

# 高强钢 S460 高温力学性能研究与抗火设计建议

强旭红,毋凯冬,姜旭<sup>†</sup>,罗永峰  
(同济大学土木工程学院,上海 200092)

**摘要:**针对钢结构抗火设计中高强度结构钢材料力学性能参数的取值进行研究.为研究最常用的高强度结构钢 S460N 在高温下的力学性能,对其在稳态和瞬态不同火灾情况下进行材性试验,得到不同温度下 S460N 的弹性模量、屈服强度和极限强度的折减系数,并与现有文献和现行主要钢结构设计规范进行对比分析.通过与现有文献中欧标钢 S460N 和 S460M、国产钢 Q460 以及普通钢的研究结果比较,发现高温下结构钢的力学性能退化取决于钢材种类及其加工工艺.因此,各国现行的钢结构设计规范基于普通钢研究成果得出的设计建议不适用于高强度结构钢.此外,给出可用于指导设计的高强度结构钢 S460N 在高温下力学性能退化的拟合公式,并对其进行校验.

**关键词:**高强度结构钢;高温;力学性能;试验研究;抗火设计

**中图分类号:**TU511.3

**文献标志码:**A

## Study on Mechanical Properties of High Strength Steel S460 at Elevated Temperatures and Fire-resistance Design Recommendations

QIANG Xuhong, WU Kaidong, JIANG Xu<sup>†</sup>, LUO Yongfeng  
(College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:**This paper investigates the parameter evaluation of mechanical behavior of high strength structural steels in fire-resistance design. In order to reveal the elevated-temperature mechanical properties of high strength steel S460N, tensile tests were conducted under both fire conditions of steady state and transient state. The elevated-temperature reduction factors of elastic modulus, yield and ultimate strengths of S460N were obtained and compared to those in the current design standards and available literature. According to the comparison between the research results on S460N, the available research results in literature on S460N, S460M, Q460 and various mild steels, it is found that the deterioration of mechanical properties of structural steels at elevated temperatures is dependent on steel grades and manufacturing method. Therefore, the recommendations in current design standards are not applicable to high strength structural steels. Moreover, unique predictive equations for the deterioration of S460 mechanical properties at elevated temperatures were proposed and validated against the available literatures.

**Key words:**high strength structural steel;elevated temperature;mechanical properties;experiment study;fire-resistance design

\* 收稿日期:2017-10-28

**基金项目:**国家重点研发计划重点专项(2017YFB0304701),National key R & D Program of China(2017YFB0304701);国家自然科学基金资助项目(51408150),National Natural Science Foundation of China(51408150);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2014KJ044),Fundamental Research Funds for the Central Universities(2014KJ044)

**作者简介:**强旭红(1984—),女,黑龙江齐齐哈尔人,同济大学副教授,博士

<sup>†</sup> 通讯联系人,E-mail:jiangxu@tongji.edu.cn

在 20 年前的欧洲, S355 被视为高强度结构钢; 现在, S355 热轧钢板和 H 型钢是欧洲最常用的结构用钢. 根据欧洲钢结构设计规范( EC3 )<sup>[1]</sup> 的定义, 屈服强度大于等于 420 N/mm<sup>2</sup> 的钢材被称为高强度结构钢. 由于高强度结构钢的经济效益优于普通钢, 在过去十年中, 高强度结构钢已广泛应用于世界各地的重要土木结构建设中<sup>[2]</sup>, 比如我国的鸟巢、日本明石海大桥、美国纽约的自由塔、法国的 Millau 索承公路桥等. 因此, 高强度结构钢得到越来越多的关注, 并逐步占领更大的钢结构市场.

Collin 和 Johansson<sup>[3]</sup> 曾进行过验证, 发现若钢材的强度可以得到充分的利用, 结构用钢的成本将随着钢材强度的增加而降低. 随着生产工艺和制造技术的发展, 制造高强度结构钢的成本将越来越接近普通钢. 因此, 使用高强度结构钢可以产生很好的经济与社会效益, 尤其是在高强度结构钢的强度可得到充分利用的结构中, 优势更为明显.

美国“911 事件”后, 各国学者进行了大量火灾下结构性能变化的研究, 这是材料退化、热约束和结构构件偶然失效的综合作用的结果. 作为评估火灾下以及火灾后钢结构性能变化的基础, 一些结构钢在高温和冷却后的力学性能已有相关报导<sup>[4-9]</sup>. 但是, 之前的研究主要集中于普通钢, 而对高强度结构钢, 现有的研究还很少. 这导致目前的钢结构抗火设计中, 高强钢结构的设计或偏于保守或偏于不安全<sup>[10-15]</sup>. 这些问题严重阻碍了高强度结构钢在结构工程中的实际应用, 也埋下了很多安全隐患.

欧洲钢结构设计规范( EC3 )<sup>[1]</sup> 根据普通钢试验得到的结果, 对各种结构钢高温下的材料性能退化做出了统一的建议. 然而, 有研究表明高温下高强度结构钢材与普通钢不同<sup>[13-15]</sup>. 因此, 使用 EC3 的建议进行高强钢结构的抗火设计可能存在安全问题. 不仅是欧洲钢结构设计规范<sup>[1]</sup>, 目前美国<sup>[16-17]</sup>、澳大利亚<sup>[18]</sup>和英国<sup>[19]</sup>的钢结构设计规范均未针对高强度结构钢抗火设计提出合理建议. 因此, 迫切需要对不同等级的高强度结构钢在高温下的材料性能进行研究, 以配合钢结构抗火模拟技术的发展和实际设计需要.

虽然在实际工程中, S460 是欧洲目前使用最广泛的高强度结构钢, 但现有的 S460 高温材料性能研究成果非常有限, 且主要集中在 S460N 与 S460M 两种结构钢. Lange 和 Wohlfeil<sup>[10]</sup> 进行过 S460N 与 S460M 瞬态火灾试验, 并发现 S460M 的高温性能较 S460N 好. Schneider 和 Lange<sup>[11-13]</sup> 对 7 种不同化学成分和成

型条件的 S460 高强度结构钢进行了稳态和瞬态火灾试验研究. 他们指出, EC3 高估了 S460 高温下的屈服强度. Outinen<sup>[7,9]</sup> 对 S460M 进行瞬态火灾试验研究, 并将试验结果与 EC3 建议的弹性模量和屈服强度值进行对比. 另外, Outinen 等人<sup>[5-6]</sup> 还针对 S355 与 S420M 进行高温下的拉伸试验, 并给出抗火设计模型. Kodur 等人<sup>[4]</sup> 对现有钢结构高温性能的研究进行文献综述, 指出试验结果之间存在差异.

Chen 等<sup>[14]</sup> 对高强度结构钢 BISPLATE 80 (名义屈服强度相当于 ASTM A514, S690Q 和 JISG3128) 与普通钢 XLERPLATE Grade 350 (相当于 ASTM 573-450) 进行了稳态和瞬态火灾试验研究, 并将高强度结构钢弹性模量以及对应应变 0.2% 的屈服强度与普通钢进行对比, 发现高强度结构钢和普通钢的弹性模量与屈服强度在 22 ~ 540 °C 之间非常相似, 但当温度超过 540 °C 后两者的差别显著. Chen 还给出高温下 BISPLATE80 的力学性能折减系数. Qiang 等<sup>[15]</sup> 针对火灾后 S460 和 S690 的残余力学性能进行研究, 提出火灾后切实可行的高强钢结构评估方法以及重新利用的建议. 屈立军等<sup>[20]</sup> 对国产 Q420 高强度结构钢在高温下的性能进行试验研究, 并进行稳态和瞬态火灾试验对比. 结果表明, 瞬态试验比稳态火灾试验得出的钢材强度要小. 王永卫等<sup>[21]</sup> 对国产 Q460 的高温力学性能进行过试验研究, 得到 Q460 强度与弹性模量随温度的变化关系, 并拟合出相应的曲线.

由于测试方法、加热条件和数据收集方式的差异, 不同文献给出的数据与结论尚不统一. 这给结构工程师准确把握高强度结构钢高温下的性能带来巨大困难. 因而本文对 S460 进行了系统的稳态和瞬态火灾试验研究.

## 1 试验研究

### 1.1 试验装置

火灾下拉伸试验在 Gleeble 3800 系统中进行, 该系统是数字闭环控制的热学和力学测试系统, 如图 1、图 2 所示. Gleeble 3800 的加热速度可高达 10 000 °C/s, 也可保持稳态平衡温度. Gleeble 3800 具有数字控制系统, 可提供所有必要信号, 以实现同时利用数字闭环的热学和力学伺服系统控制试验所需的热学和力学变量. 在该试验中, 如图 3(b) 所示的 3 对热电偶为控制系统提供准确的试件温度反馈信号. 炉内空气的温度也可以通过 Gleeble 3800

系统采集到.Gleeble 3800 力学系统最大可以施加 200 kN 的压力或 100 kN 的拉力.由非接触式激光应变仪测量试件的应变, 试验过程由 QuikSim 软件预定义的参数控制.



图 1 试验设备-Gleeble 3800 系统

Fig.1 Test device-Gleeble 3800 system

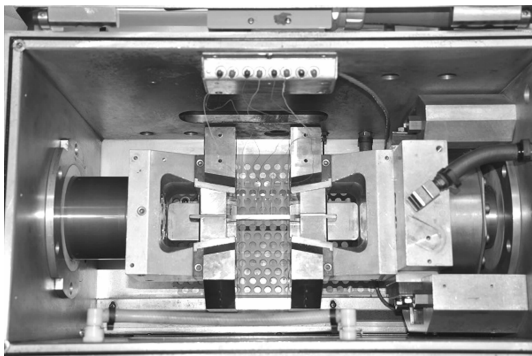


图 2 拉伸试验进行的 Gleeble 3800 试验炉

Fig.2 Tensile test set-up in the furnace of Gleeble 3800

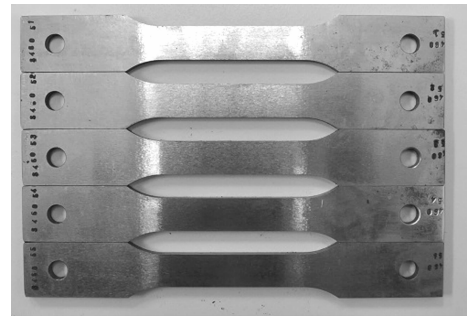
### 1.2 试验材料和试件

试验所用试件都由同一块名义厚度为 5 mm 的 S460NL 钢板切割得到.S460NL 具有较高的屈服强度和可焊性, 生产符合欧洲规范 EN10025-3<sup>[22]</sup>. S460NL 是这种钢的等级名称缩写,S 是指结构钢; 460 是其名义屈服强度; N 表示正火轧制的生产工艺; L 指低温韧性. 试验所用的高强度结构钢 S460N 的化学成分列于表 1 中. 试件的形状和尺寸依据 EN10002-5<sup>[23]</sup>和 ASTM 标准 E21-09<sup>[24]</sup>进行设计.

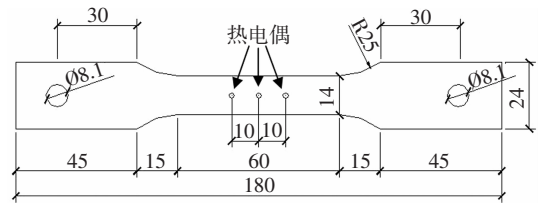
表 1 高强度结构钢 S460N 的化学成分(质量分数)

Tab.1 Chemical composition of HSS S460N material %

C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu
0.172	0.483	1.500	0.012	0.005	0.020	0.025
N	Nb	Ni	Ti	V	Al	Mo
0.005 1	0.046	0.018	0.002	0.087	0.037	0.002



(a)试件



(b)试件尺寸(mm)

图 3 试件及其尺寸

Fig.3 Tensile test coupon and dimensions

### 1.3 测试方法

评估钢材的高温力学性能,通常采用的方法是进行高温拉伸试验,包括稳态火灾试验和瞬态火灾试验两种方式.相比瞬态火灾试验而言,稳态试验更容易操作并可以直接得到应力-应变曲线,因此被更多的用于火灾试验研究.但是,瞬态火灾试验在研究火灾作用下钢构件的性能时,更接近实际情况.为比较高强度结构钢在这两种试验方法下性能的差异,本研究采用两种试验方法进行.

### 1.4 试验过程

#### 1.4.1 稳态火灾试验

在稳态火灾试验中,将试件加热到某一特定的温度,保持温度恒定,然后施加荷载,直至试件破坏.这里所采用的升温速率为 50 °C/min(满足欧洲规范 Eurocode 1 EN 1991-1-2<sup>[25]</sup>的要求),预选的火灾温度分别为 100 °C、200 °C、300 °C、350 °C、400 °C、450 °C、500 °C、550 °C、600 °C、650 °C 和 700 °C. 达到预选温度后,在该温度下稳定约 10 min,以保证试件表面和内部的温度达到均匀.然后对试件施加拉力,直至破坏.在稳态火灾试验中,采用应变控制,应变速率为 0.005/min,满足 ASTM 标准 E21-09<sup>[24]</sup>的要求.为研究高温对 S460N 力学性能退化的影响,同时对试件进行了常温下材料性能试验,用以参照对比.

#### 1.4.2 瞬态火灾试验

在瞬态火灾试验中,将一定的拉应力作用在试件上,不断升高试件温度,直到试件发生破坏.本试验中采用的拉应力分别为 100 MPa、150 MPa、200

MPa、250 MPa、300 MPa、350 MPa、400 MPa、450 MPa、500 MPa、600 MPa、650 MPa、700 MPa、750 MPa 和 800 MPa。瞬态火灾试验升温速率为 10 °C/min,该速率与结构发生自然火灾时升温速率相同。瞬态试验可得到试件在整个试验过程中的应变和温度。试件受热产生的温度应变从总应变中减去后,即可得到试件在不同火灾温度下的应变。根据某恒定应力水平下试验得到的应变-温度曲线,通过一定的转化,可以得到在不同温度下的应力-应变曲线。该转化方法 Maljaars 等<sup>[26]</sup>、Outinen 等<sup>[7,9]</sup>在之前的研究中曾采用过。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 弹性模量

弹性模量是影响钢结构刚度的重要因素,因此由于温度升高导致的弹性模量退化,将显著影响钢结构的承载力。由此可见,对高温下弹性模量的退化进行定量研究是极为重要的,可用于评定钢结构在火灾下的性能,并进行相应抗火设计。

在高温下钢材的弹性模量可由试验得到的应力-应变曲线获得,即是应力-应变曲线初始切线模量。高温下钢材弹性模量的退化程度由对应温度的折减系数表征。弹性模量的折减系数,是由某火灾温度下的弹性模量  $E_\theta$  与常温下的弹性模量  $E_{20}$  的比值来确定。在欧洲、美国和澳大利亚的钢结构设计规范中,折减系数因其使用便捷被推荐应用于抗火设计。本试验得到的高温下 S460N 的弹性模量折减系数  $E_\theta/E_{20}$  见表 2。

表 2 高温下 S460N 弹性模量及其折减系数

Tab.2 Elastic modulus and reduction factors of S460N at elevated temperatures

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	202 812	1.00	20	201 925	1.00
100	199 770	0.99	100	199 704	0.99
200	178 677	0.88	200	175 675	0.87
300	161 974	0.80	300	159 925	0.79
350	144 372	0.71	350	141 751	0.70
400	135 621	0.67	400	134 482	0.67
450	117 225	0.58	450	118 126	0.59
500	103 205	0.51	500	97 328	0.48
550	75 852	0.37	550	72 491	0.36
600	59 019	0.29	600	54 924	0.27
650	50 390	0.25	650	44 827	0.22
700	31 008	0.15	700	26 654	0.13

将本试验研究得到的弹性模量折减系数,与世界范围内现行的主要设计规范(即 EC3<sup>[1]</sup>、AISC<sup>[16]</sup>、AS4100<sup>[18]</sup>和 CECS200<sup>[27]</sup>)以及现有的高强钢 S460 相关文献的研究结果进行比较,并同王卫永等对国产高强钢 Q460 的试验结果进行对比分析,结果如图 4 所示。由图 4 可知,S460M 在高温下的弹性模量高于 S460N;王卫永得到的 Q460 高温弹性模量折减系数较其他学者对 S460 的研究结果偏高。对于 S460N,本试验结果与 Lange 的结果吻合较好。相较于现行的设计规范,除了 Lange 针对 S460M 的试验结果在低于 500 °C 下偏于安全外,AS4100 对于高强度结构钢 S460 的推荐值偏于不安全;EC3、AISC 和 CECS200 关于 S460M 的推荐值总体偏于安全,但对于 S460N 偏于不安全。这表明 EC3、AISC 和 CECS200 的推荐值对于 S460M 是安全的,但并不适用于 S460N;AS4100 对高温下结构钢弹性模量折减系数取值的建议并不适用于高强度结构钢 S460,无论是 S460M 还是 S460N。

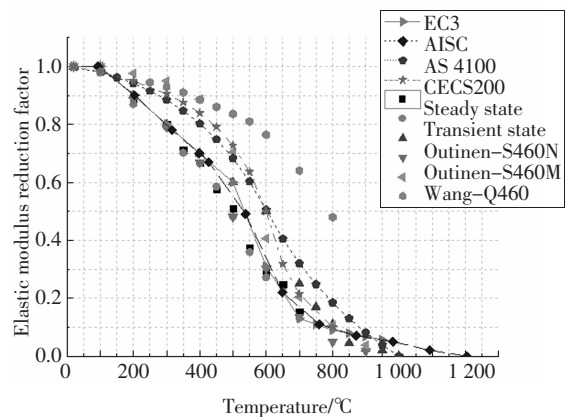


图 4 高温下弹性模量折减系数比较

Fig.4 Comparison of E-modulus reduction factors at elevated temperatures

### 2.2 屈服强度

在目前的设计规范中,EC3<sup>[1]</sup>推荐的屈服强度的折减系数是基于 0.2% 和 2.0% 的应变水平下的研究结果,而 BS5950<sup>[19]</sup>推荐的折减系数是基于 0.5%、1.5% 和 2.0% 3 个应变水平给出的。在 AISC<sup>[16]</sup>、ASCE<sup>[17]</sup> 和 AS4100<sup>[18]</sup>中,均没有给出屈服强度折减系数对应的应变水平。本文采用高温下应变为 2.0% 对应的屈服强度折减系数,以符合文献中通用的定义方法。高温下屈服强度折减系数可由高温下的屈服强度  $f_{y\theta}$  与常温下的屈服强度  $f_{y20}$  之比计算得到。由稳态火灾试验和瞬态火灾试验得出的高温下屈服强度折减系数  $f_{y\theta}/f_{y20}$  如表 3 所示。

表 3 高温下 S460N 的屈服强度及其折减系数  
Tab.3 Yield strength and reduction factors of S460N at elevated temperatures

稳态火灾试验			瞬态火灾试验		
温度/°C	屈服强度 /MPa	折减系数	温度/°C	屈服强度 /MPa	折减系数
20	504	1.00	20	523	1.00
100	497	0.99	100	517	0.99
200	501	0.99	150	510	0.98
300	504	1.00	200	507	0.97
350	496	0.98	250	505	0.97
400	478	0.95	300	503	0.96
450	442	0.88	350	501	0.96
500	372	0.74	400	493	0.94
550	282	0.56	450	470	0.90
600	209	0.42	500	403	0.78
650	158	0.31	550	334	0.64
700	94	0.19	600	259	0.50
—	—	—	650	199	0.38
—	—	—	700	129	0.25

在现有文献中,Outinen 报导<sup>[7,9]</sup>的 S460M 屈服强度折减系数是由瞬态火灾试验得到的;Lange 和 Wohlfeil 给出了 S460M 和 S460N 在瞬态火灾试验下的屈服强度折减系数<sup>[10]</sup>;Schneider 和 Lange 采用稳态和瞬态两种火灾试验方法,对化学组成不同的 3 种 S460N 进行试验,分别得到它们在不同温度下应变低于 3%范围内的应力-应变关系<sup>[11-13]</sup>;王卫永等人采用稳态火灾试验方法,对国产 Q460 钢进行过试验研究<sup>[21]</sup>.关于屈服强度折减系数,不同学者得出的结论对比如图 5 所示,现行的各国主要钢结构设计规范的建议值也绘于其中.本试验验证了高温下 S460M 的屈服强度折减系数高于 S460N,Lange 和 Wohlfeil 的试验也证实了这一点<sup>[10]</sup>.本试验的研究结果也与 Schneider 和 Lange 对 S460N 的研究结果相吻合<sup>[11-13]</sup>.王卫永等<sup>[21]</sup>关于 Q460 的试验结果离散性较大,他给出的屈服强度折减系数比其他名义屈服强度为 460 MPa 的结构钢高.EC3、BS5950、AISC 和 CECS200 推荐的折减系数较为接近,但对于高强钢 S460N 而言,上述规范推荐的折减系数较本试验结果和相关文献偏于不安全.另外,通过比较可知,ASCE 和 AS4100 的推荐值并不适用于高强钢 S460.本试验得到的 S460N 屈服强度折减系数也与

Makelainen 和 Outinen<sup>[5-9]</sup>给出的各种普通钢结果进行比较,如图 6 所示.图 6 中,Outinen<sup>[7,9]</sup>对 S460M 的试验值和 EC3 的推荐值也被包括在内作为参考.比较结果表明,不同钢材在高温下的屈服强度折减系数有较大差异,只有普通钢 S235 和 S355 与 EC3 预测值较为符合.这是因为 EC3 推荐的屈服强度折减系数是主要依据 S235 等普通钢的研究结果得到的.因此,EC3 推荐的屈服强度折减系数并不适用于所有结构钢等级.类似于 EC3,目前世界范围内还没有钢结构设计规范针对高强度结构钢给出相应的推荐值,这使高强钢结构抗火设计存在潜在安全风险.

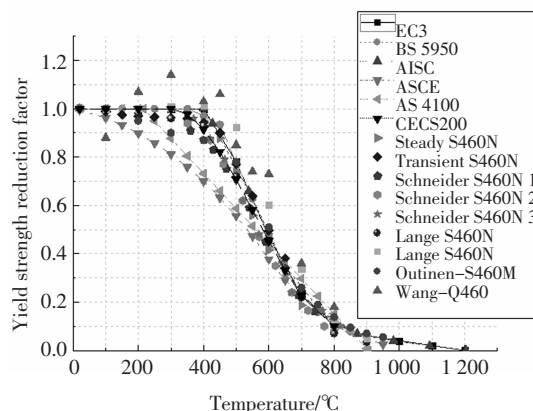


图 5 试验所得 S460 屈服强度折减系数与现行规范和现有文献的比较

Fig.5 Comparison of yield strength reduction factors with current standards and literature on S460

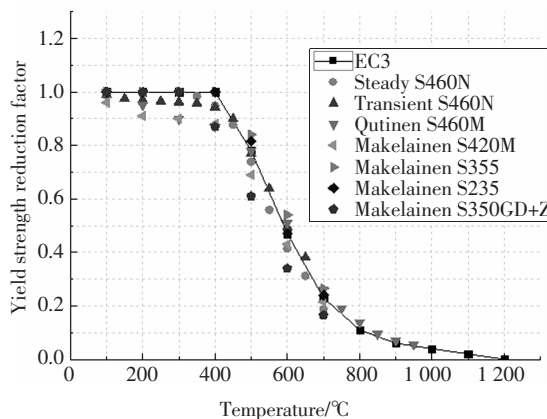


图 6 试验结果与文献中普通钢材屈服强度折减系数的比较

Fig.6 Comparison of yield strength reduction factors with literature on mild steels

### 2.3 极限强度

极限强度折减系数为高温下的极限强度  $f_{t\theta}$  与常温下的极限强度  $f_{t20}$  的比值.高温下稳态和瞬态火灾试验得到的极限强度折减系数  $f_{t\theta}/f_{t20}$ ,见表 4.本试

验得出的结果与美国规范 AISC 的建议值及王卫永等关于 Q460 的试验结果进行比较,如图 7 所示.对比可知,王卫永等人对 Q460 的试验结果较本文得到的 S460N 极限强度折减系数偏高;S460N 的极限强度折减系数普遍低于 AISC 的建议值.这是由于 AISC 的建议值主要源自普通钢高温极限强度折减系数的研究成果,将其用于评估高强度钢 S460N 在高温下的材性是偏于不安全的.因此,揭示 S460N 以及其他等级的高强度钢高温材性折减系数是极其必要的.

表 4 高温下 S460N 的极限强度折减系数

Tab.4 Ultimate strength reduction factors of S460N at elevated temperatures

稳态火灾试验		瞬态火灾试验	
温度/°C	折减系数	温度/°C	折减系数
20	1.00	20	1.00
100	0.95	100	1.00
200	0.97	150	0.97
300	1.02	200	0.97
350	1.02	250	0.97
400	0.88	300	0.97
450	0.75	350	0.97
500	0.60	400	0.97
550	0.44	450	0.90
600	0.33	500	0.69
650	0.25	550	0.56
700	0.16	600	0.42
—	—	650	0.28
—	—	700	0.21

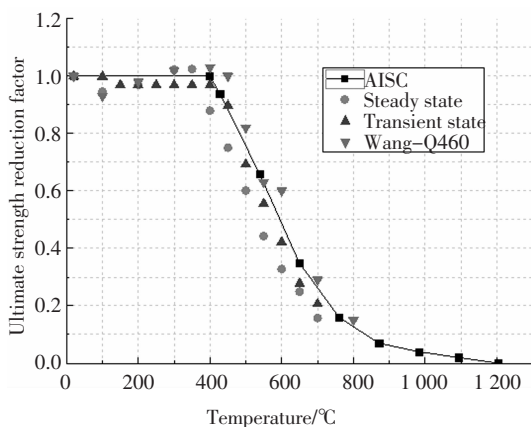


图 7 试验结果与 AISC 及 Q460 极限强度折减系数的比较

Fig.7 Comparison of ultimate strength reduction factors with AISC and Q460

### 2.4 应力-应变曲线和典型破坏模式

钢的延性是根据钢材断裂破坏前发生的变形定义的.稳态火灾试验得到的不同温度下的应力-应变曲线绘于图 8,可用于指导使用 S460N 构件的高强钢结构抗火设计.通过对比试件断裂时的应变值,可研究高温对 S460N 的延性影响.值得注意的是,在 200 °C 时 S460N 延性比室温下要低;而在 300 °C 至 350 °C 过程中,延性逐渐增大;从 400 °C 到 600 °C,延性逐渐减小;从 600 °C 到 700 °C, S460N 的延性稳定在恒定的水平.这是由 S460N 的生产加工工艺决定的.

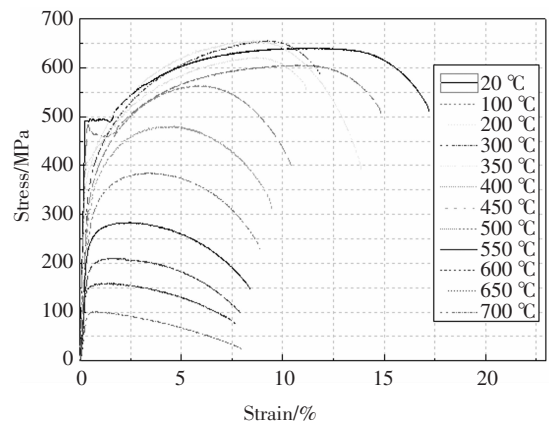


图 8 稳态火灾试验下 S460N 应力-应变曲线

Fig.8 Stress-strain curves of S460N under steady state fire conditions

S460N 试件在稳态火灾条件下得到的典型破坏模式如图 9 所示.可以看出,从 20 °C 到 700 °C 区间内,所有试件破坏前均出现了颈缩,均没有发生脆性破坏.这表明,高强度结构钢 S460N 在高温下具有较好的延性.

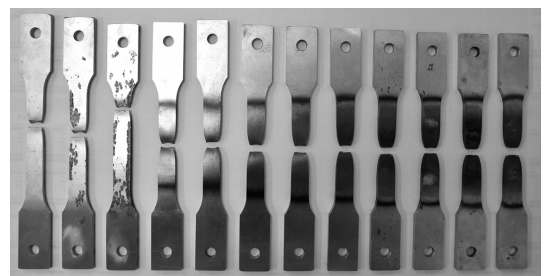


图 9 S460N 试件稳态火灾试验不同温度下的破坏模式

Fig.9 Failure modes of S460N specimens at various elevated temperatures

S460N 试件在瞬态火灾条件不同应力水平下得到的典型破坏模式如图 10 所示.可以看出,所有试件破坏前均出现了颈缩,从 100 MPa 到 800 MPa 区间内,均没有发生脆性破坏.这表明, S460N 在高温

下具有较好的延性.由此可见,高强钢 S460N 在高温下的破坏模式与普通钢没有区别.

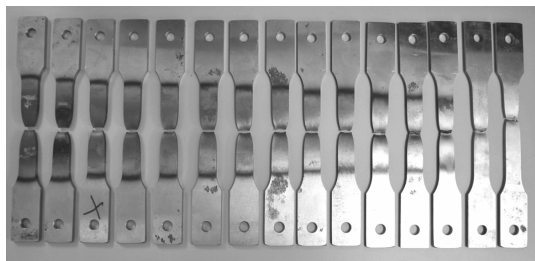


图 10 S460N 试件瞬态火灾试验不同应力水平下的破坏模式

Fig.10 Failure modes of S460N specimens under transient state fire condition at various stress levels

在某恒定的拉应力水平下,试件破坏的温度称之为瞬态火灾中该特定应力水平下的破坏温度.高强钢 S460N 在瞬态火灾中不同应力水平下的破坏温度统计见表 5. 可以发现,S460N 试件的破坏温度随所处的应力水平升高而降低.值得一提的是,当应力水平高于 750 MPa 时,其破坏温度大幅降低;但当处于名义屈服应力时,其破坏温度高于 500 °C.

表 5 S460N 瞬态试验不同应力水平下的破坏温度

Tab.5 Failure temperatures of S460N at various stress levels under transient state fire condition

应力水平/MPa	破坏温度/°C	应力水平/MPa	破坏温度/°C
100	789	500	495
150	700	550	488
200	682	600	440
250	621	650	420
300	600	700	381
350	592	750	140
400	555	800	58
450	511	—	—

### 3 拟合公式

为准确评估高强钢 S460 的抗火性能,本文基于试验结果及现有文献提出 S460 力学性能的拟合公式.由于温度是引起钢材材料性能退化的主要原因,因此这些公式均是钢材所经历最高火灾温度  $\theta$  的函数.

#### 3.1 弹性模量

基于本试验和 Lange 等<sup>[11-13]</sup>关于 S460N 高温下

弹性模量退化的研究,本文提出了计算 S460 弹性模量在火灾下退化的拟合公式,如拟合公式(1)所示.拟合公式(1)与相关文献对 S460 的研究结果的比较见图 11. 图 11 表明该拟合公式与 S460N 现有的研究结果吻合较好.另外,通过比较可知,使用式(1)来估算 S460M 在高温下的弹性模量折减系数是偏于安全的,因此式(1)也适用于 S460M.

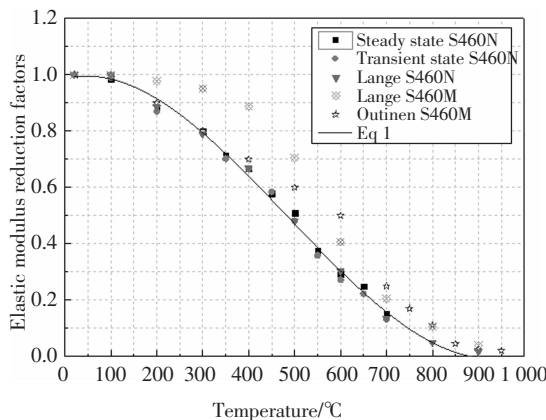


图 11 弹性模量折减系数拟合公式与文献及试验结果比较

Fig.11 Comparison of predicted elastic modulus reduction factors with literature

$$20 \leq \theta \leq 900,$$

$$\frac{E_{y\theta}}{E_{y20}} = 2.961 \times 10^{-9} \theta^3 - 4.317 \times 10^{-6} \theta^2 + 3.867 \times 10^{-4} \theta^3 + 0.986$$

(1)

#### 3.2 屈服强度

根据文献中高温下 S460N 的屈服强度和本文试验研究的结果拟合得到式(2a)和式(2b).式(2a)和(2b)与高强度结构钢 S460(包括 S460N 和 S460M)研究成果的比较情况,如图 12 所示.通过比较可知,式(2a)和(2b)能很好地吻合 S460N 的研究成果.此外,式(2a)和(2b)可用于估算 S460M 高温下的屈服强度,结果偏于安全,只有 Outinen 试验得到的 200~400 °C 范围内的 S460M 屈服强度除外.

$$20 \leq \theta \leq 350,$$

$$\frac{E_{y\theta}}{E_{y20}} = 1.001 - 1 \times 10^{-4} \theta \tag{2a}$$

$$350 \leq \theta \leq 900,$$

$$\frac{E_{y\theta}}{E_{y20}} = -1.672 \times 10^{-11} \theta^4 + 5.135 \times 10^{-8} \theta^3 -$$

$$5.41 \times 10^{-5} \theta^2 + 2.138 \times 10^{-2} \theta - 1.835$$

(2b)

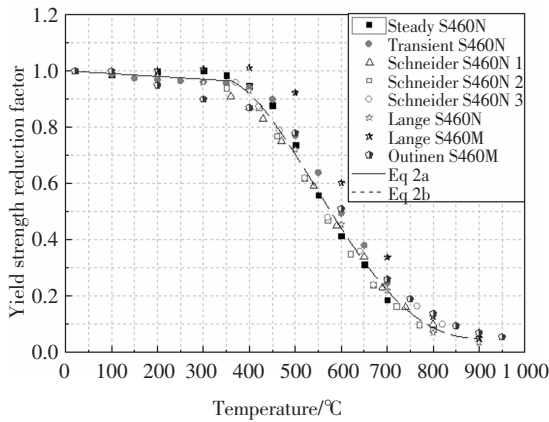


图 12 屈服强度折减系数拟合公式与文献及试验结果的比较

Fig.12 Comparison of predicted yield strength reduction factors with literature

### 3.3 极限强度

基于本试验结果,可得到高温下 S460N 极限强度折减系数的拟合公式(3a)和(3b).式(3a)和(3b)与试验结果吻合良好,如图 13 所示.

$$20 \leq \theta \leq 350,$$

$$\frac{E_{u\theta}}{E_{u20}} = 1 - 1.855 \times 10^{-4} \theta \quad (3a)$$

$$350 \leq \theta \leq 700,$$

$$\frac{E_{u\theta}}{E_{u20}} = -7.097 \times 10^{-11} \theta^4 + 1.73 \times 10^{-7} \theta^3 - 1.526 \times 10^{-4} \theta^2 + 5.52 \times 10^{-2} \theta - 5.985 \quad (3b)$$

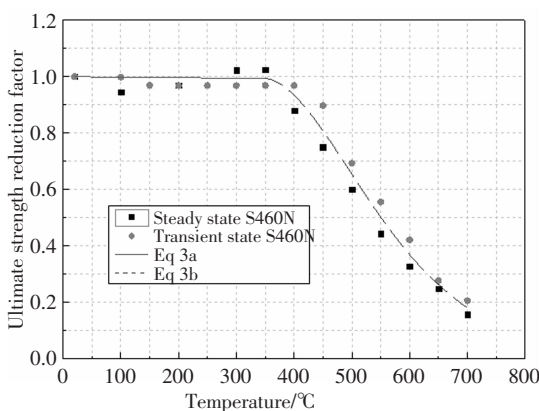


图 13 极限强度折减系数拟合公式与试验结果的比较

Fig.13 Comparison of predicted ultimate strength reduction factors with test results

## 4 结论

本文详细介绍了高强度结构钢 S460N 在稳态和瞬态火灾条件下的高温力学性能试验研究. 试验

得到不同火灾高温条件下 S460N 的弹性模量、屈服强度、极限强度的折减系数、应力-应变曲线和典型的破坏模式. 高强钢 S460N 与 S460M 和普通钢的高温材性比较表明,火灾下结构钢的力学性能退化取决于钢材种类和其生产加工工艺.关于弹性模量,本文试验研究结果表明,EC3、AISC 和 CECS200 的推荐值对于 S460M 是安全的,但并不适用于 S460N,且 AS4100 给出的推荐值不适用 S460;关于屈服强度,本文试验研究结果与 Schneider 和 Lange 对 S460N 的研究结果相吻合,且与 EC3、BS5950、AISC 和 CECS200 推荐的折减系数较为接近,但对于 S460N,上述规范的推荐值均偏于不安全;关于极限强度,本文试验研究结果表明王卫永给出的 Q460 极限强度折减系数对 S460N 偏高,且 AISC 给出的极限强度折减系数建议值偏高.因此,本文给出针对高温下高强钢 S460N 的力学性能折减系数的拟合公式,可用于高强度钢结构抗火设计与结构分析.此外,本文还强调了对多种不同等级的高强度结构钢高温力学性能进行研究并将研究成果引入钢结构设计规范的必要性.

## 参考文献

- [1] CEN, Eurocode 3 Design of steel structures-part 1-2:general rules-structural fire design[S].Brussels:CEN, 2005.
- [2] 姚昌荣,李亚东,强士中.美国桥梁高性能钢的发展与应用[J].世界桥梁,2005(1):57-60.  
YAO C R, LI Y D, QIANG S Z. Development and application of high performance steel for bridges in united states [J]. Word Bridges, 2005(1):57-60. (In Chinese)
- [3] COLLIN P, JOHANSSON B. Bridges in high strength steel [C]//I-ABSE Symposium. Budapest:IABSE, 2006:1-9.
- [4] 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):423-434.
- [5] 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):161-169.
- [6] MAKELAINEN P, OUTINEN J, KESTI J. Fire design model for structural steel S420M based upon transient-state tensile test results [J]. Journal of Constructional Steel Research, 1998, 48(1):47-57.
- [7] OUTINEN J. Mechanical properties of structural steels at high temperatures and after cooling down [R]. Helsinki, Finland: Helsinki University of Technology Laboratory of Steel Structures, 2007:1-



- 10.
- [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—251.
- [9] OUTINEN J, KAITILA O, MAKELAINEN P. High temperature testing of structural steel and modelling of structures at fire temperatures [R]. Helsinki, Finland: Helsinki University of Technology Laboratory of Steel Structures, 2001: 1—10.
- [10] 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—720.
- [11] SCHNEIDER R, LANGE J. Constitutive equations of structural steel S460 at high temperatures [C]//Nordic Steel Construction Conference. Sweden: Nordicsteel, 2009:204—211.
- [12] SCHNEIDER R, LANGE J. Constitutive equations and empirical creep law of structural steel S460 at high temperatures [J]. *Journal of Structural Fire Engineering*, 2011, 2(3):217—230.
- [13] 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. Cost, Prague, 2011:55—60.
- [14] CHEN J, YOUNG B, UY B. Behavior of high strength structural steel at elevated temperatures [J]. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 2006, 132(12):1948—1954.
- [15] 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—10.
- [16] AISC Specification for structural steel buildings [S]. Chicago: American Institution of Steel Construction, 2005.
- [17] ASCE Structural fire protection [S]. New York: ASCE, 1992.
- [18] AS 4100 Australian standards: steel structures [S]. Sydney: AS, 1998.
- [19] B.S. Institution, structural use of steelwork in building part 8: code of practice for fire resistant design [S]. London: B.S., 1998.
- [20] 屈立军, 李焕群. Q420 钢材高温强度试验研究 [J]. *消防科学与技术*, 2004, 23(3):223—225.
- QU L J, LI H Q. Study on strength of Q420 steel section at elevated temperature [J]. *Fire Science and Technology*, 2004, 23(3):223—225. (In Chinese)
- [21] 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—34.
- WANG W Y, LIU B, LI G Q. 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—34. (In Chinese)
- [22] CEN Hot rolled products of structural steels – part 3: technical delivery conditions for normalized/normalized rolled weldable fine grain structural steels [S]. Brussels: CEN, 2004.
- [23] CEN Metallic materials—tensile testing – part 5: method of testing at elevated temperature [S]. Brussels: CEN, 1992.
- [24] ASTM Standard test methods for elevated temperature tension tests of metallic materials [S]. West Conshohocken: ASTM, 2009.
- [25] CEN Eurocode 1 – actions on structures – part 1–2: general actions – actions on structures exposed to fire [S]. Brussels: CEN, 2002.
- [26] MALJAARS J, TWILT L, SOETENS F. Flexural buckling of fire exposed aluminium columns [J]. *Fire Safety Journal*, 2009, 44(5):711—717.
- [27] CECS 200 2006 建筑钢结构防火技术规范 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2006.
- CECS 200 2006 Code for fire safety of steel building structures [S]. Beijing: China Planning Press, 2006. (In Chinese)