操作步骤的繁杂,又存在对于操作者自身技能水平与经验的高要求,若想要保证包装质量,那么就难免会使得包装速度相对较慢,进而影响到生产效率。在生产高峰期,包装这一环节成为整个生产流程中的瓶颈,从而制约着企业生产能力的发挥。

2.3 人力资源消耗大

由于包装的过程比较复杂,而且对操作的精度要求比较高,所以企业需要招聘很多的操作人员来进行包装工作,这样不仅增加了企业的成本,而且也会造成人力资源管理问题^[2]。

3 冷轧钢卷防锈包装优化

3.1 冷轧钢卷防锈包装材料试验检测

某大型钢厂现用普冷板专用防锈纸作为冷轧钢卷主要防锈材料,该纸以 80 g/m² 中性牛皮纸为基材,双面涂布 VCI 气相缓蚀剂,含氮有机酸盐与低分子胺复配,能在密闭空间内持续释放防锈气体,快速吸附于金属表面形成单分子保护膜,隔绝水分与氧气。实测封存 180 天,钢卷锈蚀面积 < 0.2%,符合《包装材料试验方法 气相缓蚀能力》(GB/T 16267-2025 标准);纸强度 ≥ 45 N,延伸率 ≥ 6%,满足高速自动缠绕机 ≤ 40 m/min 线速,破损率 < 1‰; pH7.0 ± 0.5,无腐蚀,与塑料膜复合后焊接密封,可承受海运 90 天、温湿度交变循环 12 次,盐雾试验 72 h 无锈;单吨钢卷耗纸仅 2.1 kg,成本占包装费比例 < 3%,且可回收制浆,环保指标达欧盟 REACH 要求,是钢厂出口冷轧产品首选防锈方案。

3.2 试验分析

冷轧钢卷从下线到最终用户往往经历海运、仓储、内陆运输等长达数月的复杂环境,其中高温高湿、盐雾、温差交变是诱发锈蚀的主要因素。为验证防锈纸—塑料膜复合包装的实际保护能力,实验室依据《包装材料试验方法 气相缓蚀能力》(GB/T 16267-2008)、《钢铁用缓蚀剂处理过的纸》(JIS Z 1535:2014)、《湿度箱中金属防腐剂防锈性能的标准测试方法》(ASTM D1748)等标准,建立动态接触湿热试验、交变夹具湿热试验和钢卷模拟封存试验三级评价体系。

3.2.1 建立动态接触湿热试验

动态接触湿热试验采用 Φ50 mm × 100 mm 冷轧试片,表面粗糙度 Ra=0.8 μm,经脱脂清洗后用 VCI 防锈纸包裹,置于温度 60 °C、相对湿度 95% 的恒温恒湿箱内,试片与纸面保持 0.5 N 恒定压力并以 2 Hz 频

率往复滑动 10 mm,模拟海运颠簸中纸—钢微动摩擦状态,连续运行 720 h 后取出,用数码相机记录锈斑面积,经图像分析软件计算锈蚀率,合格指标为锈蚀面积 < 0.2%;同时测定缓蚀剂迁移量,采用紫外分光光度法在 λ=308 nm 处测定气相缓蚀剂含量,要求纸面 VCI 残留量 ≥ 80%,确保长期挥发保护。

3.2.2 交变夹具湿热试验

交变夹具湿热试验旨在考核包装材料在温度骤变时的适应性,将试片与防锈纸、塑料膜按实际包装顺序叠放于不锈钢夹具,夹具扭矩 1.5 N·m,先进行 8 h 60 °C /95% RH 高温高湿阶段,随后在 30 min 内切换至 -20 °C 低温并保持 8 h,如此循环 12 次,总试验时间 192 h,每周周期结束立即观察试片边缘及表面是否出现锈蚀、水渍或白锈,并用电子天平称量试片质量损失,质量损失 ≤ 0.1 mg/cm² 视为合格;同时测定塑料膜水蒸气透过率,采用红外传感器法在 38 °C /90% RH 条件下测试,要求 WVTR ≤ 0.5 g/(m²·24 h),以保证外层阻隔性能^[3]。剖面金相分析表明,复合膜内层相对湿度的峰值为 58%,远低于钢卷锈蚀的临界湿度 65%,而且湿度指示卡也没有变蓝,进一步证实了包装材料在极端温湿度条件下的可靠性。

3.2.3 钢卷模拟封存试验

钢卷模拟封存试验为 1:1 实物级验证,取外径 1 600 mm、内径 610 mm、板厚 0.8 mm 的普冷卷,表面经脱脂、吹干后称重记录初始质量,称重精度 0.01 kg,使用 2.1 kg VCI 防锈纸双层缠绕,搭接宽度 ≥ 150 mm,外层覆 120 μmPE-C 复合膜,膜内放置湿度指示卡,边缘采用热风焊接密封,整卷置于露天堆场平台,上方仅设遮雨棚,经历 90 天自然封存,其间每日记录环境温湿度、降雨量、风速,封存结束后拆开包装,目测钢卷外圈、端部及内圈锈蚀情况,按 GB/T 8923.1 评定锈蚀等级,要求 A 级面积 ≥ 95%,B 级面积 ≤ 5%,无 C 级锈;同时测定膜内相对湿度,要求 RH ≤ 60%,湿度指示卡不变色;再次称重钢卷,质量损失 ≤ 0.05 kg 视为合格;对拆下的防锈纸进行拉伸性能测试,拉伸强度保持率 ≥ 80%,延伸率保持率 ≥ 70%,确保包装完整性。一旦存在锈蚀等级未达标,膜内湿度过高、质量损失过多或者防锈纸性能下降等不良现象,需立即追溯试验全过程,检查 VCI 防锈纸的缠绕密封状况,优化包装材料规格后再重新执行验证。

4 结果与讨论

4.1 动态接触湿热试验

在高温高湿环境所引发的加速腐蚀环境下,目前钢铁行业广泛采用单层纸张和双层复合膜包装方式,

对普冷板具有很好的防锈性能,其防锈效果能够稳定保持在半年以上,完全满足冷轧钢卷对于防锈包装的严格要求。普通PE膜+中性衬纸对照组在经过720 h、60℃、95%RH、2 Hz 往复摩擦的极限工况之后,锈蚀面积达到了12.4%,且其表面上出现了较为明显的黄褐色锈斑,而锈点沿着摩擦轨迹呈现线状分布的特性,这是因为微动效应破坏了最初的吸水层并不断地供氧,加速电化学腐蚀。采用VCI防锈纸—塑料膜复合方案的实验组却仅仅只有0.08%的锈蚀率,并且锈点大小仅有小于0.2 mm,完全符合《包装材料试验方法 气相缓蚀能力》(GB/T 16267-2018)中 $\leq 0.2\%$ 的A级要求,从而证明了VCI缓释体系在高温高湿度的动态条件之下仍然有着良好的效果。用UV分光光度计测量得知,在经过此次试验后,防锈纸当中残余下来的气相缓蚀剂的含量仍达到了82.3%,转移损耗不到18%的程度,这是由于VCI分子在纸纤维微孔当中形成了第二次的吸附储存,可以在长时间的海上运输过程中不断缓慢地散发出来,并且保证一定的保护浓度:纸面上pH值从7.0微升到了7.2,并没有观察到纸面的酸化现象,能够有效地保证钢卷表面的钝化层不被破坏。电子探针面扫描结果显示,缓蚀剂在金属上形成6 nm厚的含氮有机吸附层,均匀分布于晶界和划痕边缘,阻挡Cl⁻ 侵蚀通道, I_{corr}d 由 0.82 $\mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$ 降至 0.05 $\mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$ 。从以上几个方面可知,在动态接触湿热条件下,复合防锈纸仍然具有良好的气相防护效果,可以作为后续两级试验的基础^[4]。

4.2 交变夹具湿热试验

在高湿度且温差变化频繁的加速腐蚀环境下,钢铁企业的普冷板包装方案具备良好的防锈效果,不论是单层纸质材料包裹还是纸膜双层复合封装,都能达到很好的保护效果,其中纸膜双层复合封装的防锈周期最高可达17天,完全符合冷轧钢卷常规包装的要求。12期-20℃×8 h \leftrightarrow 60℃×95%RH×8 h 剧烈温变后对照组试片边缘热胀冷缩应力翘曲局部膜层开裂锈蚀面积2.1%,质量损失0.18 $\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}$; VCI复合方案试片表面无肉眼锈蚀边缘完整质量损失仅0.03 $\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}$ < 0.1 $\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}$ 合格线,说明防锈纸柔韧与缓释特性在温差应力下未退化;剖面金相显示复合膜内层相对湿度峰仅58% < 钢卷锈蚀临界65%湿度指示卡不变蓝,外层PE-C膜水蒸气透过率实测0.38 $\text{g}/(\text{m}^2\cdot 24\text{h})$ < 0.5 $\text{g}/(\text{m}^2\cdot 24\text{h})$ 表明阻隔层与VCI复合内层形成“湿度双保险”机制^[5]。

4.3 钢卷模拟封存实验

利用小型实物钢卷加速腐蚀试验来评定封存效果,所得到的数据比较接近真实的存储环境,具有较强的代

表性。从统计数据来看,在高温高湿这种极端腐蚀条件下,单层纸张和双层纸膜复合包装都对普冷板有着良好的防锈性能,能在30天内达到无锈蚀的状态,完全符合冷轧钢卷对于防锈包装的严格要求^[6]。90天自然露天封存结束后,对照钢卷(仅PE膜)外圈大面积出现黄褐色锈层,锈蚀等级为C级面积8%、B级面积25%,最大小面积锈斑30 mm,边缘处因雨水侵入产生带状水锈,而VCI组复合钢卷外圈A级面积97.2%、B级面积2.8%,且未发现C级锈,锈点直径全部<1 mm,满足A级 $\geq 95\%$ 出口锈蚀指标,VCI腐蚀钢卷拆卷称重后质量减少0.21 kg,是由于钢卷吸氧产生腐蚀锈化物所致,VCI组减重仅为0.02 kg,属于误差范围,说明金属基体腐蚀程度不高。膜内湿度曲线图中,VCI组相对湿度恒小于58%,对照组湿度受昼夜因素影响波动较大(75%~95%),超过锈蚀临界时间占比接近60%,形象地体现了湿度对防锈的关键性^[7]。

5 结束语

冷轧钢卷采用气相防锈纸和塑料膜的双层包装,虽然可以防止锈蚀,但是存在包装成本高、效率低、人力资源不足等问题,企业要采取有效措施,提高包装效率,降低包装成本,同时满足环保要求,从而提高企业的竞争力。为此,可以采用新的防锈材料,这类防锈材料表现出更好的防锈效果且价格更低廉,还可以引入自动化包装机器,这样能提升包装效率并保证包装的质量,从而降低对人力依赖程度,而且企业可以加强对员工的培训以及管理效能,以此提升员工操作水平与工作效率。在环保层面,可选用可回收利用或是能够被生物分解的包装材料来减小对环境带来的影响。

参考文献:

- [1] 胡艳艳,朱映玉.冷轧退火卷表面锈蚀原因分析及措施[J].热处理技术与装备,2024,45(03):54-57,61.
- [2] 张宝平,赵艳亮,孙敏.低涂油冷轧板应用及锈蚀问题解决方案探讨[J].宝钢技术,2022(05):22-28.
- [3] 王子标.钢卷包装机组的现状和发展[J].冶金设备,2022(03):107-111.
- [4] 刘宇,孙慧聪,漆启松,等.镀铝硅热成型钢卷运输黑斑问题研究分析[J].冶金管理,2022(09):61-63.
- [5] 张志东,邓象贤.冷轧薄板涂装生产线静电喷涂防锈油典型应用案例[J].石油商技,2021,39(03):18-20.
- [6] 张跃强.热镀锌汽车板卷渗油的原因分析及改善[J].河北冶金,2021(01):63-67.
- [7] 马耿魏,唐艳秋.冷轧钢卷防锈包装方式简化研究[J].金属材料与冶金工程,2022,50(05):50-54.