

S32001 双相型不锈钢高温力学性能试验

楼国彪^{1,2}, 杨 未¹, 陈武龙¹, 陶宇超¹, 王美南³

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 同济大学 土木工程防灾国家实验室, 上海 200092; 3. 远大可建科技有限公司, 湖南 长沙 430121)

摘要: 对 S32001 双相型不锈钢进行了高温稳态拉伸试验研究, 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及其变化规律; 利用试验数据研究了 Rasmussen 模型和 Gardner 模型的适用性, 并基于 Rasmussen 模型提出了 S32001 不锈钢硬化指数的计算公式, 建立了高温下不锈钢材料本构关系表达式; 对比分析了 S32001 不锈钢与其他种类不锈钢及 Q235B 结构钢的高温力学性能。研究表明, S32001 不锈钢的屈服强度和极限强度随温度升高下降, 600 °C 时低于常温时的 50 %, 但高温下材料强度明显高于 S30408 不锈钢, 具有更加优越的抗火性能。该研究结果可用于结构受火性能研究和抗火设计。

关键词: 双相型不锈钢; 力学性能; 本构关系; 高温

中图分类号: TU511.3

文献标志码: A

Experimental Investigation on Mechanical Properties of S32001 Duplex Stainless Steel at Elevated Temperatures

LOU Guobiao^{1,2}, YANG Wei¹, CHEN Wulong¹, TAO Yuchao¹, WANG Meinan³

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. State Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Broad Sustainable Building, Changsha 430121, Hunan, China)

Abstract: In this paper, a high-temperature steady-state tensile test study of S32001 duplex stainless steel was conducted, and the main mechanical property indexes such as initial modulus of elasticity, nominal yield strength, tensile strength and elongation after fracture, etc. at elevated temperatures were obtained. The applicability of the Rasmussen model and the Gardner model was studied using the test data. Based on the Rasmussen model, the calculation

formula of the hardening index of S32001 stainless steel was proposed, and the constitutive relation expression at elevated temperatures was established, while the mechanical properties of S32001 stainless steel at elevated temperatures were compared and analyzed with other types of stainless steel and Q235B structural steel. The study shows that the yield strength and ultimate strength of S32001 stainless steel decreases with the increase of temperature, which is lower than 50 % at room temperature at 600 °C, but the material strength at elevated temperatures is significantly higher than that of S30408 stainless steel, which has more superior fire resistance properties. The results of this paper can be used in the study of structural fire performance and fire resistance design.

Key words: duplex stainless steel; mechanical properties; constitutive relation; high temperature

不锈钢作为建筑材料, 造型美观、耐腐蚀性好、全生命周期成本低、符合可持续发展要求, 且相较于普通碳素钢具有更优良的耐高温性能, 在建筑结构中应用前景广阔^[1-3]。现今结构用不锈钢主要是 S304 系列、S316 系列, 其常温下屈服强度约为 260 MPa^[4], 镍、铬含量高, 价格昂贵。新研发的 S32001 不锈钢作为双相型(奥氏体-铁素体)不锈钢, 既有和奥氏体型不锈钢相当的耐腐蚀性能, 又有更高的强度和良好的耐磨性能^[4-5], 其常温下屈服强度约为 490 MPa, 比 S304 系列、S316 系列提高约 90 %; 同时镍元素含量大幅降低, 使 S32001 不锈钢具有更好的经济性, 作为结构钢使用优势显著。

由于建筑火灾频发, 为保证火灾下结构的安全性, 需要研究不锈钢高温下的力学性能及结构抗火性能。目前国内外对钢材的高温性能研究主要集中

收稿日期: 2021-06-10

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、组合结构。

E-mail: gblou@tongji.edu.cn

通信作者: 陈武龙(1985—), 男, 工程师, 主要研究方向为结构抗火试验。E-mail: chenwulong@tongji.edu.cn



论文
拓展
介绍

于普通钢和高强钢^[6-7],并已提出较完整的高温下钢材力学性能指标和应力-应变关系模型。不锈钢本构关系与普通碳素钢不同^[8],具有典型非线性特征,无明显屈服平台(取残余应变为 0.2 % 处应力为屈服强度),应变硬化显著且延性高,二者的高温力学性能有较大差异。国内外学者对不锈钢材料常温下力学性能已进行较为完善的研究^[9-15],提出多种准确性较高的本构关系模型^[11-13],并在规范中作了规定。而不锈钢材料的高温下力学性能,仅欧洲规范 EN 1993-1-2^[16]和欧洲不锈钢设计手册^[17]给出了铁素体不锈钢 EN 1. 4003,奥氏体不锈钢 EN 1. 4301、EN 1. 4318、EN 1. 4401/4、EN 1. 4571 以及双相不锈钢 EN 1. 4462 的建议取值。国内外学者对不锈钢材料进行的高温下力学性能试验研究则主要集中在奥氏体和铁素体不锈钢^[18-25]。

Chen 和 Young^[19]在常温 Rasmussen 模型^[12]的基础上,针对 EN 1. 4462 级双相不锈钢和 EN 1. 4301 级奥氏体不锈钢提出高温应力-应变模型。Abdella^[20,22]基于 Chen 和 Young 的试验数据,提出不锈钢高温二段式应力应变关系的显函数形式,并 Quach 模型^[13]提出了不锈钢高温三段式应力应变关系的显函数形式,但参数计算均较为复杂,应用不便。Gardner^[11,21]在其提出的不锈钢常温本构模型的基础上,针对 EN 1. 4301 级和 EN 1. 4401/4 级奥氏体不锈钢,提出高温下两阶段本构模型。国内对不锈钢材料的高温力学性能研究主要有:浙江大学陈驹^[23]对 EN 1. 4462 级双相不锈钢和 EN 1. 4301 级奥氏体不锈钢、东南大学范圣刚^[24]对 S30408 奥氏体不锈钢以及同济大学楼国彪^[25]对 TSZ410 铁素体不锈钢进行的高温力学性能试验,利用试验结果建立高温应力-应变本构关系并给出高温下力学性能指标的折减规律。

本文将通过稳态拉伸试验方法对 S32001 双相型不锈钢高温下力学性能展开研究,得到高温下力学性能参数及其变化规律,通过数值拟合对比分析 Rasmussen 模型和 Gardner 模型,并基于 Rasmussen 模型提出 S32001 不锈钢硬化指数的计算公式,建立高温下不锈钢材料本构关系表达式。最后将试验结果与同为双相型不锈钢的 EN 1. 4462、结构钢 Q235B 及其他不锈钢的高温材性试验结果进行对比。

1 高温力学性能试验方案

1.1 试验设备

S32001 不锈钢材料高温力学性能试验在同济大学工程结构抗火试验室完成,采用 MTS E45. 305 型高温电子材料试验机(图 1),其最大加载力为 300 kN,加载速率区间为 $0.001 \sim 250 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$;加热炉采用 MTS 653.04 型高温炉,工作温度范围为 $100 \text{ }^{\circ}\text{C} \sim 1\,400 \text{ }^{\circ}\text{C}$,分上、中、下三段加热,每段配备一个热电偶用于监测和调控炉温。试验测量设备包括位移传感器、力传感器、50 mm 标距接触式高温引伸计(0.001 mm 精度)、K 型热电偶。



图 1 高温电子材料试验机

Fig. 1 High temperature electronic material testing machine

1.2 试验试件

试件取自 6 mm 厚国产 S32001 不锈钢板,材料镍(Ni)元素含量仅为 1 % ~ 3 %,经济性好。其主要化学成分与 EN 1. 4462、TSZ410、S30408 不锈钢和 Q235B 的比较见表 1。

常温和高温下材料拉伸试验的试件尺寸分别根据 GB/T228. 1—2010《金属材料拉伸试验:第 1 部分:室温试验方法》^[26]、GB/T 228. 2—2015《金属材料拉伸试验:第 2 部分:高温试验方法》^[27]的规定设计制作,采用矩形横截面。根据试验温度的不同,共设计 10 组试件(其中包括一组常温试件),每组 3 个,共计 30 个,常温及高温试验的试件编号及相关尺寸详见表 2。

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 阶段根据引伸计测试结果,按应变速率控制,为 $2.5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$;应变达到 0.05 后,取下引伸计,改为试验机横梁位移控制,位移速率为 $1.5 \text{ mm} \cdot$

表 1 S32001 不锈钢化学成分与其他钢种对比

Tab.1 Comparison of chemical composition of S32001 stainless steel and other steels

钢种	基体	质量分数/%							
		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	N
S32001	双相	≤0.030	≤1.00	4.00~6.00	0.040	0.002	1.00~3.00	19.50~21.50	0.050~0.070
EN1.4462	双相	0.018	0.54	1.57	0.022	0.001	5.71	22.44	0.175
TSZ410	铁素体	≤0.060	≤1.00	1.00~2.00	≤0.040	≤0.015		11.00~14.00	≤0.300
S30408	奥氏体	0.080	1.00	2.00	0.045	0.030	8.00~11.00	18.00~20.00	
Q235B		0.180	0.20	0.45	0.035	0.036	≤0.30	≤0.30	

min⁻¹(等同于应变速率 2.7×10⁻⁴ s⁻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 S32001 不锈钢材料抗拉极限强度和变形。

(2)高温稳态拉伸试验

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 30 min

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℃、200℃、300℃、400℃、500℃、600℃、700℃、800℃、900℃共 9 种工况,每种工况包括 3 个试件。升温速率控制在 10℃·min⁻¹~30℃·min⁻¹,且在升温及恒温过程中允许试件自由膨胀。参经常温拉伸试验,采用两阶段加载控制。

表 2 试验试件编号与尺寸

Tab. 2 Designations and dimensions of specimens

温度工况 T/℃	试件编号	试件宽度 b/mm	试件厚度 t/mm	温度工况 T/℃	试件编号	试件宽度 b/mm	试件厚度 t/mm
8	P-1	24.95	5.97	500	K5-1	24.98	5.96
	P-2	24.95	5.96		K5-2	24.99	5.95
	P-3	24.96	5.95		K5-3	24.98	5.94
100	K1-1	24.87	6.02	600	K6-1	24.99	5.94
	K1-2	24.88	5.94		K6-2	24.97	5.93
	K1-3	24.91	5.92		K6-3	24.92	5.94
200	K2-1	24.97	5.95	700	K7-1	24.97	5.96
	K2-2	24.92	5.95		K7-2	24.95	5.96
	K2-3	24.93	5.96		K7-3	24.91	5.93
300	K3-1	24.93	5.98	800	K8-1	24.97	5.95
	K3-2	24.94	5.96		K8-2	24.94	5.98
	K3-3	24.92	5.95		K8-3	24.94	5.93
400	K4-1	24.96	5.94	900	K9-1	25.00	5.95
	K4-2	24.95	5.96		K9-2	24.99	5.97
	K4-3	24.91	5.92		K9-3	24.93	5.94

注: P-1、P-2 和 P-3 为常温试验试件编号。

2 常温力学性能试验结果

2.1 常温力学性能参数

根据 Gardner^[11]提出的不锈钢材料力学性能试验结果处理方法,得到 S32001 不锈钢在常温下的力

学性能参数(表 3)及应力-应变曲线试验结果(图 2)。表 3 中, E_0 表示初始弹性模量; A_0 表示断后伸长率; $\sigma_{0.01}$ 、 $\sigma_{0.2}$ 及 $\sigma_{1.0}$ 分别表示残余应变为 0.01%、0.2%和 1.0%时对应的应力,其中 $\sigma_{0.2}$ 为名义屈服强度; σ_u 表示极限强度, ϵ_u 为 σ_u 对应的极限应变。

表 3 S32001 不锈钢常温下力学性能参数

Tab. 3 Mechanical properties of S32001 stainless steel at room temperature

试验温度工况 T/℃	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 /%
8	P-1	204 327	283.1	488.8	543.1	744.7	0.487	53.30
	P-2	192 150	299.3	501.6	563.2	749.2	0.464	48.77
	P-3	191 003	287.3	485.6	542.6	747.9	0.493	49.91
平均值		195 827	289.9	492.0	549.6	747.3	0.481	50.66

2.2 常温应力-应变关系

采用Rasmussen^[12]和Gardner^[11]推荐的常温下不锈钢材料本构模型对试验数据进行拟合,得应变硬化指数如表4所示,模型曲线与试验曲线对比见图2。Rasmussen^[12]基于Ramberg-Osgood模型^[9]提出的常温不锈钢应力-应变曲线(σ - ϵ)公式,如式(1)所示:

$$\epsilon = \begin{cases} \frac{\sigma}{E_0} + 0.002 \left(\frac{\sigma}{\sigma_{0.2}} \right)^n, & \sigma \leq \sigma_{0.2} \\ \frac{\sigma - \sigma_{0.2}}{E_{0.2}} + \epsilon_u \left(\frac{\sigma - \sigma_{0.2}}{\sigma_u - \sigma_{0.2}} \right)^m + \epsilon_{0.2}, & \sigma_{0.2} < \sigma < \sigma_u \end{cases} \quad (1a)$$

$$n = \frac{\ln 20}{\ln(\sigma_{0.2}/\sigma_{0.01})} \quad (1b)$$

$$m = 1 + 3.5\sigma_{0.2}/\sigma_u \quad (1c)$$

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

式中: n 为第一段硬化指数,用以考虑不锈钢材料的应变硬化; 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; $E_{0.2}$ 表示应力 $\sigma_{0.2}$ 处的切线模量。

Gardner^[11]采用参数 $\sigma_{1.0}$ 代替 σ_u 为控制点,提出的常温不锈钢本构模型如式(2)所示:

$$\epsilon = \begin{cases} \frac{\sigma}{E_0} + 0.002 \left(\frac{\sigma}{\sigma_{0.2}} \right)^n, & \sigma \leq \sigma_{0.2} \\ \frac{\sigma - \sigma_{0.2}}{E_{0.2}} + \left(\epsilon_{t1.0} - \epsilon_{t0.2} - \frac{\sigma_{1.0} - \sigma_{0.2}}{E_{0.2}} \right) \cdot \left(\frac{\sigma - \sigma_{0.2}}{\sigma_{1.0} - \sigma_{0.2}} \right)^{n'_{0.2,1.0}} + \epsilon_{t0.2}, & \sigma_{0.2} < \sigma < \sigma_u \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\epsilon_{t0.2}$ 和 $\epsilon_{t1.0}$ 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。

表4 常温下S32001不锈钢的应变硬化指数

Tab. 4 Hardening index of mechanical properties of S32001 stainless steel at room temperature

试件编号	n	m	n'	m'	$n'_{0.2,1.0}$
P-1	5.48	3.30	7.74	2.89	2.79
P-2	5.80	3.34	7.85	3.24	3.09
P-3	5.71	3.27	7.51	2.96	2.84
平均值	5.67	3.30	7.70	3.03	2.91

图2包括4条曲线,其中试验曲线是由试验数据获得的应力-应变曲线;Md1是由式(1)拟合的应力-应变曲线;Md3是在式(1)基础上修正硬化参数 n 、 m 为 n' 、 m' 获得的改进曲线;由于Gardner模型未给出硬化指数参考取值,Md2是由式(2)结合1stOpt(first optimization)

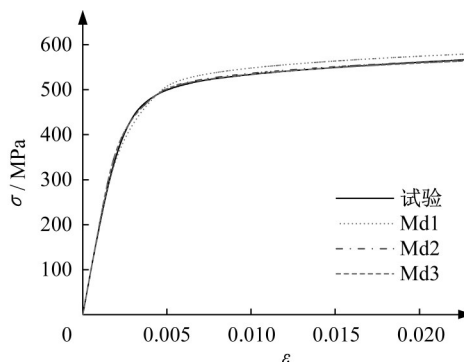


图2 S32001不锈钢常温下的应力-应变曲线

Fig. 2 Stress-strain curve of S32001 stainless steel at room temperature

非线性拟合软件拟合出 n' 、 $n'_{0.2,1.0}$ 后获得的应力-应变曲线。改进前的Rasmussen模型(Md1曲线)与试验结果相比曲线后半段明显偏高,Gardner模型(Md2曲线)和改进后的Rasmussen模型(Md3曲线)拟合结果与试验十分贴近,具有较高精度。

3 高温力学性能试验结果

3.1 试验现象

高温拉伸试件的破坏现象、特征如图3、表5所示,不同温度下试件断口处均出现颈缩现象,但表面颜色变化明显;试验温度越高,试件断口处的颈缩现象越明显,且试件拉伸到断裂有较长的塑性强化区,表明S32001不锈钢材料在高温下仍具有良好的延性。800℃、900℃温度下的试件断裂后伸长明显,其中900℃的试件除断口处颈缩外,甚至出现另一处颈缩。

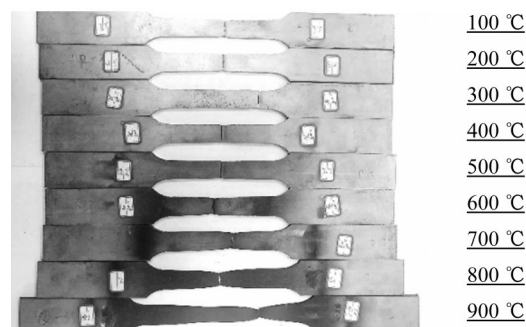


图3 S32001不锈钢高温拉伸试验试件

Fig. 3 Specimens of S32001 stainless steel after tensile test at elevated temperature

3.2 高温下力学性能参数及其拟合公式

S32001不锈钢在高温下的力学性能指标及变化情况如表6所示。其中, $E_{0,T}$ 、 $\sigma_{0.2,T}$ 、 σ_u 、 T 、 ϵ_u 、 T 和 $A_{0,T}$ 分别为温度 T 下的初始弹性模量、名义屈服强度、抗

表 5 试件破坏特征

Tab. 5 Appearance and damage characteristics of specimens

温度 $T/^{\circ}\text{C}$	试件表面颜色	断口处颈缩
100	银灰色	有
200	略有浅黄色	有
300	浅黄色	有
400	金黄色	有
500	棕黄色	有
600	蓝紫色	有
700	褐色,开始失去金属光泽	较明显
800	深褐色,无金属光泽	非常明显
900	灰黑色,无金属光泽	非常明显

拉强度、极限应变和断后伸长率; α_* 代表 T 温度工况下指标与常温下对应指标的比值,用 $\alpha_{E_0}=E_{0,T}/E_0$ 、 $\alpha_{\sigma_{0.2}}=\sigma_{0.2,T}/\sigma_{0.2}$ 、 $\alpha_{\sigma_u}=\sigma_{u,T}/\sigma_u$ 、 $\alpha_{\epsilon_u}=\epsilon_{u,T}/\epsilon_u$ 及 $\alpha_{A_0}=A_{0,T}/A_0$ 表示;表中各项指标取该温度工况下三个试

件的试验结果平均值。经分析得如下规律:

(1) S32001 不锈钢的初始弹性模量,在温度低于 $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时变化很小,在高于 $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,下降明显加快, $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时仅为常温时的 25% 。

(2) S32001 不锈钢的屈服强度与极限强度随温度下降的变化规律类似,呈现先快、后慢、再快的特征; $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时屈服强度与极限强度均小于常温时的 50% 。

(3) 与大部分钢材断后伸长率(延性)随温度升高而增大的规律不同,试验表明 S32001 不锈钢的断后伸长率随温度升高呈先减小后增大的特点。当低于 $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,断后伸长率随温度升高基本线性减小, $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时为常温下的 43% ;当高于 $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,断后伸长率开始增大, $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时增长至大约常温下的值。

表 6 S32001 不锈钢高温下力学性能试验结果

Tab. 6 Test results of mechanical properties of S32001 stainless steel at elevated temperatures

$T/^{\circ}\text{C}$	$E_{0,T}/\times 10^5\text{MPa}$	α_{E_0}	$\sigma_{0.2,T}/\text{MPa}$	$\alpha_{\sigma_{0.2}}$	$\sigma_{u,T}/\text{MPa}$	α_{σ_u}	$\epsilon_{u,T}$	α_{ϵ_u}	$A_{0,T}/\%$	α_{A_0}
20	1.958	1.00	492.0	1.00	747.3	1.00	0.481	1.00	51.00	1.00
100	2.098	1.07	402.2	0.82	594.3	0.80	0.281	0.58	37.20	0.73
200	1.964	1.00	348.7	0.71	548.0	0.73	0.264	0.55	30.89	0.61
300	1.956	1.00	335.2	0.68	556.2	0.74	0.222	0.46	21.89	0.43
400	1.822	0.93	303.6	0.62	553.5	0.74	0.217	0.45	24.65	0.48
500	1.628	0.83	277.8	0.56	488.2	0.65	0.202	0.42	28.00	0.55
600	1.336	0.68	226.8	0.46	333.2	0.45	0.162	0.34	29.69	0.58
700	1.144	0.58	143.9	0.29	208.0	0.28	0.180	0.37	36.37	0.71
800	0.871	0.44	82.4	0.17	112.9	0.15	0.134	0.28	48.73	0.96
900	0.489	0.25	45.0	0.09	57.6	0.08	0.126	0.26	50.59	0.99

通过最小二乘法对高温试验数据进行回归分析,提出 S32001 不锈钢弹性模量、屈服强度、极限强度、极限应变和断后伸长率在高温下的简化计算公式,温度范围为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 900\text{ }^{\circ}\text{C}$,均采用如下表达形式:

$$\alpha_*=a+b\left(\frac{T}{1\,000}\right)\tag{3}$$

公式系数 a 、 b 取值如表 7 所示。各力学性能指标的公式计算值和试验结果的对比见图 4。

3.3 高温下应力-应变关系

试验得到的各温度下 S32001 不锈钢在不同温度下的应力-应变曲线如图 5 所示,高温下无明显屈服平台,当试验温度达 $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上时,不锈钢的应力-应变曲线会出现应力波动。材料延性随温度升高先降低后升高,其原因可能是 S32001 不锈钢在升温过程中组织、结构和性能发生变化^[28],拉伸时因此产生的局部强化。

用 Chen 和 Young 基于 Rasmussen 模型^[12,19] 和

表 7 力学性能指标公式系数表

Tab. 7 Coefficients of mechanical properties formula

α_*	$T/^{\circ}\text{C}$	a	b
α_{E_0}	8~400	1.000	0
	400~900	1.600	-1.50
$\alpha_{\sigma_{0.2}}$	8~200	1.034	-1.70
	200~500	0.774	-0.40
	500~900	1.224	-1.30
	8~100	1.020	-2.55
α_{σ_u}	100~400	0.750	0
	400~900	1.310	-1.40
	8~100	1.100	-5.20
α_{ϵ_u}	100~900	0.623	-0.40
	8~300	1.044	-2.20
α_{A_0}	300~900	0.084	1.00

Gardner^[21] 提出的高温下不锈钢材料本构模型(以下简称 Rasmussen 模型和 Gardner 模型)对试验数据进行拟合,建立 S32001 不锈钢高温下应力-应变本构模型,两种模型表达式分别为式(4)和式(5)。

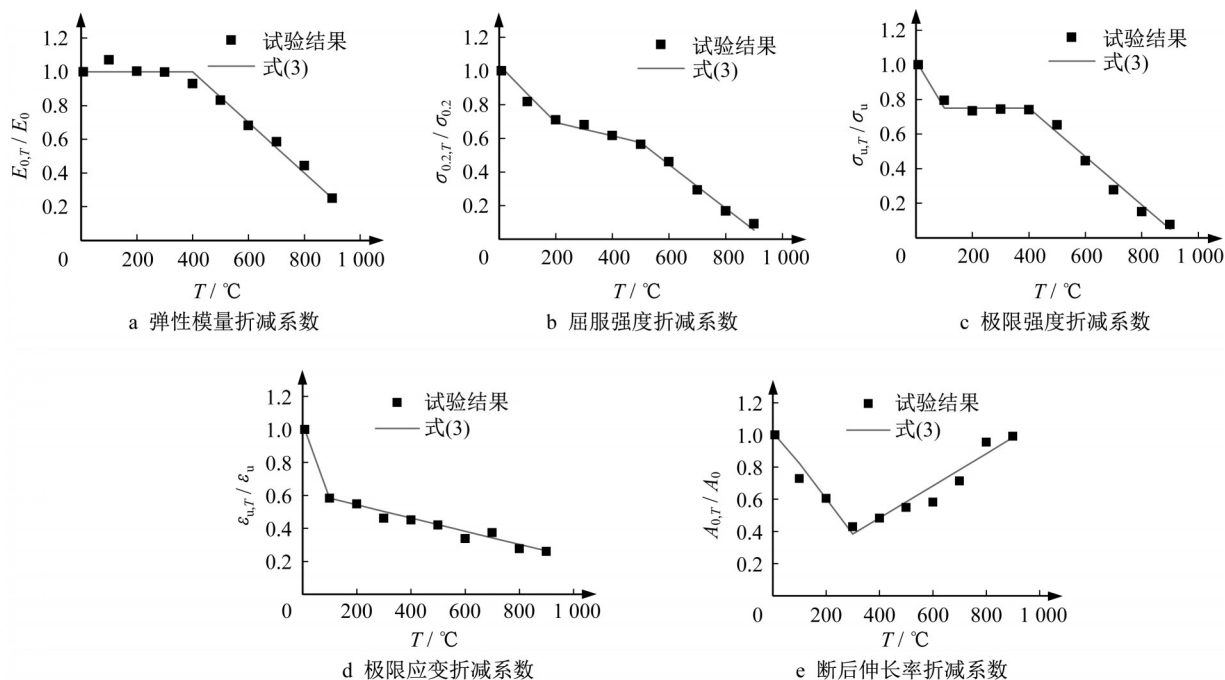


图4 高温力学性能指标计算公式与试验结果对比

Fig. 4 Comparison of mathematical model of S32001 stainless steel with test results at elevated temperatures

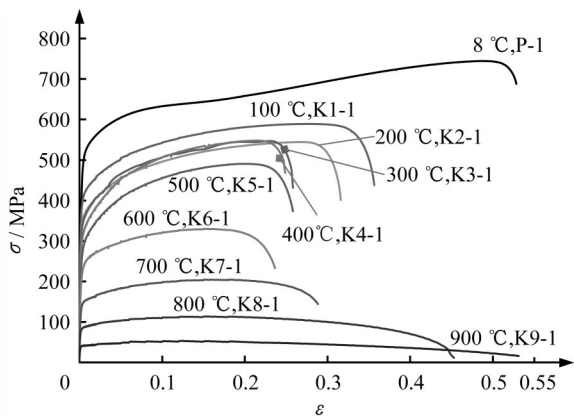


图5 高温下S32001不锈钢的应力-应变曲线

Fig. 5 Stress-strain curves of S32001 stainless steel at elevated temperatures

$$\varepsilon = \begin{cases} \frac{\sigma}{E_{0,T}} + 0.002 \left(\frac{\sigma}{\sigma_{0.2,T}} \right)^{n_T}, & \sigma \leq \sigma_{0.2,T} \\ \frac{\sigma - \sigma_{0.2,T}}{E_{0.2,T}} + \varepsilon_{u,T} \left(\frac{\sigma - \sigma_{0.2,T}}{\sigma_{u,T} - \sigma_{0.2,T}} \right)^{m_T} + \varepsilon_{0.2,T}, & \sigma_{0.2,T} < \sigma \leq \sigma_{u,T} \end{cases} \quad (4a)$$

$$n_T = 6 + 0.2\sqrt{T} \quad (4b)$$

$$m_T = \begin{cases} 2.3 - 0.001T, & \text{EN1.4301奥氏体不锈钢} \\ 5.6 - 0.005T, & \text{EN1.4462双相不锈钢} \end{cases} \quad (4c)$$

式中: $E_{0.2,T}$ 为温度为 T 时应力 $\sigma_{0.2,T}$ 对应的切线模量;

$\varepsilon_{0.2,T}$ 是温度为 T 时应力为 $\sigma_{0.2,T}$ 对应的总应变; n_T 为温度 T 时的第一段硬化指数; m_T 为温度 T 时的第二段硬化指数。

$$\varepsilon = \begin{cases} \frac{\sigma}{E_{0,T}} + 0.002 \left(\frac{\sigma}{\sigma_{0.2,T}} \right)^{n_T}, & \sigma \leq \sigma_{0.2,T} \\ \frac{\sigma - \sigma_{0.2,T}}{E_{0.2,T}} + \left(0.02 - \varepsilon_{0.2,T} - \frac{\sigma_{0.2,T} - \sigma_{0.2,T}}{E_{0.2,T}} \right) \cdot \left(\frac{\sigma - \sigma_{0.2,T}}{\sigma_{0.2,T} - \sigma_{0.2,T}} \right)^{n'_T} + \varepsilon_{0.2,T}, & \sigma_{0.2,T} < \sigma \leq \sigma_{u,T} \end{cases} \quad (5)$$

式中: $\sigma_{0.2,T}$ 是温度为 T 时不锈钢材料 2 % 总应变对应的应力; n'_T 为温度 T 时的第二段硬化指数。

由于 Chen 和 Young 以及 Gardner 有关 n_T 、 m_T 和 n'_T 的取值建议是针对部分不锈钢研究的, 根据试验结果分析表明, 推荐硬化指数取值不能准确地模拟 S32001 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 (first optimization) 非线性拟合软件得到应变硬化指数 (表 8), 模型曲线与试验曲线对比结果见图 6、图 6 包括三条曲线, 其中试验曲线是由试验数据获得的应力-应变曲线; Md1 和 Md2 曲线是分别基于式 (4) 和式 (5) 拟合的应力-应变曲线。

由图 6 知, Rasmussen 模型和 Gardner 模型 (Md1 和 Md2) 模拟 S32001 不锈钢的本构关系都与

表 8 高温下 S32001 不锈钢的应变硬化指数

Tab. 8 Hardening index of mechanical properties of S32001 stainless steel at elevated temperatures

温度 $T/^{\circ}\text{C}$	试件编号	Rasmussen 模型建议取值 ^[19]		Rasmussen 模型		Gardner 模型	
		n_T	m_T	n_T	m_T	n_T	n'_T
100	K1-1	8.00	5.10	15.62	2.81	15.62	2.83
	K1-2			26.61	3.17	26.61	3.30
	K1-3			19.73	2.67	19.73	2.82
200	K2-1	8.83	4.60	13.63	2.54	13.63	2.60
	K2-2			14.12	2.55	14.12	2.61
	K2-3			15.14	2.63	15.14	2.68
300	K3-1	9.46	4.10	9.53	2.71	9.53	2.79
	K3-2			13.60	2.70	13.60	2.72
	K3-3			10.50	2.59	10.50	2.57
400	K4-1	10.00	3.60	10.20	2.58	10.20	2.68
	K4-2			8.72	3.24	8.72	3.32
	K4-3			6.01	2.82	6.01	2.91
500	K5-1	10.47	3.10	8.06	2.74	8.06	2.84
	K5-2			6.01	2.48	6.01	2.34
	K5-3			8.45	2.68	8.45	2.79
600	K6-1	10.90	2.60	8.62	3.03	8.62	3.02
	K6-2			7.20	3.15	7.20	3.18
	K6-3			9.04	3.21	9.04	3.06
700	K7-1	11.29	2.10	7.73	2.52	7.73	2.60
	K7-2			6.83	2.21	6.83	2.56
	K7-3			9.30	2.22	9.30	2.26
800	K8-1	11.66	1.60	10.39	2.04	10.39	2.27
	K8-2			9.24	2.29	9.24	2.37
	K8-3			6.25	2.96	6.25	3.50
900	K9-1	12.00	1.10	9.73	1.73	9.73	1.64
	K9-2			13.81	1.02	13.81	1.46
	K9-3			18.17	1.38	18.17	1.34

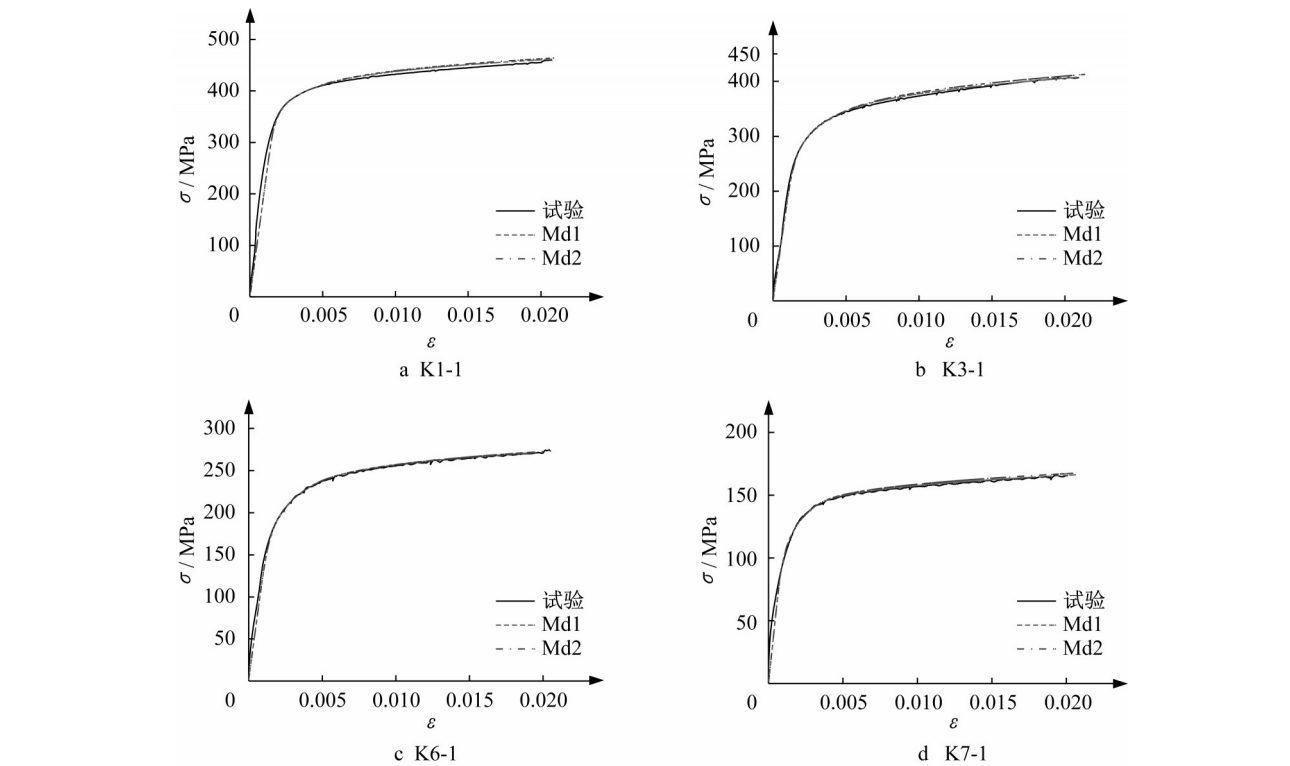


图 6 高温下本构模型拟合曲线与试验曲线对比

Fig. 6 Comparison of stress-strain fitting curve of S32001 stainless steel with test results at elevated temperatures

试验结果十分吻合,由于Rasmussen模型的表达形式更为简洁,所需参数更少,因此本文采用Rasmussen模型来模拟S32001不锈钢的应力-应变关系。

根据表8结果,对式(4)中S32001不锈钢高温下的硬化指数 n_T 、 m_T 进行数值模拟,得到S32001不锈钢的硬化指数计算公式,如下式(6)~(7)所示:

$$n_T = -1.034 \times 10^{-8} T^3 + 7.421 \times 10^{-5} T^2 - 7.366 \times 10^{-2} T + 26.850, 100^\circ\text{C} \leq T \leq 900^\circ\text{C} \quad (6)$$

$$m_T = -1.501 \times 10^{-8} T^3 + 1.815 \times 10^{-5} T^2 - 6.272 \times 10^{-3} T + 3.311, 100^\circ\text{C} \leq T \leq 900^\circ\text{C} \quad (7)$$

将表6数据和式(6)~(7)计算结果代入Rasmussen模型,可建立S32001不锈钢任意温度下的应力-应变曲线,计算结果与试验数据对比见图7。实线表示计算结果,虚线表示试验数据,二者贴合程度较高,即上述硬化指数计算公式拟合效果较好。

4 S32001 不锈钢材料与其他钢材的高温力学性能对比

S32001 不锈钢与 EN 1.4462 双相型不锈钢^[29]、

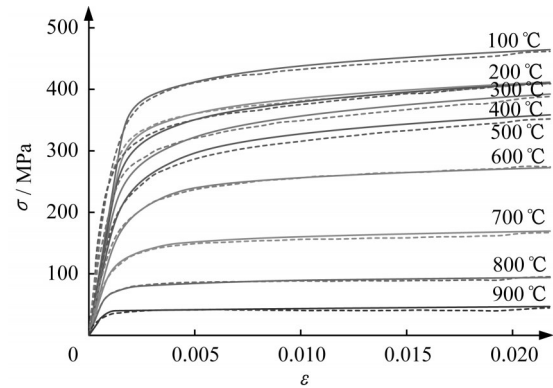


图7 不同温度下应力-应变曲线与试验结果对比

Fig. 7 Comparison of stress-strain curves of S32001 stainless steel with test results at different temperatures

TSZ410 铁素体不锈钢^[25]、结构钢 Q235B^[30-31]的高温下初始弹性模量、名义屈服强度和极限强度等力学性能参数的比较,见图 8a~图 8c。S32001 不锈钢与常见结构用 S304 系不锈钢(如 S30408 奥氏体不锈钢^[24])高温下屈服强度和极限强度的比较,见图 8d。

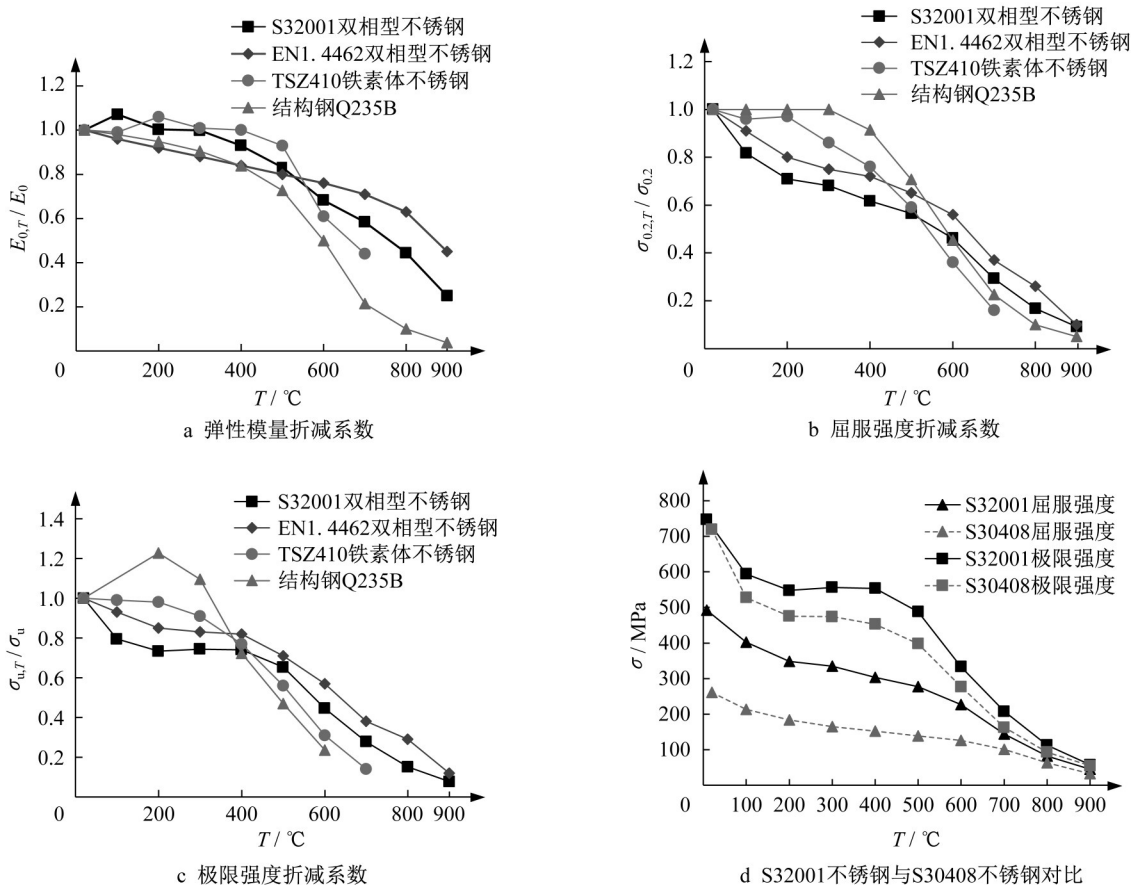


图8 S32001 不锈钢与其他钢材的高温力学性能比较

Fig. 8 Comparison of mechanical properties of different steels at elevated temperatures

有以下结论:

(1)S32001与EN 1.4462同为双相型不锈钢,高温下各项力学性能指标变化趋势基本一致,但EN 1.4462高温下力学性能略优于S32001。

(2)S32001不锈钢的高温下初始弹性模量折减情况与TSZ410大致相同,20℃~400℃温度段弹性模量基本维持不变,而Q235B随温度升高弹性模量下降明显。温度低于500℃时,S32001不锈钢的屈服强度的折减系数明显低于TSZ410及Q235B,在300℃时其折减系数与Q235B最大相差为0.32;温度高于500℃时,反之。

(3)与S30408不锈钢的对比。S32001不锈钢高温下材料强度明显高于S30408不锈钢,特别是20℃~600℃温度段,其中300℃时S32001的名义屈服强度是S30408的2.03倍。

5 结论

本文主要结论如下:

(1)S32001不锈钢的名义屈服强度、抗拉强度随着温度升高呈现先快、后慢、再快的下降趋势;600℃时分别为常温下46%和45%,900℃时均不足常温下10%。

(2)Rasmussen模型和Gardner模型分别拟合S32001不锈钢高温下应力-应变关系对比结果表明,两种模型均具有较高精度。由于Rasmussen模型表达形式更为简洁,在该模型基础上提出S32001不锈钢硬化指数的计算公式,便于实际工程应用。

(3)当温度低于500℃时,S32001不锈钢的高温下强度损失明显大于TSZ410不锈钢和结构钢Q235B,高于500℃时则相反;S32001不锈钢高温下材料强度明显高于S30408不锈钢,在20℃~600℃温度段,S32001的名义屈服强度至少是S30408的1.8倍,具有更加优越的抗火性能。

作者贡献声明:

楼国彪:课题负责人,研究方案提出与论文框架设计,负责论文审定。

杨未:试验实施及试验数据处理分析,负责论文初稿及终稿撰写。

陈武龙:试验实施及试验结果初步处理,参与论文初稿撰写。

陶宇超:试验实施及试验结果初步处理,参与论文初稿撰写。

王美南:协助制定研究方案,负责试件制作,参与论文修改。

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] YOUNG B. Experimental and numerical investigation of high strength stainless steel structures [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2008, 64(11): 1225.
- [3] 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.
- [4] 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 (Science and Technology)*, 2013, 53(9): 1231.
- [5] CHARLES J, CHEMELLE P, 胡锦程,等. 双相不锈钢的发展现状及未来市场趋势 [J]. *世界钢铁*, 2011, 11(6): 1.
CHARLES J, CHEMELLE P, HU Jincheng, *et al.* Development status and future market trend of duplex stainless steel [J]. *World Iron & Steel*, 2011, 11(6): 1.
- [6] 李国强,陈凯,蒋首超,等. 高温下Q345钢的材料性能试验研究 [J]. *建筑结构*, 2001, 31(1): 53.
LI Guoqiang, CHEN Kai, JIANG Shouchao, *et al.* Experimental study on material properties of Q345 steel at high temperature [J]. *Building structure*, 2001, 31(1): 53.
- [7] 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 high temperature mechanical properties of high strength Q460 steel [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2012, 32(S1): 30.
- [8] GARDNER L. The use of stainless steel in structures [J]. *Progress in Structural Engineering and Materials*, 2005, 7(2): 45.
- [9] RAMBERG W, OSGOOD W R. Description of stress-strain curves by three parameters [J]. *Technical Note*, 1943(902): 1.
- [10] HILL H N. Determination of stress-strain relations from "offset" yield strength values [J]. *Pediatrics*, 1944, 6(1): 93.
- [11] GARDNER L. A new approach to stainless steel structural design [J]. *Structural Engineer*, 2002, 82(21): 21.
- [12] RASMUSSEN K J R. Full-range stress-strain curves for stainless steel alloys [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2003, 59(1): 47.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] Euro Inox/SCI. Design manual for structural stainless steel [S]. 3rd ed. Building series: Euro Inox and the Steel Construction Institute, 2006.
- [18] SAKUMOTO Y, NAKAZATO T, MATSUZAKI A. High-temperature properties of stainless steel for building structures [J]. Journal of Structural Engineering, 1996, 122(4): 399.
- [19] CHEN J, YOUNG B. Stress-strain curves for stainless steel at elevated temperatures [J]. Engineering Structures, 2006, 28(2): 229.
- [20] ABDELLA K. Explicit full-range stress-strain relations for stainless steel at high temperatures [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2009, 65(4): 794.
- [21] GARDNER L, INSAUSTI A, NG K T. Elevated temperature material properties of stainless steel alloys [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2010, 66(5): 634.
- [22] ABDELLA K. A three-stage full-range stress-strain inversion for stainless steel alloys as an explicit function of temperature [J]. Thin-Walled Structures, 2012, 53: 9.
- [23] 陈驹, 金伟良, 杨立伟. 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. Behaviour of constructional stainless steel at elevated temperatures [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science Edition), 2008, 42(11): 1983.
- [24] 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.
- [25] 楼国彪, 陶宇超, 陈武龙, 等. TSZ410铁素体不锈钢的高温力学性能试验[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2021, 49(1): 20.
- LOU Guobiao, TAO Yuchao, CHEN Wulong, *et al.* Experimental investigation of mechanical properties of TSZ410 ferritic stainless steel at elevated temperature [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2021, 49(1): 20.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] ZHAO B. ECCS project “Development of the use of stainless steel in construction” work package 5.1: Material behaviour at elevated temperatures [R]. [S.l.]: CTICM, 2000.
- [30] 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, 2017.
- 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.
- [31] 欧蔓丽, 曹伟军. 建筑用Q235钢在高温(火灾)条件下的力学性能研究[J]. 株洲工学院学报, 2006(4): 99.
- OU Manli, CAO Weijun. On the mechanic performance of building-purpose Q235 steel under high-temperature (Fire) [J]. Journal of Hunan University of Technology, 2006(4): 99.