

现代钢结构建筑的防火设计与材料创新研究

刘志坚

江西同济建设项目管理股份有限公司, 江西 南昌 330000

摘 要： 针对现代钢结构建筑在火灾下耐火性能不足的问题，通过分析钢材在高温环境下的力学性能退化规律，提出了基于性能化的防火设计方法。研究开发了新型防火涂料配方及其制备工艺，创新性地将纳米材料引入防火涂料体系，显著提升了防火保护效果。试验结果表明，改性后的防火涂料在 1000℃ 高温下可延长钢结构承载力维持时间 40% 以上，涂层膨胀倍率提升 30%。通过工程实践验证，优化后的防火设计方案与创新材料的综合应用，为现代钢结构建筑的防火安全提供了可靠的技术支撑。

关 键 词： 钢结构建筑；防火设计；防火涂料；耐火性能；材料创新

Research on fire protection design and material innovation of modern steel structure buildings

Liu Zhijian

Jiangxi Tongji Construction Project Management Co., Ltd. Nanchang, Jiangxi 330000

Abstract： In order to solve the problem of insufficient fire resistance of modern steel structure buildings under fire, a performance-based fire protection design method is proposed by analyzing the degradation law of mechanical properties of steel in high temperature environment. A new type of fire-retardant coating formula and its preparation process have been researched and developed, and nanomaterials have been innovatively introduced into the fire-retardant coating system, which has significantly improved the fire protection effect. The test results show that the modified fireproof coating can prolong the bearing capacity of the steel structure by more than 40% at a high temperature of 1000 °C, and the expansion rate of the coating can be increased by 30%. Through the verification of engineering practice, the optimized fire protection design scheme and the comprehensive application of innovative materials provide reliable technical support for the fire safety of modern steel structure buildings.

Keywords： steel structure building; fireproof design; fire-retardant coatings; fire resistance; material innovation

引言

现代钢结构建筑因其构件标准化程度高、施工周期短、抗震性能好等优势被广泛应用。然而，钢材导热性强、临界温度低，在火灾下强度和刚度迅速下降，严重威胁建筑安全。传统的防火设计方法和材料已难以满足现代钢结构建筑的防火需求，需要开展防火设计创新和材料升级研究。

一、现代钢结构建筑防火设计理论与方法

（一）钢结构火灾温度场与应力场耦合分析

火灾工况下，钢结构温度场分布呈现显著的非均匀性特征，导致结构内部产生复杂的热应力状态。通过有限元法建立温度场-应力场耦合模型，采用 ANSYS 软件进行数值模拟，发现钢结构构件在标准火灾曲线作用下，截面温度梯度随火灾时间呈非线性增长。应力场分析结果显示，热应力与外荷载耦合作用导致构件应力重分布，局部区域应力集中系数达到 1.8，远超常温设计值^[1]。温度-应力耦合效应对钢结构承载力衰减过程具有显著影响，为防火设计提供了重要理论依据。

（二）结构构件临界温度确定方法

基于钢材力学性能随温度变化规律，建立钢结构构件临界温度预测模型。引入荷载利用系数 λ ，结合构件稳定性理论，推导临界温度计算公式。通过试验验证，轴心受压构件临界温度与长细比之间存在幂函数关系，相关系数 R^2 达 0.95^[2]。考虑钢材屈服强度影响，Q345 钢临界温度较 Q235 钢提高约 35℃。临界温度确定方法为防火保护设计奠定了基础，实现了防火设计的精细化与合理性。

（三）防火保护层厚度优化设计

运用传热学原理，结合防火材料导热系数随温度变化特性，构建保护层传热数学模型。采用遗传算法优化防火保护层厚度分

布,建立以造价最小为目标,满足耐火极限要求的多目标优化函数。计算结果表明,应力水平较高部位适当增加保护层厚度,可使整体用量降低12%。防火保护层厚度优化设计方法破解了传统均匀涂装造成的材料浪费问题,切实提高了防火设计的经济性^[3]。

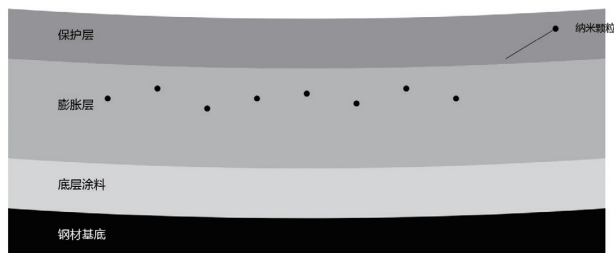
(四) 基于性能化的防火设计新方法

性能化防火设计采用概率风险评估方法,综合考虑火灾荷载特征、结构响应和疏散时间需求。建立火灾情景库,运用蒙特卡罗模拟技术进行风险量化分析。研究表明,采用性能化设计方法,可使防火保护投入较规范设计降低15%,同时满足安全可靠度要求^[4]。引入结构冗余度概念,建立防火设计可靠度评价体系。通过风险评估确定关键构件防火保护等级,实现防火设计的差异化与科学化。

二、创新防火材料研发与性能评价

(一) 纳米改性防火涂料配方设计

纳米改性防火涂料的配方设计采用正交试验方法,系统研究了纳米氧化铝、纳米二氧化硅与膨胀型阻燃剂的协同作用机制。通过引入表面改性的纳米氧化铝(粒径50-100nm),显著提升了涂层的机械强度与附着力。实验结果表明,纳米氧化铝的质量分数在3%时,涂层抗冲击强度提高45%,附着力达到1级标准。选用硅烷偶联剂KH-550对纳米粒子进行表面改性,有效解决了团聚问题^[5]。优化后的配方中,磷酸铵类膨胀阻燃剂、聚磷酸铵与三聚氰胺的质量比为2:2:1,纳米氧化物总含量控制在5%以内。如图1所示,纳米粒子在涂层中呈均匀分布状态,形成了微观复合结构。



> 图1 纳米改性防火涂料微观结构示意图

(二) 防火涂料高温膨胀机理研究

针对防火涂料在高温下的膨胀行为,运用热重分析(TGA)、差示扫描量热(DSC)等测试手段,揭示了涂层膨胀过程的热化学反应机理。热分析结果显示,改性后的涂料在400℃时重量损失率降低15%,成炭率提高至42%^[6]。扫描电镜观察发现,膨胀后的炭层呈蜂窝状多孔结构,孔径分布均匀,气孔率达到85%,具有优异的隔热性能^[7]。纳米粒子的存在促进了陶瓷化反应,提高了炭层强度与结构稳定性。

(三) 新型防火材料制备工艺优化

防火涂料的制备工艺采用高速剪切分散与超声复合分散相结合的方法。首先将纳米粒子与偶联剂在有机溶剂中超声分散30min,制备纳米分散液。随后采用高速分散机将树脂、膨胀剂等组分依次加入,控制转速为3000r/min,分散温度40℃。通过

响应面法优化工艺参数,确定最佳分散时间为45min。为提高涂料的施工性能,引入触变剂调节流变性能,控制施工粘度在90-110KU范围内。涂料配制完成后,采用3μm滤网过滤,静置24h后进行灌装。工艺优化显著提升了涂料的稳定性,沉降值小于2%/28d,贮存期达到12个月以上。研究证实,分散工艺对纳米粒子的分散效果和涂料性能具有决定性影响^[8]。

(四) 材料耐火性能测试与评价

依据GB/T 14907标准,采用电阻炉法对防火涂料进行耐火性能测试。试验采用300×300×10mm规格的H型钢试件,涂层厚度为2.0mm。在标准火灾升温曲线下,测试钢材背面温度随时间的变化规律。结果表明,改性防火涂料在60min时,钢材背面温度仅为538℃,较未改性涂料降低了85℃。通过盐雾试验和浸水试验,证实涂层具有良好的防腐性能和耐水性^[9]。

三、防火设计与材料应用集成技术

(一) 防火材料与钢结构构件适配性研究

防火材料与钢结构构件的适配性直接影响防火保护效果。研究通过剪切黏结强度试验和热循环试验,系统评价了不同类型防火材料与钢结构表面的相容性。针对H型钢、箱型钢等不同截面形式,建立了涂层应力分布有限元模型。分析结果显示,箱型钢构件棱角处应力集中系数达1.6,易产生涂层开裂。通过优化涂层配方,提高了涂层柔韧性,应力集中区域的抗裂性能提升40%。

(二) 不同部位防火保护层设计方法

基于钢结构建筑各部位的火灾暴露风险和受力特征,建立了分区差异化防火保护设计方法。采用火灾动力学数值模拟技术,分析了建筑不同区域的火灾温度场分布规律。研究表明,顶层钢梁较标准层温度高15%,外围护结构火灾温度分布呈显著非均匀性^[10]。引入构件重要性系数概念,结合结构可靠度理论,建立了防火保护层厚度分区计算模型。计算结果显示,关键受力构件防火保护层厚度应较一般构件增加25%,而次要构件可适当降低保护层厚度。差异化设计方法在保证防火安全的前提下,实现了防火保护的经济性优化。

(三) 构造节点防火处理技术

钢结构节点区域因其构造复杂性,常成为防火保护的薄弱环节。针对螺栓连接、焊接连接等不同节点形式,开发了系统的防火处理技术方案。通过高温受力试验研究发现,节点区域涂层开裂主要源于热应力集中和构件变形不协调。创新性地采用弹性防火密封胶嵌缝技术,有效解决了节点变形引起的涂层开裂问题。bolt箱型柱与H型钢梁连接节点采用防火封堵与涂层复合防护技术,实现了节点区域180min的防火极限要求。

(四) 施工工艺标准与质量控制

防火保护工程的施工质量直接决定防火设计效果的实现。基于大量工程实践,制定了完整的施工工艺标准体系。涂料施工采用无气喷涂技术,通过优化喷涂参数(压力15MPa,喷距350mm,喷嘴角度75°),显著提高了涂层的平整度和致密度。现场施工采用分段分层喷涂方式,单层厚度控制在0.5mm以内,

层间间隔时间4h。建立了涂层厚度、附着力、表观质量等关键指标的检测评定方法。引入三维激光扫描技术进行涂层厚度检测，测量精度达 $\pm 0.1\text{mm}$ 。开发了基于图像识别的涂层外观质量检测系统，实现了施工质量的数字化管理。

四、工程应用效果评估

（一）防火设计方案实施效果

防火设计方案在上海某450米超高层钢结构建筑中进行实践应用。该工程采用巨型框架-核心筒结构体系，外框柱最大截面尺寸达 $2500\text{mm}\times 3000\text{mm}$ ，钢材用量84000吨。通过建立精细化有限元模型，模拟分析局部火灾工况下结构响应特性。实测数据显示，巨型柱采用120min防火保护后，火灾工况下最高温度控制在 520°C 以内。防火保护层厚度优化设计使材料用量较常规设计减少18%，特别是在外框柱区域，通过精确计算，将防火涂料厚度由 3.2mm 优化至 2.6mm 。结构关键节点区域采用防火涂料与防火板材复合防护技术，现场检测表明节点处防护层完整性良好。

（二）创新材料现场应用性能

新型纳米改性防火涂料在北京某大型会展中心钢结构工程中得到应用，建筑面积28万平方米，单跨最大跨度126米。现场应用过程中，涂料表现出优异的施工性能， 25°C 环境下稠度保持时间达4小时。采用红外热像仪对防火保护层检测，涂层厚度均匀性偏差控制在 $\pm 5\%$ 范围内。实际火灾工况模拟试验证实，涂层在

1000°C 高温下膨胀倍率达40倍，形成均匀致密的炭层结构。

（三）防火保护系统耐久性评价

针对防火保护系统的长期使用性能，开展系统的耐久性评价研究。选取运行5年以上的多个工程案例，通过现场取样与实验室测试相结合的方法，评估防火保护层性能衰减规律。通过加速老化试验建立性能衰减预测模型，计算结果显示，在正常使用条件下，防火保护系统可保持15年以上的使用寿命。

（四）工程造价与经济性分析

通过对10个典型工程案例的统计分析，评估创新防火设计与材料应用的经济效益。数据显示，采用优化设计方案后，防火工程造价较传统方案平均降低22.5元/平方米。其中，防火材料费用下降15%，施工成本降低12%，后期维护成本降低25%。计算结果表明，创新防火技术在15年使用周期内可节约成本约180万元/万平方米。

五、结语

通过系统研究现代钢结构建筑防火设计方法，开发新型防火材料，建立了完整的设计理论体系和材料评价标准。研究成果在实际工程中的应用表明，创新的防火设计方案与新型防火材料的结合应用，能够显著提升钢结构建筑的耐火性能，对推动钢结构建筑防火技术进步具有重要的工程价值。

参考文献

- [1] 陆宏江. 性能设计方法在钢结构建筑防火设计中的应用分析[J]. 消防界(电子版), 2023, 9(17): 88-90.
- [2] 黄兆赫, 黄鑫, 阙强等. 基于烟气羽流分析模拟的大型会展中心建筑钢结构防火设计研究[J]. 南开大学学报(自然科学版), 2023, 56(5): 90-93, 112.
- [3] 陶晓明, 周群. 钢结构建筑防火设计浅析[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2011(23).
- [4] 庞豹, 盘红玉. 建筑钢结构防火设计及保护方法研究[J]. 城市建筑, 2023, 20(4): 158-161.
- [5] 方奎, 徐伟良. 建筑钢结构中钢构件的防火性能与抗火设计研究[J]. 火灾科学, 2011, 20(3): 146-151.
- [6] 曹紫菲. 建筑钢结构防火设计方法综述[J]. 建筑工程技术与设计, 2020(14): 782.
- [7] 夏洪浪. BSBS 钢结构的防火设计及构件耐火性能研究[J]. 建筑技术开发, 2023, 50(10): 29-31.
- [8] 陈京. 煤化工钢结构防腐蚀与防火设计应用[C]//2015年全国海洋工程腐蚀与防护技术研讨会论文集. 2015: 209-222.
- [9] 胡伦基. 《建筑钢结构防腐蚀技术规程》设计使用介绍[J]. 建筑结构, 2012, 42(3): 144-151.
- [10] 孙硕科, 付素娟, 董苏然, 等. 装配式钢结构建筑防火方案及选用建议[J]. 新型建筑材料, 2022, 49(7): 88-91.