

# 火灾下超高强钢 S960 力学性能与抗火设计建议

强旭红<sup>1,2</sup>, 张至毅<sup>1</sup>, 姜旭<sup>1</sup>, 刘晓<sup>3</sup>, 任楚超<sup>4</sup>

(1. 同济大学土木工程学院, 上海 200092; 2. 工程结构性能演化与控制教育部重点实验室, 上海 200092; 3. 上海宝冶工程技术有限公司, 上海 200941; 4. 广东水利电力职业技术学院土木工程系, 广东广州 510925)

**摘要:** 为研究超高强钢 S960 在火灾下的材料力学性能, 分别采用稳态火灾试验方法和瞬态火灾试验方法对超高强钢 S960 进行高温力学性能试验, 得到超高强钢 S960 在火灾下的弹性模量、屈服强度、极限强度、应力-应变关系曲线以及钢材破坏模式等。将试验研究结果同现行钢结构规范 EC3、ASCE、AISC、AS 4100 和 BS 5950 等进行对比分析, 以验证规范对于高强钢的适用性。同时, 为研究不同种类高强钢火灾下力学性能差异, 将试验结果与现有文献中欧标高强钢 S460、S690 以及国产高强钢 Q460、Q550、Q690 和 Q890 的火灾下材料力学性能进行对比。此外, 提出超高强钢 S960 在火灾高温作用下钢材力学性能的拟合公式, 并验证其准确性。研究表明, 现行各国规范不能安全可靠地指导超高强钢 S960 及其他高强钢的抗火设计, 对规范进行针对高强钢的修订势在必行。

**关键词:** 超高强钢; S960; 材料力学性能; 火灾; 高温; 拟合公式

中图分类号: TU392

文献标志码: A

## Fire Performance and Design Recommendations of Very High Strength Steel S960

QIANG Xuhong<sup>1,2</sup>, ZHANG Zhiyi<sup>1</sup>, JIANG Xu<sup>1</sup>, LIU Xiao<sup>3</sup>, REN Chuchao<sup>4</sup>

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Performance Evolution and Control for Engineering Structures of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Shanghai Baoye Engineering Technology Co., Ltd, Shanghai 200941, China; 4. Guangdong Polytechnic of Water Resources and Electric Engineering, Guangzhou 510925, China)

**Abstract:** In order to reveal the high temperature

mechanical properties of very high strength steel (VHSS) S960, tensile tests were conducted under both steady state and transient state fire conditions. The elastic modulus, yield strength, ultimate strength, stress-strain curve as well as failure mode of S960 were obtained. The test results were compared with current steel structure codes, such as EC3, ASCE, AISC, AS 4100 and BS 5950, to verify the applicability of standards for high strength steel (HSS). For comparison, the available research results in literature on S460, S690, Q460, Q550, Q690 and Q890 were compared with the test results of S960. Besides, the fitting formula of the mechanical properties of the VHSS S960 under the action of high temperature of fire was put forward, and its accuracy was verified. It is shown that fire-resistance design of steel structures with S960 is unsafe according to the current design standards, and differences of mechanical properties of HSS exist in different kinds of HSS. Moreover, the fitting formula for the deterioration of S960 at high temperatures was validated for practical engineering design.

**Key words:** very high strength steel (VHSS); S960; mechanical properties; fire; high temperature; fitting formula

近年来,在资源匮乏、能源紧缺的形势下,建筑设计却朝着“高、大、新、异”的方向发展,这为实际工程中高强钢的应用创造条件。相比于普通钢结构,高强钢(high strength steel, HSS)结构在结构受力性能、建筑使用功能以及社会经济和环保效应等方面具有明显优势,因此,已成功应用于国内外一些大型或重要市政、道桥以及体育场馆建设中,并取得良好

收稿日期: 2019-05-06

基金项目: 国家重点研发计划重点专项(2017YFB0304701); 国家自然科学基金(51408150); 国家财政部项目((2013)235); 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,副教授,工学博士,博士生导师,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

通信作者: 姜旭(1982—),男,副教授,工学博士,博士生导师,主要研究方向为钢结构和钢与组合桥。E-mail: jiangxu@tongji.edu.cn



论文  
拓展  
介绍

效果,如深圳市会展中心、德国的 Sony Center、瑞典军用桥 Fast Bridge 48 以及北京国家体育场等<sup>[1]</sup>。

作为钢结构研究领域的一个关键问题,火灾对建筑钢结构的影响早已成为相关学术领域的热点,而高强钢材料在火灾下的力学性能又是高强钢结构抗火研究的基础。文献[2-5]通过火灾高温下拉伸试验,对高强钢 S460 和 S690 的高温力学性能进行研究,得出高强钢在火灾下性能的退化不同于普通钢及钢材化学成分与生产加工工艺对其高温性能影响显著的结论。文献[6-7]对高强钢 S460、S690 和 S960 经历火灾后的力学性能进行系统研究,得到经历不同高温后高强钢的力学性能并提出高强钢受火后的评估建议:当受火温度低于 600℃ 时,三种高强钢冷却到常温后基本可恢复其力学性能,出于安全考虑,建议取 0.9 的折减系数。针对国产高强钢,文献[8-11]通过试验研究得到国产高强钢 Q460、Q550、Q690 和 Q890 在火灾下和火灾后的力学性能。

欧洲钢结构设计规范 EC3<sup>[12]</sup>假定不同强度等级的钢材(如 S235, S275, S355, S420 和 S460)在火灾下选取同一组折减系数对钢材力学性能进行折减。2007 年,EC3<sup>[13]</sup>将规范条文适用范围拓展到钢材强度等级 S700,包括 S500、S550、S620 和 S690 等高强钢。然而,EC3<sup>[12-13]</sup>中针对高强钢在火灾下力学性能的相关条文与普通钢相同,是基于普通钢(即 S235、S275 和 S355)的试验研究结果的。同样地,澳大利亚规范 AS 4100<sup>[14]</sup>通过补充条文 AS 4100-A1<sup>[15]</sup>将规范适用范围由钢材强度等级 450 MPa 拓展到 690 MPa,但没有针对高强钢结构对原有针对普通钢结构的设计方法进行相应修正。现有研究表明<sup>[16-18]</sup>,火灾下高强钢的材料力学性能不同于普通钢,采用规范 EC3 和 AS 4100 对高强钢结构进行抗火设计可能存在安全隐患。因此,有必要对不同种类高强钢进行试验研究,以得到相应钢种的抗火性能期望指导工程实践。

本文采用稳态火灾试验方法和瞬态火灾试验方法对超高强钢(very high strength steel, VHSS) S960 进行高温力学性能试验,得到超高强钢 S960 在火灾下的材料力学性能,如弹性模量、屈服强度、极限强度、应力-应变关系曲线以及钢材破坏模式等。将试验研究结果同现行钢结构规范 EC3<sup>[12-13]</sup>、ASCE<sup>[19]</sup>、AISC<sup>[20]</sup>、AS 4100<sup>[14-15]</sup> 和 BS 5950<sup>[21]</sup> 等进行对比分析,以验证规范对高强钢的适用性。同时,提出超高强钢 S960 在火灾高温作用下钢材力学性能的拟合公式,并验证其准确性。此外,将试验结果与现有文

献中 S460<sup>[4]</sup>、S690<sup>[5]</sup> 以及国产高强钢 Q460<sup>[8]</sup>、Q550<sup>[11]</sup>、Q690<sup>[11]</sup> 和 Q890<sup>[11]</sup> 的火灾下材料力学性能进行对比,以探讨不同种类高强钢火灾下力学性能差异。

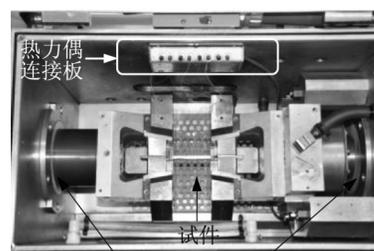
## 1 试验研究

### 1.1 试验设备

火灾高温拉伸试验在 Gleeble 3800 系统中进行,该系统是全数字闭环控制热与力学耦合测试系统,如图 1 所示。试验中,试件加热速率依据欧洲规范 EC1 EN 1991-1-2<sup>[22]</sup> 选取,即 5~50 °C·min<sup>-1</sup>,并通过三对热电偶准确控制试件温度,如图 2a 所示,炉内空气温度可由 Gleeble 3800 系统自动获取。试验采用非接触式激光变形测量仪测量试件应变,通过预先在 QuikSim 软件中设定的程序来控制试验过程。所有试验数据由电脑存储并通过屏幕实时显示,以监测试验过程。



a Gleeble 3800系统



b 试验炉内的拉伸试验装置

图1 试验装置

Fig.1 Test device

### 1.2 试验材料和试件设计

S960QL 钢依据欧洲标准 EN 10025-6<sup>[23]</sup> 生产,经过淬火和回火等热处理工艺,具有良好的韧性和焊接性能。S960QL 是这类超高强钢的缩写,其中 S 表示结构钢,960 表示钢材名义屈服强度为 960 MPa, Q 表示淬火和回火工艺, L 表示低温韧性。试件的尺寸和形状依据标准 EN 10002-5<sup>[24]</sup> 和 ASTM E21-09<sup>[25]</sup> 设计,如图 2 所示,超高强钢 S960QL 的化

学成分如表1所示。

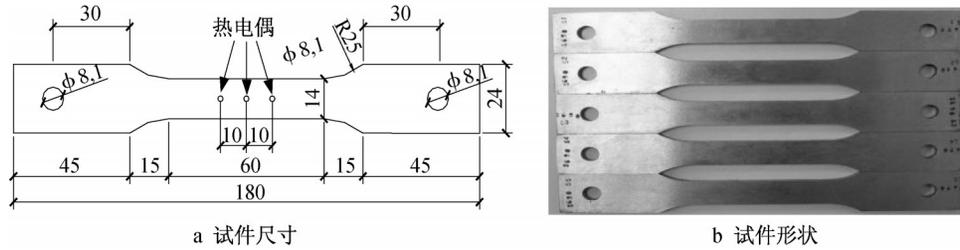


图2 试件形状及尺寸(单位:mm)

Fig.2 Shape and dimensions of test specimen (unit: mm)

表1 超高强钢S960QL的化学组成质量分数

Tab.1 Chemical composition mass fraction of VHSS S960QL

								%
C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Mo	
0.180	0.390	1.430	0.008	0.0009	0.580	0.020	0.450	
N	Nb	Ni	Ti	V	Al-g	B-g		
0.0047	0.022	0.050	0.004	0.030	0.044	0.0001		

1.3 试验方法

火灾高温试验有2种方法:①恒温加载(也称稳态试验)是指试件升温到一个指定温度,然后在这个恒定的温度下施加荷载直到试件发生破坏。此法通过拉伸试验可直接得到目标温度下材料的本构关系。②恒载升温(也称瞬态试验)是指试件在一定的应力水平下升温,直至试件破坏,试验可得到温度-应变关系曲线,通过转化得到钢材应力-应变关系。瞬态试验方法可较为真实地反映结构遭受火灾高温作用,稳态试验方法却因其简便易操作而更为常用。为得到超高强钢S960在火灾高温下较为全面的力学性能,本文采用上述两种火灾试验方法进行对比研究。

1.4 试验步骤

在稳态火灾试验中,试件被加热到目标温度后持温约10 min,以使试件温度分布均匀,然后在目标温度下对试件施加拉力直到试件破坏。稳态火灾试验的升温速率为 $50\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ ,目标温度为 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ , $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ , $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ , $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ , $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ , $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ , $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ , $650\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,在每个目标温度下,分别进行3次试验。稳态试验采用应变控制的方法施加荷载,根据标准ASTM E21-09<sup>[25]</sup>应变速率取 $0.005\text{ min}^{-1}$ 。为比较火灾高温对超高强钢S960材料性能的影响,同时对常温下S960试件进行拉伸试验。

在瞬态火灾试验中,试件受到持续恒定的拉应力作用,试件温度以一定速率升高直到试件发生破坏。瞬态试验的目标应力为 $100, 200, 250, 300, 400,$

$500, 600, 650, 700, 800, 850, 900, 950$ 和 $1\ 000\text{ MPa}$ 。在每一目标应力下,分别进行3次试验。瞬态火灾试验升温速率为 $10\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ ,相当于正常防火保护的钢构件在火灾中的升温速率<sup>[4]</sup>。试验过程中记录试件的总应变和温度,试件的总应变减去热应变可得到试件在不同温度下的应变。采用文献[26]中的转换方法可将瞬态火灾试验得到的应变-温度曲线转换成不同温度下的应力-应变曲线,具体如图3所示。图中 $\sigma$ 为应力, $\varepsilon$ 为应变, $T$ 为温度, $t$ 为时间。

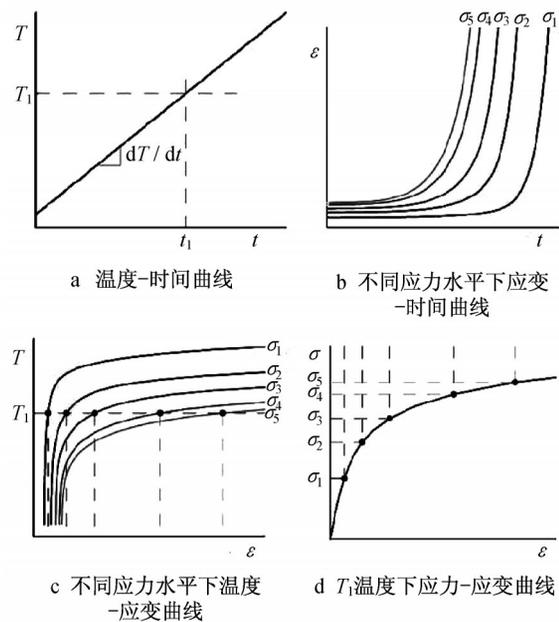


图3 瞬态应力-应变曲线的转换方法<sup>[26]</sup>

Fig.3 Transformation method of transient stress-strain curve<sup>[26]</sup>

2 试验结果与讨论

2.1 应力-应变关系曲线

稳态火灾试验和瞬态火灾试验得到的不同火灾高温下超高强钢S960的应力-应变关系曲线分别如图4和图5所示。瞬态火灾试验不同应力水平下

S960的破坏温度见表2。

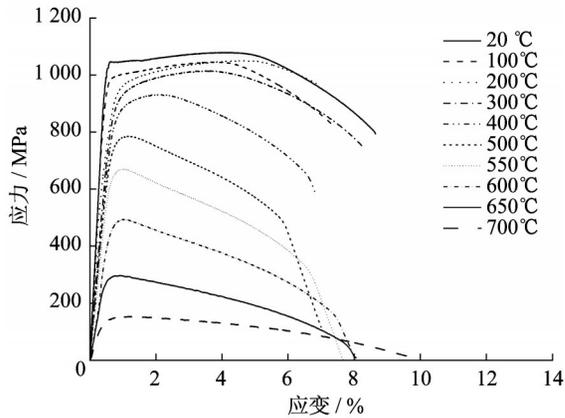


图4 稳态试验不同火灾高温下S960的应力-应变关系  
Fig.4 Stress-strain curves of S960 at different fire high temperature in steady state test

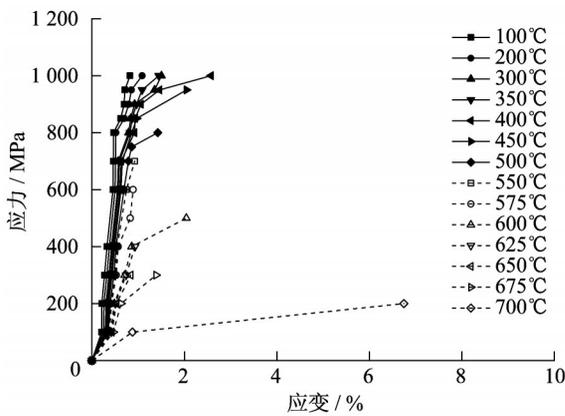


图5 瞬态试验不同火灾高温下S960的应力-应变关系  
Fig.5 Stress-strain curves of S960 at different fire high temperature in transient state

### 2.2 弹性模量

火灾高温下钢材的弹性模量取决于相应温度下的应力-应变曲线关系,通过取目标温度下钢材应力-应变曲线初始弹性阶段的切线模量为弹性模量,如图6所示。

弹性模量随温度升高而退化的程度可通过折减系数表征,弹性模量折减系数是指火灾高温下的弹性模量与常温下弹性模量的比值,即  $E_{\theta}/E_{20}$ , 其中  $E_{\theta}$  为火灾高温  $\theta$  下的弹性模量,  $E_{20}$  为常温下的弹性模量。现行钢结构设计规范 EC3<sup>[12]</sup>、AISC<sup>[20]</sup> 和 AS 4100<sup>[14]</sup> 等均采用弹性模量折减系数来进行钢结构的

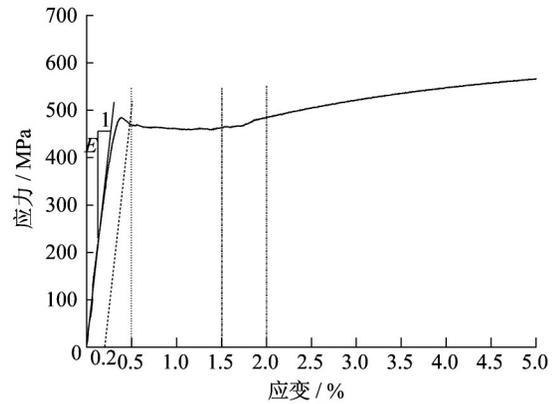


图6 钢材力学性能的确定方法  
Fig.6 Determination method of mechanical properties of steels

抗火设计与验算。

此外,将超高强钢S960在不同火灾高温下的弹性模量折减系数与 EC3<sup>[12]</sup>、AISC<sup>[20]</sup> 和 AS 4100<sup>[14]</sup> 等现行钢结构设计规范进行对比,如图7所示。可以看出,规范 EC3<sup>[12]</sup> 和 AISC<sup>[20]</sup> 对超高强钢S960火灾下弹性模量折减系数的建议值较为准确,而规范 AS 4100<sup>[14]</sup> 的建议值偏于不安全。同时,将2种火灾试

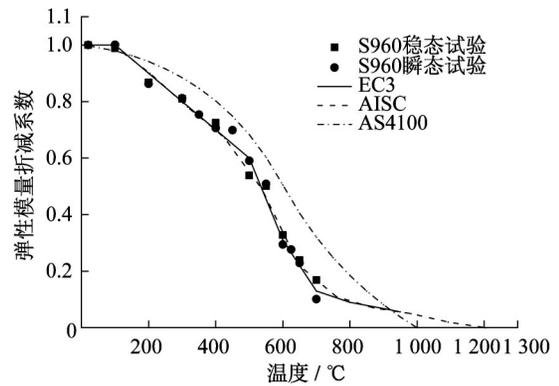


图7 火灾高温下S960弹性模量折减系数对比  
Fig.7 Comparison on elastic modulus reduction coefficients of S960 at high temperature of fire

验方法得到的超高强钢S960在不同火灾高温下的弹性模量及折减系数进行汇总,如表3所示。

### 2.3 屈服强度

通常情况下,钢材高温下的屈服强度是根据应力-应变曲线中一定的应变水平所对应的应力值确

表2 瞬态火灾试验不同应力水平下S960的破坏温度

Tab.2 Failure temperatures of S960 at various stress levels under transient state fire condition

应力水平/MPa	100	200	300	400	500	600	700	750	800	850	900	950	1 000
破坏温度/°C	800	700	690	665	613	602	594	584	580	545	540	430	402

表3 火灾高温下S960的弹性模量及折减系数

Tab.3 Elastic modulus and reduction coefficients of S960 at high temperature of fire

稳态火灾试验			瞬态火灾试验		
温度 /°C	弹性模量/ MPa	折减 系数	温度 /°C	弹性模量/ MPa	折减 系数
20	213 586	1.000	20	213 586	1.000
100	211 141	0.989	100	213 764	1.001
200	185 292	0.868	200	184 325	0.863
300	172 992	0.810	300	173 432	0.812
—	—	—	350	161 055	0.754
400	154 812	0.725	400	150 819	0.706
—	—	—	450	149 254	0.699
500	115 089	0.539	500	126 152	0.591
550	106 959	0.501	550	108 696	0.509
600	70 059	0.328	600	62 893	0.294
—	—	—	625	59 121	0.277
650	51 096	0.239	650	48 900	0.229
700	36 084	0.169	700	21 601	0.101

定的。在现行钢结构设计规范中,EC3<sup>[12]</sup>取2%的名义应变确定钢材的名义屈服强度,BS 5950<sup>[21]</sup>分别取0.5%、1.5%、2%的名义应变来确定钢材的名义屈服强度,而在AISC<sup>[20]</sup>、ASCE<sup>[27]</sup>和AS 4100<sup>[14]</sup>中,则

没有明确给出名义应变的取值。

本文分别选取0.2%、0.5%、1.5%、2%的名义应变来确定超高强钢S960的名义屈服强度,并对比上述4种名义屈服强度的异同。不同应变水平所对应的名义屈服强度的确定方法如图6所示,以0.2%的名义应变来确定超高强钢S960的名义屈服强度( $f_{0.2}$ )为例, $f_{0.2}$ 是由过0.2%应变处并与应力-应变曲线原点处切线平行的直线与应力-应变曲线相交得到。

屈服强度随温度升高而退化的程度可通过折减系数表征,屈服强度折减系数是指火灾高温下的屈服强度与常温下屈服强度的比值,即 $f_{y\theta}/f_{y20}$ ,其中 $f_{y\theta}$ 为火灾高温 $\theta$ 下的屈服强度, $f_{y20}$ 为常温下屈服强度。将2种火灾试验方法得到的超高强钢S960在不同火灾高温下的屈服强度折减系数进行汇总,如表4所示。表中给出了S960在不同温度下,在稳态火灾试验与瞬态火灾试验中名义应变分别为0.2%、0.5%、1.5%与2.0%时对应的屈服强度折减系数。

表4 火灾高温下S960的屈服强度折减系数

Tab.4 Yield strength reduction coefficients of S960 at high temperature of fire

稳态火灾试验					瞬态火灾试验				
温度/°C	不同名义应变条件下的屈服强度折减系数				温度/°C	不同名义应变条件下的屈服强度折减系数			
	0.2%	0.5%	1.5%	2.0%		0.2%	0.5%	1.5%	2.0%
20	1.000	1.000	1.000	1.000	20	1.000	1.000	1.000	1.000
100	0.947	0.899	0.964	0.968	100	0.953	0.807	0.951	0.945
200	0.904	0.714	0.945	0.956	200	0.925	0.800	0.951	0.945
300	0.859	0.673	0.923	0.936	300	0.863	0.732	0.949	0.943
—	—	—	—	—	350	0.857	0.715	0.946	0.940
400	0.819	0.622	0.874	0.880	400	0.813	0.701	0.913	0.928
—	—	—	—	—	450	0.806	0.697	0.874	0.909
500	0.734	0.590	0.738	0.710	500	0.740	0.605	0.763	0.788
550	0.631	0.513	0.618	0.589	550	0.679	0.576	0.718	0.721
600	0.472	0.364	0.454	0.431	600	0.462	0.251	0.513	0.569
650	0.280	0.259	0.271	0.259	650	0.345	0.263	0.391	0.401
700	0.138	0.130	0.144	0.141	700	0.102	0.192	0.206	0.210

现行钢结构设计规范 EC3<sup>[12]</sup>、AISC<sup>[20]</sup>、AS 4100<sup>[14]</sup>和 BS 5950<sup>[21]</sup>等均采用屈服强度折减系数来进行钢结构的抗火设计与验算。将试验结果与上述规范进行对比,如图8~图11所示。

由图8可看出,当温度为350℃~600℃时,规范AISC<sup>[20]</sup>对超高强钢S960名义应变为0.2%屈服强度折减系数的建议值偏于保守,但在其他温度时,AISC<sup>[20]</sup>偏不安全,规范ASCE<sup>[27]</sup>在温度为300℃~600℃时的情况类似。由图9可看出,规范AISC<sup>[20]</sup>对超高强钢S960名义应变为0.5%屈服强度折减系数的建议值偏于不安全。当温度低于500℃时,英

国规范BS 5950<sup>[21]</sup>偏于不安全。美国规范ASCE<sup>[27]</sup>和澳大利亚规范AS 4100<sup>[14]</sup>在温度区间450℃~550℃偏于安全而在其他温度区间偏于不安全。由图10可看出,当温度低于400℃时,规范AISC<sup>[20]</sup>和规范BS 5950<sup>[21]</sup>对超高强钢S960名义应变为1.5%屈服强度折减系数的建议值偏于不安全。澳大利亚规范AS 4100<sup>[14]</sup>在300℃~600℃温度区间内偏于安全而在其他温度区间偏于不安全。对于美国规范ASCE<sup>[27]</sup>,除700℃外其余温度偏于安全。由图11可看出,欧洲规范EC3<sup>[12]</sup>对超高强钢S960名义应变为2.0%屈服强度折减系数的建议值仅在温度高于

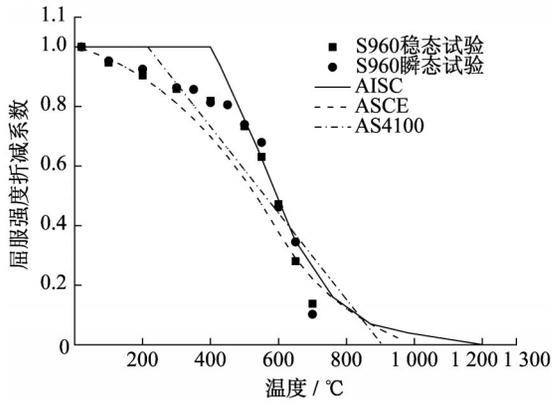


图 8 温度-屈服强度折减系数对比(名义应变为 0.2%)  
Fig.8 Yield strength reduction coefficients of S960 vs. temperatures (nominal strain is 0.2%)

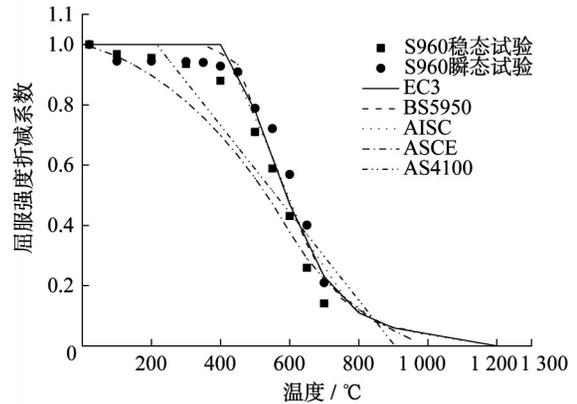


图 11 温度-屈服强度折减系数对比(名义应变为 2.0%)  
Fig.11 Yield strength reduction coefficients of S960 vs. temperatures (nominal strain is 2.0%)

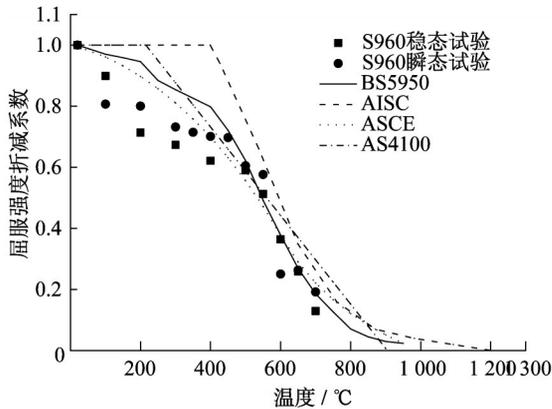


图 9 温度-屈服强度折减系数对比(名义应变为 0.5%)  
Fig.9 Yield strength reduction coefficients of S960 vs. temperatures (nominal strain is 0.5%)

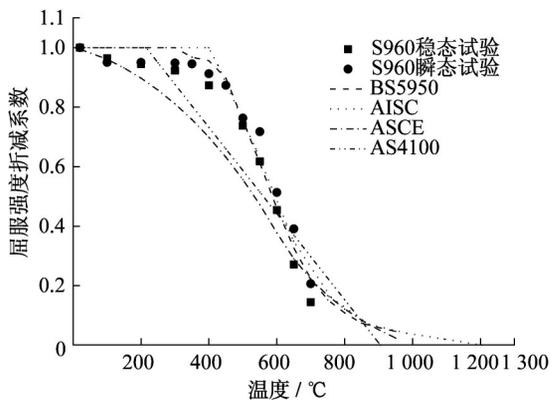


图 10 温度-屈服强度折减系数对比(名义应变为 1.5%)  
Fig.10 Yield strength reduction coefficients of S960 vs. temperatures (nominal strain is 1.5%)

400 °C时偏于安全,其余规范的情况类似于钢材名义应变为 1.5%时。

通过试验结果与世界各国现行钢结构设计规范的比较可看出,基于普通钢试验结果的现行钢结构

设计规范不适用于超高强钢 S960 的抗火设计,因此,有必要针对高强钢及超高强钢提出可准确描述其抗火性能的规范条文。

### 2.4 极限强度

极限强度随温度升高而退化的程度可通过折减系数表征,极限强度折减系数是指火灾高温下的极限强度与常温下极限强度的比值,即  $f_{u\theta}/f_{u20}$ , 其中  $f_{u\theta}$  为火灾高温  $\theta$  下的极限强度,  $f_{u20}$  为常温下的极限强度。将 2 种火灾试验方法得到的超高强钢 S960 在不同火灾高温下的极限强度及折减系数进行汇总,如表 5 所示。

表 5 火灾高温下 S960 的极限强度及折减系数

Tab.5 Ultimate strength and reduction coefficients of S960 at high temperature of fire

稳态火灾试验			瞬态火灾试验		
温度 / °C	极限强度 / MPa	折减系数	温度 / °C	极限强度 / MPa	折减系数
20	1 079	1.000	20	1 079	1.000
100	1 048	0.971	100	1 000	0.927
200	1 052	0.975	200	1 000	0.927
300	1 016	0.942	300	1 000	0.927
—	—	—	350	1 000	0.927
400	934	0.866	400	1 000	0.927
—	—	—	450	950	0.880
500	786	0.728	500	800	0.741
550	670	0.621	550	700	0.649
600	494	0.458	600	500	0.463
650	296	0.274	650	300	0.278
700	153	0.142	700	200	0.185

将试验结果与美国规范 AISC<sup>[20]</sup>进行对比,如图 12 所示。可以看出,美国规范 AISC<sup>[20]</sup>对超高强钢 S960 极限强度的建议值仅在 400 °C~600 °C 范围内偏于安全,因此,当采用美国规范 AISC<sup>[20]</sup>对超高强钢 S960 进行抗火设计时,规范对其火灾下极限强度

的建议值可能偏于不安全。

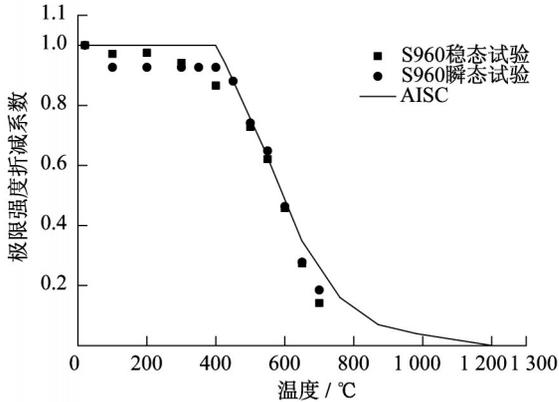


图12 温度-极限强度折减系数对比

Fig.12 Comparison on ultimate strength reduction factors of S960 vs. temperatures

### 3 预测公式

为指导实际工程中超高强钢S960的抗火设计,基于试验结果,对超高强钢S960在火灾高温下的弹性模量、屈服强度和极限强度等折减系数进行数值拟合,并提出超高强钢S960在火灾高温下力学性能的拟合公式。由于火灾高温是钢材力学性能退化的主要因素,因此上述材料力学性能均是温度 $\theta$ 的函数。

#### 3.1 弹性模量

基于试验结果,提出超高强钢S960在火灾高温下的弹性模量折减系数随温度 $\theta$ 变化的拟合公式如式(1)所示:

$$\frac{E_{\theta}}{E_{20}} = -1.8 \times 10^{-9}\theta^3 + 2.319 \times 10^{-7}\theta^2 - 5.845 \times 10^{-4}\theta + 1.021, 100 < \theta \leq 700 \quad (1)$$

式中: $E_{\theta}$ 为温度为 $\theta$ 时超高强钢S960的弹性模量; $E_{20}$ 为常温下超高强钢S960的弹性模量。

将式(1)与试验结果进行对比,如图13所示,可以看出,式(1)与试验结果拟合较好。

#### 3.2 屈服强度

对于超高强钢S960名义应变为2%的屈服强度,稳态火灾试验方法与瞬态火灾试验方法结果存在不同,因此,分别建立两组公式以拟合超高强钢S960在火灾下的屈服强度。其中超高强钢S960在稳态火灾下的屈服强度折减系数随温度 $\theta$ 变化的拟合公式如式(2)和式(3)所示,在瞬态火灾下的拟合公式如式(4)和式(5)所示。

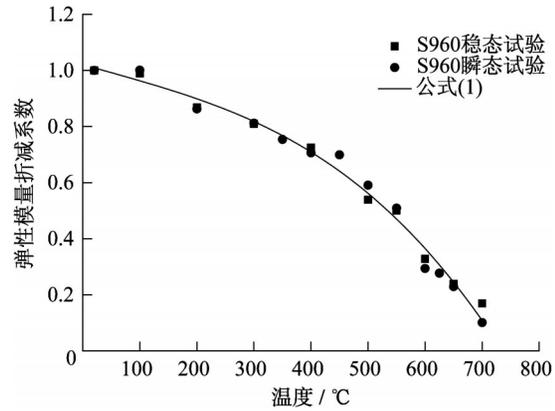


图13 超高强钢S960弹性模量折减系数与试验结果对比  
Fig.13 Comparison on elastic modulus reduction coefficients of VHSS S960 with test results

$$\frac{f_{y\theta s}}{f_{y20}} = 1.006 - 2.834 \times 10^{-4}\theta, 20 \leq \theta \leq 400 \quad (2)$$

$$\frac{f_{y\theta s}}{f_{y20}} = -3.21 \times 10^{-6}\theta^2 + 9.75 \times 10^{-4}\theta + 1.011, 400 < \theta \leq 700 \quad (3)$$

式(2)~(3)中: $f_{y\theta s}$ 为在稳态火灾试验条件下当温度为 $\theta$ 时超高强钢S960的屈服强度; $f_{y20}$ 为常温下超高强钢S960的屈服强度。

$$\frac{f_{y\theta t}}{f_{y20}} = 1.004 - 1.818 \times 10^{-4}\theta, 20 \leq \theta \leq 400 \quad (4)$$

$$\frac{f_{y\theta t}}{f_{y20}} = -6.024 \times 10^{-6}\theta^2 + 4.205 \times 10^{-3}\theta + 0.216, 400 < \theta \leq 700 \quad (5)$$

式(4)~(5)中: $f_{y\theta t}$ 为在瞬态火灾试验条件下温度为 $\theta$ 时超高强钢S960的屈服强度。

将式(2)~(5)与试验结果进行对比,如图14所示,可以看出,拟合公式与试验结果拟合较好。在实际工程项目中,从安全可靠抗火设计的角度出发,建议选择稳态火灾拟合公式(2)和(3)进行超高强钢S960的抗火设计。

#### 3.3 极限强度

基于试验结果,提出超高强钢S960在火灾高温下的极限强度折减系数随温度 $\theta$ 变化的拟合公式如式(6)和式(7)所示:

$$\frac{f_{u\theta}}{f_{u20}} = 1.005 - 2.607 \times 10^{-4}\theta, 20 \leq \theta \leq 400 \quad (6)$$

$$\frac{f_{u\theta}}{f_{u20}} = -5.055 \times 10^{-6}\theta^2 + 3.01 \times 10^{-3}\theta + 0.497, 400 < \theta \leq 700 \quad (7)$$

式(6)~(7)中: $f_{u\theta}$ 为温度为 $\theta$ 时超高强钢S960的极限强度; $f_{u20}$ 为常温下超高强钢S960的极限强度。

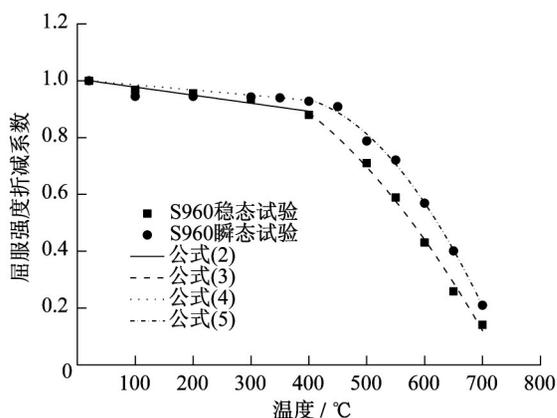


图14 超高强钢S960屈服强度折减系数与试验结果对比  
Fig.14 Comparison on yield strength reduction coefficients of VHSS S960 with test results

将式(6)和式(7)与试验结果进行对比,如图15所示,可以看出,拟合公式与试验结果拟合较好。

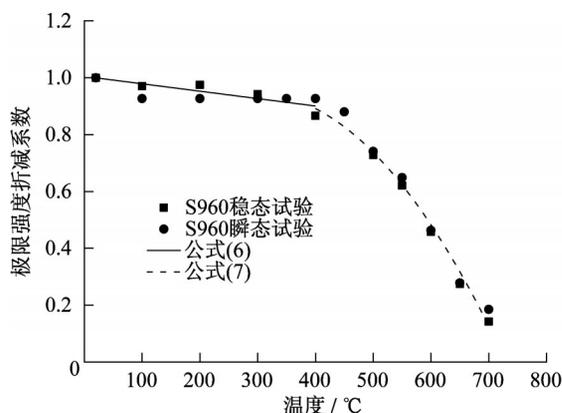


图15 超高强钢S960极限强度折减系数与试验结果对比  
Fig.15 Comparison on ultimate strength reduction coefficients of VHSS S960 with test results

## 4 比较分析

将两种火灾试验方法所得超高强钢S960的材料力学性能与现有文献中S460<sup>[4]</sup>、S690<sup>[5]</sup>以及国产高强钢Q460<sup>[8]</sup>、Q550<sup>[11]</sup>、Q690<sup>[11]</sup>和Q890<sup>[11]</sup>的火灾下材料力学性能进行对比,同时,验证现行钢结构规范EC3<sup>[12-13]</sup>、ASCE<sup>[19]</sup>、AISC<sup>[20]</sup>、AS 4100<sup>[14-15]</sup>和BS 5950<sup>[21]</sup>等的适用性。

### 4.1 弹性模量折减系数

第4节所述几种高强钢在火灾下的弹性模量折减系数试验结果以及与规范中钢材火灾下弹性模量折减系数对比如图16所示。可以看出,欧标钢材与国产钢材在弹性模量折减系数上有着明显差异,这是因为欧标和我国国产高强钢在化学成分、生产加

工工艺等方面的差异导致了其力学性能的差别,温度达到700℃及以上时,国产高强钢Q460弹性模量的折减系数明显较其他强度国产高强钢大。高强钢试验结果与规范对比可看出,澳大利亚规范AS 4100<sup>[14-15]</sup>对欧标高强钢火灾下弹性模量折减系数的建议值偏于不安全,欧洲规范EC3<sup>[12-13]</sup>和美国AISC<sup>[20]</sup>则均对欧标高强钢火灾下弹性模量折减系数的建议值在某温度区间范围内偏于不安全,但整体偏差不大,而现行各国规范对国产高强钢火灾下弹性模量折减系数的建议值在600℃以下时偏于安全,当温度超过700℃时偏于不安全。

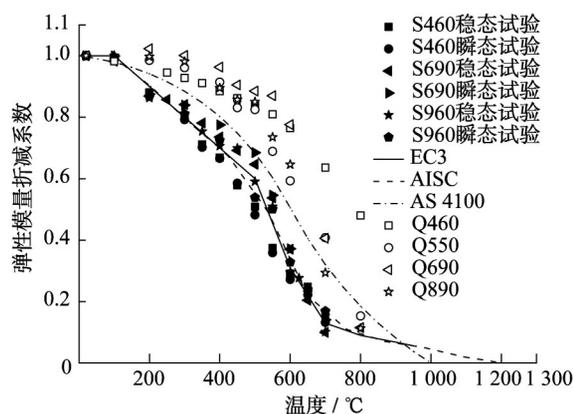


图16 高强钢弹性模量折减系数对比  
Fig.16 Comparison on elastic modulus reduction coefficients of high strength steel

### 4.2 屈服强度折减系数

几种高强钢在火灾下的名义屈服强度(除国产高强钢Q460以1%的应变确定外,其他钢材以2%的名义应变确定)折减系数试验结果以及与规范中折减系数对比如图17所示,可以看出,上述几种高强钢在火灾高温下的屈服强度折减系数存在差异,由于现有试验数据中屈服强度确定标准不一致,国产高强钢Q460与其他钢材的折减系数相差较大。高强钢试验结果与规范对比可看出,EC3<sup>[12-13]</sup>、BS 5950<sup>[21]</sup>和AISC<sup>[20]</sup>等对火灾下钢材屈服强度折减系数的建议值较为接近,但规范曲线均未能完全包络试验值,偏于不安全。上述几种规范对比可看出,规范ASCE<sup>[19]</sup>的建议值最偏于安全,但对高强钢而言过于保守。

### 4.3 极限强度折减系数

在现行钢结构规范中,目前仅规范AISC<sup>[20]</sup>对火灾高温下钢材的极限强度折减系数提出建议值,几种高强钢在火灾下极限强度随温度升高的折减系数与规范AISC<sup>[20]</sup>的对比情况如图18所示。可以看

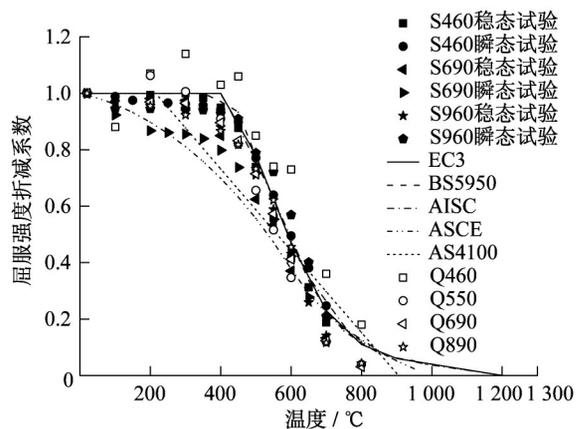


图 17 高强钢屈服强度折减系数对比

Fig.17 Comparison on yield strength reduction coefficients of high strength steel

出,上述几种高强钢在火灾高温下的极限强度折减系数存在差异,国产高强钢Q460较其他钢材的极限强度折减系数稍大,规范AISC<sup>[20]</sup>提出火灾高温下钢材的极限强度折减系数的建议值对高强钢整体偏于不安全。

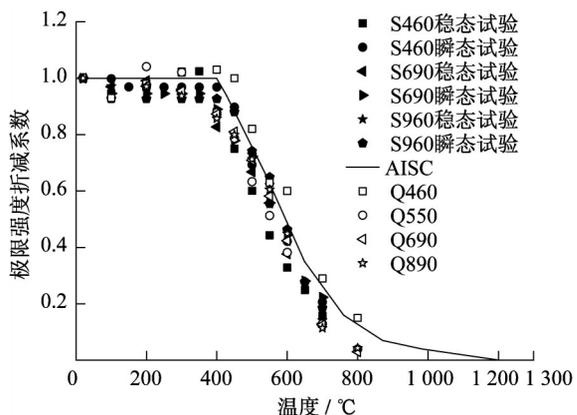


图 18 高强钢极限强度折减系数对比

Fig.18 Comparison on ultimate strength reduction coefficients of high strength steel

## 5 结论

本文采用稳态火灾试验方法和瞬态火灾试验方法对超高强钢S960进行高温力学性能试验,得到超高强钢S960在火灾下的弹性模量、屈服强度、极限强度、应力-应变关系曲线以及钢材破坏模式等。

将试验研究结果与现有文献中欧标高强钢S460、S690以及国产高强钢Q460、Q550、Q690和Q890等不同种类高强钢火灾下材料力学性能进行对比分析,结果显示我国与欧标不同高强钢在火灾

高温下的力学性能存在差异,这是因为不同高强钢在化学成分、生产加工工艺等方面存在差异。

将试验研究结果与各国现行钢结构规范EC3、ASCE、AISC、AS 4100和BS 5950等进行对比分析,结果显示,现行规范均不能安全可靠地指导超高强钢S960的抗火设计。当温度低于700℃时,可采用规范ASCE对超高强钢S960火灾下屈服强度进行预测,结果偏于安全,但对于超高强钢S960火灾下的弹性模量和极限强度,规范ASCE建议值存在偏于不安全的情况。因此,为指导实际工程中超高强钢S960的抗火设计,基于试验结果,采用最小二乘法对超高强钢S960在火灾高温下的弹性模量、屈服强度和极限强度折减系数进行数值拟合,提出超高强钢S960在火灾高温下力学性能的拟合公式,并与试验结果对比验证拟合公式准确有效。

此外,将欧标高强钢S460、S690与S960与国产高强钢Q460、Q550、Q690和Q890在火灾高温下的力学性能与各国现行主流钢结构设计规范进行对比,结果表明:基于普通钢研究成果的各国现行钢结构设计规范均无法安全地指导高强钢结构的抗火设计。

本文研究成果为高强及超高强钢结构的设计直接沿用现行规范基于普通钢结构得出的设计准则敲响了警钟,凸显了现行各大钢结构设计规范对高强钢结构提出针对性设计准则的必要性和紧迫性。

## 参考文献:

- [1] 罗永峰,任楚超,强旭红,等. 高强钢结构抗火研究进展[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版). 2016(S1): 104. LUO Yongfeng, REN Chuchao, QIANG Xuhong, *et al.* State-of-the-art on fire-resistance behavior of high strength steel structures [J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2016(S1): 104.
- [2] QIANG Xuhong, BIJLAARD F S K, KOLSTEIN H. Deterioration of mechanical properties of high strength structural steel S460N under steady state fire condition [J]. Materials & Design, 2012, 36(1): 438.
- [3] QIANG Xuhong, BIJLAARD F S K, KOLSTEIN H. Deterioration of mechanical properties of high strength structural steel S460N under transient state fire condition [J]. Materials & Design, 2012, 40(1): 521.
- [4] QIANG Xuhong, BIJLAARD F S K, KOLSTEIN H. Elevated-temperature mechanical properties of high strength structural steel S460N: experimental study and recommendations for fire-resistance design [J]. Fire Safety Journal, 2013, 55(1): 15.

- [5] QIANG Xuhong, BIJLAARD F, KOLSTEIN H. Dependence of mechanical properties of high strength steel S690 on elevated temperatures[J]. *Construction and Building Materials*, 2012, 30(1): 73.
- [6] QIANG Xuhong, BIJLAARD F S K, KOLSTEIN H. Post-fire mechanical properties of high strength structural steels S460 and S690[J]. *Engineering Structures*, 2012, 35(1): 1.
- [7] QIANG Xuhong, BIJLAARD F S K, KOLSTEIN H. Post-fire performance of very high strength steel S960[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2013, 80(1): 235.
- [8] 王卫永, 刘兵, 李国强. 高强度Q460钢材高温力学性能试验研究[J]. *防灾减灾工程学报*, 2012, 32(S1): 30.  
WANG Weiyong, LIU Bing, LI Guoqiang. Experimental study on mechanical properties of Q460 high strength steel at elevated temperature [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2012, 32(S1): 30.
- [9] 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.  
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.
- [10] 吕慧宝. 国产超500 MPa高强度结构钢高温后力学性能研究[D]. 上海: 同济大学, 2017.  
LYU Huibao. Study on mechanical properties of domestic high strength structural steel over 500MPa after high temperature [D]. Shanghai: Tongji University, 2017.
- [11] 黄雷. 国产高强度结构钢高温力学性能研究[D]. 上海: 同济大学, 2017.  
HUANG Lei. Study on mechanical properties of domestic high strength structural steel in high temperature [D]. Shanghai: Tongji University, 2017.
- [12] 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.
- [13] British Standards Institution. Eurocode 3-design of steel structures-part 1 - 12: additional rules for the extension of EN 1993 up to steel grades S700: EN 1993-1-2: 2007 (E) [S]. Brussels: CEN, 2005.
- [14] Australian Building Codes Board. Australian standards: steel structures: AS 4100[S]. Sydney: Standards Australia, 1998.
- [15] Australian Building Codes Board. Australian standard: amendment no. 1 to AS 4100-1998 steel structures: AS4100-A1[S]. Sydney: Standards Australia, 2012.
- [16] OUTINEN J, MÄKELÄINEN P. Mechanical properties of structural steel at elevated temperatures and after cooling down[J]. *Fire & Materials*, 2004, 28(2-4): 237.
- [17] CHEN J, YOUNG B, UY B. Behavior of high strength structural steel at elevated temperatures [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2006, 132(12): 1948.
- [18] LANGE J W N. Examination of the mechanical properties of steel S460 for fire[J]. *Journal of Structural Fire Engineering*, 2010, 1(3): 189.
- [19] American Society of Civil Engineering. Structural fire protection: MOP 78 [S]. New York: ASCE, 1992.
- [20] American Institute of Steel Construction. Specification for structural steel buildings: AISC 360-05[S]. Chicago: AISC, 2005.
- [21] British Standards Institution. Structural use of steelwork in building: BS5950-5[S]. London: BSI, 1998.
- [22] European Committee for Standardization. Eurocode 1: actions on structures, part 1-2 - general actions - actions on structures exposed to fire: EC1 EN 1991-1-2[S]. Brussels: CEN, 2002.
- [23] European Committee for Standardization. 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: EN 10025-6 [S]. Brussels: CEN, 2009.
- [24] European Committee for Standardization. Tensile testing of metallic materials, part 5: method of testing at elevated temperature: EN 10002-5[S]. Brussels: CEN, 1992.
- [25] American Society of Testing Materials. Standard test methods for elevated temperature tension tests of metallic materials: ASTM E21-09[S]. West Conshohocken: ASTM, 2009.
- [26] MALJAARS J, TWILT L, SOETENS F. Flexural buckling of fire exposed aluminium columns [J]. *Fire Safety Journal*. 2009, 44(5): 711.
- [27] American Society of Civil Engineering. Design of latticed steel transmission structures: ASCE 10-97 [S]. Reston: ASCE, 2000.