

无机填料在膨胀型钢结构防火涂料中的应用研究

曾慧崇, 李华明, 王乃迪, 强富彬, 王 钢
(西北永新涂料有限公司, 兰州 730030)

摘要: 膨胀型防火涂料应用在钢结构上存在火灾时发泡层强度不够及与基材附着力差易松散脱落的问题, 影响防火涂料的耐火极限, 导致防火涂料对钢结构防火保护作用下降。本文在膨胀型防火涂料中分别添加高岭土、陶瓷微粉和硼酸锌 3 种无机填料, 考察其对防火涂料耐火时间、膨胀倍数、炭层强度及附着力的影响。结果表明: 添加 2% 高岭土、1% 陶瓷微粉和 1% 硼酸锌制备的膨胀型防火涂料综合性能最佳, 可使涂层保持完整的炭层, 避免防火涂料在实际火场中开裂脱落, 耐火性能可达 70 min。

关键词: 钢结构防火涂料; 膨胀型; 炭层强度; 无机填料

中图分类号: TQ637.8 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-9548(2025)09-0014-05

Research on the Application of Inorganic Filler in Intumescent Steel Structure Fireproof Coating

ZENG Hui-chong, LI Hua-ming, WANG Nai-di, QIANG Fu-bin, WANG Gang
(Northwest Yongxin Coatings Co., Ltd., Lanzhou 730030, China)

Abstract: Intumescent fireproof coating applied on steel structure has the problems of insufficient strength of foam layer and poor adhesion to substrate and easy to loose off, which affects the fire-resistance limit of fireproof coating and leads to the decrease of fireproof coating's fire protection effect on steel structure. In this paper, kaolin, ceramic powder and zinc borate were added to the intumescent fire retardant coating, respectively, and the effects of the three inorganic fillers on the fire resistance time, the expansion ratio, the strength and adhesion of the carbon layer were investigated. The results show that the intumescent fire-retardant coating prepared by adding 2% kaolin, 1% ceramic powder and 1% zinc borate has the best comprehensive properties. It can make the coating keep intact carbon layer and prevent the fire retardant coating from cracking and falling off in the actual fire scene, and the fire resistance performance can reach 70 minutes.

Key words: steel structure fireproof coating; intumescent; carbon layer strength; inorganic filler

0 引言

膨胀型防火涂层遇火或在热辐射作用下, 会发生膨胀与炭化, 产生比原涂层厚几倍甚至几十倍的膨胀

隔热炭层^[1]。相关数据表明, 这类膨胀炭层的导热系数通常接近于气体, 约为 $2.326 \times 10^{-5} \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, 较低的导热系数可有效阻止外部火焰对基材的热传导。因此膨胀型防火涂料用于钢结构建筑可提高构件的耐火性能, 防止火灾下钢结构建筑短时间坍塌^[2-3]。然而耐火性能除了与涂刷防火涂料厚度、膨胀倍数有关外, 与膨胀炭层是否脱落开裂也有至关重要的关系, 当膨胀炭层附着力及强度不足受火场的风力或者火焰冲击作用, 炭层开裂脱落后火场温度迅速传导至钢结构基材, 造成构件的耐火性能不足, 严重时造成建筑物坍塌。因

收稿日期: 2025-07-03

基金项目: 国有资本经营预算支持省属企业科研项目 2023GZ014; 甘肃省青年人才个人项目 2025QNGR35。

作者简介: 曾慧崇(1988—), 女, 硕士, 高级工程师, 主要从事特种功能涂料及新材料的研发与应用工作。E-mail: 690569133@qq.com。

此研究膨胀型防火涂料膨胀炭层的强度及与基材的附着力具有重要的现实意义。

无机填料作为涂料的组成部分,它能改善涂料的理化性能,如赋予涂膜遮盖力、提高涂膜的物理机械强度等。相关研究表明,防火涂料中无机填料的用量越大,涂层的膨胀高度越小、炭层孔隙增大,但炭层的强度会有所提升,而少量的无机填料能使涂层在防火的中后期保持完整的炭层,持续发挥防火阻燃功能^[4-5]。本文选用硼酸锌、高岭土、陶瓷微粉作为无机填料,考察其对膨胀型钢结构防火涂料耐火时间、膨胀倍数、炭层强度与附着力的影响,并确定了防火涂料中填料的最佳用量。

1 试验部分

1.1 主要原料

丙烯酸树脂,自制;复合阻燃剂(多聚磷酸铵(聚合度 $n>1000$)、季戊四醇、三聚氰胺);钛白粉;高岭土;陶瓷微粉;硼酸锌,以上原料均为工业级。助剂:毕克化工股份有限公司。

1.2 试验仪器

砂磨分散搅拌多用机(SFJ-400),上海现代环境工程技术股份有限公司;涂层测厚仪(QNIX4500),德国 QNix 公司;耐火性能在线测试炉(KJ-XB14),洛阳科炬炉业有限公司;精密电子天平,常熟双杰测试仪器厂;刻度尺,巨星钢盾工具有限公司;天平砝码,常州艾克瑞特衡器有限公司;不锈钢刮板细度计,标格达精密仪器有限公司。

1.3 涂料配方及工艺

膨胀型防火涂料参考配方如表 1 所列。防火涂料的制备工艺为:将丙烯酸树脂加入配料罐中,在搅拌状态下依次加入分散剂、消泡剂、防沉剂,搅拌 10~15 min,依次加入添加型复合阻燃剂、钛白粉和无机填料继续搅拌均匀后转入研磨罐中,研磨至细度 $\leq 80 \mu\text{m}$,用二甲苯调整涂料黏度至 95~100 KU,即得膨胀型钢结构防火涂料。

表 1 膨胀型防火涂料参考配方

原材料	质量分数/%
丙烯酸树脂	20~32
分散剂	0.2~0.4
消泡剂	0.2~0.4
防沉剂	0.3~0.5
复合阻燃剂	25~38
钛白粉	8~12
无机填料	1~4
二甲苯	15~25

1.4 样板制备

样板的制备按照 GB 14907—2018《钢结构防火涂料》^[6]6.3 理化性能制样要求制作,采用 Q235 钢材作为试件基材,打磨处理后涂刷涂料,防火涂料采用分道涂刷,待前道涂层表干后再刷涂下一道(至少 4 h),涂层厚度按标准(2.0±0.2) mm 进行制样,制备好的样板在(23±2) °C 的环境下养护 14 d 后进行防火性能测试,防火测试后的样板做膨胀倍数、炭层强度及附着力等级评价,每个试样刷涂 3 个样片。

1.5 防火性能检测

观察记录涂有防火涂料样板钢板背面的升温状况可有效检测涂料的防火性能。本文按照钢结构防火涂料隔热效率试验方法测试涂料的防火性能,防火性能检测装置是模拟 GB 14907—2018 附录 A 隔热效率试验方法定制设计的一款钢结构防火涂料耐火性能在线测试炉,炉内的温度控制满足 GB/T 9978.1—2008^[7]中的相关规定,以测试钢板平均背温达到 500 °C 的时间为涂层的耐火时间,耐火时间越长防火性能越好。

1.6 膨胀倍数测试

选用刻度尺测量防火性能检测后样板上膨胀炭层的高度,膨胀炭层高度除以测试前涂层的干膜厚度即为膨胀倍数^[8]。

1.7 膨胀炭层强度及附着力测试

以不同质量的砝码评定炭层承重能力,以承重能力高低评定炭层强度。具体操作:在防火性能检测后样板的膨胀炭层上放置不同质量的砝码,当炭层不变形、表面不产生凹陷,此时砝码的质量记为炭层强度,例如炭层承受 50 g 砝码时炭层不变形、表面不产生凹陷记为测试样品的炭层强度为 W_{50} 。

附着力测试以 0.2 mm 的马口铁板垂直切割膨胀炭层至基材,炭层不散、成型且剩余的炭层不与基材脱离视为附着力较好,记为 A 级。附着力性能分为 A、B、C、D 四个等级,具体的划分标准如表 2 所列。

表 2 附着力等级

等级	切割后炭层形态结构
A	炭层不散、成型,剩余炭层不与基材脱离,附着完好
B	炭层不散、成型,剩余炭层与基材轻微分离
C	炭层松散、成型,剩余炭层与基材有明显的脱离
D	炭层松散、不成型,剩余的炭层与基材完全脱离

2 结果与讨论

2.1 无机填料及其含量对防火涂料防火性能的影响

无机填料的元素组成、形貌结构以及物理性质各有差异,因而在防火涂料中发挥的作用不同。高岭土主

要成分是高岭石,晶体化学式为 $2\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$,其富含的 1:1 型层状小单元结构使其具有极强的耐高温、易分散的优点。陶瓷微粉是一种轻质非金属材料,主要成分是 SiO_2 ,且廉价易得,其具有化学稳定性好、耐热温度高、烧失量低等特性。因高岭土和陶瓷微粉的高温稳定性使其在防火涂料领域具有可应用性。硼酸锌是一种环保型的无卤阻燃剂,无毒、低水溶性,作为

无机阻燃剂在燃烧过程中可形成玻璃态无机硼酸盐覆盖层,进而隔绝氧气和热量抑制燃烧,同时在燃烧过程中硼酸锌分子中的结晶水失水吸热可降低体系的温度,减缓燃烧速度^[9]。

因此优选以上 3 种无机填料,按照表 1 的参考配方分别添加 3 种无机填料,制备膨胀型防火涂料并检测防火性能,结果如图 1 所示。

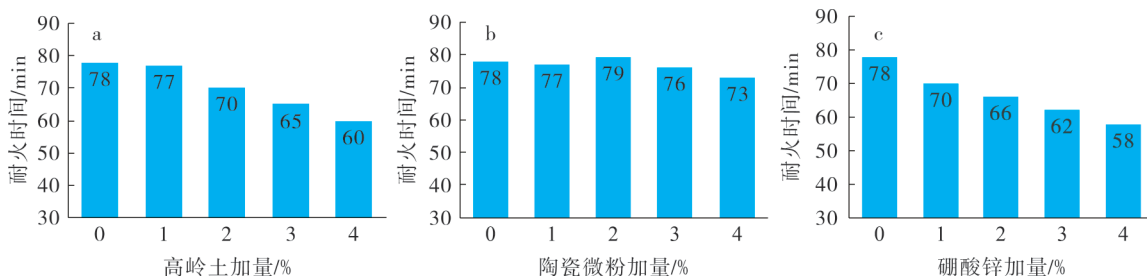


图 1 无机填料及其含量对防火性能的影响

由图 1 可以看出,3 种无机填料的加入对防火涂料防火性能均有影响,其中陶瓷微粉添加量 1%~4%对防火性能影响最小;其次是高岭土,在添加量大于 2%后耐火时间下降明显;对防火性能影响最大的是硼酸锌,当添加 1%时耐火时间下降 10%。

2.2 无机填料及其含量对防火涂料膨胀倍数的影响

根据热传导公式^[3]可知:传热距离 L 对传导热量 Q 的影响是非常显著的,而防火涂料在炭化膨胀后,炭层的厚度将是原涂层的几倍甚至几十倍,即形成了不同的传热距离 L ,相当于炭层膨胀倍数越大传导的热量越小。因此进一步对防火性能测试后样板上炭层膨胀倍数进行测试分析,以标准刻度尺测量样板的膨胀炭层高度,膨胀炭层高度除以测试前涂层的干膜厚度即为膨胀倍数。结果如图 2 所示。

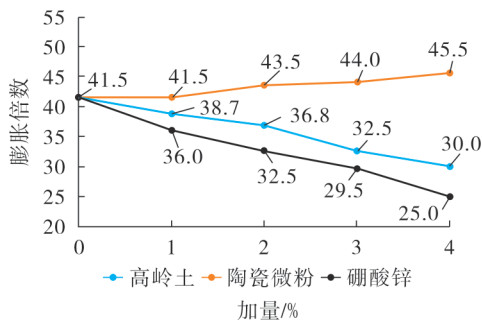


图 2 无机填料及其含量对膨胀倍数的影响

从图 2 中可以看出,陶瓷微粉对防火涂料膨胀发泡性具有有益的影响,添加量从 1%增加到 4%时,炭层膨胀倍数从 41.5 增大到 45.5 倍,但对防火性能即耐火时间的正向影响不显著(图 1b),而高岭土和硼酸锌对防火涂料膨胀发泡性均有负向影响,同时也从耐火

时间的数据可以得到印证(图 1a、c),即高岭土的添加量大于 2%后,膨胀倍数下降大于 10%,耐火时间下降 10%;硼酸锌的添加量为 1%时,膨胀倍数下降 13.3%,耐火时间下降 10%,含量增大到 4%时,耐火时间显著下降,从 78 min 下降至 58 min。

2.3 无机填料及其含量对膨胀炭层强度及附着力的影响

进一步对防火性能测试后膨胀炭层强度及附着力进行测试分析,在膨胀炭层上放置不同质量的砝码,记录炭层不变形、表面不产生凹陷时砝码的质量,测试数据如表 3 所列。炭层强度测试完后以薄的马口铁板垂直切割膨胀炭层至基材,按照表 2 中炭层形态结构对应确定附着力等级,A 级炭层附着力最优,D 级最差即脱落或开裂,3 种无机填料对炭层附着力的影响结果如表 4 所列,不同附着力等级数码照片如图 3 所示。

表 3 无机填料及其含量对炭层强度的影响

无机填料	添加量/%				
	0	1	2	3	4
高岭土	W_{20}	W_{20}	W_{100}	W_{100}	W_{200}
陶瓷微粉	W_{20}	W_{20}	W_{50}	W_{50}	W_{50}
硼酸锌	W_{20}	W_{50}	W_{100}	W_{200}	W_{200}

由表 3 可以看出,无机填料高岭土和硼酸锌对防火涂料膨胀炭层的强度具有显著的增强作用,添加量为 2%时炭层强度即可提高 5 倍,从可承重 20 g 提高到 100 g 炭层不变形不凹陷,而陶瓷微粉对炭层强度的提升不明显,添加量大于 2%以后炭层强度不再提升,最大强度为 50 g。进一步结合表 4 无机填料的含量对炭层附着力的影响,垂直切割膨胀炭层至基材后

清除切割下的部分,观察留在基材上剩余部分炭层形态结构并对应确定附着等级。

表 4 无机填料及其含量对炭层附着力的影响

无机填料	添加量/%				
	0	1	2	3	4
高岭土	C	C	B	B	A
陶瓷微粉	C	C	C	C	D
硼酸锌	C	A	A	A	A

由表 4 可知,硼酸锌对炭层附着力具有显著的提升,当硼酸锌添加量为 1%时,炭层附着力由原来的 C 级提高到 A 级,即剩余在基材上的炭层与基材紧密结合无裂缝及空洞,如图 3a 所示。其次,随着无机填料高岭土含量的增加,炭层附着力逐渐增强,当添加量为 4%时,附着力也可达到 A 级。而无机填料陶瓷微粉的加入对炭层附着力具有负向影响,影响炭层成型性,当添加量 4%时,附着力下降至 D 级,剩余的炭层与基材完全脱离且炭层蓬松、不成型,如图 3d 所示。

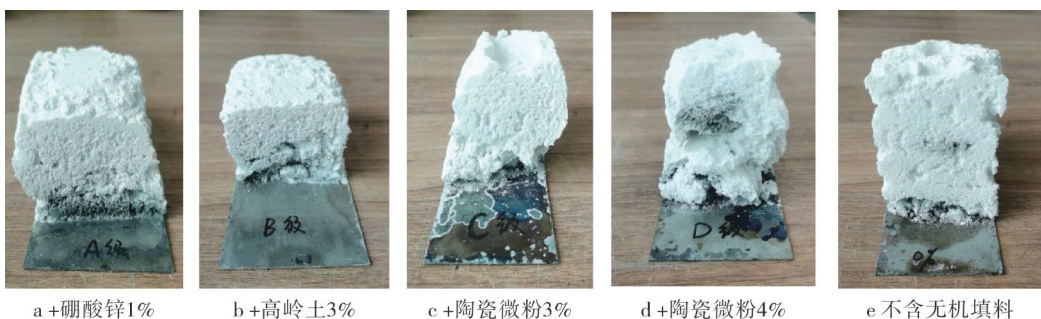


图 3 炭层不同附着力等级数码照片

综合分析 3 种无机填料对防火涂料耐火时间、炭层强度及附着力影响可以得出:1)硼酸锌对炭层强度和附着力具有显著的提升作用,但添加后耐火时间明显下降。可能由于体系中无机有机阻燃体系不匹配,不能各自发挥优势作用。硼酸锌在高温熔融后形成玻璃态无机硼酸盐覆盖在炭层表面,虽有隔绝氧气和热量的作用但也同时抑制了有机阻燃剂的膨胀发泡性,同时也阻止了部分膨胀阻燃体系生成的惰性气体的外散,形成了部分大气泡,炭层状态由致密细小孔隙逐渐变到疏松的大孔隙,炭层致密性下降孔隙增大,耐火时间较短,如图 3a 所示。2)高岭土对炭层强度和附着力同样具有一定的提升作用,同时对耐火时间具有一定影响。观察对比膨胀炭层的形貌图 3b、e 分析,未添加高岭土时炭层状态蓬松孔隙致密、强度差容易从基材上掉落,添加适量的高岭土后炭层紧实强度增加,但孔隙致密性下降。主要是因为高岭土高温时生成的无定型硅酸铝填充在膨胀炭层中,提升了炭层的隔热能力与强度,但无定型硅酸铝的填充一定程度上影响着阻燃体系脱水成炭、膨胀发泡的通道,进而影响炭层孔隙均匀度,造成耐火时间下降。3)陶瓷微粉对耐火性能的影响较小,对炭层强度和附着力无明显增强作用,同时添加 4%以后会影响炭层的成型性,造成松散蓬松的炭层形态易脱落。因此可考虑作为体质填料适当添加以提高防火涂料的体积固含,提升涂装效率,降低综合成本。

2.4 优选混合填料制备膨胀型防火涂料及性能测试

由上述试验结果可知,适量添加无机填料可避免防火涂料在实际火场中炭层开裂脱落的情况。结合上述耐火时间、炭层强度和附着力测试结果,优选 2%高岭土、1%陶瓷微粉和 1%硼酸锌为无机增强填料制备膨胀型钢结构防火涂料,对该样品进行性能检测,结果如图 4~5 所示。

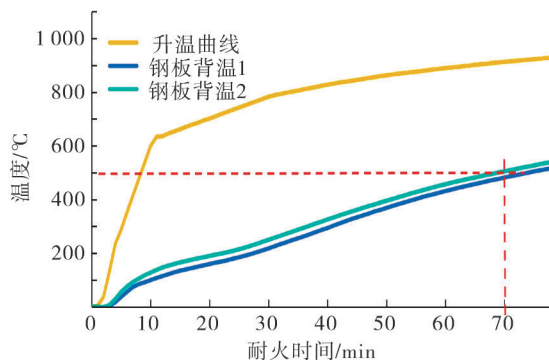


图 4 膨胀型防火涂料耐火时间曲线



图 5 炭层强度、附着力等级照片

从上述耐火时间曲线、炭层强度及附着力测试结果可以得出,通过无机填料及其用量优选,以 2%高岭土、1%陶瓷微粉和 1%硼酸锌为增强填料制备的膨胀型钢结构防火涂料具有最佳的综合性能。在标准升温测试条件下,钢板平均背温达到 500 °C 的时间间隔为 70 min,即耐火时间为 70 min。经过耐火性能测试后炭层可承受 200 g 质量不变形且与基材附着力良好,炭层无开裂脱落现象。

3 结语

本文研究了硼酸锌、高岭土、陶瓷微粉 3 种无机填料对膨胀型钢结构防火涂料的性能影响,结果表明上述无机填料是一类添加量小但能增强膨胀型防火涂料综合性能的功能填料,能使涂层保持完整的炭层,持续发挥防火阻燃功能,避免防火涂料在实际火场中炭层开裂脱落的情况。其中高岭土和硼酸锌对膨胀炭层强度和附着力具有显著提升作用,陶瓷微粉有助于涂层膨胀发泡性且对耐火时间影响微小,可作为体质填料适当添加,提高防火涂料的体积固含,提升涂装效率,降低综合成本,以 2%高岭土、1%陶瓷微粉和 1%硼酸锌为增强填料制备的膨胀型钢结构防火涂料,耐火性能达 70 min,且具有最佳的综合性能。

参考文献:

[1] 李昭.膨胀型防火涂料的防火机理研究[J].涂料工业,2015,45(11):8-11.
 [2] 刘庆恩.钢结构防火涂料的研究现状、存在问题和发展前景[J].有色矿冶,2006,22(8):50-53.
 [3] PURI R G, KHANNA A S.Intumescent coatings:a review on recent progress[J].Journal of Coatings Technology and Research, 2017(14):1-20.
 [4] 陈中华,李崇裔.水性超薄型钢结构防火涂料的研制与性能研究[J].涂料工业,2011,41(4):26-30.
 [5] 罗荡荡,马腾飞,梁光明.颜填料在膨胀型钢结构防火涂料中的应用研究[J].涂料工业,2018,48(8):67-71.
 [6] GB 14907—2018 钢结构防火涂料[S].
 [7] GB/T 9978.1—2008 建筑构件耐火试验方法 第 1 部分:通用要求[S].
 [8] 王清海,王秀娟,方健君,等.钢结构用水性膨胀型防火涂料的制备及性能研究[J].涂料工业,2022,52(2):42-48.
 [9] JAKUB LOPINSKI, BEATA SCHMIDT, YONGPING BAI, et al.Effect of the B: Zn: H₂O molar ratio on the properties of poly(vinyl acetate) and zinc borate-based intumescent coating materials exposed to a quasi-real cellulosic fire [J].Polymers, 2020,12(11):2542. ◆

(上接第 13 页)

[13] YOON H J, ZHOU Z. Carbon dioxide gas sensor using a graphene sheet [J].Sensors and Actuators B: Chemicals,2011,157(1):310-313.
 [14] ZHU S, ZHANG C. Graphene based piezoresistive pressure sensor [J].Applied Physics Letters,2013,102(16):1619041-1619043.
 [15] BIANCO A. Graphene:safe or toxic? The two faces of the medal [J].Angewandte Chemie International Edition,2013,52(19):4986-4997.
 [16] NEZAKATI T, COUSINS B G, SEIFALIAN A M. Toxicology of chemically modified graphene-based materials for medical application[J].Archives of Toxicology,2014,88(11):1987-2012.
 [17] SKODA M, DUDEK I, JAROSZ A, et al. Graphene:one material, Many possibilities-application difficulties in biological systems[J].Journal of Nanomaterials,2014:1-11.
 [18] WANG M, DUAN X, XU Y, et al. Functional three-dimensional graphene/polymer composites[J].ACS Nano,2016,10(8):7231-7247.
 [19] KAMARUDDIN N H, MARLINDA A R, SAID M, et al. Synergistic effects of rubber band infused graphene nanocompos-

ite on morphology, spectral and dynamic mechanical properties [J].Polymer Composites,2020,41(4):1475-1480.
 [20] GAO W, ZHAO N, YU T, et al. High-efficiency electromagnetic interference shielding realized in nacre-mimetic graphene/polymer composite with extremely low graphene loading [J].Carbon,2020,157:570-577.
 [21] VESNA MI KOVIC'-STANKOVIC, IVANA JEVREMOVIC', INHWA JUNG, et al. Electrochemical study of corrosion behavior of graphene coatings on copper and aluminum in a chloride solution[J].ScienceDirect,2014,75:335-344.
 [22] LIU Z Y, LI X G, CHENG Y F. Understand the occurrence of pitting corrosion of pipeline carbon steel under cathodic polarization[J].Electrochimica Acta,2012,60:259-263.
 [23] LIU Z Y, LI X G, DU C W, et al. Local additional potential model for effect of strain rate on SCC of pipeline steel in an acidic soil solution [J].Corrosion Science,2009,51(12):2860-2871.
 [24] LIU C, REVILLA R I, LIU Z, et al. Effect of inclusions modified by rare earth elements on localized marine corrosion in Q460NH weathering steel [J].Corrosion Science,2017,129:82-90. ◆