

工业建筑钢结构防火设计理论与防护技术创新

贾新朋

中煤科工集团北京华宇工程有限公司 北京 100120

摘要：工业建筑钢结构因轻质高强、施工便捷等优势广泛应用，但钢材高温力学性能劣化的特性使其面临严重火灾风险，防火设计与防护技术成为保障结构安全的核心。本文系统梳理钢结构防火设计理论基础，剖析火灾特性与设计原理，深入探讨当前设计、施工及维护中的突出问题，重点阐述新型防火材料、创新防护技术的研发应用及性能提升效果，从设计、施工、维护全流程提出优化策略。研究旨在完善工业建筑钢结构防火体系，推动防护技术创新落地，为提升工业建筑火灾安全保障能力提供理论与实践支撑。

关键词：工业建筑；钢结构；防火设计；性能化设计

引言：工业建筑钢结构凭借轻质高强、施工便捷等优势，在众多领域广泛应用。然而，钢材在高温下力学性能急剧劣化，使钢结构面临严峻火灾风险，一旦发生火灾，后果不堪设想。当前，工业建筑钢结构防火设计与防护技术虽取得一定成果，但在设计合理性、施工质量以及维护管理等方面仍存在诸多问题。因此，深入探讨防火设计理论与防护技术创新，对保障工业建筑钢结构安全意义重大。

1 工业建筑钢结构防火设计理论基础

1.1 钢结构的火灾特性分析

工业建筑钢结构的火灾特性核心源于钢材的热物理性能与高温力学响应，火灾环境下其性能劣化呈现显著阶段性与危害性。钢材导热系数约为混凝土的40倍，火灾中热量快速传导至构件内部，使温度在10-15分钟内即可升至300℃以上。当温度达到500℃时，钢材屈服强度降至常温的50%以下，弹性模量大幅衰减，结构承载能力急剧下降；温度超过600℃时，钢材基本丧失承载能力，易引发结构坍塌。工业建筑多涉及易燃易爆物料，火灾发展速度快、烟气毒性高，且生产设备密集导致钢结构受力复杂，火灾中不仅面临整体坍塌风险，还可能因局部构件失效引发连锁破坏。此外，火灾后钢结构易出现残余变形与腐蚀加剧问题，即使未坍塌也可能失去修复价值，进一步放大火灾损失。

1.2 防火设计的基本原理

工业建筑钢结构防火设计关乎建筑、人员及财产安全，以“延缓高温损伤、保障逃生、控制灾害”为目标。设计遵循预防为主、防治结合，主动防控与被动防护协同。主动防控注重火灾源头控制与早期预警，合理规划防火分区，设自动灭火和报警装置。自动灭火系统在初期迅速响应，抑制火势；报警装置及时警报，助人

员疏散应对，减少火灾发生与初期蔓延。被动防护针对钢材高温劣化，采取措施延缓升温，在耐火极限内保证结构承载与稳定，争取救援时间^[1]。性能化设计突破传统规范，结合建筑功能、火灾荷载等参数，量化确定个性化防火目标与方案，兼顾安全与经济效益。

2 工业建筑钢结构防火设计中存在的问题

2.1 设计不合理导致的防火隐患

设计环节的不合理是工业建筑钢结构火灾隐患的主要源头，集中体现在防火目标模糊、参数取值偏差与方案衔接不畅等方面。部分设计未结合工业建筑火灾荷载特性确定防火等级，如化工车间与普通机械厂房采用相同防火标准，导致高危区域防护不足。荷载取值方面，忽视工业生产中物料堆积、设备运行产生的附加火灾荷载，仅按通用建筑标准设计，使防火方案无法应对实际火灾强度。构件防护设计存在盲区，如梁柱节点、螺栓连接等薄弱部位未强化防护，火灾中易率先失效；防火分区划分与通风系统设计冲突，导致烟气扩散速度加快，缩短结构耐火时间。此外，部分设计未考虑施工可行性，如复杂节点防火涂层难以均匀涂刷，为后续施工质量埋下隐患。

2.2 施工质量对防火效果的影响

施工质量直接决定防火设计方案的落地效果，当前工业建筑钢结构防火施工中存在材料替换、工艺不规范与验收疏漏等问题。材料方面，部分施工单位为降低成本，将符合标准的防火涂料替换为劣质产品，或减少防火材料用量，如防火涂层厚度不足设计值的60%，导致构件耐火极限大幅下降。工艺操作不规范现象普遍，如涂刷防火涂料前未清理构件表面油污与锈蚀，涂层与钢材附着力差，火灾中易脱落；喷射混凝土防护时骨料级配不合理，出现空鼓、开裂问题，无法有效阻隔热量传

递^[2]。验收环节缺乏精准检测手段,对防火涂层厚度、粘结强度等关键指标仅进行抽样检查,难以全面把控施工质量,部分隐蔽工程的质量缺陷未被发现,成为潜在火灾风险。

2.3 维护管理不到位的问题

维护管理的缺失使工业建筑钢结构防火体系的防护效果随时间衰减,逐步形成安全隐患。日常巡检流于形式,未建立针对消防设施与防护构件的专项巡检制度,无法及时发现防火涂层老化、开裂、脱落等问题。工业生产环境中,粉尘、油污长期附着于钢结构表面,不仅加速防护层腐蚀,还可能堵塞自动灭火系统喷头与火灾探测器,导致设备失效。维护维修不及时,部分企业在发现防护层损坏后,未采取专业修复措施,仅进行简单涂刷,修复质量无法保障;消防设施未按规定定期检测调试,如灭火器过期、消火栓水压不足等问题普遍存在,火灾发生时无法发挥作用。此外,企业未建立火灾应急预案与定期演练制度,人员应急处置能力不足,进一步放大火灾风险。

3 工业建筑钢结构防护技术创新

3.1 新型防火材料的研发与应用

新型防火材料的研发与应用,为工业建筑钢结构防护带来了性能更为卓越的解决方案,其研发核心紧密围绕耐高温、低烟无毒、长效耐久等关键特性展开。膨胀型钢结构防火涂料取得了重大技术突破,科研人员通过引入纳米改性剂,极大地提升了涂层的膨胀倍率与炭化层强度。在火灾发生时,这种涂料能迅速形成致密的蜂窝状保护层,如同给钢结构穿上了一层坚固的“隔热铠甲”,有效阻隔热量的传递。经过实际测试,其耐火极限较传统产品提升了40%以上,能够为人员疏散和消防救援争取到更充足的时间。而且,在环保指标方面,它也完全符合工业场所严苛的要求,不会对环境对人体造成危害;纤维增强复合防火材料成为重要的发展方向,以玄武岩纤维布与防火胶凝材料复合体系为例,它兼具高强度与优异的防火性能。当将其包裹于钢结构表面时,可使构件在800℃的高温环境下保持承载能力1.5小时以上^[3]。同时,这种材料施工便捷,能够大大缩短施工周期,而且抗老化性能突出,长期使用也不易损坏。此外,自修复型防火涂料也实现了技术突破,它通过内置微胶囊修复剂,当涂层出现微裂纹时,修复剂会自动释放,迅速恢复防护性能,大幅降低了维护成本,特别适用于复杂的工业环境。

3.2 创新的防火防护技术与工艺

防火防护技术与工艺的创新聚焦于提升防护精准

性、可靠性与施工效率,形成多元化技术体系。性能化防火设计技术通过数值模拟与现场试验相结合,精准预测工业建筑火灾发展路径与钢结构温度场分布,为不同区域构件定制差异化防护方案,如对核心承重构件采用厚型防火涂料+防火板双重防护,对次要构件采用薄型防火涂料,实现资源优化配置。智能化施工技术逐步应用,如采用机器人进行防火涂料喷涂,通过激光扫描定位确保涂层厚度均匀,误差控制在 $\pm 0.5\text{mm}$ 以内;3D打印技术用于复杂节点防火构件预制,实现防护层与构件的完美贴合,解决传统工艺难以处理的施工难题。此外,一体化防火防护体系创新发展,将防火、防腐与保温功能整合,通过复合工艺实现多重防护效果,提升结构综合耐久性。

3.3 防护技术创新对防火性能提升的验证

防护技术创新的防火性能提升已通过大量试验研究与工程实践得到验证,形成完善的性能评价体系。实验室试验中,采用标准火灾升温曲线对应用新型防护技术的钢结构构件进行测试,结果表明,应用纳米改性膨胀型涂料的钢梁,在1000℃高温下耐火极限达到2.5小时,较传统涂料提升67%;采用玄武岩纤维复合防护的钢柱,高温下轴向变形量控制在L/250以内,远优于规范要求的L/150限值。数值模拟验证方面,通过FDS火灾模拟软件与ABAQUS结构分析软件耦合计算,模拟工业建筑火灾场景下结构整体响应,结果显示,采用性能化设计方案的钢结构厂房,火灾中结构坍塌风险降低80%以上。工程实践中,某化工园区钢结构厂房应用一体化防护技术后,在一次局部火灾中,受火区域构件未出现明显损伤,火灾后经检测仍可继续使用,充分证明创新技术的可靠性与有效性。

4 工业建筑钢结构防火设计与防护技术的优化策略

4.1 设计阶段的优化措施

设计阶段的优化对于工业建筑钢结构防火至关重要,需构建全流程精细化设计体系,以性能化设计为核心提升方案科学性。首先,开展全面且深入的专项火灾风险评估。结合工业建筑的生产类型,如化工、机械制造等,分析物料特性,像易燃易爆、腐蚀性等,以及结构形式,如单层、多层、大跨度等参数。精准确定火灾荷载密度、火灾发展速度等关键指标,通过这些指标精确定位防火薄弱环节,为后续设计提供准确依据。强化参数取值精准性,参考最新防火规范与行业标准,同时结合现场实测数据,如环境温度、湿度等对防火性能的影响,确定构件防火等级与防护厚度。对于易燃易爆区域,采用冗余设计思路,增加安全储备,确保在极端情

况下也能保障结构安全^[4]。推广BIM技术在防火设计中的应用,构建包含防火信息的三维模型,通过碰撞检测优化防火分区与防护构件布置,避免与机电、工艺设备冲突。利用BIM进行火灾模拟分析,预判火灾蔓延路径与结构受力变化,提前优化防护方案。建立严格的设计评审机制,邀请结构、消防、工艺等多专业专家参与评审,确保设计方案兼具安全性与可行性。

4.2 施工阶段的质量控制要点

施工阶段是保障工业建筑钢结构防火效果的关键环节,需建立全流程质量管控体系,从材料进场到竣工验收实现闭环管理。在材料管控方面,严格执行进场检验制度,对防火涂料、复合防护材料等关键物资进行抽样送检,核查产品合格证、耐火性能检测报告等资料,确保材料质量符合要求,杜绝不合格材料进入施工现场。建立完善材料追溯体系,通过二维码标记材料来源、批次与使用部位,实现全程可追溯,一旦发现问题能迅速定位源头。工艺控制方面,编制专项施工方案,明确不同防护技术的施工流程与质量标准,对施工人员进行技术交底与实操培训,使其熟悉施工要求。重点把控构件表面处理、防护层施工、节点处理等关键工序,采用旁站监理方式确保工艺规范,如构件表面处理要达到规定的清洁度和粗糙度,防护层施工要保证均匀、无气泡等。检测验收方面,引入先进的无损检测技术,如采用超声波测厚仪检测防火涂层厚度,采用拉拔试验仪检测涂层粘结强度,实现全覆盖检测,确保防护层质量。对隐蔽工程实行分段验收,验收合格后方可进入下道工序,保证施工质量符合设计要求。

4.3 维护管理阶段的保障措施

维护管理阶段对于保持工业建筑钢结构防火性能长期稳定至关重要,需构建常态化、智能化保障体系。建立专项维护管理制度,明确巡检周期、内容与责任主体。日常巡检重点检查防火涂层破损、消防设施完好性等情况,及时发现并处理小问题,防止问题扩大。季度巡检结合工业生产停机时段进行全面检测,对结构进行更细致的检查和评估。年度巡检邀请专业机构开展结构

防火性能评估,运用专业设备和技术全面检测结构的防火性能,为后续维护提供科学依据。引入智能化监测技术,在关键钢结构构件表面安装温度传感器与应变传感器,通过物联网平台实时采集数据。当监测到防护层破损或构件温度异常时自动发出预警,以便及时采取措施^[5]。利用无人机对高大空间、不易攀爬区域进行巡检,提升巡检效率与覆盖面,确保无巡检死角。完善应急管理体系,制定针对性火灾应急预案,明确应急响应流程与人员职责,定期组织消防演练,提升人员应急处置能力。建立防火维护档案,记录巡检、维修、检测等信息,通过数据分析为后续维护决策提供数据支撑,实现科学维护管理。

结束语

工业建筑钢结构防火设计与防护技术创新是保障工程安全的核心支撑,直接关系到人员生命与财产安全。本文通过分析钢结构火灾特性与设计原理,揭示当前设计、施工、维护中的突出问题,阐述新型材料与创新技术的应用价值,提出全流程优化策略。未来,需进一步推动性能化设计理念的普及,加强多学科技术融合,完善标准规范体系。企业应重视防火设计与维护管理,加大技术创新投入,通过设计优化、质量管控与智能运维的协同发力,构建全方位火灾安全保障体系,为工业建筑高质量发展提供坚实安全保障。

参考文献

- [1]张凯.论工业建筑工程中轻型钢结构设计[J].河南建材,2022(11):92-94.
- [2]王斌弘.建筑消防设计问题及管理对策分析[J].消防界,2022,8(16):100-102.
- [3]毛凯.城镇规划区外住宅消防设计与监督问题探讨[J].居业,2022(3):145-147.
- [4]李倩.工业建筑的防腐和防火设计[J].全面腐蚀控制,2020,33(11):118-119.
- [5]赵大千.《建筑设计防火规范》在选煤厂改造方案设计中的应用[J].煤炭工程,2021,53(07):31-35.