

TSZ410铁素体不锈钢的高温力学性能试验

楼国彪^{1,2}, 陶宇超¹, 陈武龙¹, 谭永强³, 王美南³, 姜健⁴

(1. 同济大学土木工程学院, 上海 200092; 2. 同济大学土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092; 3. 远大科技集团有限公司, 湖南长沙 410138; 4. 中国矿业大学力学与土木工程学院, 江苏徐州 221116)

摘要: 通过对TSZ410铁素体不锈钢进行高温稳态试验研究, 得到了高温下初始弹性模量、名义屈服强度、抗拉强度、断后伸长率等主要力学性能指标, 对比分析了Rasmussen模型和Gardner模型, 并基于Rasmussen模型, 提出了TSZ410不锈钢硬化指数的计算公式, 建立了高温应力-应变本构关系, 并与Q235B、S30408奥氏体不锈钢、EN 1.4003不锈钢进行了对比, 研究揭示了温度对其力学性能的影响规律。研究表明, TSZ410不锈钢的初始弹性模量、名义屈服强度、抗拉强度随着温度的升高而逐渐下降, 特别是在400~700℃温度段的下降速度最为显著; 温度700℃时, 初始弹性模量约为常温下的40%, 名义屈服强度和抗拉强度降为常温下的15%左右。TSZ410不锈钢在高温下强度损失明显大于Q235B, 而刚度损失明显小于Q235B; 在温度低于500℃时, TSZ410不锈钢的强度损失显著小于S30408奥氏体不锈钢; 当温度高于500℃后, 则相反。

关键词: 不锈钢; 铁素体; 力学性能; 高温; 本构关系

中图分类号: TU511.3

文献标志码: A

Experimental Investigation of Mechanical Properties of TSZ410 Ferritic Stainless Steel at Elevated Temperature

LOU Guobiao^{1,2}, TAO Yuchao¹, CHEN Wulong¹, TAN Yongqiang³, WANG Meinan³, JIANG Jian⁴

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Broad Group, Changsha 410138, China; 4. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: By conducting a high-temperature steady-state test study on TSZ410 ferritic stainless steel, the main mechanical performance indicators such as elastic

modulus, nominal yield strength, tensile strength, and elongation were obtained. The Rasmussen model and Gardner model were compared and analyzed. Based on the Rasmussen model, the calculation formula for the high-temperature stainless steel material hardening index was proposed and the high temperature stress-strain constitutive relationship of TSZ410 stainless steel was established. Compared with Q235B, S30408 austenitic stainless steel and EN 1.4003 stainless steel, the law of the effect of temperature on its mechanical properties was revealed. The results indicate that the initial elastic modulus, the nominal yield strength, and the tensile strength of TSZ410 stainless steel decrease gradually with the increase of temperature, especially in the temperature segment of 400℃ to 700℃, and the rate of decline is most significant. When heating temperatures are equal to 700℃, the elastic modulus is reduced to 40% of the normal temperature elastic modulus, and the nominal yield strength and tensile strength are reduced to about 15% of the nominal yield strength and tensile strength at room temperature. At a high temperature, the strength loss of TSZ410 stainless steel is larger than that of Q235B, while the stiffness loss is obviously less than that of Q235B. At a temperature below 500℃, TSZ410 stainless steel strength loss is significantly less than S30408 austenitic stainless steel, but when the temperature is higher than 500℃, the opposite is true.

Key words: stainless steel; ferrite; mechanical property; elevated temperature; constitutive equation

不锈钢结构除具有普通碳素钢结构的优点外, 还具有延性高、耐腐蚀性强、表观性高以及全生命周期维护成本低等优点, 尤其是其优良的耐腐蚀性能、耐高温性能, 恰好弥补了普通碳素钢等常用建筑钢

收稿日期: 2020-05-29

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC0703808)

第一作者: 楼国彪(1975—), 男, 副研究员, 工学博士, 主要研究方向为结构抗火、钢结构。

E-mail: gblou@tongji.edu.cn



论文
拓展
介绍

材的缺陷,在建筑工程中具有广阔的应用前景^[1-2]。然而,火灾引起结构破坏也是不锈钢结构面临的重要问题。并且,由于具有良好的外观效果,不锈钢结构一般不采取任何防火措施。因此,不锈钢结构在火灾下的受力性能研究就显得尤为必要。

目前国内外学者对常温下不锈钢力学性能的研究已经较为完善^[3-14],提出了常温下不锈钢材料应力-应变曲线的多种模型^[9-11],其准确性和便捷性均较好,且相关规范^[15-19]中也给出了不锈钢材料力学性能的参数值和有关规定。然而,国内外学者对于高温下不锈钢材料力学性能研究的报道并不多,相关规范也仅有欧洲规范EN 1993-1-2^[20]和欧洲不锈钢设计手册^[21]中给出了EN 1.4003、EN 1.4301、EN 1.4318、EN 1.4401、EN 1.4404、EN 1.4462、EN 1.4571这7种不锈钢材料在高温下力学性能指标折减系数的取值。

国外学者通过对不锈钢材料进行高温下力学性能的相关试验研究提出了几种高温下不锈钢的本构模型。Chen和Young^[22]对牌号EN 1.4462和EN 1.4301的不锈钢试件进行了高温稳态、高温瞬态2种拉伸试验,并在常温Rasmussen模型的基础上提出了高温下不锈钢Rasmussen模型的表达式和关键参数折减系数的表达式,且该模型表达式简单,便于应用。Abdella^[23]基于Chen和Young的试验数据,提出了高温下不锈钢材料本构模型的显式表达式,但模型参数计算较复杂,不便于应用。Gardner等^[24]通过对牌号EN 1.4301和EN 1.4401/4不锈钢试件进行高温材性试验,在其提出的常温本构模型的基础上,提出了高温下EN 1.4301和EN 1.4401/4不锈钢材料的两阶段本构模型。该模型表达式相对复杂,但精度较高。

国内学者对不锈钢材料的力学性能研究成果较少。在高温材性方面,浙江大学陈驹等^[25]对建筑用不锈钢(EN 1.4462和EN 1.4301)进行了高温材性试验,提出了不锈钢高温下的本构模型以及不锈钢在高温下力学性能指标的计算公式,并将不锈钢、碳素钢和合金钢进行对比,认为不锈钢具有更为优越的防火性能。东南大学范圣刚等^[26]对奥氏体不锈钢S30408进行了高温下力学性能研究,得到了该材料常温和高温下的本构关系,验证了Rasmussen模型的准确性,并对相关硬化指数作出修正。

上述研究表明,国外学者对不同类型不锈钢材料高温下的力学性能已有了一定研究,而国内研究则处于起步阶段。由于不同类型不锈钢的化学成分

和热处理工艺不同,其力学性能有很大差别^[27]。TSZ410铁素体不锈钢作为一种新型不锈钢材料,合金中无镍(Ni)元素,其高温下力学性能有待通过试验进行进一步研究。本文通过稳态试验方法研究了TSZ410铁素体不锈钢(简称为TSZ410不锈钢)的高温力学性能,研究不同温度对其力学性能的影响规律,对比分析Rasmussen模型和Gardner模型,并基于Rasmussen模型,提出TSZ410不锈钢硬化指数的计算公式,建立高温本构关系。将试验结果与Q235B、其他不锈钢的高温材性试验结果进行对比,更加全面地分析TSZ410不锈钢高温下力学性能的退化规律。

1 不锈钢力学性能试验方案

1.1 试验设备

试验在同济大学工程结构抗火试验室完成,采用MTS E45.305-B型高温电子材性试验机(图1),其最大加载力为300kN,可进行力控制和位移控制加载,加载速率为 $0.001 \sim 250 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$;加热炉采用MTS 653.04型高温炉,工作温度范围为 $100 \sim 1400^\circ\text{C}$,加热炉分上、中、下3段加热,每段配备一个热电偶用于监测和调控炉温。高温试验时试件的变形测量采用接触式高温引伸计,精度为 0.001mm 。



图1 高温电子材性试验机

Fig. 1 High temperature electronic material testing machine

1.2 试件

试件由6mm厚国产TSZ410不锈钢板制成,TSZ410不锈钢不含镍(Ni),其主要化学成分与S30408不锈钢、Q235B的比较见表1。试件根据《金属材料拉伸试验第1部分:室温试验方法:GB/T228.1—2010》^[28]和《金属材料拉伸试验第2部分:

高温试验方法:GB/T 228.2—2015》^[29]的规定设计制作,采用矩形横截面,形状及尺寸如图2所示。根

据试验温度的不同,共设计了8组试件(其中包括一组常温试件),每组2个,共计16个。

表1 TSZ410 不锈钢化学成分以及与S30408、Q235B的对比

Tab. 1 Chemical composition of TSZ410 stainless steel and comparison with S30408 and Q235B

钢种	基体	牌号	质量分数/%								
			C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	N	
TSZ410	铁素体		≤0.060	≤1.000	1.000~2.000	≤0.040	≤0.015			11.000~14.000	≤0.300
S30408	奥氏体	06Cr19Ni10	0.080	1.000	2.000	0.0450	0.0300	8.000~11.000		18.000~20.000	
Q235B			0.180	0.200	0.450	0.0350	0.0360	≤0.300		≤0.300	

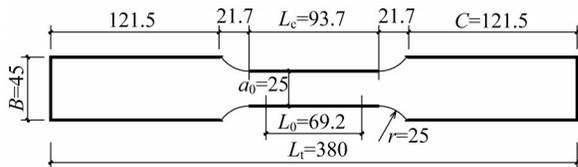


图2 试件尺寸(单位:mm)

Fig. 2 Specimen size (unit:mm)

1.3 试验方法

(1) 常温拉伸试验。按照GB/T228.1—2010,采用两阶段加载控制。第1阶段为应变速率控制,为 $2.5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$;应变达到0.05后,改为位移控制,位移速率为 $1.5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$,直至试件被拉断。第1阶段加载主要用于测量材料初始弹性模量和名义屈服强度;第2阶段主要用于测量TSZ410不锈钢材料抗拉极限强度。常温拉伸试件的编号为K-20-1(2)。

(2) 高温稳态试验。高温拉伸采用稳态试验,即恒温加载试验方法。在试验过程中先将试件升温

至指定温度,并恒温15min待试件标距段温度均匀后,再采用与常温拉伸试验相同的两阶段加载控制,拉伸试件直至试件断裂。试验温度点包括 100°C 、 200°C 、 300°C 、 400°C 、 500°C 、 600°C 、 700°C 共7种工况,每种工况包括2个试件。各工况试件编号分别为K-100-1(2)、K-200-1(2)、K-300-1(2)、K-400-1(2)、K-500-1(2)、K-600-1(2)、K-700-1(2)。升温速率控制在 $10 \sim 30^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$,加热至指定温度时,恒温15min,且在升温及恒温过程中允许试件自由膨胀。参照常温拉伸试验,采用两阶段加载控制。

2 不锈钢常温力学性能试验结果

TSZ410不锈钢在常温下的力学性能参数、应力-应变曲线试验结果见表2及图3,表2中 A_0 为断后伸长率。材料的本构关系是进行有限元分析的基础,因此,众多学者对不锈钢材料的本构关系进行了

表2 TSZ410 不锈钢常温下力学性能参数

Tab. 2 Mechanical properties of TSZ410 stainless steel at room temperature

试件编号	E_0 /MPa	$\sigma_{0.01}$ /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	$\sigma_{1.0}$ /MPa	σ_u /MPa	ϵ_u	A_0 /%
K-20-1	206 234	244.7	405.4	443.2	514.9	0.142	27.40
K-20-2	207 476	254.6	423.9	460.7	513.9	0.133	26.86
平均值	206 855	249.7	414.6	451.9	514.4	0.138	27.13

研究,并提出了数学模型。其中,最有代表性的是Rasmussen模型和Gardner模型。

Rasmussen^[10]在Ramberg-Osgood模型^[5]的基础上,提出了常温下不锈钢应力-应变本构模型,如式(1)所示:

$$\epsilon = \begin{cases} \frac{\sigma}{E_0} + 0.002 \left(\frac{\sigma}{\sigma_{0.2}} \right)^n, & \sigma \leq \sigma_{0.2} \\ \frac{\sigma - \sigma_{0.2}}{E_{0.2}} + \epsilon_u \left(\frac{\sigma - \sigma_{0.2}}{\sigma_u - \sigma_{0.2}} \right)^m, & \sigma_u > \sigma > \sigma_{0.2} \end{cases}$$

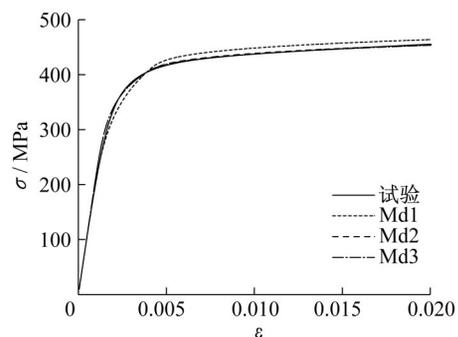


图3 TSZ410 不锈钢常温下的应力-应变曲线

Fig. 3 Stress-strain curve of TSZ410 stainless steel at room temperature

$$n = \frac{\ln 20}{\ln(\sigma_{0.2}/\sigma_{0.01})}$$

$$m = 1 + 3.5\sigma_{0.2}/\sigma_u$$

$$E_{0.2} = \frac{E_0}{1 + 0.002nE_0/\sigma_{0.2}} \quad (1)$$

式中: ϵ 和 σ 分别为材料的应变和应力; $\sigma_{0.01}$ 、 $\sigma_{0.2}$ 分别为0.01%和0.2%残余应变对应的应力; σ_u 为极限强度; ϵ_u 为 σ_u 对应的极限应变; E_0 为初始弹性模量; $E_{0.2}$ 为应力应变曲线在应力 $\sigma_{0.2}$ 处的切线模量; n 为第一段硬化指数,以考虑不锈钢材料的应变硬化,保证应力-应变曲线在 $\sigma > \sigma_{0.2}$ 段与试验数据相吻合; m 为第二段硬化指数,以改善Ramberg-Osgood模型后半段应力偏高的情况。

Gardner^[9]在式(1)的基础上进行了改进,采用参数 $\sigma_{1.0}$ 代替 σ_u ,提出了常温下不锈钢本构模型,如式(2)所示:

$$\epsilon = \begin{cases} \frac{\sigma}{E_0} + 0.002 \left(\frac{\sigma}{\sigma_{0.2}} \right)^n, & \sigma \leq \sigma_{0.2} \\ \frac{\sigma - \sigma_{0.2}}{E_{0.2}} + \left(\epsilon_{1.0} - \epsilon_{0.2} - \frac{\sigma_{1.0} - \sigma_{0.2}}{E_{0.2}} \right) \times \\ \left(\frac{\sigma - \sigma_{0.2}}{\sigma_{1.0} - \sigma_{0.2}} \right)^{n'_{0.2,1.0}} + \epsilon_{0.2}, & \sigma_{0.2} < \sigma < \sigma_u \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\sigma_{0.2}$ 和 $\sigma_{1.0}$ 为0.2%和1.0%残余应变对应的应力, $\epsilon_{0.2}$ 和 $\epsilon_{1.0}$ 分别为 $\sigma_{0.2}$ 和 $\sigma_{1.0}$ 所对应的总应变, $n'_{0.2,1.0}$ 是第二段硬化指数。

采用式(1)和式(2)对TZ410不锈钢的常温材料性能试验数据进行拟合,得到应变硬化指数如表3所示,模型曲线与试验曲线的对比如图3所示,其中“试验”曲线是根据试验结果获得的应力-应变曲线;Md1和Md2曲线分别是由式(1)和式(2)拟合的应力-应变曲线;Md3改进曲线为根据试验数据,采用麦夸特法和通用全局优化法结合1stOpt(first optimization)非线性拟合软件将式(1)中的硬化参数 n 和 m 分别修正为 n' 和 m' 而获得的应力-应变曲线。由图3可知,试验曲线与Rasmussen模型分段拟合得到的理论曲线在Ramberg-Osgood模型前半段偏低,后半段偏高,而Gardner模型和改进后的Rasmussen模型曲线与试验曲线相差较小,精度较高。

3 不锈钢高温力学性能试验结果

3.1 试验现象

高温稳态试验后各试件的破坏状况如图4所示,不同温度下试件表面颜色变化明显,具体见表4。

表3 常温材料的应变硬化指数

Tab. 3 Hardening index of mechanical properties of materials at room temperature

试件编号	n	m	n'	m'	$n'_{0.2,1.0}$
K-20-1	5.94	3.76	9.03	3.03	2.88
K-20-2	5.88	3.69	8.82	2.53	2.38
平均值	5.91	3.73	8.92	2.78	2.63

由表4和图4可知:

(1)当温度为100℃和200℃时,试件的表观特征与常温相近,无明显变化,断口处出现颈缩现象。

(2)当温度为300℃时,试件表面呈浅黄色,400℃时试件表面呈金黄色,500℃时试件表面颜色介于金黄色和紫色之间;300℃、400℃和500℃时试件断口处有颈缩现象,但没有常温下颈缩明显。

(3)当温度为600℃时,试件表面颜色为红褐色,表面逐渐开始失去光泽,断口处的颈缩现象非常明显。

(4)当温度为700℃时,试件表面为黑色,无金属光泽,试件伸长量最大、颈缩最明显。

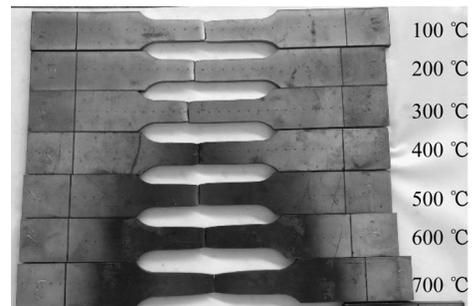


图4 TSZ410不锈钢高温拉伸试验后的试件

Fig. 4 Test pieces of TSZ410 stainless steel after elevated temperature tensile test

表4 试件破坏特征

Tab. 4 Appearance and damage characteristics of test pieces

温度/℃	试件表面颜色	断口处颈缩
20	银灰色	有
100	银灰色	有
200	略有浅黄色	有
300	浅黄色	有
400	金黄色	有
500	金黄色和紫色之间	有
600	红褐色,逐渐开始失去光泽	非常明显
700	黑色,无金属光泽	最明显

3.2 力学性能指标及其拟合计算公式

表5和表6分别给出了TSZ410不锈钢高温力学性能指标及其变化情况。表中, $E_{0,T}$ 、 $\sigma_{0.2,T}$ 、 $\sigma_{u,T}$ 、

$\epsilon_{u,T}$ 、 $A_{0,T}$ 分别为温度 T 下的初始弹性模量、名义屈服强度、抗拉强度、极限应变和断后伸长率, E_0 、 $\sigma_{0.2}$ 、 σ_u 、 ϵ_u 、 A_0 分别为常温下不锈钢的初始弹性模量、名义屈服强度、抗拉强度、极限应变和断后伸长率。分析以上试验结果,有以下规律:

(1)当温度低于400℃时,TSZ410不锈钢的初始弹性模量变化很小;当温度高于500℃时,初始弹性模量下降明显加快,700℃时,初始弹性模量仅为常温下的44%。

(2)TSZ410不锈钢的屈服强度、极限强度和极限应变随温度的变化规律相似,即呈现先慢、后快的特征。当温度低于200℃时,不锈钢的屈服强度、极限强度以及极限应变比常温下的值略微降低;当温度在200~700℃时,不锈钢的屈服强度、极限强度以

及极限应变的下降明显加快;700℃时,不锈钢的屈服强度与极限强度约为常温下的15%,极限应变约为常温下的10%。

(3)绝大部分钢材的断后伸长率(延性)是随着温度的升高而有明显的增大,但是本文试验结果表明TSZ410不锈钢的断后伸长率呈现出了不同的变化规律,其断后伸长率随温度变化呈现先减小后增大的特点。当温度低于400℃时,断后伸长率随温度的升高基本呈线性减小,400℃时约为常温下的59%;当温度高于400℃时,断后伸长率开始增大,600℃时,断后伸长率与常温下的值相当,600℃以后,断后伸长率远大于常温下的值。其原因是TSZ410不锈钢在升温的过程中会发生固态相变,引起组织、结构和性能的变化^[30]。

表5 TSZ410不锈钢高温下力学性能指标试验结果

Tab. 5 Test results of mechanical properties of TSZ410 stainless steel at elevated temperature

$T/^\circ\text{C}$	$E_{0,T}/(10^5\text{MPa})$	$\sigma_{0.2,T}/\text{MPa}$	$\sigma_{u,T}/\text{MPa}$	$\epsilon_{u,T}$	$A_{0,T}/\%$
20	2.069	414.6	514.4	0.138	27.1
100	2.057	396.7	508.3	0.140	23.1
200	2.198	400.9	502.5	0.114	18.4
300	2.085	356.8	466.0	0.113	17.4
400	2.072	313.4	398.3	0.088	16.1
500	1.931	245.0	288.5	0.082	21.6
600	1.264	149.8	160.8	0.058	28.7
700	0.916	67.7	70.3	0.022	51.4

表6 TSZ410不锈钢高温力学指标

Tab. 6 Change of mechanical parameters of TSZ410 stainless steel at elevated temperature

$T/^\circ\text{C}$	$E_{0,T}/E_0$	$\sigma_{0.2,T}/\sigma_{0.2}$	$\sigma_{u,T}/\sigma_u$
20	1.00	1.00	1.00
100	0.99	0.96	0.99
200	1.06	0.97	0.98
300	1.01	0.86	0.91
400	1.00	0.76	0.77
500	0.93	0.59	0.56
600	0.61	0.36	0.31
700	0.44	0.16	0.14

根据试验结果,利用最小二乘法进行回归分析,得到高温下TSZ410不锈钢力学性能的简化计算公式(详见式(3)~(6)),公式与试验结果的对比如图5。

$$\frac{E_{0,T}}{E_0} = \begin{cases} 1.0, 20^\circ\text{C} \leq T \leq 400^\circ\text{C} \\ 1.70 - 1.75T/1000, 400^\circ\text{C} < T \leq 700^\circ\text{C} \end{cases} \quad (3)$$

$$\frac{\sigma_{0.2,T}}{\sigma_{0.2}} = \frac{\sigma_{u,T}}{\sigma_u} = \begin{cases} 1.006 - 0.3T/1000, 20^\circ\text{C} \leq T \leq 300^\circ\text{C} \\ 1.486 - 1.9T/1000, 300^\circ\text{C} < T \leq 700^\circ\text{C} \end{cases} \quad (4)$$

$$\frac{\epsilon_{u,T}}{\epsilon_u} = \begin{cases} 1.0, 20^\circ\text{C} \leq T \leq 100^\circ\text{C} \\ 1.124 - 1.24T/1000, 100^\circ\text{C} < T \leq 700^\circ\text{C} \end{cases} \quad (5)$$

$$\frac{A_{0,T}}{A_0} = 11.04 \times \left(\frac{T}{1000}\right)^3 - 4.477 \times \left(\frac{T}{1000}\right)^2 - 1.078 \times \frac{T}{1000} + 1.023, 20^\circ\text{C} \leq T \leq 700^\circ\text{C} \quad (6)$$

3.3 应力-应变关系

图6为TSZ410不锈钢在不同温度下的应力-应变曲线,可见其在常温和高温下均无明显屈服平台。在200℃之前,TSZ410不锈钢的初始弹性模量和屈服强度几乎没有变化;超过200℃后,随着温度升高,初始弹性模量和屈服强度不断降低。

根据试验结果,本文采用Rasmussen模型^[10,22]和Gardner模型^[24]来建立TSZ410不锈钢高温下应

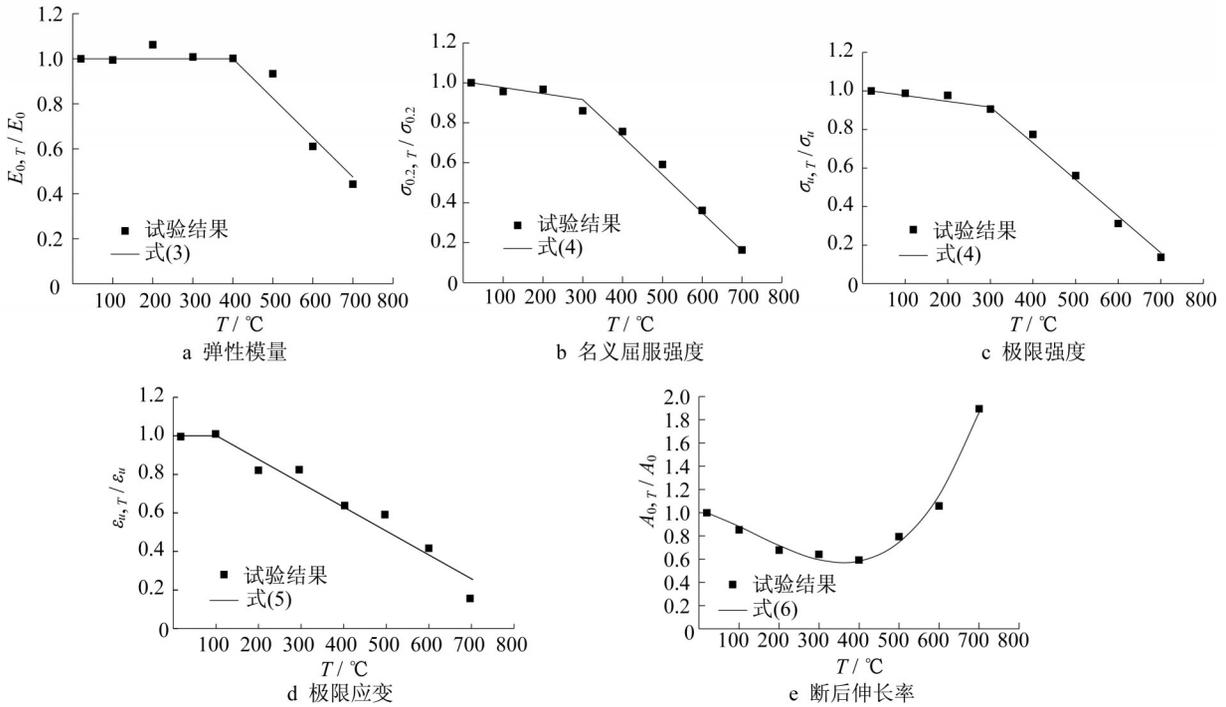


图 5 不锈钢力学参数试验结果与简化计算公式的对比

Fig. 5 Comparison of mechanical parameter test results and mathematical model of TSZ410 stainless steel

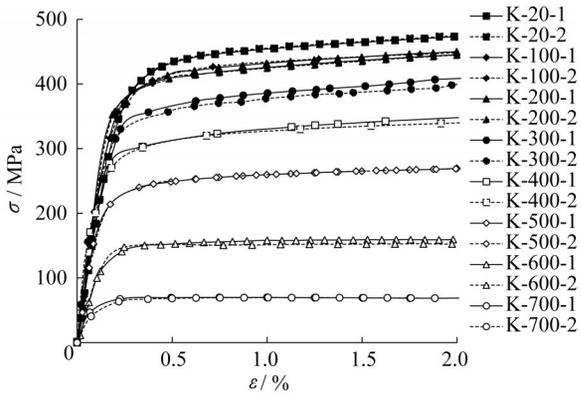


图 6 高温下 TSZ410 不锈钢的应力-应变曲线

Fig. 6 Stress-strain curve of TSZ410 stainless steel at elevated temperature

力-应变本构模型,这 2 种模型的表达式分别如式(7)和式(8)所示。对高温下试件的试验数据进行拟合,结果如图 7 所示,限于篇幅,图中仅给出了部分试件的应力-应变关系。在图 7 中每个试件对应有 3 条应力-应变曲线,其中“试验”曲线是由试验结果获得的应力-应变曲线,Md1 曲线是由式(7)获得的应力-应变曲线,Md2 曲线是由式(8)获得的应力-应变曲线,其硬化参数 n_T, m_T, n'_T 的计算结果详见表 7。

$$\epsilon = \begin{cases} \frac{\sigma}{E_T} + 0.002 \left(\frac{\sigma}{\sigma_{0.2,T}} \right)^{n_T}, & \sigma \leq \sigma_{0.2,T} \\ \frac{\sigma - \sigma_{0.2,T}}{E_{0.2,T}} + \epsilon_{u,T} \left(\frac{\sigma - \sigma_{0.2,T}}{\sigma_{u,T} - \sigma_{0.2,T}} \right)^{m_T} + \epsilon_{i0.2,T}, & \sigma_{0.2,T} < \sigma \leq \sigma_{u,T} \end{cases}$$

$$n_T = 6 + 0.2\sqrt{T}$$

$$m_T = \begin{cases} 2.3 - 0.001T & \text{EN 1.4301 奥氏体不锈钢} \\ 5.6 - 0.005T & \text{EN 1.4462 双相体不锈钢} \end{cases} \quad (7)$$

$$\epsilon = \begin{cases} \frac{\sigma}{E_T} + 0.002 \left(\frac{\sigma}{\sigma_{0.2,T}} \right)^{n_T}, & \sigma \leq \sigma_{0.2,T} \\ \frac{\sigma - \sigma_{0.2,T}}{E_{0.2,T}} + \left(0.02 - \epsilon_{i0.2,T} - \frac{\sigma_{i2.0,T} - \sigma_{0.2,T}}{E_{0.2,T}} \right) \times \left(\frac{\sigma - \sigma_{0.2,T}}{\sigma_{i2.0,T} - \sigma_{0.2,T}} \right)^{n'_T} + \epsilon_{i0.2,T}, & \sigma_{0.2,T} < \sigma \leq \sigma_{u,T} \end{cases} \quad (8)$$

式中: $\sigma_{0.2,T}$ 是温度为 T 时不锈钢材料 0.2% 残余应变对应的应力; $\sigma_{i2.0,T}$ 是温度为 T 时不锈钢材料 2% 总应变对应的应力; $\sigma_{u,T}$ 是温度为 T 时抗拉极限强度; E_T 和 $E_{0.2,T}$ 分别为温度为 T 时初始弹性模量和应力为 $\sigma_{0.2,T}$ 对应的切线模量; $\epsilon_{i0.2,T}$ 是温度为 T 时应力为 $\sigma_{0.2,T}$ 对应的总应变; $\epsilon_{u,T}$ 是温度为 T 时 $\sigma_{u,T}$ 对应的极限应变; n_T 为温度 T 时本构模型的第一段硬化指数;

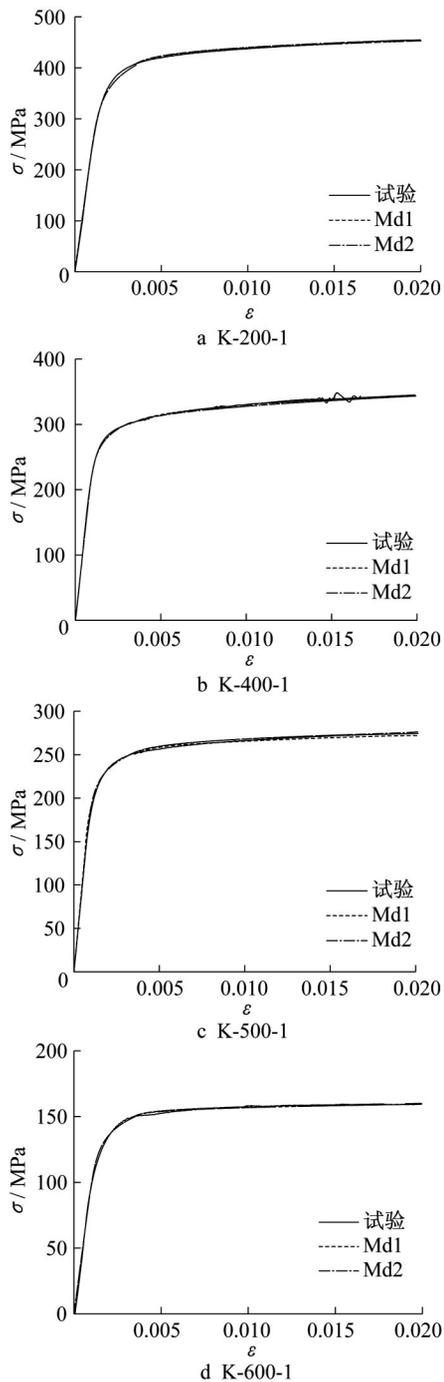


图7 高温下TSZ410不锈钢的应力-应变拟合曲线与试验结果对比

Fig. 7 Stress-strain fitting curve of TSZ410 stainless steel at elevated temperature

m_T 为温度 T 时 Rasmussen 本构模型第二段的硬化指数; n'_T 为温度 T 时 Gardner 本构模型第二段的硬化指数。

对于 EN 1.4031 奥氏体不锈钢、EN 1.4462 双相体不锈钢, Chen 和 Young 给出了硬化指数 n_T 、 m_T 的取值公式; 对于 EN 1.4031 不锈钢和 EN 1.4401/

4 不锈钢, Gardner 只给出了硬化指数 n'_T 的取值, 并建议 n_T 按 $n_T = 6 + 0.2\sqrt{T}$ 取值。分析表明, 以上硬化指数取值用于 TSZ410 不锈钢时, 不能准确地模拟 TSZ410 不锈钢的应力-应变关系, 因此本文采用麦夸特法、通用全局优化法并应用 1stOpt 非线性拟合软件得到以上硬化指数取值, 如表 7 所示。

由图 7 可以看出 Gardner 模型和 Rasmussen 模型的精度均较高, 都可以很好地用来模拟 TSZ410 不锈钢的应力-应变本构关系, 但 Rasmussen 模型更为简单, 精度也满足设计需要。因此本文采用 Rasmussen 模型来模拟 TSZ410 不锈钢的应力-应变关系。

根据表 7 中 TSZ410 不锈钢高温下力学性能的硬化指数值, 对式 (7) 中的硬化指数 n_T 、 m_T 拟合, 得到 TSZ410 不锈钢的硬化指数计算公式, 如式 (9)、式 (10) 所示:

$$n_T = -76.09 \times \left(\frac{T}{1000}\right)^3 + 50.36 \times \left(\frac{T}{1000}\right)^2 + 0.725 \times \frac{T}{1000} + 8.886, 20^\circ\text{C} \leq T \leq 700^\circ\text{C} \quad (9)$$

$$m_T = \begin{cases} 2.77, & 20^\circ\text{C} \leq T \leq 400^\circ\text{C} \\ 175 \times \left(\frac{T}{1000}\right)^3 - 302.5 \times \left(\frac{T}{1000}\right)^2 + 170 \times \frac{T}{1000} - 28.03, & 400^\circ\text{C} < T \leq 700^\circ\text{C} \end{cases} \quad (10)$$

根据式 (3)~(10), 可得到任意温度下采用 Rasmussen 模型建立的 TSZ410 不锈钢的应力-应变曲线, 以便用于结构数值模拟分析。

4 TSZ410 不锈钢与其他钢材的高温力学性能比较

图 8 给出了 TSZ410 不锈钢、S30408 奥氏体不锈钢^[26]、EN 1.4003^[20] (铁素体的一种)、普通结构钢 Q235B^[31] 的高温下力学性能参数变化情况, 以更加全面地分析 TSZ410 不锈钢高温下的力学性能。由图 8 可知:

(1) 高温下初始弹性模量。当温度低于 500°C 时, 高温下 TSZ410 不锈钢的初始弹性模量变化系数明显大于 Q235B、S30408 奥氏体不锈钢和 EN 1.4003 不锈钢; 当温度为 500°C 时, TSZ410 不锈钢的初始弹性模量变化系数与 Q235B、S30408 奥氏体不锈钢和 EN 1.4003 不锈钢分别相差 20%、15%

表 7 稳态试验材料力学性能的硬化参数

Tab. 7 Hardening parameters of mechanical properties of materials in steady state test

试件编号	温度/°C	一般取值	本文 Rasmussen 模型取值		本文 Gardner 模型取值	
		n_T	n_T	m_T	n_T	n'_T
K-100-1	100	8.00	9.28	2.82	9.28	2.66
K-100-2	100	8.00	8.84	2.56	8.84	2.10
K-200-1	200	8.83	10.34	2.75	10.34	2.84
K-200-2	200	8.83	10.96	2.40	10.96	2.39
K-300-1	300	9.46	11.32	2.61	11.32	2.54
K-300-2	300	9.46	11.66	2.78	11.66	2.89
K-400-1	400	10.00	12.90	2.45	12.90	2.17
K-400-2	400	10.00	12.65	3.00	12.65	2.98
K-500-1	500	10.47	12.68	3.04	12.68	3.60
K-500-2	500	10.47	10.68	3.30	10.68	3.71
K-600-1	600	10.90	11.52	3.19	11.52	3.54
K-600-2	600	10.90	11.26	2.42	11.26	2.76
K-700-1	700	11.29	8.36	2.54	8.36	2.50
K-700-2	700	11.29	7.44	2.85	7.44	2.95

和 20%；当温度高于 500°C 时，TSZ410 不锈钢的初始弹性模量变化系数显著大于 Q235B、低于 EN 1.4003 不锈钢，与 S30408 奥氏体不锈钢相近；当温度为 700°C 时，TSZ410 不锈钢的初始弹性模量变化系数与 Q235B 和 EN 1.4003 不锈钢分别相差 20% 和 30%。

(2) 高温下屈服强度。总体上，TSZ410 不锈钢的屈服强度变化规律与 EN 1.4003 不锈钢、Q235B 类似，但是前者强度下降幅度大于后二者，特别是在 200~500°C 温度段。当温度低于 500°C 时，TSZ410 不锈钢的屈服强度损失显著小于 S30408 奥氏体不锈钢，在 200°C 时，屈服强度损失相差最大，达 25%；当温度高于 500°C 后，TSZ410 不锈钢的屈服强度损失大于 S30408 不锈钢。

(3) 高温下极限强度。TSZ410 不锈钢的高温下极限强度变化规律与其屈服强度基本一致，与 S30408 奥氏体不锈钢、Q235B 之间的差异性也相似，但与 EN 1.4003 不锈钢有较大的不同（EN 1.4003 不锈钢的高温极限强度变化规律不同于其屈服强度）。

5 结论

对 TSZ410 不锈钢进行了高温力学性能试验研究，建立了高温下弹性模量、名义屈服强度、抗拉强度、断后伸长率等主要力学性能指标计算公式，对比分析了 Rasmussen 模型和 Gardner 模型，并基于 Rasmussen 模型，提出了 TSZ410 不锈钢硬化指数的计算公式，建立了高温应力-应变本构关系。为进一步了解 TSZ410 不锈钢的高温力学性能，还将其与

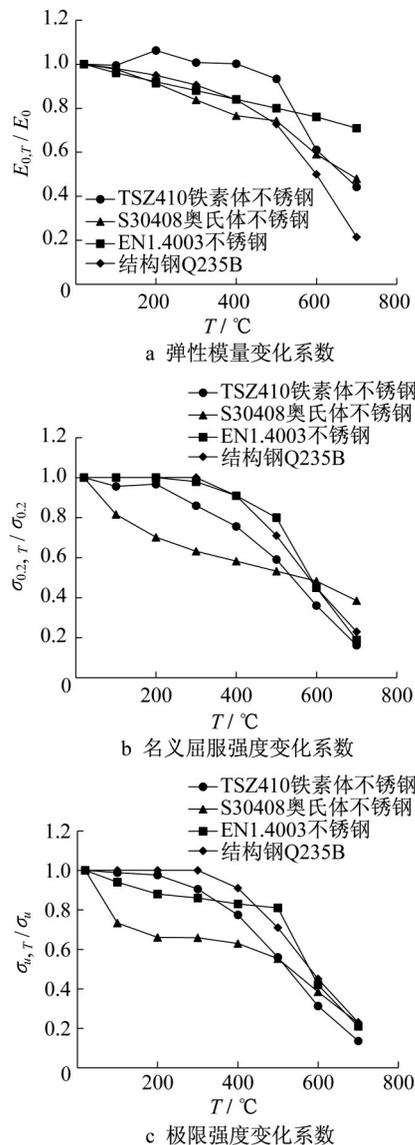


图 8 TSZ410 不锈钢与其他钢材的高温力学性能比较
Fig. 8 Comparison of mechanical properties of different steels at elevated temperature

S30408奥氏体不锈钢、EN 1.4003不锈钢、Q235B的高温力学性能进行了比较,主要结论如下:

(1)TSZ410不锈钢的名义屈服强度、抗拉强度随着温度的升高而逐渐下降,特别是在400℃~700℃温度段的下降速度最为显著;700℃时,名义屈服强度和抗拉强度降为常温下的15%左右。TSZ410不锈钢在高温下强度损失比普通结构钢大。在温度低于500℃时,TSZ410不锈钢的强度损失显著小于S30408奥氏体不锈钢;当温度高于500℃后,则相反。

(2)TSZ410不锈钢的初始弹性模量在温度低于400℃时变化很小;在温度超过500℃后,初始弹性模量下降明显加快,700℃时,初始弹性模量约为常温下的40%。TSZ410不锈钢在高温下的刚度损失远小于普通结构钢。另外,温度对TSZ410不锈钢、S30408奥氏体不锈钢、EN 1.4003不锈钢这3种不锈钢初始弹性模量的影响有较大的不同。

(3)TSZ410不锈钢断后伸长率随温度变化呈现先减小后增大的特点。当温度低于400℃时,断后伸长率随温度的升高基本呈直线减小,400℃时,断后伸长率约为常温下的59%;当温度高于400℃时,断后伸长率开始增大,600℃时,断后伸长率与常温下的值相当,600℃以后,断后伸长率远大于常温下的值。

(4)基于Rasmussen模型和Gardner模型,建立了TSZ410不锈钢高温下的应力-应变本构关系,并与试验曲线进行对比分析。结果表明,这2个模型均具有很好的精度,但Rasmussen模型更为简洁,因此,基于该模型进一步提出了TSZ410不锈钢硬化指数的计算公式,以便于工程应用。

作者贡献申明:

楼国彪:课题负责人,提出了研究方案,设计了论文的框架,负责论文审定。

陶宇超:试验实施,试验数据处理,试验结果分析和解释,撰写论文初稿和终稿。

陈武龙:试验实施,试验结果初步处理,并参与了论文初稿的撰写。

谭永强:协助制定研究方案,负责试件制作。

王美南:协助制定研究方案,试件制作实施,提出论文修改意见和建议。

姜健:协助制定研究方案,提出论文修改意见和建议。

参考文献:

- [1] BURGAN B A, BADDOO N R, GILSENAN K A. Structural design of stainless steel members — comparison between Eurocode 3, Part 1.4 and test results [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2000, 54(1):51.
- [2] 王元清,袁焕鑫,石永久,等. 不锈钢结构的应用和研究现状 [J]. *钢结构*, 2010, 25(2):1.
WANG Yuanqing, YUAN Huanxin, SHI Yongjiu, *et al.* A review of current applications and research of stainless steel structure [J]. *Steel Structure*, 2010, 25 (2): 1.
- [3] HOLMQUIST J L, NADAI A. A theoretical and experimental approach to the problem of collapse of deep-well casing [C]//*Drilling and Production Practice*. New York: American Petroleum Institute, 1939:392-420.
- [4] ATCHISON C S, MILLER J A. Tensile and pack compressive tests of some sheets of aluminum alloy, 1025 carbon steel, and chromium-nickel steel [J]. *Technical Note*, 1942(840): 1.
- [5] RAMBERG W, OSGOOD W R. Description of stress-strain curves by three parameters[J]. *Technical Note*, 1943(902): 1.
- [6] HILL H N. Determination of stress-strain relations from "offset" yield strength values[J]. *Pediatrics*, 1944, 6(1):93.
- [7] MACDONALD M, RHODES J, TAYLOR G T. Mechanical properties of stainless steel lipped channels[C]//*Proceedings of 15th International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures*. St. Louis: University of Missouri--Rolla, 2000: 673-686.
- [8] OLSSON A. Stainless steel plasticity: material modelling and structural applications[D]. Luleå: Luleå Tekniska Universitet, 2001.
- [9] GARDNER L. A new approach to stainless steel structural design[J]. *Structural Engineer*, 2002, 82(21):21.
- [10] RASMUSSEN K J R. Full-range stress - strain curves for stainless steel alloys [J]. *Journal of constructional steel research*, 2003, 59(1): 47.
- [11] QUACH W M, TENG J G, CHUNG K F. Three-stage full-range stress-strain model for stainless steels [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2008, 134(9): 1518.
- [12] 郑宝锋,舒赣平,沈晓明. 不锈钢材料常温力学性能试验研究 [J]. *钢结构*, 2011, 26(5): 1.
ZHENG Baofeng, SHU Ganping, SHEN Xiaoming. Experimental study on material properties of stainless steel at room temperature [J]. *Steel structure*, 2011, 26 (5): 1.
- [13] 朱浩川,姚谏. 不锈钢材料的应力-应变模型[J]. *空间结构*, 2011, 17(1): 62.
ZHU Haochuan, YAO Jian. Stress-strain model for stainless steel [J]. *Spatial structure*, 2011, 17 (1): 62.
- [14] 王元清,常婷,石永久,等. 奥氏体不锈钢S31608的本构关系试验[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2013,53(9):1231.
WANG Yuanqing, CHANG Ting, SHI Yongjiu, *et al.* Experimental study of the stress-strain relation of austenitic

- stainless steel S31608 [J]. Journal of Tsinghua University (Natural Science Edition), 2013, 53 (9): 1231.
- [15] European Committee for Standardization. EN 1993-1-4 Eurocode 3-Design of steel structures-Part 1-4:General rules—Supplementary rules for stainless steels[S]. Brussels: European Committee for Standardization, 2006.
- [16] American Society of Civil Engineers. Specification for the design of cold-formed stainless steel structural members:SEI / ASCE 8-02 (Standard No. 02-008) [S]. Reston: ASCE Press, 2002.
- [17] Joint Standards Australian/ Standards New Zealand Committee. Cold-formed stainless-steel structures[S]. Sydney & Wellington: Standards Australia International Ltd & Standards New Zealand, 2001.
- [18] Stainless Steel Building Association of Japan. Design and construction standards of stainless-steel buildings [S]. Tokyo: Japanese Standards Association Press, 1995.
- [19] 中国工程建设标准化协会. 不锈钢结构技术规程:CECS 410—2015[S].北京:中国计划出版社, 2015.
- China Engineering Construction Standardization Association. Technical specification for stainless steel structures:CECS 410—2015[S]. Beijing: China Planning Press, 2015.
- [20] European Committee for Standardization. EN 1993-1-2 Eurocode 3-Design of steel structures-Part 1-2:General rules—structural fire design [S]. Brussels: European Committee for Standardization, 2005.
- [21] Euro Inox/SCI . Design manual for structural stainless steel [S]. 3rd ed. Building series; Euro Inox and the Steel Construction Institute, 2006.
- [22] CHEN J, YOUNG B. Stress - strain curves for stainless steel at elevated temperatures[J]. Engineering Structures, 2006, 28 (2): 229.
- [23] ABDELLA K. Explicit full-range stress - strain relations for stainless steel at high temperatures [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2009, 65(4): 794.
- [24] GARDNER L, INSAUSTI A, NG K T, *et al.* Elevated temperature material properties of stainless-steel alloys [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2010, 66(5): 634.
- [25] 陈驹, 金伟良, 杨立伟, 等. 建筑用不锈钢的抗火性能[J]. 浙江大学学报(工学版), 2008, 42(11):1983.
- CHEN Ju, JIN Weiliang, YANG Liwei, *et al.* Behaviour of constructional stainless steel at elevated temperatures [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science Edition), 2008, 42 (11): 1983.
- [26] 范圣刚, 郑家理, 孙文隽, 等. S30408奥氏体不锈钢高温力学性能试验研究[J]. 工程力学, 2017, 34(4):167.
- FAN Shenggang, ZHENG Jiazhen, SUN Wenjun, *et al.* Experimental investigation on mechanical properties of S30408 austenitic stainless steel at elevated temperatures [J]. Engineering Mechanics, 2017, 34 (4): 167.
- [27] 贾凤翔, 侯若明, 贾晓滨. 不锈钢性能及选用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2013.
- JIA Fengxiang, HOU Ruoming, JIA Xiaobin. Properties and selection of stainless steel [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2013.
- [28] 中国国家标准化管理委员会. 金属材料拉伸试验第1部分:室温试验方法: GB/T228.1—2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
- Standardization Administration of the People's Republic of China. Metallic materials —Tensile testing—Part 1: Method of test at room temperature: GB / T228.1—2010 [S]. Beijing: China Standard Press, 2010.
- [29] 中国国家标准化管理委员会. 金属材料拉伸试验第2部分:高温试验方法: GB/T 228.2—2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
- Standardization Administration of the People's Republic of China. Metallic materials —Tensile testing—Part 2: Method of test at elevated temperature : GB / T228.2—2015 [S]. Beijing: China Standard Press, 2015.
- [30] 朱学仪. 钢材热处理手册[M]. 北京:中国标准出版社, 2007.
- Zhu Xueyi. Steel heat treatment manual [M]. Beijing: China Standard Press, 2007.
- [31] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑钢结构防火技术规范: GB 51249—2017[S]. 北京:中国计划出版社.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for fire safety of steel structures in buildings: GB 51249—2017 [S]. Beijing: China Planning Press, 2017.