

DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.2017.02.021

高强钢 S460 和 S690 火灾后力学性能试验

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:火灾后,材料力学性能的退化是导致钢结构火灾后承载力降低的主要因素.通过试验研究高强钢 S460 和 S690 过火冷却至常温后的力学性能,得到过火高温对高强钢 S460 和 S690 的弹性模量、屈服强度、极限强度及应力-应变曲线的影响规律,并与普通钢火灾后力学性能进行对比.结果表明,当过火温度低于 600 ℃ 时,S460 和 S690 冷却后可恢复其基本力学性能;当过火温度超过 600 ℃ 后,甚至高达 1 000 ℃ 时,高强钢 S460 仍可恢复其常温下 75% 以上的力学性能,而 S690 仅可恢复其常温下 64.5% 的弹性模量、38.1% 的屈服强度及 57.3% 的极限强度;高强钢火灾后力学性能与普通钢不同.通过对试验数据进行数值拟合,给出可准确表达 S460 和 S690 火灾后力学性能剩余程度的预测公式,可用于指导含高强钢 S460 和 S690 构件的钢结构火灾后检测与鉴定,并为相关规范的修订提供参考依据.

关键词: 高强钢;火灾后;力学性能;剩余系数;预测公式

中图分类号: TU391

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2017)02-0130-09

Mechanical properties of high strength steels S460 and S690 after fire

QIANG Xuhong, WU Nianduo, JIANG Xu, LUO Yongfeng

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

Abstract: The load bearing capacity of steel structures after fire reduces mainly due to the deterioration of its mechanical properties. This paper presented an experimental study on material properties of high strength steels S460 and S690 after fire. The post-fire elastic modulus, yield and ultimate strengths, ductility and stress-strain curves were obtained and compared with the post-fire mechanical properties of mild strength steels. It is found that when the fire temperature from which the high strength steel is cooled down is less than or equal to 600 ℃, S460 and S690 can regain their original mechanical properties. When the fire temperature is up 1 000 ℃, S460 can also regain more than 75% of its original mechanical properties, but S690 only regains 64.5% of its original elastic modulus, 38.1% of its original yield strength and 57.3% of its original ultimate strength. The mechanical properties of high strength steels are different from mild strength steels. Predictive equations were proposed to evaluate the post-fire material properties of S460 and S690. Comparing with the test results, the predictive equations were validated. The predictive equations can be employed for practical inspection and appraisal of steel structures after fire with members made of S460 and S690, and provide a reference for the revision of current worldwide leading design standards.

Keywords: high strength steel; post-fire; mechanical properties; residual factor; predictive equation

目前,对于高强钢的定义,欧洲钢结构设计规范 Eurocode 3 (EC3)^[1] 定义高强钢的名义屈服强度不小于 460 MPa;澳大利亚规范 AS 4100^[2] 定义高强钢的名义屈服强度大于 450 MPa;香港规范^[3] 定义高强钢的名义屈服强度在 460~690 MPa;中国国家标准《钢分类》^[4] 定义屈服强度大于等于 420 MPa 的钢材为高强钢.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.自美国“911”恐怖事件后,研究火灾下材料退化、热约束及

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.目前的研究尚主要针对常规强度的结构钢(普通钢)^[5-7],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^[8-14] 和 BISPLATE 80^[15];尚未有学者对高强钢火灾后的力学性能进行研究,即使对于普通钢火灾后力学性能的研究也很有限^[9-10,16-18].英国规范 BS 5950-8 (2003) 附录 B^[19] 针对普通钢火灾后力学性能和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;普通钢 S235 和 S275 火灾后可恢复其常温下(未过火)90% 的力学性能;当过火温度超过 600 ℃ 时,S355 冷却后的强度可恢复至常温(未过火)时的 75% 以上.但对于高强钢,世界范围内现行的钢结构设计规范还

收稿日期:2016-03-04

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)

作者简介:强旭红(1984—),女,博士,助理教授;
罗永峰(1957—),男,教授,博士生导师

通信作者:姜 旭,jiangxu@tongji.edu.cn

没有给出任何相关建议.

可靠的高强钢火灾后性能数据的缺失导致高强钢结构火灾后性能的检测与鉴定缺乏重要依据,这将造成不必要的经济损失.因此,BS 5950^[19]和 EC3 part1-2^[1]等现行钢结构设计规范对高强钢火灾后的力学性能提出针对性建议势在必行.本文对欧标高强钢 S460 和 S690 进行的火灾后拉伸试验旨在揭示 S460 和 S690 火灾后的弹性模量、屈服强度及极限强度的退化程度,并与现有研究成果和现行钢结构设计规范中的其他等级钢材进行对比.分别给出高强钢 S460 和 S690 火灾后力学性能剩余程度的预测公式,并验证其准确性.

1 试 验

1.1 试验设备

火灾试验在可控温的电热炉中完成(如图 1 所示).拉伸试验通过 Gleeble 3800 系统进行,该系统是全数字闭环控制热与力学耦合测试系统,如图 2、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 的压力或 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

1.2 试验材料及试件设计

试验试件分别由名义厚度为 5 mm 的 S460NL 和 S690QL 钢板上切割而来.S460NL 是一种符合欧洲标

准 EN 10025-3^[20]的高强度结构用钢.S460NL 是钢材等级名称缩写,S 指结构用钢,460 指名义屈服强度为 460 MPa,N 指采用标准化轧制,L 指低温韧性.S690QL 钢是一种符合欧洲标准 EN 10025-6^[21]的高强度结构用钢.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.类似地,S690QL 是钢材等级名称缩写,S 指结构用钢,690 指名义屈服强度为 690 MPa,Q 指淬火回火技术,L 指低温韧性.

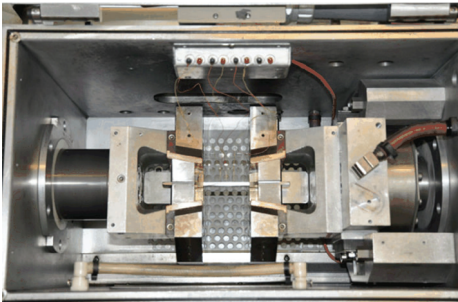
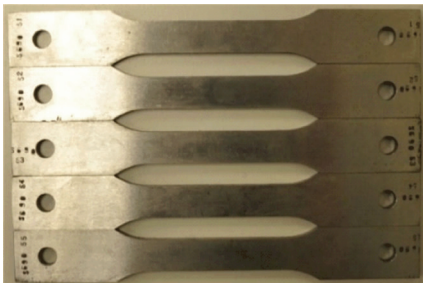
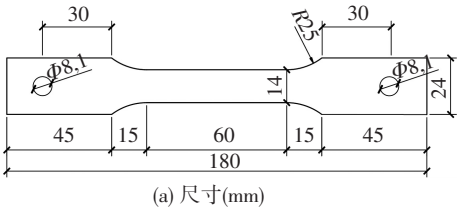


图 3 试验炉内的拉伸装置
Fig.3 Tensile test rig inside the furnace

本试验所用高强钢 S460 和 S690 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^[22]和美国标准 ASTM E21-09^[23]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(如图 4 所示).

表 1 高强钢 S460NL 和 S690QL 的化学组成(质量分数)

Tab.1 Chemical composition of S460NL and S690QL %							
高强钢	C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu
S460NL	0.172	0.483	1.500	0.012	0.005	0.020	0.025
S690QL	0.160	0.210	0.850	0.012	0.001	0.350	0.030
高强钢	N	Nb	Ni	Ti	V	Al	Mo
S460NL	0.005 1	0.046	0.018	0.002	0.087	0.037	0.002
S690QL	0.002 6	0.025	0.050	0.006	0	0.093	0.200



(b) 试件
图 4 试件及其尺寸
Fig.4 Test specimen and dimension

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者瞬态火灾拉伸试验.与瞬态火灾试验方法相比,稳态火灾试验方法更为常用,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,采用稳态火灾试验方法对 S460 和 S690 火灾后的力学性能进行研究,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

试件在电热炉中由常温升温至指定温度,为模拟自然火灾,升温速率取 10 ℃/min.对于 S460,选取 11 个火灾温度:300、400、500、600、650、700、750、800、850、900 及 1 000 ℃;对于 S690,还选取火灾温度 100 和 200 ℃.试件升温至指定温度后,持温约 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.采用应变控制的方法施加荷载,应变率为 0.005 min^{-1} ,满足 ASTM E21-09^[23]的相关规定.为比较过火温度对高强钢火灾后力学性能的影响,同时对试件进行常温下(未过火)的拉伸试验.

2 试验结果

S460 和 S690 火灾后的应力-应变曲线分别如图 5、6 所示,本节在高强钢火灾后应力-应变曲线的基础上对其火灾后力学性能进行研究.S690 的试验结果表明,过火温度为 100 和 200 ℃时,其冷却至室温后的力学性能与常温时(未过火)相比几乎无变化.因此,在对 S460 火灾后力学性能进行研究时,未选取 100 和 200 ℃作为过火温度.

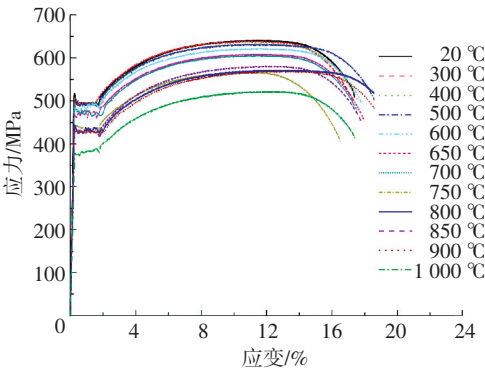


图 5 S460 火灾后应力-应变曲线

Fig.5 Stress-strain curves of S460 after fire

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,钢材火灾后的弹性模量也由钢材火灾后的应力-应变曲线得到.钢材火灾后力学性能的剩余程度常用剩余系数来评估,弹性模量剩余

系数是指钢材火灾后的弹性模量与常温下(未过火)弹性模量的比值.试验得到的高强钢 S460 和 S690 火灾后的弹性模量和弹性模量剩余系数见表 2,弹性模量剩余系数随过火高温的变化见图 7.

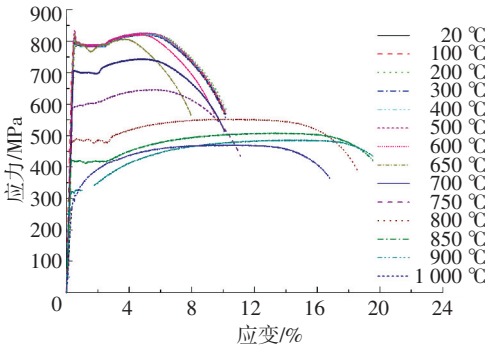


图 6 S690 火灾后应力-应变曲线

Fig.6 Stress-strain curves of S690 after fire

表 2 火灾后弹性模量和弹性模量剩余系数

Tab.2 Post-fire elastic modulus and residual factors

$\theta/^\circ\text{C}$	S460		S690	
	弹性模量/MPa	剩余系数	弹性模量/MPa	剩余系数
20	202 619	1.000	212 490	1.000
100	—	—	211 800	0.997
200	—	—	210 808	0.992
300	202 300	0.998	210 400	0.990
400	198 870	0.981	208 900	0.983
500	194 910	0.962	205 900	0.969
600	191 320	0.944	203 500	0.958
650	190 000	0.938	195 250	0.919
700	186 140	0.919	184 761	0.870
750	176 184	0.870	168 879	0.795
800	173 660	0.857	160 010	0.753
850	170 780	0.843	149 520	0.704
900	163 980	0.809	142 538	0.671
1 000	144 470	0.713	137 063	0.645

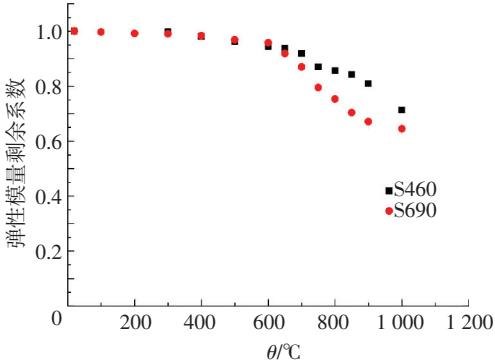


图 7 弹性模量剩余系数

Fig.7 Post-fire elastic modulus residual factors

由图 7 可以看出:当过火温度低于 600 ℃时, S460 和 S690 冷却后的弹性模量与常温下(未过火)相同;当过火温度超过 600 ℃后, S460 和 S690 冷却后的弹性模量显著降低,且 S690 的降幅更大,这是由 S460N 和 S690Q 制造过程中不同的淬火回火技术造成的.值得注意的是,当过火温度为 800 ℃时, S460 和 S690 冷却后的弹性模量可达常温下(未过火)的 75%;即使过火温度高达 1 000 ℃, S460 和 S690 冷却后的弹性模量仍可达常温下(未过火)的 60%.

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,有些学者采用 0.5%、1.5% 及 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^[8-9,15].本文研究过火温度对 S460 和 S690 火灾后名义屈服强度的影响(名义应变分别取 0.2%、0.5%、1.5%及 2.0%),并对比以上 4 个名义应变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%及 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火灾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,屈服强度剩余系数随过火高温的变化如图 8 所示.

表 3 火灾后不同名义应变条件下的屈服强度

Tab.3 Post-fire yield strength MPa

$\theta/^{\circ}\text{C}$	S460				S690			
	0.2%	0.5%	1.5%	2%	0.2%	0.5%	1.5%	2%
20	490	495	490	524	789	806	784	786
100	—	—	—	—	787	801	787	787
200	—	—	—	—	787	782	789	789
300	490	496	495	521	785	781	781	781
400	489	489	495	498	786	806	788	786
500	494	496	490	509	786	807	790	790
600	480	478	492	506	785	802	783	786
650	466	472	474	473	793	800	769	783
700	474	474	471	472	705	707	702	698
750	442	439	430	455	591	591	603	608
800	428	425	437	432	484	484	486	486
850	427	427	428	441	420	420	417	418
900	427	424	425	426	320	321	375	394
1 000	374	375	387	400	301	301	328	351

表 4 火灾后屈服强度剩余系数

Tab.4 Post-fire yield strength residual factors

$\theta/^{\circ}\text{C}$	S460				S690			
	0.2%	0.5%	1.5%	2%	0.2%	0.5%	1.5%	2%
20	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
100	—	—	—	—	0.998	0.994	1.004	1.002
200	—	—	—	—	0.998	0.971	1.006	1.004
300	1.000	1.002	1.010	0.995	0.995	0.970	0.997	0.995
400	0.997	0.988	1.011	0.951	0.997	1.000	1.005	1.001
500	1.007	1.002	1.000	0.972	0.997	1.002	1.007	1.005
600	0.980	0.966	1.005	0.965	0.995	0.995	0.999	1.001
650	0.950	0.954	0.968	0.903	1.006	0.993	0.981	0.997
700	0.968	0.959	0.960	0.901	0.894	0.877	0.895	0.889
750	0.901	0.887	0.876	0.868	0.749	0.733	0.769	0.775
800	0.874	0.858	0.891	0.824	0.614	0.600	0.619	0.618
850	0.871	0.863	0.873	0.843	0.532	0.521	0.531	0.532
900	0.871	0.858	0.867	0.813	0.405	0.399	0.478	0.502
1 000	0.763	0.758	0.790	0.764	0.381	0.373	0.419	0.447

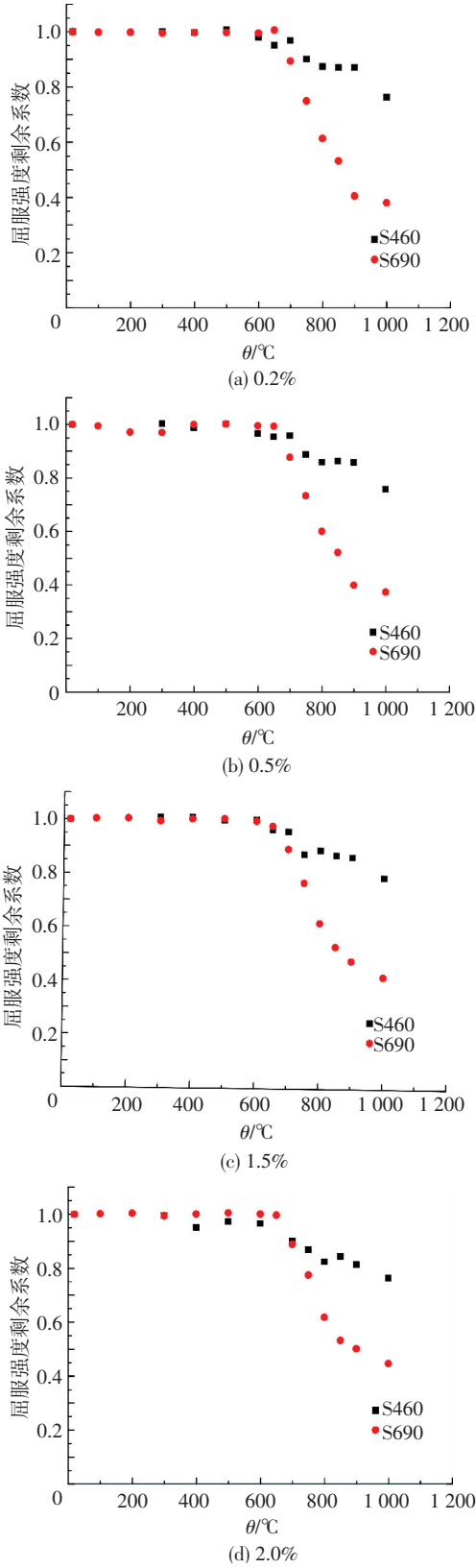


图 8 火灾后屈服强度剩余系数对比

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

由图 8 可以看出,当过火温度低于 600 ℃时,过火高温对 S460 和 S690 冷却后的屈服强度几乎无影响;当过火温度超过 600 ℃后,S460 的屈服强度剩余系数高于 S690;即使过火温度高达 1 000 ℃,S460 冷却后仍可恢复其常温下(未过火)75%的屈服强

度,这是由 S460N 和 S690Q 制造过程中不同的淬火回火技术造成的.试验结果表明,若火灾温度低于 600 ℃,S460 和 S690 冷却后的屈服强度与常温时(未过火)相同,这对高强钢火灾后的再利用十分有利.出于安全考虑,若采用高强钢 S460 或 S690 的建筑结构经历的火灾温度在 600 ℃ 以下,建议灾后 S460 和 S690 的名义屈服强度取常温下(未过火)的 90%.因此,采用高强钢 S460 和 S690 的构件若经历的火灾温度在 600 ℃ 以下,同时构件的平直度在限值内,其在火灾后可继续使用.

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.试验得出的高强钢火灾后极限强度剩余系数见表 5 和图 9.结果表明,当过火温度不超过 600 ℃ 时,过火高温对 S460 和 S690 冷却后的极限强度几乎无影响;当过火温度超过 600 ℃ 后,S460 的极限强度剩余系数高于 S690;即使过火温度高达 1 000 ℃,S460 冷却后的极限强度可恢复其常温下(未过火)的 80%,而 S690 仅剩余 55%,这同样是由 S460N 和 S690Q 制造过程中不同的淬火回火技术造成的.

表 5 火灾后极限强度和极限强度剩余系数

Tab.5 Post-fire ultimate strength and residual factors

$\theta/^\circ\text{C}$	S460		S690	
	极限强度/MPa	剩余系数	极限强度/MPa	剩余系数
20	640	1.000	820	1.000
100	—	—	823	1.003
200	—	—	823	1.003
300	638	0.996	822	1.002
400	637	0.995	820	0.999
500	631	0.985	821	1.001
600	621	0.970	820	1.000
650	608	0.950	807	0.983
700	605	0.945	743	0.906
750	566	0.884	646	0.788
800	571	0.892	552	0.673
850	580	0.906	507	0.619
900	568	0.887	485	0.592
1 000	521	0.814	470	0.573

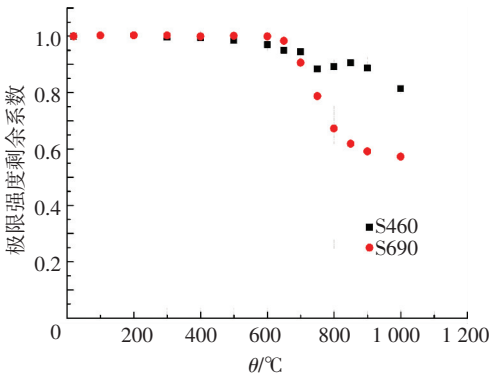


图 9 火灾后极限强度剩余系数

Fig.9 Post-fire ultimate strength residual factors

2.4 延性

钢材的延性取决于钢材破坏前的变形能力,通过图 5、6 中试件断裂时的应变可看出,S460 在常温下(未过火)和过火温度较低时的延性均优于 S690.但当过火温度超过 750 ℃ 时,两种钢材冷却后的延性相仿.值得注意的是,当过火温度为 750 ℃ 时,S690 冷却后的延性高于常温(未过火)时,而 S460 未发现此现象.图 10、11 列出高强钢常温(未过火)和火灾后的破坏模式,可以看出,所有试件在破坏前均发生颈缩现象,无试件脆性破坏.这表明高强钢火灾后具备一定的延性,可适当保证结构火灾后的安全性.



图 10 S460 拉伸试件火灾后的破坏模式

Fig.10 Failure modes of S460 tensile specimens after fire



图 11 S690 拉伸试件火灾后的破坏模式

Fig.11 Failure modes of S690 tensile specimens after fire

2.5 对比分析

现有研究鲜有涉及钢材火灾下和火灾后力学性能,BS 5950-8(2003)附录 B^[19]对火灾后普通钢的继续使用提出相关建议;BS 5950 对铸钢和预应力钢筋的火灾下和火灾后力学性能也提出相关建议,但并未提及高强钢.世界范围内现行的其他钢结构设计规范尚未对钢材火灾后的继续使用给出建议.Outinen^[9-10]从升温至 710 ℃ 的 S355 和 S350 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十分匮乏.本文的试验研究表明,高强钢 S460 和 S690 火灾后的强度剩余程度与普通钢不同.当过火温度不超过 600 ℃ 时,高强钢冷却后可恢复其常温下(未过火)的力学性能.出于安全考虑,建

议火灾后 S460 和 S690 的名义屈服强度取常温下(未过火)的 90%;当过火温度超过 600 ℃ 时,S460 冷却后的屈服强度和极限强度可恢复至常温下(未过火)的 75%;S690 冷却后的屈服强度和极限强度则退化较多.因此,采用 BS 5950 针对普通钢提出的建议预测高强钢火灾后的力学性能是十分危险的,应对高强钢火灾后力学性能提出针对性的预测公式,对高强钢火灾后可否继续使用提出针对性的建议.

3 预测公式

由于过火温度是钢材火灾后力学性能退化的主要因素,各力学性能剩余系数是试件过火温度 θ 的函数.对于 S460 火灾后力学性能的预测,给出两种选择,一种便于实际应用,另一种用于精确预测.由图 12~20 可以看出,建议公式与试验结果拟合较好,因此建议公式可以准确预测高强钢 S460 和 S690 的火灾后力学性能.

3.1 弹性模量

3.1.1 S460

针对 S460 火灾后弹性模量提出的两种预测公式如下

选择 1:

$$\frac{E_{\theta}}{E_{20}} = -2.69 \times 10^{-7} \theta^2 + 6.55 \times 10^{-5} \theta + 0.999, \quad 20 \leq \theta \leq 600; \tag{1}$$

$$\frac{E_{\theta}}{E_{20}} = 0.947 - \frac{(\theta - 600)^{1.618}}{68.84\theta}, \quad 600 < \theta \leq 800; \tag{2}$$

$$\frac{E_{\theta}}{E_{20}} = -2.545 \times 10^{-6} \theta^2 + 3.856 \times 10^{-3} \theta - 0.598, \quad 800 < \theta \leq 1\,000. \tag{3}$$

预测公式(1)~(3)与试验结果的对比见图 12,可以看出,预测公式与试验结果吻合.

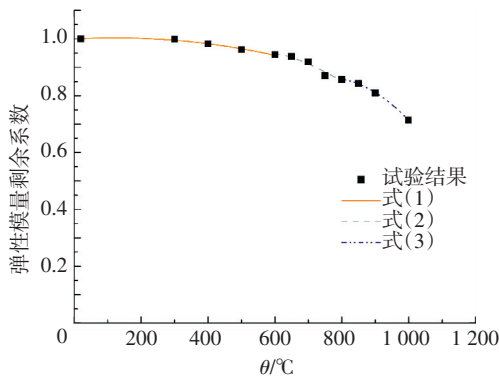


图 12 预测公式(1)~(3)与试验结果对比

Fig.12 Comparison of predicted elastic modulus residual factor from Eqs.(1)–(3) with test results

选择 2:

$$\frac{E_{\theta}}{E_{20}} = -3.84 \times 10^{-10} \theta^3 + 1.43 \times 10^{-7} \theta^2 - 4.18 \times 10^{-5} \theta + 1.00, 20 \leq \theta \leq 1\,000. \tag{4}$$

选择 2 采用统一的公式对 S460 火灾后力学性能进行预测,图 13 表明预测公式(4)与试验结果吻合.预测公式(1)~(3)精度较高,如所需预测公式形式简单,推荐采用式(4).

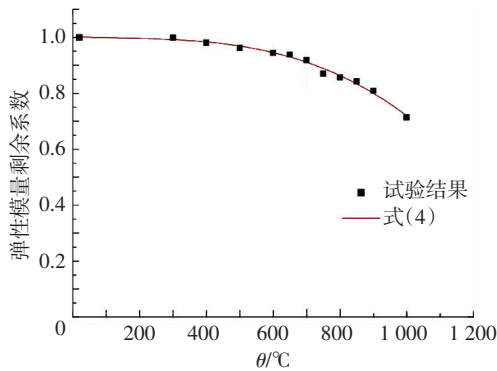


图 13 预测公式(4)与试验结果对比

Fig.13 Comparison of predicted elastic modulus residual factor from Eq.(4) with test results

3.1.2 S690

预测公式(5)、(6)与试验结果的对比见图 14.可以看出,预测公式与试验结果吻合,同时其形式简单,因此,建议采用式(5)、(6)对 S690 火灾后的弹性模量剩余程度进行预测.

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

$$\frac{E_{\theta}}{E_{20}} = 6.27 \times 10^{-9} \theta^3 - 1.38 \times 10^{-5} \theta^2 + 8.95 \times 10^{-3} \theta - 0.806, 600 < \theta \leq 1\,000. \tag{6}$$

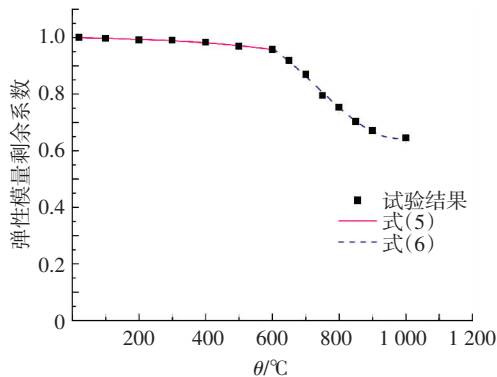


图 14 预测公式(5)、(6)与试验结果对比

Fig.14 Comparison of predicted elastic modulus residual factor from Eqs.(5) and (6) with test results

3.2 屈服强度

与常温下钢材的名义应变相应,建议取 0.2%作

为火灾后钢材的名义应变,本文在拟合屈服强度预测公式时采用 0.2%名义应变的试验数据.

3.2.1 S460

选择 1:

$$\frac{f_{y\theta}}{f_{y20}} = -1.19 \times 10^{-9} \theta^3 + 1.03 \times 10^{-6} \theta^2 + 2.25 \times 10^{-4} \theta + 1.004, 20 \leq \theta \leq 800; \tag{7}$$
$$\frac{f_{y\theta}}{f_{y20}} = 0.876 - \frac{(\theta - 800)^{3.634}}{2.048 \times 10^6 \theta}, 800 < \theta \leq 1\,000. \tag{8}$$

预测公式(7)、(8)与试验结果的对比见图 15. 可以看出,预测公式与试验结果吻合.为简化提出式(9),其与试验结果的对比见图 16.由图 15、16 可以看出,式(7)、(8)更精准,式(9)更简洁,使用时可根据需要进行选择.

选择 2:

$$\frac{f_{y\theta}}{f_{y20}} = -3.24 \times 10^{-10} \theta^3 + 4.98 \times 10^{-8} \theta^2 + 4.52 \times 10^{-5} \theta + 0.998, 20 \leq \theta \leq 1\,000. \tag{9}$$

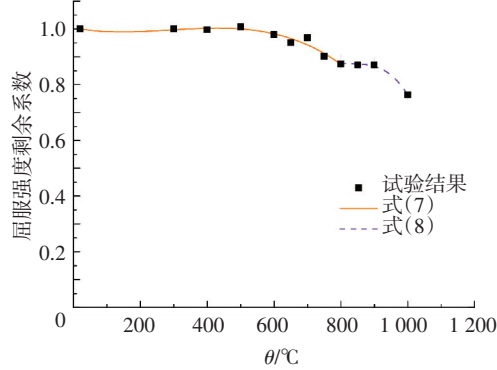


图 15 预测公式(7)、(8)与试验结果对比
Fig.15 Comparison of predicted yield strength residual factor from Eqs.(7) and (8) with test results

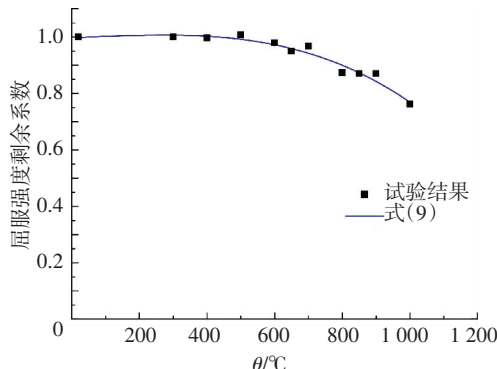


图 16 预测公式(9)与试验结果对比
Fig.16 Comparison of predicted yield strength residual factor from Eq.(9) with test results

3.2.2 S690

预测公式(10)、(11)与试验结果的对比见

图 17.可以看出,预测公式与试验结果吻合,同时其形式简单,因此,建议采用式(10)、(11)对 S690 火灾后的屈服强度剩余程度进行预测.

$$\frac{f_{y\theta}}{f_{y20}} = 1.0 - \frac{(\theta - 20)^{1.584}}{9\,957\theta}, 20 \leq \theta \leq 650; \tag{10}$$

$$\frac{f_{y\theta}}{f_{y20}} = 1.80 \times 10^{-8} \theta^3 - 4.03 \times 10^{-5} \theta + 2.74 \times 10^{-2} \theta - 4.711, 650 \leq \theta \leq 1\,000. \tag{11}$$

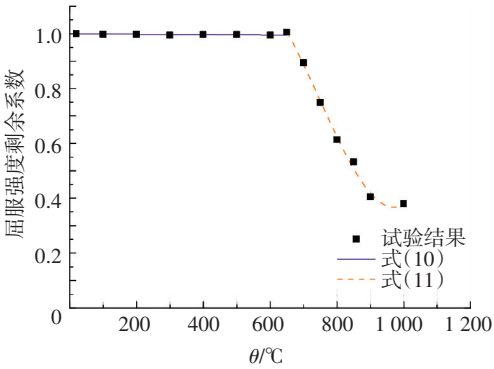


图 17 预测公式(10)、(11)与试验结果对比
Fig.17 Comparison of predicted yield strength residual factor from Eqs.(10) and (11) with test results

3.3 极限强度

3.3.1 S460

选择 1:

$$\frac{f_{u\theta}}{f_{u20}} = -1.24 \times 10^{-9} \theta^3 + 1.07 \times 10^{-6} \theta^2 - 2.54 \times 10^{-4} \theta + 1.005, 20 \leq \theta \leq 750; \tag{12}$$

$$\frac{f_{u\theta}}{f_{u20}} = -3.09 \times 10^{-6} \theta^2 + 5.14 \times 10^{-3} \theta - 1.235, 750 < \theta \leq 1\,000. \tag{13}$$

预测公式(12)、(13)与试验结果的对比见图 18.可以看出,预测公式与试验结果吻合.

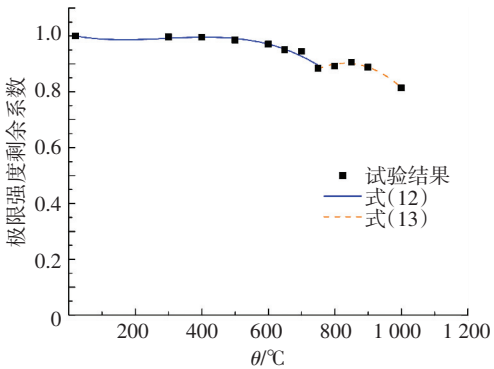


图 18 预测公式(12)、(13)与试验结果对比
Fig.18 Comparison of predicted ultimate strength residual factor from Eqs.(12) and (13) with test results

为简化提出式(14),其与试验结果的对比见图 19.由图 18、19 可以看出,式(12)、(13)更精准,式(14)更简洁,使用时可根据需求进行选择.

选择 2:

$$\frac{f_{u\theta}}{f_{u20}} = -2.79 \times 10^{-7} \theta^2 + 1.08 \times 10^{-4} \theta + 0.996, \quad 20 \leq \theta \leq 1\,000. \quad (14)$$

3.3.2 S690

预测公式(15)、(16)与试验结果的对比见图 20.可以看出,预测公式与试验结果吻合,同时其形式简单,因此,建议采用式(15)、(16)对 S690 火灾后的极限强度剩余程度进行预测.

$$\frac{f_{u\theta}}{f_{u20}} = 1.000, 20 \leq \theta \leq 600; \quad (15)$$

$$\frac{f_{u\theta}}{f_{u20}} = -1.24 \times 10^{-10} \theta^4 + 4.13 \times 10^{-7} \theta^3 - 5.077 \times 10^{-4} \theta^2 + 0.271 \theta - 52.21, 600 \leq \theta \leq 1\,000. \quad (16)$$

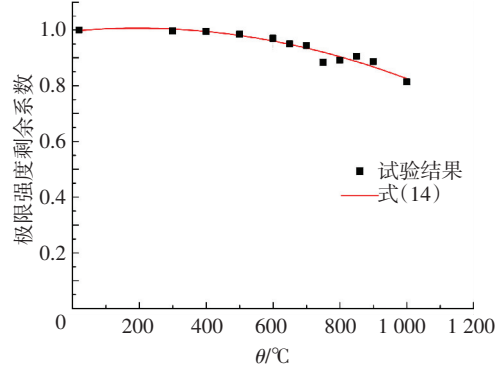


图 19 预测公式(14)与试验结果对比

Fig. 19 Comparison of predicted ultimate strength residual factor from Eq.(14) with test results

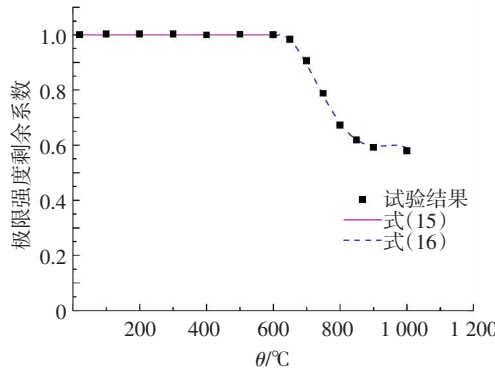


图 20 预测公式(15)、(16)与试验结果对比

Fig. 20 Comparison of predicted ultimate strength residual factor from Eqs.(15) and (16) with test results

4 结 论

钢材火灾后的力学性能取决于钢材的等级和生产工艺,因此 BS 5950 针对普通钢火灾后力学

性能和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.现有的针对高强钢火灾后力学性能的研究非常有限,各国现行钢结构设计规范也未对高强钢火灾后力学性能提出针对性建议,本研究对这方面的研究起到抛砖引玉作用.研究表明,当过火温度低于 600 ℃ 时,S460 和 S690 冷却后可恢复其基本力学性能.此时,出于安全考虑,若采用高强钢 S460 或 S690 的建筑结构所经历的火灾温度在 600 ℃ 以下,建议灾后 S460 和 S690 的名义屈服强度取其常温下(未过火)的 90%.为便于评估 S460 和 S690 过火温度超过 600 ℃ 甚至达到 1 000 ℃ 冷却后的力学性能,本文提出一系列公式用以预测高强钢火灾后的弹性模量、屈服强度及极限强度的剩余情况,通过与试验结果的对比,验证预测公式的准确性,为高强钢结构火灾后性能的检测鉴定和可否继续使用提供理论依据,也为各国相关设计规范的修订提供参考.

参考文献

[1] European Committee for Standardization. EN 1993-1-2, Eurocode 3-design of steel structures-part 1-2: General rules-structural fire design [S]. CEN, Brussels, 2005.

[2] Australia Standards (AS). AS 4100: 1998, Steel structures [S]. Sydney, Australia, 1998.

[3] Hong Kong Buildings Department. Code of practice for the structural use of steel [S]. Hong Kong: The Government of the Hong Kong Special Administrative Region, 2005.

[4] 钢分类:GB/T 13304—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008. Steels Classification: GB/T 13304—2008 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2008.

[5] KODUR V, DWAIKAT M, FIKE R. High-temperature properties of steel for fire resistance modeling of structures [J]. J Mater Civ Eng, 2010, 22:423-434.

[6] OUTINEN J, KESTI J, MAKELAINEN P. Fire design model for structural steel S355 based upon transient state tensile test results [J]. J Constr Steel Res, 1997, 42:161-169.

[7] MAKELAINEN P, OUTINEN J, KESTI J. Fire design model for structure steel S420M based upon transient-state tensile test results [J]. J Constr Steel Res, 1998, 48:47-57.

[8] OUTINEN J, KAITILA O, MAKELAINEN P. High-temperature testing of structural steel and modelling of structures at fire temperatures [R]. Helsinki, Finland: Helsinki Univ of Technology Laboratory of Steel Structures, 2001.

[9] OUTINEN J. Mechanical properties of structural steels at high temperatures and after cooling down, laboratory of steel structures[R]. Helsinki, Finland: Helsinki Univ of Technology, 2007.

[10] OUTINEN J, MAKELAINEN P. Mechanical properties of structural steel at elevated temperatures and after cooling down [J]. Fire Mater, 2004, 28:237-251.

[11] LANGE J, WOHLFEIL N. Examination of the mechanical properties of the microalloyed grain refined steel S460 at elevated temperatures

[J]. Bautechnik, 2007, 84:711-720.

[12]SCHNEIDER R, LANGE J. Constitutive equations of structural steel S460 at high temperatures [C]// Nordic Steel Construction Conference 2009. Sweden, 2009:204-211.

[13]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.

[14]SCHNEIDER 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.

[15]YOUNG B, CHEN J, UY B. Behavior of high strength structural steel at evaluated temperatures [J]. J Struct Eng ASCE, 2006, 132:1948-1954.

[16]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):328-333.

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.

[17]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.

[18]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.

[19]British Standards Institution (BSI). BS 5950-8, Structural use of steelwork in building-part 8; Code of practice for fire resistant design [S]. London, 1998.

[20]European standard EN 10025-3. Hot rolled products of structural steels-part3; Technical delivery conditions for normalized/normalized rolled weldable fine grain structural steels [S]. CEN, Brussels, 2004.

[21]European standard EN 10025-6. Hot rolled products of structural steels-part6; technical delivery conditions for flat products of high yield strength structural steels in the quenched and tempered condition [S]. CEN, Brussels, 2009.

[22]European standard EN 10002-5. Metallic materials tensile testing-part 5;Method of testing at elevated temperature [S]. Brussels,1992.

[23]ASTM E21-09. Standard test methods for elevated temperature tension tests of metallic materials [S]. West Conshohocken, United States, 2009.

(编辑 刘 彤)