



高强度耐火钢高温冷却后力学性能试验研究

楼国彪 费楚妮 王彦博 陈林恒

EXPERIMENTAL STUDY ON POST-FIRE MECHANICAL PROPERTIES OF HIGH STRENGTH FIRE-RESISTANT STEEL

LOU Guo-biao, FEI Chu-ni, WANG Yan-bo, CHEN Lin-heng

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2021.05.0380>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

CFRP约束高温后混凝土力学性能试验研究

EXPERIMENTAL STUDY ON THE MECHANICAL PERFORMANCE OF POST-FIRE CONCRETE CONFINED BY CFRP SHEETS

工程力学. 2017, 34(9): 158-166 <https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2016.05.0348>

火灾后型钢混凝土框架结构力学性能试验研究及分析

EXPERIMENTAL RESEARCH AND ANALYSIS ON THE POST-FIRE PERFORMANCE OF STEEL REINFORCED CONCRETE FRAME STRUCTURES

工程力学. 2018, 35(5): 152-161 <https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2017.01.0068>

S30408奥氏体不锈钢高温力学性能试验研究

EXPERIMENTAL INVESTIGATION ON MECHANICAL PROPERTIES OF S30408 AUSTENITIC STAINLESS STEEL AT ELEVATED TEMPERATURES

工程力学. 2017, 34(4): 167-176, 186 <https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2015.11.0889>

高强度不锈钢短尾环槽铆钉力学性能试验研究

EXPERIMENTAL STUDY ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF HIGH STRENGTH STAINLESS STEEL SHORT TAIL SWAGE-LOCKING PINS

工程力学. 2021, 38(S): 151-158 <https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2020.05.S027>

部分预制装配型钢混凝土柱火灾后偏压试验研究

EXPERIMENTAL STUDY ON POST-FIRE PERFORMANCE OF PARTIALLY PRECAST STEEL REINFORCED CONCRETE COLUMNS SUBJECTED TO ECCENTRIC COMPRESSION

工程力学. 2020, 37(3): 108-119 <https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2019.04.0174>

CFRP-火灾后混凝土界面快速剥离试验

EXPERIMENTAL INVESTIGATION ON THE INTERFACIAL DEBONDING BETWEEN CFRP AND POST-FIRE CONCRETE UNDER RAPID LOADING

工程力学. 2019, 36(S1): 285-292, 297 <https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2018.05.S059>



订阅号：面向读者



订阅号：面向作者

扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

文章编号: 1000-4750(2022)09-0153-07

高强度耐火钢高温冷却后力学性能试验研究

楼国彪^{1,2}, 费楚妮¹, 王彦博¹, 陈林恒³

(1. 同济大学土木工程学院, 上海 200092; 2. 同济大学土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092; 3. 南京钢铁股份有限公司, 南京 210035)

摘 要: 该文对国产 Q460FR、Q420FR、Q345FR 等高强度耐火钢进行了 200℃~800℃ 高温过火、自然冷却后的拉伸试验, 在获得高强度耐火钢高温冷却后的应力-应变关系曲线和力学性能参数, 并与普通结构钢的高温冷却后力学参数进行对比后, 给出了屈服强度和抗拉强度变化系数拟合公式。研究表明: 国产高强度耐火钢在高温冷却后的屈服强度和抗拉强度均得到提高, 弹性模量基本稳定。该文研究的结果可以用来评估耐火钢结构火灾后的承载性能。

关键词: 耐火钢; 过火温度; 高温后; 拉伸试验; 力学性能

中图分类号: TU541 **文献标志码:** A **doi:** 10.6052/j.issn.1000-4750.2021.05.0380

EXPERIMENTAL STUDY ON POST-FIRE MECHANICAL PROPERTIES OF HIGH STRENGTH FIRE-RESISTANT STEEL

LOU Guo-biao^{1,2}, FEI Chu-ni¹, WANG Yan-bo¹, CHEN Lin-heng³

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. State Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

3. Nanjing Iron & Steel Co., LTD., Nanjing 210035, China)

Abstract: A series of static tensile tests on high-strength fire-resistant steel such as grades Q460FR, Q420FR, Q345FR after fire were carried out in this study. The stress-strain curves and mechanical parameters of high-strength fire-resistant steel with post-fire temperatures from 200℃ to 800℃ were obtained. After comparing their mechanical properties with those of ordinary structural steels after high-temperature cooling, the coefficient of variation fitting equation of yield strength and tensile strength were proposed. It is shown that: the yield strength and tensile strength of high-strength fire-resistant steel with natural cooling after fire have been improved, while the modulus of elasticity is not influenced by exposing to fire. The results of this study can be applied to the assessment of load-bearing performance of fire-resistant steel structures after fire.

Key words: fire-resistant steel; post-fire temperature; post-fire; tensile test; mechanical properties

目前, 主要有两种方法来提高钢结构的抗火性能和耐火极限: 第一, 采用防火涂料对钢结构进行保护, 通过延缓构件升温的速度来达到防火效果; 第二, 提高钢材的耐火力学性能, 即生产出耐火钢。1988 年日本学者在普通 C-Mn 钢材中添加耐高温的合金元素 Mo、Cr、Nb、V 等提高其高温强度。国内马钢、宝钢、武钢、鞍钢等在 20 世纪 90 年代后期研制了 Q235 级、Q345 级耐

火钢, 并在上海中福城高层钢结构住宅、北京国家大剧院钢结构外壳等建筑中都得到了应用^[1]。

通常规定在 600℃ 耐火钢的屈服强度不低于常温屈服强度的 2/3, 同时保证耐火钢在常温下的机械性能和可焊性能不低于相应等级的普通钢。以往的耐火钢采用了较多的 Mo 元素, 成本高、且强度等级较低, 主要为 Q235 级、Q345 级耐火钢^[2]。为此, 南钢集团开发了 Q460FR、Q420FR、Q345FR

收稿日期: 2021-05-22; 修改日期: 2021-09-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(5201001048); 应急管理部消防救援局重点攻关项目(2019XFGG10)

通讯作者: 王彦博(1983—), 男, 河南人, 副教授, 博士, 硕导, 从事高强度结构和高性能组合结构研究 (E-mail: ybwang@tongji.edu.cn).

作者简介: 楼国彪(1975—), 男, 浙江人, 副教授, 博士, 博导, 从事多高层钢结构及钢结构抗火研究 (E-mail: gblou@tongji.edu.cn);

费楚妮(1997—), 女, 浙江人, 硕士生, 从事钢结构抗火研究 (E-mail: fcn611@163.com);

陈林恒(1983—), 男, 湖北人, 高工, 博士, 南钢研究院副院长, 从事先进钢材及加工制备 (E-mail: chenlinheng@njsteel.com.cn).

级新型高强度耐火钢, 用 Nb 元素部分替代 Mo 元素, 大幅降低了成本, 并保证其高温强度^[3]。

在绝大多数钢结构建筑火灾中, 钢结构没有发生根本性破坏, 为保证后续使用安全, 需对其进行火灾后安全性鉴定和必要的加固^[4-5]。因此, 有必要研究钢材高温过火后的力学性能。Lu 等^[6]对 Q235、Q345 和 Q420 等热轧钢和 Q235 冷弯型钢进行了高温冷却后力学性能试验研究。Gunalan 等^[7]和 Qiang 等^[8-9]分别对 G 系列 (G300、G500、G550) 钢和 S 系列 (S460、S690、S960) 高强度钢进行了高温冷却后的力学性能研究。李国强等^[10]和胡婉颖等^[11]都对 Q690 高强度钢进行了高温冷却后力学性能试验。楼国彪等^[12]对 8.8S 和 10.9S 高强度螺栓进行了高温冷却后力学性能试验研究。目前, 国内外的研究中较缺乏针对高强度耐火钢的力学性能的研究, 本文主要针对南钢产 Q460FR、Q420FR、Q345FR 级别的新型高强度耐火钢在高温冷却后进行力学性能试验。

1 高温后力学性能试验方案

1.1 试样设计

试样由 Q460FR、Q420FR、Q345FR 级的高强度耐火钢制成, 耐火钢具体化学成分如表 1 所示。本次试验所用钢材与文献^[3]中为同一批钢材。试样设计遵循金属拉伸试验方法^[13-14]中规定, 三种耐火钢均使用 20 mm 板厚的母材加工圆棒拉伸试样, 具体尺寸及构造如图 1 所示。试验共设 200 °C、300 °C、400 °C、450 °C、500 °C、550 °C、600 °C、650 °C、700 °C、750 °C、800 °C 等 11 个温度点。

表 1 耐火钢的化学成分表^[3]
Table 1 Chemical composition of fire-resistant steel

牌号	化学成分质量分数/(%)										
	P	C	Mn	Nb	Si	Mo	Ti	Cr	V	S	Al
Q460FR	0.01	0.05	0.78	0.09	0.19	0.20	0.01	0.50	0.03	0.001	0.03
Q420FR	0.01	0.05	0.60	0.05	0.19	0.20	0.01	0.46	0.03	0.001	0.02
Q345FR	0.01	0.04	0.40	0.05	0.17	0.19	0.02	0.42	0.03	0.001	0.04

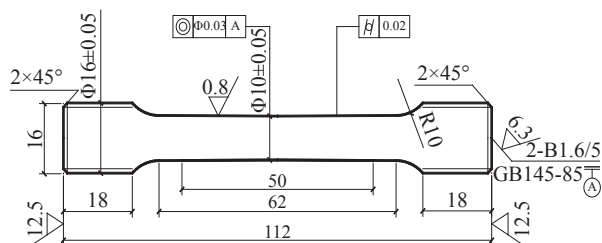


图 1 试样尺寸

Fig. 1 Specimen dimensions

1.2 试验方法

拉伸试验主要使用高温电子材料试验机 (图 2), 最大负荷达到 300 kN, 负荷速率为 0.001 mm/min~250 mm/min, 搭配有 GW900 高温炉 (图 2), 工作温度范围为 200 °C~1100 °C, 等温区间的长度为 150 mm。在高温炉中插入 K 型热电偶, 测量高温炉内的空气温度, 用绑定在样品中部的热电偶测量样品温度^[3]。



图 2 试验设备

Fig. 2 Test equipment

耐火钢高温冷却后拉伸试验包括 3 个阶段:

- 1) 将试件升温至预设温度, 升温速率为 10 °C/min~15 °C/min, 并保温 15 min 恒定, 使试件受热均匀;
- 2) 试件自然冷却至室温, 并在自然条件下放置 3 d;
- 3) 进行常温静力拉伸试验。以位移控制方式对样品进行负荷, 将负荷速度控制在 2 mm/min 的同时, 使用接触式引伸计测量试件的变形量, 量程为 2.5 mm, 标距为 50 mm。试验结束后, 可根据力、位移数据可以得到钢材高温过火后的应力-应变关系曲线、屈服强度 $f_{y,T}$ 、抗拉强度 $f_{u,T}$ 、弹性模量 E_T 及断后伸长率 A_T 。

2 高温后力学性能试验结果及其分析

2.1 试验现象

试件拉伸破坏形态如图 3 所示。经高温冷却后, 试件颜色根据过火温度的不同, 发生了一定程度的变化, 当过火温度为 200 °C 时, 试件呈金黄色; 当过火温度为 300 °C 时, 试件稍微发蓝; 当过火温度升至 400 °C~700 °C 时, 试件的光泽度渐渐丧失, 颜色逐渐变暗, 向灰黑色转变; 当过火温度为 750 °C~800 °C 时, 试件呈红褐色 (见图 3, 从左到右温度依次为 20 °C、200 °C、300 °C、400 °C、

450 °C、500 °C、550 °C、600 °C、650 °C、700 °C、750 °C、800 °C)。

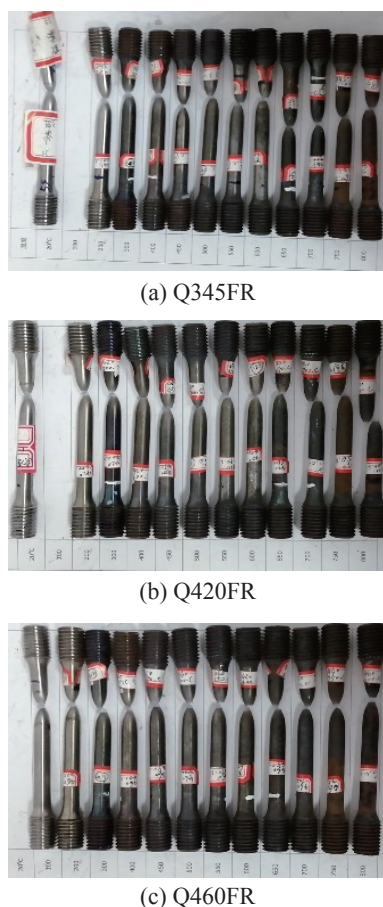


图3 高温冷却后拉伸试样破坏情况
Fig. 3 Failure of tensile specimen after fire

2.2 应力-应变关系曲线

图4为三种牌号耐火钢经过高温自然冷却后的应力-应变($\sigma-\varepsilon$)关系曲线。从图4可以看出,与常温下的应力-应变曲线相比,高温后的应力-应变曲线出现了明显的屈服平台,且都呈现较为一致的曲线形状,其中过火温度超过600 °C的曲线的屈服平台较明显^[15]。从三种牌号的钢材曲线图中也可以看出,过火温度为650 °C时,钢材强度提高最为显著,而当过火温度 T 持续上升到800 °C时,钢材强度突然下降。

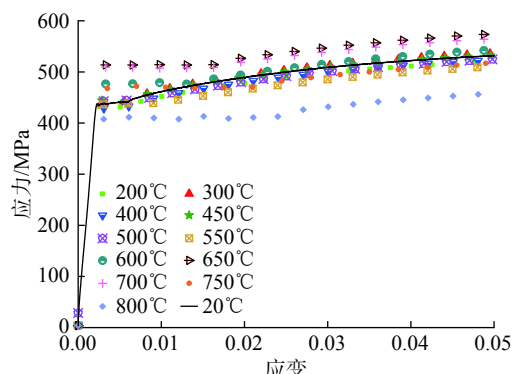
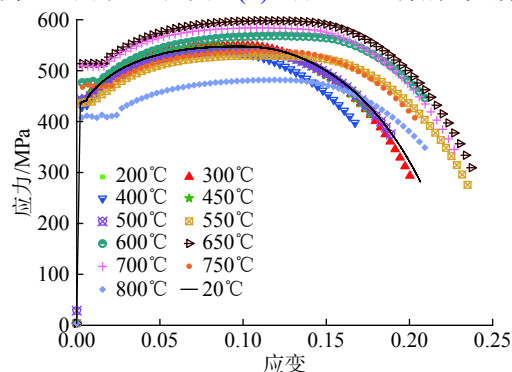
2.3 弹性模量

变化系数定义为高温过火后试验值与未过火试验值的比值,用以反映高温过火冷却的影响。

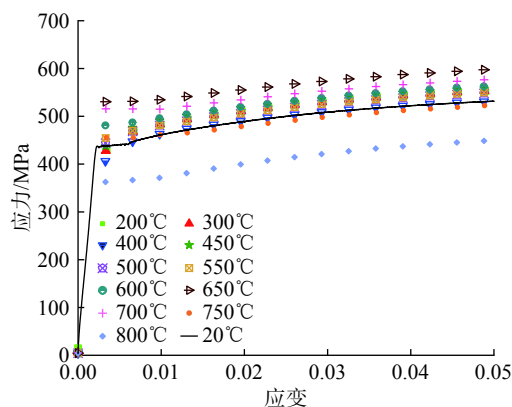
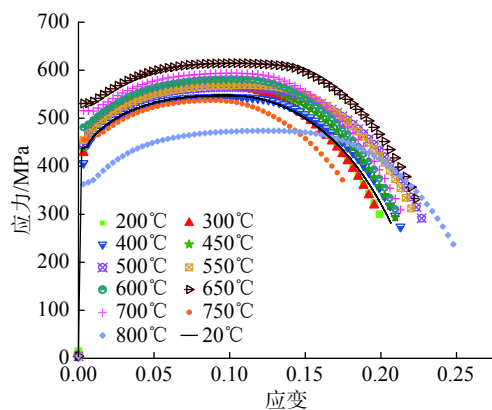
表2显示了耐火钢高温过火冷却后的弹性模量变化系数 η_E 的变化。图5为耐火钢过火后的力学参数变化曲线。由表2和图5(a)可知,过火温度不超过800 °C时,对弹性模量的影响在3%以内。

2.4 屈服强度

当应力-应变关系曲线有明显的屈服平台时,屈服强度取上屈服点^[16];在没有明显屈服平台的情况下,屈服强度将采取对应于0.2%残余应变的应力值。由表3和图5(b)可知,三种牌号耐火钢



(a) Q345FR



(b) Q420FR

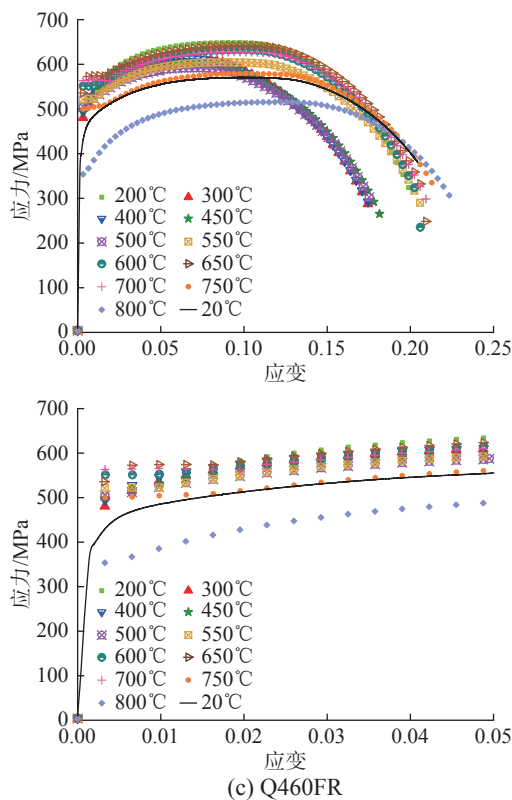


图4 耐火钢过火后的应力-应变关系曲线

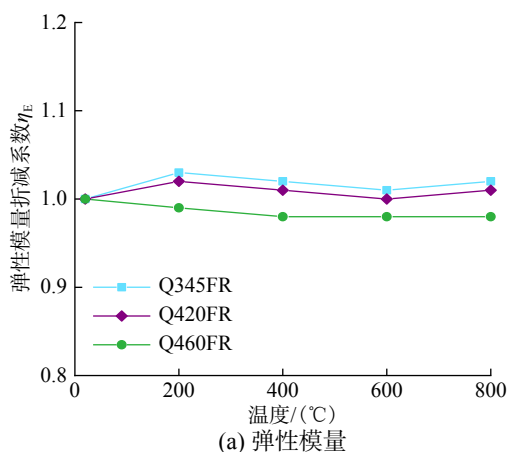
Fig. 4 Post-fire stress-strain curves of fire-resistant steel

表2 耐火钢过火后弹性模量参数

Table 2 Elastic modulus parameters of fire-resistant steel after fire

$T/(^{\circ}\text{C})$	Q345FR		Q420FR		Q460FR	
	E/GPa	η_E	E/GPa	η_E	E/GPa	η_E
20	205.8	1.00	211.7	1.00	201.8	1.00
200	—	1.03	—	1.02	—	0.99
400	—	1.02	—	1.01	—	0.98
600	—	1.01	—	1.00	—	0.98
800	—	1.02	—	1.01	—	0.98

注: T 为温度; E 为弹性模量; η_E 为弹性模量折减系数。



(a) 弹性模量

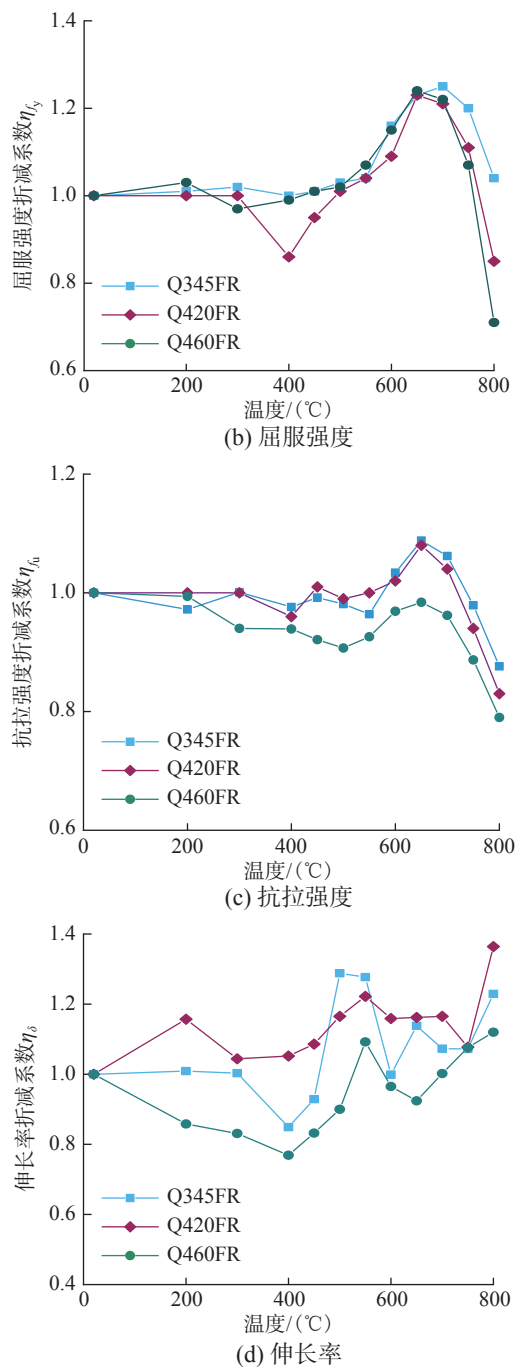


图5 耐火钢过火后力学参数变化曲线

Fig. 5 Variation curves of mechanical parameters of fire-resistant steel after fire

的屈服强度变化趋势大体一致, 当过火温度不超过 550 °C 时, 屈服强度变化不大; 超过 550 °C 时, 屈服强度开始随温度的升高而增大, 其原因主要是该温度下材料呈不完全奥氏体化状态, 由奥氏体和未转变的残余相形成的混合相组织增加了材料强度; 当超过 700 °C 时, 屈服强度呈现急速下降的趋势。耐火钢高温冷却后屈服强度在过火温度为 650 °C~700 °C 达到最大峰值。

表 3 耐火钢过火后屈服强度参数
Table 3 Yield strength parameters of fire-resistant steel after fire

$T/(^{\circ}\text{C})$	Q345FR		Q420FR		Q460FR	
	f_y/MPa	η_{fy}	f_y/MPa	η_{fy}	f_y/MPa	η_{fy}
20	440	1.00	438	1.00	492	1.00
200	443	1.01	438	1.00	507	1.03
300	450	1.02	440	1.00	475	0.97
400	440	1.00	375	0.86	487	0.99
450	446	1.01	416	0.95	496	1.01
500	451	1.03	443	1.01	502	1.02
550	457	1.04	457	1.04	528	1.07
600	511	1.16	476	1.09	565	1.15
650	543	1.23	538	1.23	610	1.24
700	550	1.25	529	1.21	601	1.22
750	529	1.20	484	1.11	524	1.07
800	456	1.04	373	0.85	347	0.71

注: T 为温度; f_y 为屈服强度; η_{fy} 为屈服强度折减系数。

2.5 抗拉强度

表 4 为耐火钢高温冷却后的抗拉强度及其变化系数。从表 4 和图 5(c) 可知, 当过火温度不超过 600 $^{\circ}\text{C}$ 时, Q345FR 和 Q420FR 的抗拉强度变化系数上下波动幅度不超过 4%; 当温度超过 600 $^{\circ}\text{C}$ 时, 抗拉强度随温度升高先增大后减小, 且在 650 $^{\circ}\text{C}$ ~700 $^{\circ}\text{C}$ 区间内达到峰值。相比于 Q345FR 和 Q420FR 的抗拉强度在过火后相比常温有升高, Q460FR 的抗拉强度在过火后都小于常温下的抗拉强度, 随着温度的升高, 抗拉强度会先上升至峰值而后减小, 同样在 650 $^{\circ}\text{C}$ ~700 $^{\circ}\text{C}$ 区间内达到峰值。

出现以上现象的主要原因是: 高温过火、冷却对耐火钢的微观结构造成了改变。过火温度在 500 $^{\circ}\text{C}$ ~700 $^{\circ}\text{C}$ 时, 耐火钢材料处于未完全奥氏体化的阶段, 剩余的渗碳体量比铁素体量大, 奥氏体和未转变的残余相形成了混合相组织, 材料强度随之增大; 当温度超过 700 $^{\circ}\text{C}$, 奥氏体发生共析转变, 获得块状铁素体加珠光体组织, 屈服强度和抗拉强度均降低。应力-应变曲线出现了明显的屈服平台段。

2.6 伸长率

按照《金属材料拉伸试验 第 1 部分: 室温试验方法》(GB/T 228.1—2010)^[13] 规定测量断开后的标距, 具体的方法是: 将试样破坏的部分牢牢地粘在一起, 保证其轴线在同一直线上, 测试试样断

表 4 耐火钢过火后抗拉强度参数
Table 4 Tensile strength parameters of fire-resistant steel after fire

$T/(^{\circ}\text{C})$	Q345FR		Q420FR		Q460FR	
	f_u/MPa	η_{fu}	f_u/MPa	η_{fu}	f_u/MPa	η_{fu}
20	550	1.00	570	1.00	653	1.00
200	534	0.97	568	1.00	649	0.99
300	550	1.00	568	1.00	614	0.94
400	537	0.98	545	0.96	613	0.94
450	545	0.99	573	1.01	602	0.92
500	540	0.98	565	0.99	592	0.91
550	530	0.96	569	1.00	605	0.93
600	569	1.03	582	1.02	633	0.97
700	584	1.06	593	1.04	628	0.96
750	539	0.98	538	0.94	579	0.89
800	482	0.88	474	0.83	516	0.79

注: T 为温度; f_u 为抗拉强度; η_{fu} 为抗拉强度折减系数。

后的标距。测量时使用的游标卡尺精度为 0.01 mm, 伸长率测量误差为 0.01%。并按下式计算断后伸长率 A :

$$A = \frac{L_u - L_o}{L_o} \times 100 \quad (1)$$

式中: L_o 为原始标距; L_u 为断后标距。断后伸长率 A 结果如表 5 所示。可以看出, 耐火钢高温冷却后的伸长率呈波动变化, 且波动幅度较大, 但三种钢号的波动趋势大体相似。其中, Q420FR 高温冷却后的伸长率都大于未受火情况。当过火温度为 550 $^{\circ}\text{C}$ 时, 三种牌号耐火钢的伸长率都突然增加。

表 5 耐火钢过火后伸长率参数
Table 5 Elongation parameters of fire-resistant steel after fire

$T/(^{\circ}\text{C})$	Q345FR		Q420FR		Q460FR	
	$A/(%)$	η_A	$A/(%)$	η_A	$A/(%)$	η_A
20	25.6	1.00	23.5	1.00	27.3	1.00
200	25.9	1.01	27.1	1.16	23.4	0.86
300	25.7	1.00	24.5	1.04	22.7	0.83
400	21.8	0.85	24.7	1.05	21.0	0.77
450	23.8	0.93	25.5	1.09	22.7	0.83
500	33.0	1.29	27.3	1.16	24.6	0.90
550	32.7	1.28	28.7	1.22	29.8	1.09
600	25.6	1.00	27.2	1.16	26.3	0.96
650	29.2	1.14	27.3	1.16	25.2	0.92
700	27.5	1.07	27.3	1.16	27.3	1.00
750	27.5	1.07	25.3	1.08	29.4	1.08
800	31.5	1.23	32.0	1.36	30.5	1.12

注: T 为温度; A 为伸长率; η_A 为伸长率折减系数。

3 高温冷却后力学性能指标建议取值

将耐火钢屈服强度、抗拉强度与同等级的结构钢 Q345^[17]、Q460^[18] 进行对比 (图 6 和图 7), 发现在现有研究中提出的结构钢的高温冷却后的本构模型不适用于高强度耐火钢。

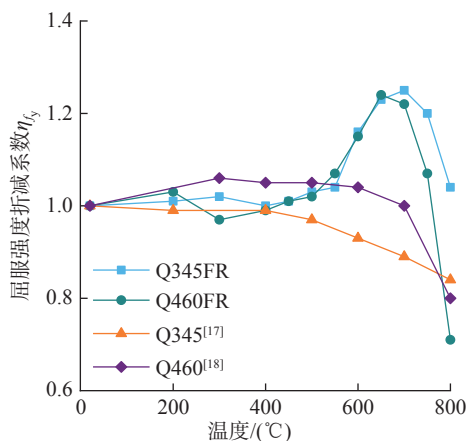


图 6 屈服强度对比曲线

Fig. 6 Contrast curve of yield strength

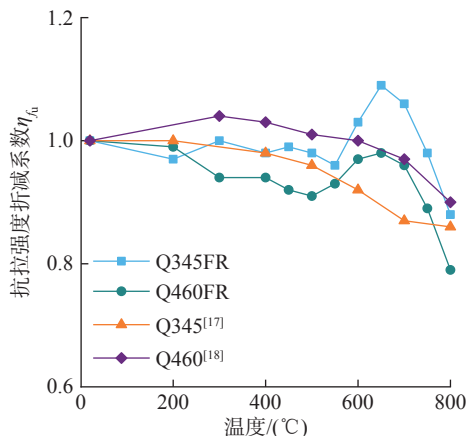


图 7 抗拉强度对比曲线

Fig. 7 Contrast curve of tensile strength

3.1 弹性模量

从图 5(a) 可知, 各种耐火钢的高温冷却后弹性模量变化均很小, 可以直接取未过火耐火钢的弹性模量。

3.2 屈服强度

与 Q460 结构钢相比 (图 6), 过火温度低于 500 °C 时, 耐火钢高温冷却后的屈服强度变化系数均小于 Q460 结构钢; 500 °C~700 °C 时, 耐火钢屈服强度变化系数随温度的升高而显著增大, 而 Q460 结构钢和 Q345 结构钢则为下降; 当温度超过 750 °C 时, 耐火钢的屈服强度迅速下降。

高强度耐火钢高温冷却后的屈服强度变化系数可按式计算 (图 8), 平均误差为 3.67%, 方差

为 5.42%:

$$\eta_{fy} = \begin{cases} 1, & 0^\circ\text{C} \leq T < 500^\circ\text{C} \\ 0.0016T + 0.2, & 500^\circ\text{C} \leq T \leq 650^\circ\text{C} \\ -0.0036T + 3.58, & 650^\circ\text{C} \leq T \leq 1000^\circ\text{C} \end{cases} \quad (2)$$

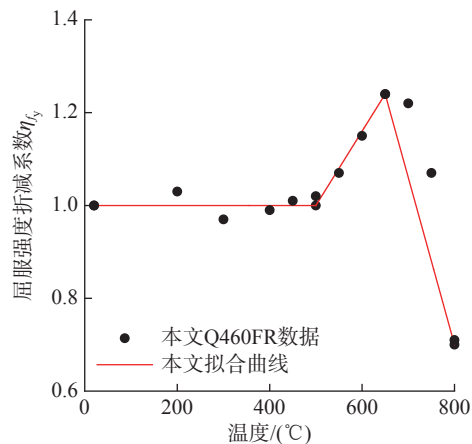


图 8 过火后屈服强度变化系数拟合公式曲线

Fig. 8 Recommended formula curve of yield strength variation coefficient after fire

3.3 抗拉强度

图 7 为高强度耐火钢抗拉强度变化系数 η_{fk} 与结构钢的对比, 可见两种牌号耐火钢的变化系数均在过火温度为 650 °C 左右有一个突增, 而后出现一段急速下坡段, 而结构钢的极限强度则随过火温度升高平缓地慢慢减小。

高强度耐火钢高温冷却后抗拉强度变化系数可按式计算 (图 9), 平均误差为 3.16%, 方差为 2.42%:

$$\eta_{fk} = \begin{cases} -5.59 \times 10^{-5}T + 1.00, & 0^\circ\text{C} \leq T \leq 700^\circ\text{C} \\ -0.00187T + 2.27, & 700^\circ\text{C} < T \leq 1000^\circ\text{C} \end{cases} \quad (3)$$

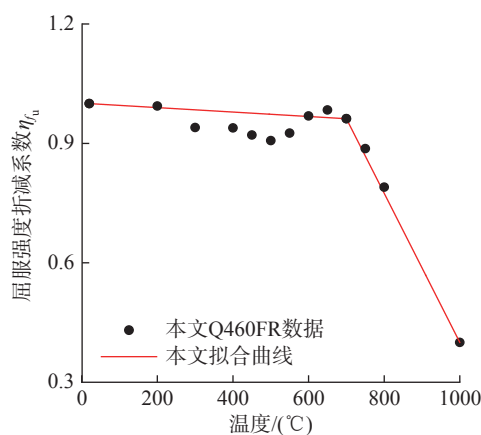


图 9 过火后抗拉强度变化系数拟合公式曲线

Fig. 9 Recommended formula curve of tensile strength variation coefficient after fire

4 结论

对比分析了耐火钢高温冷却后的弹性模量、

屈服强度、抗拉强度等主要力学性能指标, 本文得到了其变化规律。主要结论如下:

(1) 随着过火温度的升高, 高温冷却后耐火钢表面颜色呈现现金黄色、淡蓝色、灰黑色、红褐色的变化趋势。试样断裂时断口截面随温度升高, 越来越小。

(2) 与常温下不同的是, 耐火钢的应力-应变曲线在高温冷却后出现了明显的屈服平台。当过火温度在 700 °C 以下范围, 钢材过火后的强度高于未受火情况下强度。

(3) 超过 600 °C 时, 伴随着过火温度的上升, 屈服强度和抗拉强度会先上升然后急剧下降, 且屈服强度和抗拉强度都有一个较明显的突增点, 伸长率则在 550 °C 左右有一个突增, 弹性模量轻微上下浮动, 变化不大。

(4) 针对工程应用, 本文给出了高强度耐火钢高温冷却后的弹性模量、屈服强度、抗拉强度计算的拟合公式, 可以用来评估耐火钢结构火灾后的承载性能。

参考文献:

- [1] 王庆敏, 王忠民, 刘应心. 高层建筑用耐火钢研究与应用综述[J]. 宽厚板, 2020, 26(4): 45—48.
Wang Qingmin, Wang Zhongmin, Liu Yingxin. Summary of research and applications of fire proof steel for high rise building [J]. Wide and Heavy Plate, 2020, 26(4): 45—48. (in Chinese)
- [2] 杨才福, 张永权. 建筑用耐火钢的发展[J]. 钢结构, 1997, 12(38): 29—34.
Yang Caifu, Zhang Yongquan. Development of fire-resistant steel for buildings [J]. Steel Construction, 1997, 12(38): 29—34. (in Chinese)
- [3] 楼国彪, 费楚妮, 王彦博, 等. 高强度耐火钢高温下力学性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2021. doi: 10.14006/j.jzjgxb.2020.0686
Lou Guobiao, Fei Chuni, Wang Yanbo, et al. Experimental study on mechanical properties of high strength fire-resistant steel at elevated temperatures[J]. Journal of Building Structures, 2021. doi: 10.14006/j.jzjgxb.2020.0686. (in Chinese)
- [4] 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)
- [5] 杨勇, 魏博, 薛亦聪, 等. 部分预制装配型钢筋混凝土柱火灾后偏压试验研究[J]. 工程力学, 2020, 37(3): 108—119.
Yang Yong, Wei Bo, Xue Yicong, et al. Experimental study on post-fire performance of partially precast steel reinforced concrete columns subjected to eccentric compression [J]. Engineering Mechanics, 2020, 37(3): 108—119. (in Chinese)
- [6] Lu Jie, Liu Hongbo, Chen Zhihua, 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.
- [7] Gunalan S, Mahendran M. Experimental investigation of post-fire mechanical properties of cold-formed steels [J]. Thin-Walled Structures, 2014, 84: 241—254.
- [8] Qiang X H, Frans S, Bijlaard K, et al. Post-fire mechanical properties of high strength structural steels S460 and S690 [J]. Engineering Structures, 2012, 35: 1—10.
- [9] Qiang X H, Frans S, Bijlaard K, et al. Post-fire performance of very high strength steel S960 [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2013, 80: 235—242.
- [10] 李国强, 吕慧宝, 张超. Q690钢材高温后力学性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2017, 38(5): 109—116.
Li Guoqiang, Lü Huibao, Zhang Chao. Experimental research on post-fire mechanical properties of Q690 steel [J]. Journal of Building Structures, 2017, 38(5): 109—116. (in Chinese)
- [11] 胡婉颖, 余玉洁, 田沛丰, 等. 高温后高强Q690钢材循环加载试验及本构模型研究[J]. 工程力学, 2021, 38: 1—13.
Hu Wanying, Yu Yujie, Tian Peifeng, et al. Cyclic loading test and constitutive model of postfire [J]. Engineering Mechanics, 2021, 38: 1—13. (in Chinese)
- [12] 楼国彪, 俞珊, 王锐. 高强度螺栓过火冷却后力学性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2012, 33(2): 33—40.
Lou Guobiao, Yu Shan, Wang Rui. Mechanical properties of high-strength bolts after fire [J]. Journal of Building Structures, 2012, 33(2): 33—40. (in Chinese)
- [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]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
GB/T 228.1—2010, Metallic materials-Tensile testing-Part 1: Method of test at room temperature [S]. Beijing: Standards Press of China, 2010. (in Chinese)
- [14] GB/T 228.2—2015, 金属材料拉伸试验 第2部分: 高温试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
GB/T 228.2—2015, Metallic materials-Tensile testing-Part 2: Method of test at elevated temperature [S]. Beijing: Standards Press of China, 2015. (in Chinese)
- [15] 熊自柳, 江海涛, 蔡庆伍, 等. 消除TRIP钢屈服平台的预拉伸实验及微观机理[J]. 北京科技大学学报, 2008, 30(4): 379—382.
Xiong Ziliu, Jiang Haitao, Cai Qingwu, et al. Tension test and microstructural mechanism for eliminating the yield platform of TRIP steel [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2008, 30(4): 379—382. (in Chinese)
- [16] GB/T 28415—2012, 耐火结构用钢板及钢带[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
GB/T 28415—2012, Fire-resistant structural steel plate and strip [S]. Beijing: Standards Press of China, 2012. (in Chinese)
- [17] Zhang Chuntao, Wang Ruheng, Zhu Li. Mechanical properties of Q345 structural steel after artificial cooling from elevated temperatures [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2021, 176: 106432.
- [18] Wang Weiyong, Liu Tianzi, Liu Jiepeng. Experimental study on post-fire mechanical properties of high strength Q460 steel [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2015, 114: 100—109.