

# 超高强钢 S960 火灾后力学性能试验研究

强旭红, 武念铎, 姜 旭, 罗永峰

(同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

**摘要:** 通过试验研究超高强钢 S960 过火冷却至常温后的力学性能, 得到过火高温对超高强钢 S960 弹性模量、屈服强度、极限强度以及应力-应变曲线的影响规律。结果表明, 钢材火灾后的力学性能取决于钢材的等级和生产加工工艺。通过对试验数据进行数值拟合, 给出可准确表达 S960 火灾高温后材料力学性能剩余程度的预测公式。

**关键词:** 超高强钢; 火灾高温后; 力学性能; 剩余系数; 预测公式

中图分类号: TU392

文献标志码: A

## Experimental Study on Post-fire Mechanical Properties of Very High Strength Steel S960

QIANG Xuhong, WU Nianduo, JIANG Xu, LUO Yongfeng

(College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** This paper presents an experimental study on very high strength steel S960 after cooling down from elevated temperatures and its post-fire elastic modulus, yield strength, ultimate strength and stress-strain curves are obtained. The results show that the material properties of steels after fire are dependent on their grade and process of manufacture. Based on the experimental results, this paper proposes some unique predictive equations for evaluating the post-fire mechanical properties of S960.

**Key words:** very high strength steel; post-fire; mechanical properties; residual factor; predictive equation

高强钢的应用能带来可观的社会经济效益, 比如: 减少用钢量; 有效地解决构件尺寸问题, 创造更大的建筑使用空间; 减少焊接工作量; 节省运输、吊装费用; 减轻结构自重; 减少基础造价等<sup>[1]</sup>。此外, 高

强钢的应用还能节约能源、减少碳排放, 是一种环境友好型材料, 符合我国节约环保型社会的建设需求。因此一些结构形式及构件宜采用高强钢, 如受拉构件、大跨度结构以及高层结构中的短粗柱等<sup>[2]</sup>。近年来, 许多重要建筑结构已采用高强钢。随着材料科学的进步, 高强钢的应用前景将更加广泛, 所以对高强钢进行深入的研究势在必行。

钢材在常温下具有良好的力学性能, 随着温度升高, 钢材的力学性能显著降低。但是, 钢材过火冷却至常温后可恢复大部分的初始力学性能, 因此火灾后钢材的再利用具有一定的空间。若结构火灾后未倒塌, 构件将随着火势减小及环境温度降低而冷却至常温。降温过程中, 结构的内力和变形不断重分布, 此时的结构可能比火灾下更危险。钢结构火灾后是否需要拆除、维修或者直接继续使用, 需要可靠的检测与鉴定, 而钢材火灾后力学性能是结构火灾后性能检测与鉴定的重要依据之一。

自美国“911”恐怖事件后, 研究火灾下材料性能退化、热约束和结构构件的偶然移除对结构性能的综合影响成为结构工程领域的当务之急。目前的研究主要针对常规强度的结构钢(普通钢)<sup>[3-5]</sup>, 对于高强钢火灾下力学性能的研究有限, 涉及的强度等级主要有 S460<sup>[6-12]</sup>和 BISPLATE 80<sup>[13]</sup>。至于钢材火灾高温后力学性能, 仅文献<sup>[14]</sup>对高强钢 S460 和 S690 进行研究, 即使对于普通钢火灾后力学性能的研究也很有限<sup>[7-8, 15-17]</sup>。BS 5950-8(2003)附录 B<sup>[18]</sup>针对普通钢的火灾后力学性能及继续使用提出若干建议: 若火灾后热处理钢和铸钢的变形在限值内, 则可以继续使用; 火灾后的普通钢 S235 和 S275 可恢复常温下(未过火)90%的力学性能; 当过火温度超过 600 °C, S355 冷却至常温后的强度可恢复至常温下(未过火)的 75%以上。但是对于高强钢, 世界范围内

收稿日期: 2015-12-22

基金项目: 国家自然科学基金(51408150); 中央高校基本科研业务费专项资金(2014KJ044)

第一作者: 强旭红(1984—), 女, 工学博士, 主要研究方向为钢结构抗火及高强钢在土木工程领域的应用。

E-mail: qiangxuhong@tongji.edu.cn

通讯作者: 姜 旭(1982—), 男, 工学博士, 主要研究方向为钢结构和钢与组合桥。E-mail: jiangxu@tongji.edu.cn

现行的设计规范还没有给出任何相关建议。

本文对超高强钢 S960 进行火灾高温后力学性能试验,旨在揭示 S960 火灾后的应力-应变曲线、弹性模量、屈服强度和极限强度的剩余情况,并与现有研究及现行设计规范中的其他等级钢材对比,同时给出超高强钢 S960 火灾后力学性能剩余情况的预测公式,并验证其准确性。

## 1 试验过程

### 1.1 试验设备

试件的升温在可控温的电热炉中完成(见图 1)。高温后的拉伸试验通过 Gleeble 3800 系统进行,如图 2 和 3 所示。Gleeble 3800 系统是力学与热学耦合的一体化系统,最大可施加 20 t 的压力和 10 t 的拉力。本试验采用非接触式激光变形测量仪测量试件的应变,通过 QuikSim 软件预先设定的程序来控制试验过程。试验过程中得出的所有试验数据由电脑存储,并可由屏幕实时显示,进行试验监测。



图 1 可控温电热炉

Fig.1 Temperature-controllable furnace

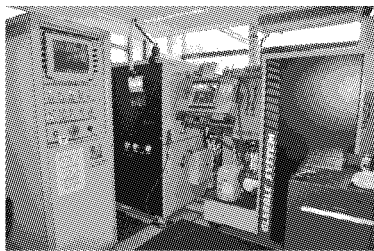


图 2 Gleeble 3800 系统

Fig.2 Gleeble 3800 system

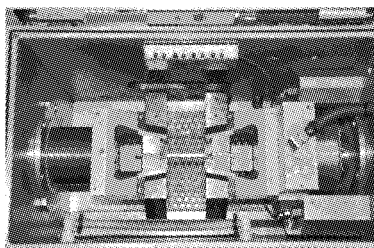


图 3 试验炉内的拉伸装置

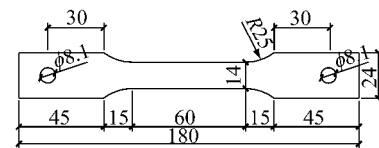
Fig.3 Tensile test rig inside the furnace

### 1.2 试验材料和试件设计

所有试件从同一块 S960QL 钢板上切割而来,钢板名义厚度为 5 mm。S960QL 钢是一种符合欧洲标准 EN 10025-6<sup>[19]</sup> 的超高强度结构用钢。该钢材经过淬火回火技术处理,具有良好的抗弯性和可焊性。S960QL 是钢材等级名称的缩写,其中 S 指结构用钢,960 指钢材的名义屈服强度为 960 MPa, Q 指淬火回火技术, L 指低温韧性。本试验所用超高强钢 S960QL(下文简称 S960)的化学成分见表 1。试件的形状和尺寸符合欧洲标准 EN 10002-5<sup>[20]</sup> 和美国标准 ASTM E21-09<sup>[21]</sup> 的要求。为将试件固定到 Gleeble 3800 系统的夹具上,在试件的两端预留孔洞,以便固定试件(见图 4)。

表 1 超高强钢 S960QL 的化学组成

Tab.1 Chemical composition of S960QL %				
$w_C$	$w_{Si}$	$w_{Mn}$	$w_P$	$w_S$
0.180	0.390	1.430	0.008	0.000 9
$w_{Cr}$	$w_{Cu}$	$w_{Mo}$	$w_N$	$w_{Nb}$
0.580	0.020	0.450	0.0047	0.022
$w_{Ni}$	$w_{Ti}$	$w_V$	$w_{Al-g}$	$w_{B-g}$
0.050	0.004	0.030	0.044	0.000 1



a 尺寸



b 试件

图 4 试件及其尺寸(单位:mm)

Fig.4 Test specimen and dimension(Unit:mm)

### 1.3 试验方法

常用的评估钢材高温力学性能的方法是进行稳态或瞬态火灾拉伸试验。与瞬态火灾试验方法相比,稳态火灾试验方法更为常用,这是因为稳态火灾试验操作相对容易并且能直接获得材料的应力-应变曲线。因此,本文采用稳态试验方法对 S960 进行试验研究,即试件升温至指定温度后自然冷却至常温,随后对试件进行拉伸试验。

### 1.4 试验步骤

试件在电热炉中从常温升温至指定温度,为模拟自然火灾,升温速率取  $10\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 。本试验共选

取 11 个火灾温度:300、400、500、600、650、700、750、800、850、900 和 1 000 °C. 前期研究表明<sup>[14]</sup>,升温至 100 °C和 200 °C后自然冷却至常温,钢材可恢复其基本力学性能,因此本试验并未选取 100 °C和 200 °C作为火灾温度. 试件升温至指定温度后,令温度稳定大约 10 min,使试件中部的温度分布均匀,随后自然冷却至常温,在常温下对试件施加拉力直至破坏. 本试验采用应变控制的方法施加荷载,应变率为0.005 min<sup>-1</sup>,满足 ASTM E21-09 的相关规定<sup>[21]</sup>. 为比较过火温度对 S960 高温后力学性能的影响,本试验同时进行 S960 常温下(未过火)的拉伸试验.

2 试验结果

2.1 弹性模量

弹性模量是影响钢结构承载能力的重要参数之一. 高温下钢材的弹性模量取决于相应温度的应力-应变曲线. 类似地,钢材火灾高温后的弹性模量也由钢材高温后的应力-应变曲线得到. 钢材高温后力学性能的剩余程度常用剩余系数评估. 弹性模量剩余系数是指钢材高温后的弹性模量与常温下(未过火)弹性模量的比值. 由于剩余系数的使用十分便捷,欧洲、美国和澳大利亚的钢结构设计规范,都推荐采用剩余系数进行钢结构的抗火设计与计算. 因此,本试验以弹性模量剩余系数的形式,研究过火温度对 S960 高温后弹性模量的影响.

试验得到的 S960 高温后弹性模量和弹性模量剩余系数列于表 2. 从表 2 可看出:过火温度不超过 600 °C时,S960 冷却后的弹性模量与常温下(未过火)相同;过火温度超过 600 °C后,冷却后的弹性模量显著降低. 值得注意的是,当过火温度为 800 °C和

1 000 °C时,S960 冷却后的弹性模量仍可达到常温下(未过火)的 75%和 65%.

2.2 屈服强度

常温下一般取 0.2%作为钢材的名义应变,取此应变对应的应力作为钢材的名义屈服强度. 高温下,由于没有明确统一的定义,有学者采用 0.5%、1.5%和 2.0%分别作为名义应变,取其对应的应力为钢材的名义屈服强度<sup>[6-7,13]</sup>. 本文研究过火温度对 S960 高温后名义屈服强度的影响(名义应变分别取 0.2%、0.5%、1.5%和 2.0%),并对比以上 4 个名义应变所对应的名义屈服强度剩余情况的异同. 名义应变 0.2%对应的名义屈服强度( $f_{0.2}$ )是由应力-应变曲线与原点处切线平移到 0.2%应变处的直线的交点确定;而 0.5%、1.5%和 2.0%应变所对应的屈服强度是由其应变水平处的垂直线与应力-应变曲线的交点确定.

钢材的屈服强度剩余系数是指钢材高温后的屈服强度与常温下(未过火)屈服强度的比值. 试件经拉伸试验得到的 4 个不同名义应变对应的名义屈服强度见表 3,屈服强度剩余系数见表 4.

表 3 S960 火灾后屈服强度

Tab.3 Post-fire yield strength of S960				
温度/°C	不同名义应变条件下的屈服强度/MPa			
	0.2%	0.5%	1.5%	2.0%
20	1 045	1 041	1 052	1 058
300	1 052	1 054	1 058	1 068
400	1 050	1 054	1 052	1 058
500	1 054	1 054	1 052	1 058
600	1 035	1 039	1 041	1 045
650	967	965	977	981
700	755	753	807	807
750	701	705	716	722
800	629	581	826	909
850	529	512	786	869
900	388	400	570	601
1 000	384	394	552	587

表 4 S960 火灾后屈服强度剩余系数

Tab.4 Post-fire yield strength residual factor of S960				
温度/°C	不同名义应变条件下的剩余系数			
	0.2%	0.5%	1.5%	2.0%
20	1.00	1.00	1.00	1.00
300	1.01	1.01	1.01	1.01
400	1.00	1.01	1.00	1.00
500	1.01	1.01	1.00	1.00
600	0.99	1.00	0.99	0.99
650	0.93	0.93	0.93	0.93
700	0.72	0.72	0.77	0.76
750	0.67	0.68	0.68	0.68
800	0.60	0.59	0.79	0.86
850	0.51	0.49	0.75	0.82
900	0.37	0.39	0.54	0.57
1 000	0.37	0.38	0.53	0.56

表 2 S960 火灾后弹性模量和弹性模量剩余系数

Tab.2 Post-fire elastic modulus and residual factor of S960		
温度/°C	弹性模量/MPa	剩余系数
20	213 586	1.00
300	217 287	1.02
400	208 889	0.98
500	206 272	0.97
600	201 870	0.95
650	193 695	0.91
700	186 649	0.87
750	171 418	0.80
800	160 587	0.75
850	151 339	0.71
900	141 275	0.66
1 000	138 648	0.65

从表 3 和 4 可看出,过火温度不超过 600 °C 时, S960 冷却后的名义屈服强度与常温下(未过火)相同,这对超高强钢 S960 火灾后的再利用是十分有利的.出于安全考虑,若采用超高强钢 S960 的建筑结构经历火灾的温度在 600 °C 以下,建议火灾后 S960 的名义屈服强度取常温下(未过火)的 90%.因此采用超高强钢 S960 的构件若经历火灾温度在 600 °C 以下,同时构件的平直度在限值内,则火灾后可继续使用.

值得注意的是,当过火温度为 800 °C 且名义应变取 1.5% 和 2.0% 时, S960 冷却至常温后的名义屈服强度较 750 °C 时有显著提高;当过火温度超过 800 °C 后,其冷却至常温后的屈服强度显著降低.

### 2.3 极限强度

钢材的极限强度剩余系数是指钢材火灾后的极限强度与常温下(未过火)极限强度的比值.试验得出的 S960 火灾后极限强度和极限强度剩余系数汇总于表 5.从表 5 可看出,过火温度不超过 600 °C 时, S960 冷却后的极限强度与常温下(未过火)相同;即使过火温度达到 1 000 °C, S960 冷却后的极限强度仍可达到常温下(未过火)的 60%.与屈服强度相似,过火温度为 800 °C 时, S960 冷却后的极限屈服强度有所提高;过火温度超过 800 °C 后,其冷却后的极限强度显著降低,这与超高强钢 S960 的生产加工工艺有关.

表 5 S960 火灾后极限强度和极限强度剩余系数

Tab.5 Post-fire ultimate strength and residual factor of S960

温度/°C	极限强度/MPa	剩余系数
20	1 079	1.00
300	1 080	1.00
400	1 082	1.00
500	1 074	1.00
600	1 070	0.99
650	1 002	0.93
700	983	0.91
750	776	0.72
800	1 060	0.98
850	917	0.85
900	788	0.73
1 000	695	0.64

### 2.4 应力-应变曲线与破坏模式

钢材的延性好坏是由钢材断裂之前的变形程度确定的.试验得出的 S960 火灾高温后应力-应变曲线如图 5 所示.从图 5 看出,过火温度不超过 800 °C 时, S960 冷却后的应力-应变曲线与常温下(未过火)相似,具有明显的屈服平台;过火温度超过 800 °C

后,其冷却后的应力-应变曲线逐渐丧失屈服平台.

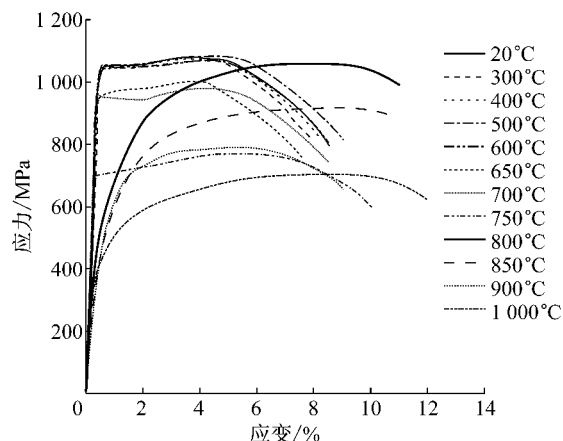


图 5 试件不同过火温度冷却后的应力-应变曲线

Fig.5 Stress-strain curves after cooling down from various fire temperatures

当过火温度为 800 °C 时, S960 冷却后的强度较 750 °C 显著提高,随后随着过火温度升高,其冷却后的强度逐渐降低.试件火灾高温后的典型破坏模式如图 6 所示.从图 6 可看出,试件颈缩明显,无脆性破坏,这表明超高强钢 S960 在火灾后具有良好的延性.

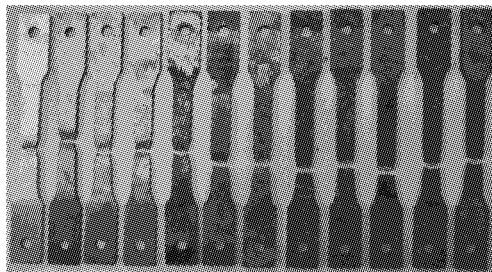


图 6 试件不同过火温度冷却后拉伸试验下的破坏模式

Fig.6 Failure modes of S960 tensile specimens after exposure to various fire temperatures

## 3 对比分析

现有研究鲜有涉及钢材的火灾下及火灾后力学性能, BS 5950-8(2003)附录 B<sup>[18]</sup>对火灾后普通钢的继续使用提出相关建议,也对铸钢和预应力钢筋的火灾下及火灾后力学性能提出相关建议,但并未提及高强钢.世界范围内现行的其他设计规范未对钢材火灾后的继续使用给出建议.

Outinen 等<sup>[7-8]</sup>从升温至 710 °C 的 S355 和 S350 构件上截取试件,对试件进行常温下拉伸试验,基于试验结果建议:若钢结构火灾后的变形满足限值要求,材料的强度仍可满足要求.遗憾的是,现阶段定

量的钢材火灾后材性数据仍不足。

本节对本文试验结果与现有研究成果进行对比分析。

### 3.1 弹性模量

S960、S355、S460 和 S690 火灾高温后的弹性模量剩余系数如图 7 所示。从图 7 可看出,当过火温度低于 600 °C 时,4 种钢材冷却后的弹性模量剩余系数相差不大,均可达到常温下(未过火)的 90% 以上。值得注意的是,当过火温度超过 600 °C 后, S960 冷却

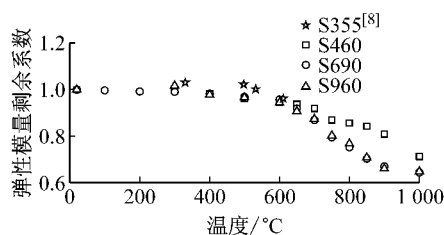
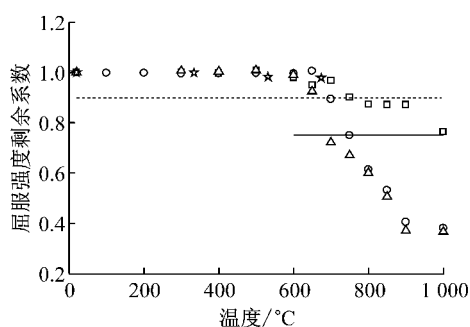
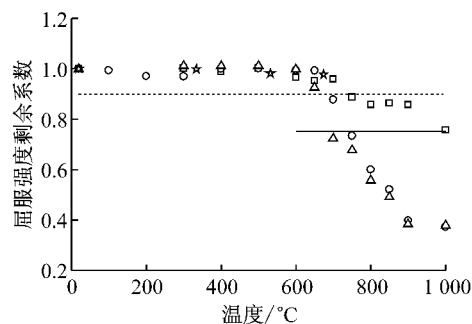


图 7 火灾后弹性模量剩余系数对比

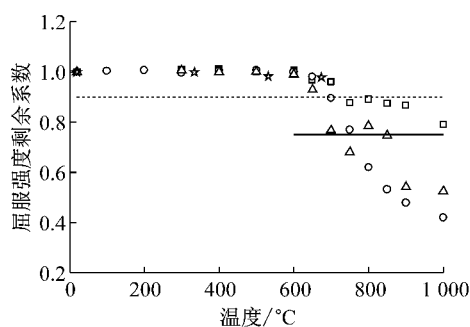
Fig.7 Comparison of post-fire elastic modulus residual factors



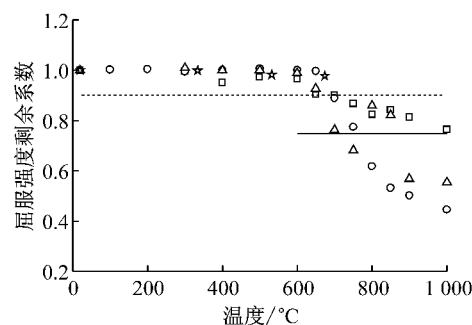
a 0.2%名义应变



b 0.5%名义应变



c 1.5%名义应变



d 2.0%名义应变

□ S460 ○ S690 △ S960 ★ S355<sup>[8]</sup> — S355(BS 5950) ..... S235和S275(BS 5950)

图 8 火灾后屈服强度剩余系数对比

Fig.8 Comparison of post-fire yield strength residual factors

### 3.3 极限强度

本节比较 S960、S355、S460 和 S690 过火冷却后极限强度的剩余系数,以及 BS 5950 针对 S235 和 S275 给出的火灾后力学性能建议(见图 9)。从图 9 可看出,BS 5950 针对普通钢 S235 和 S275 火灾后极

后的弹性模量剩余系数与 S690 相差不大,但与 S460 有一定的差别,这是由钢材生产工艺决定的。

### 3.2 屈服强度

本节比较 S960、S355、S460 和 S690 火灾高温后屈服强度的剩余系数,以及 BS 5950 针对 S235 和 S275 给出的火灾后力学性能建议(见图 8)。从图 8 可看出,BS 5950 针对 S235 和 S275 火灾后屈服强度提出的建议并不适用于高强度钢 S460、S690 和超高强度钢 S960;针对 S355 火灾后屈服强度提出的建议对于 S460 偏保守,对于 S690 和 S960 偏不安全,尤其是当过火温度超过 700 °C 后。此外,当名义应变取 0.2% 和 0.5% 时, S960 火灾后的屈服强度剩余系数与 S690 相似;当名义应变取 1.5% 和 2.0% 且过火温度超过 800 °C 后, S960 冷却后的名义屈服强度剩余系数与 S690 有较大差别。综上所述,钢材火灾后的屈服强度剩余系数取决于钢材的等级和生产工艺。

限强度提出的建议并不适用于高强度钢 S460、S690 和超高强度钢 S960;针对 S355 火灾后极限强度提出的建议对于 S460 偏保守,但对于 S690 和 S960 并不适用,特别是当过火温度超过 700 °C 后。此外,当过火温度低于 800 °C 时, S960 火灾高温后的极限强度

剩余系数与 S690 相似;当过火温度超过 800 °C 后, S960 冷却后的极限强度剩余系数与 S690 有较大差别. 因此, 钢材火灾后的极限强度剩余系数取决于钢材的等级和生产加工工艺. 综上, 采用 BS 5950 针对普通钢火灾后力学性能的建议来预测高强钢的火灾后力学性能是十分危险的, 各国规范针对高强钢火灾后力学性能及其可否继续使用提出相应的建议迫在眉睫. 本文在试验结果的基础上提出了相应的预测公式.

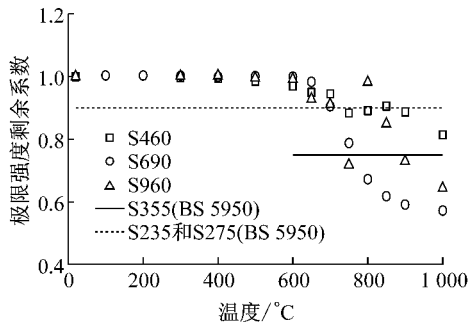


图9 火灾后极限强度剩余系数对比

Fig.9 Comparison of post-fire ultimate strength residual factors

## 4 预测公式

过火温度是钢材力学性能退化的主要因素, 因此钢材的各力学性能剩余系数是试件过火温度  $\theta$  的函数.

### 4.1 弹性模量

S960 火灾后的弹性模量剩余系数与 S690 相同, 前期研究<sup>[14]</sup>给出 S690 火灾高温后弹性模量剩余系数的预测公式, 本文采用该公式(见式(1)和(2))与试验结果进行对比(见图10). 从图10可看

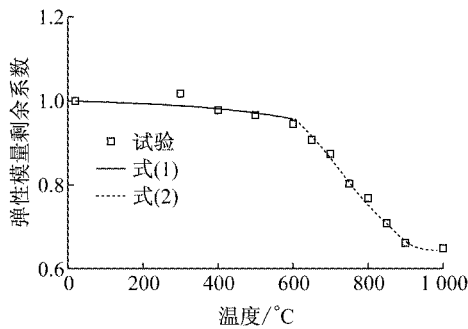


图10 式(1)~(2)计算结果与试验结果的对比

Fig.10 Comparison of predicted elastic modulus residual factor from Eqs. (1) and (2) with test results

出, 预测公式与试验结果吻合较好, 且该公式形式简单, 故建议采用该公式预测超高强钢 S960 火灾高温后的弹性模量剩余程度.

$$\frac{E_{\theta}}{E_{20}} = -1.52 \times 10^{-10} \theta^3 + 2.70 \times 10^{-8} \theta^2 - 3.35 \times 10^{-5} \theta + 1, \quad 20 \leq \theta \leq 600 \quad (1)$$

$$\frac{E_{\theta}}{E_{20}} = 6.27 \times 10^{-9} \theta^3 - 1.38 \times 10^{-5} \theta^2 + 8.95 \times 10^{-3} \theta - 0.806, \quad 600 < \theta \leq 1000 \quad (2)$$

式中:  $E_{\theta}$  为 S960 过火温度  $\theta$  时冷却后的弹性模量;  $E_{20}$  为 S960 常温下(未过火)的弹性模量.

### 4.2 屈服强度

由于 0.5%、1.5% 和 2.0% 的名义应变应用范围有限, 故本文仅提出 0.2% 名义应变对应的 S960 名义屈服强度剩余系数预测公式.

图 11 列出 2 种预测公式(见式(3)~(6))与试验结果的对比情况. 从图 11 可看出, 式(3)~(4)与试验结果吻合较好, 但有时偏于不安全. 因此出于安全考虑, 建议采用式(5)~(6)预测超高强钢 S960 火灾后屈服强度的剩余程度.

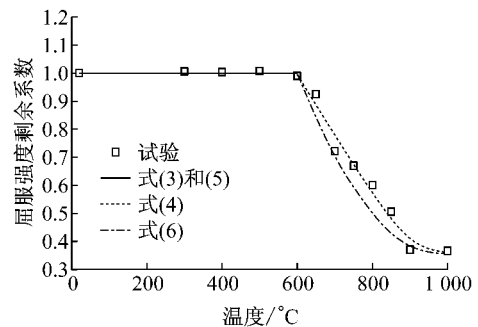


图11 式(3)~(6)计算结果与试验结果对比

Fig.11 Comparison of predicted yield strength residual factor from Eqs. (3)~(6) with test results

$$\frac{f_{y\theta}}{f_{y20}} = 1.0, \quad 20 \leq \theta \leq 600 \quad (3)$$

$$\frac{f_{y\theta}}{f_{y20}} = 8.157 \times 10^{-9} \theta^3 - 1.685 \times 10^{-5} \theta^2 + 9.388 \times 10^{-3} \theta - 0.333, \quad 600 < \theta \leq 1000 \quad (4)$$

$$\frac{f_{y\theta}}{f_{y20}} = 1.0, \quad 20 \leq \theta \leq 600 \quad (5)$$

$$\frac{f_{y\theta}}{f_{y20}} = 4.4 \times 10^{-6} \theta^2 - 8.637 \times 10^{-3} \theta + 4.596, \quad 600 < \theta \leq 1000 \quad (6)$$

式中:  $f_{y\theta}$  为 S960 过火温度  $\theta$  时冷却后的屈服强度;  $f_{y20}$  为 S960 常温下(未过火)的屈服强度.

### 4.3 极限强度

通过试验可看出,过火温度为 800 °C 时, S960 冷却后的极限强度较 750 °C 显著提高,因此本文采用 3 段公式拟合试验结果(见图 12). 从图 12 可看出,预测公式(7)~(9)与试验结果吻合较好.

$$\frac{f_{u\theta}}{f_{u20}} = 1.0, \quad 20 \leq \theta \leq 600 \quad (7)$$

$$\frac{f_{u\theta}}{f_{u20}} = 1.006 - \frac{(\theta - 600)^{1.158}}{9.567 \times 10^5 \theta}, \quad 600 < \theta \leq 800 \quad (8)$$

$$\frac{f_{u\theta}}{f_{u20}} = 7.762 \times 10^{-6} \theta^2 - 1.568 \times 10^{-2} \theta + 8.564, \quad 800 < \theta \leq 1000 \quad (9)$$

式中:  $f_{u\theta}$  为 S960 过火温度  $\theta$  时冷却后的极限强度;  $f_{u20}$  为 S960 常温下(未过火)的极限强度.

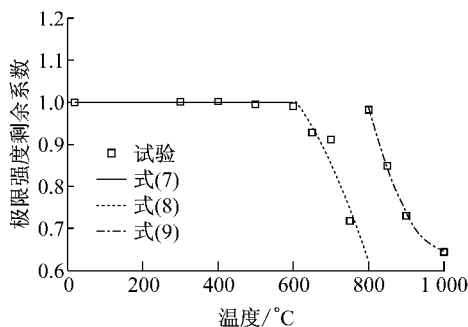


图 12 式(7)~(9)计算结果与试验结果的对比

Fig.12 Comparison of predicted ultimate strength residual factor from Eqs. (7) ~ (9) with test results

## 5 结语

本文对超高强钢 S960 进行不同过火温度冷却至常温后的拉伸试验,得到过火温度对 S960 弹性模量、屈服强度、极限强度、应力-应变曲线的影响规律和典型破坏模式. 试验结果表明, S960 火灾后的力学性能与 S460、S690 及普通钢不同,钢材过火冷却后的力学性能取决于钢材的等级和生产加工工艺,因此 BS 5950 针对普通钢火灾后力学性能及可否继续使用提出的建议并不适用于高强钢,应对高强钢提出针对性建议. 值得注意的是,与其他等级钢材相似,当过火温度低于 600 °C 时,超高强钢 S960 冷却后可恢复其基本力学性能. 因此,当火灾温度不超过 600 °C 且采用 S960 构件火灾后的平直度满足限值要求时,构件可以继续使用. 出于安全考虑,建议此时 S960 的力学性能取常温下(未过火)的 90%. 为便

于评估 S960 过火温度超过 600 °C 甚至达到 1000 °C 冷却后的力学性能,本文提出一系列公式预测 S960 火灾后的弹性模量、屈服强度和极限强度剩余情况. 通过与试验结果对比,验证预测公式的准确性,这为高强钢结构火灾后性能的检测鉴定及可否继续使用提供理论依据,也为各国相关规范的修订提供参考.

### 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 steels in seismic structure [J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(1):1.
- [2] Bjorhovde R. Performance and design issues for high strength steel in structures [J]. Advances in Structural Engineering, 2010, 13(3):403.
- [3] Kodur V, Dwaikat M, Fike R. High-temperature properties of steel for fire resistance modeling of structures [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2010, 22(5):423.
- [4] Outinen J, Kesti J, Makelainen P. Fire design model for structural steel S355 based upon transient state tensile test results [J]. Journal of Constructional Steel Research, 1997, 42(3):161.
- [5] Makelainen P, Outinen J, Kesti J. Fire design model for structure steel S420M based upon transient-state tensile test results [J]. Journal of Constructional Steel Research, 1998, 48(1):47.
- [6] Outinen J, Kaitila O, Makelainen P. High-temperature testing of structural steel and modelling of structures at fire temperatures [R]. Helsinki: Helsinki University of Technology, 2001.
- [7] Outinen J. Mechanical properties of structural steels at high temperatures and after cooling down[R]. Helsinki: Helsinki University of Technology, 2007.
- [8] Outinen J, Makelainen P. Mechanical properties of structural steel at elevated temperatures and after cooling down [J]. Fire and Materials, 2004, 28(2/4):237.
- [9] Lange J, Wohlfeil N. Examination of the mechanical properties of the microalloyed grain refined steel S460 at elevated temperatures [J]. Bautechnik, 2007, 84(10):711.
- [10] Schneider R, Lange J. Constitutive equations of structural steel S460 at high temperatures [C]// Nordic Steel Construction Conference. Darmstadt: [s.n.], 2009:204-211.
- [11] Schneider 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.
- [12] Schneider R, Lange J. Material and creep behaviour of S460 in case of fire experimental investigation and analytical modeling [C]// International Conference Application of Structural Fire Engineering. Prague: Cost, 2011:55-60.
- [13] Chen J, Young B, Uy B. Behavior of high strength structural

- steel at elevated temperatures [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2006, 7(3):331.
- [14] Qiang X, Bijlaard F S K, Kolstein H. Post-fire mechanical properties of high strength structural steels S460 and S690 [J]. *Engineering Structures*, 2012, 35:1.
- [15] 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, 2010, 11(3):328.  
CHEN Jianfeng, CAO Pingzhou. Experimental investigation into mechanical properties of steel post high temperatures [J]. *Journal of PLA University of Science and Technology*, 2010, 11(3):328.
- [16] 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.  
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.
- [17] 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.  
ZHANG Youju, 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.
- [18] British Standards Institution (BSI). BS 5950-8 Structural use of steelwork in building. Part 8: code of practice for fire resistant design [S]. London: BSI, 1998.
- [19] European Committee for Standardization. European Standard EN 10025-6 Hot rolled products of structural steels. Part 6: technical delivery conditions for flat products of high yield strength structural steels in the quenched and tempered condition [S]. Brussels: CEN, 2009.
- [20] European Committee for Standardization. European Standard EN 10002-5 Metallic materials-tensile testing. Part 5: method of testing at elevated temperature [S]. Brussels: CEN, 1992.
- [21] American Society for Testing and Materials (ASTM). ASTM E21-09 Standard test methods for elevated temperature tension tests of metallic materials [S]. West Conshohocken: ASTM, 2009.
- 
- (上接第 1037 页)
- [6] Asami Y. Characteristics of wind loads of high-rise building and assessment of wind loads for design [D]. Tokyo: Tokyo Polytechnic University, 2006.
- [7] Tamura Y, Kim Y C, Kikuchi H, *et al.* Correlation and combination of wind force components and responses [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2014, 125: 81.
- [8] Tamura Y, Kikuchi H, Hibi K. Peak normal stresses and effects of wind direction on wind load combinations for medium-rise buildings [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2008, 96(6): 1043.
- [9] Davenport A G. Wind tunnel testing: a general outline[R]. Ontario: The University of Western Ontario, 2007.
- [10] 严志威. 复杂环境下有外附网架的高层建筑风荷载特性及高层建筑三个方向上的等效静力风荷载分量的组合方法研究[D]. 上海: 同济大学, 2011.  
YAN Zhiwei. Research on the characteristics of wind loads of a grid-encircled high-rise building under complex surroundings and combination method of the equivalent static wind loads on three directions of high-rise building [D]. Shanghai: Tongji University, 2011.
- [11] Architectural Institute of Japan. AIJ recommendations for loads on building [S]. Tokyo: AIJ, 2006.
- [12] ISO. 4354 Wind actions on structures [S]. Geneva: International Organization for Standardization, 2009.
- [13] Bartoli G, Mannini C, Massai T. Quasi-static combination of wind loads: a copula-based approach [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2011, 99(6): 672.
- [14] Sklar A. Functions de répartition à n dimensions et leurs marges[J]. *Publications de l'Institut de Statistique de l'Université de Paris*, 1959, 8: 229.
- [15] Embrechts P, Mcneil E, Straumann D. Correlation: pitfalls and alternatives[J]. *Risk Magazine*, 1999, 12(5): 69.
- [16] Favre A C, El Adlouni S, Perreault L, *et al.* Multivariate hydrological frequency analysis using copulas [J]. *Water Resources Research*, 2004, 40(1): 1.
- [17] 同济大学应用数学系. 概率统计简明教程[M]. 北京: 高等教育出版社, 2008.  
Department of Applied Mathematics, Tongji University. Concise tutorial on probability statistics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2008.
- [18] Harris R I. Errors in GEV analysis of wind epoch maxima from Weibull parents[J]. *Wind and Structures*, 2006, 9(3): 179.
- [19] Harris R I. XIMIS: a penultimate extreme value method suitable for all types of wind climate[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2009, 97(5): 271.