

市售室内水性超薄膨胀型钢结构防火涂料性能研究

吴东霞, 樊利华, 陆 铭, 吴芸芳, 任婷婷, 尹建华
(自然资源部天津海水淡化与综合利用研究所, 天津 300192)

摘要: 分析测试了国内外 5 种室内水性超薄膨胀型钢结构防火涂料商品性能, 得出其防火性能对比, 结果表明: WFP-1 浆料细腻, 水分散性好, 耐火性能基本达到进口防火涂料 AFP 水平, 且价格不到进口防火涂料的 20%。WFP-2、WFP-3 基本不膨胀, 耐火性能较差。SFP 膨胀倍数低, 燃烧后碳层破裂脱落, 且 SFP 本身易燃, 防火初期起助燃作用。目前国内市场上防火涂料商品质量良莠不齐, 建议工程选用的防火涂料在涂装前应进行防火性能检测, 同时有关部门应健全防火涂料行业标准, 加大市场的监管力度, 提高钢结构建筑的防火安全性。

关键词: 钢结构; 防火涂料商品; 性能对比

中图分类号: TQ637 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-9548(2025)10-0008-04

Research on the Performance of Commercially Indoor Water-based Ultra-thin Intumescent Fireproof Coatings for Steel Structure

WU Dong-xia, FAN Li-hua, LU Ming, WU Yun-fang, REN Ting-ting, YIN Jian-hua

(The Institute of Seawater Desalination and Multipurpose Utilization, Ministry of Natural Resources, Tianjin 300192, China)

Abstract: By analyzing and testing the performance of five kinds of water-based fireproof coatings for indoor ultra-thin expanded steel structure, the comparison of their fire resistance performance is obtained. The results show that WFP-1 slurry is delicate and has good water dispersibility. The fire resistance is basically at the level of the imported AFP fireproof coatings, and its price is less than 20% of AFP. WFP-2 and WFP-3 coatings do not expand significantly and have poor fire resistance. The SFP has a low expansion ratio, and after combustion, the carbon layer breaks and falls off. Moreover, SFP is flammable and plays a role in assisting combustion during the initial stage of fire prevention. At present, the quality of fire-resistant coatings in the domestic market varies greatly. It is recommended that the fire-resistant coatings selected for engineering should undergo fire performance testing before painting. At the same time, relevant departments should improve the industry standards for fire-resistant coatings and increase market supervision, thus improving the fire safety of steel structure buildings.

Key words: steel structure; fireproof coating products; performance comparison

0 引言

随着我国经济、社会的发展, 高层钢结构建筑日趋

增多, 尤其是一些超高层建筑, 采用钢结构材料更为广泛。钢材本身具有质轻、不燃、抗震、抗弯等特性, 但钢材作为建筑材料在防火方面又存在一些难以避免的缺陷, 在火灾或高温环境下, 钢材的屈服强度、抗拉及弹性模量等力学性能随温度的升高而急剧下降。高层建筑一旦发生火灾事故, 火势在短时间内不能扑灭, 一般无任何防护的钢结构温度在 3 min 内可快速达到 300 °C 以上, 在火灾发生的 10 min 之内, 钢结构机械强度降至 30% 以下, 力学性能的下降导致建筑物的支撑能

收稿日期: 2025-03-26

基金项目: 科研院所基本科研业务费项目 Y-JBYWF-2022-T06、Y-JBYWF-2022-01、K-JBYWF-2021-T04、K-JBYWF-2023-T09, 国家自然科学基金 22105231。

作者简介: 吴东霞(1980—), 女, 博士, 高级工程师, 主要从事水性防火涂料研发工作。E-mail: 237257396@qq.com。

力降低,进而造成建筑物坍塌,对人身安全和财产造成严重的损失。在钢结构表面涂刷防火涂料可有效降低钢结构表面温度,解决钢构件高温环境下力学性能快速下降的问题,延长钢结构的支撑时间,增加逃生时间并减少财产损失。超薄膨胀型钢结构防火涂料在常温下为普通薄膜,而在高温作用下涂层可膨胀几倍甚至几十倍,形成不易燃的海绵状物质层,起到阻隔外部热源的作用,具有用量少、装饰性强、施工便利等优点,近年来备受市场青睐^[1-7]。

室内超薄膨胀型钢结构防火涂料分为水性和溶剂型,随着国家对环境污染的日益重视,挥发性有机物(VOC)含量很高的溶剂型涂料使用受到越来越严格的控制。水性超薄膨胀型钢结构防火涂料^[8-11]由水、多种无机物、助剂及水性黏合剂组成,相较于溶剂型超薄膨胀型钢结构防火涂料,水性超薄膨胀型钢结构防火涂料能大量减少涂料在生产、施工及阻燃过程中使用的有机溶剂对人体的危害和对环境的污染。张文喜等^[12]通过钢结构防火涂料烟气毒性分析研究发现,一些溶剂型钢结构防火涂料在火灾中自身存在起燃风险,水性钢结构防火涂料的烟气毒性明显小于溶剂型钢结构防火涂料。因此,水性超薄膨胀型钢结构防火涂料也成为了近年来的研究热点。

国内学者在水性超薄膨胀型钢结构防火涂料研发方面做了大量研究工作。杨鑫等^[13]发现在防火涂料中加入硅酸铝能够增加炭层致密性和稳定性,但对涂层膨胀有一定抑制影响,当硅酸铝的加入量为20%时,膨胀层孔隙大小和致密度最好,耐火性能最佳。秦汝祥等^[14]以水性环氧乳液和固化剂作为基料,加入可膨胀石墨、粉煤灰漂珠与纳米TiO₂等,制备的膨胀型钢结构防火涂料具有良好的隔热性能,最佳涂覆厚度为1.9 mm,耐火时间为107 min。要如磊等^[15]制备的水性聚脲基膨胀型钢结构防火涂料,当水性聚脲添加量为20%、钛白粉添加量为16%、陶瓷纤维添加量为1.0%时,制备得到的膨胀型钢结构防火涂料耐火性能最佳。李严等^[16]在水性防火涂料中加入质量比为1:1的增强隔热材料高铝纤维和高硅氧纤维,制备的防火涂料耐火时间最长为1.65 h。其中高铝纤维可以有效延长耐火时间,高硅氧纤维可以有效防止炭层出现裂纹。

目前防火涂料行业的龙头企业为国外的阿克苏诺贝尔公司,该公司水性膨胀型防火涂料产品市面上应用的主要为Interchar1120。国内市场上生产销售水性钢结构防火涂料的公司很多,有江苏冠军、安徽凤凰、河北智和、廊坊大浩等,每家公司销售的水性钢结构防火涂料品种单一、宣传资料大同小异,对黏结乳液的组成、膨胀体系等提及较少。国内防火涂料市场民企的市

场占有率约50%,且占有率呈上升趋势,民营企业产品正在逐步进军外资企业所垄断的高端市场。

综上,在查阅水性超薄膨胀型钢结构防火涂料研究资料时,未见对国内市场上销售的防火涂料产品性能进行系统对比分析的相关研究。本文主要以市售的3种室内水性超薄膨胀型钢结构防火涂料和1种溶剂型室内超薄膨胀型钢结构防火涂料为研究对象,对比分析不同厂家销售的防火涂料的状态、性能及价格等,并与进口的水性室内超薄膨胀型钢结构防火涂料进行性能对比,为实际工程应用筛选防火涂料提供理论分析和数据支撑。

1 试验部分

1.1 主要原料

室内水性超薄膨胀型钢结构防火涂料:牌号分别为WFP-1、WFP-2、WFP-3,选自国内3家知名企业;溶剂型室内超薄膨胀型钢结构防火涂料,牌号为SFP,商用在售。进口室内水性超薄膨胀型钢结构防火涂料:牌号为AFP,阿克苏诺贝尔Interchar 1120,阿克苏诺贝尔防火涂料(苏州)有限公司。以上产品均具备GB 14907《钢结构防火涂料》要求的检测报告。

1.2 主要仪器

粒径采用Particulate Systems公司的纳米粒度仪NanoPlus测量。涂层厚度采用ElektroPhysik公司的Mikrotest磁性测厚仪测量。自制涂层耐火性能测试装置中,利用IKA的ETS-D5型热电偶测量涂层试件背火面温度。

1.3 试验过程

1.3.1 基材预处理

试件基材Q235钢材,试件尺寸150 mm×70 mm×5 mm,喷砂处理粗糙度Ra为28 μm,分别用乙醇和丙酮清洁试件表面;马口铁标准试件120 mm×50 mm×0.28 mm,用80目砂纸对马口铁试件进行打磨处理,使用乙醇擦拭马口铁表面。

1.3.2 耐火性能测试

耐火性能测试通过自制耐火装置评价,见图1。将试件涂料层置于酒精喷灯正上方,二者之间距离为6 cm,热电偶放在试件背面,利用酒精喷灯燃烧模拟火场温度,热电偶测量试件背火面温度,记录试件背火面温度随时间的变化。每种防火涂料耐火性能测试试验为90 min,每30 s记录一次温度数据,以试件背面温度、膨胀层厚度、炭层表面形貌等参数评价涂料的耐火性能,温度越低、膨胀层越厚、炭层越致密完整代表防火涂料的耐火性能越好。

1.3.3 涂层制备

将4种国产防火涂料WFP-1、WFP-2、WFP-3、

SFP 搅拌均匀,静置 15~30 min,消除涂料搅拌分散过程中产生的气泡。进口防火涂料 AFP 固含量高、黏稠,直接涂刷涂层表面不平整,需加入约 15%的水稀释。搅拌均匀后的涂料用羊毛刷刷涂在经过预处理的试件上,由于涂料生产厂家不一,单次涂刷干膜厚度差异较大,每 24 h 涂刷一次并测量涂层厚度,使用测厚仪控制防火涂料涂层的平均干膜厚度约为 1 mm,室温放置养护 7 d 后进行耐火性能测试。

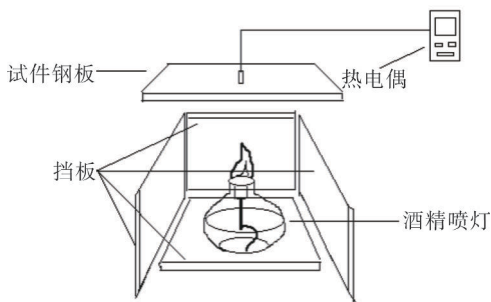


图 1 防火涂料耐火性能试验装置

2 结果与讨论

2.1 防火涂料商品价格对比

4 种国产室内超薄膨胀型钢结构防火涂料 WFP-1、WFP-2、WFP-3、SFP 的售价在 16~28 元/kg,阿克苏诺贝尔公司生产的防火涂料 AFP 售价在 100~120 元/kg,从售价上可见国产室内超薄膨胀型钢结构防火涂料单价约为进口防火涂料 20%,价格优势明显。

2.2 防火涂料商品稳定性

将固含量及粒径不同的防火涂料商品倒入烧杯中,观察并记录防火涂料放置时间析出液体量占总体积的百分比,结果见表 1。

表 1 5 种防火涂料的固含量、粒径及析出液体体积百分比

| 项目 | WFP-1 | WFP-2 | WFP-3 | SFP | AFP |
|----------|----------|-------|---------|-------|-------|
| 固含量/% | 54.55 | 25.75 | 57.69 | 64.62 | 70.56 |
| 粒径/nm | 16 343.1 | 294.6 | 2 841.4 | | 469.2 |
| 析出液体体积/% | 放置 2 d | 5 | 60 | 7 | 0 |
| | 放置 4 d | 12 | 70 | 10 | 0 |
| | 放置 8 d | 13 | 72 | 10 | 0 |
| | 放置 10 d | 15 | 75 | 12 | 0 |

由表 1 可知,防火涂料的固含量、粒径与析出液体体积所占百分比直接相关。3 种水性防火涂料 WFP-1、WFP-2、WFP-3 搅拌均匀后,放置初期析出液体量较多,继续放置析出液体量增加不明显,固含量越高析出液体量越少。其中 WFP-2 的固含量只有 25.75%,质地稀薄,放置 2 d 析出水量占总体积的 60%,放置 10 d

析出水量占总体积的 75%,析出水的体积明显大于固体相,分层严重;WFP-1 的固含量为 54.55%,WFP-3 为 57.69%,放置 10 d 析出水量占总体积百分比分别为 15%和 12%,固含量略高的 WFP-3 析出水量相对较少;但从表 1 同样可以发现,WFP-1 放置 2 d 析出水量占总体积百分比为 5%,低于 WFP-3 析出水量体积百分比 7%约 2 个百分点,分析原因应该是由 WFP-1 细腻粒径小分散性好,而 WFP-3 质地粗糙呈颗粒状态有关。WFP-3 粒径测量结果与涂料的表观状态明显不一致,这是由于在粒径检测过程中,需要用水将涂料稀释至一定浓度再测量,稀释后的涂料 WFP-3 中大颗粒快速沉降,导致检测结果明显低于实际值。

溶剂型防火涂料 SFP 固含量高(64.62%),溶剂分散性强,放置 10 d 后性状没有明显变化;进口水性防火涂料 AFP 呈膏状固体,没有流动性,固含量为 70.56%,粒径最小,放置 10 d 没有液体析出。

2.3 涂层干膜厚度及状态

按照进口防火涂料 AFP 涂装要求,将 AFP 搅拌均匀,直接刷涂在试件上,涂刷过程发现由于固含量高、黏稠,直接涂刷涂层表面不平整,干膜表面布满裂缝,因此涂刷 AFP 时需加入约 15%的水稀释。除 AFP 需要稀释涂刷外,其他 4 种国产防火涂料都是搅拌均匀后直接涂刷在 Q235 钢材试件表面,水平置于试验台上,每 24 h 涂刷一次并测量涂层厚度,防火涂料涂层干膜厚度与时间的关系见图 2。

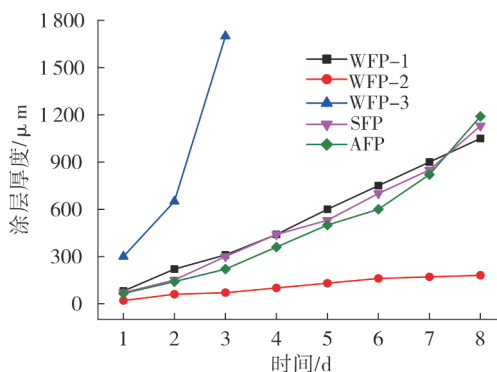


图 2 防火涂料涂层干膜厚度与时间的关系

从图 2 可以看出,防火涂料 WFP-1、SFP、AFP 的涂层干膜厚度与涂刷时间的关系趋势基本一致,每次涂刷厚度控制在 80~150 μm 范围内,涂刷 8 d 涂层厚度在 1.0~1.2 mm。WFP-2 固含量最低,含水量大,每次涂刷厚度为 20~40 μm,涂刷 8 d 后涂层干膜平均厚度仅为 180 μm,且涂刷 WFP-2 的 Q235 钢材试件表面出现大量锈斑,考虑是没添加防闪锈剂或是防闪锈剂不合适导致。WFP-3 质地粗糙,呈颗粒状态,涂刷 3 次

涂层干膜厚度就达 1.7 mm。

防火涂料涂刷在马口铁试件表面，每次涂刷后的马口铁试片均悬挂放置于架子上，涂刷 8 次后的涂层干膜外观对比见图 3。

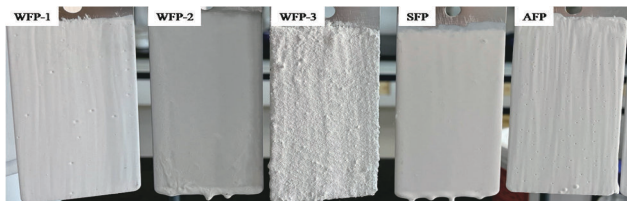


图 3 涂刷在马口铁表面涂层干膜外观对比

从图 3 可以看出，涂刷防火涂料 WFP-1 和 AFP 的涂层细腻均匀，表面有起泡破裂后留下的坑，没有流挂现象；WFP-2 和 SFP 涂料成膜效果更好，干膜表层均匀无坑，但由于涂料本身较稀薄，涂层干膜出现严重的流挂现象，且 SFP 是溶剂型防火涂料，有刺激性气味；涂刷 WFP-3 的涂层表面粗糙，颗粒感明显。

2.4 耐火性能对比分析

使用自制耐火试验装置考察防火涂料的耐火性能，分别记录涂层试件的背火面温度、碳层膨胀高度、膨胀倍数、碳层完整性等数据，结果见表 2 及图 4~5 所示。

表 2 防火涂料涂层的耐火性能

| 项目 | WFP-1 | WFP-2 | WFP-3 | SFP | AFP |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 平均干膜厚度/mm | 1.11 | 0.155 | 1.09 | 1.01 | 1.19 |
| 开始膨胀时间/min | 1.5 | 0.5 | 1.5 | 1.5 | 3.5 |
| 开始膨胀温度/℃ | 163.9 | 173.2 | 174.9 | 149.8 | 150.4 |
| 最高温度/℃ | 181.6 | 225.3 | 229.6 | 234.6 | 192.4 |
| 温度转折时间/min | 3.5 | 3.0 | 5.0 | 4.0 | 8.5 |
| 结束膨胀温度/℃ | 161.2 | 214.8 | 242.1 | 200.3 | 189.0 |
| 碳层膨胀高度/cm | 1.57 | 0.16 | 1.0 | 0.6 | 2.46 |
| 膨胀倍数/倍 | 14.1 | 1.0 | 0.9 | 5.9 | 20.7 |

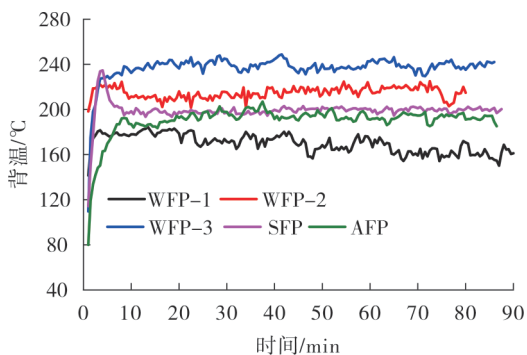


图 4 防火涂料涂层试件背火面的温度曲线

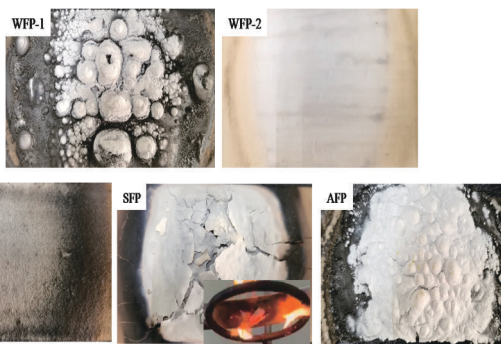


图 5 防火涂料涂层灼烧后残碳照片

从图 4 可以看出，涂覆防火涂料的试件背火面温度随灼烧时间的增加迅速升高，4 种国产防火涂料试件在灼烧 5 min 内背火面温度急剧上升至拐点达到最大值，进口防火涂料 AFP 灼烧温度达到拐点最大值的时间延长至 8 min，几种防火涂料的试件灼烧均在达到温度最高点后略有降低，然后逐渐趋于平稳。5 种防火涂料试件灼烧的背火面温度控制在 180~240 ℃之间，温度排序为 WFP-1<AFP<SFP<WFP-2<WFP-3，防火涂料 WFP-1 涂层的燃烧温度最低，平均温度控制在 180 ℃以下，进口防火涂料 AFP 涂层平均温度控制在 190 ℃以内，WFP-3 的燃烧温度最高，温度集中在 240 ℃左右。

从图 5 可以看出，防火涂料 WFP-1 与 AFP 经耐火试验后，碳层表面完整致密未脱落，WFP-1 碳层的膨胀倍数为 14.1 倍，相对进口防火涂料 AFP 膨胀 20.7 倍略低；WFP-2 和 WFP-3 基本不膨胀；溶剂型防火涂料 SFP 耐火试验中释放刺鼻气味，灼烧初期出现明火自燃现象，自燃约 4 min 后明火消失，膨胀倍数较低，耐火温度居中，膨胀碳层虽未完全脱离基材，但部分碳层破裂脱落。SFP 涂层灼烧出现明火现象，可能是由于涂料中添加了助燃物质所导致，作为防火涂料产品在燃烧过程中出现明火非常不利于防火及人员逃生。水性防火涂料相对更安全环保且性能优异，其中 WFP-1 耐火性能基本达到进口防火涂料 AFP 的水平，售价仅为进口防火涂料的 20%，市场竞争优势明显。

3 结语

通过几种防火涂料性能对比可以发现，国内水性防火涂料产品质量参差不齐，有与进口防火涂料 AFP 相媲美的 WFP-1，也有耐火性能较差的 WFP-2、WFP-3。在工程实际应用中，应根据实际需要选用水性或溶剂型防火涂料，且应在涂装前进行耐火性能实测，同时有关部门应健全防火涂料行业标准，加大市场的监管力度，提高钢结构建筑的防火安全性。

(下转第 16 页)