

建筑钢结构火灾后检测与评估研究进展

蒋彬辉^{1,2}, 浦通葳^{1,2}, 李国强^{3*}

(1. 中南大学 高速铁路建造技术国家工程研究中心, 长沙 410075; 2. 中南大学 土木工程学院, 长沙 410075; 3. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

摘要: 建筑结构火灾事故频发, 火灾可能对建筑物造成严重损伤, 甚至引起建筑物倒塌, 导致人民生命和财产的巨大损失。对于遭受火灾但未倒塌的建筑物, 通过修复加固后可实现再利用。修复加固前, 需要对受火损伤的建筑物进行科学、详细、准确的检测和鉴定, 确定建筑结构材料的剩余强度和构件的损伤程度, 为建筑结构的修复加固提供依据, 从而达到经济且安全地恢复建筑结构使用功能的目的。归纳了火灾后建筑钢结构检测与评估的研究进展, 介绍了建筑结构火灾后现场调查分析的步骤和方法, 分析了构件及火场经历的最高温度的判定方法及其适用性, 指出了火灾后钢材力学性能推断与检测的方法及其优缺点, 论述了构件及结构火灾后残余变形的测量内容和方法, 总结了火灾后构件及结构剩余承载力的相关研究及验算方法。同时指出了有待进一步研究的问题, 为建筑钢结构火灾后检测与评估的理论研究和工程应用提供参考。

关键词: 建筑钢结构; 火灾后检测; 鉴定方法; 剩余承载力; 评估; 研究进展

中图分类号: TU391

文献标志码: A

文章编号: 1671-9379(2025)01-0001-14

DOI: 10.13969/j.jzgjz.20230816001

State-of-the-Art Review on Post-Fire Detection and Assessment of Steel Building Structures

JIANG Binhui^{1,2}, PU Tongwei^{1,2}, LI Guoqiang^{3*}

(1. National Engineering Research Center for High-Speed Railway Construction Technology, Central South University, Changsha 410075, China; 2. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China; 3. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

*Corresponding author: gqli@tongji.edu.cn

Abstract: Fire accidents in building structures occur frequently, and can cause serious damage or even collapse to buildings, leading to huge losses of people's lives and property. Buildings that have suffered from fire but not collapsed can be repaired, reinforced and reused. Before repairing and reinforcement of the building, it is necessary to carry out scientific, detailed and accurate detection and identification of the fire-damaged structures, such as determining the residual strength of the structural materials of the building, and the degree of damage of the members, so as to provide a basis for the repair and reinforcement, and finally achieve the purpose of economic and safe restoration of building structure function. This paper summarized in detail the research progress of the detection and evaluation of

收稿日期: 2023-08-16

基金项目: 国家自然科学基金(52378547, 51908560), 中国中铁股份有限公司科技研究开发计划项目(2021-专项-04-02)

作者简介:

蒋彬辉(1987—), 男, 博士, 副教授, 主要从事钢结构与钢-混凝土组合结构抗火方面的研究。E-mail: binhuijiang@126.com。

浦通葳(2000—), 女, 硕士研究生, 主要从事钢结构与钢-混凝土组合结构抗火方面的研究。

通信作者:

李国强(1963—), 男, 博士, 教授, 主要从事多高层钢结构抗震、钢结构抗火、钢结构抗爆方面的研究。

E-mail: gqli@tongji.edu.cn。

post-fire steel building structures. The steps and methods of on-site investigation and analysis of building structures after fire were introduced, the determination methods and applicability of the maximum temperature experienced by members and fire sites were analyzed, the methods of inferring and testing the mechanical properties of steel after fire and their advantages and disadvantages were pointed out, the measurement contents and methods of residual deformation of members and structures after fire were discussed, and the relevant research and calculation methods of residual bearing capacity of members and structures after fire were summarized. At the same time, the problems that need further research were pointed out, providing reference for the theoretical research and engineering application of detection and evaluation of steel building structures after fire.

Keywords: steel building structure; post-fire detection; identification method; residual bearing capacity; assessment; research progress

钢结构具有强度高、重量轻、塑性与韧性好等特点,因此在建筑中被广泛应用。但钢结构耐火性能差,火灾下钢材的物理和力学性能会发生改变,导致构件承载力降低、变形增加,最终导致钢结构的损伤与破坏^[1]。发生火灾后,少数钢结构建筑会发生倒塌或因损坏过于严重而只能拆除,但大多数受火建筑只有部分构件破坏,仍具有一定的承载力。对于经受火灾而未倒塌的钢结构建筑,需要进行检测与评估。建筑钢结构火灾后的检测与评估程序主要包括:了解建筑火灾前概况、现场调查分析火灾后构件及结构受损情况、判定构件及火场经历的最高温度、检测钢材力学性能和构件残余变形。在此基础上,进一步对火灾后构件及结构的承载力进行验算,最终评定火灾后建筑的安全等级,确定其能否继续使用、是否需要加固以及如何加固等。不同损坏程度对应不同的加固处理方式,通过综合对比各种方式确定合理的加固处理方式,可以为加固后建筑的正常使用提供安全保障。火灾后钢结构工程的检测与评估有利于减少火灾损失,具有重大的社会和经济意义,符合国家可持续发展的战略要求。

1 相关规范发展历史

1.1 国外规范

国外对火灾后结构性能的研究早于我国对其的研究,20世纪50年代国外就已开始研究火灾后结构损伤鉴定及加固相关内容。1985年国内翻译了前苏联出版的《火灾损伤建筑物技术鉴定》专著^[2],1987年前苏联又颁布了 *Identification Standard for Concrete Structures After Fire in Buildings*^[3]。1986年,KIRBY等^[4]提出了钢框架结构火灾后损伤评估和修复指导意见,并给出了不同结构类型、钢筋、铸铁和螺栓经历高温后的残余力学性能。1990年,英国混凝土协会^[5]编写了混凝土结构火灾损伤评估和加固设计的技术报告,并在2008年对该报告进行了修订,修订后的报告内容包括:高温对结构材料性能的影响情况、常用的混凝土火灾损伤评估方法以及火灾后受损建筑加固设计和修复方法,最后列举了建筑火灾案

例来演示评估程序的应用。1998年,英国钢结构规范(BS 5950-8)^[6]在附录B中指出“材性未受严重影响或构件发生的扭曲或损伤未超过规定的结构钢材,在高温过火之后可以再次使用”。

1.2 国内规范

我国在20世纪80年代后期才开始对火灾后建筑物的损伤鉴定与加固进行研究。1994年,闵明保等撰写了《建筑物火灾后诊断与处理》^[7]专著。1996年,上海市建筑科学研究院编制了《火灾后混凝土构件评定标准》(DBJ 08-219-96)^[8],介绍了火灾后混凝土构件的评定程序,即分别从承载力、裂缝、变形三个方面对其综合评定。2003年,吴波撰写了《火灾后钢筋混凝土结构的力学性能》^[9]专著,介绍了其关于混凝土结构火灾损伤评估与抗震修复的部分研究成果,以及国内外其他学者的相关研究工作。

2009年9月1日,中国工程建设标准化协会发布的标准《火灾后建筑结构鉴定标准》(CECS 252:2009)^[10]正式施行,该标准适用于工业与民用建筑中的混凝土结构、钢结构、砌体结构火灾后的检测与鉴定,对构件过火温度、过火时间的确定及高温过火后材料强度的折减、构件的鉴定评级等内容都出台了相应的规定,为火灾后钢结构鉴定与加固提供了依据。2020年4月1日施行了《火灾后工程结构鉴定标准》(T/CECS 252—2019)^[11],该标准不仅适用于火灾后工业与民用建构筑物的鉴定,而且适用于火灾后桥梁、隧道等工程结构的鉴定,同时,原《火灾后建筑结构鉴定标准》(CECS 252:2009)^[10]废止。相比于原标准,新标准中结构类型增加了木结构和钢-混凝土组合结构,调整了高温冷却后钢材屈服强度折减系数,增加了关于高温冷却后高强度螺栓、焊缝的强度折减系数的内容。

《火灾后建筑结构鉴定标准》(CECS 252:2009)^[10]和《火灾后工程结构鉴定标准》(T/CECS 252—2019)^[11]都以火灾后构件的安全性鉴定为主,对火灾后结构整体的安全性和可靠性的鉴定一般依据《民用建筑可靠性鉴定标准》(GB 50292—2015)^[12]、《工业建筑可靠性鉴定标

准》(GB 50144—2019)^[13]或《工程结构可靠性设计统一标准》(GB 50153—2008)^[14]等标准。《民用建筑可靠性鉴定标准》(GB 50292—2015)^[12]与《工业建筑可靠性鉴定标准》(GB 50144—2019)^[13]中介绍了钢结构的安全鉴定方法,包括对建筑结构的承载能力和整体稳定性(安全性)、适用性和耐久性(正常使用性)等进行调查、检测、分析、验算及评定,安全性和正常使用性鉴定评级可分为构件、子单元和鉴定单元三个层次。完成构件、节点鉴定后,再对整个建筑物进行可靠性鉴定,最后依据评定标准得出建筑物的可靠性鉴定结论。但是,《民用建筑可靠性鉴定标准》(GB 50292—2015)^[12]和《工业建筑可靠性鉴定标准》(GB 50144—2019)^[13]适用于一般的可靠性鉴定,在经历火灾后的钢结构可靠性鉴定方面具有一定的局限性^[1]。

除国家标准外,部分地区也编写了相关标准。在北京市,北京市建筑工程研究院有限责任公司主编了《火灾后钢结构损伤评估技术规程》(DB11T 1727—2020)^[15];在福建省,由华侨大学主编的《火灾后混凝土结构鉴定标准》(DBJ/T 13-352—2021)^[16]于2022年实施;在重庆市,由重庆市建筑科学研究院有限公司于2020年主编的工程建设地方标准《火灾后混凝土结构鉴定标准》^[17]已完成征求意见稿。

2 火灾事故调查

火灾调查是一门新兴的边缘交叉科学,注重多学科知识的融合。在建筑火灾调查中,通常采取访问调查、监控调查、现场调查等多种手段,先充分了解建筑物火灾前的概况,再对遭受火灾的建筑物进行现场调查,详细分析火灾情况,以便更好地对钢结构火灾后的损伤进行评估。

2.1 了解建筑结构火灾前概况

钢结构建筑发生火灾后,调查人员主要通过受灾单位负责人提供的资料了解建筑结构火灾前概况,具体工作内容包括:熟悉建筑物的建造时间、用途、耐火等级及使用年限;了解建筑物之前是否遭受过其他事故或是否加固维修过;收集建筑设计图、结构施工图、施工日志、竣工验收等存档资料;明确火灾前建筑物内存放物品的种类、性质、数量、堆放位置及室内通风、湿度和温度情况,并准确绘制出示意图;此外,还需查明建筑有无防火安全制度和操作规程,以及实际执行情况。

2.2 火灾后现场调查

一般调查小组对建筑结构火灾前概况全面了解后再进行现场调查。首先通过目测观察、拍照或摄像记录火灾后现场情况,结合消防部门获取的火灾鉴定报告,初步

划分火灾严重区及结构受损中心区,并对明显处于危险状态的构件进行安全处理^[7];然后由调查小组组织火灾发现者及灭火人员座谈,调查询问火灾发生、发展蔓延及灭火过程等,根据陈述及现场情况调查起火时间、原因、起火点、火灾持续时间、燃烧范围与程度、灭火方式及措施;同时检查现场物品以及梁、柱等重要构件的烧损情况并记录,绘制构件的受损情况图。另外,有必要时可收集现场残留物。

MARAVEAS等^[18]指出现场调查过程中,对受损不严重构件的损伤评估,通常会偏于保守,而且火灾造成的结构未受损部分的内力重分布也会影响评估结果。所以火灾后现场调查不仅要求内容全面,而且勘查方法也要正确,尽量获取精准信息。在以往研究的现场勘查中,火灾的起火部位及蔓延方向有以下经验判断方法:多层、高层钢结构建筑起火部位一般为V字形、斜面形烟熏和火烧痕迹的底部;钢构件受火首先会出现弯曲变形,火灾中屋面最先出现凹陷位置的下部一般就是起火部位;屋顶局部塌落,起火部位一般在塌落处或塌落相邻的一跨建筑内;对于大面积整体倒塌的钢结构建筑,钢梁整体位移的方向、钢柱顶端所处位置在钢柱原始位置的一侧方向一般就是起火部位或火势蔓延方向^[19]。由于钢材受火作用表面会产生金属氧化层,因此根据火灾现场钢构件的变色特征也可以判定出受热温度最高、作用时间最长的部位,进而认定起火部位和起火点^[20]。

传统的绘图与摄影等方式,不能很好地反映火场的三维真实状态,随着科技的发展,一些新技术已被应用于火灾后现场调查中,如采用三维扫描、VR影像等新兴技术对火场信息进行采集、建模,可以反映出火场痕迹物证的三维空间位置,再结合现场调查信息,应用FDS、ABAQUS等有限元软件,可以还原火灾发生和蔓延的过程^[21]。对于较复杂的工程,建立火灾原因认定风险控制体系,把控收集证据、审查分析等各个环节,有利于提高火灾现场调查的准确性^[22]。

3 构件及火场最高温度判定

建筑构件及火场经历的最高温度的判定是检测评估过程中必不可少的内容。由于火灾作用不均匀,火灾下建筑结构各部位的温度也不同,一般根据现场调查中的初步分区,分别确定各区域内的最高温度^[7]。相比于钢结构,国内外对于混凝土结构火灾前后的相关研究内容比较丰富,理论比较成熟^[23]。根据国内外的相关研究^[24-30],建筑构件及火场经历的最高温度主要通过标准升温曲线公式、现场残留物烧损情况、火灾后构件表面颜色及涂料烧损状况、显微组织特征、火灾后钢筋及钢材剩余强度变化等方法进行判定^[24-25]。此外,火灾后混凝土结构构件最高温度还可以通过热释光、超声法、X射线衍

射方法进行判定^[24],钢结构构件的最高温度可以根据钢材硬度降低情况进行判定^[30]。

(1) 根据标准升温曲线公式推算

目前,我国采用较多的升温曲线是国际标准组织制订的ISO 834标准升温曲线^[26],该火灾升温曲线模型假定整个火场空间温度呈均匀分布。为了更好地反映真实火灾对构件的破坏程度,国际建筑研究与委员会通过定义等效曝火时间将真实火灾与标准火联系起来,即真实火灾对构件的破坏程度等效成相同建筑在标准火作用等效曝火时间后对构件的破坏程度,并提出了将真实火灾等效成ISO 834标准火时等效曝火时间的计算式^[27]。通过火灾现场调查,可以得到火灾区域内可燃物的种类和数量、建筑物通风条件等信息,然后根据以下等效曝火时间、ISO 834标准升温曲线(式(1)~(6)和表1)可推算火场等效曝火时刻的温度^[27]。

$$t_e = c_b q w_f \quad (1)$$

$$q = \frac{1}{A_n} \mu \sum M_V \Delta H_V \quad (2)$$

对于 $A_n < 100 \text{ m}^2$ 且顶棚没有通风口的房间,有:

$$w_f = A_n \sqrt{\frac{1}{A_{10} A_V \sqrt{H_V}}} \quad (3)$$

对于 $0.025 \leq A_{wv}/A_n \leq 0.250$ 的其他类型房间,有:

$$w_f = \max \left\{ \begin{array}{l} (6/H)^{0.3} [0.62 + 90(0.4 - A_{vv}/A_n)^4 / \\ (1 + b_v A_{vh}/A_n)] \\ 0.5 \end{array} \right. \quad (4)$$

$$b_v = \max \left\{ \begin{array}{l} 12.5 [1 + 10A_{wv}/A_n - (A_{wv}/A_n)^2] \\ 10 \end{array} \right. \quad (5)$$

$$T = T_0 + 345 \log_{10}(8t_e + 1) \quad (6)$$

式中: t_e 为等效曝火时间; c_b 为转换系数,与壁面热惰性有关,取值如表1所示,当房间壁面系数不能确定时,取 $c_b = 0.07 \text{ min} \cdot (\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2})^{-1}$; q 为火荷载密度,单位为 $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$; w_f 为通风修正系数; A_n 为火灾房间楼板面积,单位为 m^2 ; μ 为非完全燃烧系数,与材料类型有关,在 $0 \sim 1$ 之间取值; M_V 为室内可燃材料 V 的总质量,单位为 kg ; ΔH_V 为室内可燃材料 V 的热值,单位为 $\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$; A_n 为火灾房间内表面积之和(不包括开口),单位为 m^2 ; A_{10} 为火灾房间内表面积(包括开口),单位为 m^2 ; A_V 为房间开口面积,单位为 m^2 ; H_V 为开口高度,单位为 m ; H 为着火房间高度,单位为 m ; A_{vv} 为垂直通风口面积,单位为 m^2 ; b_v 为通风口宽度,单位为 m ; A_{vh} 为水平通风口面积,单位为 m^2 ; A_{wv} 为窗口开口面积,单位为 m^2 ; T 为火灾温度,单位为 $^{\circ}\text{C}$; T_0 为环境温度(一般取 20°C)。

该判定方法简单易行,可以推定火灾中不同等效曝火时刻的火场温度,在实际工程的检测和评估中使用最多。但等效曝火时间的取值不易确定,通常以实际火灾

表1 转换系数 c_b 的取值^[27]

Table 1 Values of the conversion coefficient c_b ^[27]

热惰性 $\sqrt{\lambda \rho c} / (\text{Jm}^{-2}\text{s}^{-1/2}\text{K})$	转换系数 $c_b / (\text{min} \cdot (\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2})^{-1})$
$\sqrt{\lambda \rho c} < 720$	0.070
$720 \leq \sqrt{\lambda \rho c} < 2520$	0.055
$\sqrt{\lambda \rho c} \geq 2520$	0.040

注: λ 为导热系数,单位为 $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$; ρ 为密度,单位为 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; c 为比热容,单位为 $\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$ 。

燃烧时间来代替,简化了公式,同时也使推定的火场温度存在一定的偏差。另外标准升温曲线仅针对室内小空间火灾,对于露天环境以及大空间火灾,采用升温曲线不能准确判定火灾温度。

(2) 根据现场残留物烧损情况判定

火灾后现场残留物间接反映了火灾的发展情况,通过观察火灾现场残留物的燃烧、融化、变形形态和烧损程度可以估计构件受火温度。铝材的熔化温度大致在 $300 \sim 500^{\circ}\text{C}$; 玻璃的软化温度在 700°C 左右,熔化温度大致在 $800 \sim 850^{\circ}\text{C}$ ^[25]。《火灾后建筑结构鉴定标准》(CECS 252:2009)^[10]附录 A 和《火灾后工程结构鉴定标准》(T/CECS 252—2019)^[11]附录 B 中给出了常见材料的变态温度、燃点,对照烧损物品残留物的燃点温度、变态温度或软化点温度可大致判断火场经历的最低及最高温度。这种判定方法可查用现成的对照表,操作简单、明确,被广泛应用于火灾后工程实际检测中。但该方法仅能粗略估计出残留物邻近构件的温度范围,常与其他温度判定方法结合使用,相互验证判定结果的准确性。

(3) 根据火灾后钢构件表面颜色及涂料烧损状况判定

火场中钢结构构件的表面颜色随火灾时间、火场温度与冷却条件的变化而变化。陈建锋等^[31]通过试验绘制了火灾后钢材热变色图谱,直观地反映了结构钢热变色随温度变化的规律,对照该图谱可推测构件经历的火灾温度。但是热变色图谱在实际应用中容易受光线及其他因素的影响而产生视觉误判,存在一定偏差^[32]。研究发现,当钢构件表面温度小于 300°C 时,涂料变黑且会出现裂缝和脱皮现象,防锈涂料保持完好;当钢构件表面温度达到 $300 \sim 600^{\circ}\text{C}$ 时,涂料变黑、脱落,防锈涂料发生变色;当钢构件表面温度高于 600°C 后,火灾高温会烧光一般涂料和防锈涂料^[33-34]。由于火场情况复杂,根据火灾后钢构件表面颜色及涂料烧损状况也只能大致判定构件经历的最高温度。

(4) 根据钢材硬度变化情况判定

钢材经历高温并达到一定值后,内部组织结构发生变化,碳含量会有一定程度的降低,进而影响钢材的表面硬

度。荣成晓^[35]通过钢材高温过火后力学性能试验,发现当温度超过600℃后,里氏硬度随钢材所经历最高温度的变化趋势与屈服强度及极限强度的变化趋势相似。在张辉等^[29]试验研究的基础上,陈建锋等^[30]利用便携式硬度仪在结构的梁、柱等代表性部位取样检测,根据过火后结构钢洛氏硬度与火灾温度关系计算式推定了火灾温度。采用钢材硬度变化情况判定方法可以定量计算出火灾后钢材经历的最高温度,但钢材硬度不仅受冷却方式的影响,而且当温度低于一定值时,钢结构硬度变化幅度很小,故这种方法仅适用于推断一定温度以上的火灾高温。

(5) 根据火灾后构件显微组织特征判定

随着温度的升高,钢材的晶粒会变大。AZHARI等^[28]对低碳钢、高强钢和超高强度钢管经历高温冷却后的显微组织进行研究,发现钢材过火温度小于600℃时,其微观结构变化并不明显,当超过600℃时,钢材结构组织将会出现显著变化。陈建锋等^[30]利用金相显微镜作金相分析,测量了试样晶粒度,依据高温火灾后结构钢晶粒度折减与火灾温度的对应关系反推火灾温度,在700℃以下,晶粒度基本不变,当测得火灾后试样晶粒度减小幅度在2%以内时,可判定火灾温度不高于700℃。这种判定方法简单易行,参照晶粒度可判定构件温度的大致范围,但需要参照规范取样,若操作不规范则会检测结果,甚至会导致分析错误,MARAVEAS等^[18]也通过试验发现根据显微组织评定受损钢结构的残余力学性能存在不确定性。因此,该方法需结合其他方法使用。

(6) 根据火灾后钢筋、钢材剩余强度判定

构件所经历的最高温度可以根据火灾后钢筋或钢材剩余强度计算,陈建锋等^[30]提出了受火温度在400~900℃之间时,利用钢材火灾高温自然冷却、浇水冷却后抗拉强度来推定火灾温度的计算式。实际应用中,也可从相关研究^[36-52]中根据不同的钢材牌号和特定条件选择对应残余强度计算式推算构件经历的最高温度。利用剩余强度判定方法得到的结果虽然比较准确,但需做强度试验,比其他几种判定方法的实施成本更高、工作量更大。

选取火灾后构件及火场经历的最高温度判定方法时,不仅要依据实际火场结构烧损和可燃物的情况,还要考虑实际技术、设备等条件。目前在火灾后实际工程案例检测中多使用标准升温曲线结合现场残留物烧损情况进行构件及火场经历的最高温度判定,以往的工程案例也验证了采用综合评定方法判定的效果是最好的,特别是判定较高温度的火灾时结果会更准确^[30]。

4 火灾后钢材力学性能的推断与检测

4.1 依据火灾中钢材最高温度推断钢材性能

依据火灾中钢材经历的最高温度可推断钢材的力

学性能,《火灾后建筑结构鉴定标准》(CECS 252:2009)^[10]附录J和《火灾后工程结构鉴定标准》(CECS 252—2019)^[11]附录H提供了钢材高温过火冷却后的屈服强度折减系数。此外,国内外学者对不同牌号的普通钢和 高强钢高温下和高温后的力学性能进行了大量研究,且已经取得丰硕的研究成果^[36-52],包括Q235^[36-38]、Q345^[38-40]、Q420^[42-43]、Q460^[37,43,46]、Q550^[47]、Q690^[44-46]、Q890^[47]、Q960^[48]、S460^[49-50]、S690^[49-50]、S960^[50]、ASTM A992^[51]、G300和G500^[40,52]等钢材。LI等^[53]对强度等级为235~960MPa的热轧碳素结构钢高温力学性能的试验数据进行了总结,并分析了不同试验条件对钢材力学性能的影响。朱美春等^[54]、LOU等^[55]、LIU等^[56]也分别开展了焊缝、螺栓连接试件高温冷却后的拉伸试验。这些研究不仅揭示了钢材在一定温度范围内的力学性能变化规律,而且建立了钢材的弹性模量、屈服强度、极限强度等力学性能计算模型。如果能确定火灾过程中构件所经受的最高温度,则可使用规范提供的数据或选取相关研究中给出的对应公式及结论计算火灾后钢材的残余强度。但这种方法对温度判定的精确度要求较高,而且已有研究采用的试验方法、材料尺寸和型号均不同,因此根据各试验研究得到的结果具有一定的离散性^[57]。

4.2 依据试验检测火灾后钢材力学性能

实际工程中,更多采取的方式为依据试验检测受火冷却后钢材力学性能,再与常温钢材的力学性能对比,最后确定材料的剩余强度以及损伤程度^[58]。依据试验检测钢材受火冷却后力学性能的方法主要有取样拉伸法、表面硬度法、化学成分分析法^[59],其中取样拉伸法的应用范围最广、检测结果最准确、可检测参数更多,但取样会对结构造成一定损伤、耗时长、受现场条件限制,且取样数量也会影响数据分析结果。当不方便切取试样时,采用表面硬度法等非破损或微破损法进行力学性能检测。钢材强度现场无损检测快速、简便、高效、适用性和灵活性较好、对环境要求不高且不会对结构造成损伤,可以大范围应用,但精准度没有取样拉伸试验的精准度高。

(1) 取样拉伸试验

进行拉伸试验前需要在原结构上取样,按照标准《钢及钢产品 力学性能试验取样位置及试样制备》(GB/T 2975—2018)^[60]和《金属材料 拉伸试验 第1部分:室温试验方法》(GB/T 228.1—2021)^[61]取样,常见的取样切割方法有冷切割和热切割,冷切割包括水刀切割、锯切和线切割;热切割包括氧气燃料火焰切割、等离子切割和激光切割。火焰切割的热影响区可能会导致不同受损区试件材性试验结果无明显差异,激光切割的热影响区很小,此类试验中构件的取样切割方式一般为激光切割或人工机械

切割^[33]。取样时需确保不再次损伤结构,避开主要受力位置,必要时对取样部位进行补强。取样后进行拉伸试验,最后得到试样的比例极限、弹性极限、屈服强度、抗拉强度等力学性能指标。

(2) 表面硬度试验

硬度是材料弹性、塑性、强度和韧性等力学性能的综合指标,检测火灾后钢材的抗拉强度一般采用表面硬度法,研究^[4,62]也证实了硬度测试是一种可靠的方法。表面硬度试验方法主要有静态和动态试验方法,前者主要包括布氏、洛氏、维氏、努氏、韦氏、巴氏等硬度试验方法,后者主要包括肖式、里氏两种硬度试验方法。其中布氏、洛氏、维氏硬度试验方法的应用最广泛,且洛氏硬度试验方法的应用最多,目前应用中的硬度计约70%是洛氏硬度计^[63]。常用的几种硬度试验方法及其特点如表2所示。在一定范围内,钢材抗拉强度同硬度之间可以建立相关性,国际标准 ISO 18265:2013^[64]、德国标准 DIN 50150 1976^[65]、国家标准 GB/T 1172—1999^[66]

等诸多规范中都有较为详细的强度-硬度换算关系表,基于布氏、洛氏和维氏硬度可以直接查规范换算得到被测材料的强度值。而里氏硬度则通过规范《金属材料里氏硬度试验第4部分:硬度值换算表》(GB/T 17394.4—2014)^[67]把里氏硬度值换算成维氏硬度值,然后根据《黑色金属硬度及强度换算值》(GB/T 1172—1999)^[66]换算出对应的强度值。直到2019年,《建筑结构检测技术标准》(GB/T 50344—2019)^[68]中提供了新的抗拉强度-里氏硬度换算表。表面硬度试验是检测金属力学性能最迅速、经济、简单的一种方法,需要根据检测试件材料、处理工艺、外形尺寸及检测要求等选择合适的检测方法。以往对钢结构火灾后强度无损检测的研究相对较少,但随着学科技术的需要,硬度法检测钢材强度的应用越来越广泛。LIU等^[69]、王武刚^[70]、刘红波等^[71]采用里氏硬度法建立了钢材火灾后剩余强度与里氏硬度之间的回归函数,为火灾后结构材料强度无损检测提供了参考。

表2 常用硬度试验方法的比较

Table 2 Comparison of commonly used hardness test methods

检测方法	提出时间	优点	缺点
布氏硬度法	1899年	测量数值稳定、准确,重复性好	压痕较大,操作速度慢
洛氏硬度法	1914年	操作迅速、简便、压痕小、测量范围大	数据准确性、稳定性、重复性不好
维氏硬度法	1924年	对构件损伤小、测量精确	操作较麻烦,多用于科研
里氏硬度法	1978年	仪器轻巧便携、操作快速简便、测试灵活	要求试样具备一定的品质和厚度,不适用于测试小工件

(3) 化学成分分析与评定

钢材化学成分分析可分为全成分或主要成分分析,取样和试验分别按《钢的成品化学成分允许偏差》(GB/T 222—2006)^[72]和 GB/T 223.32—94^[73]进行,并按相应标准评定。目前采用的方法主要有吸光光度法、原子吸收光谱法、滴定法、红外线吸收法、气体容量法等。钢构件及连接材料的化学成分分析主要检测碳、硅、锰、硫、磷元素的含量,通过试件的主要化学元素含量和力学性能,建立钢材强度与化学元素含量之间的回归方程^[70]。

5 火灾后节点连接区域力学性能检测

节点连接对钢结构的抗力至关重要,在大多数设计规范中都不允许高强螺栓在火灾后继续使用。目前火灾后节点力学性能的研究主要针对高强钢端板连接节点^[74-75]、方钢管混凝土柱-钢梁组合节点^[76-77]、焊接空心球节点^[78]、螺栓球节点^[79-80]、T型钢管节点^[81]等节点类型,通过火灾后力学性能试验和数值模拟,得到过火温度、冷却方式、钢材强度等级等关键参数对节点性能的影响规律,并提出火灾作用后节点的承载力计算式,为火灾作用后同类节点的评估和修复提供了参考。

经历火灾高温后,高强度螺栓滑移荷载、摩擦系数、抗拉强度等均会受到影响,焊缝连接的节点受火灾作用也会出现变形、滑移、撕裂等破坏^[82]。火灾后建筑结构常用的修复措施通常是对结构的明显损伤部位进行加固补强,可能会忽略火灾高温后关键节点力学性能的退化,导致一些薄弱区域疏于加固,留下安全隐患。应按照规定方法对螺栓、焊缝连接的性能进行检测。对于火灾后螺栓、焊缝的检测,通常先进行外观检测,通过扭矩扳手等工具测定高强螺栓的预拉力,然后现场取样,按照有关标准对不同受损区域内螺栓或焊缝材料特性进行试验,观察试验过程中节点的高强螺栓或焊缝是否完好,是否存在开裂、变形等异常情况,若能满足相关规范的要求,可不考虑火灾对高强螺栓连接或焊缝连接的节点力学性能的不利影响。必要时焊缝的检测可参考《钢结构现场检测技术标准》(GB/T 50621—2010)^[83],采用超声波探伤、磁粉、射线、渗透等无损检测方法检测其缺陷^[1]。

6 火灾后钢结构和构件变形的检测

钢结构在火灾高温下会发生变形,产生局部破坏,对

结构的安全性产生影响,因此在火灾后钢结构的鉴定中,应以合理的方式检测构件、结构的变形损伤程度。目前,火灾后结构变形的检测设备基本实现了遥控化、数字化、智能化和程序化。变形测量根据《建筑变形测量规范》(JGJ 8—2016)^[84]的要求进行。火灾后钢结构及构件的变形测量方法有常规测量、数字摄影测量、特殊测量、空间测量等。

常规测量方法通过全站仪、水准仪、经纬仪、吊锤等测量变形。常规测量方法的精度高、应用灵活,适用于不同的变形和火灾环境,但测量对环境的光线有一定要求。数字摄影测量即应用计算机技术,以计算机视觉代替人眼观测,用数字表达几何与物理信息的测量方法,不需要接触被检测的建筑物、摄影影像的信息量大、利用率高、观测时间短、可获取快速变形过程。特殊测量包括各种准直测量法、挠度曲线测量法、液体静力水准测量法和微距离精密测量法等,可实现连续自动监测和遥感、相对精度高,但测量范围不大,仅能提供局部变形信息。空间测量技术包括甚长基线干涉测量、三维激光扫描、卫星测高、全球定位系统等,这种测量方法技术先进,可提供大范围的变形信息,具有全天候、高精度、实时、连续、自动监测等优点,并能与远程数据传输相结合,实现监测与决策智能化。

火灾后变形检测的内容包括准确测量构件或结构的翘曲度、挠度、倾角、位移、侧向弯曲等变形值,然后与规范中对应的允许值比较,确定火灾引起的变形程度^[58]。全站仪测量精度比激光扫描的精度略高,激光扫描测量精度又高于摄影测量的精度。若构件或结构整体变形不大,对检测结果精度要求不高时,一般使用钢尺、吊锤、拉线等方式检测;对检测结果精度要求较高时,则使用高精度全站仪、三轴定位仪或经纬仪,采用三维坐标测量技术,利用梁柱轴线建立正交网,然后进行坐标变换,得到梁、柱的实际变形值^[1]。钢材厚度可以用游标卡尺或超声测厚仪测量。对于整体变形的要求,《火灾后工程结构鉴定标准》(T/CECS 252—2019)^[11]中规定,当变形不大于现行国家标准《钢结构设计标准》(GB 50017—2017)^[85]规定的变形允许值时,初步鉴定可评为Ⅱa级或Ⅱb级;当变形不大于《钢结构设计标准》(GB 50017—2017)^[85]规定的变形允许值的2倍时,初步鉴定可评为Ⅲ级。

7 火灾后构件及整体结构承载力

7.1 火灾后构件及整体结构承载力研究

目前,关于构件火灾后力学性能的研究已较多^[86-100],而针对火灾后整体钢结构剩余承载力的研究相对较少^[101-103]。钢柱、钢梁等构件火灾后力学性能的研究主要包括:对受约束的Q550^[86-87]和Q690^[88]高强钢柱、Q690^[89-90]高强钢柱、Q460^[91]钢焊接H形截面柱、

S700^[92]型高强钢管截面短柱受火后的剩余承载性能开展试验研究与有限元模拟,获得钢柱受火全过程的形变及受火后的剩余承载力和破坏模式,并对柱受火后剩余承载力的影响参数进行系统分析。王新堂等^[93]、陈建锋等^[94]研究了工程中常见的H形截面端部约束钢柱、轴心受压钢柱火灾后剩余承载力,考虑高温后材料的强度变化、构件截面刚度退化等因素,提出了受压钢柱火灾后剩余承载力计算式;BAILEY等^[95]对钢框架结构在火灾升温 and 降温阶段的结构响应进行了数值模拟,得到了简支梁在升温再降温环境下的残余变形及残余内力;陈建锋等^[96]以受火钢梁为研究对象,通过分析受火前后钢梁的整体稳定临界弯矩,推导了其火灾后剩余承载力的计算式;杨秀英等^[97]以两端约束的钢梁为研究对象,分析了火灾后钢梁的剩余承载力及影响因素;郭小农等^[98]探究了Q690高强钢梁火灾后的破坏模式和承载性能;刘链波等^[99-100]通过对火灾后梁端约束H型钢梁-柱节点进行拟静力试验,分析了试件的承载力、刚度退化、延性及耗能能力的变化情况。根据以上研究可以发现,影响构件剩余承载力的主要因素包括截面尺寸、过火温度、冷却方式、荷载比、轴向约束刚度比、转动约束刚度、长细比以及钢材强度等级等。不同参数对构件火灾后受力性能的影响规律可为评估钢构件耐火性能提供重要基础。对于火灾后整体结构剩余承载力的研究,蒋首超等^[101]基于构件变形测量以及取样拉伸试验的结果,针对受火后实际的钢结构几何尺寸,建立了计算模型并分析其在火灾后的实际受力状况,根据火灾后的试件取样拉伸试验结果对结构和构件的承载力进行验算。范圣刚等^[102]、刘振华等^[103]分别按火灾前和火灾后两种情况来计算火灾后网架的承载力。火灾前,对整个网架的各根杆件按实际截面尺寸并采用直杆单元进行有限元模拟,利用有限元软件计算其承载力。火灾后,将整个网架的各根杆件也按实际截面尺寸,采用曲梁单元和直杆单元组合进行模拟,利用FRAME(直杆)与CFRAME(曲梁)两个模块计算结构剩余承载力。

7.2 火灾后构件及整体结构承载力验算

火灾中受损的建筑钢结构需要验算其火灾后的承载能力和刚度,以确定结构在剩余使用期限内是否满足承受各种荷载和作用的要求。目前,构件及结构承载能力主要通过理论计算和有限元分析方法进行验算。

理论计算方法指借助火灾后钢材力学性能、作用荷载和支承方式,改变公式中的材料强度取值,直接采用常温下构件承载力验算公式计算当前构件的残余承载能力^[25]。由于钢结构受火灾高温作用后的受力性能复杂,影响因素较多,这种计算方法难免存在考虑不周的情况,实际工程中应用较少。对火灾后构件及结构承载能力研

究采用较多的是有限元分析方法,即在构件耐火等级、变形、力学性能检测结果的基础上,根据受火后实际的钢结构几何尺寸建立计算模型,分析其在火灾后的实际受力情况,利用有限元软件分别按火灾前和火灾后两种情况来计算钢结构的残余承载力^[102-103]。有限元分析方法能够快捷有效地将各种影响因素考虑进去,全面分析各类因素对于构件及结构的影响机制,还充分考虑了温度不均的影响,使得计算结果更加符合实际情况^[104]。但复杂问题的有限元分析计算耗费时间与内存,计算量比较大。

建筑钢结构火灾后承载能力的验算一般先进行重荷载作用下整体结构的火灾升降温全过程分析,以及火灾后竖向荷载作用下承载能力的验算,并得到各构件的火灾效应,然后对火灾后构件的承载力进行验算校核后评定构件的安全等级,《火灾后工程结构鉴定标准》(T/CECS 252—2019)^[11]中规定在构件取样拉伸试验的基础上,对损伤等级为Ⅱb级、Ⅲ级的重要结构构件进行承载力验算。通过验算承载力与作用效应、结构重要性系数的比值,与《火灾后工程结构鉴定标准》(T/CECS 252—2019)^[11]中规定值(表3)的对比来评定构件的详细鉴定等级,最后根据详细鉴定评级对相应构件采取处理措施。

表3 火灾后钢结构构件(含连接)按承载能力
评定等级标准^[11]

Table 3 Grade standard for evaluating steel structure components (including connections) according to bearing capacity after fire^[11]

构件类别	$R_f/(\gamma_0 S)$		
	b级	c级	d级
重要构件、连接	≥ 0.95	≥ 0.90	< 0.90
次要构件	≥ 0.92	≥ 0.87	< 0.87

注: R_f 为结构构件火灾后的抗力; S 为作用效应; γ_0 为结构重要性系数,按现行标准的规定取值。

8 结语与展望

本文总结了建筑钢结构火灾后检测与评估方面的国内外研究进展,介绍了建筑钢结构火灾后检测与评估的主要内容,主要包括:了解建筑结构火灾前概况、对建筑火灾后现场调查分析、判定构件及火场经历的最高温度、推断与检测钢材力学性能、测量构件及结构的残余变形、验算构件及结构的剩余承载力。国内外对建筑钢结构火灾后的检测与评估方法研究已经取得了许多重要成果,但目前仍没有完善的体系能够全面准确地评估建筑结构火灾后构件及整体的损伤情况,主要结语及展望如下:

(1) 建筑火灾温度与室内空间大小、布局、通风情况和可燃物数量、种类及堆放状态等各种因素有关。目前,

我国较多使用国际 ISO 834 标准升温曲线计算火场温度,但由于等效曝火时间难以确定,且该曲线模型是理想化模型,由其所计算出来的火场温度与实际火灾温度存在一定偏差,需要进一步研究不同条件下更符合实际情况的火灾空气升温曲线模型。

(2) 我国已有的钢结构鉴定标准中虽然指出了火灾后构件及结构的检测内容与评定程序,但没有具体说明各项检测内容宜采用的检测技术和方法,且鉴定标准中缺乏对火灾后钢结构连接节点的现场检测、鉴定等内容的规定,在今后的研究中有必要进行补充和完善。

(3) 根据火灾中构件所经受的最高温度,按有关研究理论推断钢材力学性能对温度判定的准确度要求较高,且已有研究数据具有一定的离散性。目前火灾后钢材的力学性能主要通过取样拉伸和表面硬度试验方法进行检测。常用的取样拉伸试验方法虽然精度高,但取样会对结构造成损伤,而表面硬度法等非破损或微破损试验方法虽然对结构无损伤或轻微损伤,但精度不如取样方法的精度高。因此如何提高非破损检测或微破损检测的准确度可以作为后续研究的一个重要方向。

(4) 火灾后结构鉴定标准中关于钢结构的内容以定性分析为主,定量计算为辅,并未给出火灾后钢构件及钢结构剩余承载能力的具体计算方法。有待进一步深入研究以建立钢结构火灾后剩余承载力的定量评估方法。

(5) 火灾中受力状态变化引起的应力重分布对未过火区域构件的影响难以准确评定,会对后续评估处理结果产生影响,有必要细化不同类型及功能的钢结构构件损伤分级标准。

参考文献:

- [1] 曹军岭. 钢结构火灾损伤鉴定与加固方法研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2009.
CAO Junling. Research on fire damage identification and reinforcement method of steel structure [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2009. (in Chinese)
- [2] HIJIBIH H A. 火灾损伤建筑物技术鉴定[M]. 冶金部建筑研究总院情报室, 译. 北京: 冶金部建筑研究总院情报室, 1985: 1-53.
HIJIBIH H A. Technical appraisal of fire damaged buildings[M]. The Information Office of the General Institute of Construction Research of the Ministry of Metallurgy, Translate. Beijing: The Information Office of the General Institute of Construction Research of the Ministry of Metallurgy, 1985: 1-53. (in Chinese)
- [3] Concrete Research Institute of the USSR Ministry of Construction. Identification Standard for Concrete Structures After Fire in Buildings [S]. Moscow: State Construction Committee, 1987.
- [4] KIRBY B R, LAPWOOD, D G, THOMSON G. The reinstatement of fire damaged steel and iron framed structures[M].

- London: British Steel Corporation (Corus), 1986: 1-42.
- [5] Concrete Society. Assessment and repair of fire-damaged concrete structures[R]. London: Concrete Society, 1990.
- [6] British Standards Institution (BSI). Structural Use of Steelwork in Building-Part 8: Code of Practice for Fire Resistant Design: BS 5950-8 [S]. London: British Standards Institution, 1998.
- [7] 闵明保, 李延和, 高本立, 等. 建筑物火灾后诊断与处理[M]. 南京: 江苏凤凰科学技术出版社, 1994.
MIN Mingbao, LI Yanhe, GAO Benli, et al. Post-fire diagnosis and treatment of buildings [M]. Nanjing: Phoenix Science Press, 1994. (in Chinese)
- [8] 上海市建设委员会. 火灾后混凝土构件评定标准: DBJ 08-291-96[S]. 上海: 上海市建筑科学研究院有限公司, 1996.
Shanghai Municipal Construction Commission. Criteria of Assessment for Concrete Element After Fire: DBJ 08-291-96[S]. Shanghai: Shanghai Research Institute of Building Sciences Co., Ltd., 1996. (in Chinese)
- [9] 吴波. 火灾后钢筋混凝土结构的力学性能[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 122-170.
WU Bo. Mechanical properties of reinforced concrete structures after fire[M]. Beijing: Science Press, 2003: 122-170. (in Chinese)
- [10] 中国工程建设标准化协会. 火灾后建筑结构鉴定标准: CECS 252: 2009[S]. 北京: 中国计划出版社, 2009.
China Association for Engineering Construction Standardization. Standard for Building Structural Assessment After Fire: CECS 252: 2009 [S]. Beijing: China Planning Press, 2009. (in Chinese)
- [11] 中国工程建设标准化协会. 火灾后工程结构鉴定标准: T/CECS 252—2019[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
China Association for Engineering Construction Standardization. Standard for Appraisal of Engineering Structures After Fire: T/CECS 252—2019[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019. (in Chinese)
- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 民用建筑可靠性鉴定标准: GB 50292—2015[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Standard for Appraisal of Reliability of Civil Buildings: GB 50292—2015 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015. (in Chinese)
- [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 工业建筑可靠性鉴定标准: GB 50144—2019[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Standard for Appraisal of Reliability of Industrial Buildings and Structures: GB 50144—2019 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019. (in Chinese)
- [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 工程结构可靠性设计统一标准: GB 50153—2008[S]. 北京: 中国计划出版社, 2008.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Unified Standard for Reliability Design of Engineering Structures: GB 50153—2008 [S]. Beijing: China Planning Press, 2008. (in Chinese)
- [15] 北京市住房和城乡建设委员会, 北京市市场监督管理局. 火灾后钢结构损伤评估技术规程: DB11T 1727—2020[S]. 北京: 北京城建科技促进会, 2020.
Beijing Municipal Commission of Housing and Urban-Rural Development, Beijing Municipal Bureau of Market Supervision and Administration. Technical Specification for Steel Structure Damage Assessment After Fire: DB11T 1727—2020 [S]. Beijing: Beijing Urban Construction Science Technology Promoting Association, 2020. (in Chinese)
- [16] 福建省住房和城乡建设厅. 火灾后混凝土结构鉴定标准: DBJ/T 13-352—2021[S]. 福州: 福建省住房和城乡建设厅, 2021.
Housing and Urban-Rural Development of Fujian Province. Identification Standard for Assessment of Concrete Structure After Fire: DBJ/T 13-352—2021 [S]. Fuzhou: Housing and Urban-Rural Development of Fujian Province, 2021. (in Chinese)
- [17] 重庆市住房和城乡建设委员会. 火灾后混凝土结构鉴定标准(征求意见稿)[S]. 重庆: 重庆市建筑科学研究院有限公司, 2020.
Housing and Urban-Rural Development of Chongqing. Identification Standard for Concrete Structures After Fire (Draft for Comments) [S]. Chongqing: Chongqing Construction Science Research Institute Co., Ltd., 2020. (in Chinese)
- [18] MARAVEAS C, FASOULAKIS Z, TSAVDARIDIS K D. Post-fire assessment and reinstatement of steel structures[J]. Journal of Structural Fire Engineering, 2017, 8(2): 181-201. DOI: 10.1108/jsfe-03-2017-0028.
- [19] 郝存继. 钢结构建筑火灾现场勘查方法[J]. 消防科学与技术, 2014, 33(7): 842-844. DOI: 10.3969/j.issn.1009-0029.2014.07.036.
- [20] HAO Cunji. The methods of the fire scene investigation on the steel structure buildings [J]. Fire Science and Technology, 2014, 33(7): 842-844. DOI: 10.3969/j.issn.1009-0029.2014.07.036. (in Chinese)
- [20] 杜振煌. 从一起库房火灾事故调查谈钢架金属构件火烧痕迹的实际应用[J]. 消防技术与产品信息, 2014(2): 49-51, 43. DOI: 10.3969/j.issn.1002-784X.2014.02.018.

- DU Zhenhuang. Practical application of fire marks of steel frame metal components from the investigation of a warehouse fire accident [J]. Fire Technology and Product Information, 2014(2): 49-51, 43. DOI: 10.3969/j.issn.1002-784X.2014.02.018. (in Chinese)
- [21] 冯绍攀, 贾占坤, 辛雷, 等. 火灾后钢结构吸收塔可靠性研究[J]. 钢结构, 2018, 33(11): 143-148. DOI: 10.13206/j.gjg.201811026.
- FENG Shaopan, JIA Zhankun, XIN Lei, et al. Research on reliability of steel absorber tower after fire[J]. Steel Construction, 2018, 33(11): 143-148. DOI: 10.13206/j.gjg.201811026. (in Chinese)
- [22] 丁可. 一起火灾事故调查中的若干误区及对策[J]. 消防科学与技术, 2021, 40(7): 1102-1105. DOI: 10.3969/j.issn.1009-0029.2021.07.037.
- DING Ke. Several misconception and countermeasure of a fire investigation[J]. Fire Science and Technology, 2021, 40(7): 1102-1105. DOI: 10.3969/j.issn.1009-0029.2021.07.037. (in Chinese)
- [23] 姚兰, 刘育民, 左勇志, 等. 钢结构工程火灾后性能研究[J]. 四川建筑科学研究, 2014, 40(2): 79-81. DOI: 10.3969/j.issn.1008-1933.2014.02.018.
- YAO Lan, LIU Yumin, ZUO Yongzhi, et al. Research on the behavior of steel structure after the fire[J]. Sichuan Building Science, 2014, 40(2): 79-81. DOI: 10.3969/j.issn.1008-1933.2014.02.018. (in Chinese)
- [24] 侯世恩, 王建刚. 火灾温度的判定方法[J]. 消防科技, 1997, 16(4): 5-9.
- HOU Shi'en, WANG Jiangang. Determination method of fire temperature [J]. Fire Science and Technology, 1997, 16(4): 5-9. (in Chinese)
- [25] 易贤仁. 钢结构火灾后的性能分析与鉴定[J]. 武汉理工大学学报, 2005, 27(1): 54-57. DOI: 10.3321/j.issn:1671-4431.2005.01.017.
- YI Xianren. Analysis and judgment on capability of fired steel structure [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2005, 27(1): 54-57. DOI: 10.3321/j.issn:1671-4431.2005.01.017. (in Chinese)
- [26] International Organization for Standardization. Fire Resistance Tests—Elements of Building Construction: ISO 834 [S]. Switzerland: International Organization for Standardization, 1980.
- [27] 李国强, 韩林海, 楼国彪, 等. 钢结构及钢-混凝土组合结构抗火设计[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006: 25-30.
- LI Guoqiang, HAN Linhai, LOU Guobiao, et al. Fire resistance design of steel structure and steel-concrete composite structure [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2006: 25-30. (in Chinese)
- [28] AZHARI F, HEIDARPOUR A, ZHAO X L, et al. Mechanical properties of ultra-high strength (Grade 1200) steel tubes under cooling phase of a fire: an experimental investigation[J]. Construction and Building Materials, 2015, 93(15): 841-850.
- [29] 张辉, 邹红. 火灾温度与Q235钢晶粒度和硬度关系的研究[J]. 理化检验(物理分册), 2001, 37(9): 384-386. DOI: 10.3969/j.issn.1001-4012.2001.09.005.
- ZHANG Hui, ZOU Hong. Study of the relationship between grain size and hardness of Q235 steel and fire temperature[J]. Physical Testing and Chemical Analysis (Part A: Physical Testing), 2001, 37(9): 384-386. DOI: 10.3969/j.issn.1001-4012.2001.09.005. (in Chinese)
- [30] 陈建锋, 曹平周, 周天华, 等. 钢结构火灾温度推定方法研究[J]. 建筑科学, 2010, 26(9): 67-70, 53. DOI: 10.13614/j.cnki.11-1962/tu.2010.09.017.
- CHEN Jianfeng, CAO Pingzhou, ZHOU Tianhua, et al. Estimation methods of fire temperature for steel structure[J]. Building Science, 2010, 26(9): 67-70, 53. DOI: 10.13614/j.cnki.11-1962/tu.2010.09.017. (in Chinese)
- [31] 陈建锋, 周天华. 高温后结构钢热变色试验[J]. 建筑科学与工程学报, 2013, 30(2): 109-113. DOI: 10.3969/j.issn.1673-2049.2013.02.017.
- CHEN Jianfeng, ZHOU Tianhua. Experiment on thermochromism of structural steel after high temperatures[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2013, 30(2): 109-113. DOI: 10.3969/j.issn.1673-2049.2013.02.017. (in Chinese)
- [32] 陈建锋. 钢结构火灾后安全评估及加固研究[D]. 南京: 河海大学, 2009.
- CHEN Jianfeng. Research on post-fire safety assessment and reinforcement of steel structure[D]. Nanjing: Hohai University, 2009. (in Chinese)
- [33] 周浪, 谢瑜昱, 唐钰, 等. 火灾后钢结构的检测与评定技术研究[J]. 建筑科学, 2011, 27(增刊1): 112-115. DOI: 10.3969/j.issn.1002-8528.2011.z1.037.
- ZHOU Lang, XIE Yuyu, TANG Po, et al. Analysis of detection and inspection for steel structure after fire [J]. Building Science, 2011, 27(Suppl.1): 112-115. DOI: 10.3969/j.issn.1002-8528.2011.z1.037. (in Chinese)
- [34] 马爱民, 张志猛. 火灾后钢结构损伤评估与性能研究[J]. 四川建材, 2015, 41(6): 294-295. DOI: 10.3969/j.issn.1672-4011.2015.06.151.
- MA Aimin, ZHANG Zhimeng. Damage assessment and performance study of steel structure after fire [J]. Sichuan Building Materials, 2015, 41(6): 294-295. DOI: 10.3969/j.issn.1672-4011.2015.06.151. (in Chinese)
- [35] 荣成骁. 结构钢材高温过火后性能研究[D]. 北京: 清华大学, 2018.
- RONG Chengxiao. Study on properties of structural steel after high temperature overfire [D]. Beijing: Tsinghua University, 2018. (in Chinese)
- [36] 丁发兴, 余志武, 温海林. 高温后Q235钢材力学性能试验研究[J]. 建筑材料学报, 2006, 9(2): 245-249. DOI: 10.3969/j.

- issn.1007-9629.2006.02.022.
- DING Faxing, YU Zhiwu, WEN Hailin. Experimental research on mechanical properties of Q235 steel after high temperature treatment[J]. Journal of Building Materials, 2006, 9(2): 245-249. DOI: 10.3969/j.issn.1007-9629.2006.02.022. (in Chinese)
- [37] LU J, LIU H B, CHEN Z H, et al. Experimental investigation into the post-fire mechanical properties of hot-rolled and cold-formed steels [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2016, 121: 291-310. DOI: 10.1016/j.jcsr.2016.03.005.
- [38] REN C, DAI L S, HUANG Y E, et al. Experimental investigation of post-fire mechanical properties of Q235 cold-formed steel [J]. Thin-Walled Structures, 2020, 150: 106651. DOI: 10.1016/j.tws.2020.106651.
- [39] 屈立军, 李焕群, 王跃琴, 等. 国产钢结构用Q345(16Mn)钢高温力学性能的恒温加载试验研究[J]. 土木工程学报, 2008, 41(7): 33-40. DOI: 10.3321/j.issn:1000-131X.2008.07.006.
- QU Lijun, LI Huanqun, WANG Yueqin, et al. Material properties of Q345 (16Mn) steel under loading and constant temperature [J]. China Civil Engineering Journal, 2008, 41(7): 33-40. DOI: 10.3321/j.issn:1000-131X.2008.07.006. (in Chinese)
- [40] CHEN W, YE J H, PENG J X, et al. Experimental investigation of postfire mechanical properties of Q345 and G550 cold-formed steel [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2019, 31(7): 04019116. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002791.
- [41] SHI G, WANG S H, RONG C X. Experimental investigation into mechanical properties of Q345 steel after fire [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2022, 199: 107582. DOI: 10.1016/j.jcsr.2022.107582.
- [42] QU L J, LI H Q. Study on strength of Q420 steel section at elevated temperature [J]. Fire Science and Technology, 2004, 23(3): 223-225 (in Chinese).
- [43] WANG W Y, LIU T Z, LIU J P. Experimental study on post-fire mechanical properties of high strength Q460 steel [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2015, 114: 100-109.
- [44] 李国强, 吕慧宝, 张超. Q690钢材高温后的力学性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2017, 38(5): 109-116. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2017.05.014.
- LI Guoqiang, LYU Huibao, ZHANG Chao. Experimental research on post-fire mechanical properties of Q690 steel [J]. Journal of Building Structures, 2017, 38(5): 109-116. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2017.05.014. (in Chinese)
- [45] WANG M J, LOU G B, LI G Q, et al. Experimental study on mechanical properties of Q690D high strength steel during the cooling stage of fire [J]. Fire Safety Journal, 2022, 132: 103639. DOI: 10.1016/j.firesaf.2022.103639.
- [46] WANG M J, LI Y Z, LI G Q, et al. Comparative experimental studies of high-temperature mechanical properties of HSSs Q460D and Q690D [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2022, 189: 107065. DOI: 10.1016/j.jcsr. 2021. 107065.
- [47] HUANG L, LI G Q, WANG X X, et al. High temperature mechanical properties of high strength structural steels Q550, Q690 and Q890 [J]. Fire Technology, 2018, 54(6): 1609-1628. DOI: 10.1007/s10694-018-0760-9.
- [48] 王卫永, 张艳红, 李翔. 高强Q960钢高温后力学性能试验研究[J]. 建筑材料学报, 2022, 25(1): 102-110. DOI: 10.3969/j.issn.1007-9629.2022.01.015.
- WANG Weiyong, ZHANG Yanhong, LI Xiang. Experimental study on mechanical properties of high strength Q960 steel after high temperature [J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(1): 102-110. DOI: 10.3969/j.issn.1007-9629.2022.01.015. (in Chinese)
- [49] QIANG X H, BIJLAARD F S K, KOLSTEIN H. Post-fire mechanical properties of high strength structural steels S460 and S690 [J]. Engineering Structures, 2012, 35: 1-10. DOI: 10.1016/j.engstruct.2011.11.005.
- [50] CHIEW S P, ZHAO M S, LEE C K. Mechanical properties of heat-treated high strength steel under fire/post-fire conditions [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2014, 98: 12-19. DOI: 10.1016/j.jcsr.2014.02.003.
- [51] LEE J, ENGELHARDT M D, TALEFF E M. Mechanical properties of ASTM A992 steel after fire [J]. Engineering Journal (New York), 2012, 49(1): 33-44. DOI: 10.3744/SNAK.2012.49.1.33.
- [52] GUNALAN S, MAHENDRAN M. Experimental investigation of post-fire mechanical properties of cold-formed steels [J]. Thin-Walled Structures, 2014, 84: 241-254. DOI: 10.1016/j.tws.2014.06.010.
- [53] LI Y Z, WANG M J, LI G Q, et al. Mechanical properties of hot-rolled structural steels at elevated temperatures: a review [J]. Fire Safety Journal, 2021, 119: 103237. DOI: 10.1016/J.firesaf.2020.103237.
- [54] 朱美春, 程亮, 李国强, 等. 钢结构侧面角焊缝高温后力学性能 [J]. 建筑材料学报, 2016, 19(4): 706-711. DOI: 10.3969/j.issn.1007-9629.2016.04.017.
- ZHU Meichun, CHENG Liang, LI Guoqiang, et al. Mechanical behavior of longitudinal fillet welds in steel structures after exposure to elevated temperature [J]. Journal of Building Materials, 2016, 19(4): 706-711. DOI: 10.3969/j.issn.1007-9629.2016.04.017. (in Chinese)
- [55] LOU G B, ZHU M C, LI M, et al. Experimental research on slip-resistant bolted connections after fire [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2015, 104: 1-8. DOI: 10.1016/j.jcsr.2014.09.018.
- [56] LIU H B, LIU D Y, CHEN Z H, et al. Post-fire residual slip resistance and shear capacity of high strength bolted connection [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2017, 138: 65-71. DOI: 10.1016/j.jcsr.2017.06.026.
- [57] 翟传明. 基于TVCC大楼火灾超高层建筑中钢结构损伤评估研究[D]. 天津: 天津大学, 2014.

- ZHAI Chuanming. Research on damage assessment of steel structure in super high-rise building based on TVCC building fire[D]. Tianjin: Tianjin University, 2014. (in Chinese)
- [58] 李松涛. 钢结构的可靠性鉴定与加固方法及其火灾后性能分析[D]. 郑州: 河南工业大学, 2016.
- LI Songtao. Reliability identification and reinforcement method of steel structure and post-fire performance analysis [D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2016. (in Chinese)
- [59] MUÑOZ BLANC C, OBIOL SÁNCHEZ A, FORTEA NAVARRO I. Evaluation of steel structures integrity in a post-fire condition; case study of the serradells sports centre in Andorra [J]. *Fire Safety Journal*, 2022, 133: 103668. DOI: 10.1016/j.firesaf.2022.103668.
- [60] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 钢及钢产品力学性能试验取样位置及试样制备: GB/T 2975—2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Steel and Steel Products—Location and Preparation of Samples and Test Pieces for Mechanical Testing: GB/T 2975—2018[S]. Beijing: Standards Press of China, 2018. (in Chinese)
- [61] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 金属材料拉伸试验 第1部分: 室温试验方法: GB/T 228.1—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
- State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. Metallic Materials—Tensile Testing—Part 1: Method of Test at Room Temperature: GB/T 228.1—2021 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2021. (in Chinese)
- [62] INGHAM J. Forensic engineering of fire-damaged structures[J]. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Civil Engineering*, 2009, 162(5): 12-17. DOI: 10.1680/cien.2009.162.5.12.
- [63] 马隼. 火灾后钢结构的检测与鉴定研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2014.
- MA Yi. Research on detection and identification of steel structure after fire [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2014. (in Chinese)
- [64] International Organization for Standardization. Metallic Materials—Conversion of Hardness Values: EN ISO 18265: 2013[S]. Switzerland: International Organization for Standardization, 2013.
- [65] Materials Testing Committee of the German Institute for Standardization. Testing of Steel and Cast Steel; Conversion Table for Vickers Hardness, Brinell Hardness, Rockwell Hardness and Tensile Strength: DIN 50150 1976[S]. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 1976.
- [66] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 黑色金属硬度及强度换算值: GB/T 1172—1999[S]. 北京: 中国标准出版社, 1999.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Conversion of Hardness and Strength for Ferrous Metal: GB/T 1172—1999[S]. Beijing: Standards Press of China, 1999. (in Chinese)
- [67] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 国家标准化管理委员会. 金属材料 里氏硬度试验 第4部分: 硬度值换算表: GB/T 17394.4—2014[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of China. Metallic Materials—Leeb Hardness Test—Part 4: Tables of Hardness Values Conversion: GB/T 17394.4—2014[S]. Beijing: Standards Press of China, 2014. (in Chinese)
- [68] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 国家市场监督管理总局. 建筑结构检测技术标准: GB/T 50344—2019[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, State Administration for Market Regulation. Technical Standard for Inspection of Building Structure: GB/T 50344—2019[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019. (in Chinese)
- [69] LIU D Z, LIU X Y, FU F, et al. Nondestructive post-fire damage assessment of structural steel members using leeb harness method[J]. *Fire Technology*, 2020, 56(4): 1777-1799. DOI: 10.1007/s10694-020-00954-6.
- [70] 王武刚. 火灾后钢材强度测定方法研究[D]. 长春: 吉林建筑大学, 2016.
- WANG Wugang. Research on strength determination method of steel after fire [D]. Changchun: Jilin Jianzhu University, 2016. (in Chinese)
- [71] 刘红波, 杨德鹏, 王小盾. 火灾后空间结构材料强度无损检测方法研究[J]. *天津大学学报(自然科学与工程技术版)*, 2017, 50(增刊1): 18-26. DOI: 10.11784/tdxbz201704091.
- LIU Hongbo, YANG Depeng, WANG Xiaodun. Research on non-destructive testing method of strength of space structure materials after fire [J]. *Journal of Tianjin University (Science and Technology)*, 2017, 50(Suppl.1): 18-26. DOI: 10.11784/tdxbz201704091. (in Chinese)
- [72] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 国家标准化管理委员会. 钢的成品化学成分允许偏差: GB/T 222—2006[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of China. Permissible Tolerances for Chemical Composition of Steel Products: GB/T 222—2006[S]. Beijing: Standards Press of China, 2006. (in Chinese)
- [73] 国家技术监督局. 钢铁及合金化学分析方法 次磷酸钠还原-碘量法测定砷量: GB/T 223.32-94[S]. 北京: 中国标准出版社, 1994.
- State Bureau of Quality and Technical Supervision of the

- People's Republic of China. Methods for Chemical Analysis of Iron, Steel and Alloy—The Hypophosphite Reduction-Iodimetric Method for the Determination of Arsenic Content: GB/T 223.32-94[S]. Beijing: Standards Press of China, 1994. (in Chinese)
- [74] 强旭红,武念铎,罗永峰,等. 高强钢梁柱外伸式端板节点常温与火灾后性能参数分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2018, 45(5): 62-75. DOI: 10.16339/j.cnki.hdxzbkb.2018.05.008.
QIANG Xuhong, WU Nianduo, LUO Yongfeng, et al. Parametric study on performance of high-strength steel beam-to-column extended endplate connections at ambient temperature and after fire [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2018, 45(5): 62-75. DOI: 10.16339/j.cnki.hdxzbkb.2018.05.008. (in Chinese)
- [75] 强旭红,武念铎,罗永峰,等. 全高强钢端板节点火灾后性能试验[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2017, 45(2): 173-179, 194. DOI: 10.11908/j.issn.0253-374x.2017.02.003.
QIANG Xuhong, WU Nianduo, LUO Yongfeng, et al. Experimental research on post-fire behavior of full high strength steel endplate connections [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2017, 45(2): 173-179, 194. DOI: 10.11908/j.issn.0253-374x.2017.02.003. (in Chinese)
- [76] 江莹. 火灾后方钢管混凝土柱-钢梁连接节点的力学性能分析[D]. 北京:清华大学, 2008.
JIANG Ying. Analysis of mechanical properties of concrete-filled steel tubular column-steel beam connection joint after fire [D]. Beijing: Tsinghua University, 2008. (in Chinese)
- [77] 霍静思. 火灾作用后钢管混凝土柱-钢梁节点力学性能研究[D]. 福州:福州大学, 2005.
HUO Jingsi. Study on mechanical properties of concrete-filled steel tubular column-beam joints after fire [D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2005. (in Chinese)
- [78] 卢杰. 焊接空心球节点空间网格结构火灾后力学性能研究[D]. 天津:天津大学, 2019.
LU Jie. Study on mechanical properties of welded hollow ball node space grid structure after fire [D]. Tianjin: Tianjin University, 2019. (in Chinese)
- [79] LIU H B, TAN Z L, CHEN Z H, et al. Experimental study on residual mechanical properties of bolt-sphere joints after a fire [J]. International Journal of Steel Structures, 2018, 18(3): 802-820. DOI: 10.1007/s13296-018-0029-7.
- [80] 刘东宇. 火灾后螺栓球节点网架结构残余力学性能研究[D]. 天津:天津大学, 2017.
LIU Dongyu. Study on residual mechanical properties of bolted ball joint grid structure after fire [D]. Tianjin: Tianjin University, 2017. (in Chinese)
- [81] JIN M, ZHAO J C, CHANG J, et al. Experimental and parametric study on the post-fire behavior of tubular T-joint [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2012, 70: 93-100. DOI: 10.1016/j.jcsr.2011.07.018.
- [82] 张志猛. 钢结构火灾损伤识别及安全性鉴定研究[D]. 西安:西安工业大学, 2016.
ZHANG Zhimeng. Research on fire damage identification and safety identification of steel structure [D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2016. (in Chinese)
- [83] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 钢结构现场检测技术标准: GB/T 50621—2010[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2010.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Technical Standard for In-Site Testing of Steel Structure: GB/T 50621—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010. (in Chinese)
- [84] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑变形测量规范: JGJ 8—2016[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2016.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for Deformation Measurement of Building and Structure: JGJ 8—2016 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016. (in Chinese)
- [85] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 钢结构设计标准: GB 50017—2017[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2017.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Standard for Design of Steel Structures: GB 50017—2017 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017. (in Chinese)
- [86] 李国强, 宋林昕, 缪嘉荣. 约束高强钢柱受火后轴压剩余承载力试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2020, 41(1): 79-86. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2018.0563.
LI Guoqiang, SONG Linxin, MIAO Jiarong. Experimental study on residual capacities of axially restrained high strength steel columns after fire [J]. Journal of Building Structures, 2020, 41(1): 79-86. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2018.0563. (in Chinese)
- [87] 李国强, 缪嘉荣, 宋林昕. 约束高强钢柱受火后轴压剩余承载力影响参数研究 [J]. 建筑结构学报, 2020, 41(1): 87-94. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2018.0560.
LI Guoqiang, MIAO Jiarong, SONG Linxin. Parametric study on residual capacities of axially restrained high strength steel columns after fire [J]. Journal of Building Structures, 2020, 41(1): 87-94. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2018.0560. (in Chinese)
- [88] SONG L X, LI G Q, WANG Y C. Experimental study on the effects of whole heating cycle on post-fire behavior of restrained high strength structural steel columns [J]. Journal of Building Engineering, 2023, 70: 106385. DOI: 10.1016/j.job.2023.106385.
- [89] 王卫永, 张娟, 李国强. 高强度 Q690 钢柱受火后受力性能试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2020, 41(5): 138-146. DOI:

- 10.14006/j.jzjgxb.2019.0461.
WANG Weiyong, ZHANG Juan, LI Guoqiang. Experimental study on post-fire load capacity of high strength Q690 steel columns[J]. Journal of Building Structures, 2020, 41(5): 138-146. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2019.0461. (in Chinese)
- [90] 张娟. 高强Q690钢焊接截面柱受火后残余应力及受力性能研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2019.
ZHANG Juan. Study on residual stress and stress performance of high-strength Q690 steel welded section column after fire[D]. Chongqing: Chongqing University, 2019. (in Chinese)
- [91] 刘天姿. 高强度Q460钢柱受火后力学性能研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2015.
LIU Tianzi. Study on mechanical properties of high-strength Q460 steel column after fire [D]. Chongqing: Chongqing University, 2015. (in Chinese)
- [92] ZHONG Y K, SUN Y, TAN K H, et al. Post-fire behaviour and residual resistances of S700 high strength steel tubular section stub columns under combined loading [J]. Thin-Walled Structures, 2021, 169: 108275. DOI: 10.1016/j.tws.2021.108275.
- [93] 王新堂, 周明, 王万祯. 约束H型钢柱火灾响应及火灾后力学性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2012, 33(2): 18-25. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2012.02.004.
WANG Xintang, ZHOU Ming, WANG Wanzhen. Experimental study of fire response and post-fire mechanical behavior of restrained H-steel columns after exposure to fire[J]. Journal of Building Structures, 2012, 33(2): 18-25. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2012.02.004. (in Chinese)
- [94] 陈建锋, 周天华, 孙彬生. 轴心受压钢柱火灾后稳定承载力研究[J]. 水资源与水工程学报, 2013, 24(4): 71-73.
CHEN Jianfeng, ZHOU Tianhua, SUN Binsheng. Study on stability bearing capacity of steel column under axial compression after fire [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2013, 24(4): 71-73. (in Chinese)
- [95] BAILEY C G, BURGESS I W, PLANK R J. Analyses of the effects of cooling and fire spread on steel-framed buildings[J]. Fire Safety Journal, 1996, 26(4): 273-293. DOI: 10.1016/S0379-7112(96)00027-6.
- [96] 陈建锋, 周天华. 火灾后钢梁安全稳定承载力研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2013, 11(4): 43-45, 50. DOI: 10.3969/j.issn.1672-1144.2013.04.011.
CHEN Jianfeng, ZHOU Tianhua. Study on stability bearing capacity of steel beam after fire disaster[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2013, 11(4): 43-45, 50. DOI: 10.3969/j.issn.1672-1144.2013.04.011. (in Chinese)
- [97] 杨秀英, 宋杰, 刘永欣. 火灾后约束钢梁的剩余承载力研究[J]. 建筑科学, 2017, 33(3): 119-122. DOI: 10.13614/j.cnki.11-1962/tu.2017.03.020.
YANG Xiuying, SONG Jie, LIU Yongxin. Research on the residual bearing capacity of restraint steel beam after fire [J]. Building Science, 2017, 33(3): 119-122. DOI: 10.13614/j.cnki.11-1962/tu.2017.03.020. (in Chinese)
- [98] 郭小农, 宗绍晗, 于孟同, 等. Q690高强钢梁火灾后承载性能研究[J]. 建筑钢结构进展, 2021, 23(11): 103-111. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2021.11.012.
GUO Xiaonong, ZONG Shaohan, YU Mengtong, et al. The bearing capacity of Q690 high-strength steel beams after fire [J]. Progress in Steel Building Structures, 2021, 23(11): 103-111. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2021.11.012. (in Chinese)
- [99] 刘链波, 王新堂, 周明, 等. 梁端约束H型钢梁-柱节点的火灾后力学性能试验研究[J]. 工业建筑, 2022, 52(9): 153-160. DOI: 10.13204/j.gyjzG22030702.
LIU Lianbo, WANG Xintang, ZHOU Ming, et al. Experimental research on post-fire mechanical properties of H-steel beam to column connection with restraint at beam ends [J]. Industrial Construction, 2022, 52(9): 153-160. DOI: 10.13204/j.gyjzG22030702. (in Chinese)
- [100] 刘链波, 周明, 王新堂. H型钢梁-柱节点火灾后力学性能试验及有限元分析[J]. 工业建筑, 2022, 52(12): 107-112. DOI: 10.13204/j.gyjzG22092306.
LIU Lianbo, ZHOU Ming, WANG Xintang. Mechanical property experiments and finite element analysis of joints between H-steel beams and columns after fire [J]. Industrial Construction, 2022, 52(12): 107-112. DOI: 10.13204/j.gyjzG22092306. (in Chinese)
- [101] 蒋首超, 李国强, 韩兵康, 等. 某钢结构梯架火灾后的性能分析与鉴定[J]. 结构工程师, 2009, 25(1): 124-127. DOI: 10.15935/j.cnki.jggcs.2009.01.016.
JIANG Shouchao, LI Guoqiang, HAN Bingkang, et al. Appraisal on structural safety of a steel frame after fire [J]. Structural Engineers, 2009, 25(1): 124-127. DOI: 10.15935/j.cnki.jggcs.2009.01.016. (in Chinese)
- [102] 范圣刚, 舒赣平, 吕志涛, 等. 火灾后网架结构的加固与修复设计[J]. 工业建筑, 2002, 32(10): 69-71, 68. DOI: 10.3321/j.issn:1000-8993.2002.10.023.
FAN Shenggang, SHU Ganping, LYU Zhitao, et al. Strengthening and renovation design of the space grid structure after fires [J]. Industrial Construction, 2002, 32(10): 69-71, 68. DOI: 10.3321/j.issn: 1000-8993.2002.10.023. (in Chinese)
- [103] 刘振华, 刘艳, 周颖, 等. 火灾后某网架结构的安全性能分析与评价[J]. 钢结构, 2007, 22(7): 89-91. DOI: 10.3969/j.issn.1007-9963.2007.08.026.
LIU Zhenhua, LIU Yan, ZHOU Ying, et al. Analysis and evaluation of safety of a lattice truss structure after fire accident [J]. Steel Construction, 2007, 22(7): 89-91. DOI: 10.3969/j.issn.1007-9963.2007.08.026. (in Chinese)
- [104] 翟传明, 杨光, 傅本钊. 建筑钢结构火灾损伤评估研究综述[J]. 低温建筑技术, 2015, 37(3): 53-55. DOI: 10.13905/j.cnki.dwjz.2015.03.021.
ZHAI Chuanming, YANG Guang, FU Benzhaoh. Review of fire damage assessment of building steel structure [J]. Low Temperature Architecture Technology, 2015, 37(3): 53-55. DOI: 10.13905/j.cnki.dwjz.2015.03.021. (in Chinese)