

# Effect of Vanadium on Microstructure and Corrosion Resistance of 2205 Duplex Stainless Steel

Xiu Sun<sup>1,2\*</sup>, Zhongmin Yang<sup>2</sup>, Ying Chen<sup>2</sup>, Jianwen Hu<sup>1</sup>, Xiaobin Li<sup>3</sup>, Shanglin Lv<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang Hebei

<sup>2</sup>Department for Structure Steel, Central Iron and Steel Research Institute, Beijing

<sup>3</sup>Central Research Institute of Building and Construction of MCC Group, Beijing

Email: \*sunxiu2018@163.com

Received: Jul. 22<sup>nd</sup>, 2018; accepted: Aug. 13<sup>th</sup>, 2018; published: Aug. 20<sup>th</sup>, 2018

## Abstract

The microstructure and electrochemical corrosion resistance of V microalloyed 2205 duplex stainless steels bar and 2205 duplex stainless steels bar without V were investigated for solution treatment and holding time respectively. The results show that the 2205 stainless steel reinforcement containing V was solution treated at 950°C. The brittleness of the structure was significantly reduced compared with that of 2205 stainless steel without V. In the temperature range of 1000°C~1050°C, there is no  $\sigma$  brittle phase in the two kinds of 2205 stainless steel bars. The addition of microalloying V inhibited the brittle phase precipitation. The critical pitting point of 2205 stainless steel with V is higher than the critical pitting point of 2205 stainless steel without V, which improves the corrosion resistance of 2205 duplex stainless steel.

## Keywords

Microalloying Element V, 2205 Duplex Stainless Steel, Critical Pitting Point

# V对2205双相不锈钢钢筋组织和耐蚀性能影响研究

孙秀<sup>1,2\*</sup>, 杨忠民<sup>2</sup>, 陈颖<sup>2</sup>, 胡建文<sup>1</sup>, 李晓滨<sup>3</sup>, 吕尚霖<sup>3</sup>

<sup>1</sup>河北科技大学材料学院, 河北 石家庄

<sup>2</sup>钢铁研究总院工程用钢研究所, 北京

<sup>3</sup>中冶建筑研究总院有限公司, 北京

\*通讯作者。

文章引用: 孙秀, 杨忠民, 陈颖, 胡建文, 李晓滨, 吕尚霖. V对2205双相不锈钢钢筋组织和耐蚀性能影响研究[J]. 冶金工程, 2018, 5(3): 122-130. DOI: 10.12677/meng.2018.53017

Email: sunxiu2018@163.com

收稿日期: 2018年7月22日; 录用日期: 2018年8月13日; 发布日期: 2018年8月20日

## 摘要

本文对比了V微合金化2205双相不锈钢钢筋和不含V的2205双相不锈钢钢筋经过不同固溶处理的组织和电化学腐蚀性能, 结果表明: 含V的2205不锈钢钢筋在950℃固溶处理时组织中的脆性相比不含V的2205不锈钢钢筋组织中的脆性相显著减少, 在1000℃~1050℃温度区间内, 含V的2205钢筋和不含V的2205钢筋的微观组织中都没有 $\sigma$ 相等脆性相析出, 添加V有抑制脆性相析出的作用。含V的2205不锈钢钢筋的临界点蚀电位高于不含V的2205不锈钢钢筋的临界点蚀电位, 添加V提高了2205双相不锈钢的耐腐蚀性能。

## 关键词

微合金元素V2205, 双相不锈钢, 临界点蚀电位

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

2205 双相不锈钢集良好的力学性能、优良的耐应力腐蚀开裂性能、可焊接性和相对的经济性于一体, 使得其广泛应用于油气、石化、桥梁、建筑等领域[1] [2] [3]。然而, 2205 双相不锈钢钢筋的研究报道很少, 特别是在 2205 双相不锈钢中添加微合金元素轧制螺纹钢的文章还未见报道。本文重点以含 V 和不含 V 的 2205 双相不锈钢钢筋为研究对象, 研究了不同固溶温度、保温时间对组织特征的影响和耐腐蚀性能的影响。

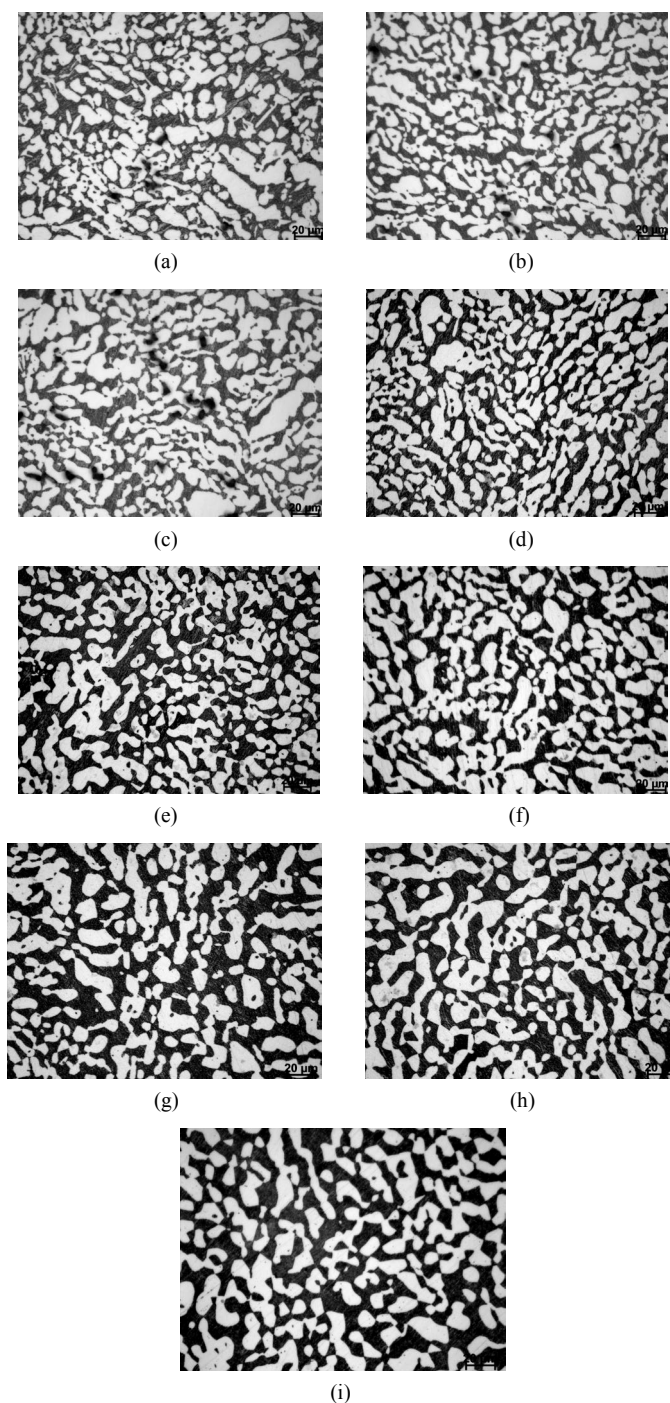
## 2. 实验方法

2205 双相不锈钢钢筋的化学成分见表 1。含 V 的钢筋来自江阴市西城钢铁有限公司, 不含 V 的钢筋来自攀钢集团长城特殊钢有限公司。试样从热轧态 2205 双相不锈钢钢筋上横向截取。在实验室热处理炉中进行固溶处理, 固溶处理温度为 950℃、1000℃和 1050℃, 保温时间分别为 1 h、2 h、3 h。试样进行金相样品制备, 经过机械磨抛、电解腐蚀后采用光学显微镜(OM)场发射扫描电镜(SEM)对试样进行组织观察。采用 273A 电化学工作站对试样进行点蚀电位测试。

## 3. 实验结果及分析

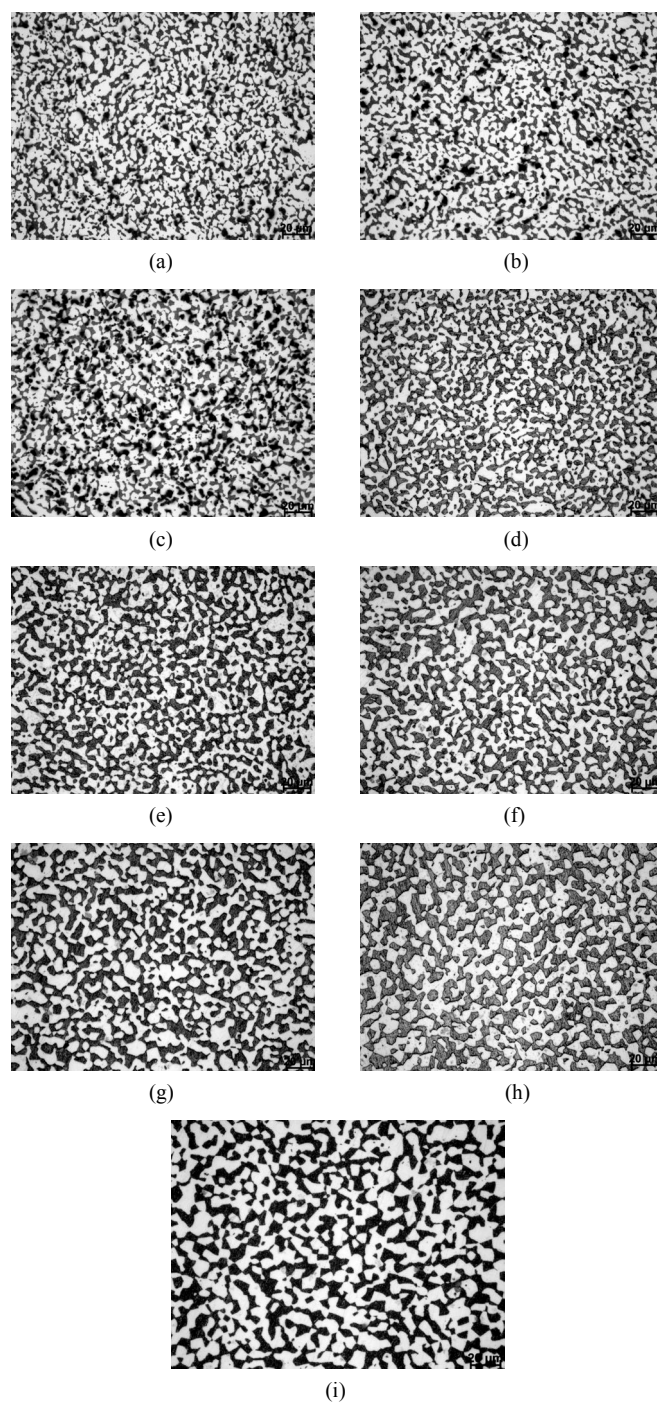
### 3.1. 不同固溶处理制度的 2205 双相不锈钢钢筋的 SEM 观察

用 10% KOH 水溶液, 电压 6~10 V, 电解腐蚀 1 min。样品腐蚀后, 在金相显微镜下观察, 500 倍放大倍数。含 V2205 双相不锈钢钢筋在 950℃、1000℃和 1050℃固溶不同时间下的组织特征如图 1 所示, 不含 V2205 双相不锈钢钢筋的组织特征如图 2 所示。



**Figure 1.** The microstructure of different time at solution temperature of 950°C with V. (a) The solid solution temperature: 950°C, heat preservation 1 h; (b) The solid solution temperature: 950°C, heat preservation 2 h; (c) The solid solution temperature: 950°C, heat preservation 3 h; (d) The solid solution temperature: 1000°C, heat preservation 1 h; (e) The solid solution temperature: 1000°C, heat preservation 2 h; (f) The solid solution temperature: 1000°C, heat preservation 3 h; (g) The solid solution temperature: 1050°C, heat preservation 1 h; (h) The solid solution temperature: 1050°C, heat preservation 2 h; (i) The solid solution temperature: 1050°C, heat preservation 3 h

**图 1.** 含 V 固溶温度 950°C 不同保温时间的组织特征。(a) 固溶温度: 950°C, 保温 1 h; (b) 固溶温度: 950°C, 保温 2 h; (c) 固溶温度: 950°C, 保温 3 h; (d) 固溶温度: 1000°C, 保温 1 h; (e) 固溶温度: 1000°C, 保温 2 h; (f) 固溶温度: 1000°C, 保温 3 h; (g) 固溶温度: 1050°C, 保温 1 h; (h) 固溶温度: 1050°C, 保温 1 h; (i) 固溶温度: 1050°C, 保温 3 h



**Figure 2.** The microstructure of different time at solution temperature of 950°C without V. (a) The solid solution temperature: 950°C, heat preservation 1 h; (b) The solid solution temperature: 950°C, heat preservation 2 h; (c) The solid solution temperature: 950°C, heat preservation 3 h; (d) The solid solution temperature: 1000°C, heat preservation 1 h; (e) The solid solution temperature: 1000°C, heat preservation 2 h; (f) The solid solution temperature: 1000°C, heat preservation 3 h; (g) The solid solution temperature: 1050°C, heat preservation 1 h; (h) The solid solution temperature: 1050°C, heat preservation 2 h; (i) The solid solution temperature: 1050°C, heat preservation 3 h

**图 2.** 不含 V 固溶温度 950°C 不同保温时间的组织特征。(a) 固溶温度: 950°C, 保温 1 h; (b) 固溶温度: 950°C, 保温 2 h; (c) 固溶温度: 950°C, 保温 3 h; (d) 固溶温度: 1000°C, 保温 1 h; (e) 固溶温度: 1000°C, 保温 2 h; (f) 固溶温度: 1000°C, 保温 3 h; (g) 固溶温度: 1050°C, 保温 1 h; (h) 固溶温度: 1050°C, 保温 2 h; (i) 固溶温度: 1050°C, 保温 3 h

**Table 1.** Chemical composition of the tested steels (wt%)  
**表 1.** 2205 双相不锈钢钢筋主要化学成分(wt%)

编号	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	N	V
含 V	0.011	0.41	1.3	0.0064	0.001	22.3	5.99	2.65	0.15	0.09
不含 V	0.017	0.4	1.2	0.022	0.002	21.8	5.3	2.95	0.15	/

对比含 V 的 2205 钢筋和不含 V 的 2205 钢筋经过不同固溶处理后的组织,可以看出,在 950℃固溶处理,组织中有不同于奥氏体和铁素体相的其他相析出,且随着保温时间的延长,析出相数量增加[4] [5]。950℃下含 V 的 2205 钢筋的组织中奥氏体和铁素体相界面处脆性相析出量比不含 V 的少很多,说明含 V 的微合金化 2205 不锈钢由于 V 的存在降低了自由能,抑制了脆性相的析出。在 1000℃~1050℃温度区间内,含 V 的 2205 钢筋和不含 V 的 2205 钢筋的微观组织中都没有  $\sigma$  相等脆性相析出,只有深色的  $\alpha$  相和浅色的  $\gamma$  相。随着保温时间延长,组织有长大的趋势。采用金相显微镜附带的 Pro-imaging 图像分析仪软件按照 GB/T6401-1986 标准测量并计算相比比例(按灰度区分深浅颜色面积之比)。为获得更加准确的结果,每个试样在 500 倍下测量 10 个视场,计算相比比例的平均值。其在不同固溶温度和保温时间下的相的具体含量见图 3。当固溶温度为 950℃时,脆性相比比例随着保温时间延长而增加,铁素体含量减少,原因是随保温时间的延长,铁素体中发生了共析反应  $\alpha \rightarrow \gamma_2 + \sigma$ ,  $\sigma$  相在界面处不断形核并向铁素体相内长大,使得其含量不断增加,铁素体含量不断减少。在 1000℃~1050℃温度区间内,无  $\sigma$  相等脆性相析出,  $\alpha$  相: $\gamma$  相的比例接近为 1:1。

### 3.2. 含 V 和不含 V 的 2205 不锈钢钢筋 950℃固溶处理的 SEM 观察

分别选取含 V 和不含 V 的 2205 不锈钢钢筋在 950℃保温 3 小时的固溶处理金相样品进行 SEM 观察,结果如图 4、图 5 所示。950℃固溶处理的 SEM 观察到奥氏体和铁素体相界存在块状析出物,能谱扫描发现析出相中含有 Fe、Cr、Mo、Ca、O 等元素。推测析出物优先在相界面的夹杂物复合析出。

### 3.3. 含 V 的 2205 不锈钢钢筋和不含 V 的 2205 不锈钢钢筋的电化学腐蚀试验

分别选取含 V 和不含 V 的 2205 不锈钢钢筋固溶处理样品进行点蚀电位测试,根据 GBT 17899-1999 标准在 3.5%的 NaCl 溶液中测得的点蚀电位如表 2 所示。实验装置采用经典的三电极体系(如图 6),将固溶处理完的两种 2205 不锈钢钢筋用线切割机切为尺寸为 10×10×2.5 mm 的样品,并且每一组准备 3 个平行试样。先将方形试样去除氧化皮和油脂,然后用在其一端焊上导线,用环氧树脂封样,放入真空箱静置 72 h,固化后,打磨、抛光以备测量。从图 7 可以看出:含 V 的 2205 不锈钢钢筋的点蚀电位高于不含 V 的点蚀电位,说明含 V 的 2205 不锈钢钢筋由于 V 的存在,减弱了脆性相析出,提高了耐腐蚀性能[6] [7] [8] [9]。

## 4. 结论

1) 含 V 的 2205 不锈钢钢筋在 950℃固溶处理,组织中的脆性相比不含 V 的 2205 不锈钢钢筋组织中的脆性相显著减少。说明添加微合金元素 V 有抑制脆性相析出的作用。在 1000℃~1050℃温度区间内,无  $\sigma$  相等脆性相析出,  $\alpha$  相: $\gamma$  相的比例接近为 1:1。

2) 含 V 的 2205 不锈钢钢筋的临界点蚀电位高于不含 V 的 2205 不锈钢钢筋的临界点蚀电位。说明添加微合金元素提高了 2205 双相不锈钢的耐腐蚀性能。

3) 添加微合金元素抑制脆性相析出,将有利于降低固溶处理温度,对节能降耗发挥积极作用。

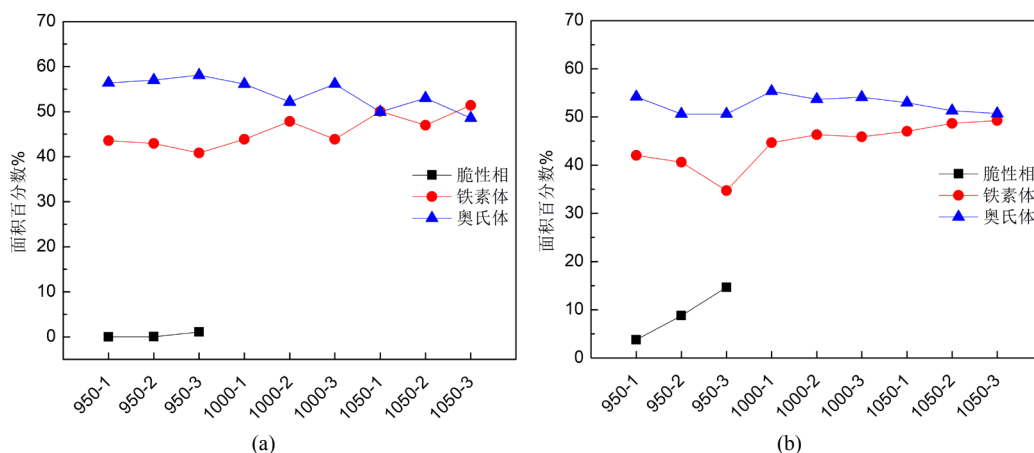
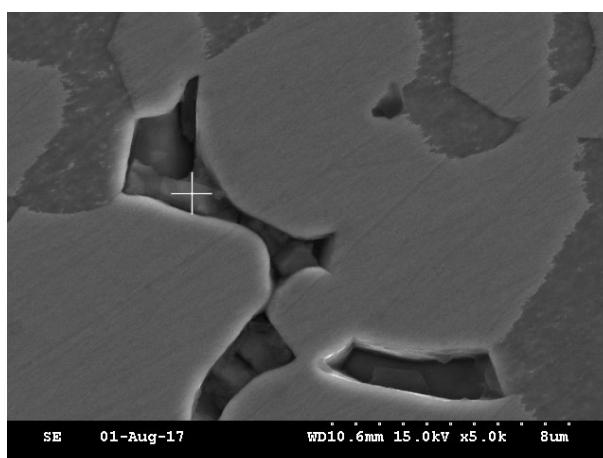
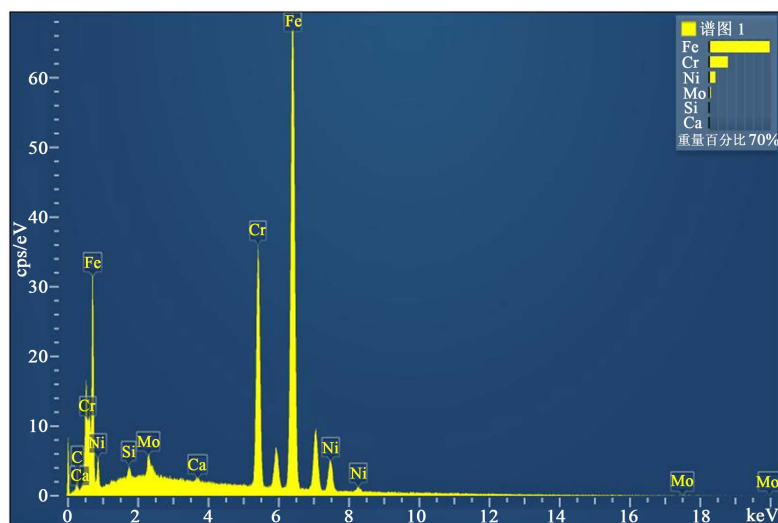


Figure 3. Phase proportion at different solution treatment. (a) Vanadium; (b) Do not contain vanadium  
 图 3. 不同固溶温度下和保温时间下的相含量。(a) 含钒; (b) 不含钒

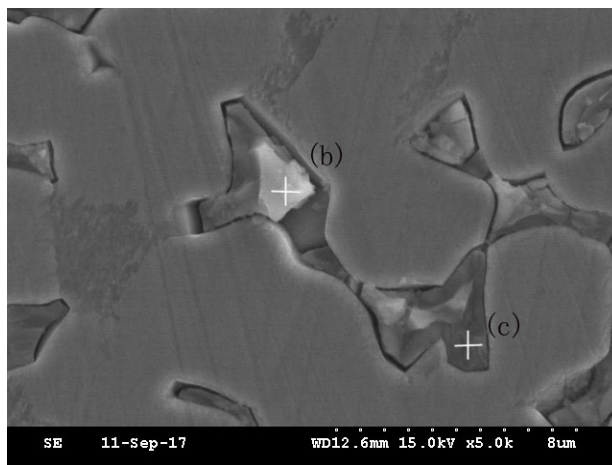


(a)

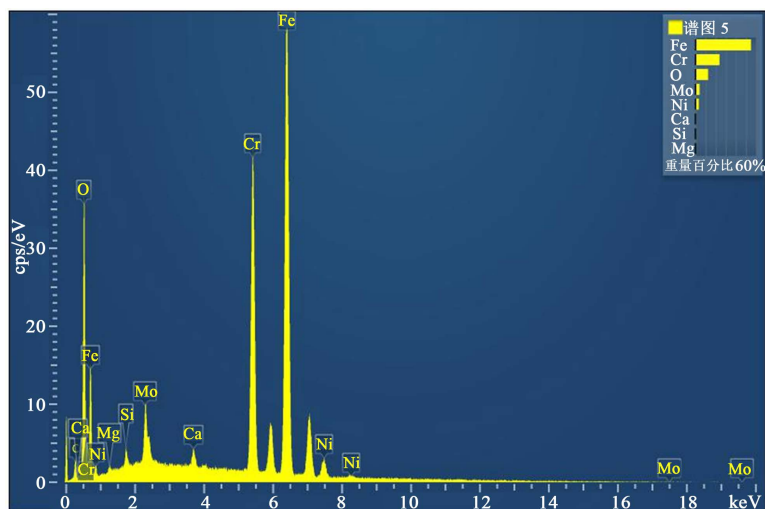


(b)

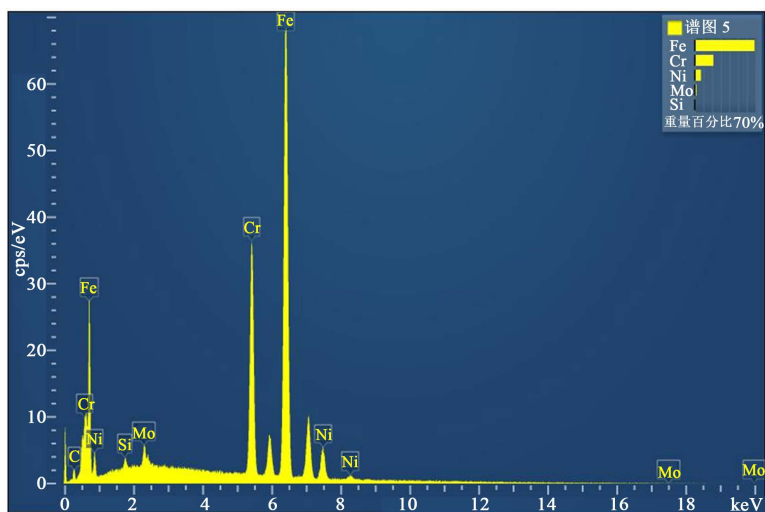
Figure 4. The images of 950°C solution treatment with V for 3 hour. (a) Morphology; (b) Energy spectrum  
 图 4. 含 V950°C固溶保温 3 小时的扫描照片。(a) 形貌; (b) 能谱



(a)



(b)



(c)

**Figure 5.** The images of 950°C solution treatment without V for 3 hour. (a) Morphology; (b), (c) Energy spectrum  
**图 5.** 不含 V950°C固溶保温 3 小时的扫描照片。(a) 形貌；(b)、(c) 能谱

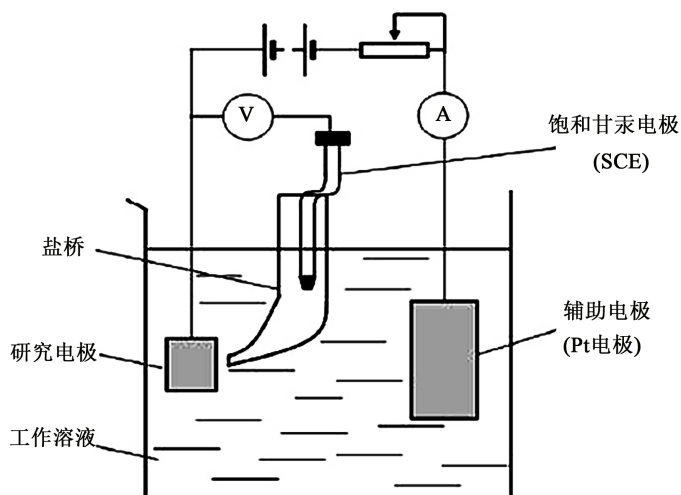


Figure 6. Standard three electrode cell of electrochemical test  
图 6. 电化学三电极体系

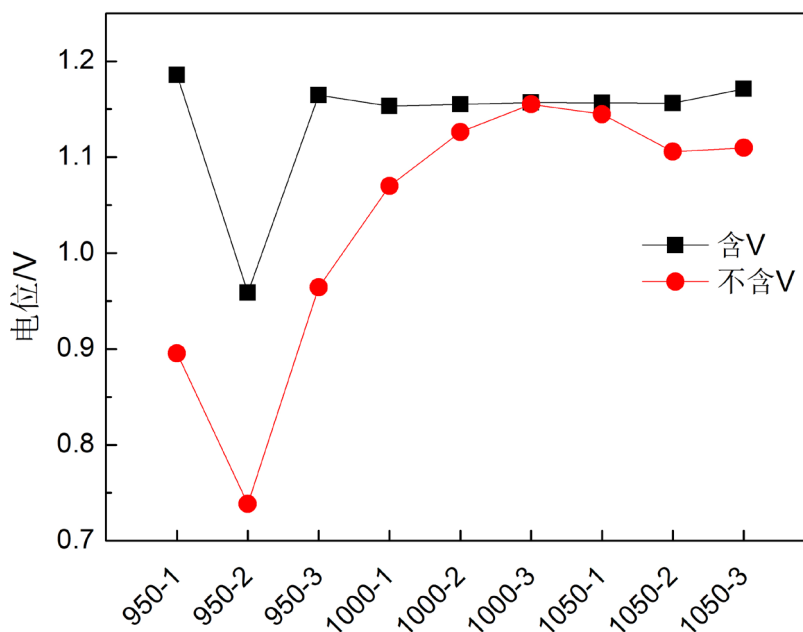


Figure 7. Critical pitting point of 2205 duplex stainless steel under different solution treatment  
图 7. 不同固溶处理条件下 2205 双相不锈钢点蚀电位

Table 2. Critical pitting point of 2205 duplex stainless steel under different solution treatment  
表 2. 不同固溶处理条件下 2205 双相不锈钢的临界点蚀电位

点蚀电位平均值/V	950-1	950-2	950-3	1000-1	1000-2	1000-3	1050-1	1050-2	1050-3
含 V	1.186	0.956	1.165	1.153	1.155	1.157	1.157	1.156	1.171
不含 V	0.895	0.739	0.964	1.070	1.126	1.155	1.145	1.106	1.110

### 基金项目

国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2015AA03A502)。



## 参考文献

- [1] 武英杰, 申鹏, 颜海涛. 双相不锈钢的国内外研究进展[J]. 科技创新导报, 2010(28): 41.
- [2] Olsson, L. (1994) 60 Years of Duplex Stainless Steel Applications. *National Association of Corrosion Engineers International Annual Conference*, Baltimore, 28 February-4 March 1994.
- [3] 王刚, 郭幼丹, 郭雷, 等. 双相不锈钢的发展特点及其应用[J]. 科技与创新, 2015(7): 91-92.
- [4] 刘复兴. S32205 双相不锈钢中  $\sigma$  相的析出及其对力学性能的影响[J]. 钢铁, 2010, 45(7): 62-65 + 93.
- [5] 刘雄, 何燕霖, 丁秀平, 等. 高温时效对 2205 双相不锈钢中  $\sigma$  相析出行为的影响[J]. 材料热处理学报, 2010, 31(3): 48-51.
- [6] Angelini, E. and De Benedetti, B. (2004) Microstructural Evolution And localized Corrosion Resistance of an Aged Super Duplex Stainless Steel. *Corrosion Science*, **46**, 1351-1367. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2003.09.024>
- [7] 肖纪美. 不锈钢的金属学问题[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2006.
- [8] 杨才福, 王瑞珍, 陈雪慧, 译. 钒在微合金钢中的作用[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2015.
- [9] Ras, M.H. and Pistorius, P.C. (2002) Possible Mechanisms for the Improvement by Vanadium of the Pitting Corrosion Resistance of 18% Chromium Ferritic Stainless Steel. *Corrosion Science*, **44**, 2479-2490. [https://doi.org/10.1016/S0010-938X\(02\)00050-1](https://doi.org/10.1016/S0010-938X(02)00050-1)

### 知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2373-1478, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: [meng@hanspub.org](mailto:meng@hanspub.org)