

# 盐水冷却对 S36950 不锈钢力学性能的影响

张铮<sup>1</sup>, 黄晓明<sup>1</sup>, 余鑫<sup>2</sup>

(1. 福建理工大学 土木工程学院, 福建 福州 350118;

2. 福州大学 土木工程学院, 福建 福州 350108)

**摘要:** 为考察盐水冷却对 S36950 不锈钢高温后力学性能的影响, 选取普通 S30408 不锈钢为参考对象进行了不同温度工况冷却后两类不锈钢的拉伸试验, 获取高温盐水冷却后其力学性能指标(弹性模量、名义屈服强度、抗拉极限强度、断后伸长率等)的变化规律, 与同类型钢材采用普通水冷却的既有高温后试验结果对比。结果表明, 盐水冷却后两类不锈钢表面均出现了明显的腐蚀现象; 盐水冷却使得两类不锈钢在敏化温度段(600~800 °C)的高温后弹性模量与延伸率有所波动; 采用盐水冷却的两类不锈钢高温后强度均较普通水冷却有所下降, 且 S36950 不锈钢的屈服与极限强度在 800 °C 高温后下降显著。基于试验结果修正了既有不锈钢高温后本构模型, 提高了其对盐水冷却的 S36950 不锈钢高温后应力-应变关系的预测精度。

**关键词:** 奥氏体不锈钢; 高温后; 盐水冷却; 力学性能; 本构模型

中图分类号: TU398

文献标志码: A

文章编号: 1672-4348(2023)04-0307-07

## Effect of brine cooling on mechanical properties of S36950 stainless steel

ZHANG Zheng<sup>1</sup>, HUANG Xiaoming<sup>1</sup>, YU Xin<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China;

2. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

**Abstract:** In order to investigate the effect of brine cooling on the mechanical properties of S36950 stainless steel after high temperature, the tensile test of two kinds of stainless steel after cooling at different temperature conditions was carried out by selecting ordinary S30408 stainless steel as the reference object. The variation law of mechanical properties (elastic modulus, nominal yield strength, tensile ultimate strength, elongation after fracture, etc.) after high temperature brine cooling was obtained, which was compared with the existing high temperature test results of the same type of steel cooled by ordinary water. Results show that obvious corrosion appeared on the surface of two kinds of stainless steel after brine cooling. The elastic modulus and elongation of the two types of stainless steels fluctuated after high temperature in the sensitization temperature range (600~800 °C) due to brine cooling. The strength of the two types of stainless steel cooled by brine after high temperature was lower than that of ordinary water cooling, and the yield and ultimate strength of S36950 stainless steel decreased significantly after such high temperature as 800 °C. At last, the existing stress-strain constitutive model of stainless steel after elevated temperatures was modified based on current test data, to achieve a better prediction accuracy for S36950 stainless steel after elevated temperatures with brine cooling.

**Keywords:** austenitic stainless steel; post-high temperature exposure; brine cooling; mechanical properties; constitutive model

不锈钢因耐腐蚀性好、力学性能优良及全寿命周期成本低等优点, 逐渐应用于服役环境严苛

的各工程结构<sup>[1]</sup>。鉴于其非线性特征, 国内外学者针对其常温下力学性能开展了大量研究并提出

了适用的应力-应变关系模型<sup>[2-3]</sup>。高温下不锈钢力学性能的研究表明,不锈钢较碳钢具有更好的耐火性能<sup>[4]</sup>。Tao 等<sup>[5]</sup>发现奥氏体不锈钢高温后的塑性和强度优于碳钢,并提出了其高温后的应力-应变关系模型。

Ni 是稳定不锈钢中奥氏体组织的重要元素并可改善其耐腐蚀性和韧性,但昂贵的 Ni 增加了不锈钢成本。以 N 代替 Ni 在稳定不锈钢奥氏体组织的同时,还可提高其强度与耐腐蚀性<sup>[6]</sup>。奥氏体不锈钢 S36950 作为一种新型高 N 节 Ni 钢,在不降低相关性能的前提下大幅提高了钢材强度并有效降低了成本<sup>[7]</sup>。然而高 N 节 Ni 易导致不锈钢中奥氏体晶粒尺寸增加并降低其热塑性<sup>[8]</sup>。既有研究发现浸水冷却较自然冷却方式对 S36950 不锈钢的高温后强度影响较大<sup>[9]</sup>。

不锈钢多应用于滨海或离岸海洋环境,遭遇火灾时往往就近取海水灭火,海水中的氯离子是否对火灾后不锈钢造成复合损伤尚不明确。同时在炼油、航空航天和能源等领域,对钢材的高温稳定性和耐久性要求较高,研究盐水冷却的效果可以帮助改进材料的选择和冷却系统的设计。鉴于

此,本文以 S36950 不锈钢为研究对象,对比 S30408 不锈钢以探究盐水冷却方式对高温后 S36950 不锈钢力学性能的影响,并分析既有高温后不锈钢应力-应变关系模型的适用性,以期为不锈钢的实际应用提供参考。

## 1 试验概况

### 1.1 试件制作

选用奥氏体不锈钢 S36950 和 S30408 制作拉伸试件,两类不锈钢均取自热轧酸洗后的 4 mm 厚不锈钢板且均沿钢板轧制方向以线切割取件,其化学成分列于表 1。由表 1 可见,S36950 不锈钢的 Cr 含量与 S30408 不锈钢相当,但显著降低了 Ni 含量,同时 Mn、Cu 及 N 元素的增加不仅稳定了 S36950 不锈钢的奥氏体组织,还提高了强度及耐酸蚀能力。

试件尺寸按照 GB/T 228.1-2010《金属材料拉伸试验:第 1 部分:室温试验方法》<sup>[10]</sup>中相关规定设计,尺寸如图 1 所示。根据试验设计的历受温度,两类钢材的拉伸试件均被分为 9 个温度组,每组设置 3 个平行试件,总计 54 个。

表 1 S36950 与 S30408 不锈钢的化学成分

Tab.1 Chemical composition of S36950 and S30408 stainless steel

钢种	w/%									
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	N	P	S	
S36950	0.07	0.45	6.4	18.15	3.0	1.66	0.26	0.04	0.001 5	
S30408	0.05	0.39	1.1	18.25	8.1	0.04	0.05	0.03	0.003 5	

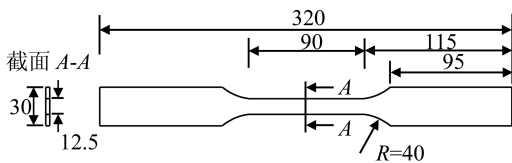


图 1 拉伸试件尺寸(单位:mm)

Fig.1 Dimensions of tensile test piece (unit: mm)

### 1.2 试验过程

采用马弗炉对试件进行升温试验。温度设置分别为 400、500、600、650、700、800、1 000 及 1 200 °C。试件以 20 °C/min 的速率升温至指定温度,并在炉内保温 120 min 以均匀受热。随后将试件移入  $w_{\text{氯化钠}}$  为 5% 的水中冷却 30 min 至室温后取出,晾干并放置 14 d,观察试件的表观特征变化情况。

采用 SANS 万能试验机进行拉伸试验,试件平直段设置电阻应变片(纵横各 2 片)及初始标距为 50 mm 的引伸计以测量试件在加载过程中的应变及纵向相对变形。加载采用位移控制,前期以 1 mm/min 的速率加载至 0.02 应变,后以 4 mm/min 的速率加载直至试件断裂。

## 2 试验结果

### 2.1 表观特征

图 2 对比了两类不锈钢试件经盐水冷却并于室温静置 14 d 后的表观特征。随着历受温度的提高,两类试件的表观颜色逐渐由金色转为褐色并加深,且均在 1 000 °C 高温后出现了不同程度

的表面碳化现象,这是因为不锈钢表面的 Si、Mn、Cr 等元素在高温下发生了不同程度的氧化。同时可见两类不锈钢试件表面均发生了局部腐蚀,且局部腐蚀范围随历受温度提高而扩大。对比两类不锈钢发现 S30408 不锈钢在 650~800 °C 温度区间腐蚀更严重,这是因为在该温度段易发生敏化,不锈钢内 Cr 碳化物的析出会导致晶界处的 Cr 元素减少进而降低晶界处的耐蚀性能。而 S36950 不锈钢中高含量的 N 元素抑制了 Cr 碳化物的形核进而改善了耐蚀性能<sup>[7]</sup>。

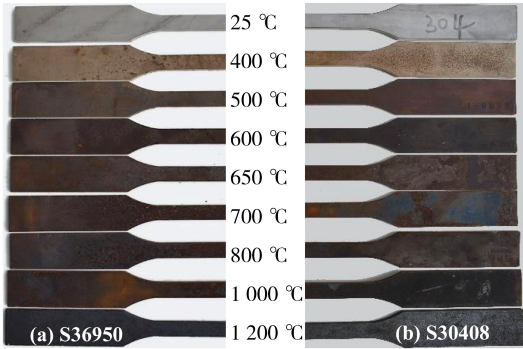


图2 盐水冷却的高温后试件外观特征

Fig.2 Appearance characteristics of specimens after high temperatures with brine cooling

## 2.2 断口形貌

两类不锈钢的断口形态没有明显区别,如图3

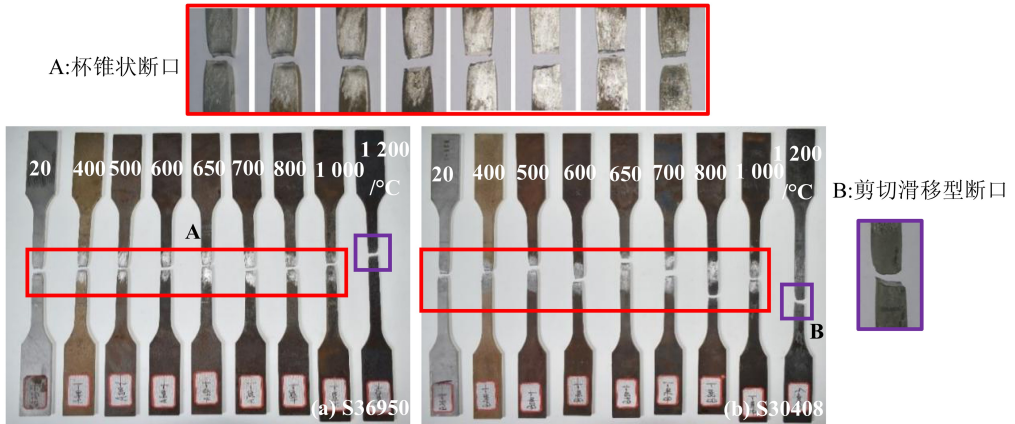


图3 两类不锈钢拉伸试件的断裂状态

Fig.3 Fractures of tensile test pieces for two types of stainless steel

## 2.4 高温后的力学性能变化

根据高温后应力-应变关系曲线可获得不锈钢各力学性能指标,平均值列于表2。其中  $T$  是历受温度、 $E_T$  为弹性模量、 $f_{yT}$  为钢材 0.002 残余应变时应力作为屈服强度、 $\delta_T$  为断后伸长率、 $n_T$  为应变硬化系数、 $f_{uT}$  和  $\varepsilon_{uT}$  分别为极限强度和

所示。断裂后试件的塑性变形与断口缩颈明显,属于典型的韧性断裂。韧性断裂根据断口的形状可分为杯锥状与剪切滑移型断口,而杯锥状断口在其形成过程中能吸收较多的能量所以韧性更高;盐水冷却的高温后试件的韧性断裂性能随历受温度提高而逐渐减弱。在 1000 °C 前两类不锈钢均表现为杯锥状破坏,而历受 1200 °C 高温后试件碳化严重导致断口表现为剪切状。在相同历受温度下对比同类不锈钢拉伸试件的断口特征发现盐水冷却对断口形态没有明显影响<sup>[9]</sup>。

## 2.3 高温后应力-应变关系曲线

图4给出了两类不锈钢典型的高温后应力-应变关系曲线,其中应变由应变片与引伸计数据综合确定。可见盐水冷却的两类不锈钢高温后应力-应变关系曲线仍呈现出典型的非线性特征,但是其曲线形状、强度及延伸率等随历受温度升高而变化。800 °C 前 S36950 不锈钢的应力-应变关系曲线较为接近,而 S30408 不锈钢的曲线则在 600 °C 前变化不大。但 S30408 不锈钢应力-应变曲线在 0.1~0.3 的应变范围内存在一段明显的塑性波动,而文献报道的同类不锈钢普通水冷的高温后试件并未出现此类现象<sup>[11]</sup>。这可能是因为盐水中氯离子的侵蚀作用导致高温后不锈钢晶粒间位错堆积<sup>[7]</sup>。1000 °C 后两类不锈钢均出现了强度降低与断裂应变增大的现象。

对应的极限应变。20 °C 时的 S36950 不锈钢的屈服强度约为 S30408 不锈钢的 1.3 倍。为探究盐水冷却对高温后 S36950 不锈钢力学性能的影响,引用文献报道的高温后浸水冷却的 S36950 不锈钢<sup>[9]</sup> 与 S30408 不锈钢<sup>[11]</sup> 的试验结果进行对比分析。

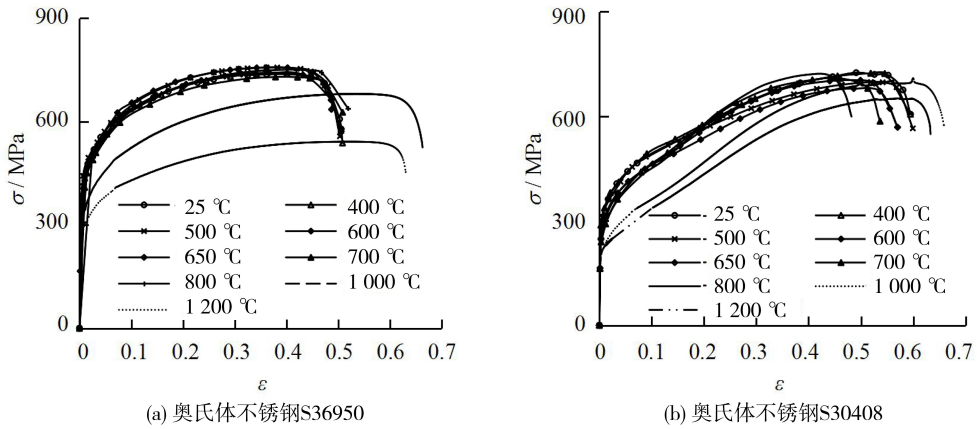


图 4 高温后不锈钢的应力-应变关系曲线

Fig.4 Stress-strain curves of stainless steel after high temperature exposure

表 2 高温盐水冷却后不锈钢力学性能

Tab.2 Mechanical properties of stainless steel after high temperature with brine cooling

T/°C	S36950						S30408					
	$E_T$ /GPa	$f_{yT}$ /MPa	$f_{uT}$ /MPa	$\epsilon_{uT}$	$\delta_T$ /%	$n_T$	$E_T$ /GPa	$f_{yT}$ /MPa	$f_{uT}$ /MPa	$\epsilon_{uT}$	$\delta_T$ /%	$n_T$
20	186.4	409.4	752.8	0.392	52.3	6.9	184.6	295.2	725.0	0.504	61.3	4.8
400	185.8	404.5	739.1	0.376	50.9	7.4	186.9	299.1	710.7	0.526	61.1	7.0
500	184.3	419.1	757.1	0.371	50.8	8.7	181.7	287.0	694.9	0.523	59.6	5.4
600	175.9	391.0	758.0	0.364	45.6	5.8	188.2	259.1	683.8	0.503	56.6	4.3
650	172.0	373.3	734.7	0.386	48.7	5.2	182.3	253.0	710.0	0.462	55.8	4.4
700	165.2	351.6	721.9	0.392	49.9	5.1	180.5	235.4	702.8	0.441	50.6	4.3
800	182.6	377.6	753.6	0.399	47.7	5.8	185.7	221.9	707.4	0.423	50.5	3.9
1 000	178.8	301.9	675.7	0.533	66.2	4.9	171.5	195.5	710.1	0.558	64.6	4.6
1 200	169.7	224.1	542.5	0.532	60.3	4.5	173.4	185.5	652.7	0.561	60.9	5.8

2.4.1 弹性模量

各类不锈钢高温后弹性模量( $E_T$ )与其 20 °C 时弹性模量( $E_{20}$ )的比值随历受温度的变化情况如图 5 所示。高温后 S36950 与 S30408 两类不锈钢的弹性模量随历受温度的升高而略有降低。而盐水冷却的两类不锈钢高温后弹性模量在 600~800 °C 的历受温度区间出现了明显的下降,采用普通水冷的不锈钢未出现此现象。这是因为不锈钢在该温度区间的“敏化”效应,敏化容易导致不锈钢晶界处析出以  $Cr_{23}C_6$  为主的碳化物进而降低不锈钢的耐腐蚀性<sup>[7]</sup>,使得盐水冷却后不锈钢在该温度区段因腐蚀而导致弹性模量出现下降。对比盐水冷却的两类不锈钢,可见在“敏化”效应作用温度区间内,S36950 表现出更大的弹性模量降低幅度。这是因为  $Cr_2N$  的析出敏感性随着 N

元素的增加而增加<sup>[12]</sup>,从而导致 S36950 的弹性模量较 S30408 下降幅度更大。

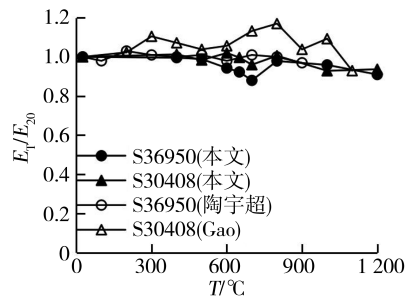


图 5  $E_T/E_{20}$  随历受温度  $T$  变化情况

Fig.5 Variation of  $E_T/E_{20}$  with the temperature  $T$

2.4.2 屈服强度

图 6 对比了各类不锈钢高温后屈服强度( $f_{yT}$ )与 20 °C 时屈服强度( $f_{y20}$ )的比值随历受温度的变化情

况。可见盐水冷却后 S30408 不锈钢屈服强度的折减幅度要高于 S36950 不锈钢,这归因于高温后 S36950 不锈钢晶界有氮化物析出进而阻碍了晶界的相对滑动,从而在一定程度上提高了不锈钢的屈服强度<sup>[8]</sup>。特别是 S36950 不锈钢的屈服强度在 800 °C 高温后有所恢复,这是因为该类不锈钢因敏化所致的晶间腐蚀敏感性在 800 °C 时明显降低使得其力学性能有所恢复<sup>[7]</sup>。对比冷却方式发现盐水冷却对其屈服强度的影响更不利,采用盐水冷却的两类不锈钢,在 600 °C 高温后的屈服强度下降幅度要高于采用普通水冷的相应钢种。这是因为高温后不锈钢的晶粒有所增大且晶界有相应碳化物析出,更易受盐水中氯离子的腐蚀进而降低其力学性能。

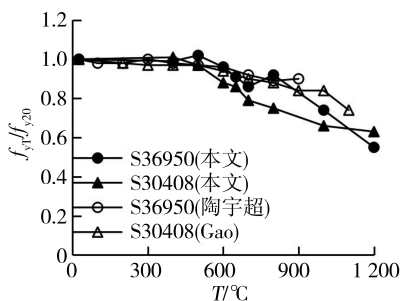


图6  $f_{yT}/f_{y20}$  随历受温度  $T$  变化情况

Fig.6 Variation of  $f_{yT}/f_{y20}$  with the temperature  $T$

### 2.4.3 极限强度

各类不锈钢高温后抗拉极限强度 ( $f_{uT}$ ) 与 20 °C 时极限强度 ( $f_{u20}$ ) 的比值随历受温度的变化情况如图 7 所示。当历受温度低于 800 °C, 普通水与盐水冷却对两类不锈钢极限强度的影响不大, 但当历受温度超过 800 °C 时, 采用盐水冷却的不锈钢其极限强度的折减幅度明显增大。特别是采用盐水冷却的 S36950 不锈钢在历受温度超过 800 °C 后, 其极限强度下降幅度较 S30408 显著, 这是因为二者 Ni 元素含量的差异导致金属原子间结合力不同, 以及 N 元素的晶粒尺寸强化作用随历受温度升高而减弱<sup>[7]</sup>。

### 2.4.4 延伸率

高温后各类不锈钢的延伸率 ( $\delta_T$ ) 与其 20 °C 时延伸率 ( $\delta_{20}$ ) 的比值随历受温度的变化情况如图 8 所示。与普通水冷却不同, 采用盐水冷却的两类不锈钢在其“敏化”温度段的延伸率出现了较明显的波动, 这是因为敏化效应导致不锈钢形成晶间贫 Cr 区进而使得其塑性下降<sup>[6]</sup>。同时盐水冷却的两类不锈钢延伸率在 1 000 °C 高温后均呈现出明显的提高。这是因为 1 000 °C 高温已脱离不锈钢的

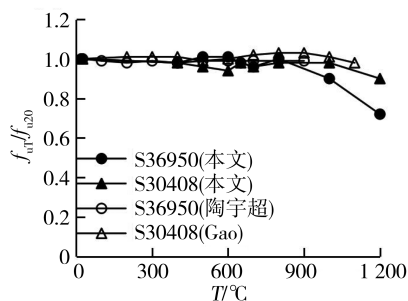


图7  $f_{uT}/f_{u20}$  随历受温度  $T$  变化情况

Fig.7 Variation of  $f_{uT}/f_{u20}$  with the temperature  $T$

敏化温度段使得塑性有所恢复, 但 1 000 °C 后随着温度再升高导致不锈钢碳化严重使得延伸率又有所下降。对比盐水冷却后两类不锈钢高温后延伸率的变化情况可以发现, 历受温度低于 600 °C 时, S30408 的高温后延伸率高于 S36950 不锈钢, 但当历受温度超过 600 °C 后, S36950 不锈钢的延伸率要优于 S30408。这是因为 S36950 不锈钢中添加的 Mn 元素对其高温后塑性有明显的改善作用<sup>[13]</sup>。

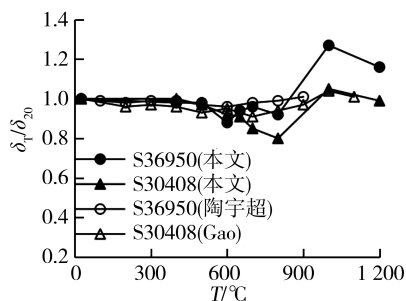


图8  $\delta_T/\delta_{20}$  随历受温度  $T$  变化情况

Fig.8 Variation of  $\delta_T/\delta_{20}$  with temperature  $T$

## 3 高温后应力-应变关系模型

Tao 等<sup>[5]</sup> 提出了具有峰值后下降段的高温后不锈钢应力-应变关系模型 (下文简称 Tao 模型), 模型的应力-应变关系如下:

$$\varepsilon = \begin{cases} \frac{\sigma}{E_T} + 0.002 \left( \frac{\sigma}{f_{yT}} \right)^{n_T} & \sigma \leq f_{yT} \\ 0.002 + \frac{f_{yT}}{E_T} + \frac{\sigma - f_{yT}}{E_{yT}} + \varepsilon_{upT} \left( \frac{\sigma - f_{yT}}{f_{uT} - f_{yT}} \right)^{m_T} & f_{yT} < \sigma \leq f_{uT} \\ \varepsilon_{uT} + (\varepsilon_{iT} - \varepsilon_{uT}) \left( \frac{\sigma - f_{uT}}{f_{iT} - f_{uT}} \right)^p & f_{uT} > \sigma \geq f_{iT} \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中:  $E_T$  为弹性模量, GPa;  $f_{yT}$  为屈服强度, MPa;  $f_{uT}$  为极限强度, MPa;  $\varepsilon_{uT}$  为极限应变;  $n_T$  为应

变硬化系数。由于盐水冷却对高温后 S36950 不锈钢的弹性模量影响不大,如图 9(a)所示,可沿用 Tao 模型的相关推荐公式。同时由图 9(b-e)

可知 Tao 模型对 800 °C 高温前 S36950 不锈钢的  $f_{yT}$ 、 $f_{uT}$ 、 $\varepsilon_{uT}$  及  $n_T$  的预测较为准确,而对其 800 °C 高温后的预测误差较大。

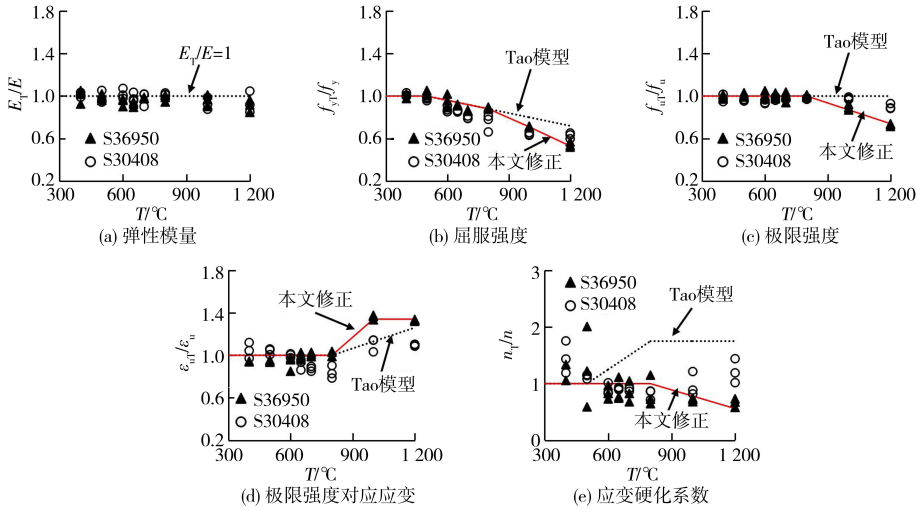


图 9 模型参数修正

Fig.9 Modification of model parameters

根据既有试验数据对相关参数表达式进行修正,修正后的相关表达式如下:

$$\frac{n_T}{n} = \begin{cases} 1 & T \leq 800 \text{ } ^\circ\text{C} \\ 1 - 1.1 \times 10^{-3}(T - 800) & 800 \text{ } ^\circ\text{C} < T \leq 1200 \text{ } ^\circ\text{C} \end{cases} \quad (5)$$

$$\frac{f_{yT}}{f_y} = \begin{cases} 1 & T \leq 500 \text{ } ^\circ\text{C} \\ 1 - 4 \times 10^{-4}(T - 500) & 500 \text{ } ^\circ\text{C} < T \leq 800 \text{ } ^\circ\text{C} \\ 0.88 - 7.5 \times 10^{-4}(T - 800) & 800 \text{ } ^\circ\text{C} < T \leq 1200 \text{ } ^\circ\text{C} \end{cases} \quad (2)$$

模型其余参数: $p$  为应变软化系数; $m_T$  为屈服阶段应变硬化系数; $\varepsilon_{upT}$  为屈服阶段极限应变; $E_{yT}$  为屈服阶段弹性模量, GPa;下降段相关指标( $f_{rT}$ ,  $\varepsilon_{rT}$  及  $E_{rT}$ ) 的计算方法详见文献[5]。图 10 表明,修正后 800 °C 高温后的模型有较大改善,具有更高的预测精度。

$$\frac{f_{uT}}{f_u} = \begin{cases} 1 & T \leq 800 \text{ } ^\circ\text{C} \\ 1 - 6.5 \times 10^{-4}(T - 800) & 800 \text{ } ^\circ\text{C} < T \leq 1200 \text{ } ^\circ\text{C} \end{cases} \quad (3)$$

$$\frac{\varepsilon_{uT}}{\varepsilon_u} = \begin{cases} 1 & T \leq 800 \text{ } ^\circ\text{C} \\ 1 + 1.7 \times 10^{-3}(T - 800) & 800 \text{ } ^\circ\text{C} < T \leq 1000 \text{ } ^\circ\text{C} \\ 1.34 & 1000 \text{ } ^\circ\text{C} < T \leq 1200 \text{ } ^\circ\text{C} \end{cases} \quad (4)$$

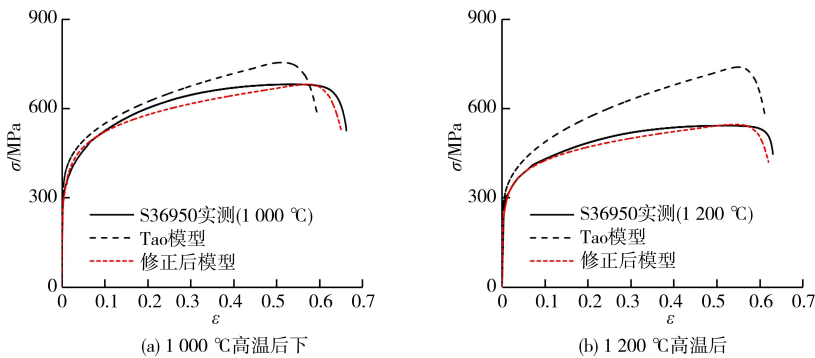


图 10 S36950 不锈钢采用修正后模型的预测曲线与试验曲线对比

Fig.10 Comparison between predicted curves with modified model and test curves for S36950 stainless steel

## 4 结论

1) 不锈钢敏化效应使得盐水冷却的 S36950 与 S30408 不锈钢在 600~800 °C 高温后的弹性模量及延伸率较普通水冷有所下降。

2) 盐水冷却使得高温后不锈钢的强度较普

通水冷有所下降,特别是 800 °C 高温后采用盐水冷却的 S36950 不锈钢屈服与极限强度显著折减。

3) 基于试验数据修正了 Tao 等提出的高温后不锈钢应力-应变模型,以提高模型对采用盐水冷却的 S36950 不锈钢高温后力学性能的预测精度。

## 参考文献:

- [1] 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):1-12,18.
- [2] RASMUSSEN K J R. Full-range stress-strain curves for stainless steel alloys[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2003,59(1):47-61.
- [3] 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):1231-1234,1240.
- [4] 楼国彪,杨未,陈武龙,等. S32001 双相型不锈钢高温力学性能试验[J]. 同济大学学报(自然科学版),2022,50(6):831-840.
- [5] TAO Z, WANG X Q, HASSAN M K, et al. Behaviour of three types of stainless steel after exposure to elevated temperatures [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2019,152:296-311.
- [6] 周睿. 高氮不锈钢固溶与时效处理对显微组织及力学性能的影响[D]. 扬州:扬州大学,2020.
- [7] 蒋一,程满浪,姜海洪,等. 高强度含 N 节 Ni 奥氏体不锈钢 08Cr<sub>19</sub>Mn<sub>6</sub>Ni<sub>3</sub>Cu<sub>2</sub>N(QN<sub>1803</sub>) 的显微组织及性能[J]. 金属学报,2020,56(4):642-652.
- [8] 周莉,杨吉春,董梦瑶,等. 增氮降镍对 316 奥氏体不锈钢高温拉伸性能的影响[J]. 金属热处理,2015,40(7):95-98.
- [9] 陶宇超,楼国彪,陈武龙,等. 304D 奥氏体和 TSZ410 铁素体不锈钢高温后力学性能试验[J]. 建筑钢结构进展,2022,24(4):39-46.
- [10] 国家质量监督检验检疫总局. 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.
- [11] GAO X F, ZHANG X P, LIU H B, et al. Residual mechanical properties of stainless steels S30408 and S31608 after fire exposure[J]. Construction and Building Materials, 2018,165:82-92.
- [12] 秦凤明,李亚杰,赵晓东,等. 含 N 量对 Mn<sub>18</sub>Cr18N 奥氏体不锈钢的析出行为及力学性能的影响[J]. 金属学报, 2018,54(1):55-64.
- [13] 王琳. 超级奥氏体不锈钢热变形行为及组织演变研究[D]. 秦皇岛:燕山大学,2022.

(责任编辑:陈雯)