文章编号:1007-9629(2025)04-0350-08

Q355、Q460和Q690钢材火灾降温阶段 力学性能对比

楼国彪1, 王梦洁1, 李国强1, 蒋彬辉2.*

(1.同济大学 土木工程学院,上海 200092; 2.中南大学 土木工程学院,湖南 长沙 410075)

摘要:基于Q355、Q460和Q690钢材在火灾升温和降温全过程中的力学性能试验结果,对3种钢材火 灾降温阶段的断口形貌和力学性能进行对比分析.结果表明:当最高受热温度在700℃以内时,Q460 和Q690钢材的降温阶段弹性模量折减系数相近,3种钢材屈服强度f_{0.2}折减系数相差较大,屈服强度 f_{2.0}折减系数相近,极限强度折减系数有一定差距;当最高受热温度为800、900℃时,3种钢材降温阶 段弹性模量和屈服强度折减系数相差较大,而极限强度折减系数相差较小;将现有规范推荐的钢材 高温力学性能与3种钢材降温阶段力学性能进行对比得出,现有规范中钢材升温阶段力学性能折减 系数无法系统地预测钢材降温阶段力学性能.

关键词:热轧结构钢;火灾;降温阶段;力学性能;对比分析

中图分类号:TU391;TU317 文献标志码:A **doi:**10.3969/j.issn.1007-9629.2025.04.008

Comparison of Mechanical Properties of Q355, Q460 and Q690 Steel at the Cooling Stage of Fire

LOU Guobiao¹, WANG Mengjie¹, LI Guoqiang¹, JIANG Binhui^{2.*}

College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;
 School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China)

Abstract: Based on the experimental results, the fracture morphology and mechanical properties of Q355, Q460, and Q690 steels during the cooling stage were analyzed and compared. The results show that when the peak heating temperature is below 700 °C, the reduction factors of Young's modulus for Q460 and Q690 steel at the cooling stage are similar. The differences in reduction factor of yield strength $f_{0.2}$ among the three kinds of steels are large, while they are small in that of yield strength $f_{2.0}$ and ultimate strength. At peak heating temperatures of 800 °C or 900 °C, the differences in the reduction factors for Young's modulus and yield strength among Q355, Q460, and Q690 steels at the cooling stage are more pronounced, while the differences in ultimate strength reduction factors are smaller. The high temperature mechanical properties of steel at the cooling stage. The results also show that the reduction factors proposed in the existing specifications cannot predict the mechanical properties of steel at the cooling stage well.

Key words: hot-rolled structural steel; fire; cooling stage; mechanical property; comparative analysis

钢结构由于其优越的抗震性能、便于装配化施工、强度

工、强度高、韧性好且易于连接等诸多优势而在建筑

收稿日期:2024-06-03;修订日期:2024-10-24

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52378547,51908560)

第一作者:楼国彪(1975—),男,浙江东阳人,同济大学副教授,博士生导师,博士.E-mail:gblou@tongji.edu.cn

通讯作者:蒋彬辉(1987-),男,湖南娄底人,中南大学副教授,博士生导师,博士.E-mail:binhuijiang@csu.edu.cn

结构中广泛应用^[1].火灾是建筑结构最常见的危害之一,可能引发建筑结构(尤其是建筑钢结构)的倒塌, 从而导致严重的社会创伤与经济损失^[2].因此,有必 要对钢结构进行抗火分析,其中,钢材在火灾高温下 的力学性能是钢结构抗火研究的基础^[3].真实的火灾 包括升温阶段和降温阶段.在实际火灾中,能够承受 住火灾升温阶段的建筑结构也可能在火灾降温阶段 发生进一步的破坏,甚至倒塌.例如湖南省衡阳市 "11·3"火灾,在火势基本得到控制,正扑灭余火的过 程中,大楼西北侧整体倒塌,导致20名消防官兵殉 职^[4].此外,相关火灾事故和研究表明^[5-6],在火灾降温 阶段,钢梁将产生较大的拉力,可能导致节点被拉断. 因此,有必要研究结构钢材在火灾降温阶段的力学 性能.

目前,关于国产热轧结构钢在火灾升温阶段的 性能已有较多的研究.例如,不同学者对16Mn^[7-8]、 $Q235^{[9]}$, $Q355^{[10-11]}$, $Q460^{[12-13]}$, $Q550^{[14-15]}$, $Q690^{[13, 16-17]}$, Q890^[18]和Q960^[19]等钢材进行了试验研究,结果表 明,钢材的弹性模量和强度均随温度升高而迅速降 低,且不同强度等级和生产工艺对钢材高温力学性 能有影响.然而,目前对于钢材在火灾降温阶段力 学性能的研究较少.Hanus等^[20]对8.8级螺栓和对接 焊缝在升温阶段和降温阶段力学性能的研究结果表 明,在受火后的降温阶段,与升温阶段相同温度点相 比,螺栓和焊缝的强度明显下降.Mushahary等^[21]对 印度钢材E350在升温和降温过程中的力学性能进 行了试验研究,发现当最高受热温度在600℃以内 时,随着温度的下降,钢材的强度基本可以恢复. Chen 等^[22-23]对冷弯型钢 Q345 和 G550 在受火降温阶 段的力学性能进行了试验研究,结果表明,简单地采 用升温阶段的材料模型代替降温阶段是不合适的, 并且不同钢材在降温阶段的力学性能变化规律有所 不同.Azhari等^[24]对超高强钢G1200在受火升温和 降温阶段的蠕变响应及其冷却到室温后的残余强度 进行了研究,但没有测量试件在降温阶段的强度和 弹性模量等力学性能参数.本研究团队对Q355^[25]、 Q460^[26]和Q690^[27]钢材在火灾升温和降温全过程 中的力学性能进行了试验研究,采用降温阶段影响 系数来对比相同加载温度下钢材降温阶段和升温 阶段的力学性能,发现当最高受热温度超过某一温 度后,降温阶段与升温阶段钢材的力学性能有明显 差异.此外,建立了3种钢材降温阶段影响系数的 计算模型和火灾全过程的本构模型.然而,此前的 研究主要关注钢材降温阶段力学性能与其升温阶 段性能的异同,缺乏对不同强度等级钢材降温阶 段力学性能折减系数的对比分析,且现有规范对 钢材升温阶段性能折减系数的推荐值与上述钢材 降温阶段力学性能折减系数之间的差异情况尚不 明确.

本文基于Q355、Q460和Q690钢材在火灾升温 和降温全过程中的力学性能试验结果,对3种钢材在 火灾降温阶段的力学性能进行了对比分析,包括弹 性模量、屈服强度、极限强度和极限应变;并将3种钢 材降温阶段力学性能与国内外现行规范推荐的钢材 高温力学性能进行了对比.

1 试验概况

1.1 试验材料与试件

试验所用试件取自 20 mm 厚 Q355、Q460 和 Q690 钢板,其中 Q355 和 Q460 钢板的生产工艺为 控制轧制,Q690 钢板的生产工艺为调质,3 种钢板 的化学组成(质量分数,文中涉及的组成等均为质 量分数)如表1所示.试件尺寸和形状符合 GB/T 228.2—2015《金属材料 拉伸试验 第2部分:高温试 验方法》的要求,采用的是螺纹头部的圆柱状试件, 试件总长度 112 mm,平行段长度 62 mm,平行段直 径 10 mm,两端为 M16 螺纹.试件方向垂直于钢板 的轧制方向.

表 1 Q355、Q460和Q690钢板的化学组成 Table 1 Chemical compositions(by mass) of Q355, Q460 and Q690 steel plates

Unit:% V Р С \mathbf{S} Nb Ni Steel plate Si Mn Cr Al Mo Тi Cu Q355 0.170 0.280 1.320 0.014 0.006 0.040 0.0340.014 0.0020.080 0.0180.030 0.002 Q460 0.180 0.260 1.350 0.013 0.002 0.050 0.040 0.080 0.0020.080 0.025 0.015 0.002 **Q**690 0.1600.280 1.320 0.016 0.003 0.040 0.030 0.010 0.005 0.010 0.023 0.0370.002

1.2 试验装置

试验在中南大学火灾实验室完成.所用仪器为 300 kN高温电子万能试验机,横梁行程为1100 mm, 横梁移动速度调节范围为0.001~500 mm/min.试验 采用对开式大气高温炉,分上、中、下三段单独进行 控制加热,最高试验温度为1100℃,配置3支热电偶 以实时采集试件温度.采用Epsilon 3448高温引伸计 测量试件变形.

1.3 试验方案

采用稳态试验方法,试验参数参考GB/T 228.2— 2015标准选取.试验过程如下:首先将试件升温至最 高受热温度(t_p),升温速率为20℃/min,并在该温度 下恒温15 min使得试件温度分布均匀;然后将试件 降温至加载温度(t_i),降温速率为8℃/min,并在加载 温度下恒温15 min;最后,在加载温度下,对试件进行 加载,加载方式采用位移控制,加载速度为0.31 mm/min (对应应变加载速率0.005/min).最高受热温度和加 载温度均设为20、200、300、400、500、600、700、800、 900℃.以工况H7C3表示最高受热温度为700℃、加 载温度为300℃,其余类推.另以符号R代表常温.每 种工况下都进行了2~4组重复试验,保证每种工况 下至少有2组有效数据.试验过程中采用热电偶实时 测量试件温度.

2 降温阶段性能对比

本节对比Q355、Q460和Q690钢材降温阶段试 验后的断口形貌及力学性能,包括弹性模量(E)、屈 服强度(f_{0.2}和f_{2.0})、极限强度(f_u)和极限应变(ε_u).其 中,f_{0.2}是残余应变达到0.2%时的应力,f_{2.0}是整体应 变达到2.0%时的应力.引入折减系数k表征火灾升、 降温阶段力学性能的变化规律,其定义为钢材在升、 降温阶段的力学性能参数与常温状态下的比值.通 过对3种钢材降温阶段力学性能试验结果进行分析, 发现当最高受热温度不超过700℃时,不同最高受热 温度下钢材的力学性能随加载温度的变化趋势大致 相同,且在相同加载温度下钢材k值相差较小.然而, 当最高受热温度达到800、900℃时,钢材的力学性能 变化趋势出现明显差异,其k值也发生明显变化.

因此,在对比3种钢材降温阶段力学性能时,本 文将其分为2个部分进行:(1)当最高受热温度不超 过700℃时,将每种钢材在相同加载温度、不同最高 受热温度下的折减系数取均值,通过对比折减系数 的均值分析其降温阶段力学性能的异同;(2)当最高 受热温度为800、900℃时,直接将3种钢材力学性能 的试验结果进行对比.

此外,本节还采用相对差值(绝对差值与平均值 的百分比)来定量分析不同钢材之间力学性能折减 系数的差异.

2.1 断口形貌

通过对Q355、Q460和Q690钢材降温阶段试验 后试件的断口形貌进行观察和总结发现:(1)加载温 度对3种钢材试件断口形貌的影响较大,而最高受热 温度对其影响较小;整体而言,加载温度越高,断口 颜色越深,颈缩现象越显著,断口面积越小;3种钢材 试件断口颜色相近,当加载温度为200℃时断口基本 呈灰白色,300℃时大多呈蓝色或蓝紫色,400℃时呈 灰蓝色,超过500℃后呈灰黑色.(2)3种钢材试件的 断口形状有所不同.Q355和Q690钢材的断口形貌相 似,当加载温度不超过400℃时,试件断口呈杯锥状, 沿45°方向,当加载温度超过700℃后,断口面积显著 减小,近似呈1个点;对于Q460钢材,当加载温度不 超过400℃时,试件断口呈椭圆状,大部分沿45°方向 断裂,且随着加载温度的升高,断口面积减小,呈一 条短线.

2.2 弹性模量

图 1 为 Q355、Q460 和 Q690 钢材降温阶段弹性 模量折减系数对比.从图 1(a)可以看出:当最高受热 温度不超过700℃时,Q460 和 Q690 钢材降温阶段弹 性模量折减系数相近,平均相对差值为5.8%;当加载 温度超过300℃后,Q460 和 Q690 钢材弹性模量折减 系数明显大于Q355 钢材,平均相对差值分别为 26.8%、29.7%;整体而言,当最高受热温度在700℃ 以内时,其对Q355 和 Q690 钢材降温阶段弹性模量 影响较小,而对Q460 钢材影响较大.由图1(b)可见:





当最高受热温度为800、900℃时,Q460钢材弹性模量折减系数明显大于Q355钢材;当加载温度在400℃以内时,Q690钢材折减系数明显小于Q460钢材;当加载温度超过400℃时,Q690钢材折减系数明显大于Q355钢材.

2.3 屈服强度

2.3.1 屈服强度 f_{0.2}

图 2为Q355、Q460和Q690钢材降温阶段屈服 强度 $f_{0.2}$ 折减系数对比.从图 2(a)可以看出:当最高受 热温度在700 ℃以内时,3种钢材的 $f_{0.2}$ 折减系数数值 相差较大,其中Q690钢材最大,Q460钢材次之, Q355钢材最小,Q690和Q460钢材的平均相对差值 为15.1%,Q690和Q355钢材的平均相对差值为 28.3%;除了加载温度为200℃时外,最高受热温度 对Q355、Q460和Q690钢材降温阶段 $f_{0.2}$ 影响较小. 由图2(b)可见:当最高受热温度为800℃时,Q355和 Q460钢材降温阶段 $f_{0.2}$ 折减系数相差较小,并且当加 载温度在400℃以内时小于Q690钢材,而在加载温 度为500℃时大于Q690钢材;当最高受热温度为 900℃,加载温度在400℃以内时,Q690钢材 $f_{0.2}$ 折减 系数整体大于Q355和Q460钢材,当加载温度超过 400℃后,Q355和Q460钢材 $f_{0.2}$ 折减系数相近.



Fig. 2 Comparison of reduction factors of $f_{0,2}$ for Q355, Q460, and Q690 steel at the cooling stage

2.3.2 屈服强度 f_{2.0}

图 3 为 Q355、Q460 和 Q690 钢材降温阶段屈 服强度 f₂₀ 折减系数对比.如图 3(a)所示:当最高 受热温度在 700 ℃以内时,3种钢材降温阶段 f₂₀ 折 减系数相近,平均相对差值为 5.7%,并且最高受 热温度对 Q355 钢材降温阶段屈服强度 f₂₀影响较 小,而对Q460和Q690钢材降温阶段屈服强度 $f_{2.0}$ 影响较大.由图3(b)可见:当最高受热温度为800、900℃时,Q460钢材 $f_{2.0}$ 折减系数整体小于Q355钢材,平均相对差值超过10.0%;当加载温度在300℃以内时,Q690钢材 $f_{2.0}$ 折减系数大于Q355和Q460钢材.





2.4 极限强度

图 4 为 Q355、Q460 和 Q690 钢材降温阶段极限 强度 f_u折减系数对比.从图 4(a)可以看出:当最高受 热温度在 700 ℃以内,加载温度不超过 400 ℃时, Q355和Q460钢材的f_a折减系数相近,并且明显大于 Q690钢材;当加载温度超过400℃后,Q460和Q690 钢材的f_a折减系数相近,并且大于Q355钢材;当最高 受热温度在700℃以内时,最高受热温度对Q355钢 材降温阶段极限强度影响较小,而对Q460和Q690 钢材影响较大.由图4(b)可见:当最高受热温度为 800、900℃,且加载温度超过400℃时,3种钢材ƒ。降 温阶段极限强度折减系数相近,当加载温度在400℃ 以内时,Q690钢材f_a折减系数较大,Q355钢材居中, Q460钢材最小.



图 4 Q355、Q460 和 Q690 钢材降温阶段极限强度折减系数对比 Fig. 4 Comparison of reduction factors of *f*_u for Q355, Q460, and Q690 steel at the cooling stage

2.5 极限应变

图 5 为 Q355、Q460 和 Q690 钢材降温阶段极限 应变 ε_u折减系数对比.由图 5(a)可见:当最高受热温 度在 700 ℃以内时,3种钢材降温阶段 ε_u的变化趋势 相近,但是折减系数有明显差异,平均相对差值为 38.4%.由图 5(b)可见:当最高受热温度为 800、 900 ℃时,3种钢材 ε_a变化趋势和折减系数均明显不 同,平均相对差值为 69.1%.



Fig. 5 Comparison of reduction factors of ultimate strain for Q355, Q460, and Q690 steel at the cooling stage

2.6 机理分析

根据金属热处理原理,不同温度下钢材力学性 能不同主要是由于钢材的微观组织在加热和冷却过 程中发生变化引起的^[28].Q355、Q460和Q690钢材降 温阶段力学性能的差异主要由钢材的微观结构、合 金元素含量、晶粒尺寸、再结晶行为、强化机制和生 产工艺等因素共同决定^[29].例如,强度等级更高的钢 材通常含有更高的合金元素含量、较细小的晶粒、更 复杂的强化机制和严格的生产工艺,这些因素可以 使钢材在常温下具有更高的强度.然而高温下这些 因素有不同的作用机制,进而导致不同强度等级的 钢材在高温下的力学性能也有明显的差异.当最高 受热温度达到 800、900 ℃时,Q355、Q460和Q690钢 材降温阶段力学性能差异明显增大,这与钢材在升 温和降温过程中钢材微观组织的变化密切相关.在 升温阶段,当温度升高至一定范围内时(727~ 910℃),钢材微观组织会发生变化,如铁素体或珠光 体开始转变为奥氏体,进而导致钢材力学性能发生 明显变化^[30];在随后的降温过程中,奥氏体会随着温 度的降低转变为其他组织,如珠光体、贝氏体或马氏 体等,这与降温方法和降温速率有关^[31].因此,在升温 和降温过程中,钢材的力学性能有显著变化,尤其是 当最高受热温度达到800、900℃时.

3 与规范对比

本文将试验所得的Q355、Q460和Q690钢材降 温阶段力学性能折减系数与各国规范推荐值进行对 比,包括欧洲规范EC3^[32]和ECCS^[33],美国规范 AISC^[34]和ASCE^[35],澳大利亚规范AS4100^[36],英国 规范BS5950^[37]和中国规范GB51249^[38].当最高受热 温度不超过700℃时,将钢材在相同加载温度、不同 最高受热温度下的折减系数取均值,与规范推荐值 进行对比;当最高受热温度为800、900℃时,直接将 试验结果与规范推荐值进行对比.并采用相对误差 来定量分析钢材力学性能与各国规范推荐值的差 异,相对误差为规范推荐值与试验值的绝对差值与 试验值的比值.

3.1 弹性模量

图1展示了3种钢材降温阶段弹性模量折减系数与不同规范推荐值的对比.整体而言,当最高受热温度在700℃以内时,规范AS4100、AISC和GB51249推荐值与3种钢材降温阶段弹性模量折减系数的试验值相差最小,平均相对误差约为10.7%;其他规范推荐值整体小于试验值,平均相对误差约为26.0%;当最高受热温度为800、900℃时,现有规范推荐值无法较好预测Q355、Q460和Q690钢材降温阶段弹性模量折减系数,平均相对误差分别为62.9%、23.7%和33.8%.

3.2 屈服强度

不同规范中采用了不同定义的名义屈服强度, BS5950采用的是残余应变达到 0.5%、1.0%、1.5% 时的应力 $f_{0.5}$ 、 $f_{1.0}$ 和 $f_{1.5}$, ASCE采用的是 $f_{0.2}$, ECCS 在 400 ℃以上取 $f_{0.5}$, GB51249 为 $f_{1.0}$, EC3 和 AISC 均为 $f_{2.0}$, AS4100则并未说明.现有研究表明, 屈服强度 $f_{0.2}$ 与 $f_{0.5}$ 的折减系数相近; 屈服强度 $f_{1.0}$ 、 $f_{1.5}$ 和 $f_{2.0}$ 的折减系 数相近.目前, 屈服强度 $f_{0.2}$ 和 $f_{2.0}$ 应用较为广泛, 因此 本文将对这 2种名义屈服强度的折减系数与规范值 进行对比.

3.2.1 屈服强度 f_{0.2}

图 2 展示了 3 种钢材降温阶段 $f_{0.2}$ 折减系数与不同规范推荐值的对比.整体而言,当最高受热温度不超过 700 °C时,规范 ASCE 和 BS5950 分别能够较好地预测 Q355 和 Q460 钢材降温阶段屈服强度 $f_{0.2}$,平均相对误差分别为 5.2% 和 6.3%,然而对于 Q690 钢材,现有规范整体偏于保守,平均相对误差约为 22.5%.当最高受热温度为 800、900 °C时,现有规范均无法较好地预测 3 种钢材的 $f_{0.2}$,平均相对误差均大于 38.3%.

3.2.2 屈服强度 f_{2.0}

图 3 展示了 3 种钢材降温阶段屈服强度 f₂₀折减 系数与不同规范推荐值的对比.整体而言,当最高受 热温度不超过 700 ℃时,规范 GB51249 能够相对更 好地预测 Q355、Q460 和 Q690 钢材降温阶段屈服强 度 $f_{2.0}$,平均相对误差分别为10.1%、6.2%和5.2%.当 最高受热温度为800、900℃时,现有规范均无法较好 地预测3种钢材的屈服强度 $f_{2.0}$,平均相对误差均大于 36.5%.

3.3 极限强度

图4展示了3种钢材降温阶段极限强度折减系 数与AISC推荐值的对比.由图4可见:当最高受热 温度在700℃以内,加载温度不超过300℃时,规范 AISC推荐值与试验值相近;而当加载温度超过 300℃或最高受热温度达到800、900℃时,规范AISC 推荐值整体大于试验值,偏于不保守.整体而言,现 有规范无法较好预测3种钢材降温阶段极限强度,当 最高受热温度不超过700℃时,平均相对误差为 21.9%,当最高受热温度为800、900℃时,平均相对 误差为47.2%.

4 结论

(1)对于钢材在火灾降温阶段的弹性模量,当最 高受热温度在700℃以内时,Q460和Q690钢材折减 系数相近;当最高受热温度为800、900℃时,3种钢材 折减系数差异较大.

(2)对于钢材在火灾降温阶段的屈服强度*f*_{0.2},当 最高受热温度在700℃以内时,3种钢材的屈服强度 *f*_{0.2}折减系数数值相差较大,其中以Q690钢材最大, Q460钢材次之,Q355钢材最小;当最高受热温度为 800、900℃时,Q355和Q460钢材折减系数相对差值 较小.

(3)对于钢材在火灾降温阶段的屈服强度*f*_{2.0},当 最高受热温度在700℃以内时,3种钢材折减系数相 近;当最高受热温度为800、900℃时,Q460钢材折减 系数整体小于Q355钢材.

(4)对于钢材在火灾降温阶段的极限强度,当最 高受热温度在700℃以内,加载温度在400℃以内 时,Q690钢材折减系数较小,加载温度超过400℃ 后,Q355钢材折减系数较小;当最高受热温度为 800、900℃,且加载温度超过400℃时,3种钢材折减 系数相近.

(5)对于钢材在火灾降温阶段的极限应变,当最 高受热温度在700 ℃以内时,3种钢材降温阶段极限 应变的变化趋势整体相近,但是折减系数有明显差 异;当最高受热温度为800、900 ℃时,3种钢材降温阶 段极限应变变化趋势和折减系数均明显不同.

(6)当最高受热温度在700℃以内时,规范 ASCE、BS5950和GB51249可以相对较好地预测钢 材降温阶段的屈服强度f_{0.2}或f_{2.0},但其他规范与试验 值相差较大;且现有规范无法较好地预测钢材降温 阶段的弹性模量和极限强度.当最高受热温度达到 800、900℃时,所有规范推荐值与试验值的相对误差 均较大.因此,国内外现有规范针对普通钢提出的升 温阶段高温力学性能折减系数无法系统地预测 Q355、Q460和Q690钢材在火灾降温阶段的力学 性能.

参考文献:

- [1] 王卫永,李国强.高强钢结构抗火设计理论研究进展[J].工业 建筑,2016,46(7):61-67.
 WANG Weiyong, LI Guoqiang. Research progress of fire resistance design theory of high strength steel structures [J]. Industrial Construction, 2016, 46(7):61-67. (in Chinese)
- 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.
- [3] 冯程远,李国强,蒋彬辉.钢材高温材性模型对火灾下钢框架 结构倒塌模拟的影响研究[J].工程力学,2019,36(12): 24-36,78.

FENG Chengyuan, LI Guoqiang, JIANG Binhui. The influence of high-temperature material model of steel on the simulation of collapse of steel frame structure under fire [J]. Engineering Mechanics, 2019, 36(12):24-36,78. (in Chinese)

[4] 邸小坛, 史毅, 周燕. 衡州大厦坍塌原因分析[J]. 工程质量, 2004
(3): 36-38.
DI Xiaotan, SHI Yi, ZHOU Yan. Analysis of the causes of the

collapse of the Hengzhou building[J]. Construction Quality, 2004 (3):36-38. (in Chinese)

[5] 王银志.考虑结构整体性的组合梁抗火性能研究[D].上海:同 济大学,2006.

WANG Yinzhi. Behavior and design of composite beam in fire with considering global structure effect[D]. Shanghai: Tongji University, 2006. (in Chinese)

[6] 吕俊利.整体钢框架中梁柱抗火性能的研究[D].哈尔滨:哈尔 滨工业大学,2013.

LÜ Junli. Study of fire resistance of beam and column in the overall steel frame[D]. Harbin:Harbin Institute of Technology, 2013. (in Chinese)

- [7] 屈立军,李焕群,王跃琴.Q345(16Mn)钢在恒温加载条件下的应力-应变曲线和弹性模量[J].火灾科学,2009,18(4):187-191.
 QU Lijun, LI Huanqun, WANG Yueqin. Stress-strain relationship and modulus of elasticity of 16Mn steel under loading and constant temperature[J]. Fire Safety Science, 2009, 18(4): 187-191. (in Chinese)
- [8] 褚新颖,谢飞.结构用钢(16Mn)恒载加温试验研究[J].火灾科 学,2014,23(2):122-128.

CHU Xinying, XIE Fei. Research on steel structural 16Mn by heating tests under constant loads[J]. Fire Safety Science, 2014, 23(2):122-128. (in Chinese)

- [9] 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.
 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. (in Chinese)
- [10] 李国强,陈凯,蒋首超,等.高温下Q345钢的材料性能试验研究
 [J].建筑结构,2001(1):53-55.
 LI Guoqiang, CHEN Kai, JIANG Shouchao, et al. Experimental study on the material properties of Q345 steel at elevated temperatures[J]. Building Structure, 2001(1):53-55. (in Chinese)
- [11] 屈立军,李焕群.国产Q345钢在不同热-力路径下的材料性能 对比和材料模型应用[J].火灾科学,2010,19(1):19-26.
 QU Lijun, LI Huanqun. Comparison of mechanical behavior of 16Mn steel and application of material models under different stress-temperature paths[J]. Fire Safety Science, 2010, 19(1): 19-26. (in Chinese)
- [12] 王卫永,刘兵,李国强.高强度Q460钢材高温力学性能试验研究[J].防灾减灾工程学报,2012,32(增刊1):30-35.
 WANG Weiyong, LIU Bing, LI Guoqiang. Experimental study on mechanical properties of Q460 high strength steel at elevated temperature[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2012, 32(Suppl 1):30-35. (in Chinese)
- [13] 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.
- [14] 宋林昕,李国强. 控轧控冷型高强钢高温下的力学性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2021, 54(2):84-92.
 SONG Linxin, LI Guoqiang. Experimental study on mechanical properties of TMCP high strength steel at elevated temperatures
 [J]. China Civil Engineering Journal, 2021, 54(2):84-92. (in Chinese)
- [15] 李国强,赵忆冬,张超,等.国产Q550、Q690、Q890高强钢材高 温热膨胀系数研究[J].钢结构,2018,33(3):108-112.
 LI Guoqiang, ZHAO Yidong, ZHANG Chao, et al. Research on the coefficient of thermal expansion of domestic Q550, Q690, Q890 high strength structural steel[J]. Steel Structure, 2018,33 (3):108-112. (in Chinese)
- [16] 李国强,黄雷,张超.国产Q690高强钢高温下力学性能试验研究[J].建筑结构学报,2020,41(2):149-156.
 LI Guoqiang, HUANG Lei, ZHANG Chao. Experimental research on mechanical properties of domestic high strength steel Q690 at elevated temperatures[J]. Journal of Building Structures, 2020, 41(2):149-156. (in Chinese)
- [17] 王康.高强度Q690钢材高温力学性能研究[D].重庆:重庆大学,2016.
 WANG Kang. Experimental study on mechanical properties of high strengthQ690 steel at elevated temperatures[D]. Chongqing:
- Chongqing University, 2016. (in Chinese)
 [18] 李国强,黄雷,张超.国产超高强钢Q890高温力学性能试验[J].
 建筑科学与工程学报, 2018, 35(3):1-6.

LI Guoqiang, HUANG Lei, ZHANG Chao. Experiment on

mechanical properties of domestic ultra-high strength steel Q890 at elevated temperatures [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2018, 35(3):1-6. (in Chinese)

- [19] 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.
 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. (in Chinese)
- [20] HANUS F, ZILLI G, FRANSSEN J M. Experimental tests and analytical models for welds and grade 8.8 bolts under heating and subsequent cooling[J]. Journal of Structural Fire Engineering, 2011, 2(3):181-194.
- MUSHAHARY S K, SINGH K D, JAYACHANDRAN S A. Mechanical properties of E350 steel during heating and cooling[J]. Thin-Walled Structures, 2021, 160:107351.
- [22] CHEN W, YE J H, JIN L, et al. High-temperature material degradation of Q345 cold-formed steel during full-range compartment fires[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2020, 175:106366.
- [23] CHEN W, LIU K, YE J H, et al. High-temperature steady-state experiments on G550 cold-formed steel during heating and cooling stages[J]. Thin-Walled Structures, 2020, 151:106760.
- [24] 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, 93:841-850.
- [25] JIANG B H, QU Y Q, WANG M J, et al. Mechanical properties of Q355 hot-rolled steel during the entire fire process[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2024, 215:108565.
- [26] JIANG B H, QU Y Q, WANG M J, et al. Mechanical properties and constitutive model of Q460 steel during the fire-cooling stage [J]. Thin-Walled Structures, 2023, 189:110904.
- [27] 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.
- [28] 崔忠圻,刘北兴.金属学与热处理原理[M].哈尔滨:哈尔滨工 业大学出版社,2017:173-208.

CUI Zhongqi, LIU Beixing. Principles of metallurgy and heat treatment[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2017:173-208. (in Chinese)

- [29] BHADESHIA H K D H, HONEYCOMBE R W K. Steels: Microstructure and properties [M]. 3rd ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2006:167-181.
- [30] DING F X, LAN L F, YU Y J, et al. Experimental study of the effect of a slow cooling heat treatment on the mechanical properties of high strength steels[J]. Construction and Building Materials, 2020, 241:118020.
- [31] TRZASKA J, DOBRZANSKI L A. Modelling of CCT diagrams for engineering and constructional steels[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 192-193(1-7):504-510.
- [32] European Committee for Standardization. Eurocode 3: Design of steel structures—Part 1-2: General rules—Structural fire design: EN 1993-1-2: 2005 [S]. Brussels: European Committee for Standardization, 2005.
- [33] ECCS Technical Committee 3. European recommendations for the fire safety of steel structures: Calculation of the fire resistance of load bearing elements and structural assemblies exposed to the standard fire [S]. Amsterdam: European Convention for Constructional Steelwork, 1983.
- [34] American Institution of Steel Construction. Specification for structural steel buildings: ANSI/AISC 360-16 [S]. Chicago: American Institution of Steel Construction, 2016.
- [35] American Society of Civil Engineers. ASCE structural fire protection[S]. New York: American Society of Civil Engineers, 1992.
- [36] Standards Australia. Steel structures: AS 4100;2020[S]. Sydney: Standards Australia, 2020.
- [37] British Standards Institution. Structural use of steelwork in building-Part 8: Code of practice for fire restraint design: BS 5950-8:2003[S]. London:British Standards Institution, 2003.
- [38] 中华人民共和国住房和城乡建设部.建筑钢结构防火技术规范: GB51249—2017[S].北京:中国建筑工业出版社,2018.
 Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People' s Republic of China. Code for fire protection of steel structures in buildings:GB51249—2017[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2018. (in Chinese)