

浅谈针对钢结构返锈的防锈涂料应用

薛红涛

(中交建筑集团有限公司,北京 100081)

摘要: 本文针对钢结构工程中普遍存在的返锈现象,系统地探讨了防锈涂料的应用工艺、返锈成因及其综合防治策略。研究分析表明,返锈主要源于钢材表面处理不彻底、涂料选型与配套体系不当、涂装环境控制不佳及施工操作不规范等多重因素。预防措施应聚焦于提升除锈等级标准、优化涂料配套体系、严格监控涂装环境与涂装间隔时间,并强化施工全过程的质量管理。对于已出现的返锈问题,需根据锈蚀程度与工况条件,采取局部彻底除锈后补涂或使用适应性带锈涂料进行修复,并建立长期的监测与维护机制。本文结合典型工程实例,提出了适用于不同施工场景的防锈技术路径与解决方案,以期为钢结构防腐工程的设计、施工与维护提供理论依据与实践参考。

关键词: 钢结构; 防锈涂料; 返锈; 表面处理; 闪锈

中图分类号:TQ637

文献标志码:A

文章编号:1007-9548(2026)01-0013-04

Discussion on the Application of Anti-rust Coating for Rust Return of Steel Structure

XUE Hong-tao

(China Communications Construction Group Co., Ltd., Beijing 100081, China)

Abstract: This paper systematically investigates the application process of anti-rust coatings for steel structures, focusing on the causes and comprehensive prevention and control strategies of rust recurrence. Research and analysis indicate that rust recurrence primarily stems from multiple factors, including inadequate surface treatment of steel, inappropriate coating selection and supporting systems, poorly controlled painting environments, and non-standard construction practices. Preventive measures should emphasize improving derusting grade standards, optimizing coating systems, strictly controlling environmental conditions and coating intervals, and enhancing quality management throughout the construction process. For existing rust recurrence, localized thorough derusting followed by recoating or the application of adaptive rust-tolerant coatings should be adopted based on the severity of corrosion and specific working conditions, alongside the establishment of a long-term monitoring and maintenance mechanism. Combining typical engineering cases, the article proposes anti-rust technical pathways and solutions suitable for various construction scenarios, aiming to provide theoretical basis and practical reference for the design, construction, and maintenance of anti-corrosion engineering for steel structures.

Key words: steel structure; anti-rust coating; rust recurrence; surface treatment; flash rust

收稿日期: 2024-08-06

作者简介: 薛红涛(1989—),男,本科,工程师,主要从事钢结构建筑防腐施工技术研究工作。E-mail:569041029@qq.com。

0 引言

钢结构因其强度高、自重轻、塑性韧性好、施工周期短等突出优点,在现代建筑、桥梁、工业厂房及大型公共设施中得到了极其广泛的应用。然而,钢材固有的易腐蚀性是其最显著的缺点之一。许昌某项目采用了

内灌注混凝土的钢管束组合结构,该结构体系通过在钢管内灌注混凝土,使其在建筑中承担剪力墙的功能,再与钢梁、钢筋桁架楼承板等构件协同工作,共同构成一个高效、稳定的空间受力体系。在实际工程施工与后期维护中,一个普遍且棘手的问题是,部分钢构件在进行表面除锈并涂装防锈涂料后,在一定时间间隔内,涂层下或涂层未覆盖区域重新出现了锈蚀现象,这种现象在工程界被称为“返锈”。返锈现象的出现,是一个明确的信号,表明初始的防锈措施存在缺陷或已在特定条件下失效。返锈问题的治理,不仅关系到结构安全,也直接影响到工程的经济效益和社会效益。合理的防锈方案能有效降低因腐蚀导致的维修加固成本,避免因结构性能退化引发的安全事故,从而延长结构的使用寿命,实现资源的节约与可持续发展^[1]。鉴于返锈问题的复杂性或多因性,本文结合工程实践,对返锈现象的产生原因进行系统的深入剖析,并分别从预防性控制与修复性治理两个维度,探讨其综合应对措施与技术要点。

1 产生原因

返锈现象的产生并非单一因素所致,而是设计、材料、环境、施工和管理等多个环节问题的综合体现,对其进行溯源性分析,是制定有效防治策略的基础。总体来看,返锈主要与以下几个方面密切相关。

1.1 表面处理质量不达标

表面处理是涂层系统能够发挥长期有效防护功能的基石,其质量优劣直接决定了涂层与钢材基体之间的附着力强度与耐久性^[2]。表面处理不仅包括构件出厂前的初次除锈,也包括施工现场涂装前的表面清理。如果除锈等级未能达到设计文件或涂料产品说明书所要求的等级(如 Sa2.5 或 St3 级),表面残留的氧化皮、铁锈、焊渣、粉尘等污染物会成为涂层下的隐患^[3]。

特别需要关注的是湿法喷砂(水喷砂)除锈工艺。该工艺因其抑尘效果好、清理效率高等优点在某些场合得到应用。然而,如果在喷砂用水中未添加足量且合适的缓锈剂或防锈液,水分会渗透至钢材表面微观不平处的缝隙中,若后续干燥不彻底,将导致钢材在涂装前就已发生快速锈蚀^[4]。

1.2 涂料体系选择与配套不当

防锈涂料是构成保护屏障的功能性材料,其选择与配套使用的科学性直接决定了防护体系的性能。部分工程未根据钢结构所处的具体腐蚀环境和使用要求来选择合适的涂料体系,导致涂料自身的防锈能力不足以抵抗环境侵蚀^[5]。

此外,涂料的物理性能(如黏度、附着力、柔韧性等)若不达标,涂层在服役过程中易出现开裂、剥离等

缺陷,使钢材暴露在环境中。不同种类涂料(如环氧、聚氨酯、丙烯酸等)之间的相容性问题也至关重要。

水性涂料的广泛应用带来了其特有的“闪锈”问题。闪锈是指水性涂料涂覆在金属基材上后,在干燥固化前,涂层表面出现的点状或网状锈斑的现象^[6]。若涂料配方中未选用合适的缓锈剂,或施工时环境温湿度控制不当,锈蚀在涂装后几十分钟至几小时内即可发生,这种“闪锈”可视为一种特殊且快速的返锈形式。

1.3 涂装环境条件控制不力

涂装时的环境条件对涂层的形成质量与固化效果有着决定性的影响。如果在不适宜的环境下施工,即使表面处理和涂料选择都正确,也难以获得优质的防护涂层。

在低温环境下,涂料(尤其是化学反应固化型涂料,如环氧漆)的固化反应速度减慢甚至停止;在高湿环境下,水分挥发缓慢。对于水性涂料,这极易导致流挂、不干等缺陷,使涂层长期处于不固化状态,丧失防护能力。溶剂型涂料在高湿环境下施工,表面易凝露,水分被包裹在涂膜内,也会影响附着力并诱发锈蚀。

在高温环境下,特别是夏季阳光直射下,钢材表面温度可高达 50~60℃。此时涂装溶剂型涂料,溶剂会急速挥发,易产生针孔、缩孔等缺陷;涂装水性涂料,则会加速水分蒸发和原电池反应电流的传导,极易诱发严重的闪锈。

此外,涂装时钢材表面的温度必须高于环境露点温度 3℃以上。若低于此要求,水汽会在冰冷的钢材表面凝结,形成肉眼难以察觉的薄水膜,严重破坏涂层附着力,为返锈提供直接条件^[7]。

1.4 施工操作与管理存在疏漏

施工环节是理论方案转化为实体工程的最后一环,也是质量问题的高发区。施工人员的技能水平、质量意识和操作规范性直接关系到涂层的最终状态。

涂装过程中若出现漏涂、涂膜厚度不足或不均匀、涂装间隔时间过短或过长等问题,都会直接削弱涂层的防护效果。钢结构中的焊缝、棱角、螺栓连接处、剪压板边缘等位置是应力集中区和几何形状复杂区,这些部位往往是表面处理最难彻底、涂装最难覆盖均匀的地方。钢结构在安装过程中,不可避免地会对原有涂层造成局部损伤。如果这些破损点未能在第一时间被发现并进行规范的表面处理和补涂,它们将成为腐蚀的起始点。

施工过程中的质量控制不严,特别是对复杂节点和现场修补环节的疏忽,是导致涂层体系在投入使用后短期内即出现失效和返锈的重要原因^[8]。

2 预防措施

预防是解决返锈问题最经济、最有效的途径。针对上述成因,必须在返锈发生前,构建一个涵盖材料、设计、施工、管理全过程的系统性预防体系。

2.1 强化表面处理的质量控制

表面处理是预防返锈的第一道,也是最重要的一道防线,必须严格执行相关标准,确保处理质量。

1)明确除锈等级:对于新建钢结构,工厂内的初始除锈等级应不低于 Sa2.5 级(非常彻底的喷射除锈)。对于处于严重腐蚀环境或设计使用年限要求高的关键构件,应采用最高等级的 Sa3 级(使钢材表面洁净,露出金属本色)。现场二次处理和修补处理,其质量等级不应低于初始处理等级。

2)控制处理时机与环境:钢构件在制作完成后,应尽快(通常在 4~6 h 内)进行除锈和涂装车间底漆,防止在工厂内发生二次锈蚀。处理后的表面在涂装前应避免被污染、受潮。

3)优化湿法喷砂工艺:当采用湿法喷砂时,必须在喷砂用水中添加专用缓蚀剂,如磷酸三钠、碳酸钠或复合型商业缓锈剂,其浓度需通过试验确定,以确保在工艺要求的窗口期内钢材不发生返锈^[4]。处理后应尽快用干燥空气吹干表面。

4)清洁度检查:除锈后,除了目视检查锈蚀和氧化皮去除情况,还必须检查表面的油脂、盐分等污染物残留。可使用清洁布擦拭法或专用测试套件(如测盐仪、油脂测试纸)进行定量或定性检测,确保表面清洁度达标。

2.2 科学选型与优化涂料体系

根据钢结构的具体服役环境进行涂料体系的科学选型与配套设计,是保证防护效果的前提。

1)环境适应性原则:选用的涂料体系必须与腐蚀环境等级相匹配。例如,C4(高腐蚀性环境,如化工厂、海岸)和 C5-M(海洋等高腐蚀环境)下,必须采用重防腐涂料体系,如环氧富锌底漆+环氧云铁中间漆+氟碳或聚硅氧烷面漆的经典配套。

2)体系配套性原则:确保底、中、面漆之间具有良好的相容性和层间附着力。优先选择同一涂料生产商提供的完整配套体系。如需跨品牌配套,必须进行严格的相容性试验。

3)水性涂料的防闪锈对策:针对水性涂料的闪锈问题,应从配方和施工两方面入手。在配方上,需筛选并复配高效的缓锈剂,如亚硝酸盐、钼酸盐、有机氮杂环化合物等,通过协同作用在抑制闪锈与保持涂层耐水性之间取得平衡^[6,9]。在施工前,若发现基材除油效果不佳,可考虑在涂料中添加合适的乳化剂类表面活

性剂,以帮助乳化残留的微量油污,改善涂料对基材的润湿与附着^[10]。

2.3 严格管控涂装环境与过程

创造并维持适宜的涂装环境,是保证涂层正常固化、形成完整保护膜的必要条件。

涂装作业前、中、后,均应持续监测环境温度、相对湿度和钢材表面温度,建议使用电子温湿度计和红外测温仪。确保施工环境温度在 5~35 ℃之间(具体参照产品说明书),相对湿度一般低于 85%,并且钢材表面温度始终高于露点 3 ℃以上。

涂装区域应保持良好的通风,以利于溶剂挥发和涂层固化,但同时要避免强风带起粉尘污染未干涂层。涂装完成后,在涂层完全固化前,应采取必要的防护措施,如设置警示标识、覆盖保护膜等,防止人员踩踏、机械碰撞和雨水、露水侵袭。

2.4 规范施工操作与加强节点管理

精细化的施工操作和严格的节点处理是确保涂层系统完整性的关键。

对涂装施工人员进行系统的技能培训和考核,使其熟练掌握各种涂装方法(刷涂、辊涂、无气喷涂)的适用场景与技巧,理解膜厚控制、间隔时间等关键工艺参数的重要性。

施工中应使用湿膜卡和干膜测厚仪对涂层进行过程控制和最终检验,确保各道涂层及总干膜厚度符合设计要求。严格遵循产品说明书规定的“最短重涂间隔”和“最长重涂间隔”。超过最长间隔时,必须对前道涂层表面进行拉毛处理,清洁后再进行涂装。

对于焊缝、棱角、孔洞、连接板接触面边缘等复杂部位,应优先采用刷涂进行预涂装,确保涂料能够充分渗透和覆盖。高强螺栓连接节点的摩擦面,需按设计规定进行处理和保护。安装完成后,对所有现场焊缝、涂层破损处,必须进行彻底的表面处理(至少达到 St3 级),并使用与工厂涂层相同或相容的涂料进行补涂,补涂区域的涂层厚度应不低于原设计厚度。

3 修复措施

当返锈现象已经发生时,必须采取及时、正确、彻底的修复措施,以阻止腐蚀的进一步发展,恢复结构的防护状态。

3.1 基于彻底除锈的补涂

这是最根本、最可靠的修复方法,适用于绝大多数返锈情况,尤其是锈蚀面积较大或程度较深时。

1)评估与处理:首先评估返锈的范围和严重程度。对于局部小面积返锈,可使用动力工具(如角磨机配钢丝刷盘、砂纸盘)进行彻底清理,直至露出坚实的基材。对于大面积返锈,则应优先采用喷砂除锈,处理等级应

恢复至与原设计要求一致(如 Sa2.5 级)。

2)表面清洁:除锈后,立即使用压缩空气吹扫、真空吸尘或清洁布擦拭,彻底清除表面的粉尘和残留物。

3)阶梯式补涂:补涂时,应遵循“阶梯式”原则,即每一道补涂的涂层边缘应比前一道或原有涂层边缘适当向外扩展,形成平滑的过渡区,避免在修补边界处形成明显的厚度台阶,从而减少边缘起皮的风险。补涂的涂料体系、道数及干膜厚度应与原设计一致。

3.2 适应性选用带锈涂料

在某些特殊工况下,如空间受限无法进行喷砂、对粉尘有严格要求或基体结构不允许剧烈振动(如既有建筑维修),无法实现彻底的表面处理时,可以考虑使用带锈涂料作为一种补救措施。

带锈涂料并非简单地涂在锈层上,其工作原理主要分为3种:稳定型(通过活性颜料将活泼的铁锈转化为稳定的磁性氧化铁或络合物,使其失去活性)、转化型(利用转化剂(如磷酸、丹宁酸)与铁锈反应生成难溶的稳定保护层)和渗透型(依靠极强的渗透力携带防锈颜料深入锈层底部,形成致密封闭层)^[4]。选择带锈涂料必须谨慎,首先要判断其类型与当前锈蚀状态(锈层厚度、致密性)是否匹配;其次,要明确其通常是作为底漆使用,上面仍需覆盖中间漆和面漆以构成完整体系。

3.3 建立长效检查与维护机制

涂装修复并非一劳永逸,必须建立一套系统性的长期检查与维护计划,以实现钢结构防护状态的持续监控和主动干预。

1)定期检查:制定详细的检查计划,周期可分为季度检查、年度检查和特殊情况(如台风、地震后)检查。检查内容应包括:涂层外观(是否有粉化、开裂、起泡、剥落)、涂层厚度、附着力状况以及是否有新的锈蚀点出现。对于关键部位和以往出现过问题的区域,应进行重点检查。

2)预防性维护:对于检查中发现的微小缺陷,如轻微的机械损伤、早期的小范围锈点,应在其发展扩大前及时进行局部处理和维修,做到“防微杜渐”。

3)健康档案管理:建议为重要钢结构工程建立涂层防护系统的“健康档案”,记录从施工、验收到每次检查、维护的全部信息^[5]。

4 结语

钢结构返锈是一个涉及材料科学、表面工程、结构力学与环境因素交叉的复杂问题,其防治是一项系统工程,需要设计、材料、施工、管理各方协同努力。通过系统分析,得出以下结论:

1)返锈的根源可归结于表面处理、涂料体系、涂装环境及施工操作4个关键环节的失控。其中,表面处理质量是基础,涂料选型配套是核心,环境过程控制是保障,规范精细施工是关键。任何一个环节的缺失或不足,都可能导致防护体系的失效。

2)在预防策略上,必须坚持“预防为主,防治结合”的原则。通过强化表面处理的质量标准、科学选配与环境相适应的涂料体系、严格监控涂装环境与工艺参数,并规范施工操作与加强节点细节管理,构建起一道坚实的主动防御体系,从源头上最大限度地降低返锈风险。

3)在修复治理上,应秉持“对症下药,持续维护”的理念。根据返锈的具体情况,选择最适宜的修复方案:优先采用彻底除锈后补涂这一根本方法;在条件受限时,可审慎选用与之匹配的带锈涂料作为适应性解决方案。无论采用何种修复手段,修复后的长期、定期检查与主动性维护都是确保修复效果持久性的必要条件。

参考文献:

- [1] 杨博均,魏木孟,姚敬华,等.基材不同除锈处理工艺对涂层性能影响的优劣对比研究[J].中国涂料,2022,37(8):70-74.
- [2] 王志鹏,谢众,李龙,等.钢材表面处理工艺对环氧涂层附着力的影响[J].全面腐蚀控制,2013,27(11):60-62.
- [3] 唐振,韩佩,张伟,等.超高层建筑钢结构防腐涂装质量问题分析与控制[J].建筑施工,2019,41(1):41-42.
- [4] 董彩常,陈艳,赵晓明,等.无返锈湿喷砂缓蚀剂的筛选[J].腐蚀与防护,2015,36(2):161-165.
- [5] 吴栋,刘书法,曲春钊,等.海洋平台涂装施工要求与质量分析[J].现代涂料与涂装,2023,26(12):41-43.
- [6] 束树军.基于丙烯酸乳胶的水性防腐涂料闪锈抑制机理及影响因素探究[J].涂层与防护,2022,43(6):43-50.
- [7] 朱敬林,姚飞,王炳华,等.钢结构用水性醇酸防腐涂料涂装技术的研究分析[J].现代涂料与涂装,2021,24(11):32-35.
- [8] 曹辉,刘阳,黄昌东,等.车站钢结构涂料涂装体系失效问题及分析[J].现代涂料与涂装,2022,25(9):39-44.
- [9] 谷锐,李运德.防闪锈剂在水性单组分丙烯酸涂料中的应用研究[J].中国涂料,2021,36(7):42-46.
- [10] 江拥.钢结构专用水性醇酸防锈漆配方设计因素分析[J].涂料工业,2016,46(10):21-26.
- [11] 游仲.带锈涂装对环氧涂层防腐性能的影响[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2014.