文章编号:1674-2974(2025)03-0201-12 DOI:10.16339/j.cnki.hdxbzkb.2025040

热风钎焊S30403奥氏体不锈钢高温下及高温冷却后的力学性能试验研究

谭瑞昕[1],楼国彪[1,2†],陶宇超[1],王美南[3],李舜[3],苏葛[3]
(1. 同济大学 土木工程学院,上海 200092;
2. 同济大学 土木工程防灾减灾全国重点实验室,上海 200092;
3. 远大可建科技有限公司,长沙 430121)

摘 要:以S30403奥氏体不锈钢为原材料的热风钎焊不锈钢芯板具有突出的力学特性和环境友好性.相较于传统热辐射钎焊,热风铜钎焊技术提高了生产效率,并将加工成本降低了30%以上.热风钎焊时,不锈钢经过铜钎焊炉高速高温(1 100 ℃)热风处理,会影响不锈钢力学性能.本文对热风钎焊S30403奥氏体不锈钢进行了高温下和高温冷却后拉伸试验,得到弹性模量、名义屈服强度、极限强度、断后伸长率等主要力学性能数据,建立高温下主要力学性能指标计算模型,并基于Rasmussen模型建立高温应力-应变本构关系.研究表明,热风钎焊S30403奥氏体不锈钢在高温下的初始弹性模量、名义屈服强度、极限强度随温度升高而下降,900 ℃时,弹性模量约为常温时39%,名义屈服强度约为常温时20%,极限强度约为常温时10%.采用不同的冷却方式时,热风钎焊S30403奥氏体不锈钢的名义屈服强度、极限强度区别不大,但弹性模量和断后伸长率会发生较明显的变化.

关键词:奥氏体不锈钢;钎焊;高温;本构模型;冷却方式;力学性能
中图分类号:TU511.3 **文献标志码**:A

Experimental Investigation on Mechanical Properties of Hot-air Brazed S30403 Austenitic Stainless Steel at High Temperatures and After Cooling

TAN Ruixin[1],LOU Guobiao[1,2†],TAO Yuchao[1],WANG Meinan[3],LI Shun[3],SU Ge[3]
(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 Co., Ltd., Changsha 430121, China)

Abstract: Hot air brazed stainless steel core plates made from S30403 austenitic stainless steel exhibit outstanding mechanical properties and environmental friendliness. Compared with conventional hot radiation brazing, the hot air copper brazing technology increases productivity and reduces processing costs by more than 30%. Stainless steel is subjected to high speed and high temperature (1 100 °C) hot air treatment during the copper

* **收稿日期**:2024-02-05
基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFC0703808), National Key Research and Development Program of China (2017YFC0703808)
作者简介:谭瑞昕(1996—),女,山西临汾人,同济大学博士研究生
† 通信联系人,E-mail: gblou@tongji.edu.cn

brazing furnace, which affects the mechanical properties of stainless steel. The tensile test of hot air brazed S30403 austenitic stainless steel under high temperatures and after cooling from high-temperature was carried out, and the main mechanical properties such as elastic modulus, nominal yield strength, ultimate strength, elongation after break were obtained. A calculation model of main mechanical properties at high temperatures of hot air brazed S30403 was established, and a high temperature stress-strain constitutive model was established based on the Rasmussen model. The study shows that the initial modulus of elasticity, nominal yield strength and ultimate strength of hot air brazed S30403 austenitic stainless steel at high temperatures decreases with the increasing temperature. At 900 °C, modulus of elasticity is about 39% of that at room temperature, nominal yield strength is about 20% and ultimate strength is about 10%. The cooling mode has a minimal effect on the nominal yield strength and the ultimate strength of hot-air brazed S30403 austenitic stainless steel, but it has a more significant impact on the modulus of elasticity and elongation after break.

Key words: austenitic stainless steel; brazing; high temperature; constitutive models; cooling mode; mechanical properties

不锈钢作为一种新型建筑材料,外形美观、维保简单,且整个生命周期的成本效益高;特别是其卓越的抗腐蚀和耐高温特性有效地弥补了普通碳钢等传统建筑材料的不足[1-3]. 因此,无论是在国内还是国外,不锈钢在建筑结构中的使用都越发普遍.与传统钢筋混凝土板相比,不锈钢芯板具有极高的强度重量比、良好的韧性和突出的环境友好性;与其他不锈钢蜂窝板相比,节约钢耗30%~60%,整体成本显著降低.

热风铜钎焊时,不锈钢经过铜钎焊炉约1 100 ℃高速高温热风处理,高温力学性能会受到影响. 为了研究不锈钢芯板结构抗火性能,评估火灾后的结构安全性,需要研究热风钎焊不锈钢在高温下及高温过火冷却后的力学性能.

对于不锈钢结构抗火性能研究,国外学者从材料的本构关系到结构的抗火设计均有一定的研究成果[4-12]. Rasmussen[4]对常温下用奥氏体、双相体和铁素体不锈钢材料制成的平板区和转角区试件进行了大量拉伸试验,基于R-O模型提出改进后的材料本构模型. Gardner等[5-6]基于EN 1.4301和EN 1.4401/4常温应力-应变模型及高温试验数据,提出了高温双阶段本构模型. Ellobody[7,13]基于已有的相关火灾试验结果,建立无保护简支碳钢和不锈钢组合梁的非线性3D有限元模型,研究发现不锈钢组合梁比碳素钢组合梁在高温条件下具有更好的承载能力.

近年来,我国有相关学者开始对不锈钢材料的高温和高温冷却后材性进行研究,经过分析及模型拟合,陈驹等[14]提出两阶段本构模型,可用于高温下的EN 1.4301和EN 1.4401/4;范圣刚等[15-16]研究了S30408奥氏体不锈钢常温、高温以及经过高温冷却后的应力-应变关系;郭兆军等[17]以铁素体不锈钢为研究对象,创新性地提出一种估算冷却过程后的力学特性的数学模型.

目前,针对不锈钢材料高温及高温后本构模型的研究较少,且S30403奥氏体不锈钢与已有研究中的研究对象存在化学成分(特别是碳含量)上的明显区别. 因此,本文对热风钎焊[18]S30403奥氏体不锈钢进行了高温及高温冷却后的拉伸试验,总结其力学性能的变化规律,建立本构模型.

1 试验设计

1.1 试验设备

本研究中试验机和高温炉型号分别为MTS E45.305和MTS 653.04(图1),量测设备为MF接触式高温引伸计,设备主要性能参数如下:最大加载力300 kN;加载速率0.001~250 mm/min;温度100~1 400 ℃;变形量测精度0.001 mm.

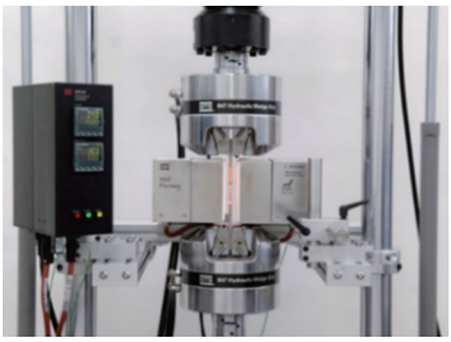


图 1　高温材性试验机

Fig.1　High temperature material property testing rig

1.2　试件

S30403奥氏体不锈钢的碳含量较低,具有良好的焊接性,因此不锈钢芯板采用S30403奥氏体不锈钢作为热风钎焊不锈钢芯板的原材料.本文所用热风钎焊不锈钢芯板(图2)由远大可建科技有限公司发明.

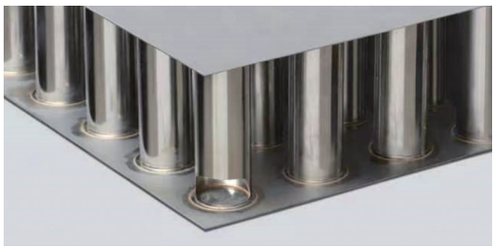


图 2　热风钎焊不锈钢芯板

Fig.2　Hot-air brazed stainless steel core-plate

热风钎焊S30403奥氏体不锈钢的主要化学成分(质量分数)及与S30408奥氏体不锈钢[15]和Q235B[19]的对比见表1.

为研究热风钎焊不锈钢在高温及高温过火冷却后的力学性能,所采用的试件均取自经过热风钎焊生产的不锈钢芯板.试件按金属材料拉伸试验规范[20-21]进行设计制作,横截面为矩形,厚度为6 mm.

表1　不同种类不锈钢成分对比

Tab.1　Comparation of stainless steel composition　　%

钢种	基体	牌号	w_C	w_{Si}	w_{Mn}	w_S	w_P	w_{Ni}	w_{Cr}	w_N
S30403	奥氏体	022 Cr19Ni10	0.030	0.75	2.00	0.030	0.045	8.00~10.00	17.50~19.50	—
S30408	奥氏体	06 Cr19Ni10	0.080	1.00	2.00	0.030	0.045	8.00~11.00	18.00~20.00	—
Q235B	—	—	0.18	0.20	0.45	0.036	0.035	≤0.30	≤0.30	—

为了研究热风钎焊的影响,还进行了热风钎焊前不锈钢材料的常温拉伸试验,其试件尺寸如图3所示.

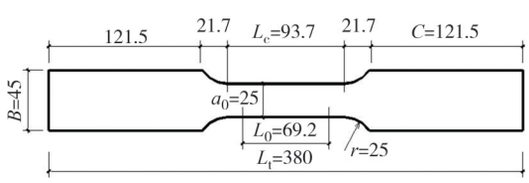


图 3　试件尺寸(单位:mm)

Fig.3　Specimen size (unit:mm)

1.3　试验方法

1.3.1　常温拉伸试验

采用两阶段控制方法:先用0.000 25/s的应变速率加载,达到0.05的应变后,再以1.5 mm/min的位移速率加载,直到试件破坏.前一个阶段可以得到弹性模量、名义屈服强度,后一个阶段可以得到极限强度及断后伸长率.

1.3.2　高温下拉伸试验

采用稳态试验方法,即试验过程分为升温、恒温及高温加载三个步骤.升温速率为10 ~30 ℃/min;15 min恒温段的作用是使试件温度均匀;采用两阶段控制方法进行加载.

试验温度点为:100 ℃、200 ℃、300 ℃、400 ℃、500 ℃、600 ℃、700 ℃、800 ℃、900 ℃,每工况下测试2个试件.

1.3.3　高温冷却后拉伸试验

高温冷却后拉伸试验包括加热、恒温、冷却及常温拉伸4个步骤.前两个阶段同高温下拉伸试验.冷却方式包括自然冷却和浸水冷却.在室内常温放置5 d后,记录试件的外观特征并加载.

高温冷却后拉伸试验工况及加载控制如下:①试验温度工况与高温稳态试验相同;②采用两阶段控制方法加载.

2　常温力学材性试验结果

2.1　试验结果

S30403奥氏体不锈钢热风钎焊前后常温下的力学性能指标见表2,应力-应变曲线见图4.表2中A1、A2试件为未热风钎焊的S30403奥氏体不锈钢试件,B1、B2为热风钎焊后的S30403奥氏体不锈钢试件.

由表2和图4可以得出以下结论:

1)热风钎焊后的S30403奥氏体不锈钢应力-应

表 2 热风钎焊前后 S30403 奥氏体不锈钢常温力学性能

Tab.2 Mechanical properties of S30403 austenitic stainless steel before and after hot-air braze process (room-temperature)

试件编号	E_0/10^5MPa	$\sigma_{0.01}$/MPa	$\sigma_{0.2}$/MPa	$\sigma_{1.0}$/MPa	σ_u/MPa	$\varepsilon_{0.2}$	$\varepsilon_{1.0}$	ε_u	A_0/%
A1	2.10	207.3	297.0	330.1	657.2	0.355	1.189	0.551	54.3
A2	2.13	204.0	295.6	328.3	660.6	0.249	1.191	0.569	52.9
平均值	2.11	205.7	296.3	329.2	658.9	0.302	1.19	0.560	53.6
B1	2.09	209.6	242.7	274.6	641.4	0.365	1.179	0.671	57.1
B2	2.12	217.1	250.0	282.1	652.2	0.295	1.133	0.675	55.7
平均值	2.10	213.4	246.4	278.3	646.8	0.330	1.156	0.673	56.4

注：E_0为初始弹性模量；$\sigma_{0.01}$、$\sigma_{0.2}$和$\sigma_{1.0}$分别是残余应变为0.01%、0.2%和1.0%时的应力；$\varepsilon_{0.2}$和$\varepsilon_{1.0}$分别是残余应变为0.2%和1.0%时的总应变；σ_u和ε_u分别为极限强度和极限应变；A_0为断后伸长率.

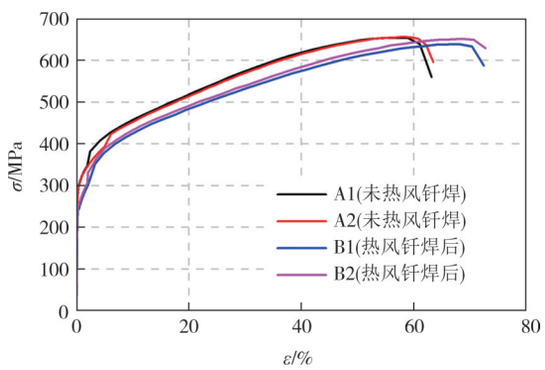


图 4 热风钎焊前后 S30403 奥氏体不锈钢常温下应力-应变曲线

Fig.4 Stress-strain curves of S30403 austenitic stainless steel before and after hot-air braze process (room-temperature)

变曲线上没有出现屈服平台，非线性特征显著.

2)热风钎焊后 S30403 奥氏体不锈钢和未热风钎焊 S30403 奥氏体不锈钢的应力-应变曲线前期基本重合，后期差异明显.

3)热风钎焊工艺对 S30403 奥氏体不锈钢的弹性模量、极限强度几乎没有影响，但是会降低 S30403 奥氏体不锈钢的屈服强度至 83%，并增加材料的延性，使其极限伸长率提高 5%.

2.2 应力-应变本构模型

应力-应变关系模型是进行结构设计的基础. 对于不锈钢材料，Rasmussen 模型和 Gardner 模型的应用较为广泛.

2.2.1 Rasmussen 模型

基于 R-O 模型，Rasmussen[4]提出了不锈钢的常温应力-应变模型，其表达式如式(1)所示.

$$\varepsilon=\begin{cases}\dfrac{\sigma}{E_0}+0.002\left(\dfrac{\sigma}{\sigma_{0.2}}\right)^n, \sigma\leqslant\sigma_{0.2}\\ \dfrac{\sigma-\sigma_{0.2}}{E_{0.2}}+\varepsilon_u\left(\dfrac{\sigma-\sigma_{0.2}}{\sigma_u-\sigma_{0.2}}\right)^m+\varepsilon_{0.2}, \\ \sigma_{0.2}<\sigma<\sigma_u\end{cases} \tag{1}$$

其中，

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

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

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

式中：ε为材料的应变；σ为应力；$E_{0.2}$为$\sigma_{0.2}$处的切线模量；硬化指数n和m(取值见表3)用于考虑$\sigma>\sigma_{0.2}$时材料的应变硬化.

2.2.2 Gardner 模型

Gardner 等[5]基于式(1)，用$\sigma_{1.0}$代替σ_u，提出常温不锈钢应力-应变模型，其表达式如式(2)所示.

$$\varepsilon=\begin{cases}\dfrac{\sigma}{E_0}+0.002\left(\dfrac{\sigma}{\sigma_{0.2}}\right)^n, \sigma\leqslant\sigma_{0.2}\\ \dfrac{\sigma-\sigma_{0.2}}{E_{0.2}}+\varepsilon_{0.2}+\left(\varepsilon_{1.0}-\varepsilon_{0.2}-\dfrac{\sigma_{1.0}-\sigma_{0.2}}{E_{0.2}}\right)\times \\ \left(\dfrac{\sigma-\sigma_{0.2}}{\sigma_{1.0}-\sigma_{0.2}}\right)^{n'_{0.2,1.0}}, \sigma_{0.2}<\sigma<\sigma_u\end{cases} \tag{2}$$

式中：n为第一阶段硬化指数；$n'_{0.2,1.0}$为第二阶段硬化指数，取值见表3.

2.2.3 模型适用性分析及改进

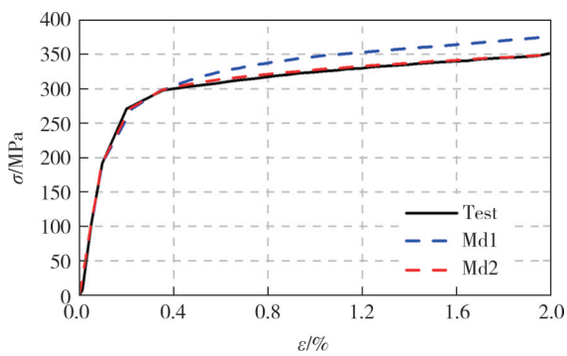
为了修正硬化指数，对热风钎焊前后 S30403 的常温力学性能试验结果进行拟合，结果见表3.

图5和图6中，将由式(1)和式(2)直接得到的曲线(Md1和Md3)、使用修正参数的曲线(Md2和Md4)与试验值(Test曲线)进行对比. 限于篇幅，仅给出A1和B2的结果. 可知，Rasmussen 模型和 Gardner 模型曲线在前半段偏低，后半段偏高(对未热风钎焊试件更明显). 改进的模型在描述热风钎焊 S30403 奥氏体不锈钢的力学性能方面具有较高的准确性和可靠性. 这对于进一步研究该材料在高温条件下的力学行为和工程应用具有重要意义.

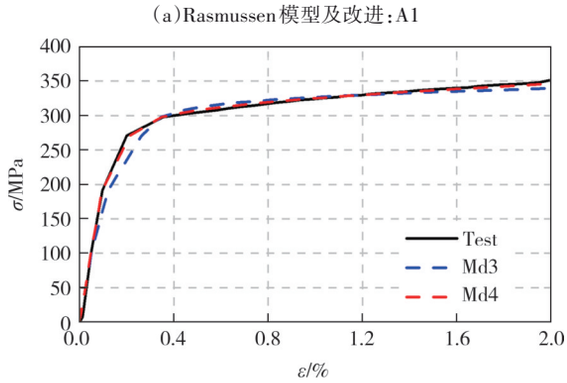
表3　材料硬化指数(常温)

Tab.3　Material hardening index (room-temperature)

试件	Rasmussen模型				Gardner模型			
	建议值		修正值		建议值		修正值	
	n	m	n'	m'	n	$n'_{0.2,\ 1.0}$	n'	$n''_{0.2,\ 1.0}$
A1	8.33	2.58	9.46	1.94	4.4	3.1	9.46	1.88
A2	8.07	2.57	9.21	1.93	4.4	3.1	9.21	1.87
平均值	8.20	2.58	9.34	1.94	8.20	2.58	9.34	1.88
B1	20.43	2.32	21.86	2.36	—	—	21.86	2.22
B2	21.22	2.34	22.64	2.50	—	—	22.64	2.16
平均值	20.83	2.33	22.25	2.43	—	—	22.25	2.19



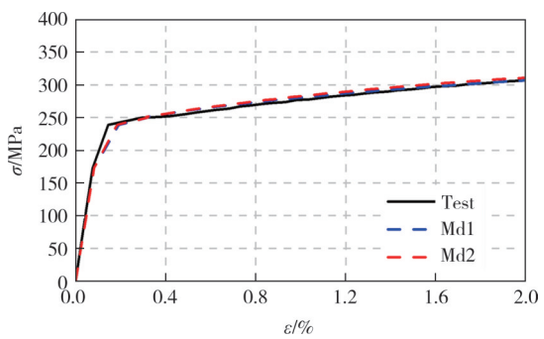
(a)Rasmussen模型及改进:A1



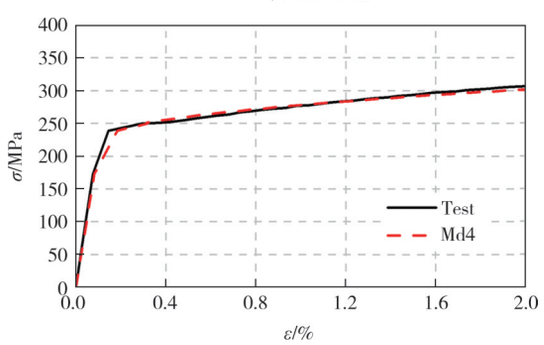
(b)Gardner模型及改进:A1

图5　S30403奥氏体不锈钢常温下应力-应变模型的比较

Fig.5　Comparation of stress-strain models of S30403 austenitic stainless steel at room-temperature



(a)Rasmussen模型及改进:B2



(b)Gardner模型及改进:B2

图6　热风钎焊S30403奥氏体不锈钢常温下的应力-应变模型

Fig.6　Stress-strain models of hot-air brazed S30403 austenitic stainless steel at room-temperature

3　高温力学材性试验结果

3.1　试验现象

各个温度点试件的外观特征如图7和表4所示.可以看出,随温度升高,试件表面颜色逐渐加深、金属光泽逐渐消失,且碳化现象加重,颈缩现象在100~700 ℃范围内弱于常温,在800~900 ℃范围内较常温下更明显.

3.2　力学性能参数试验结果

S30403奥氏体不锈钢在热风钎焊过程中的高温

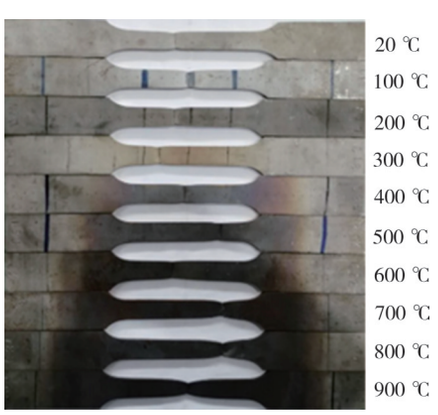


图7　高温试验后试件外观特征

Fig.7　Appearance characteristics of test specimens after high-temperature tests

表4 试件外观特征(高温试验后)

Tab.4 Appearance characteristics of test specimens (after high-temperature tests)

T/℃	表面颜色	颈缩现象
20	金属本色	明显
100	金属本色	小于常温
200	金属本色	小于常温
300	浅黄色	小于常温
400	介于金黄色和紫色之间	小于常温
500	红褐色,开始失去金属光泽	小于常温
600	黑色,失去部分金属光泽	小于常温
700	黑色,失去部分金属光泽	小于常温
800	黑色,无金属光泽	非常明显
900	黑色,无金属光泽	最明显

力学性能参数试验结果如表5所示.可以看出:

1)随着温度升高,热风钎焊S30403奥氏体不锈钢的弹性模量不断下降,900 ℃时约为常温时的39%.

2)随着温度的升高,热风钎焊S30403奥氏体不锈钢的屈服强度不断下降,当温度高于200 ℃时下降速度减慢,900 ℃时约为常温时的20%.

3)随着温度升高,热风钎焊S30403奥氏体不锈钢的极限强度和极限应变具有相似的变化趋势,即整体下降,于200~400 ℃出现平台.当温度达到900 ℃时,极限强度和极限应变分别为常温时的10%和19%.

4)随着温度升高,热风钎焊S30403奥氏体不锈钢的断后伸长率先减小后增大,而大多数钢材的断后伸长率则为随温度升高持续增长.转折点500 ℃处的断后伸长率约为常温时的61%,当温度超过700 ℃时,断后伸长率会高于常温.这与升温过程中材料的固态相变有关,内部结构和组织的变化引起力学性能的转变[23].

表5 热风钎焊S30403奥氏体不锈钢力学性能试验结果(高温下)

Tab.5 Mechanical properties of hot-air brazed S30403 austenitic stainless steel (at high temperatures)

T/℃	$E_{0,T}$/MPa	α_{E0}	$\sigma_{0.2,T}$/MPa	$\alpha_{\sigma 0.2}$	$\sigma_{u,T}$/MPa	$\alpha_{\sigma u}$	$\varepsilon_{u,T}$	$\alpha_{\varepsilon u}$	$A_{0,T}$/%	α_{40}
20	2.105	1.00	264.4	1.00	646.8	1.00	0.673	1.00	56.42	1.00
100	1.978	0.94	189.7	0.77	498.1	0.77	0.528	0.79	50.21	0.89
200	1.869	0.89	162.6	0.66	439.8	0.68	0.412	0.63	44.01	0.78
300	1.784	0.85	137.9	0.56	426.8	0.66	0.422	0.63	41.19	0.73
400	1.712	0.81	128.1	0.52	420.4	0.65	0.396	0.60	37.24	0.66
500	1.664	0.79	113.3	0.46	388.2	0.60	0.392	0.53	34.42	0.61
600	1.538	0.73	103.4	0.42	316.9	0.49	0.306	0.43	40.06	0.71
700	1.318	0.63	101.0	0.41	213.4	0.33	0.228	0.33	55.86	0.99
800	1.077	0.51	83.7	0.34	129.3	0.20	0.147	0.22	61.50	1.09
900	0.817	0.39	49.2	0.20	64.6	0.10	0.126	0.19	75.60	1.34

注:α为同一指标的高温值与常温值之比,如$\alpha_{0.2,T}=\sigma_{0.2,T}/\sigma_{0.2}$,下标$T$代表对应的温度点;$E_{0,T}$为温度$T$下的初始弹性模量;$\sigma_{0.2,T}$是温度$T$下残余应变为0.2%时的名义屈服应力;$\sigma_{u,T}$和$\varepsilon_{u,T}$为温度$T$下的极限强度和极限应变;$A_{0,T}$为温度$T$下的断后伸长率.

3.3 力学性能参数拟合公式

根据试验结果,利用最小二乘法和回归分析,得到统一形式的高温下热风钎焊S30403奥氏体不锈钢力学性能的拟合公式,如式(3)所示.其中,a、b为公式拟合参数,取值见表6.拟合结果与试验结果对比见图8.

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

3.4 应力-应变曲线

热风钎焊S30403奥氏体不锈钢的应力-应变曲线见图9.材料的初始弹性模量、名义屈服强度随温度升高明显降低.各个温度下均没有典型的屈服平台出现.

基于Rasmussen模型[4]和Gardner模型[5],结合试验结果提出高温下热风钎焊S30403奥氏体不锈钢应力-应变模型,其表达式分别如式(4)、式(5)所示.

$$\varepsilon = \begin{cases} \dfrac{\sigma}{E_T} + 0.002\left(\dfrac{\sigma}{\sigma_{0.2,T}}\right)^{n_T}, \sigma \leqslant \sigma_{0.2,\mathrm{T}} \\ \dfrac{\sigma-\sigma_{0.2,T}}{E_{0.2,T}} + \varepsilon_{0.2,T} + \varepsilon_{u,\mathrm{T}}\left(\dfrac{\sigma-\sigma_{0.2,T}}{\sigma_{u,T}-\sigma_{0.2,T}}\right)^{m_T}, \\ \sigma_{0.2} < \sigma < \sigma_{u} \end{cases} \tag{4}$$

$$\varepsilon = \begin{cases} \dfrac{\sigma}{E_T} + 0.002\left(\dfrac{\sigma}{\sigma_{0.2,\mathrm{T}}}\right)^{n_T}, \sigma \leqslant \sigma_{0.2,\mathrm{T}} \\ \dfrac{\sigma-\sigma_{0.2,\mathrm{T}}}{E_{0.2,\mathrm{T}}} + \varepsilon_{0.2,\mathrm{T}} + \\ \left(0.02 - \varepsilon_{0.2,\mathrm{T}} - \dfrac{\sigma_{t2.0,\mathrm{T}}-\sigma_{0.2,\mathrm{T}}}{E_{0.2,\mathrm{T}}}\right)\times \\ \left(\dfrac{\sigma-\sigma_{0.2,\mathrm{T}}}{\sigma_{t2.0,\mathrm{T}}-\sigma_{0.2,\mathrm{T}}}\right)^{n'_T}, \sigma_{0.2,\mathrm{T}} < \sigma \leqslant \sigma_{u,\mathrm{T}} \end{cases} \tag{5}$$

表 6　热风钎焊S30403奥氏体不锈钢力学性能指标公式系数(高温下)

Tab.6　The equation parameters of mechanical properties of hot-air brazed S30403 austenitic stainless steel (at high temperatures)

α_*	T/℃	a	b
α_{E0}	20~500	1.010	−0.50
	500~900	1.210	−0.90
$\alpha_{\sigma 0.2}$	20~200	1.039	−1.95
	200~900	0.777	−0.64
$\alpha_{\sigma u}$	20~200	1.039	−1.95
	200~400	0.649	0
	400~900	1.101	−1.13
$\alpha_{\varepsilon u}$	20~200	1.044	−2.20
	200~400	0.604	0
	400~900	0.944	−0.85
α_{A0}	20~500	1.017	−0.85
	500~900	−0.343	−1.87

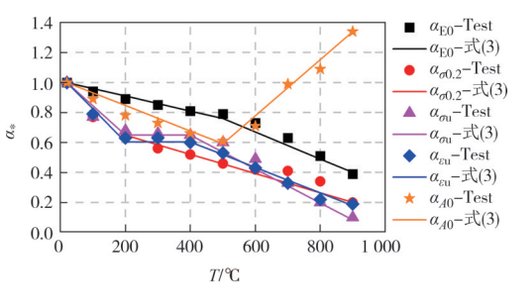


图 8　热风钎焊S30403奥氏体不锈钢力学性能试验结果及拟合曲线(高温下)

Fig.8　Comparation of test results and fitting curves of mechanical properties of hot-air brazed S30403 austenitic stainless steel (at high temperatures)

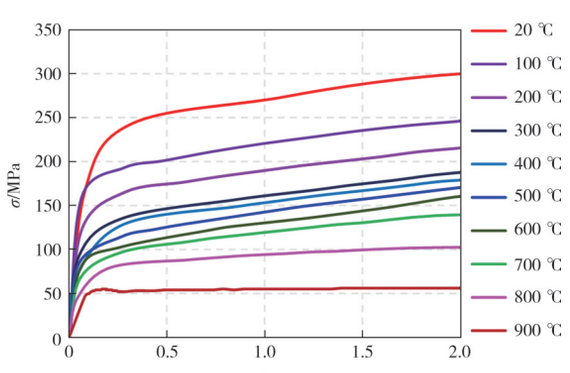


图 9　热风钎焊S30403奥氏体不锈钢的应力-应变曲线(高温)

Fig.9　Stress-strain curves of hot-air brazed S30403 austenitic stainless steel(at high temperatures)

式中:n_T、m_T、n'_T为温度T时的硬化指数.

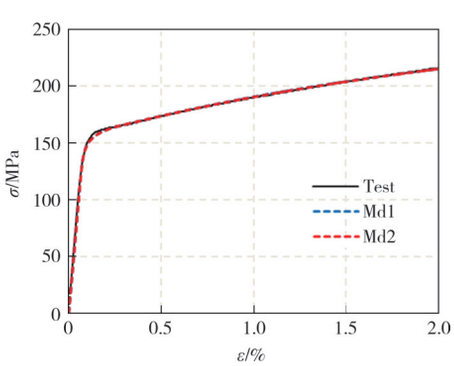
拟合指数及拟合情况如表 7、图 10 所示. Test、Md1 及 Md2 分别对应试验结果、式(4)和式(5). 限于篇幅,仅给出了部分试件的结果.

表 7　试件应力-应变模型的硬化指数(高温下)

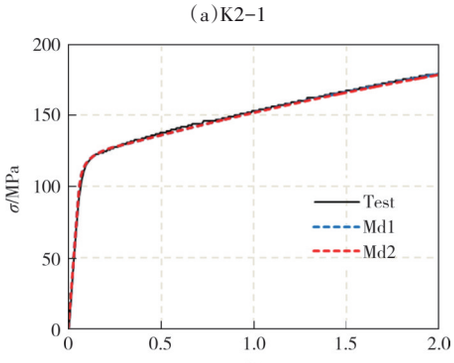
Tab.7　The hardening index of specimens stress-strain models (at high temperatures)

试件编号	T/℃	Rasmussen模型取值		Gardner模型取值	
		n_T	m_T	n_T	n'_T
K1-1	100	22.55	2.90	22.95	2.77
K1-2	100	22.93	2.79	22.93	2.69
K2-1	200	20.60	2.74	20.60	2.63
K2-2	200	20.67	2.65	20.67	2.54
K3-1	300	20.65	3.50	20.65	3.24
K3-2	300	20.56	3.48	20.56	3.27
K4-1	400	19.01	3.01	19.01	2.79
K4-2	400	18.51	3.24	18.51	3.01
K5-1	500	15.39	3.27	15.39	3.01
K5-2	500	15.01	3.43	19.19	3.23
K6-1	600	12.66	3.47	12.66	3.18
K6-2	600	12.62	3.29	12.62	3.15
K7-1	700	10.65	3.34	10.65	3.24
K7-2	700	10.23	3.04	10.23	2.88
K8-1	800	14.59	3.93	14.59	3.73
K8-2	800	14.47	2.96	14.47	2.66
K9-1	900	16.03	2.21	16.03	2.04
K9-2	900	15.70	1.78	15.70	1.57

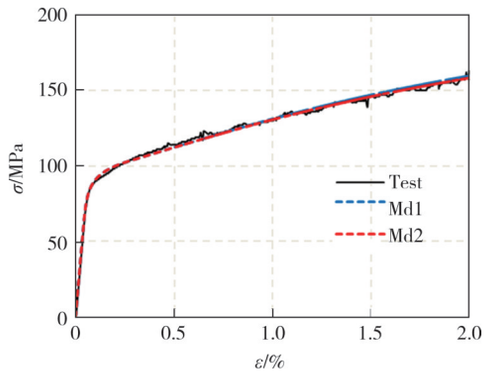
由图 10 可知,Rasmussen 模型和 Gardner 模型均可以准确地模拟热风钎焊 S30403 奥氏体不锈钢的高温本构关系. 由于 Rasmussen 模型较为简单,根据各试件拟合参数的均值给出参数取值,如表 8 所示.



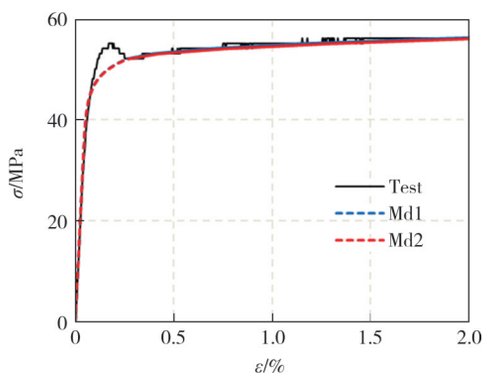
(a)K2-1



(b)K4-1



(c)K6-1



(d)K9-1

图 10 热风钎焊 S30403 奥氏体不锈钢的应力-应变试验结果与拟合模型对比(高温下)

Fig.10 Comparation of test results and fitting curves of stress-strain curves of hot-air brazed S30403 austenitic stainless steel (at high temperatures)

表 8 热风钎焊 S30403 奥氏体不锈钢的应力-应变模型的硬化指数(高温下)

Tab.8 The hardening exponent of hot-air brazed S30403 austenitic stainless steel stress-strain model (at high temperature)

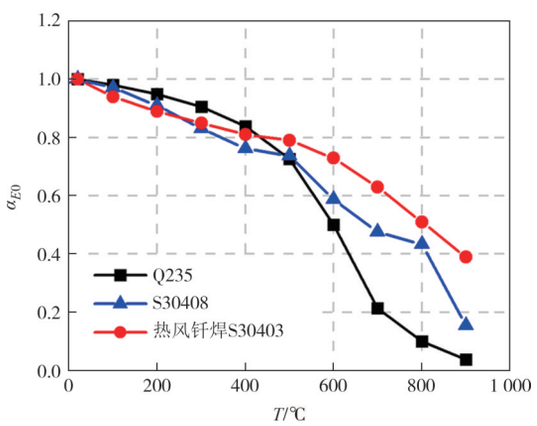
T/℃	Rasmussen 模型建议取值	
	n_T	m_T
20	22.25	2.43
100	22.74	2.845
200	20.635	2.695
300	20.605	3.49
400	18.76	3.125
500	15.2	3.35
600	12.64	3.38
700	10.44	3.19
800	14.53	3.445
900	15.865	1.995

其余温度下的参数可通过线性差值得到.

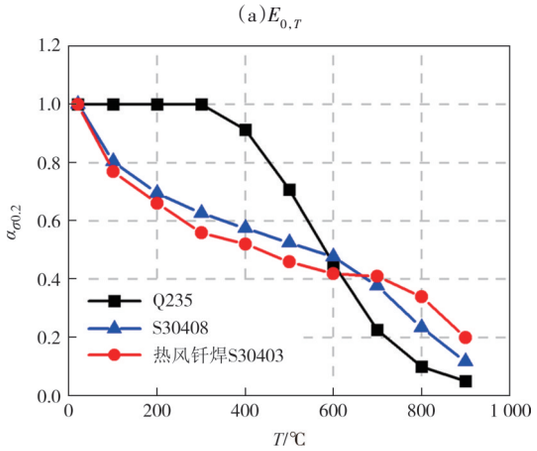
根据表 6、表 8 以及式(3)~式(5),可以得到不锈钢在任意温度下的应力-应变曲线.可以为热风钎焊不锈钢芯板的耐火试验研究提供数据和指导,同时可用于结构数值模拟分析.

3.5 与其他钢材高温下力学性能的比较

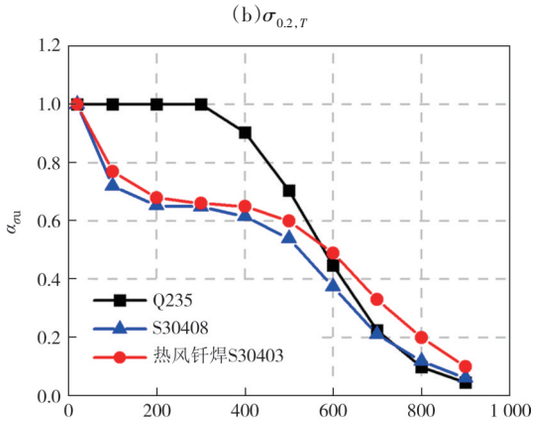
图 11 对比了热风钎焊 S30403 奥氏体不锈钢、国产 S30408 奥氏体不锈钢[15]、Q235 结构钢[22]的高温下力学性能参数变化情况.可知:



(a)$E_{0,T}$



(b)$\sigma_{0.2,T}$



(c)$\sigma_{u,T}$

图 11 热风钎焊 S30403 奥氏体不锈钢与其他钢材的力学性能比较(高温下)

Fig.11 Comparation of mechanical properties of hot-air brazed S30403 austenitic stainless steel and other steels (at high temperatures)

1)高温下热风钎焊S30403奥氏体不锈钢的高温下初始弹性模量变化趋势与Q235结构钢、S30408奥氏体不锈钢基本一致;温度高于500 ℃时,热风钎焊S30403奥氏体不锈钢的对应值较大.

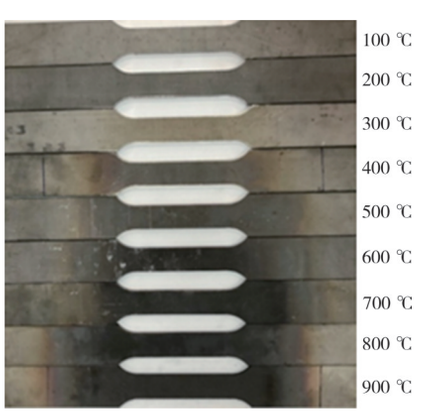
2)热风钎焊S30403奥氏体不锈钢在高温下屈服强度变化规律类似S30408奥氏体不锈钢,但是温度高于700 ℃时,热风钎焊S30403奥氏体不锈钢屈服强度高于S30408奥氏体不锈钢;温度低于600 ℃时,热风钎焊S30403奥氏体不锈钢屈服强度低于Q235结构钢,反之亦反.

3)热风钎焊S30403奥氏体不锈钢高温下极限强度变化规律类似S30408奥氏体不锈钢;与Q235结构钢的区别与屈服强度一致.

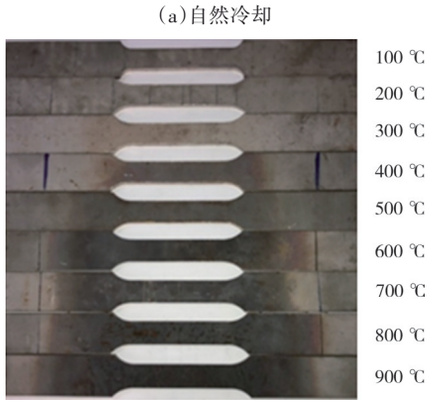
4　高温冷却后力学材性试验结果

4.1　试验现象

经高温冷却后,自然冷却和浸水冷却的试件的外观特征见图12. 可以看出,过火温度的升高导致试件碳化现象加重、表面颜色加深. 浸水冷却的试件碳化较自然冷却更严重,500 ℃以上浸水冷却试件的表面颜色更深.



(a)自然冷却



(b)浸水冷却

图12　试件外观特征(高温冷却后)

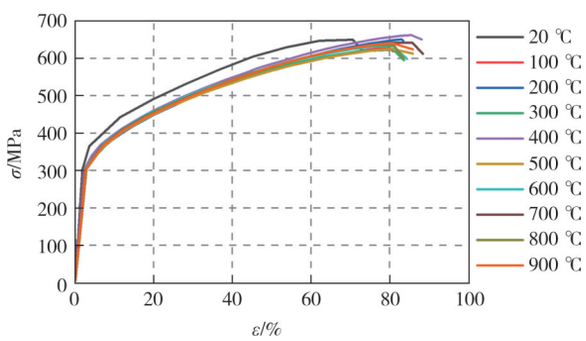
Fig.12　Apparent characteristics of specimens (after cooling from high temperature)

4.2　应力-应变曲线

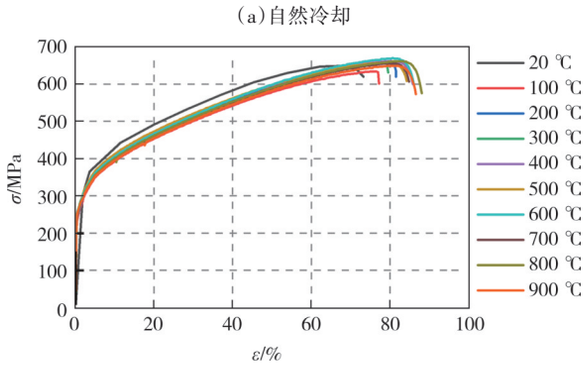
高温下自然冷却和浸水冷却后,热风钎焊S30403奥氏体不锈钢的应力-应变曲线如图13所示,具有以下特点:

1)高温冷却后不锈钢的应力-应变曲线呈现明显的非线性特性,没有观察到明显的屈服平台.

2)温度高低主要影响曲线后期. 高温下浸水冷却试件的极限强度相对较高,两种冷却方式下的延性较常温均有明显提高.



(a)自然冷却



(b)浸水冷却

图13　热风钎焊S30403奥氏体不锈钢的应力-应变曲线(高温冷却后)

Fig.13　The stress-strain curves of hot-air brazed S30403 austenitic stainless steel (after cooling from high temperature)

4.3　力学性能参数

表9和图14给出了采用不同冷却方式的高温冷却后热风钎焊S30403奥氏体不锈钢的各力学性能指标的变化系数及变化曲线,可以得出以下结论.

1)冷却方式对热风钎焊S30403奥氏体不锈钢的弹性模量的影响较大. 自然冷却的影响很小;浸水冷却时过火温度影响较大,低于200 ℃,弹性模量随过火温度升高略微增大,200~800 ℃范围内弹性模量

表 9 热风钎焊 S30403 奥氏体不锈钢力学性能变化系数(高温冷却后)

Tab.9 Variation coefficients of mechanical properties of hot-air brazed S30403 austenitic stainless steel (after cooling from high temperature)

T/℃	α_{E0}		$\alpha_{\sigma 0.2}$		$\alpha_{\sigma u}$		α_{A0}	
	自然冷却	浸水冷却	自然冷却	浸水冷却	自然冷却	浸水冷却	自然冷却	浸水冷却
20	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
100	1.00	1.01	0.96	0.96	0.99	0.99	1.05	1.01
200	1.00	1.02	0.94	0.98	0.99	1.01	1.04	1.04
300	0.98	0.91	0.96	0.99	1.00	1.02	1.09	1.08
400	1.03	0.86	0.98	1.00	1.01	1.02	1.16	1.09
500	1.00	0.88	0.94	1.00	0.98	1.02	1.19	1.09
600	1.01	0.83	0.96	0.99	0.99	1.04	1.14	1.13
700	1.02	0.83	0.96	0.98	0.99	1.02	1.18	1.14
800	0.97	0.76	0.93	0.94	0.98	1.02	1.13	1.15
900	0.95	0.88	0.93	0.94	1.00	1.00	1.19	1.18

不断降低,高于 800 ℃,弹性模量又有一定提高.

2)冷却方式对热风钎焊 S30403 奥氏体不锈钢的名义屈服强度有一定的影响.自然冷却时,过火温度的升高会导致名义屈服强度的减少;浸水冷却时,低于 700 ℃对应的名义屈服强度几乎没有变化,高于 700 ℃时,名义屈服强度开始减少.

3)无论是自然冷却还是浸水冷却,过火温度对材料的极限强度影响都较小.随着过火温度的增加,材料的极限伸长率逐渐提高.

4.4 与其他钢材高温冷却后力学性能的比较

为说明热风钎焊 S30403 奥氏体不锈钢高温冷却后的材性特点,将试验结果与 S30408 奥氏体不锈钢[16]、Q235 结构钢[19]进行对比,如图 15~图 17 所示.

1)对于所有钢材种类,无论采用哪种冷却方式,冷却后弹性模量均随过火温度升高而波动,且 S30403 奥氏体不锈钢的波动幅值最大;自然冷却条件下,过火温度高低产生的影响较小,而在浸水冷却条件下,过火温度高低产生的影响较大.

2)冷却方式对热风钎焊 S30403 奥氏体不锈钢和 S30408 奥氏体不锈钢高温冷却后屈服强度的影响不大,整体上随着温度升高屈服强度降低;而冷却方式对 Q235 结构钢屈服强度的影响是显著的.

3)冷却方式对热风钎焊 S30403 奥氏体不锈钢和 S30408 奥氏体不锈钢高温冷却后极限强度影响不大,整体上极限强度随着温度升高而增大;而冷却方式对 Q235 结构钢极限强度影响显著.

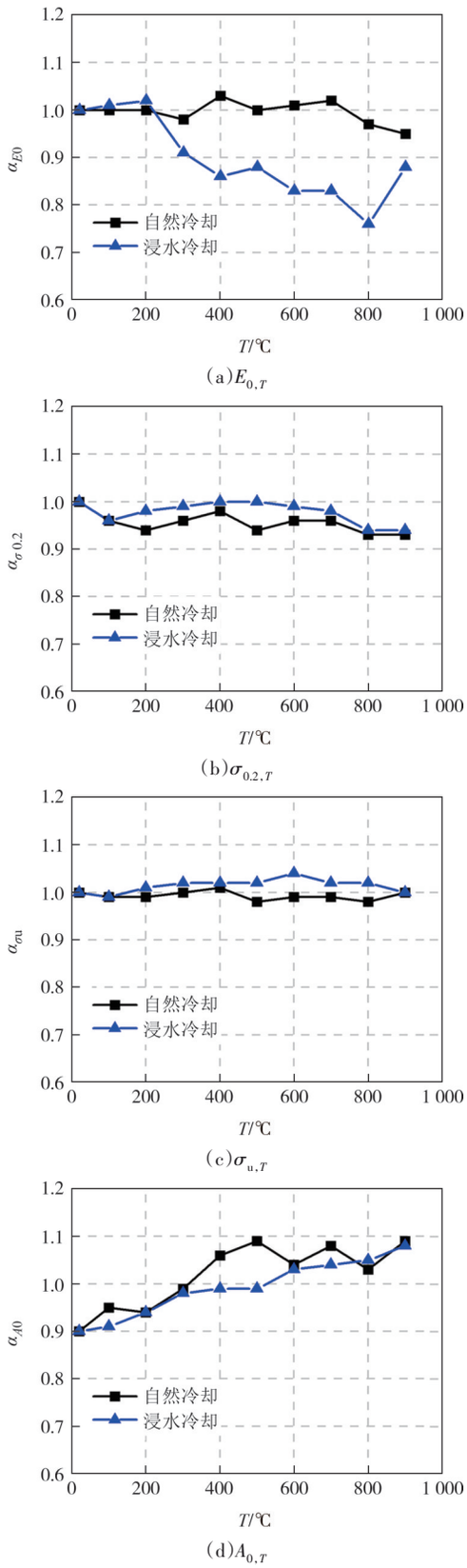
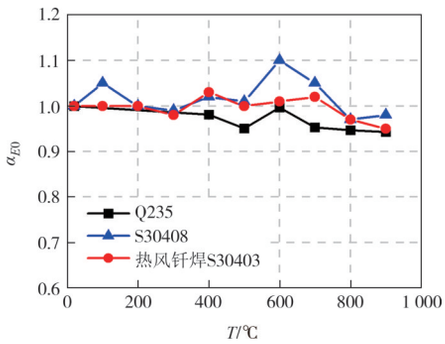
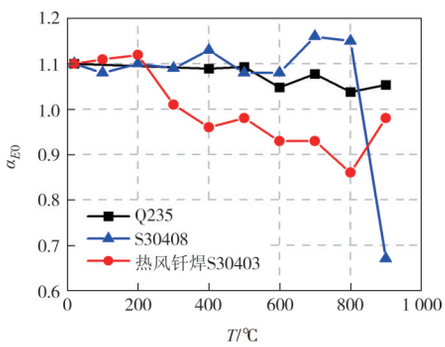


图 14 热风钎焊 S30403 奥氏体不锈钢力学性能变化曲线(高温冷却后)

Fig.14 Variation curves of mechahical properties of hot-air brazed S30403 austenitic stainless steel (after cooling from high temperature)



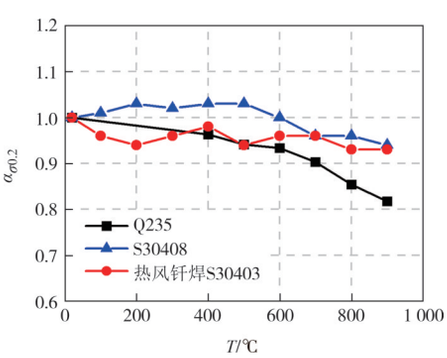
(a)自然冷却



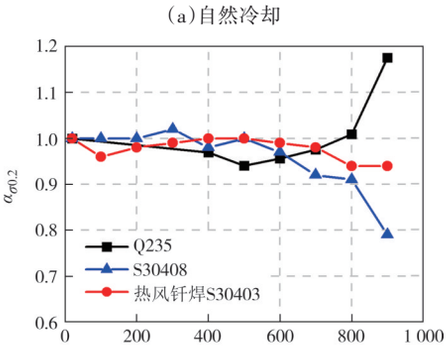
(b)浸水冷却

图 15　热风钎焊S30403奥氏体不锈钢与其他钢材的弹性模量(高温冷却后)

Fig.15　Elastic modulus of hot-air brazed S30403 austenitic stainless steel and other steels(after cooling from high temperature)



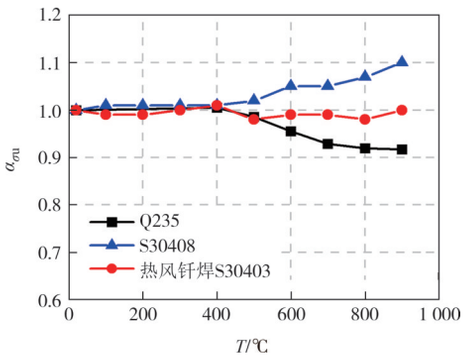
(a)自然冷却



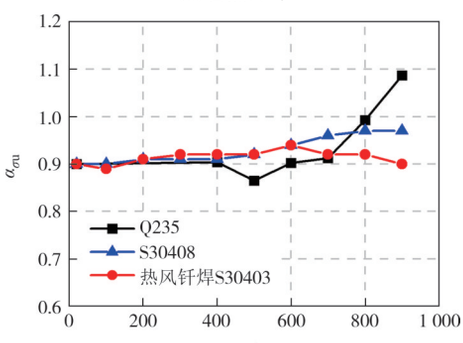
(b)浸水冷却

图 16　热风钎焊S30403奥氏体不锈钢与其他钢材的名义屈服强度(高温冷却后)

Fig.16　Nominal yield strength of hot-air brazed S30403 austenitic stainless steel and other steels (after cooling from high temperature)



(a)自然冷却



(b)浸水冷却

图 17　热风钎焊S30403奥氏体不锈钢与其他钢材的极限强度(高温冷却后)

Fig.17　Ultimate strength of hot-air brazed S30403 austenitic stainless steel and other steels(after cooling from high temperature)

5　结 论

1)常温下,热风钎焊后S30403奥氏体不锈钢的拉伸应力-应变曲线呈现典型的非线性特征,与未热风钎焊的S30403奥氏体不锈钢相比,前期基本重合,后期差异明显.热风钎焊工艺对S30403奥氏体不锈钢的弹性模量、极限强度几乎没有影响;但是会降低屈服强度17%,提高极限伸长率5%.

2)在高温下,经过热风钎焊后的S30403奥氏体不锈钢材料具有典型的非线性拉伸应力-应变曲线.随着温度的升高,热风钎焊S30403奥氏体不锈钢的弹性模量和屈服强度不断降低,在900 ℃时,分别为常温条件下的39%和20%;高温下极限强度和极限应变整体随温度升高而下降,200~400 ℃时出现屈服平台;当温度达到900 ℃时,极限强度和极限应变分别为常温时的10%和19%.

3)高温冷却后,经过热风钎焊的S30403奥氏体不锈钢没有明显的屈服平台.自然冷却对经过热风钎焊的S30403奥氏体不锈钢的力学性能几乎没有

影响.浸水冷却影响较大,在过火温度低于800 ℃时,浸水冷却会降低弹性模量,提高延性.

4)建立了热风钎焊S30403奥氏体不锈钢高温下弹性模量、名义屈服强度、抗拉强度、断后伸长率的计算模型,与试验曲线对比结果说明模型精度较高.

5)给出了改进后的Rasmussen模型和Gardner模型,都能较为精确地模拟热风钎焊S30403奥氏体不锈钢常温及高温下应力-应变曲线.

参考文献

[1] 埃斯科·米耶蒂宁.不锈钢与建筑[M].王爱英,李伟,译.天津:天津大学出版社,2004.
MIETTINEN E. Stainless steel in architecture[M]. translate by WANG A Y, LI W. Tianjin: Tianjin University Press, 2004.(in Chinese)

[2] 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 F X, HOU R M, JIA X B. Properties and selection of stainless steel[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2013.(in Chinese)

[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):1-12.
WANG Y Q, YUAN H X, SHI Y J, et al. A review of current applications and research of stainless steel structure[J]. Steel Construction, 2010, 25(2):1-12.(in Chinese)

[4] RASMUSSEN K J R. Full-range stress-strain curves for stainless steel alloys[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2003, 59(1): 47-61.

[5] 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): 634-647.

[6] GARDNER L, NETHERCOT D A. Structural stainless steel design: a new approach[J]. Structural Engineer, 2004, 82(21): 21-28.

[7] ELLOBODY E. Composite slim floor stainless steel beam construction exposed to different fires[J]. Engineering Structures, 2012, 36: 1-13.

[8] SAKUMOTO Y, NAKAZATO T, MATSUZAKI A. High-temperature properties of stainless steel for building structures[J]. Journal of Structural Engineering, 1996, 122(4): 399-406.

[9] CHEN J, YOUNG B. Stress-strain curves for stainless steel at elevated temperatures[J]. Engineering Structures, 2006, 28(2): 229-239.

[10] TO E C, YOUNG B. Performance of cold-formed stainless steel tubular columns at elevated temperatures [J]. Engineering Structures, 2008, 30(7): 2012-2021.

[11] FENG R, YOUNG B. Design of cold-formed stainless steel tubular joints at elevated temperatures[J]. Engineering Structures, 2012, 35: 188-202.

[12] LOPES N, VILA REAL P, SIMÕES DA SILVA L, et al. Numerical analysis of stainless steel beam-columns in case of fire[J]. Fire Safety Journal, 2012, 50: 35-50.

[13] ELLOBODY E. A consistent nonlinear approach for analysing steel, cold-formed steel, stainless steel and composite columns at ambient and fire conditions[J]. Thin-Walled Structures, 2013, 68: 1-17.

[14] 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):1983-1989.
CHEN J, JIN W L, YANG L W. Behaviour of constructional stainless steel at elevated temperatures[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2008, 42(11): 1983-1989.(in Chinese)

[15] 范圣刚,郑家珥,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):167-176.
FAN S G, ZHENG J C, SUN W J, et al. Experimental investigation on mechanical properties of S30408 austenitic stainless steel at elevated temperatures[J]. Engineering Mechanics, 2017, 34(4): 167-176.(in Chinese)

[16] 范圣刚,张岁寒,孟畅. 高温冷却后奥氏体不锈钢力学性能试验研究[J].浙江大学学报(工学版),2017,51(12):2348-2354.
FAN S G, ZHANG S H, MENG C. Experimental investigation on mechanical properties of austenitic stainless steel with elevated temperature cooling [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2017, 51(12): 2348-2354.(in Chinese)

[17] 郭兆军,王兴强,李伟. 高温后铁素体不锈钢力学性能试验[J]. 建筑科学,2017,33(7):67-70.
GUO Z J, WANG X Q, LI W. Experiment on mechanical properties of ferritic stainless steel after exposure to elevated temperatures [J]. Building Science, 2017, 33(7): 67-70.(in Chinese)

[18] 赵越. 钎焊技术及应用[M]. 北京:化学工业出版社,2004.
ZHAO Y. Brazing technology and its application[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004.(in Chinese)

[19] 陈建锋,曹平周.高温后结构钢力学性能试验[J].解放军理工大学学报(自然科学版),2010,11(3):328-333.
CHEN J F, CAO P Z. Experimental investigation into mechanical properties of steel post high temperatures [J]. Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2010, 11(3): 328-333.(in Chinese)

[20] 金属材料 拉伸试验 第1部分:室温试验方法:GB/T 228.1—2021[S].北京:中国标准出版社,2021.
Metallic materials—Tensile testing—Part 1: method of test at room temperature: GB/T 228.1—2021 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2021.(in Chinese)

[21] 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,2016.
Metallic materials—Tensile testing—Part 2: method of test at elevated temperature: GB/T 228.2—2015[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.(in Chinese)

[22] 建筑钢结构防火技术规范:GB 51249—2017[S].北京:中国计划出版社,2018.
Technical code for fire protection of building steel structures: GB 51249—2017[S]. Beijing: China Planning Press, 2018.(in Chinese)

[23] 朱学仪.钢材热处理手册[M].北京:中国标准出版社,2007.
ZHU X Y. Handbook of steel heat treatment [M]. Beijing: Standards Press of China, 2007.(in Chinese)