

文章编号:1673-2049(2018)03-0001-06

国产超高强钢 Q890 高温力学性能试验

李国强^{1,2}, 黄 雷², 张 超²

(1. 同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092; 2. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

摘要:通过稳态拉伸试验法对国产超高强钢 Q890 在不同火灾高温条件下的力学性能进行了试验研究,得到高温下钢材的力学性能参数、应力-应变关系曲线和试验现象,并将所得试验结果与钢结构抗火设计规范及相关超高强钢研究文献中高温材料模型结果进行比较。分别采用多项式模型和钢材高温通用材料模型对试验结果进行数值拟合,建立高温下 Q890 钢力学性能参数的材料模型。结果表明:不同温度条件下的 Q890 钢试件在试验后有明显不同的外观特征,相应的应力-应变关系曲线基本形状差异较大;当受热温度低于 500 ℃ 时,弹性模量和强度随温度升高逐步减小,断后伸长率变化不大;超过 500 ℃ 后,弹性模量和强度下降速率明显加快,断后伸长率急剧增大;所建立的模型为研究 Q890 钢结构抗火性能及其计算方法提供理论基础。

关键词:国产超高强钢;高温;稳态试验;力学性能;材料模型

中图分类号:TU391 **文献标志码:**A

Experiment on Mechanical Properties of Domestic Ultra-high Strength Steel Q890 at Elevated Temperatures

LI Guo-qiang^{1,2}, HUANG Lei², ZHANG Chao²

(1. State Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;
2. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: By steady-state test, an experimental study was conducted on the mechanical properties of domestic ultra-high strength steel Q890 under different fire temperature. The mechanical properties, stress-strain curves and experimental phenomena at elevated temperatures were obtained. The experimental results were compared with high temperature material models determined by fire resistant design of steel structures and literature on ultra-high strength steel. In order to obtain the mathematical models for mechanical properties of Q890 at elevated temperature, polynomial model and high temperature material model proposed by National Institute of Standards and Technology were employed for fitting the experiment data. The results show that the specimens with different temperatures have different appearance characteristics after the tests and different basic shapes of stress-strain curves. When the temperature is below 500 ℃, the elastic modulus and strength slightly decrease, and the elongation changes little. When the temperature is over 500 ℃, the declines of elastic modulus and strength obviously accelerate, and the elongation increases rapidly. The material models can be used for fire resistance of Q890 steel structure.

Key words: domestic ultra-high strength steel; high temperature; steady-state test; mechanical

收稿日期:2017-10-12

基金项目:国家自然科学基金项目(51508399)

作者简介:李国强(1963-),男,湖南株洲人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:gqli@tongji.edu.cn。

property; material model

0 引言

随着冶金制造工艺的发展及一大批重点工程的兴建,高强钢越来越广泛地应用于建筑工程中^[1-3]。作为高强钢结构抗火设计的理论基础,高强钢高温力学研究也随之得到各国学者的重视。Qiang 等^[4-8]对欧洲高强钢 S460N, S690 和超高强钢 S960 进行了试验研究,发现钢材高温力学性能受钢材等级和加工方法影响很大,且各国现行规范并不适用于其所研究的钢材。Chiew 等^[9]研究了经由淬火和回火工艺得到的 RQT-S690 钢的高温力学性能,发现当温度低于 400 ℃时钢材力学性能并未发生明显变化,温度超过 400 ℃后其强度急剧下降而延性增加。

在中国,李国强等^[10]对 10.9 级高强度螺栓常用的 20MnTiB 钢材进行了高温下的材料性能试验,根据试验结果提出了相关力学参数的高温模型,并将之与其他国家推荐的高温钢材模型进行比较,发现各国所指定的高温下钢材的材料模型有较大差异。王卫永等^[11-12]通过对国产高强钢 Q460 的研究发现, Q460 钢在高温下的力学性能与普通钢差别较大,强度和弹性模量随温度升高降低较慢。

由于生产工艺以及化学组成的不同,不同高强钢高温力学性能存在明显差异。本文对国产超高强钢 Q890 高温力学性能进行试验研究,建立 Q890 钢高温材料模型,为研究 Q890 钢结构抗火性能及其计算方法提供理论支持。

1 试验概况

1.1 试验设备

试验仪器采用同济大学工程结构抗火实验室的 300 kN 高温电子材料试验机,如图 1 所示。试验机



图 1 试验仪器

Fig. 1 Testing Machine

加载速率可控制在 0.001~250 mm·min⁻¹ 之间,高温炉工作温度范围为 200~1 100 ℃,最小分辨率为 0.1 ℃。高温试验中由绑扎于试件中部的热电偶来测量及控制试件温度,并由精度为 0.001 mm 的接触式高温引伸计测量试件变形。

1.2 试验方法

试验采用稳态试验法。试验温度点包括 20(常温), 200, 300, 400, 450, 500, 550, 600, 700, 800 ℃。常温下进行 3 个试件测量,其余每个温度点下进行 2 个试件测量。试验加载采用应变速率控制,常温加载应变速率为 0.015 min⁻¹,高温加载应变速率为 0.003 min⁻¹,分别满足 GB/T 228.1—2010^[13]和 GB/T 4338—2006^[14]要求。

1.3 试验材料和试件设计

本试验所有试件均采用国产 Q890 钢板制作,板厚 20 mm,其化学成分见表 1。试件的形状和尺寸符合 GB/T 228.1—2010 和 GB/T 4338—2006 要求,如图 2 所示。

表 1 Q890 钢板化学成分

Tab. 1 Chemical Constitution of Q890 Steel Plate

化学成分	C	Si	Mn	P	S	Cr	Al	Mo	Ti	Cu	Nb	Ni	V
质量分数/%	0.160	0.330	1.250	0.110	0.002	0.270	0.041	0.560	0.017	0.020	0.021	0.110	0.048

2 试验结果与分析

2.1 试验现象

图 3 为不同温度下 Q890 钢试件破坏状况。由图 3 可知,试件在常温试验后表面为灰白色;200 ℃时,表面呈现金黄色金属光泽;300 ℃时表面颜色变化明显,为蓝色;400 ℃和 450 ℃时表面转为墨绿

色;500 ℃和 550 ℃时表面为黑色,局部为棕红色;600 ℃时试件通长呈现棕红色;700 ℃和 800 ℃时表面为深灰色,且 800 ℃时试件氧化膜剥落现象严重,表面粗糙。

2.2 应力-应变关系曲线

图 4 为不同温度 T 时 Q890 钢的应力-应变关系曲线。从图 4 可以看出, Q890 钢在常温时有一极

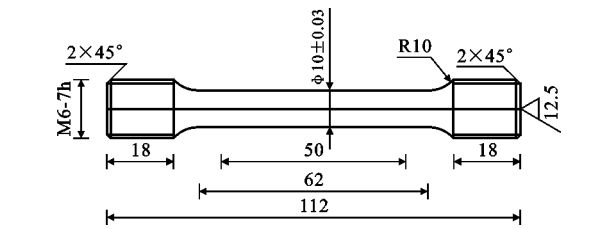


图 2 试件尺寸(单位:mm)

Fig. 2 Size of Specimens(Unit:mm)



图 3 不同温度下 Q890 钢试件破坏状况

Fig. 3 Failure Modes of Q890 Steel Specimens at Various Temperatures

短的屈服平台,高温下平台消失。随温度升高,曲线初始直线段缩短,强化段结束更早,而下降段逐步变得平缓。

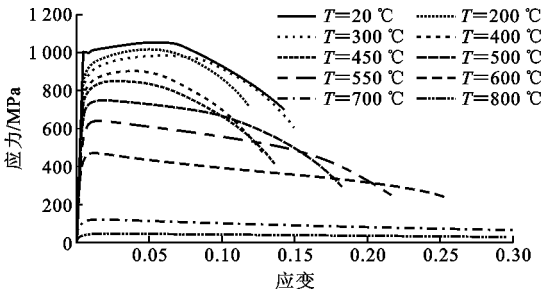


图 4 不同温度时 Q890 钢应力-应变关系曲线

Fig. 4 Stress-strain Curves of Q890 Steel at Various Temperatures

2.3 力学参数

表 2 给出了 Q890 钢高温力学性能参数值及折减系数。折减系数是相应温度的力学性能参数试验值与常温试验值的比值,该表示法为各国钢结构抗火设计规范所采用。由于高温下钢材没有明显的屈服平台,因此需要指定一个强度作为名义屈服强度,本文选用 1.0%应变垂直线与应力-应变关系曲线交点所对应的强度值。

2.3.1 弹性模量

图 5 为 Q890 钢弹性模量折减系数与钢结构设计规范(CECS 200^[15], EC3^[16], AS 4100^[17], ECCS^[18], AISC^[19])中材料模型及超高强钢 S960^[8], 20MnTiB^[10]试验结果的比较,其中 E_T 为温

表 2 Q890 钢高温力学性能及折减系数

Tab. 2 Mechanical Properties and Reduction Factors of Q890 Steel at Elevated Temperatures

温度/℃	弹性模量/MPa	弹性模量折减系数	屈服强度/MPa	屈服强度折减系数	极限强度/MPa	极限强度折减系数	断后伸长率/%	断后伸长率折减系数
20	204 976	1.000	1 010	1.000	1 057	1.000	16.64	1.000
200	204 400	0.997	938	0.929	1 025	0.970	13.87	0.834
300	201 032	0.981	904	0.895	990	0.937	16.97	1.020
400	183 367	0.895	849	0.841	906	0.857	16.93	1.017
450	175 592	0.857	810	0.802	845	0.799	18.68	1.123
500	174 246	0.850	738	0.731	754	0.713	22.17	1.332
550	150 692	0.735	633	0.627	640	0.605	26.91	1.617
600	132 509	0.646	472	0.467	475	0.449	27.14	1.631
700	60 189	0.294	117	0.116	120	0.114	70.80	4.225
800	23 209	0.113	43	0.043	45	0.043	162.02	9.737

度 T 时的弹性模量, E_{20} 为常温时的弹性模量。可见, Q890 钢弹性模量随着温度升高而减小。S960, 20MnTiB 的试验值及规范中模型均低于 Q890 钢。

2.3.2 屈服强度

图 6 为 Q890 钢屈服强度折减系数与规范中材料模型以及超强钢 S960, 20MnTiB 试验值的比较, 其中, $f_{y,T}$ 为温度 T 时的屈服强度, $f_{y,20}$ 为常温时的屈服强度, CECS 200, EC3 分别取 1.0% 和 2.0% 应

变对应的强度; ECCS 规定 400℃ 后取 0.5% 应变对应的强度, 低于 400℃ 时, 在 0.2% (20℃) 和 0.5% 应变之间线性插值。S960 和 20MnTiB 钢分别采用 1.0% 和 2.0% 应变对应的强度。结合表 2 和图 6 可知, Q890 钢屈服强度随温度升高而减小, 且 500℃ 后其下降速率明显加快。相比 Q890 钢试验值, S960 钢屈服强度折减系数与其较为接近, 而 20MnTiB 钢明显偏小。CECS 200 推荐的屈服强度

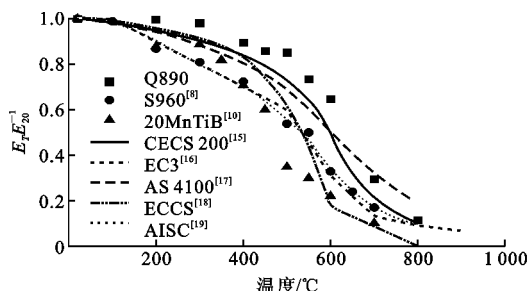


图5 高温弹性模量折减系数比较

Fig. 5 Comparison of Elastic Modulus Reduction Factors at Elevated Temperatures

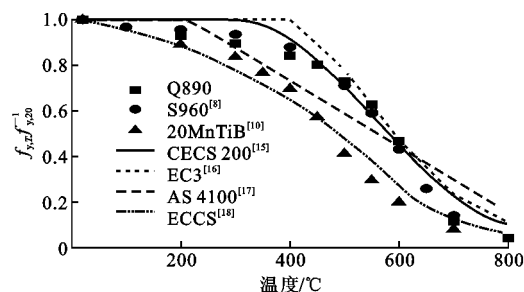


图6 高温屈服强度折减系数比较

Fig. 6 Comparison of Yield Strength Reduction Factors at Elevated Temperatures

折减系数用于预测 Q890 钢时,在 450~600 °C 内吻合,其余温度上偏于不安全。AS 4100 的屈服强度折减系数在 300~600 °C 内偏低,其余温度上偏高。EC3 和 ECCS 模型则分别偏不安全和偏保守。

2.3.3 极限强度

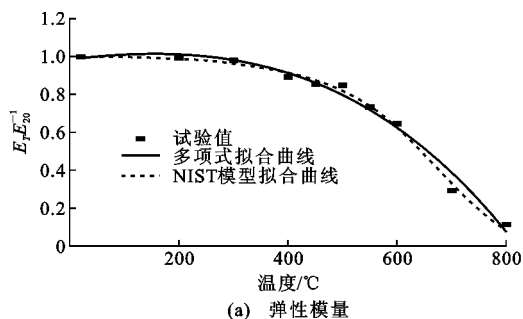
由表 2 可知,Q890 钢极限强度折减系数随温度升高而减小。700 °C 时钢材剩余强度仅为常温下的 10%。

2.3.4 断后伸长率

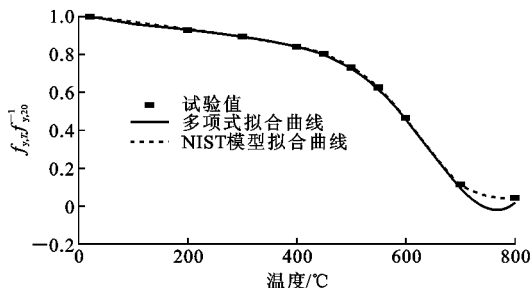
Q890 钢在 200 °C 时脆性增强,断后伸长率相对常温下减少 17%。300~500 °C 内其伸长率相对常温有较大幅度升高,550~600 °C 时增至常温值 1.6 倍。此后,断后伸长率迅速增加。

3 拟合公式

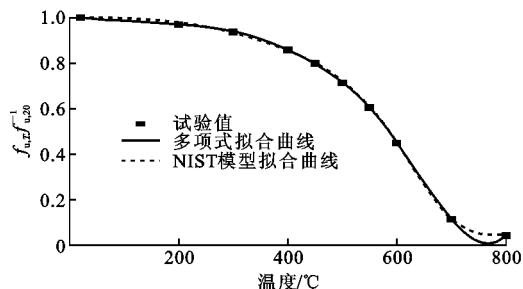
相关结构抗火设计规范及超高强钢研究文献中的钢材高温性能参数模型并不适用于 Q890 钢材。本文分别采用多项式和美国国家标准与技术研究院 (NIST) 提出的钢材高温通用材料模型^[20-21]对 Q890 钢试验结果进行拟合。试验结果与模型拟合曲线对比如图 7 所示,其中, $f_{u,T}$ 为温度 T 时的极限强度, $f_{u,20}$ 为常温时的极限强度, $\epsilon_{u,T}$ 为温度 T 时的断后伸长率, $\epsilon_{u,20}$ 为常温时的断后伸长率。



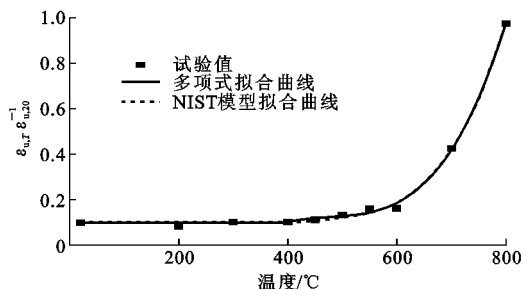
(a) 弹性模量



(b) 屈服强度



(c) 极限强度



(d) 断后伸长率

图7 Q890 钢试验值和拟合公式曲线比较

Fig. 7 Comparison Between Test Values and Fitting Equation Curves of Q890 Steel

3.1 弹性模量

多项式拟合公式为

$$\frac{E_T}{E_{20}} = -1.428 \times 10^{-9} T^3 - 6.869 \times 10^{-7} T^2 + 3.229 \times 10^{-4} T + 0.9867 \quad (1)$$

$20^\circ\text{C} \leq T \leq 800^\circ\text{C}$

NIST 模型拟合公式为

$$\frac{E_T}{E_{20}} = \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{T-20}{1044}\right)^{2.076} - \frac{1}{2}\left(\frac{T-20}{620}\right)^{6.442}\right] \quad (2)$$

$20^\circ\text{C} \leq T \leq 800^\circ\text{C}$

3.2 屈服强度

多项式拟合公式为

$$\frac{f_{y,T}}{f_{y,20}} = \begin{cases} -3.143 \times 10^{-9} T^3 + 1.829 \times 10^{-6} T^2 - 6.573 \times 10^{-4} T + 1.012 & 20\text{ }^{\circ}\text{C} \leq T \leq 400\text{ }^{\circ}\text{C} \\ 1.231 \times 10^{-10} T^4 - 2.589 \times 10^{-7} T^3 + 1.945 \times 10^{-4} T^2 - 6.365 \times 10^{-2} T + 8.593 & 400\text{ }^{\circ}\text{C} < T \leq 800\text{ }^{\circ}\text{C} \end{cases} \quad (3)$$

NIST 模型拟合公式为

$$\frac{f_{y,T}}{f_{y,20}} = 0.041\ 69 + (1 - 0.041\ 69) \cdot \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{T-20}{1\ 005}\right)^{1.118} - \frac{1}{2} \left(\frac{T-20}{574}\right)^{8.773}\right] \quad 20\text{ }^{\circ}\text{C} \leq T \leq 800\text{ }^{\circ}\text{C} \quad (4)$$

3.3 极限强度

多项式拟合公式为

$$\frac{f_{u,T}}{f_{u,20}} = \begin{cases} -4.649 \times 10^{-9} T^3 + 1.834 \times 10^{-6} T^2 - 3.638 \times 10^{-4} T + 1.007 & 20\text{ }^{\circ}\text{C} \leq T \leq 400\text{ }^{\circ}\text{C} \\ 1.137 \times 10^{-10} T^4 - 2.403 \times 10^{-7} T^3 + 1.824 \times 10^{-4} T^2 - 6.093 \times 10^{-2} T + 8.514 & 400\text{ }^{\circ}\text{C} < T \leq 800\text{ }^{\circ}\text{C} \end{cases} \quad (5)$$

NIST 模型拟合公式为

$$\frac{f_{u,T}}{f_{u,20}} = 0.042\ 24 + (1 - 0.042\ 24) \cdot \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{T-20}{595.3}\right)^{2.567} - \frac{1}{2} \left(\frac{T-20}{594.5}\right)^{9.828}\right] \quad 20\text{ }^{\circ}\text{C} \leq T \leq 800\text{ }^{\circ}\text{C} \quad (6)$$

3.4 断后伸长率

多项式拟合公式为

$$\frac{\epsilon_{u,T}}{\epsilon_{u,20}} = \begin{cases} 1 & 20\text{ }^{\circ}\text{C} \leq T \leq 400\text{ }^{\circ}\text{C} \\ 2.489 \times 10^{-7} T^3 - 3.599 \times 10^{-4} T^2 + 0.175 T - 27.35 & 400\text{ }^{\circ}\text{C} < T \leq 800\text{ }^{\circ}\text{C} \end{cases} \quad (7)$$

NIST 模型拟合公式为

$$\frac{\epsilon_{u,T}}{\epsilon_{u,20}} = 1.008 + 21.08 \left[1 - \exp\left(-\left(\frac{T-20}{839.1}\right)^{8.575}\right)\right] \quad 20\text{ }^{\circ}\text{C} \leq T \leq 800\text{ }^{\circ}\text{C} \quad (8)$$

4 结 语

本文通过稳态拉伸试验,得到不同火灾温度下国产超高强钢 Q890 的试验现象、力学性能参数值和应力-应变关系曲线,并将所得力学性能参数试验结果与国内外钢结构抗火设计规范及超高强钢研究文献中高温材料模型结果进行对比。研究发现,

20~500 °C 内钢材强度和弹性模量下降,而伸长率变化不大;超过 500 °C 后,Q890 超高强钢内部晶体结构发生改变,强度和弹性模量下降速率明显加快,而断后伸长率急剧增大。已有的钢材高温性能参数模型并不适用于 Q890 钢。最后根据试验结果,分别采用多项式模型和钢材高温通用材料模型拟合得到 Q890 钢的高温力学性能参数模型,可用于指导 Q890 钢结构抗火安全评估与设计。

参考文献:

References:

- [1] 李国强,王彦博,陈素文,等. 高强度结构钢研究现状及其在抗震设防区应用问题[J]. 建筑结构学报, 2013,34(1):1-13.
LI Guo-qiang, WANG Yan-bo, CHEN Su-wen, et al. State-of-the-art on Research of High Strength Structural Steels and Key Issues of Using High Strength Steels in Seismic Structures[J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(1): 1-13.
- [2] 邱林波,刘毅,侯兆新,等. 高强结构钢在建筑中的应用研究现状[J]. 工业建筑, 2014, 44(3): 1-5, 47.
QIU Lin-bo, LIU Yi, HOU Zhao-xin, et al. State Application Research of High Strength Steel in Steel Structures[J]. Industrial Construction, 2014, 44(3): 1-5, 47.
- [3] 罗永峰,任楚超,强旭红,等. 高强钢结构抗火研究进展[J]. 天津大学学报: 自然科学与工程技术版, 2016, 49(增): 104-121.
LUO Yong-feng, REN Chu-chao, QIANG Xu-hong, et al. State-of-the-art on Fire-resistance Behavior of High Strength Steel Structures[J]. Journal of Tianjin University: Science and Technology, 2016, 49(S): 104-121.
- [4] QIANG X H, BIJLAARD F, KOLSTEIN H. Deterioration of Mechanical Properties of High Strength S460N Under Steady State Fire Condition[J]. Materials & Design, 2012, 36: 438-442.
- [5] QIANG X H, BIJLAARD F, KOLSTEIN H. Deterioration of Mechanical Properties of High Strength Structural Steel S460N Under Transient State Fire Condition[J]. Materials & Design, 2012, 40: 521-527.
- [6] QIANG X H, BIJLAARD F S K, KOLSTEIN H. Elevated-temperature Mechanical Properties of High Strength Structural Steel S460N: Experimental Study and Recommendations for Fire-resistance Design[J]. Fire Safety Journal, 2013, 55: 15-21.
- [7] QIANG X H, BIJLAARD F S K, KOLSTEIN H. Dependence of Mechanical Properties of High Strength

- Steel S690 on Elevated Temperatures[J]. Construction and Building Materials, 2012, 30: 73-79.
- [8] QIANG X H, JIANG X, BIJLAARD F S K, et al. Mechanical Properties and Design Recommendations of Very High Strength Steel S960 in Fire[J]. Engineering Structures, 2016, 112: 60-70.
- [9] 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.
- [10] 李国强, 李明菲, 殷颖智, 等. 高温下高强度螺栓 20MnTiB 钢的材料性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2001, 34(5): 100-104.
- LI Guo-qiang, LI Ming-fei, YIN Ying-zhi, et al. Experimental Studies on the Behavior of High-strength Bolts Made of 20MnTiB Steel at Elevated Temperatures[J]. China Civil Engineering Journal, 2001, 34(5): 100-104.
- [11] 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): 30-35.
- WANG Wei-yong, LIU Bing, LI Guo-qiang. Experimental Study on Mechanical Properties of Q460 High Strength Steel at Elevated Temperature[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2012, 32(S): 30-35.
- [12] 刘 兵, 王卫永, 李国强, 等. 高强度 Q460 钢柱抗火性能研究[J]. 土木工程学报, 2012, 45(9): 19-26.
- LIU Bing, WANG Wei-yong, LI Guo-qiang, et al. Study of Fire Resistance of High Strength Q460 Steel Columns[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(9): 19-26.
- [13] GB/T 228.1—2010, 金属材料拉伸试验 第 1 部分: 室温试验方法[S].
- GB/T 228.1—2010, Metallic Materials — Tensile Testing — Part 1: Method of Test at Room Temperature[S].
- [14] GB/T 4338—2006, 金属材料高温拉伸试验方法[S].
- GB/T 4338—2006, Metallic Materials — Tensile Testing at Elevated Temperature[S].
- [15] CECS 200: 2006, 建筑钢结构防火技术规范[S].
- CECS 200: 2006, Technical Code for Fire Safety of Steel Structure in Buildings[S].
- [16] EN 1993-1-2: 2005, Eurocode 3: Design of Steel Structures — Part 1. 2: General — Rules Structural Fire Design[S].
- [17] AS 4100-1998, Steel Structures[S].
- [18] ECCS. Technical Committee-fire Safety of Steel Structures, European Recommendations for the Fire Safety of Steel Structure; Calculation of the Fire Resistance of Load Bearing Element and Structural Assemblies Exposed to the Standard Fire [M]. Amsterdam: ECCS, 1983.
- [19] ANSI/AISC 360-05, Specification for Structural Steel Buildings[S].
- [20] CHOE L, ZHANG C, LUECKE W E, et al. Influence of Material Models on Predicting the Fire Behavior of Steel Columns [J]. Fire Technology, 2017, 53: 375-400.
- [21] ZHANG C, CHOE L, GROSS J L. High-temperature Material Constitutive Models for Structural-fire Analysis[C]//SIF. Proceedings of 8th International Conference on Structures in Fire. Princeton: SIF, 2014: 616-623.