

网络优先数字出版时间:2016-08-26

【DOI】10.13657/j.cnki.gxkxyxb.20160826.011

网络优先数字出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/45.1075.N.20160826.1049.022.html>

# 固溶处理温度对 2507 双相不锈钢组织结构及耐蚀性能的影响<sup>\*</sup>

## Effect of Solution Treatment Temperature on Microstructure and Corrosion Resistance of 2507 Duplex Stainless Steel

郑传波<sup>\*\*</sup>, 陈 曦

ZHENG Chuanbo, CHEN Xi

(江苏科技大学材料科学与工程学院, 江苏镇江 212003)

(School of Material Science and Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang, Jiangsu, 212003, China)

**摘要:**【目的】现代工业的飞速发展对双相不锈钢的使用要求越来越高,为扩大 2507 双相不锈钢(DSS2507)的实际应用,本研究探讨固溶处理温度对 DSS2507 组织结构、硬度及耐蚀性能的影响。【方法】通过定量金相法及硬度法研究固溶处理温度对 DSS2507 显微组织结构以及硬度的影响;通过电化学实验分析固溶处理温度对 DSS2507 抗腐蚀能力的影响。【结果】随着固溶处理温度的上升,铁素体  $\alpha$  相含量增多而奥氏体  $\gamma$  相含量减少,固溶处理温度为 1 050~1 100℃ 时可使钢中铁素体相跟奥氏体相的比例达到 1:1。固溶处理温度为 1 000~1 050℃ 时 DSS2507 的硬度降低;但固溶处理温度从 1 050℃ 升高到 1 200℃ 时,其硬度又逐渐升高。另外,随着固溶处理温度从 1 000℃ 升高到 1 200℃,DSS2507 的耐均匀腐蚀和点蚀性能先增强后减弱,1 050℃ 处理的 DSS2507 抗电化学腐蚀性能最优。【结论】固溶处理温度为 1 050~1 100℃ 时可以使 DSS2507 两相比例达到 1:1,经 1 050℃ 固溶处理的 DSS2507 抗电化学腐蚀性能最优。

**关键词:** 固溶处理温度 2507 双相不锈钢 腐蚀行为

**中图分类号:** TG142.71, TG156.94 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-7378(2016)03-0161-07

**Abstract:**【Objective】With the rapid development of modern industry, more and more requirements are put forward for the use of duplex stainless steel. Therefore, in order to enlarge the applicable range of 2507 duplex stainless steel (DSS2507), the research investigated the effect of solution treatment temperature on the microstructure, hardness and corrosion resistance of DSS2507.【Methods】We used quantitative metallography and hardness methods to study the effect of solution treatment temperature on the microstructure and hardness; in addition, used electrochemical tests to study the effect of solution treatment temperature on corrosion resistance of DSS2507.【Results】Quantitative metallographic analysis showed that with the solution treatment temperature rising, alpha phase content increased and the content of austenite phase reduced. When solution treatment temperature was 1 050℃ to 1 100℃, phase proportion of ferrite phase and austenitic phase reached 1:1; when solution treatment temperature was 1 000℃ to 1 050℃, hardness of DSS2507 decreased; when solution treatment temperature increased from 1 050℃ to 1 200℃,

hardness increased. In addition, with the solution treatment temperature increasing from 1 000℃ to 1 200℃, the corrosion resistance of DSS2507 first increased and then decreased. The corrosion resistance of DSS2507 was the best after solution treatment at 1 050℃.【Conclusion】When the solution treatment temperature was 1 050~1 100℃, the ratio of DSS2507 ferrite phase and austenite phase could reach 1:1. The hardness of DSS2507 decreased when the solution treatment temperature was 1 000~1 050℃, and increased when the solution treatment temperature increased from 1 050℃ to 1 200℃.

收稿日期:2016-05-24

修回日期:2016-07-14

作者简介:郑传波(1980-),男,副教授,主要从事金属材料腐蚀防护研究。

<sup>\*</sup> 江苏省自然科学基金项目(BK20141292)资助。

<sup>\*\*</sup> 通讯作者;E-mail:15952802516@139.com。

hardness increased gradually. Electrochemical tests showed that with the solution treatment temperature increasing from 1 000°C to 1 200°C, uniform corrosion resistance and pitting corrosion resistance of DSS2507 increased firstly and then decreased, when the solution treatment temperature was at 1 050°C, the sample had the best electrochemical corrosion resistance. **【Conclusion】**When the solution treatment temperature was 1 050—1 100°C, the two-phase ratio could reach 1 : 1, and when the solution treatment temperature was at 1 050°C, the sample had the best electrochemical corrosion resistance.

**Key words:** solution treatment temperature, 2507 duplex stainless steel, corrosion resistance

## 0 引言

**【研究意义】**双相不锈钢为一类同时具有铁素体  $\alpha$  相及奥氏体  $\gamma$  相两种显微组织的钢种,在固溶组织中两相的相比比例约为 1 : 1,且通常情况下这两相中量少相的含量要求至少不低于 30%。双相不锈钢的性能特点在于其抗蚀能力较优、强度高且加工性能较佳。跟铁素体不锈钢比较,双相不锈钢的塑性、韧性、焊接性能及耐晶间腐蚀性能都显著增强<sup>[1]</sup>,所以双相不锈钢材料发展迅速,且被广泛地应用在造纸业、石油开采业、海洋运输业、军事以及化工等领域,同时也引发科研工作者对双相不锈钢的广泛关注<sup>[2-8]</sup>。**【前人研究进展】**双相组织于 1927 年被国外的 Griffiths 及 Bain 最先发现,20 世纪 30 年代双相不锈钢开始被发展应用,1935 年法国取得 Uranus 50 钢种的专利。赵辉等<sup>[9]</sup>研究 DSS2205 抗腐蚀能力以及微观组织在不同时效时间和不同热处理温度下的变化,结果显示固溶处理温度达到 1 060°C 时 DSS2205 中的两相比比例接近 1 : 1,此时 DSS2205 拥有最佳的抗点蚀性能,并且 DSS2205 中的  $\sigma$  相含量随着时效时间的延长而变多,时效时间的增长减弱 DSS2205 的抗点蚀能力。张敏等<sup>[10]</sup>研究双相不锈钢在 10% (V/V) 硫酸溶液、10% (V/V) 盐酸溶液中的抗腐蚀性能和腐蚀发生行为,结果表明双相不锈钢在 HCl 介质中的抗蚀性能较差,而在 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 介质中的抗蚀性能较强,这是因为在 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 溶液中双相不锈钢表面能够形成 Cr—O、Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、FeO 等氧化物,阻碍钢腐蚀的发生。Ezuber 等<sup>[11]</sup>研究 DSS2205 在 20°C、50°C 以及 80°C 温度下的耐孔蚀性能。do Nascimento 等<sup>[12]</sup>研究铸造双相不锈钢 ASTM890 grade 1A 在 475°C 和 850°C 下于 3.5% NaCl 溶液中的临界点蚀温度,结果显示双相不锈钢的化学成分和组织共同影响临界点蚀温度的变化。**【本研究切入点】**热处理温度对各种金属结构材料的显微组织结构及性能都有着较大的影响<sup>[13-14]</sup>,因此研究固溶处理温度对 2507 双相不锈钢

(DSS2507)的组织及其耐腐蚀性能的影响具有较大的现实意义。**【拟解决的关键问题】**通过定量金相法、硬度法及电化学实验研究固溶处理温度对 DSS2507 双相不锈钢性能的影响,分析固溶处理温度对 DSS2507 双相不锈钢在 3.5% (W/V) NaCl 腐蚀溶液中抗腐蚀能力的影响。

## 1 材料与方 法

### 1.1 材料

实验所用材料为 DSS2507,其主要化学成分如表 1 所示。实验所需主要设备:Sx2-10-12 箱式电阻炉(中国上海实研电炉有限公司),Gamry Reference 600 电化学工作站(美国 Gamry 公司),BSA 系列电子天平(德国赛多利股份公司),OlymPus-PM3 光学显微镜(日本奥林巴斯公司)。

表 1 DSS2507 主要化学成分(质量分数,%)

Table 1 Main chemical composition of DSS2507 (mass fraction, %)

元素 Element	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Mo	N
含量 Content	0.021	0.53	0.97	0.001	0.025	25.02	7.13	3.7	0.27

### 1.2 方法

#### 1.2.1 固溶处理

将实验材料分别在 1 000°C、1 050°C、1 100°C、1 150°C、1 200°C 下处理 0.5 h,然后进行水冷。热处理试验于 Sx2-10-12 箱式电阻炉中进行,高温炉的额定功率为 10 kW,额定电压 380 V,额定温度 1 200°C,炉膛尺寸为 400 mm×250 mm×160 mm。

#### 1.2.2 金相实验

将经过热处理的直径 1 cm、高 1 cm 的金相试样依次采用 500#~2000# 水磨砂纸对工作面进行打磨,随后进行机械抛光,并用腐蚀液(偏重亚硫酸钾 20 g、盐酸 10 mL、蒸馏水 90 mL)对工作面进行腐蚀。

通过 OlymPus-PM3 光学显微镜分析不同固溶态金相试样的组织特点,采用 Image-Pro Plus 6.0

图像分析软件测定 2507 双相不锈钢在不同固溶温度下的相比例。

### 1.2.3 硬度实验

测量试样的洛氏硬度,比较固溶温度对试样硬度的影响。

### 1.2.4 电化学实验

使用环氧树脂将制备试样的非工作面进行封装,试样裸露出来的工作段面积是  $1.96 \text{ cm}^2$ 。采用 Gamry Reference 600 电化学工作站进行电化学实验。实验采用传统的三电极体系,试样为工作电极,铂电极为辅助电极,饱和甘汞电极为参比电极。

#### (1) 动电位极化曲线测试

实验前将测试样浸泡在腐蚀介质 ( $30^\circ\text{C}$ ,  $3.5\%$  NaCl 溶液, W/V) 中  $0.5 \text{ h}$  左右,待开路电位比较稳定后开始极化曲线的测量。扫描速率为  $1 \text{ mV/s}$ ,扫描范围为  $-0.2 \sim 1.5 \text{ V}$  (vs. OCP)。

#### (2) 电化学阻抗测试

阻抗测试所需的电极、实验介质以及实验温度与动电位扫描一致。交流阻抗的测量频率范围是  $3 \text{ mHz} \sim 100 \text{ kHz}$ ,以幅值为  $5 \text{ mV}$  的正弦波作为激励信号。

## 2 结果与分析

### 2.1 固溶处理对 DSS2507 $\sigma$ 相的影响

从图 1 可以清晰地得知,当固溶温度为  $1000^\circ\text{C}$  时,铁素体相与奥氏体相两相相界面处有  $\sigma$  相析出,当固溶处理温度升高到  $1050^\circ\text{C}$  时  $\sigma$  相已经溶解。另外从表 2 可知,固溶处理温度的增高会导致  $\sigma$  析出相含量降低,当固溶处理温度大于  $1050^\circ\text{C}$  时  $\sigma$  相已经完全溶解。这是由于固溶处理温度的升高使钢中铁素体  $\alpha$  相量增多,导致  $\sigma$  相形成元素铬和钼在铁素体  $\alpha$  相中的浓度降低,进而导致  $\sigma$  相的形成受抑制<sup>[15-16]</sup>。 $\sigma$  相硬且脆,会大幅度减弱材料的塑性与韧性,并且  $\sigma$  相富集 Cr,很容易在其周围产生贫 Cr 区,降低 DSS2507 的抗腐蚀性能<sup>[17]</sup>,所以  $\sigma$  相为 DSS2507 析出相中危害最大的相,因此在实际应用过程中要想将 2507 双相不锈钢中的热轧态  $\sigma$  相完全消除所选用的固溶温度不能低于  $1050^\circ\text{C}$ 。

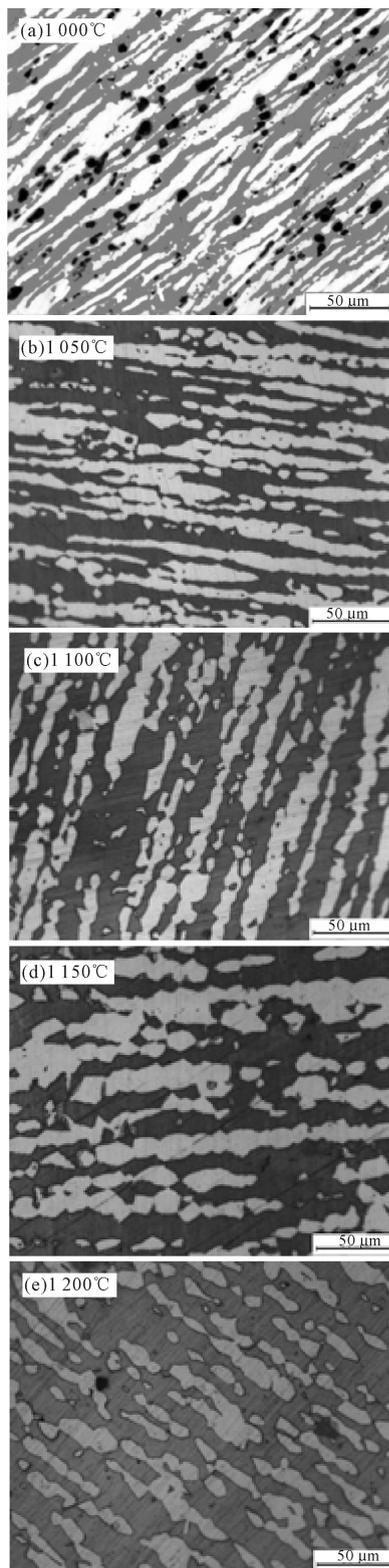


图 1 不同固溶处理温度下的 DSS2507 金相组织

Fig. 1 Metallographic structure of DSS2507 after solution treatment at different temperatures

表2 不同固溶处理温度下的 DSS2507 相比例

Table 2 Phase proportion of DSS2507 after solution treatment at different temperatures

固溶处理温度 Solution treatment temperature(°C)	相比例 Phase content(%)		
	α相	γ相	σ相
1 000	41.6	53.2	5.2
1 050	47.7	52.3	0.0
1 100	53.1	46.9	0.0
1 150	56.6	43.4	0.0
1 200	65.7	34.3	0.0

## 2.2 固溶处理温度对 2507 双相不锈钢两相组织的影响

从图 1 可知奥氏体  $\gamma$  相(浅色组织)首先表现为长条状,随着固溶处理温度的升高而逐渐变短,变成岛状分布在基体铁素体  $\alpha$  相(深色组织)上面。从表 2 中给出的相比例测量结果可知,钢中铁素体  $\alpha$  相量随固溶处理温度的升高而上升,奥氏体  $\gamma$  相量随着固溶温度的上升而下降,这是由于随固溶处理温度的升高,奥氏体逐渐转变为铁素体组织,因此在较高的固溶处理温度下 2507 双相不锈钢组织为单一的铁素体。此外,当固溶处理温度为 1 000~1 050°C 时奥氏体  $\gamma$  相比例减小得比较缓慢,随固溶处理温度的升高奥氏体  $\gamma$  相含量减少的趋势加快,这是因为 2507 双相不锈钢中的 N 元素是奥氏体形成元素,在较低的固溶处理温度下能抑制奥氏体相向铁素体相转变<sup>[18-20]</sup>,而固溶处理温度的升高会使 N 元素稳定奥氏体相的作用逐渐减弱,进而导致奥氏体  $\gamma$  相向铁素体  $\alpha$  相的转变速度加快。

DSS2507 中的奥氏体相和铁素体相的相比例主要受固溶处理工艺以及自身化学成分的影响,在钢的主要化学成分确定的情况下,两相的相比例与固溶处理工艺有着密切联系<sup>[21]</sup>。DSS2507 的相比例又影响其自身的性能,其塑性随着铁素体含量的增多而减弱、耐应力腐蚀能力随着奥氏体含量升高而减弱<sup>[22]</sup>;当铁素体  $\alpha$  相跟奥氏体  $\gamma$  相的相比例接近 1:1 时,双相不锈钢的综合性能最佳,有较好的抗腐蚀能力以及较优的力学性能<sup>[23]</sup>。从表 2 可知固溶处理温度在 1 050~1 100°C 时可以使钢中两相的组织比例达到 1:1,且 1 050°C 时铁素体  $\alpha$  相跟奥氏体  $\gamma$  相比例最接近 1:1,因此合适的固溶处理温度能使 DSS2507 中两相的相比例达到 1:1。在实际应用过程中,为使 DSS2507 获得较好的综合性能,进行固溶处理时选取的温度宜为 1 050~1 100°C。

## 2.3 固溶处理温度对 DSS2507 硬度的影响

从图 2 可知,DSS2507 的硬度随固溶处理温度的升高先减小后变大。在 1 000~1 050°C 时,钢的硬度随固溶处理温度的增高而逐渐减小,在 1 050°C 时 DSS2507 的硬度最小;随后,钢的硬度随固溶处理温度的增高又渐渐变大(图 2)。当固溶处理温度为 1 000°C 时,在铁素体和奥氏体相界处有  $\sigma$  相析出, $\sigma$  相是一种硬而脆的相,能够提高双相不锈钢的硬度值,所以 1 000°C 下钢有较高的硬度,而  $\sigma$  相会随固溶处理温度的升高而渐渐溶解到基体中,DSS2507 的硬度呈下降趋势。但由于固溶处理温度的增高导致钢中的铁素体相量增加而奥氏体相量降低,在室温下铁素体是体心立方结构(bcc),奥氏体是面心立方结构(fcc),前者硬度高于后者<sup>[24-25]</sup>,所以在铁素体含量逐渐升高的情况下,钢的硬度也逐渐升高,即随着固溶处理温度的升高,DSS2507 的硬度呈升高趋势。

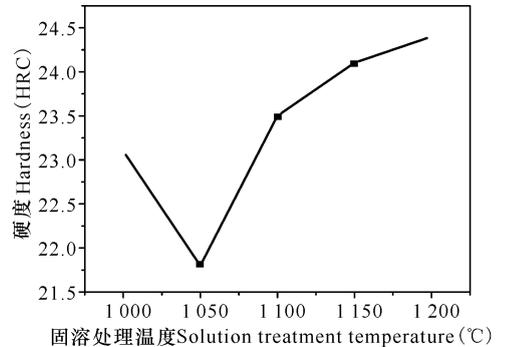


图2 不同固溶处理温度下的 DSS2507 硬度

Fig. 2 Hardness of DSS2507 after solution treatment at different temperatures

## 2.4 固溶处理温度对 DSS2507 电化学腐蚀性能的影响

### 2.4.1 极化曲线

从图 3 可知,不同固溶处理温度下 DSS2507 的极化曲线形状大体相同,都具有明显的钝化区域,且钝化区域都较宽。击破电位 ( $E_b$ , 又称点蚀电位)指金属材料最先产生点腐蚀的电位<sup>[26]</sup>,其值愈高表明材料产生孔蚀的倾向愈低,国家标准 GB 4334.9—1984 规定阳极极化曲线上与电流密度  $100 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  对应的电位即为击破电位 ( $E_b$ )<sup>[27]</sup>。从表 3 可知,DSS2507 在 3.5%(W/V)NaCl 溶液中的点蚀电位 ( $E_b$ )随着固溶处理温度的上升先变大后减小,1 050°C 时点蚀电位最高,表明在该固溶处理温度下 DSS2507 发生点蚀的倾向较低。固溶处理温度为 1 000°C 时 DSS2507 中铁素体相跟奥氏体相界处有  $\sigma$  相析出,其附近较易形成贫铬及贫铝区

域,造成该固溶处理温度下钢的抗点腐蚀能力较弱<sup>[16]</sup>;1 050℃时 DSS2507 中的两相结构(铁素体  $\alpha$  相及奥氏体  $\gamma$  相)分布较均匀,相比比例约为 1:1,有利于钢表面钝化膜的稳定,对点蚀具有较好的抑制作用,表现为点蚀电位  $E_b$  值较高;然而随固溶处理温度继续上升,铁素体  $\alpha$  相量增多,奥氏体  $\gamma$  相量减少,导致铁素体形成元素 Cr 和 Mo 的浓度减小,而奥氏体形成元素 N 浓度升高,使得 Cr、Mo 和 N 在这两种组织结构中的分布变得不均匀,由于 Cr、Mo 和 N 是钢的主要耐点蚀元素,所以钢的耐腐蚀能力降低,具体表现为点蚀电位  $E_b$  值降低,所以在 1 050~1 200℃时 DSS2507 双相不锈钢的点蚀电位呈下降趋势。

此外,从表 3 中列出的 ( $E_b - E_{corr}$ ) 值可以看出其变化趋势跟  $E_b$  值的变化趋势相同,都呈先升高后下降的趋势。由于 ( $E_b - E_{corr}$ ) 值表示形核阻力的大小<sup>[28]</sup>,所以由 ( $E_b - E_{corr}$ ) 值的变化趋势可知点蚀形核的阻力也是先变大后减小,即随着固溶温度的升

表 3 DSS2507 在不同温度下固溶处理 30 min 后的点蚀电位 ( $E_b$ )、自腐蚀电位 ( $E_{corr}$ ) 及自腐蚀电流 ( $I_{corr}$ )

Table 3 Pitting potentials, corrosion potentials and corrosion current of DSS2507 after solution treatment at different temperatures

固溶处理温度 Solution treatment temperature(℃)	$E_b$ (V vs. SCE)	$E_{corr}$ (V vs. SCE)	$I_{corr}$ (A/cm <sup>2</sup> )	( $E_b - E_{corr}$ )(V)
1 000	0.946 4	-0.372	$9.953\ 8 \times 10^{-7}$	1.318 4
1 050	1.01	-0.415 84	$3.536\ 7 \times 10^{-7}$	1.425 84
1 100	0.981 5	-0.422 8	$8.190\ 5 \times 10^{-7}$	1.404 3
1 150	0.979 8	-0.392 7	$6.857\ 3 \times 10^{-7}$	1.372 5
1 200	0.979 5	-0.348 83	$5.043\ 5 \times 10^{-7}$	1.328 33

2.4.2 交流阻抗测试

从图 4 中可以很明显看出随固溶处理温度的增高,容抗弧半径先增大后减小,1 050℃时容抗弧半径最大。容抗弧半径越大表明电荷在金属-溶液界

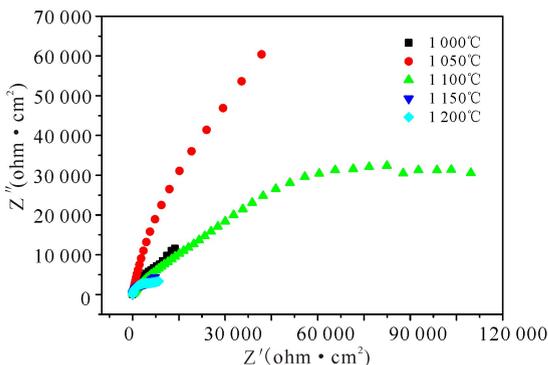


图 4 不同固溶态 DSS2507 于 3.5% NaCl 中的阻抗曲线

Fig. 4 The nyquist plots of DSS2507 in 3.5% NaCl solution after solution treatment at different temperatures

高,钢的抗点蚀性能先增强后减弱。再者,随固溶处理温度的上升,自腐蚀电流密度 ( $I_{corr}$ ) 先变小后变大再变小,在 1 050℃时自腐蚀电流密度最低为  $3.5367 \times 10^{-7}$  A/cm<sup>2</sup> (表 3),表明固溶处理温度为 1 050℃时 DSS2507 有较好的抗腐蚀能力。

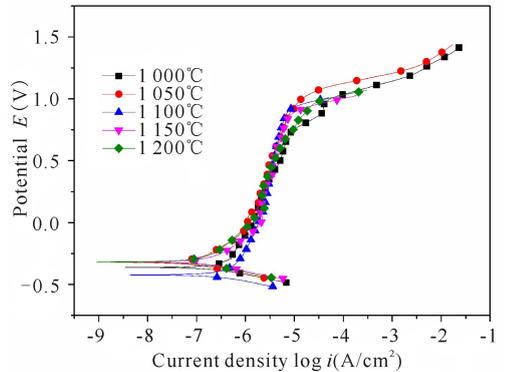


图 3 不同固溶态的 DSS2507 于 3.5% NaCl 溶液中的动电位极化曲线

Fig. 3 Potentiodynamic polarization curves of DSS2507 in 3.5% NaCl solution after solution treatment

面转移时所受到的阻力越强,意味着金属的抗蚀性能愈优。因此,从容抗弧半径的改变趋势可知,固溶处理温度升高使 DSS2507 的耐蚀性能先变强后减弱,1 050℃时 DSS2507 的抗腐蚀性性能最优。

不同固溶态的 DSS2507 在 3.5% (W/V) NaCl 溶液中的等效电路如图 5,采用的是  $R(C(R(CR)))$ ,  $R_s$  为参比电极和工作电极间的溶液电阻。采用 ZsimpWin 软件对等效电路模拟计算得到各元件的数值(表 4),其中,双电层电容 ( $C_{dl}$ ) 及钝化膜电容 ( $C_f$ ) 随固溶温度的升高呈先减小后增大的趋势;电荷转移电阻 ( $R_{ct}$ ) 和钝化膜电阻 ( $R_f$ ) 呈先变大后减小的趋势,即电化学反应阻力随固溶处理温度的增高先增强后减小,DSS2507 的抗腐蚀性性能也表现为先变强后变弱。1 000℃时钢的相界处有  $\sigma$  相析出, $\sigma$  相硬而脆降低了钢表面钝化膜的稳定,因此 DSS2507 具有较低的钝化膜电阻 ( $R_f$ );1 050℃时钢中的两相比比例约为 1:1,两相分布较均匀且成分稳

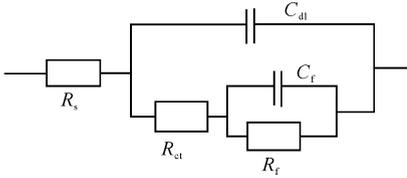


图5 交流阻抗等效电路图

定,有利于钝化膜的稳定,具体表现为钝化膜电阻( $R_f$ )较高,表明此刻离子迁移时所受阻力较大,进而DSS2507的抗腐蚀能力最佳;固溶处理温度的进一步升高使钢中的两相比比例失调,表现为铁素体相含量大幅升高奥氏体相含量减小,不利于钢表面钝化膜的稳定,导致钝化膜电阻( $R_f$ )减小,实际表现为钢的抗蚀性能下降,这与动电位扫描获得的结论一致。

Fig. 5 Equivalent circuit used for modeling the EIS re-

sults

表4 不同固溶态 DSS2507 的 EIS 等效电路拟合数据

Table 4 Results of EIS method for DSS2507 after solution treatment at different temperatures

固溶处理温度 Solution treatment temperature(°C)	$R_s$ (ohm · cm <sup>2</sup> )	$C_{dl}$ (F/cm <sup>2</sup> )	$R_{ct}$ (ohm · cm <sup>2</sup> )	$C_f$ (F/cm <sup>2</sup> )	$R_f$ (ohm · cm <sup>2</sup> )
1 000	7.953	$3.086 \times 10^{-5}$	2 019	$3.347 \times 10^{-5}$	$4.654 \times 10^4$
1 050	6.85	$2.319 \times 10^{-5}$	3 536	$3.169 \times 10^{-5}$	$7.6 \times 10^4$
1 100	8.35	$3.158 \times 10^{-5}$	1 840	$4.012 \times 10^{-5}$	$5.87 \times 10^4$
1 150	6.926	$3.506 \times 10^{-5}$	499.2	$7.217 \times 10^{-5}$	5 047
1 200	9.39	$3.935 \times 10^{-5}$	207	$9.488 \times 10^{-5}$	4 469

### 3 结论

(1)固溶处理温度为 1 000°C 时,在 DSS2507 双相不锈钢铁素体相和奥氏体相相界面处有  $\sigma$  相析出,固溶处理温度的增高能够让  $\sigma$  相溶解于基体中。在实际应用过程中要想将 DSS2507 中的热轧态  $\sigma$  相完全消除所选用的固溶温度要高于 1 050°C。

(2)随固溶处理温度的增高,DSS2507 中的铁素体相量增多而奥氏体相含量降低,固溶处理温度在 1 050~1 100°C 时可以使 DSS2507 两相比比例达到 1:1。在 1 050°C 时 DSS2507 中铁素体相与奥氏体相的相比比例最接近 1:1。

(3)随固溶处理温度的升高,DSS2507 的硬度呈曲线变化,1 000~1 050°C 时硬度下降,1 050~1 200°C 时硬度增高。

(4)从动电位极化曲线可知随着固溶温度的升高,点蚀电位( $E_b$ )、自腐蚀电位( $E_{corr}$ )及( $E_b - E_{corr}$ )值都呈先升高后降低的趋势,自腐蚀电流( $I_{corr}$ )则表现为先降低后升高再减弱的趋势;DSS2507 的耐均匀腐蚀性能及耐点蚀性能随着固溶温度升高呈先增强后减弱的变化,1 050°C 时 DSS2507 有较优的抗蚀能力。交流阻抗测试结果显示容抗弧半径随固溶处理温度的上升先变大后减小,即 DSS2507 的抗蚀性能随固溶处理温度的上升先增强后减弱,跟动电位极化曲线所得的结论一致。

#### 参考文献:

[1] 高娃,罗建明,杨建君. 双相不锈钢的研究进展及其应用[J]. 兵器科学与工程,2005,28(3):61-63.  
GAO W, LUO J M, YANG J J. Research progress and

application of double phase stainless steel[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2005, 28(3): 61-63.

[2] 董希青,黄彦良. 不锈钢在海洋环境中的环境敏感断裂研究进展[J]. 中国腐蚀与防护学报,2012,32(3):189-194.

DONG X Q, HUANG Y L. Research progress for stress corrosion cracking of stainless steel under marine environment[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2012, 32(3): 189-194.

[3] 张文奇,于福州,朱应扬. 双相不锈钢耐应力腐蚀破裂机理的电化学研究[J]. 中国腐蚀与防护学报,1985,5(1):18-25.

ZHANG W Q, YU F Z, ZHU Y Y. An investigation of the mechanism of stress corrosion resistance in duplex stainless steel by electrochemical method[J]. Journal of Chinese Society of Corrosion and Protection, 1985, 5(1): 18-25.

[4] 王荣光,闵国全,郑文龙. 双相不锈钢在应力腐蚀开裂过程中的选择性腐蚀[J]. 中国腐蚀与防护学报,1998,18(1):47-51.

WANG R G, MIN G Q, ZHENG W L. Selective corrosion during stress corrosion cracking of 00Cr18Ni5Mo3Si duplex stainless steel[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 1998, 18(1): 47-51.

[5] TSAI W T, CHEN M S. Stress corrosion cracking behavior of 2205 duplex stainless steel in concentrated NaCl solution[J]. Corrosion Science, 2000, 42(3): 545-559.

ZAKROCZYMSKI T, GLOWACKA A, SWIATNIC-KI W. Effect of hydrogen concentration on the embrittlement of a duplex stainless steel[J]. Corrosion Science, 2005, 47(6): 1403-1414.

[7] 马贵斌. 热处理工艺对超级双相不锈钢 00Cr25Ni7Mo4N 耐腐蚀性能的影响[J]. 冶金从刊, 2005(6): 4-6.

MA G B. Effect of heat treatment on corrosion property of super duplex stainless steel 00Cr25Ni7Mo4N[J]. Metallurgical Collections, 2005(6): 4-6.

- [8] 侯瑞鹏,任万里. 热处理对 2205 双相不锈钢耐腐蚀性能的影响[J]. 山西冶金, 2004(3):24-25.  
HOU R P, REN W L. Effect of the heat treatment on corrosion property of duplex stainless steel 2205[J]. Shanxi Metallurgy, 2004(3):24-25.
- [9] 赵辉,徐玲. 热处理对双相不锈钢的组织及腐蚀性能的影响[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2009, 21(3):288-290.  
ZHAO H, XU L. Effect of heat treatment on microstructure and corrosion resistance of a duplex stainless steel 0Cr25Ni6Mo3CuN [J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2009, 21(3):288-290.
- [10] 张敏,张恩华,孟强,等. 腐蚀介质对双相不锈钢 2205 腐蚀性能影响的研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2011, 34(6):40-43.  
ZHANG M, ZHANG E H, MENG Q, et al. Effect of corrosive medium on the corrosion resistance of duplex stainless steel 2205[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2011, 34(6):40-43.
- [11] EZUBER H M, EL-HOUD A, EL-SHAWESH F. Effects of sigma phase precipitation on seawater pitting of duplex stainless steel[J]. Desalination, 2007, 207(1/2/3):268-275.
- [12] DO NASCIMENTO A M, IERARDI M C F, KINA A Y, et al. Pitting corrosion resistance of cast duplex stainless steels in 3.5% NaCl solution [J]. Mater Charact, 2008, 59(12):1736-1740.
- [13] 韩俊,孙有平,林峰,等. 热处理对 2524 铝合金显微组织及力学性能影响[J]. 广西科技大学学报, 2014, 25(3):6-9.  
HAN J, SUN Y P, LIN F, et al. Effect of heat treatment on microstructures and mechanical properties of 2524 aluminum alloy[J]. Journal of Guangxi University of Science and Technology, 2014, 25(3):6-9.
- [14] 周学浩,孙有平,张扬扬,等. 固溶时效对 7055 铝合金组织和性能的影响[J]. 广西科技大学学报, 2016, 27(2):81-86.  
ZHOU X H, SUN Y P, ZHANG Y Y, et al. Effects of solution treatment and aging process on mechanical properties of 7055 aluminum alloy [J]. Journal of Guangxi University of Science and Technology, 2016, 27(2):81-86.
- [15] NILSSON J O. Super duplex stainless steel[J]. Materials Science and Technology, 1992(8):685-700.
- [16] 吴忠忠,宋志刚,郑文杰,等. 固溶温度对超级双相不锈钢 00Cr25Ni7Mo4N 组织和性能的影响[J]. 特殊钢, 2006, 27(4):11-13.  
WU Z Z, SONG Z G, ZHENG W J, et al. Influence of solution temperature on structure and properties of super duplex stainless steel 00Cr25Ni7Mo4N[J]. Special Steel, 2006, 27(4):11-13.
- [17] TOSHIO K. Role of sigma phase on hydrogen embrittlement of super duplex stainless steels[J]. Transactions of JWRI, 2005, 34(2):63-68.
- [18] 徐鹏,陈学东,秦宗川,等. 高温高流速环烷酸腐蚀试验装置:CN200920142827.0[P]. 2009-11-11.  
XU P, CHEN X D, QIN Z C, et al. High-temperature and high-flow-speed naphthenic acid corrosion testing apparatus:CN200920142827.0[P]. 2009-11-11.
- [19] 郑玉贵,姚治铭,柯伟. 流体力学因素对冲刷腐蚀的影响机制[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2002, 12(1):36-40.  
ZHENG Y G, YAO Z M, KE W. Review on the effects of hydrodynamic factors on erosion-corrosion [J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2002, 12(1):36-40.
- [20] RUSSELL D, KANE D. Influence of Velocity Interactions of Oil Composition[R]. New York:Inter Corrosion International Inc, 2000:24-26.
- [21] 钢铁研究院. 双相不锈钢论文集[M]. 北京:冶金工业出版社, 1992:241.  
Iron and Steel Research Institute. Dual Phase Stainless Steel Paper Collection [M]. Beijing:Metallurgical Industry Press, 1992:241.
- [22] Properties of Super Duplex Stainless Steel[C]. Duplex Stainless Steel World Conference, Beijing: Stainless Steel Council of China Special Steel Enterprises Association, 2003:14.
- [23] CABRERA J M, MATEO A, LLANES L, et al. Hot deformation of duplex stainless steels[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003 (143/144):321-324.
- [24] 申鹏,颜海涛,杨振,等. 固溶处理对 00Cr22Ni5Mo3N 双相不锈钢组织和性能的影响[J]. 热处理工艺, 2012, 41(22):207-209.  
SHEN P, YAN H T, YANG Z, et al. Effect of solution treatment on microstructure and property of 00Cr22Ni5Mo3N duplex stainless steel [J]. Hot Working Technology, 2012, 41(22):207-209.
- [25] 宋志刚,陈斌,郑文杰,等. 固溶温度对 00Cr22Ni5Mo3N 钢组织及力学性能的影响[J]. 钢铁研究学报, 2004, 16(6):47-50.  
SONG Z G, CHEN B, ZHENG W J, et al. Influence of solution temperature on microstructure and mechanical property of 00Cr22Ni5Mo3N[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2004, 16(6):47-50.
- [26] 袁宝林,稻村勉,三沢俊平. 双相不锈钢中( $\alpha+\gamma$ )组织对氢脆和应力腐蚀开裂敏感性的影响[J]. 上海钢研, 1985(5):91-92.  
YUAN B L, DAO C M, SANWO J P. Hydrogen embrittlement and stress corrosion cracking sensitivity of ( $\alpha+\gamma$ ) duplex stainless steel[J]. Shanghai Gangyan, 1985(5):91-92.
- [27] 乔园园. 2205 双相不锈钢腐蚀性能的研究[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2011:2-4.  
QIAO Y Y. Study on the Corrosion Behavior of 2205 Duplex Stainless Steel[D]. Xi'an:Xi'an University of Architecture and Technology, 2011:2-4.
- [28] 汤瑞瑞,龚利华. 固溶温度对 2101 节镍型双相不锈钢组织及性能的影响[J]. 钢铁钒钛, 2013, 34(4):73-77.  
TANG R R, GONG L H. Influence of solution temperature on structures and properties of low-nickel duplex stainless steel 2101[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2013, 34(4):73-77.