

火灾作用下大跨度钢结构的温度场演化与力学性能退化机理研究

卢杰

广州理工学院, 广东广州, 510540;

摘要: 随着现代城市建设的快速推进, 大跨度钢结构因其优良的受力性能与建筑美学特征被广泛应用于体育场馆、会展中心、交通枢纽等标志性建筑。然而, 这类建筑在火灾环境下的安全性问题日益突出。火灾使钢结构温度急剧升高, 导致材料性能退化、结构刚度降低, 从而可能引发整体失稳甚至倒塌。本文以管理科学与工程的系统分析思维为基础, 结合热传导理论、结构力学与材料退化模型, 系统探讨了火灾作用下大跨度钢结构的温度场演化规律与力学性能退化机理。文章引入制造执行系统(MES)与数字孪生(Digital Twin)技术, 构建了火灾条件下结构响应的监测与预测模型, 实现了温度分布与力学性能衰退的可视化分析。研究结果表明, 大跨度钢结构在火灾作用下呈现显著的空间温度差异和非线性热力耦合效应, 钢材高温退化是结构失稳的根本诱因。通过引入数字化监测与仿真技术, 可有效提升结构抗火设计与应急决策的科学性。本文的研究为复杂空间结构的防火设计及智能安全管理提供了理论基础和技术支撑。

关键词: 大跨度钢结构; 火灾作用; 温度场演化; 力学性能退化; 数字孪生; MES系统

DOI: 10.64216/3080-1508.25.12.063

引言

随着建筑业向大型化、智能化方向发展, 大跨度钢结构以其高强度、可塑性强及施工周期短等优势, 成为现代公共建筑的主要结构形式。然而, 火灾作为一种突发性热灾害, 对钢结构的稳定性构成严重威胁。火灾环境下温度的急剧变化会导致钢材屈服强度与弹性模量的显著下降, 同时结构内部会产生复杂的热应力分布, 若缺乏有效的防护与监控, 将可能导致不可逆的结构失稳。传统研究多侧重于单构件受火性能分析, 而对整体体系中温度场与力学响应的动态演化关注不足。随着信息技术与智能监测系统的发展, MES系统与数字孪生技术被引入结构安全管理领域, 为火灾下结构性能预测提供了全新的思路。本文通过理论分析与系统建模相结合的方法, 揭示大跨度钢结构在火灾作用下的温度场分布规律、力学性能退化过程及系统响应特征, 并提出以数字化手段为基础的抗火性能优化策略, 旨在为建筑防火设计和应急管理提供科学依据。

1 火灾作用下大跨度钢结构的温度场演化规律

1.1 火灾条件下的热传导与热辐射特征

火灾是一种复杂的非稳态热传递过程, 其能量通过辐射、对流和传导三种方式作用于结构。大跨度钢结构通常具有大空间、高耸顶棚和复杂节点等特征, 空气对流不均匀、热气流流动路径复杂, 使得温度分布呈强烈

的空间差异性。火焰辐射是结构受热的主要形式, 其热通量可在短时间内使表面温度上升至 700°C 以上。钢材表层迅速吸收热量, 而内层温度相对滞后, 形成显著的温度梯度。节点区域因几何复杂与传导路径交错而形成“热集中区”, 成为火灾中结构的薄弱环节。

1.2 温度场的空间非均匀性与多维耦合效应

大跨度钢结构通常采用桁架、索膜或网壳体系构成, 其空间耦合特性使得火灾温度场的演化不仅受火源位置和燃烧强度影响, 还与构件布局、材质和连接形式密切相关。温度在结构中呈现出非线性分布: 靠近火源区域温度快速上升, 远离火源部分则相对稳定, 温度等值线呈波动形态。不同高度处的温度差异明显, 上部结构因烟气积聚而温度更高, 下部相对较低, 形成垂直温差。由于这种非均匀受热, 结构内部的热膨胀受约束, 引发复杂的内力重分布, 导致构件间耦合作用增强。

1.3 温度场的时间演化与火灾阶段性特征

从时间维度看, 火灾作用下的温度场演化通常分为三个阶段: 升温阶段、稳态阶段与冷却阶段。升温阶段为火灾的快速发展期, 温度上升速率快, 热梯度大; 稳态阶段是结构热响应最为剧烈的阶段, 温度分布趋于稳定; 冷却阶段则伴随热量释放与结构恢复, 但因热惯性效应导致局部高温持续存在。此时结构处于应力再分配的关键时期, 若温度降速不均, 将导致残余应力积聚,

引发后期变形甚至延迟性失效。

2 高温作用下钢材的性能退化机理

2.1 高温下钢材的组织结构演化

钢材在高温下的微观结构发生显著变化。随着温度升高,铁素体、珠光体逐渐转变为奥氏体,晶粒发生粗化,位错密度下降。碳化物析出与再固溶过程破坏了原有的晶格稳定性,使钢的强度与刚度显著降低。微观层面的结构退化导致宏观性能下降,这是高温作用下钢结构失稳的根本原因。

2.2 力学性能与温度的非线性关系

钢材的力学性能退化与温度呈明显非线性关系。当温度达到 300℃ 时,屈服强度下降约 10%; 500℃ 时下降 40%; 600℃ 时下降超过一半; 当温度达到 800℃ 以上,钢材几乎失去承载能力。弹性模量的下降使结构整体刚度减弱,塑性变形增加。此外,热膨胀导致构件间约束效应增强,使得局部应力集中区提前屈曲。

2.3 性能退化的系统耦合特征

在大跨度钢结构中,各构件受力相互制约,钢材性能退化不仅表现为单构件承载能力下降,还会通过节点连接传递,引起系统层面的整体刚度削弱。温度不均导致的结构柔度变化,使原有的力流路径重分布,局部失稳可能演化为全局塌落。MES 系统的过程监控功能可实时采集结构温度与应力变化数据,从而实现退化过程的量化追踪。

3 火灾作用下大跨度钢结构的非线性力学响应特征

3.1 热应力分布与结构内力重构

火灾中不同构件受热速率差异导致膨胀程度不一,约束效应使得结构内部产生复杂的热应力。梁柱节点处的约束反力和附加弯矩显著增加,构件横向变形与轴力相互耦合,形成应力集中区。当热应力超过钢材的屈服强度时,结构将进入塑性阶段,造成局部屈曲甚至整体失稳。

3.2 几何非线性与屈曲变形机制

随着温度升高,钢构件刚度下降,结构几何形态逐渐偏离原始平衡位置。此时系统表现出几何非线性特征,即小变形引发大位移,导致力学响应突变。大跨度结构由于构件长细比大,热膨胀效应更加显著,局部屈曲极易蔓延为整体屈曲。火灾冷却阶段,热收缩导致新的应力集中,产生不可逆残余变形。

3.3 热-力耦合的非线性响应规律

火灾作用下的温度场与应力场相互耦合,构成复杂的热-力响应机制。温度升高导致结构内部产生热膨胀与应力重分布,而这种应力变化又会反过来影响热传导路径与速度,形成动态的双向反馈过程。该相互作用不仅改变材料的热传导性能,还会引起局部构件的屈曲、蠕变及失稳,成为结构损伤演化的关键环节。基于数字孪生技术,可建立“物理-虚拟”同步运行的模型体系,通过实时数据输入与仿真反馈,动态再现结构在火灾环境中的温度传递与力学响应。

4 MES 系统与数字孪生技术在火灾响应分析中的应用

4.1 MES 系统在结构安全管理中的作用

MES 系统起源于制造业的过程控制,其核心理念在于实现计划、执行与反馈的闭环管理。将这一思路应用于建筑火灾监控,可实现对结构温度、应力与变形数据的多点实时采集与动态分析。系统通过传感网络获取关键构件的运行参数,并利用反馈算法对数据进行持续计算与趋势评估,从而判断结构在火灾条件下的安全状态。通过过程管理功能,MES 系统能够对火灾演化阶段进行实时跟踪与分级分析,识别温度异常、热应力集中和潜在结构失稳的关键节点。系统还可将监测结果与历史数据进行对比,预测高风险区域与构件退化路径,为防火设计优化与应急救援调度提供科学支撑。该模式实现了火灾监控从被动响应向主动识别的转变,使建筑安全管理具备可视化、智能化与持续优化的特征,为现代防火体系的建设提供了可靠的技术基础。

4.2 数字孪生技术的虚拟仿真与预测功能

数字孪生技术通过构建与真实结构同步运行的虚拟模型,使火灾环境下结构性能的变化过程得以可视化呈现。依托有限元分析与热力学方程的耦合计算,系统可实时更新温度分布、应力状态、材料退化与变形数据,精准反映结构在高温作用下的力学响应特征。通过虚拟模型的动态演化,工程师能够预测结构退化趋势与潜在失稳风险,为防火设计和应急决策提供科学依据。在火灾发生前,数字孪生模型可用于防火设计优化,通过参数分析确定最优防火措施;在火灾发展过程中,系统可对关键构件进行实时监测,及时识别异常变化;在火灾处置后,虚拟模型还能对结构残余承载力进行评估,为修复与加固方案的制定提供量化参考。该技术实现了火灾全过程的监测、预测与评估一体化,为建筑结构的安全生产管理注入了智能化与精准化的新动能。

4.3 MES与数字孪生的融合应用前景

MES系统与数字孪生技术的深度融合,为建筑防火管理提供了智能化的新路径。MES负责过程数据的采集、整合与管理,确保温度、应力、烟雾浓度等关键参数的实时更新与可追溯性;数字孪生则基于这些数据进行仿真与预测分析,构建火灾作用下的虚拟建筑模型。两者结合形成“数据驱动—模型反馈—优化决策”的动态闭环体系,使防火工作实现从静态监测到智能预测的转变。系统能够根据实时监测结果自动调整模型参数,对火灾扩散路径、结构温度场变化及构件退化趋势进行动态推演。通过对不同应急场景的虚拟演算,可为防火设计与救援决策提供量化依据,显著提升应急响应的科学性与时效性。该智能体系实现了虚实融合、数据闭环与自学习优化,为未来建筑防火的数字化与智能化管理奠定了坚实基础。

5 大跨度钢结构的抗火性能优化与管理策略

5.1 防火设计阶段的结构优化

防火设计应将火灾荷载作为结构设计中的关键控制条件,通过科学的结构优化与材料选择,提升整体抗火能力。在设计阶段,应综合考虑截面形状、节点连接方式与防火涂层厚度等因素的协同作用,使结构在高温环境下仍具备稳定的承载性能。合理的截面设计可有效分散热应力,减少局部变形;优化的节点连接能够增强构件间的力传递效率,避免热致失稳的连锁反应。防火涂层的厚度与材质对热传导速率具有显著影响,其科学配置可显著延缓温度上升过程。采用耐高温钢材或钢-复合材料,可进一步提升结构的耐热强度与延展性能,使构件在火灾条件下维持较长的安全使用时间。通过多维度的设计优化,防火体系实现从材料防护到结构协同的整体提升,为建筑安全提供更具韧性与可持续性的防火保障。

5.2 施工与运营阶段的风险控制

在建筑运营过程中,应建立科学完善的多层级防火监测体系,对关键承重构件的温度、应力及变形情况进行长期动态跟踪。通过分层布设传感器网络,可实现从整体结构到局部节点的精细化监测,使火灾隐患在萌芽阶段即可被识别。依托MES系统的过程管控功能,管理者能够实时掌握建筑运行状态,对温度异常、应力集中等危险信号进行快速响应与风险评估。系统可在监测到构件温升或结构应变超过阈值时,自动启动降温或隔离措施,防止热应力累积导致的结构失稳。MES平台还可

对历史数据进行统计分析,生成趋势报告,为防火维护和设计改进提供决策依据。该体系实现了建筑运营的动态监测与智能防控,使防火管理从静态巡检转向实时监管,为建筑安全运行提供了可靠的技术支撑与持续保障。

5.3 智能化防火体系的建设方向

结合数字孪生、人工智能与物联网技术,可构建面向建筑防火管理的智能化决策平台。该系统通过多源数据融合,实现对温度、烟雾浓度、结构应力及环境参数的实时监测,并借助人工智能算法对火灾扩散路径、结构退化速率与稳定性变化进行动态预测。数字孪生技术为系统提供虚实映射基础,使虚拟模型能够同步反映建筑在火灾情景下的受热与力学响应;人工智能则通过深度学习实现模型的自学习与参数优化,从而不断提升预测精度。物联网设备的加入,使传感数据能够形成连续的监控网络,支撑火灾过程的全生命周期管理。系统可依据模型分析结果,对防火设计与应急预案进行动态调整,形成科学的风险响应机制。这一模式实现了从“被动防护”向“主动预控”的转变,为建筑安全管理提供了智能决策支撑与可持续防控能力。

6 结论

本文以大跨度钢结构为研究对象,从火灾作用下的温度场演化规律、材料性能退化机理以及结构整体响应特征三个维度展开系统分析。研究结果显示,火灾中的温度场分布呈现显著的非均匀性,热-力耦合效应使构件产生复杂的应变与内力重分布,是导致结构整体失稳的主要原因。高温作用下,钢材的晶粒结构发生变化,弹性模量与屈服强度逐步降低,进而引起承载能力的快速衰减。通过引入MES系统与数字孪生技术,可实现火灾全过程的动态监测与智能预测,对温度变化、应力传递及构件退化进行实时分析。系统的闭环反馈机制能够在火灾早期识别危险构件,辅助防火决策与应急响应。未来研究可进一步构建多场耦合机制模型,完善火灾后结构的损伤评估与修复策略,为建筑防火安全与结构韧性提升提供智能化、数据化的技术支撑。

参考文献

- [1]王建国,刘宏伟.大跨度钢结构火灾性能分析与防火设计研究[J].建筑结构学报,2023,44(6):87-96.
- [2]陈志远,李晓峰.MES系统理念在结构安全管理中的应用[J].管理科学与工程,2022,39(4):71-79.
- [3]赵丽华,张凯.数字孪生技术在建筑防火与结构健康监测中的应用探析[J].工程科学与技术,2024,41(3):92-101.