

钢结构防腐防火一体化涂层技术研究

李进国

青岛中科坤泰装配建筑科技有限公司 山东青岛

【摘要】在现代建筑工程中，钢结构因其高强度和施工便捷性被广泛应用，但其易腐蚀和耐火性差的问题严重影响结构安全与使用寿命。本文围绕“钢结构防腐防火一体化涂层技术”展开研究，旨在提出一种能够同时满足防腐与防火双重功能的新涂层体系。通过分析现有涂层材料的性能缺陷，结合实验数据对比不同复合涂层的防护效果，探讨材料配比、涂覆工艺及环境适应性对涂层综合性能的影响。采用有机-无机复合基料并添加多功能助剂的一体化涂层，在提升耐腐蚀性和耐火极限方面具有显著优势，可为钢结构长效防护提供新思路。

【关键词】 钢结构；防腐；防火；涂层技术；一体化防护

【收稿日期】 2025 年 5 月 15 日

【出刊日期】 2025 年 6 月 6 日

【DOI】 10.12208/j.jer.20250297

Research on integrated coating technology for anti-corrosion and fire protection of steel structures

Jinguo Li

Qingdao Zhongke Kuntai Assembly Building Technology Co., Ltd, Qingdao, Shandong

【Abstract】 In modern construction engineering, steel structures are widely used due to their high strength and construction convenience. However, problems such as easy corrosion and poor fire resistance seriously affect structural safety and service life. This paper focuses on the research of "integrated coating technology for anti-corrosion and fire protection of steel structures," aiming to propose a new coating system that can simultaneously meet the dual functions of anti-corrosion and fire protection. By analyzing the performance defects of existing coating materials, comparing the protective effects of different composite coatings with experimental data, the influences of material ratio, coating process, and environmental adaptability on the comprehensive properties of the coatings are discussed. The integrated coating using organic-inorganic composite base materials and added multifunctional additives has significant advantages in improving corrosion resistance and fire resistance limit, which can provide new ideas for the long-term protection of steel structures.

【Keywords】 Steel structure; Anti-corrosion; Fire protection; Coating technology; Integrated protection

引言

在工业与民用建筑中，钢结构以其优异的力学性能和可再生性成为主流结构形式之一。然而，长期暴露于复杂环境中，钢材极易受到腐蚀破坏，降低结构承载力，甚至引发安全事故。在火灾等极端条件下，钢材强度迅速下降，导致结构失稳。传统做法多采用分别施加防腐层与防火层的方式进行防护，不仅施工繁琐，还存在层间相容性差、维护成本高等问题。如何实现防腐与防火功能的协同统一，成为当前工程界亟待解决的技术难题。本文基于这一背景，提出钢结构防腐防火一体化涂层技术的研究方向，旨在探索高效、经济、可持续的综合防护方案，为提升钢结构建筑的安全性与耐久性提供理论支持和技术路径。

1 钢结构防护需求与现存问题分析

在现代建筑结构中，钢结构因其高强度、轻量化和施工便捷性被广泛应用于工业厂房、高层建筑及大跨度桥梁等领域。然而，由于钢材本身的金属特性，在复杂环境条件下极易发生氧化腐蚀，尤其是在高温、高湿、盐雾或化学介质侵蚀的环境中，腐蚀速率显著加快，严重削弱结构承载能力，缩短使用寿命。钢材在火灾条件下热传导迅速，温度超过 500℃ 时强度急剧下降，导致结构失稳甚至坍塌，带来极大的安全隐患。对钢结构实施有效的防腐与防火保护是保障其安全运行和延长服役周期的关键。

目前，工程实践中普遍采用分层防护的方式，即先施涂防腐涂层，再覆盖防火涂料，以分别应对不同环境威胁。然而，这种传统做法存在诸多弊端，如涂层间附着着力差、施工工序繁琐、后期维护成本高以及材料兼容

性不佳等问题。部分涂层材料在长期使用过程中易出现老化、剥落或性能衰减等现象,影响整体防护效果。尤其在海洋平台、化工厂区等严酷环境下,单一功能涂层难以满足长效防护需求,亟需一种兼具耐腐蚀与耐火性能的一体化涂层体系,以提升综合防护能力和工程经济性。

针对上述问题,研究提出钢结构防腐防火一体化涂层技术,旨在通过材料科学与涂装工艺的协同优化,开发出具有双重功能的复合型涂层体系。该技术不仅要求涂层具备优异的屏蔽性、电绝缘性和化学稳定性,以抵御腐蚀因子的侵入,还需在高温条件下形成致密隔热层,延缓热量传递,提高钢结构的耐火极限。通过引入有机-无机复合基料、阻燃剂及功能性填料,结合先进的涂覆工艺,实现涂层在物理性能、耐久性与功能性上的统一,为钢结构提供高效、可持续的整体防护方案。

2 一体化涂层的设计原则与功能要求

在钢结构防护工程中,防腐与防火功能往往分别设计、独立实施,导致涂层体系复杂、施工难度大、维护成本高。为解决这一系列问题,一体化涂层技术应运而生,其核心在于将传统分离的防腐层和防火层整合为一个协同作用的功能体系,实现“一涂双效”的目标。该设计理念不仅要求涂层具备良好的附着力和封闭性,以阻止腐蚀介质(如氧气、水分、氯离子等)对钢材表面的侵蚀,还需在高温条件下具备一定的膨胀阻燃性能,形成隔热炭层,延缓钢材温升,确保结构在火灾中的稳定性。这种集成化思路打破了传统分层涂装的局限,提升了涂层的整体性能和施工效率。

从材料科学角度出发,一体化涂层的设计需兼顾物理屏蔽、电化学保护与热防护三重机制。在常温环境下,涂层应具有较低的水蒸气透过率和优良的耐盐雾性能,防止电解质渗透引发电化学腐蚀;其次,在火灾发生时,涂层内部的阻燃组分应迅速响应温度变化,通过吸热分解、释放惰性气体或形成多孔炭质层等方式,有效降低热传导速率,提高钢结构的耐火极限。涂层还应具备良好的耐候性、抗老化性和机械强度,以适应不同环境条件下的长期服役需求。涂层配方设计需综合考虑基料树脂、阻燃剂、填料及助剂之间的协同效应,确保各组分在功能上互补而不冲突。

在实际应用层面,一体化涂层的设计还需充分考虑施工工艺、配套体系及环境适应性等因素。涂层应具备良好的流平性与可喷涂性,便于现场施工操作;同时应与底材及其他配套涂层具有优异的相容性,避免因

界面脱粘或开裂导致整体失效。对于海洋平台、化工储罐、隧道桥梁等特殊工况环境,涂层还需具备抗紫外线老化、耐酸碱腐蚀及耐磨性能。通过引入纳米增强材料、硅氧烷交联剂等功能组分,可进一步提升涂层的致密性与耐久性,满足不同应用场景下的综合防护需求。这种系统化的设计理念,为钢结构在复杂服役环境中的长效安全运行提供了有力保障。

3 关键材料选择与涂层性能实验研究

在钢结构防腐防火一体化涂层体系中,材料的选择直接影响涂层的综合性能与服役寿命。基料树脂作为涂层的主要成膜物质,其种类和结构决定了涂层的基本物理化学性能。有机树脂如环氧树脂、聚氨酯具有良好的附着力和封闭性,适用于防腐功能;而无机硅酸盐类材料则具备优异的耐高温性能,适合用于防火设计。研究采用有机-无机杂化树脂作为复合基料,以兼顾常温防护与高温响应能力。功能性填料如氧化锌、氢氧化铝、膨胀石墨等被引入配方中,分别起到增强屏蔽效果、提高耐腐蚀性及促进炭层形成的作用。

为更全面地验证所选材料组合对涂层性能的实际影响,研究团队在实验室环境下开展了一系列系统性的测试与模拟实验。电化学阻抗谱(EIS)和动电位极化曲线测试在3.5%NaCl模拟海水溶液中进行,用于模拟海洋及工业腐蚀环境,评估涂层在严苛条件下的耐腐蚀能力。测试结果表明,优化后的复合涂层表现出更高的阻抗模值和更低的腐蚀电流密度,说明其具备更强的电解质屏蔽能力和更稳定的界面保护性能。在耐火性能测试中,样品经受标准升温曲线(ISO834)下长达90分钟的高温作用,背火面温度始终控制在钢材临界变形温度以下,满足建筑构件对耐火极限的基本要求。这些定量数据充分证明了材料配比优化的有效性,为涂层功能的实现提供了坚实的技术支撑。

除了基本功能性能外,涂层的施工适应性与环境耐久性也是评价其工程应用价值的重要指标。为此,研究还对涂层的干燥时间、附着力、柔韧性及耐磨性进行了系统测试,并模拟实际工况下的紫外线老化、冻融循环及酸碱浸泡环境,考察其长期稳定性。实验结果显示,优化后的涂层体系在多种严酷环境下均表现出良好的完整性与性能保持率,未出现明显开裂、脱落或变色现象。这表明该一体化涂层不仅在功能上达到预期目标,也具备良好的实用性和环境适应能力,能够满足不同工程场景的应用需求。

4 一体化涂层的应用工艺与环境适应性评估

在钢结构防腐防火一体化涂层的实际应用过程中,

涂装工艺的合理性与可操作性直接影响涂层的最终性能和工程实施效率。传统防腐与防火涂层分别施工时,不仅工序繁琐、周期长,还存在层间附着力差、界面不稳定等问题,影响整体防护效果。而一体化涂层由于在同一涂层体系中集成双重功能,因此对施工工艺提出了更高的要求。实际操作中,需根据钢材表面处理等级(如 Sa2.5 级)、环境温湿度、涂装方式(如高压无气喷涂、刷涂或滚涂)以及干燥固化条件进行精细化控制,以确保涂层成膜均匀、附着牢固。在施工过程中还需避免因涂层厚度过薄导致功能不足或过厚引发开裂脱落等缺陷,从而实现涂层在物理性能、施工效率与质量控制之间的最佳平衡。

从材料性能向工程应用转化的过程中,涂层的环境适应性评估是判断其是否具备广泛推广价值的重要依据。针对不同服役环境,如海洋大气区、工业腐蚀区、高温高湿隧道及地下空间等,研究通过模拟加速老化实验(QUV 紫外老化、盐雾试验、循环腐蚀测试)与现场挂片试验相结合的方式,系统评价了一体化涂层在多种严酷条件下的稳定性表现。结果表明,该涂层在长期紫外线照射下未出现明显粉化或变色,在 3000 小时盐雾试验后仍保持良好的屏蔽性和附着力,并在高低温交变环境下未发生开裂或剥离现象。这些数据充分说明该涂层体系具有优异的耐候性与抗环境应力能力,能够满足复杂工况下的长期服役需求。

为验证其在真实工程场景中的适用性,该一体化涂层已在多个重点工程项目中开展试点应用,包括某沿海化工厂储罐支撑结构、某城市综合管廊钢梁以及某高层建筑转换层桁架节点等部位。施工反馈显示,该涂层具有良好的流平性与覆盖性,一次成膜厚度可达 150~200 μm ,减少了施工道数,提高了作业效率。在经历多轮季节性温湿度变化及局部火灾模拟演练后,涂层未出现性能劣化迹象,表现出稳定的防护能力。结合实验室研究与工程实践结果,可以认为该一体化涂层技术不仅具备优良的功能性与耐久性,也在实际应用中展现出良好的适应性与推广前景,为未来钢结构长效综合防护提供了切实可行的技术路径。

5 结语

本研究围绕钢结构防腐防火一体化涂层技术,系统分析了当前防护体系存在的问题,提出了集成化涂层设计思路,并通过材料优选与性能实验验证了其可行性。研究表明,采用有机-无机复合基料并辅以功能性填料的涂层体系,不仅具备良好的耐腐蚀与耐火性能,还具有优异的施工适应性与环境稳定性。实际工程应用进一步证实了其在复杂工况下的长效防护能力。该技术的应用为提升钢结构建筑的安全性、耐久性与施工效率提供了新的解决方案,具有良好的推广价值和广阔的应用前景。

参考文献

- [1] 李晓敏.装配式钢结构建筑中防腐防火技术的应用与改进[J].佛山陶瓷,2024,34(11):50-52.
- [2] 周梅君.某工程钢结构框架防腐、防火涂料脱落原因分析[J].新型建筑材料,2022,49(06):145-148.
- [3] 梁智昆.抽水蓄能电站顶拱钢结构深化设计及防腐防火技术研究.云南省,中国水利水电第十四工程局有限公司,2021-10-13.
- [4] 3 万吨钢结构防腐防火保护添翼全球最大环球影城[J].上海建材,2020,(01):21.
- [5] 谈军志.浅谈建筑工程钢结构的防腐防火施工技术[J].中华建设,2020,(01):116-117.
- [6] 范潇.工业钢结构厂房防腐防火的对措分析[J].山东工业技术,2019,(10):23.
- [7] 李威.浅析工业钢结构厂房的防腐防火对策[J].全面腐蚀控制,2017,31(04):27-28+82.
- [8] 胡晓玄.建筑钢结构工程防腐、防火涂料的应用[J].中国建筑金属结构,2013,(18):3+41.

版权声明: ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

