

文章编号:1007-9629(2022)01-0102-09

高强 Q960 钢高温后力学性能试验研究

王卫永^{1,2,*}, 张艳红¹, 李翔¹

(1. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045;

2. 重庆大学 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室, 重庆 400045)

摘要: 为了研究高强 Q960 钢在火灾后的力学性能, 对过火温度为 300~900 °C 的高强 Q960 钢试件进行了稳态拉伸试验, 得到其在自然冷却和浸水冷却条件下的应力-应变曲线、弹性模量、屈服强度和极限强度。结果表明: 600 °C 是高强 Q960 钢强度发生明显变化的临界温度, 将试验结果与普通 Q235 钢、Q345 钢和高强 Q460 钢、Q690 钢、S960 钢进行比较, 发现不同种类钢材经历高温后的力学性能退化程度并不相同; 根据试验结果, 建立了高强 Q960 钢高温后力学性能折减系数随温度变化的拟合公式, 拟合结果与试验结果吻合较好。

关键词: 高强 Q960 钢; 冷却方式; 拉伸试验; 高温后; 力学性能

中图分类号: TU392.4

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1007-9629.2022.01.015

Experimental Study on Mechanical Properties of High Strength Q960 Steel after High Temperature

WANG Weiyong^{1,2,*}, ZHANG Yanhong¹, LI Xiang¹

(1. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 2. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area (Ministry of Education), Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: In order to study the post-fire mechanical properties of high strength Q960 steel, the steady state tensile test on high strength Q960 steel specimens after exposure to 300–900 °C was carried out. The stress-strain curves, elastic modulus, yield strength and ultimate strength were determined after air cooling and water cooling. The results show that 600 °C is the critical temperature of strength loss of high strength Q960 steel. The test results are compared with properties of ordinary Q235, Q345 steels and high strength Q460, Q690, S960 steels. The comparison shows that the degradation degree of mechanical properties after exposure to high temperature varies among different steels. Based on the test results, new fitting equations for evaluating the post-fire mechanical property reduction factors of high strength Q960 steel are proposed. The fitting results are in good agreement with the experimental results.

Key words: high strength Q960 steel; cooling method; tensile test; post-fire; mechanical property

与普通钢类似, 高强钢的耐火性能很差, 在高温下会迅速失去承载能力, 造成很大的安全隐患。目前, 国内外对于高强钢结构抗火性能的研究主要集中在高温下受力性能的研究, 不仅对各种高强钢材开展了一系列高温材料性能试验研究^[1-5], 还对高温

下的高强钢构件^[6-9] (包括高强度钢柱、梁、节点) 进行了大量的数值模拟与试验研究。但是, 钢结构在火灾中直接倒塌的概率较低, 大多数钢结构受火后经过鉴定和加固后仍可继续使用, 因此火灾后钢结构安全评估和修复也是钢结构抗火设计中至关重要的一

收稿日期: 2020-09-07; 修订日期: 2020-10-29

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目 (2019CDQYTM027)

第一作者 (通讯作者): 王卫永 (1982—), 男, 河南太康人, 重庆大学教授, 博士生导师, 博士。E-mail: wywang@cqu.edu.cn

环.其中,科学合理地预测钢材高温冷却后力学性能的变化规律是钢结构火灾受损评估鉴定的基础.

目前,对于高强钢高温后力学性能的研究已有一定的进展.Qiang等^[10-11]通过拉伸试验对高强S460、S690和S960钢经历高温并自然冷却后的力学性能进行研究,提出一系列公式用以预测高强钢火灾后力学性能.为了研究冷却方式对高强钢高温后力学性能的影响,Li等^[12-13]通过拉伸试验研究了高强Q690钢在自然冷却和浸水冷却条件下的力学性能,结果表明冷却方式对高强钢的弹性模量影响较小,但对强度和伸长率有较大影响.Chiew等^[14]通过试验研究了高强RQT-S690钢在高温下和高温后的力学性能,结果表明RQT-S690钢高温后强度发生明显损失的临界温度为600℃.Li等^[15]从名义屈服应力为700、900 MPa的冷弯管截面中提取了41个拉伸试件来进行高温后拉伸试验,得到了冷弯高强钢材料高温后的应力-应变曲线以及力学性能参数,并根据试验结果提出了屈服强度和弹性模量预测公式.

为了研究过火温度和冷却方式对高强Q960钢力学性能的影响,本文采用国产Q960钢板制作了45个拉伸试件,分别将其加热到300~900℃,然后进行自然冷却和浸水冷却,对高温冷却后的试件进行拉伸,得到高强Q960钢高温后应力-应变曲线和力学性能参数.将试验结果与普通低碳钢和其他高强钢进行了对比分析,提出了高强Q960钢高温后力学性能折减系数的拟合公式,为高强Q960钢结构的抗火设计提供参考.

1 试验

1.1 试件设计

采用高强Q960钢板,板厚为12 mm.参照GB/T 228.1—2010《金属材料 拉伸试验 第1部分:室温试验方法》,沿轧制方向将Q960钢板切割成尺寸如图1所示的试件.考虑不同的过火温度和冷却方式,一共设计15组试件,其中包括1组常温(20℃)试件和14组高温后试件,每组3个,共计45个.

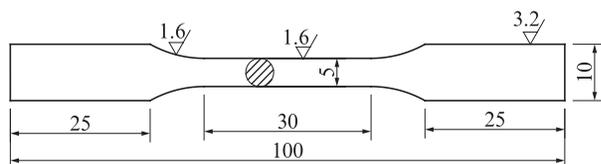


图1 试件尺寸

Fig. 1 Dimension of specimen (size:mm)

1.2 试验设备

采用SX2-12型箱式电阻升温炉(额定温度为1200℃)对试件进行加热.加热及冷却过程中采用热电偶及ZTIC-7410远端热电偶采集模块采集试件表面的温度.采用CMT-5015型微机控制电子万能试验机对冷却后的试件进行拉伸,试验机的最大加载力为100 kN,通过配套的位移传感器、常温引伸计以及力传感器来测量试件的变形和应力.

1.3 试验过程

试验步骤包括加热过程、冷却过程和常温拉伸3个部分.试验设定的温度范围为300~900℃,每隔100℃设定1个目标温度,每个温度下设置2组试件.每组取1个试件与热电偶接触(用铁丝将热电偶绑固定在试件上),以监测试件表面的温度变化.为确保试件温度分布均匀,当热电偶测得的试件温度达到目标温度后,再保温30 min.保温结束后,将试件取出,一组自然冷却(A),另一组浸水冷却(W),分别模拟建筑发生火灾后自然灭火和消防灭火2种情况.试件冷却后,在自然条件下放置3 d以上.试件编号采用温度+冷却方式+序号的形式,如300A-1代表300℃后自然冷却组的第1个试件.

参照GB/T 228.1—2010标准,对试件进行常温下静力拉伸试验,屈服阶段采用应变控制进行加载,拉伸速率为0.000 25/s;强化阶段采用位移控制进行加载,拉伸速率为2 mm/min.

2 试验结果

2.1 试件温度曲线

通过热电偶记录试件在加热和冷却过程中的温度变化.图2为500、700℃后试件的温度-时间曲线.由图2可见:浸水冷却条件下试件的温度迅速下降至常温;自然冷却条件下,试件冷却至常温所需时间约为20 min.

2.2 表观特征

高强Q960钢高温后的表观特征如图3所示.由图3可见:300℃后的试件在自然冷却后表面呈蓝色,在浸水冷却后表面呈红褐色带蓝色;400~700℃后的试件表面呈棕色带蓝色,且温度越高,颜色越深;800℃后的试件表面碳化严重,金属光泽消失,在自然冷却后表面呈灰蓝色,在浸水冷却后表面呈黑色;900℃后的试件在2种方式冷却后表面均呈蓝黑色,且表面的氧化壳发生脱落.各试件的拉伸破坏形态均有明显的颈缩现象.

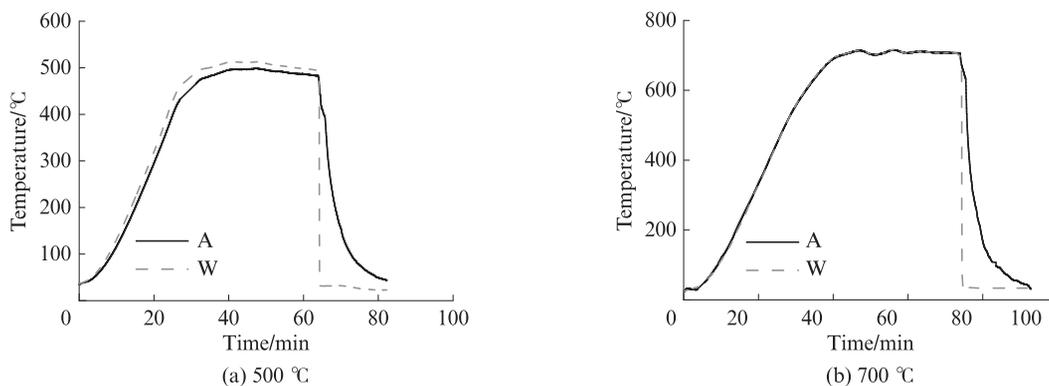


图2 500、700 °C后试件的温度-时间曲线

Fig. 2 Temperature-time curves of specimens after 500, 700 °C

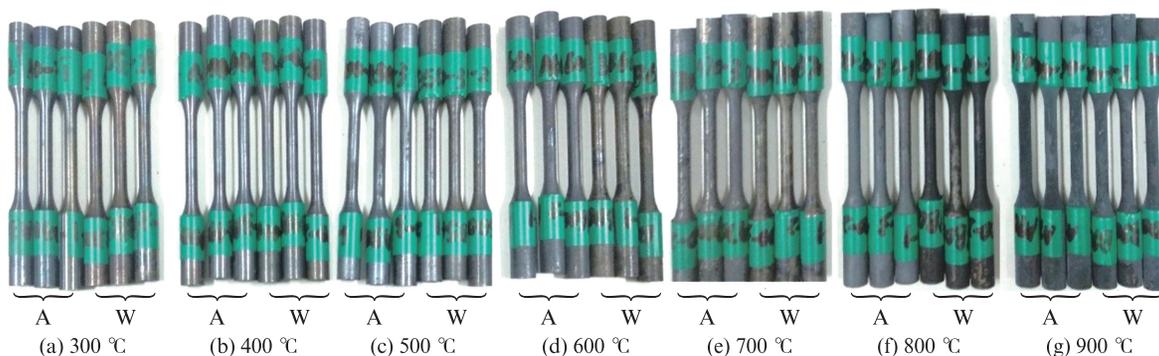


图3 高强Q960钢高温后的表面特征

Fig. 3 Surface characteristics of high strength Q960 steel after high temperature

2.3 应力-应变曲线

通过拉伸试验得到各高强Q960钢试件高温后的应力-应变(σ - ϵ)曲线,见图4.由于试件300A-3和400A-2所得结果与同组另外2根试件相差过大,结果舍弃,因此这2根试件的应力-应变曲线在图4中未显示.由图4可知:当过火温度低于700 °C时,无论是自然冷却还是浸水冷却,试件的强度均没有明显变化,并且都有明显的屈服平台;当过火温度达到700 °C时,试件强度下降明显,但此时仍有屈服平台;当过火温度达到800 °C以上时,屈服平台消失,自然冷却条件下试件强度下降明显,而在浸水冷却条件下试件强度显著提高,但极限应变显著下降,延性降低.这是由于钢材经历了高温和快速冷却,试件内部形成细小的马氏体组织,其强度显著提高,也就是所谓的淬火过程.

2.4 力学性能参数

高强Q960钢高温后的力学性能参数(弹性模量 E_T 、屈服强度 $f_{y,T}$ 、极限强度 $f_{u,T}$)见表1,对应的折减系数(E_T/E 、 $f_{y,T}/f_y$ 、 $f_{u,T}/f_u$,其中 E 、 f_y 、 f_u 分别为常温下钢材的弹性模量、屈服强度和极限强度)见表2.

2.4.1 弹性模量

由表1、2可知:当过火温度低于700 °C时,与常

温下相比,高强Q960钢高温后的弹性模量基本保持不变;当过火温度超过700 °C时,自然冷却条件下弹性模量随温度升高而下降,但仍可达到常温下的76%(900 °C时);浸水冷却条件下,钢材弹性模量的变化不大.

2.4.2 屈服强度

当过火温度不超过800 °C时,高强Q960钢高温后应力-应变曲线有明显的屈服平台,因此取应力-应变曲线屈服应力下限值作为其屈服强度;当温度达到800 °C后,屈服平台消失,则取0.2%残余应变对应的应力值作为其屈服强度.

由表1、2可知:当过火温度不超过600 °C时,高强Q960钢高温后的屈服强度基本保持不变;600 °C是高强Q960钢屈服强度发生变化的临界温度;当过火温度超过600 °C时,屈服强度显著降低,在800 °C时达到最低值,此时自然冷却条件下钢材的屈服强度约为常温下的49%,浸水冷却条件下的屈服强度为常温下的64%;当过火温度达到900 °C时,高强Q960钢的屈服强度明显上升,这是由于钢材经过淬火,强度提高.

2.4.3 极限强度

由表1、2可知:当过火温度不超过600 °C时,高

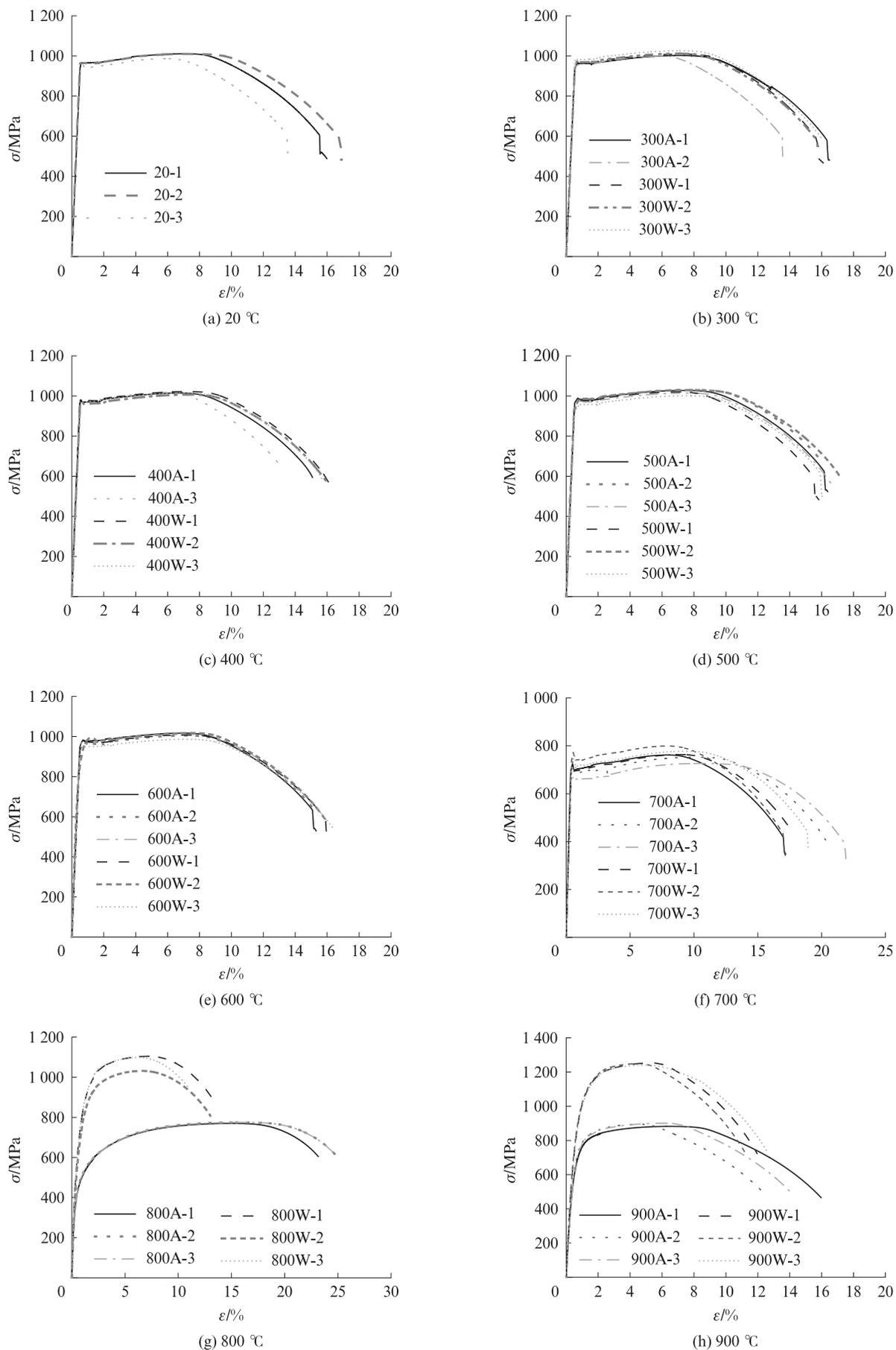


图4 高强Q960钢高温后的应力-应变曲线

Fig. 4 Stress-strain curves of high strength Q960 steel after high temperature

表1 高强Q960钢高温后的力学性能参数

Table 1 Mechanical property parameters of high strength Q960 steel after high temperature

Temperature/°C	E_T/GPa		$f_{y,T}/\text{MPa}$		$f_{u,T}/\text{MPa}$	
	A	W	A	W	A	W
20	183	183	965	965	1 011	1 011
300	176	178	958	971	1 001	1 016
400	184	185	976	968	1 016	1 015
500	188	184	975	972	1 024	1 017
600	188	181	969	960	1 011	1 004
700	187	183	680	713	747	780
800	155	182	473	615	773	1 078
900	138	172	632	797	892	1 247

表2 高强Q960钢高温后的力学性能折减系数

Table 2 Reduction factor of mechanical properties of high strength Q960 steel after high temperature

Temperature/°C	E_T/E		$f_{y,T}/f_y$		$f_{u,T}/f_u$	
	A	W	A	W	A	W
20	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
300	0.96	0.98	0.99	1.01	0.99	1.00
400	1.01	1.01	1.01	1.00	1.01	1.00
500	1.03	1.01	1.01	1.01	1.01	1.01
600	1.03	0.99	1.00	0.99	1.00	0.99
700	1.02	1.00	0.70	0.74	0.74	0.77
800	0.85	1.00	0.49	0.64	0.76	1.07
900	0.76	0.94	0.65	0.83	0.88	1.23

强Q960钢高温后的极限强度基本不变;当过火温度达到700℃时,极限强度显著降低,自然冷却条件下极限强度为常温下的74%,浸水冷却条件下极限强度为常温下的77%;当过火温度达到800℃时,极限强度又开始上升,且浸水冷却条件下极限强度上升幅度明显高于自然冷却;当过火温度为900℃时,浸水冷却条件下极限强度比常温下要高23%。

3 对比分析

3.1 与普通Q235钢、Q345钢对比

图5为高强Q960钢与普通Q235钢^[16-19]、Q345钢^[19]高温后力学性能对比。由图5可以看出:对于普通Q235钢和Q345钢,过火温度及冷却方式对其高温后弹性模量的影响不明显;而对于高强Q960钢,当过火温度超过700℃且自然冷却时,其弹性模量随温度升高而降低;自然冷却条件下,当温度低于

600℃时,3种钢材的强度变化不大,当温度超过600℃时,高强Q960钢的屈服强度和极限强度比普通Q235钢、Q345钢下降得更快;浸水冷却条件下,随着过火温度的升高,普通Q235钢和Q345钢强度衰减幅度不大,并且在文献[16-17]中Q235钢的强度随着温度的升高而增大;高强Q960钢在700℃以后,强度先下降,而后由于淬火作用又迅速上升。

3.2 与高强Q460钢、Q690钢、S960钢对比

高强S960钢是指符合欧洲规范标准DIN EN 10025-6《Hot rolled products of structural steels Part 6: Technical delivery conditions for flat products made of high yield strength structural steels in the quenched and tempered condition》的高强度结构用钢,与Q960钢具有相同的名义屈服强度。将本文试验结果与高强Q460钢^[20]、Q690钢^[13]和S960钢^[11]的相关数据进行对比分析,结果见图6。由图6

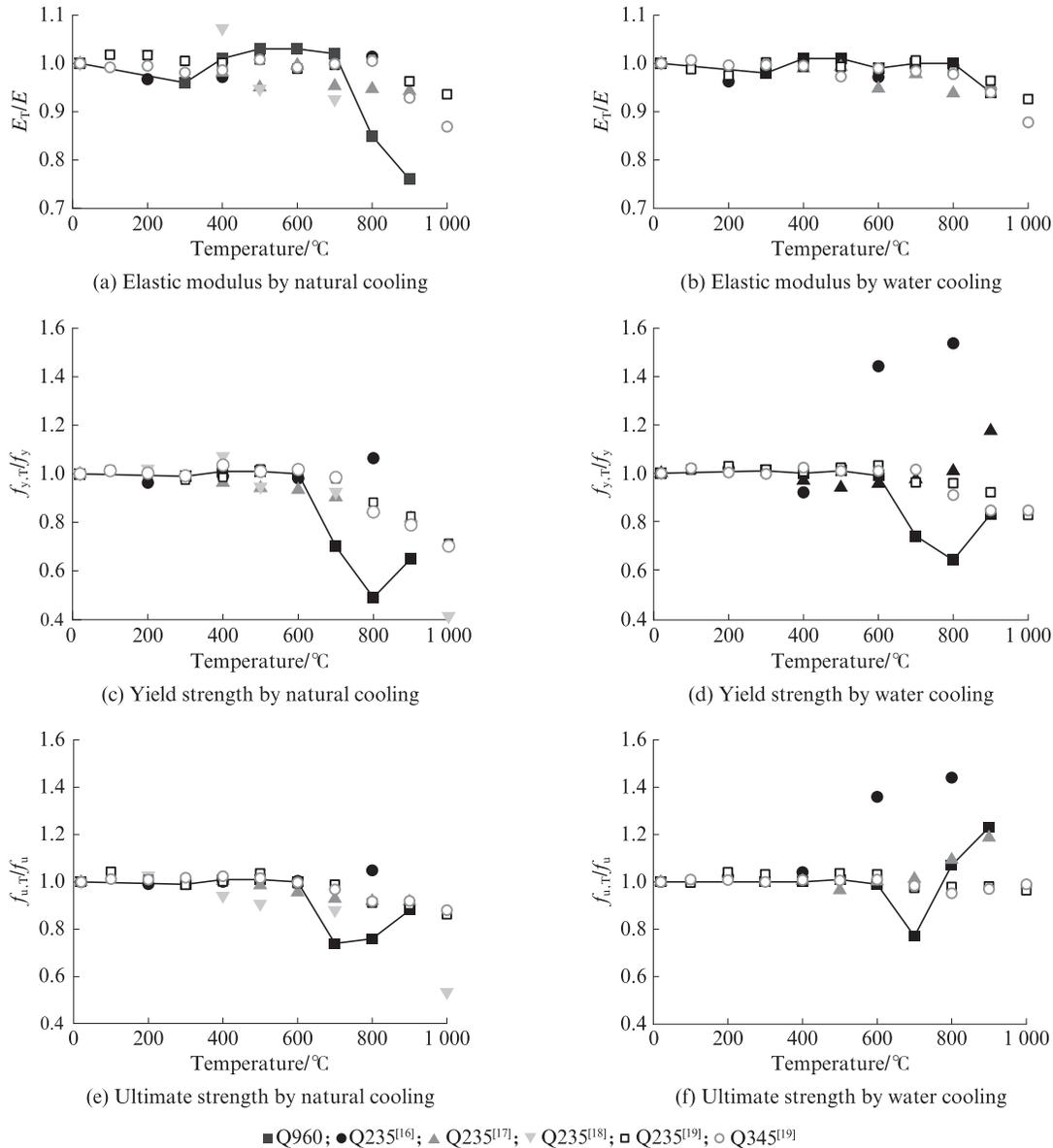


图5 高强 Q960 钢与普通 Q235 钢、Q345 钢高温后力学性能对比

Fig. 5 Comparison of mechanical properties between high strength Q960 steel and ordinary Q235, Q345 steels after high temperature

可以看出:自然冷却条件下,钢材的强度等级越高,弹性模量折减系数越小,且 S960 钢的弹性模量折减系数低于 Q960 钢;浸水冷却条件下,钢材弹性模量的变化不大;当温度低于 600 °C 时,各高强钢的屈服强度变化不大;当温度超过 600 °C 时,不同强度等级的高强钢强度变化趋势明显不同;自然冷却条件下, Q460 钢屈服强度退化程度低于其他高强钢,并且 Q690 钢和 Q960 钢在 900 °C 时屈服强度和极限强度有所回升;浸水冷却条件下,当温度超过 700 °C 时, Q690 钢的屈服强度和极限强度提高的幅度明显高于 Q960 钢。

4 力学性能指标计算公式

综上所述,不同种类钢材高温后力学性能的退化程度有所区别,因此以往文献中所提出的计算公式不适用于 Q960 钢.结合本文试验结果,利用最小二乘法,对 Q960 钢高温后力学性能折减系数进行多项式拟合,得到了不同冷却条件下高强 Q960 钢高温后弹性模量、屈服强度和极限强度折减系数随温度 (t) 变化的拟合公式,见式(1)~(6).试验结果与拟合公式对比如图 7 所示.从图 7 可以看出,试验结果与拟合结果吻合良好.

自然冷却条件下:

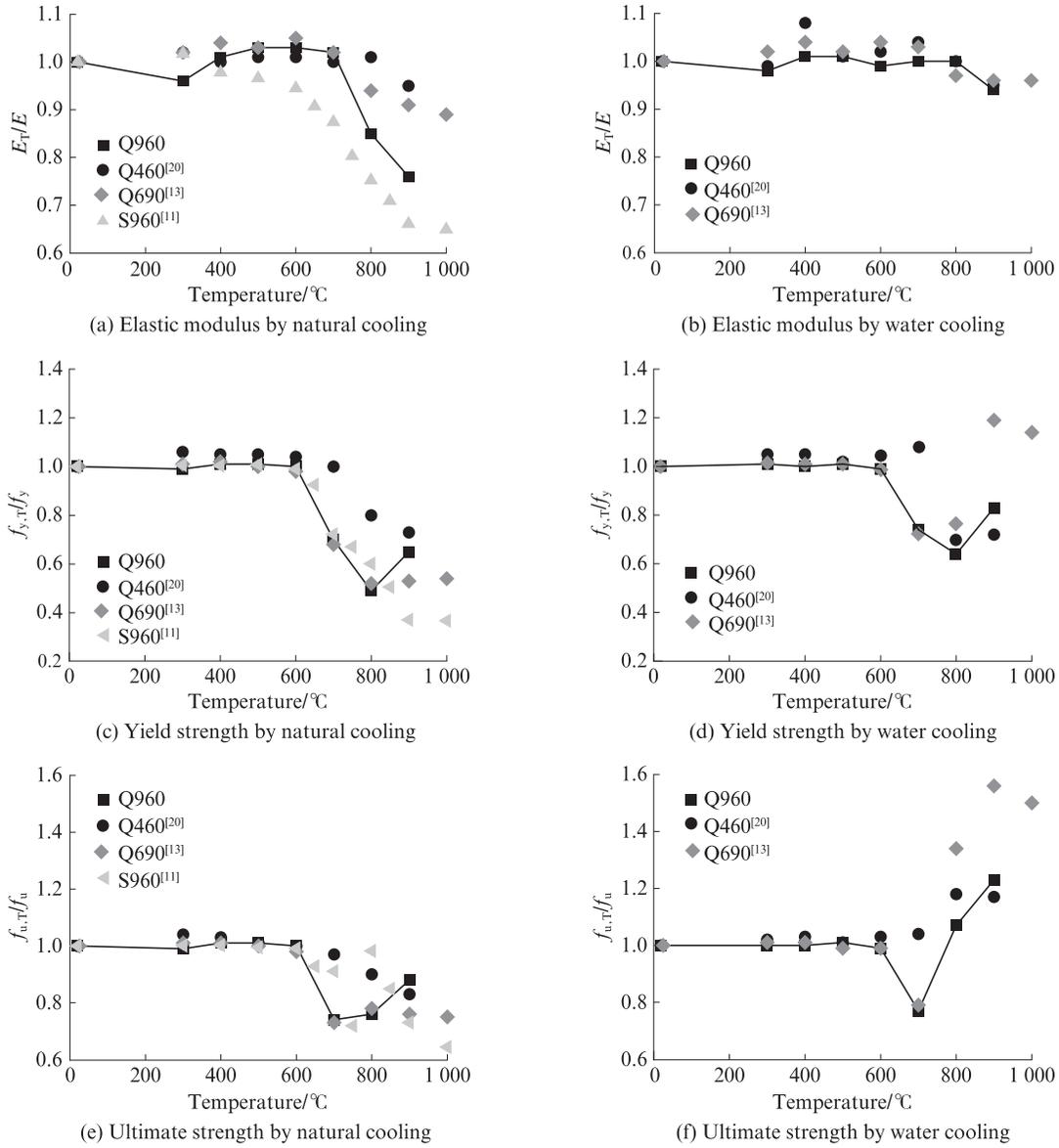


图6 高强 Q960 钢与高强 Q460 钢、Q690 钢、S960 钢高温后力学性能对比

Fig. 6 Comparison of mechanical properties between high strength Q960 steel and high strength Q460, Q690, S960 steels after high temperature

$$\frac{E_T}{E} = \begin{cases} 1, & 20^\circ\text{C} \leq t < 700^\circ\text{C} \\ 3 \times 10^{-6}t^2 - 0.006t + 3.73, & 700^\circ\text{C} \leq t \leq 900^\circ\text{C} \end{cases} \quad (1)$$

$$\frac{f_{y,T}}{f_y} = \begin{cases} 1, & 20^\circ\text{C} \leq t < 600^\circ\text{C} \\ 1.15 \times 10^{-5}t^2 - 1.85 \times 10^{-2}t + 7.98, & 600^\circ\text{C} \leq t \leq 900^\circ\text{C} \end{cases} \quad (2)$$

$$\frac{f_{u,T}}{f_u} = \begin{cases} 1, & 20^\circ\text{C} \leq t < 600^\circ\text{C} \\ 9.5 \times 10^{-6}t^2 - 0.0146t + 6.325, & 600^\circ\text{C} \leq t \leq 900^\circ\text{C} \end{cases} \quad (3)$$

浸水冷却条件下:

$$E_T/E = 1 \quad (4)$$

$$\frac{f_{y,T}}{f_y} = \begin{cases} 1, & 20^\circ\text{C} \leq t < 600^\circ\text{C} \\ 1.1 \times 10^{-5}t^2 - 1.7 \times 10^{-2}t + 7.28, & 600^\circ\text{C} \leq t \leq 900^\circ\text{C} \end{cases} \quad (5)$$

$$\frac{f_{u,T}}{f_u} = \begin{cases} 1, & 20^\circ\text{C} \leq t < 600^\circ\text{C} \\ -1.1 \times 10^{-7}t^3 + 2.57 \times 10^{-4}t^2 - 0.1966t + 50.19, & 600^\circ\text{C} \leq t \leq 900^\circ\text{C} \end{cases} \quad (6)$$

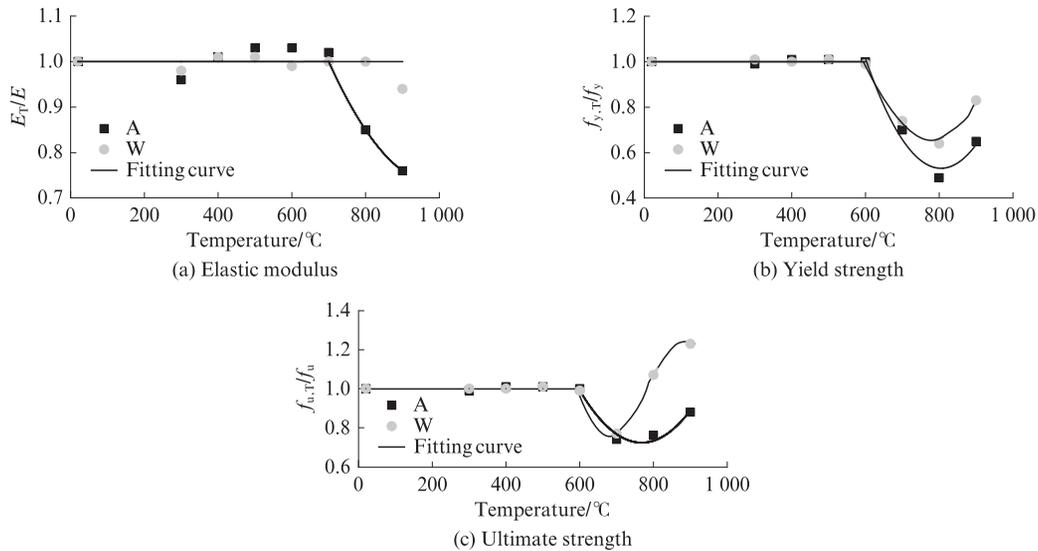


图7 试验结果与拟合公式对比

Fig. 7 Comparison of proposed equation with test data

5 结论

(1) 当过火温度不超过 600 °C 时, 自然冷却和浸水冷却条件下高强 Q960 钢的应力-应变曲线均无明显变化; 当过火温度超过 800 °C 时, 应力-应变曲线的屈服平台消失, 并且浸水冷却条件下的极限强度高于自然冷却条件下, 但极限应变显著下降, 延性降低。

(2) 600 °C 是高强 Q960 钢强度发生变化的转折点。当过火温度超过 600 °C 时, 高强 Q960 钢的强度先下降, 而后由于淬火作用迅速上升, 并且浸水冷却条件下极限强度上升幅度明显高于自然冷却条件下。

(3) 过火温度对高强 Q960 钢高温后弹性模量影响不大, 仅在过火温度超过 700 °C 且自然冷却条件下, 其弹性模量有所下降。

(4) 与普通 Q235 钢、Q345 钢和高强 Q460 钢、Q690 钢、S960 钢的对比分析表明, 不同种类钢材高温后力学性能的退化程度有所区别。

(5) 根据试验结果, 提出了高强 Q960 钢高温后弹性模量、屈服强度和极限强度折减系数的拟合公式, 拟合结果与试验结果吻合较好。

参考文献:

[1] CHEN J, YOUNG B, UY B. Behavior of high strength structural steel at elevated temperatures [J]. Journal of Structural Engineering, 2006, 132(12):1948-1954.

[2] 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.

[3] WANG W Y, LIU B, KODUR V. Effect of temperature on strength and elastic modulus of high-strength steel[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2013, 25(2):174-182.

[4] WANG W Y, WANG K, KODUR V, et al. Mechanical properties of high-strength Q690 steel at elevated temperature[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2018, 30(5):04018062.

[5] WANG W Y, ZHANG Y H, XU L, et al. Mechanical properties of high-strength Q960 steel at elevated temperature[J]. Fire Safety Journal, 2020, 114:103010.

[6] 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 Weiyong, LI Guoqiang, et al. Study of fire resistance of high strength Q460 steel columns[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(9):19-26. (in Chinese)

[7] 王卫永, 张琳博, 李国强. 高强度 Q690 钢柱耐火性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(8):155-162.

WANG Weiyong, ZHANG Linbo, LI Guoqiang. Experimental study on fire resistance of high strength Q690 steel columns[J]. Journal of Building Structures, 2019, 40(8):155-162. (in Chinese)

[8] 何平召, 王卫永. 约束高强度 Q460 钢梁的抗火性能[J]. 土木建筑与环境工程, 2015, 37(2):52-59.

HE Pingzhao, WANG Weiyong. Fire resistance performance on restrained high strength Q460 steel beams[J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2015, 37(2):52-59. (in Chinese)

[9] 强旭红, 武念铎, 罗永峰, 等. 高强钢外伸式端板节点性能试验与有限元分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2018, 45(7):1-9.

QIANG Xuhong, WU Nianduo, LUO Yongfeng, et al. Experimental and numerical analysis on high strength steel extended endplate connections[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2018, 45(7):1-9. (in Chinese)

[10] 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.
- [11] QIANG X H, BIJLAARD F S K, KOLSTEIN H. Post-fire performance of very high strength steel S960 [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2013, 80:235-242.
- [12] LI G Q, LYU H B, ZHANG C. Post-fire mechanical properties of high strength Q690 structural steel [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2017, 132:108-116.
- [13] ZHOU H T, WANG W Y, WANG K, et al. Mechanical properties deterioration of high strength steels after high temperature exposure[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 199:664-675.
- [14] 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.
- [15] LI H T, YOUNG B. Residual mechanical properties of high strength steels after exposure to fire[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2018, 148:562-571.
- [16] 张有桔, 朱跃, 赵升, 等. 高温后不同冷却条件下钢材力学性能试验研究[J]. *结构工程师*, 2009, 25(5):104-109.
ZHANG Youjie, ZHU Yue, ZHAO Sheng, et al. Experimental research on mechanical properties of steel cooled in different modes after high temperature treatment [J]. *Structural Engineers*, 2009, 25(5):104-109. (in Chinese)
- [17] 陈建锋, 曹平周. 高温后结构钢力学性能试验[J]. *解放军理工大学学报(自然科学版)*, 2010, 11(3):328-333.
CHEN Jianfeng, CAO Pingzhou. Experimental investigation into mechanical properties of steel post high temperatures[J]. *Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2010, 11(3):328-333. (in Chinese)
- [18] 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)
- [19] 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 Construction Steel Research*, 2016, 121:291-310.
- [20] 王卫永, 刘天姿. 高强Q460钢高温冷却后力学性能研究[J]. *建筑材料学报*, 2016, 19(1):171-176, 208.
WANG Weiyong, LIU Tianzi. Study on mechanical properties of high strength Q460 steel after cooling from high temperature [J]. *Journal of Building Materials*, 2016, 19(1):171-176, 208. (in Chinese)