

国产 Q550 高强钢高温力学性能试验研究

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: 通过稳态拉伸法对国产 Q550 高强钢高温力学性能进行试验研究, 得到 20~800 °C 下钢材的试验现象、力学性能参数、应力-应变关系曲线, 并将所得试验结果与国内外相关规范和研究成果对比。试验表明: 不同温度下试件破坏时表面及断口形貌区别明显; 300 °C 后随着温度升高, 弹性模量、屈服强度、极限强度下降, 应力-应变关系曲线的弹性段和强化段缩短, 下降段趋于平缓。450 °C 内高温对断后伸长率影响不大, 此后随温度升高断后伸长率急剧增大。现有钢材高温力学性能参数模型对国产 Q550 高强钢并不适用。因此, 分别采用多项式模型和美国国家标准与技术研究院的钢材高温通用材料模型进行拟合, 得到高温下 Q550 高强钢力学性能参数的数学模型。

关键词: 国产高强钢; 高温; 力学性能; 稳态试验; 拟合曲线

中图分类号: TU391

文献标志码: A

Experimental Research on Mechanical Properties of Domestic High Strength Steel Q550 at Elevated Temperatures

LI Guoqiang^{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: An experimental study was carried out to investigate the mechanical properties of domestic high strength steel Q550 at elevated temperatures. Steady-state tests were conducted on specimens at high temperatures ranged from 20 °C to 800 °C. The experimental phenomena, mechanical properties and stress-strain curves at different temperatures were obtained. The tests results were compared with the reduction factors determined by current standards and by other researchers. The results showed that, the surface and fracture of the specimens at different temperatures were significantly different. When the

temperature of specimen was higher than 300 °C, the elastic modulus, yield strength and ultimate strength decreased with the increase of temperature, the linear elasticity and strain-hardening stage of the stress-strain curves shortened, and the descending stage tended to be gentle. The high temperature had little influence on elongation when the temperature was below 450 °C. The current parameter models of high temperature mechanical properties were not applicable for Q550 steel. In order to obtain the mathematical models for mechanical properties of Q550, polynomial model and high temperature material model proposed by National Institute of Standards and Technology were employed.

Key words: domestic high strength steel; high temperature; mechanical property; steady-state test; fitting curves

高强钢与普通钢相比具有更高的屈服强度和抗拉强度, 因此在相同的受力条件下可以采用更小的截面尺寸, 达到降低结构自重, 显著减少单位建筑面积用钢量、焊接和涂刷工作量的目的^[1], 在建筑工程中得到越来越广泛的应用。高温下钢材的力学性能会发生明显下降, 造成火灾下建筑结构的破坏。了解高强钢的高温力学性能, 是进行高强钢结构抗火设计、保护火灾下高强钢建筑安全性的理论前提与基础。

目前, 一些学者进行了火灾高温条件下钢材力学性能的研究。Schneider 与 Lange^[2-4]对 7 种不同化学成分和交货状态的商业 S460 高强钢进行了高温材料性试验, 研究发现 S460 钢高温屈服强度相较于欧洲规范明显偏低。Qiang 等^[5-7]采用恒温加载和恒载升温两种方式对高强钢 S460N 和 S690 进行了试验研究, 得到两种钢材在 20~700 °C 内的力学性能和破坏模式。通过试验结果与国外标准以及相关研究文献的比较, 发现各国规范并不适用于高强钢

收稿日期: 2017-05-03

基金项目: 国家自然科学基金(51508399)

第一作者: 李国强(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为多高层钢结构及钢结构抗火。E-mail: gqli@tongji.edu.cn

通讯作者: 黄雷(1991—), 男, 硕士生, 主要研究方向为钢结构抗火。E-mail: 1226604617@qq.com

S460N 和 S690,且多数偏于不安全,具有相近常温屈服强度的 S690 和 BISPLATE80 钢高温力学性能仍表现出较大不同. Ranawaka^[8] 和 Mahendran^[9] 分别对冷轧高强钢高温力学性能进行了试验研究. Ranawaka 的研究材料包括厚度分别为 0.6 mm、0.8 mm、0.9 mm 的普通钢 G250 和 高强钢 G550 试件,试验方法包括稳态试验、瞬态试验和 ISO 标准试验. 研究发现在 200 °C~500 °C 间 高强钢与普通钢关于屈服强度的变化规律有明显区别,当温度超过 400 °C 后,高强钢强度降低得更快,且厚度对钢材性能影响不大;高强钢与普通钢在 200 °C 时延性均为最低,低温下普通钢延性更好,但温度升高到 650 °C 后两者基本一致. Chiew 等^[10] 通过对 RQT-S690 高强钢的研究发现,钢材在 400 °C 以下具有良好的抗火性,温度超过 400 °C 后强度急剧下降而延性增加.

在国内,同济大学的李国强等^[11-13] 分别对用于门式钢架结构的 16Mn 钢、制作冷弯型钢的日本标准 SM41 钢、10.9 级高强度螺栓常用的 20MnTiB 钢进行了试验研究,并利用实验数据拟合得到不同钢材高温下强度与弹性模量的模型. 陈驹等^[14] 对 5 mm 厚高强度钢 BISPLATE80 进行了 41 组稳态试验和 16 组瞬态试验,试验结果表明相关规范对于屈服强度和稳态试验得到弹性模量值的预测偏于保守,而对于瞬态试验得到的弹性模量又不安全; BISPLATE80 钢与普通钢的弹性模量折减系数和屈服强度折减系数在 22 °C~540 °C 之间相近,温度超过 540 °C 之后两种钢材的差别较大.

之前的研究表明,高强钢的高温力学性能和普通钢存在明显区别,不同国家和地区生产的不同型号高强钢的高温力学性能也存在差异,国产高强钢抗火设计不宜套用普通钢或者国外产高强钢模型. 本文对国产 Q550 高强钢进行试验研究,并根据试验

结果建立 Q550 钢高温本构关系模型.

1 试验

1.1 试验仪器

试验在同济大学工程结构抗火试验室完成,所用仪器为高温电子材料试验机,见图 1. 主机最大负荷为 300 kN,采用交流伺服机及伺服驱动器,加载速率可控制在 0.001~250 mm·min⁻¹. 加热炉采用 GW900 高温炉,见图 2,工作温度范围为 200~1 100 °C,炉温最小分辨率为 0.1 °C,均温段长度为 150 mm. 加热炉分上、中、下三段加热,每段配备一个侧插 K 型热电偶,高温试验中,将另一 K 型热电偶用耐高温布绑扎于试件中部,用以测量试件温度. 试件变形测量选用接触式高温引伸计,测量精度为 0.001 mm.



图 1 试验机

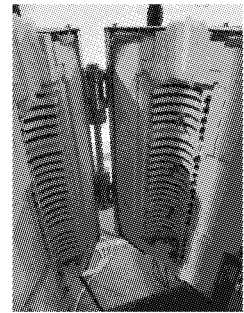


图 2 高温炉

Fig.1 Testing machine

Fig.2 Heating furnace

1.2 试验材料及试件

试验所需试件由 20 mm 厚国产 Q550 钢板制成,化学成分如表 1 所示. 试件所采用形状和尺寸按中国标准《GB/T 228.1—2010 金属材料室温拉伸试验方法》^[15] 和《GB/T4338—2006 金属材料高温拉伸试验方法》^[16] 执行,见图 3.

表 1 Q550 高强钢板化学成分表

Tab.1 Chemical constitution of high strength Q550 steel in the tests

化学成分	C	Si	Mn	P	S	Cr	Al	Mo	Ti	Cu	Nb	Ni	V
含量(0.001%)	80	200	1 700	11	3	20	32	10	18	10	33	20	8

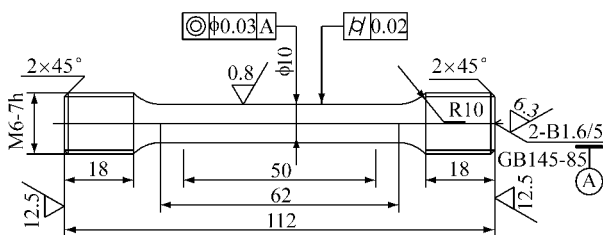


图 3 试验试件尺寸(单位:mm)

Fig.3 Geometry of the specimens(Unit: mm)

1.3 试验方法与流程

试验采用稳态试验方法,选择 10 °C·min⁻¹ 的恒定升温速率将试件加热到指定温度,然后保温 15 min,待试件温度通长均匀后开始加载,直至断裂. 加载过程中采用应变速率控制,常温试验参考 GB/T 228.1-2010,应变速率为 0.015 min⁻¹;高温试验参考 GB/T4338-2006,应变速率采用 0.003 min⁻¹. 试验温度点包括 20(常温),200,300,400,

450, 500, 550, 600, 700 和 800 °C. 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, 试件共计 21 根.

2 试验结果与分析

2.1 试验现象

试件破坏状况如图 4 所示, 不同温度下试件表面颜色变化明显: 200 °C 时, 试件表面呈现金黄色金属光泽; 300 °C 时表面为蓝色; 400~450 °C 时为墨绿色; 500~600 °C 时变为黑色; 700 °C 和 800 °C 时钢材氧化现象明显, 表皮剥落严重, 呈深灰色.

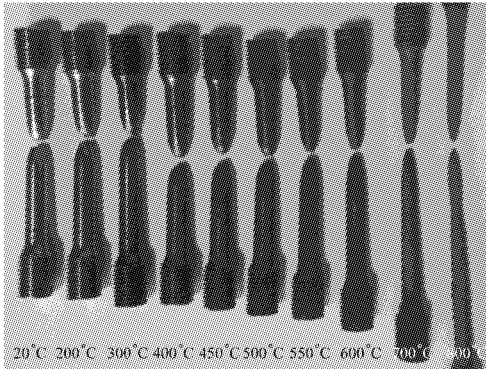


图 4 不同温度下 Q550 钢试件破坏状况

Fig. 4 Failure modes of Q550 specimens at various elevated temperatures

试件断口形貌如图 5 所示. 200 °C 时试件沿 45° 方向断裂, 其余 20~500 °C 各温度点上断口呈现明显杯口状, 550~800 °C 时断口为锥形杯状. 所有试件在断裂时均出现明显颈缩现象; 700~800 °C 断口缩至极小.

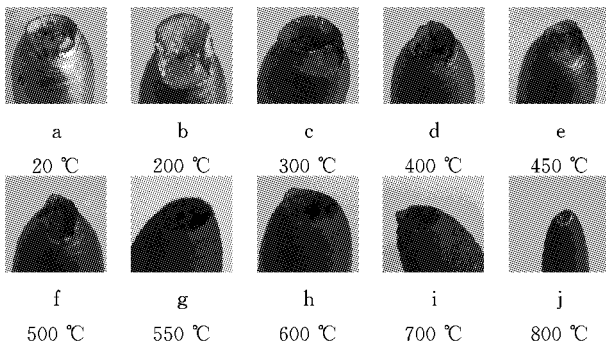


图 5 不同温度下 Q550 钢试件断口形貌

Fig. 5 Fracture morphology of Q550 specimens at various elevated temperatures

2.2 应力-应变关系曲线

图 6 为 Q550 高强钢在不同温度下的应力-应变关系曲线. 其中 20~550 °C 的曲线包括开始加载到

断裂全过程, 600~800 °C 的曲线由于断裂时延伸率过大, 只绘制到应变 0.3. 从图 6 中可知, Q550 高强钢应力-应变关系曲线在常温与高温下均无明显屈服平台. 曲线基本形状随温度升高发生明显变化. 300 °C 后随温度升高, 曲线弹性段和强化段缩短, 下降段趋于平缓.

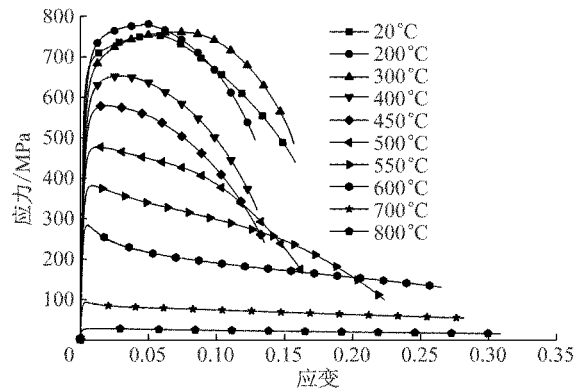


图 6 Q550 钢应力-应变关系曲线

Fig. 6 Stress-strain curves of Q550 steel at elevated temperatures

2.3 力学性能参数

Q550 高强钢高温力学性能参数试验结果平均值及其折减系数如表 2 所示. 折减系数是该温度下力学性能参数试验结果平均值与常温试验结果平均值的比值. 试验中同一温度下不同试件所得结果偏差不得超过 2%, 试验数据离散性小, 故每个试件数据不一列出.

2.3.1 弹性模量

从表 2 中可知, Q550 高强钢常温弹性模量值略高于普通钢; 400 °C 以内, 随着温度升高, 弹性模量值缓慢减小; 当钢材温度高于 500 °C, 其折减系数下降速率明显加快. 图 7 比较了本文得到的 Q550 高强钢弹性模量折减系数与部分规范中材料模型 (如 CECS200^[17]、EC3^[18]、AS4100^[19]、ECCS^[20]、AISC^[21]) 以及其他文献^[5-6, 12, 14] 中试验结果. 图中 E_T 为温度 T 时弹性模量, E_{20} 为常温时弹性模量. 可见, 不同钢材弹性模量试验值具有很强的离散性. 与 Q550 钢相比, SM41^[12] 钢结果较为接近, BISPLATE80^[14] 偏大而 S460N^[6] 和 S690^[5] 均偏小. 国内外相关规范^[17-21] 中高温弹性模量的材料模型基本上是基于普通钢试验得到, 均低于本文试验数据.

2.3.2 屈服强度

钢材高温屈服强度定义尚无统一标准, CECS200、EC3 分别取 1% 和 2% 应变对应强度;

表 2 Q550 高强钢高温力学性能参数值及折减系数

Tab.2 Mechanical properties and reduction factors of high strength Q550 steel at elevated temperatures

温度/ °C	弹性模 量/MPa	折减 系数	屈服强 度/MPa	折减 系数	极限强 度/MPa	折减 系数	断后伸 长率/%	折减 系数
20	214 459	1.000	692	1.000	747	1.000	17.36	1.000
200	211 190	0.985	720	1.040	778	1.041	14.74	0.849
300	206 166	0.961	675	0.975	763	1.021	17.65	1.017
400	195 955	0.914	623	0.900	656	0.878	16.45	0.948
450	178 243	0.831	573	0.828	588	0.787	16.76	0.965
500	177 007	0.825	471	0.681	473	0.633	20.37	1.173
550	147 701	0.689	382	0.552	383	0.513	33.37	1.922
600	127 236	0.593	271	0.392	285	0.382	44.25	2.549
700	87 430	0.408	91	0.132	96	0.129	87.06	5.015
800	32 782	0.153	29	0.042	29	0.039	172.67	9.946

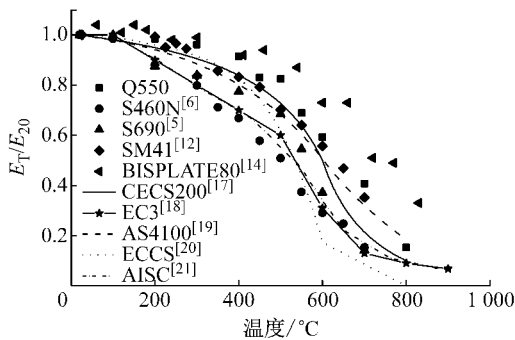


图 7 高温弹性模量折减系数比较

Fig.7 Comparison of elastic modulus reduction factors at elevated temperatures

ECCS 规定 400°C 后取 0.5% 应变作为名义应变,当温度低于 400 °C 时,则在 0.2% (20°C 时) 和 0.5% 应变之间线性差值; AS4100 对于屈服强度的应变水平没有具体规定. 本试验屈服强度采用 1.0% 应变对应的强度. 图 8 显示 Q550 钢屈服强度折减系数试验值与部分规范中材料模型 (如 CECS200、EC3、AS4100、ECCS) 以及其他文献^[5-6,14] 的试验结果对比,其中 S460N、S690 和 BISPLATE80 屈服强度均采用 2.0% 应变对应强度. $f_{y,T}$ 为温度 T 时屈服强度, $f_{y,20}$ 为常温时屈服强度.

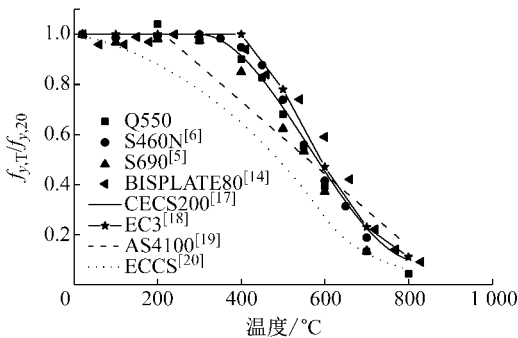


图 8 高温屈服强度折减系数比较

Fig.8 Comparison of yield strength reduction factors at elevated temperatures

结合表 2 和图 8 可知,200 °C 时,屈服强度值相对于常温值有一定程度增加;300 °C 时屈服强度值则与常温结果相当;此后,随着温度升高,折减系数逐步减小. S460N 和 BISPLATE80 屈服强度折减系数在 300~800 °C 内比本文试验值偏大;当温度低于 500 °C 时, S690 值小于 Q550, 600~800 °C 内两种钢材折减系数接近. 与 Q550 试验值相比, CECS200 规范值较为接近, EC3 规范值相对偏大, 而 AS4100 和 ECCS 规范值明显偏小.

2.3.3 极限强度

由表 2 可知,200~300 °C 内, Q550 钢极限强度相较于常温值有一定程度增加. 400~800 °C 内, 极限强度折减系数随温度升高而减小, 700 °C 后损失绝大部分强度. 图 9 显示 Q550 钢极限强度折减系数试验值和部分学者^[5-6, 10, 12, 14] 的研究结果对比. 其中, $f_{u,T}$ 和 $f_{u,20}$ 分别为温度 T 时和常温时的极限强度. 从图中可以看出, 300 °C 后, SM41、S460N、S690 的极限强度折减系数曲线与本文高强钢试验值较接近. 400~700 °C 内, 与 Q550 极限强度折减系数相比, BISPLATE80 钢试验结果偏大, 而 RQT-S690 钢偏小.

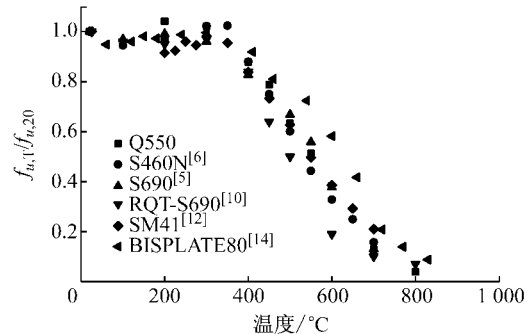


图 9 极限强度折减系数比较

Fig.9 Comparison of ultimate strength reduction factors

2.3.4 断后伸长率

由表 2 可知, Q550 钢常温断后伸长率约为 17%, 体现常温下具有较好的延性. 温度升高到 200 °C 时, 断后伸长率出现了明显下降, 约为常温值的 85%, 钢材脆性增强. 300~450 °C 内断后伸长率与常温值相当. 此后, 随温度升高, 断后伸长率急剧增大. 700 °C 后, 断后伸长率可达到常温的 5 倍以上, 表明钢材在此温度上具有极高的延性.

3 拟合公式

目前, 对于评估钢材高温力学性能尚无标准方法, 不同学者根据自身研究成果提出不同模型, 但由上文分析可知, 国产 Q550 高强钢并不适用. 为方便工程应用, 本文分别采用多项式和美国国家标准与技术研究院(NIST)的研究人员提出的钢材高温通用材料模型^[22-23]进行拟合.

3.1 弹性模量

多项式拟合公式为

$$E_T/E_{20} = -8.132 \times 10^{-10} T^3 - 1.062 \times 10^{-6} T^2 + 3.167 \times 10^{-4} T + 0.988 \quad 20^\circ\text{C} \leq T \leq 800^\circ\text{C} \quad (1)$$

NIST 通用材料模型拟合公式为

$$E_T/E_{20} = \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{T-20}{782.1}\right)^{142.1} - \frac{1}{2}\left(\frac{T-20}{580.4}\right)^{3.803}\right] \quad 20^\circ\text{C} \leq T \leq 800^\circ\text{C} \quad (2)$$

弹性模量试验值和模型拟合曲线对比如图 10 所示.

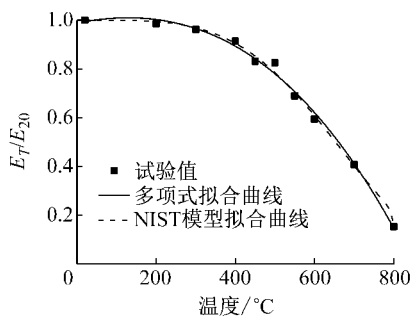


图 10 弹性模量试验值和拟合公式曲线比较

Fig.10 Comparison between the proposed equations and test data of elastic modulus

3.2 屈服强度

多项式拟合公式为

$$\frac{f_{y,T}}{f_{y,20}} = \begin{cases} -3.115 \times 10^{-6} T^2 + 9.075 \times 10^{-4} T + 0.983 & 20^\circ\text{C} \leq T \leq 300^\circ\text{C} \\ 1.578 \times 10^{-11} T^4 - 1.657 \times 10^{-8} T^3 - 2.907 \times 10^{-6} T^2 + 4.736 \times 10^{-3} T + 0.1347 & 300^\circ\text{C} \leq T \leq 800^\circ\text{C} \end{cases} \quad (3)$$

NIST 通用材料模型拟合公式为

$$\frac{f_{y,T}}{f_{y,20}} = \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{T-20}{495.3}\right)^{4.389} + \frac{1}{2}\left(\frac{T-20}{6.479 \times 10^4}\right)^{0.443^2}\right] \quad 20^\circ\text{C} \leq T \leq 800^\circ\text{C} \quad (4)$$

屈服强度试验值和模型拟合曲线对比如图 11 所示.

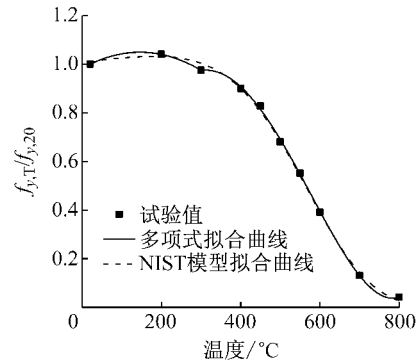


图 11 屈服强度试验值和拟合公式曲线比较

Fig.11 Comparison between the proposed equations and tests data of yield strength

3.3 极限强度

多项式拟合公式为

$$\frac{f_{u,T}}{f_{u,20}} = 1.659 \times 10^{-11} T^4 - 2.253 \times 10^{-8} T^3 + 6.218 \times 10^{-6} T^2 - 2.49 \times 10^{-4} T + 1.002 \quad 20^\circ\text{C} \leq T \leq 800^\circ\text{C} \quad (5)$$

NIST 通用材料模型拟合公式为

$$\frac{f_{u,T}}{f_{u,20}} = \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{T-20}{462.1}\right)^{3.769} + \frac{1}{2}\left(\frac{T-20}{1771}\right)^{0.941^2}\right] \quad 20^\circ\text{C} \leq T \leq 800^\circ\text{C} \quad (6)$$

极限强度试验值和模型拟合曲线对比如图 12 所示.

3.4 断后伸长率

多项式拟合公式为

$$\frac{\epsilon_{u,T}}{\epsilon_{u,20}} = \begin{cases} 1 & 20^\circ\text{C} \leq T \leq 450^\circ\text{C} \\ 1.636 \times 10^{-7} T^3 - 2.267 \times 10^{-4} T^2 + 0.1124T - 18.63 & 450^\circ\text{C} < T \leq 800^\circ\text{C} \end{cases} \quad (7)$$

NIST 通用材料模型拟合公式

$$\frac{\epsilon_{u,T}}{\epsilon_{u,20}} = 0.8879 + 26.44 \times \left[1 - \exp\left(-\left(\frac{T-20}{891.8}\right)^{6.492}\right) \right] \quad 20^\circ\text{C} \leq T \leq 800^\circ\text{C} \quad (8)$$

式中, $\epsilon_{u,T}$ 为温度 T 时的断后伸长率, $\epsilon_{u,20}$ 为常温时断后伸长率。

断后伸长率试验值和模型拟合曲线对比如图 13 所示。

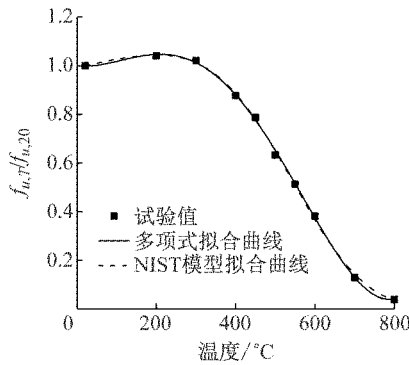


图 12 极限强度试验值和拟合公式曲线比较

Fig.12 Comparison between the proposed equations and tests data of ultimate strength

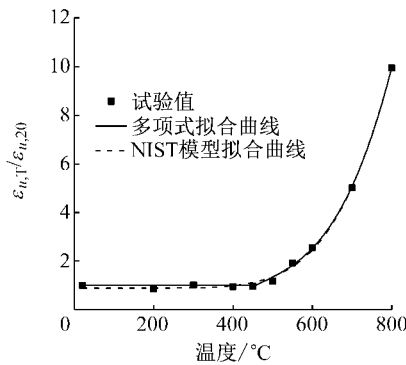


图 13 断后伸长率试验值和拟合公式曲线比较

Fig.13 Comparison between the proposed equations and tests data of elongation

3.5 应力-应变关系曲线

美国国家标准与技术研究院提出钢材高温通用材料模型来模拟高强钢的高温本构关系,模型表达式如式 9。此模型屈服前采用直线表示,屈服点后表达式为 5 参数(k_1 、 k_2 、 k_3 、 k_4 、 n)模型。本文利用此公式对 Q550 高强钢高温应力-应变关系曲线进行拟合,得到不同温度的拟合参数值如表 3 所示。图 14 将模型曲线与试验所得应力-应变关系曲线对比。从图中可以看出,模型曲线在弹性段和强化段拟合效果很好;高强钢试验曲线在屈服段呈现弧形,模型曲线在此区间内近似两直线变化,略高于试验曲线。

$$\sigma = \begin{cases} E_T \epsilon & \epsilon < f_{y,T}/E_T \\ f_{y,T} + (k_3 - k_4 f_{y,20}) \exp\left[-\left(\frac{T}{k_2}\right)^{k_1}\right] \left(\epsilon - \frac{f_{y,T}}{E_T}\right)^n & \epsilon \geq f_{y,T}/E_T \end{cases} \quad (9)$$

表 3 Q550 高强钢通用材料模型拟合参数值

Tab.3 Fitting parameters of general material model of Q550

温度/°C	k_1	k_2	k_3	k_4	n
20	1.012	479.9	713.1	0.365 1	0.466 8
200	0.796	450	650	-0.659 5	0.427 7
300	2.257	450	650	-0.792 9	0.476 9
400	1.065	448.7	590.1	-0.708 7	0.354 8
450	0.749 8	535.6	508.7	-0.337 3	0.332 6
500	0.899	410.3	651.3	-0.745 6	0.439 5
550	0.891 9	329.5	786.5	-0.136 1	0.525 4
600	0.752 4	393.8	683.6	-0.164 3	0.8311
700	80.49	1 004	748.5	-7.632×10^4	2.957
800	20.75	1 500	802.1	-1 391	2.467

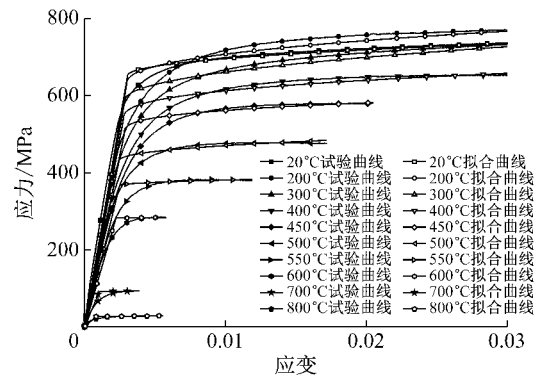


图 14 应力-应变关系试验曲线与通用模型曲线比较

Fig.14 Comparison of the stress-strain curves and the general model curves

4 结语

本文采用稳态拉伸法对国产 Q550 高强钢进行试验研究,得到 20~800 °C 钢材的弹性模量、屈服强度、极限强度、断后伸长率、应力-应变关系曲线和试验现象。通过试验值与国内外现行规范以及相关高强钢研究成果的对比发现,现有钢材高温性能参数模型对国产 Q550 高强钢并不适用。因此,本文分别采用多项式模型和美国国家标准与技术研究院的钢材高温通用材料模型进行拟合,得到高温下 Q550 钢力学性能参数的数学模型,可用于应用 Q550 钢材的钢结构抗火安全评估与设计。

参考文献:

[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.
- LI Guoqiang, WANG Yanbo, Chen Suwen, *et al.* State of the art on research of high strength structural steels and key issues of using high strength steel in seismic structures [J]. Journal of Building Structures, 2013, 34 (1): 1.
- [2] SCHNEIDEI R, LANGE J. Constitutive equations of structural steel S460 at high temperatures [J]. Journal of Structural Fire Engineering, 2011, 2(3): 217.
- [3] SCHNEIDEI R, LANGE J. Constitutive equations and empirical creep law of structural steel S460 at high temperatures [C]// Structures in Fire 2010. East Lansing: Destech Publication Inc., 2010: 703-710.
- [4] SCHNEIDEI R, LANGE J. Material and creep behavior of S460 in case of fire-experimental investigation and analytical modeling [C]// International Conference Application of Structural Fire Engineering. Prague: Cost, 2011: 55-60.
- [5] QIANG Xuhong, BIJLAARD F, KOLSTEIN H. Dependence of mechanical properties of high strength steel S690 on elevated temperatures [J]. Construction & Building Materials, 2012, 30(30): 73.
- [6] QIANG Xuhong, BIJLAARD F, KOLSTEIN H. Deterioration of mechanical properties of high strength structural steel S460N under steady state fire condition [J]. Materials & Design, 2012, 36: 438.
- [7] QIANG Xuhong, 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.
- [8] RANAWAKA T, MAHENDRAN M. Experimental study of the mechanical properties of light gauge cold-formed steels at elevated temperatures [J]. Fire Safety Journal, 2009, 44(2): 219.
- [9] KANKANAMGE N. D, MAHENDRAN M. Mechanical properties of cold-formed steels at elevated temperatures [J]. Thin-Walled Structures, 2011, 49(49): 26.
- [10] 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.
- [11] 陈凯. 变截面门式钢刚架结构抗火性能及实用设计方法研究 [D]. 上海: 同济大学, 2000.
- CHEN Kai. Research on fire resistance of steel portal frames with tapered members [D]. Shanghai: Tongji University, 2000.
- [12] 李国强, 张晓进, 蒋首超, 等. 高温下 SM41 钢的材料性能试验研究 [J]. 工业建筑, 2001, 31(6): 57.
- LI Guoqiang, ZHANG Xiaojin, JIANG Shouchao, *et al.* Experimental studies of the material properties of SM41 steel at elevated temperatures [J]. Industrial Construction, 2001, 31 (6): 57.
- [13] 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.
- LI Guoqiang, LI Mingfei, YIN Yingzhi, *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.
- [14] CHEN J, YOUNG B, UY B, Behavior of high strength structural steel at elevated temperatures [J]. Journal of Structural Engineering, 2006, 7(3): 331
- [15] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 金属材料室温拉伸试验方法: GB/T 228.1-2010 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Metallic materials-Tensile testing-Part 1: method of test at room temperature: GB/T 228.1-2010 [S]. Beijing: Standard Press of China, 2010.
- [16] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 金属材料高温拉伸试验方法: GB/T 4338-2006 [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. Metallic materials—tensile testing at elevated temperature: GB/T 4338-2006 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2006.
- [17] 同济大学, 中国钢结构协会防火与防腐分会. 建筑钢结构防火技术规范: CECS200 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2006.
- Tongji University, Sub-society for Corrosion and Fire Resistance of China Steel Construction Society. Technical code for fire safety of steel structure in buildings: CECS200 [S]. Beijing: China Planning Press, 2006.
- [18] European Committee for Standardization. Eurocode 3-design of steel structures-part 1-2: general rules-structural fire design: EN 1993-1-2 [S]. Brussels: CEN, 2005.
- [19] Australian Standards. Steel structures: AS4100 [S]. Sydney: Standards of Australia, 1998.
- [20] European Convention for Constructional Steelwork. Technical committee—fire safety of steel structures, European recommendation for the fire safety of steel structure—calculation of the fire resistance of loadbearing element and structural assemblies exposed to the standard fire [S]. Amsterdam: ECCS, 1983.
- [21] American Institution of Steel Construction. Specification for structural steel buildings [S]. Chicago: AISC, 2005.
- [22] 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.
- [23] ZHANG C, CHOE L, GROSS J L. High-temperature material constitutive models for structural-fire analysis [C]// Proceedings of 8th International Conference on Structures in Fire. Shanghai: Tongji University, 2016: 616-623.