

# 钢结构建筑防火涂料失效机理与耐久性提升策略

况乐乐 汪金胜

中建三局 湖北 武汉 430000

**摘要：**钢结构建筑防火涂料失效机理主要包括材料自身性能退化（如有机成分分解、无机填料溶出、基体树脂老化）、环境因素侵蚀（如湿度、温度循环、紫外线辐射）、施工工艺缺陷（如厚度不均、表面处理不当）及荷载与机械损伤等。提升耐久性策略可从优化材料配方（如改性树脂、高效阻燃剂复配）、改进施工工艺（如标准化施工、智能化喷涂设备）、设计复合防护体系及完善标准与认证体系等方面入手。

**关键词：**钢结构建筑；防火涂料；失效机理；耐久性提升策略

引言：钢结构建筑因其强度高、自重轻、施工快等优势，在现代建筑中广泛应用。然而，火灾下钢结构易因高温迅速失去承载力，防火涂料成为保障其耐火极限的关键防线。但受材料性能退化、复杂环境侵蚀、施工工艺缺陷及荷载作用等因素影响，防火涂料常出现粉化、脱落、隔热失效等问题，导致钢结构在火灾中提前失效，威胁生命财产安全。因此，系统分析失效机理并提出耐久性提升策略，对保障钢结构建筑防火安全、延长使用寿命具有重要意义。

## 1 钢结构建筑防火涂料失效机理分析

### 1.1 材料自身性能退化

（1）有机成分分解：膨胀型防火涂料的防火效能依赖聚磷酸铵、三聚氰胺、季戊四醇等关键有机成分的协同作用，这类成分在长期环境温湿度波动或火灾初期低热辐射下，易发生热分解反应，释放挥发性气体，导致涂层膨胀倍率下降、炭化层结构松散，无法形成有效的隔热屏障，最终丧失防火保护功能。（2）无机填料溶出：涂料中的滑石粉、氢氧化铝等无机填料是维持涂层结构稳定性的重要组分，长期暴露于雨水、工业蒸汽等潮湿环境中，填料易发生溶解、迁移或结晶水流失，导致涂层内部孔隙率显著增加，致密性破坏，不仅降低了隔热性能，还为腐蚀介质渗透提供了通道。（3）基体树脂老化：作为涂料成膜的关键载体，丙烯酸酯、环氧树脂等有机树脂长期受紫外线照射、氧气氧化作用，分子链会发生断裂、交联等化学反应，导致树脂脆性增加、柔韧性下降，涂层与钢结构基材的附着力逐步丧失，最终出现粉化、起皮、脱落等失效现象。

### 1.2 环境因素侵蚀

（1）湿度与腐蚀介质：空气中的水分通过涂层孔隙渗透至基材表面，一方面使涂层发生吸湿膨胀，产生内应力导致开裂；另一方面，在工业环境中的氯离子、二

氧化硫等腐蚀介质协同作用下，会加速钢结构基材锈蚀，锈蚀产物的体积膨胀会进一步顶推涂层，引发涂层与基材剥离。在海洋性气候或化工园区等特殊场景，盐雾、酸碱气体的侵蚀会使这一失效过程大幅缩短。（2）温度循环：昼夜交替、季节变化带来的温度波动，使钢结构与防火涂料因热膨胀系数差异，反复经历“膨胀-收缩”循环，涂层内部持续积累热应力，当应力超过涂层的抗拉强度时，会产生细微裂纹，这些微裂纹随温度循环次数增加逐步扩展，最终导致涂层开裂、脱落。（3）紫外线辐射：太阳紫外线具有强能量，会直接破坏有机树脂的化学结构，引发光氧化降解反应，使涂层表面逐步失去光泽、发生黄变，进而出现粉化现象，粉化后的涂层无法再有效保护基材，且易被雨水冲刷流失，导致涂层厚度持续减薄，最终丧失防火功能<sup>[1]</sup>。

### 1.3 施工工艺缺陷

（1）厚度不均：防火涂料的耐火极限与涂层厚度密切相关，施工中若采用刷涂、滚涂等方式操作不当，会导致涂层局部过薄，无法满足规定耐火时间要求；而局部涂层过厚时，会因干燥收缩不均产生内应力，且涂层内部易形成气泡、空鼓，后期使用中易发生开裂、脱落，尤其在钢结构节点、转角等复杂部位，厚度控制难度大，缺陷更为突出。（2）表面处理不当：钢结构基材表面的铁锈、油污、灰尘等杂质会严重影响涂层附着力，施工前若未进行彻底的喷砂除锈、除油处理，涂层仅附着于杂质表面，无法与基材形成有效结合，在后期使用中受轻微外力或环境变化影响，就易出现起皮、脱落。（3）混合使用涂料：不同类型防火涂料的成膜机理、化学组分差异显著，若施工中盲目将水性与油性涂料混合使用，或不同厂家、不同型号的涂料随意搭配，会导致涂料之间兼容性不足，出现分层、结块、固化不完全等问题，形成的涂层结构松散，无法达到设计的防

火与防护效果,短期内即会发生失效。

#### 1.4 荷载与机械损伤

(1) 钢结构振动或变形:工业厂房中的机械设备运行、车辆通行等产生的持续振动,会传递至钢结构,使涂层与基材之间产生剪切应力,长期作用下导致涂层开裂;当钢结构因荷载变化发生弹性或塑性变形时,涂层因柔韧性不足,无法随基材同步变形,会发生拉伸断裂,出现明显裂纹。(2) 人为碰撞、刮擦:在建筑施工后期装修、设备维护等过程中,人员走动、工具搬运等操作易对钢结构表面涂层造成碰撞、刮擦,破坏涂层完整性,形成局部破损区域,这些破损部位成为环境介质渗透的突破口,加速涂层整体失效,若未及时修补,破损范围会逐步扩大<sup>[2]</sup>。

### 2 钢结构建筑防火涂料耐久性提升策略

#### 2.1 材料配方优化

(1) 耐候性树脂改性:传统树脂易受紫外线、水分侵蚀,采用有机硅改性丙烯酸树脂、氟碳树脂等高性能树脂作为成膜基材,能显著优化涂层的分子结构—有机硅链段可形成致密的交联网络,增强涂层抗紫外线降解能力;氟碳树脂则凭借强化学键结合力,提升涂层耐水性及耐化学腐蚀性,使涂料在室外暴晒、潮湿环境下仍能保持结构完整,减少粉化、脱落现象。(2) 高效阻燃剂复配:传统阻燃剂存在效能单一、有毒气体释放大等问题,引入纳米氢氧化铝、纳米蒙脱土等纳米阻燃剂,其高比表面积可均匀分散于涂料体系中,增强阻燃效率的同时减少用量;构建磷-氮协同阻燃体系,通过磷系阻燃剂促进炭化层形成、氮系阻燃剂释放惰性气体,二者协同作用不仅提升防火性能,还能大幅降低燃烧时有毒气体与烟雾的产生量,兼顾安全性与耐久性。(3) 功能性添加剂:在涂料中添加针对性功能助剂,可弥补涂层单一防护缺陷。添加钼系、锡系抑烟剂,能抑制燃烧过程中烟雾颗粒的生成;引入异噻唑啉酮类防霉剂,可防止潮湿环境下涂层表面霉菌滋生,避免结构被侵蚀;嵌入自修复微胶囊(如环氧树脂微胶囊),当涂层出现微裂纹时,微胶囊破裂释放修复剂,与基材发生化学反应填补裂纹,自主修复损伤,延长涂层整体使用寿命。

#### 2.2 施工工艺改进

(1) 标准化施工流程:制定全周期施工规范,明确各环节技术要求。在底漆处理阶段,严格执行喷砂除锈(达到Sa2.5级以上)、脱脂除油工序,保障基材表面洁净度;涂层施工时,根据涂料类型(如超薄型、薄型)设定分层涂刷厚度(如超薄型每层厚度控制在0.3-0.5mm),同时实时监测施工环境温湿度(宜在5-35℃、

相对湿度 $\leq 85\%$ ),避免低温、高湿环境影响涂层干燥固化;施工后设置养护周期,防止过早受力导致涂层破损。(2) 智能化喷涂设备:采用机器人喷涂替代传统人工操作,通过程序预设喷涂路径与参数,精准控制喷涂压力、速度与距离,确保涂层厚度均匀性误差控制在 $\pm 5\%$ 以内;设备搭载激光测厚传感器与高清摄像头,实时监测涂层厚度与表面平整度,一旦发现漏喷、鼓泡等缺陷,立即反馈并自动调整,减少返工率,提升施工质量稳定性。(3) 无损检测技术:施工后应用红外热成像技术,通过检测涂层表面温度分布差异,识别内部空鼓、分层等隐蔽缺陷;采用超声波检测,利用声波传播速度变化判断涂层与基材的结合强度,评估涂层完整性;定期开展无损检测,可早期发现涂层潜在问题,避免缺陷扩大引发失效<sup>[3]</sup>。

#### 2.3 环境适应性设计

(1) 分区防护策略:根据建筑不同区域的环境条件选择适配涂料,如室外露天区域、沿海高盐雾区域,选用耐候性强、抗盐雾的室外型超薄防火涂料或厚型无机防火涂料;室内干燥环境可选用常规薄型防火涂料;化工园区等腐蚀性环境,优先采用具有耐酸碱性能的特种防火涂料,通过针对性选择,使涂料性能与环境需求精准匹配。(2) 复合防护体系:单一涂料存在性能短板,构建多层复合防护体系可实现优势互补。例如,在钢结构表面先涂刷防锈底漆增强抗腐蚀能力,再涂覆防火涂料保障防火性能,最后罩涂耐候面漆提升抗紫外线、耐污染能力;对于重要承重构件,可结合防火板包裹或无机纤维喷涂,形成“涂料+板材/纤维”的复合防护,进一步提升耐久性与防火可靠性。(3) 定期维护机制:建立涂层全生命周期监测与维护制度,根据环境恶劣程度设定维护周期(如沿海地区每1-2年一次,内陆干燥地区每3-5年一次)。维护时通过外观检查(观察是否出现开裂、脱落)、厚度检测、附着力测试等方式评估涂层状态,对局部损伤区域及时清理并补涂涂料,对老化严重的涂层进行整体翻新,避免小缺陷发展为整体失效。

#### 2.4 标准与认证体系完善

(1) 耐久性测试方法:制定统一的加速老化试验标准,模拟实际使用中的恶劣环境,如盐雾试验(设定5%氯化钠溶液、35℃恒温条件,持续喷雾1000小时)、紫外线循环试验(交替进行紫外线照射与冷凝,累计1500小时)、温度循环试验(-30℃至70℃反复循环50次),通过标准化测试评估涂料在长期环境作用下的性能衰减规律,为耐久性评价提供科学依据。(2) 涂层厚度换算模型:针对实际钢构件与标准试件在形状、尺寸上的

差异，建立耐火极限关联公式。通过大量试验数据，分析构件截面尺寸、表面曲率、涂层厚度对耐火时间的影响，构建不同工况下实际构件涂层厚度与标准试件耐火极限的换算模型，确保实际工程中涂层厚度设计既满足防火要求，又避免过度施工造成浪费，同时保障耐久性<sup>[4]</sup>。

（3）第三方认证制度：推行防火涂料产品耐久性等级标识制度，由权威第三方机构依据加速老化试验、现场长期跟踪测试等结果，对涂料耐久性进行分级（如A级、B级、C级），并在产品包装与说明书中明确标注；建立严格的市场准入机制，对未通过耐久性认证、性能不达标的产品禁止流入市场，规范企业生产行为，引导行业向高质量、高耐久性方向发展。

### 3 钢结构建筑防火涂料案例分析与实践验证

#### 3.1 典型失效案例解析

（1）某高层钢结构建筑火灾中涂层脱落原因分析：该建筑建成8年后发生火灾，火灾后检查发现，外立面钢结构防火涂料大面积脱落，未脱落区域涂层也失去膨胀防火功能。经检测分析，失效主因包括两方面：一是材料老化，涂料采用的普通丙烯酸树脂长期受室外紫外线与雨水侵蚀，分子链断裂导致附着力下降，涂层已出现明显粉化；二是施工缺陷，施工时未彻底清除基材表面锈迹，且局部涂层厚度不均（最薄处仅0.8mm，未达设计要求的1.5mm），火灾高温作用下，薄弱区域涂层率先开裂，进而引发整体脱落，失去对钢结构的保护。（2）某工业厂房涂层快速粉化问题诊断：该厂房位于南方多雨地区，建成3年后，室内外钢结构防火涂料均出现严重粉化，用手触摸即脱落。检测发现，失效源于紫外线辐射与湿度侵蚀的协同作用：厂房未设置遮阳设施，室外涂层长期受强紫外线照射，树脂光氧化降解严重；同时，南方高湿度环境使水分持续渗透涂层，导致无机填料溶出，涂层结构松散，二者共同作用下，涂层粉化速度大幅加快，3年内即丧失防护功能。

#### 3.2 提升策略应用效果

（1）某桥梁工程采用改性树脂涂料后的耐久性对

比：该桥梁位于沿海地区，原采用普通防火涂料，2年后即出现盐雾腐蚀导致的涂层脱落。后改用有机硅改性丙烯酸树脂涂料，并配套纳米氢氧化铝阻燃体系，经5年跟踪监测，数据显示：涂层外观无粉化、脱落现象，附着力仍保持在0.6MPa以上（初始值0.7MPa），耐盐雾性能测试（1000小时）后，涂层完好率达95%，远优于原涂料（2年完好率仅60%），验证了改性树脂涂料在沿海高腐蚀环境中的优异耐久性。（2）某数据中心机房复合防护体系耐火极限提升实例：该数据中心对防火要求极高，原单一防火涂料耐火极限为1.5h，无法满足升级后的2.0h要求。后采用“超薄防火涂料+防火板”复合防护体系，涂料选用磷-氮协同阻燃型，防火板采用硅酸钙防火板（厚度15mm）。经消防检测，复合体系耐火极限提升至2.3h，远超设计要求；同时，复合体系的抗冲击性能也显著提升，模拟设备搬运碰撞后，涂层无开裂、防火板无破损，保障了数据中心长期运行的防火安全性。

#### 结束语

钢结构建筑防火涂料的失效机理涉及材料、环境、施工及使用等多环节，其耐久性不足已成为制约钢结构防火安全的关键问题。通过材料配方优化（如耐候树脂改性、纳米阻燃剂复配）、施工工艺改进（如智能化喷涂、无损检测）、复合防护体系设计及标准化认证体系的完善，可显著提升涂料的长期防护效能。未来需进一步结合全生命周期管理，推动技术创新与规范落地，为钢结构建筑提供更可靠、持久的防火保障。

#### 参考文献

- [1]毕佳成,王坤.建筑钢结构防火涂料的防火性能及发展趋势[J].新材料·新装饰,2024,6(6):34-36.
- [2]姜奕豪.浅谈防火涂料在钢结构中的应用与耐火性能分析[J].消防界,2023,9(11):66-67.
- [3]千海东.钢结构建筑防火涂料的性能优化与施工要点[J].建筑科学,2025,(08):92-93.
- [4]何雪云.钢结构建筑中防火涂料的监督方法探讨[J].中国设备工程,2023,(16):107-109.