

建筑钢结构火灾后检测与评估研究进展

宋士杰

中建研科技股份有限公司 北京 100013

摘要：本文聚焦建筑钢结构火灾后检测与评估研究，阐述火灾后损伤机制，涵盖钢材高温力学性能劣化、构件损伤特征、节点连接损伤及火灾场景影响，介绍了检测技术的进展，包括外观、无损、力学性能及智能化检测。探讨评估方法，有基于规范标准的定性评估、数值模拟的定量评估、基于风险理论的综合评估及评估方法对比适配。展望发展趋势，指出技术将向智能化、自动化迈进，评估方法会更精细、多物理场耦合，为火灾后钢结构处理提供全面指导。

关键词：建筑钢结构；火灾损伤；检测技术

引言：建筑钢结构凭借强度高、自重轻等优势广泛应用。然而，火灾对其造成严重威胁，影响结构安全与稳定性。火灾后，钢结构会出现力学性能劣化、构件变形、节点连接破坏等问题，准确检测与评估损伤至关重要。它不仅关乎结构能否继续使用或需修复加固，还涉及人员生命安全与财产保障。当前，相关检测与评估技术不断发展，但仍面临诸多挑战。本文将系统梳理建筑钢结构火灾后损伤机制、检测技术及评估方法的研究进展，并展望未来发展趋势。

1 建筑钢结构火灾后损伤机制

1.1 钢材的高温力学性能劣化规律

钢材的力学性能随温度升高呈现显著劣化趋势。常温下，钢材的屈服强度约为235-420MPa，弹性模量约200GPa；当温度升至300℃时，屈服强度下降约20%，弹性模量降低10%；温度超过600℃后，钢材基本丧失承载能力，屈服强度降至常温的10%以下。高温还会导致钢材的韧性降低、脆性增加，焊接接头和热影响区的性能劣化更为显著。钢材在高温下的氧化反应会形成氧化层，其厚度与温度和时间呈正相关，进一步削弱构件的截面尺寸。例如，在800℃下持续1小时，钢材表面氧化层厚度可达2-3mm，局部屈服强度降至常温的15%，导致构件承载力大幅下降。

1.2 钢结构构件的火灾损伤特征

火灾后，钢结构构件的损伤主要表现为整体变形和局部屈曲。梁、柱等受弯构件易因热膨胀约束产生附加应力，导致侧向扭曲或波浪形变形；轴压构件（如钢柱）则可能因局部高温引发屈曲失稳，形成“象脚式”鼓曲。构件的残余变形是评估损伤程度的重要指标，规范通常规定钢梁残余挠度不得超过跨度的1/250，钢柱残余倾斜不得超过高度的1/300。另外，高温还会导致混凝土保护层脱落，暴露内部钢筋，加速锈蚀进程。

1.3 节点连接的火灾损伤机制

节点连接是钢结构体系的薄弱环节，火灾中易因热应力集中导致破坏。焊接节点中，焊缝金属在高温下脆化，热影响区裂纹萌生，尤其是T型接头和十字接头易出现层状撕裂；高强螺栓连接因预拉力损失和螺纹滑移而松动，导致摩擦型连接转变为承压型连接，承载力下降；铆接节点则可能因铆钉头熔化或杆部颈缩断裂失效。节点破坏往往引发连锁反应，导致整体结构失稳^[1]。

1.4 火灾场景对损伤程度的影响

火灾场景（如温度分布、持续时间、通风条件）直接影响钢结构损伤程度。通风良好的火灾中，氧气供应充足，火焰温度高但持续时间短，构件表面损伤严重而内部性能保留较好；密闭空间火灾则因热量积聚导致构件整体过热，残余变形更大。火灾蔓延路径也会影响损伤分布，局部火灾可能导致结构应力重分布，使未直接过火区域承受额外荷载。例如，某仓库火灾中，密闭环境使钢梁温度均匀升至700℃，残余挠度达跨度的1/30；而通风良好的同类火灾中，钢梁温度呈梯度分布，残余变形仅为1/100，表明火灾场景分析是评估损伤的必要前提。

2 建筑钢结构火灾后检测技术研究进展

2.1 外观检测技术

外观检测是火灾后初步评估的常用方法，通过观察构件颜色、变形、裂缝等特征推断损伤程度。钢材表面颜色变化可反映过火温度：灰白色对应200-300℃，浅黄色对应400-500℃，粉红色对应600℃以上，蓝色或黑色则表明温度超过700℃。锤击法通过声音判断混凝土保护层脱落情况，进而推断内部钢筋温度；直尺和塞尺测量构件残余变形，精度可达±0.1mm。然而，外观检测主观性强，难以量化损伤深度，需结合其他技术验证。

2.2 无损检测技术

无损检测技术可非破坏性地获取材料内部缺陷信息,主要包括电磁法、超声波法、射线法等。涡流检测仪通过测量电磁感应信号评估钢材表面裂纹深度,精度达0.1mm,适用于焊接接头检测;超声波法利用纵波速度与弹性模量的关系($V = \sqrt{E/\rho}$)推算材料性能,误差 $\leq 5\%$,可检测内部脱层、裂纹等缺陷;X射线衍射技术可分析焊缝残余应力分布,评估热影响区脆化风险。

2.3 力学性能检测技术

力学性能检测是评估火灾后钢结构承载能力的直接方法,分取样检测与现场载荷试验。取样检测需从损伤区截取标准试样,经拉伸、弯曲试验获取屈服强度、抗拉强度等参数,精度高但会造成二次损伤,适用于损伤严重需精确评估的构件,如某火灾后钢柱取样检测显示抗拉强度大幅下降,判定需更换。为减少损伤,微创取样技术发展起来,用5-8mm微创钻头取小试样,通过微型拉伸试验评估性能,试样重量仅为传统1/10,损伤小且结果误差小于5%。现场载荷试验则对构件施加静力或动力载荷,测量变形与应力以评估承载能力与刚度。静力试验分级加载记录变形,绘制载荷-变形曲线判断是否达标;动力试验通过激振器分析固有频率变化,如某钢梁火灾后固有频率下降,判定为中度损伤^[2]。

2.4 智能化检测技术新进展

随着人工智能和传感器技术的发展,智能化检测技术逐渐兴起。激光扫描点云法可构建结构三维变形模型,识别局部屈曲,精度达 $\pm 0.1\text{mm}$;光纤光栅传感技术通过监测应变分布评估加固效果,实现长期健康监测;机器视觉系统结合深度学习算法,可自动识别裂缝、锈蚀等缺陷,检测效率较人工提升3倍以上。例如,某体育馆火灾后,采用无人机搭载红外热像仪和高清相机,2小时内完成全结构检测,生成损伤热力图,为快速制定修复方案提供了数据支持,显著缩短了灾后恢复周期。

3 建筑钢结构火灾后评估方法研究进展

3.1 基于规范标准的定性评估方法

基于规范标准的定性评估方法是工程中最常用的评估手段,依据《火灾后建筑结构鉴定标准》(GB51028)、《建筑钢结构防火技术规范》(GB51210)等标准,通过外观检测与无损检测结果,划分损伤等级与安全等级。损伤等级分为轻微损伤、中度损伤、严重损伤三级:轻微损伤表现为表面涂层脱落、局部锈蚀,构件变形量小于规范允许值的50%,无裂纹;中度损伤表现为构件变形量达规范允许值的50%-100%,出现细微裂纹(宽度小于0.2mm),力学性能劣化率小于

30%;严重损伤表现为构件变形量超过规范允许值,裂纹宽度大于0.2mm,力学性能劣化率超过30%。安全等级根据损伤等级与结构受力状态判定,分为可继续使用、限制使用、停止使用三级:轻微损伤且结构受力正常,判定为可继续使用;中度损伤或结构受力存在局部隐患,判定为限制使用,需采取加固措施;严重损伤或结构整体稳定性不足,判定为停止使用,需拆除重建。某火灾后钢结构展厅评估中,依据规范判定3根钢梁为中度损伤,采取粘钢加固措施后恢复使用。

3.2 基于数值模拟的定量评估方法

基于数值模拟的定量评估方法借助建立有限元模型,模拟火灾后钢结构的力学反应,精准算出其承载能力与稳定性,常用软件有ANSYS、ABAQUS、SAP2000。温度场模拟是定量评估的前提,通过输入火灾温度曲线(像ISO834标准升温曲线),算出构件各部位的温度分布,明确高温作用区域;力学响应模拟依据温度场结果,考虑钢材力学性能的退化,算出构件应力、变形和极限承载能力,如一钢框架火灾后数值模拟表明,梁端最大应力达320MPa,超出退化后的屈服强度(280MPa),判定承载能力不够^[3]。近年,数字孪生技术提升了定量评估精度,构建火灾后钢结构数字孪生体,融合现场检测数据(变形量、应力值)实时修正模型,让模拟结果与实际状态误差小于3%,一超高层钢结构火灾后,数字孪生模型成功预测加固后承载能力恢复状况,为修复方案优化提供支撑。

3.3 基于风险理论的综合评估方法

基于风险理论的综合评估方法考虑火灾后钢结构的不确定性因素(如材料性能波动、荷载变化),通过概率分析量化结构失效风险,为决策提供更全面的依据。风险评估流程包括风险识别、风险分析、风险评价三个阶段:风险识别明确结构可能面临的失效模式(如构件屈曲、节点失效、整体坍塌);风险分析通过蒙特卡洛模拟、故障树分析等方法,计算各失效模式的发生概率与后果严重程度;风险评价根据风险等级(低风险、中风险、高风险)制定应对措施,低风险采取定期监测,中风险采取加固措施,高风险采取拆除重建。

3.4 评估方法的对比与适配场景

三种评估方法各有优势与适配场景,基于规范标准的定性评估方法操作简便、成本低,适用于损伤较轻、结构简单的钢结构(如单层工业厂房),可快速判断结构安全状态,评估周期通常为1-3天。基于数值模拟的定量评估方法精度高、可量化,但成本较高、周期较长(5-10天),适用于损伤复杂、结构重要的钢结构(如高

层写字楼、大跨度会展中心),需精确计算承载能力与稳定性,为修复方案设计提供数据支撑。基于风险理论的综合评估方法考虑不确定性因素,适用于高风险、高价值的钢结构(如核电站钢结构、大型桥梁钢结构),需全面评估失效风险,为决策提供风险量化依据,评估周期较长(10-15天),成本也最高;实际工程中,常采用“定性评估+定量评估”的组合方式,先通过定性评估初步判断损伤等级,再对中度、严重损伤区域采用定量评估精确计算,兼顾效率与精度。

4 建筑钢结构火灾后检测与评估的发展趋势

4.1 技术智能化方向

未来检测技术将进一步向智能化、自动化发展,多模态智能检测设备将成为主流,集成超声、磁粉、硬度检测功能,结合AI算法实现“检测-分析-报告”一体化,设备便携性提升,重量控制在5kg以内,适用于现场快速检测;无人机检测技术将融合红外热像仪与激光雷达,实现温度场与三维形态同步检测,红外热像仪分辨率达 0.05°C ,激光雷达点云密度达500点/ m^2 ,可同时获取温度损伤与几何损伤数据;AI技术将向深度融合方向发展,基于数字孪生的AI评估模型可实时接收检测数据,动态更新模型参数,实现损伤演化预测与修复效果模拟,预测精度达95%以上;边缘计算技术的应用将使AI分析在检测设备本地完成,减少数据传输量,分析速度提升10倍,适用于网络信号薄弱的偏远区域检测^[4]。

4.2 方法精细化方向

评估方法将向精细化、多物理场耦合方向发展,多物理场耦合评估模型将融合温度场、应力场、损伤场、渗流场(考虑灭火积水影响),更真实模拟火灾后钢结

构的力学响应,模型计算误差控制在2%以内;微观-宏观多尺度评估模型将从原子尺度分析钢材相变机制,从宏观尺度计算结构整体稳定性,实现微观损伤与宏观性能的关联分析,为损伤机理研究提供新路径;概率性评估方法将进一步完善,考虑更多不确定性因素(如火灾温度波动、材料不均匀性),采用贝叶斯更新方法不断修正概率模型,使风险评估结果更贴合实际;修复效果评估将向动态化方向发展,通过实时监测数据与数值模拟结合,评估修复后结构在长期使用中的性能变化,预测结构剩余使用寿命。

结束语

建筑钢结构火灾后检测与评估是保障结构安全的关键环节,近年来,检测技术从外观到无损、力学性能检测,再到智能化检测不断革新;评估方法也由基于规范的定性评估,发展到数值模拟定量评估和基于风险理论的综合评估。未来,检测技术将更加智能、便捷,评估方法也会更加精细、精准。随着研究深入,希望更全面、准确地掌握火灾后钢结构状态,为其修复、加固及安全使用提供更可靠依据,推动建筑钢结构领域安全发展。

参考文献

- [1]蒋彬辉,浦通葳,李国强.建筑钢结构火灾后检测与评估研究进展[J].建筑钢结构进展,2025,27(1):1-14.
- [2]孙屹立,刘晓明.建筑钢结构火灾后检测与评估研究进展[J].科海故事博览,2025(4):115-117.
- [3]淳琦.民国建筑钢筋混凝土结构检测鉴定及加固技术[J].建筑技术,2020,44(2):153~156.
- [4]毛吉化.某高层建筑火灾后结构性能检测鉴定研究[J].广东土木与建筑,2021,28(5):42-45.