

# 侧吹气体对奥氏体不锈钢激光焊缝组织和耐腐蚀性能的影响

周 媛<sup>1</sup>, 蔡 艳<sup>1,2</sup>, 衡昊坤<sup>1</sup>, 盛 洁<sup>1</sup>, 李 芳<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>上海交通大学上海市激光制造与材料改性重点实验室, 上海 200240;

<sup>2</sup>高新船舶与深海开发装备协同创新中心, 上海 200240

**摘要** 为了研究光纤激光焊接奥氏体不锈钢过程中侧吹气体对焊缝组织和耐腐蚀性能的影响,建立了一种侧吹气体和金属蒸气的流体模型,分析了不同侧吹气体及其流量对金属蒸气温度场和速度矢量场的影响,提出了一种通过侧吹气体增加焊缝金属中氮元素含量的方法。试验结果表明,在不影响焊缝成形的前提下,该方法有效提高了上层焊缝金属中氮元素的含量,抑制了焊缝金属中铁素体的含量,增强了奥氏体不锈钢激光焊缝的耐点蚀性能。

**关键词** 激光技术; 光纤激光焊; 奥氏体不锈钢; 氮气; 焊缝组织; 耐蚀性

中图分类号 TG456.7

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0502005

## Influence of Side Assist Gas on Microstructure and Corrosion Resistance of Welds of Austenitic Stainless Steel in Laser Welding

Zhou Yuan<sup>1</sup>, Cai Yan<sup>1,2</sup>, Heng Haokun<sup>1</sup>, Sheng Jie<sup>1</sup>, Li Fang<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Shanghai Key Laboratory of Materials Laser Processing and Modification, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

<sup>2</sup>Collaborative Innovation Center for Advanced Ship and Deep-Sea Exploration, Shanghai 200240, China

**Abstract** In order to study the influence of side assist gas on the microstructure and the corrosion resistance of welds of austenitic stainless steels in the process of fiber laser welding, a fluid model of side assist gas and metal vapor is established. The influences of different kinds of side assist gases and their flow rates on the metal vapor temperature field and velocity vector are analyzed, and a method to increase the nitrogen content in the weld metals by means of side assist gas is proposed. The experimental results show that, on the premise of keeping the weld formation unaffected, the proposed method can effectively improve the nitrogen content in the upper layer of weld metals, restrain the ratio of ferrite in the weld metals, and enhance the pitting corrosion resistance of the austenitic stainless steel.

**Key words** laser technique; fiber laser welding; austenitic stainless steel; nitrogen; weld microstructure; corrosion resistance

**OCIS codes** 140.3390; 350.3390; 160.3900; 060.3510

## 1 引 言

奥氏体不锈钢作为一种重要的耐腐蚀材料,被广泛应用于各种腐蚀环境中,该不锈钢含有的少量铁素体组织可提高钢材的抗热裂能力和耐腐蚀能力。铁素体与奥氏体的电极电位不同,因此奥氏体不锈钢中的铁素体含量不宜过高,否则会增大点蚀倾向,造成材料的耐腐蚀性能下降。在焊接过程的非平衡热力学条件

收稿日期: 2016-12-09; 收到修改稿日期: 2017-01-11

基金项目: 国家自然科学基金(51475297)

作者简介: 周 媛(1992—),女,硕士研究生,主要从事高功率激光焊接方面的研究。E-mail: zhou\_yuan0506@sjtu.edu.cn

导师简介: 蔡 艳(1976—),女,博士,教授,博士生导师,主要从事焊接自动化、高功率激光焊接方面的研究。

E-mail: ycail@sjtu.edu.cn(通信联系人)

下,凝固过程中的偏析使焊缝金属的化学成分分布很不均匀,从而可能导致奥氏体不锈钢焊缝区铁素体含量较高且分布很不均匀。有研究表明<sup>[1-2]</sup>,奥氏体不锈钢中铁素体的最佳质量分数应小于3%,对于某些轧制的奥氏体不锈钢薄板,铁素体含量应当控制在2%以下。在采用传统焊接方法得到的奥氏体不锈钢焊缝金属中,铁素体含量可达到5%~7%<sup>[3]</sup>。激光焊过程的热输入较高,其焊接头中铁素体组织含量很高<sup>[4]</sup>,不利于获得具有较好耐蚀性能的接头,因此有必要探索一种新方法抑制铁素体的形成。

凝固模式对奥氏体不锈钢焊缝金属的组织具有重要影响。房菲等<sup>[5]</sup>指出,当18Mn18CrN(18%,1%分别指对应组分所占的质量分数)不锈钢中氮元素的质量分数由0.07%增加到0.72%时,凝固模式由铁素体模式向铁素体-奥氏体模式和奥氏体模式转变,奥氏体含量有所增加。邓宝柱等<sup>[6]</sup>研究表明,氮元素含量能对316L不锈钢焊缝的凝固模式和组织产生影响,当氮质量分数从0.018%提升到0.088%时,焊缝主要凝固模式由铁素体-奥氏体模式转变为奥氏体-铁素体模式,焊缝氮含量的增加导致焊缝铁素体形态和数目发生变化。总之,氮是一种强烈的奥氏体形成元素,在奥氏体不锈钢和双相不锈钢中加入一定含量的氮元素,可促进奥氏体的形成,从而显著提高不锈钢的力学性能和耐腐蚀性能<sup>[7]</sup>。

近年来,有学者尝试在激光焊接过程中通过侧吹气体来提高焊缝中氮元素的含量,以改善其焊缝组织<sup>[8]</sup>。Lai等<sup>[9]</sup>采用保护气中添加氮气的方式进行双相不锈钢焊缝组织的调控,发现氮元素有助于提升铁素体-奥氏体转变的温度,从而促进奥氏体形成。Kim等<sup>[10-11]</sup>发现,与纯氩气作为保护气体相比,在氩气中混合入氮气以后,氮原子可以由 $\alpha$ 相扩散至 $\gamma$ 相,并增加焊缝中的 $\gamma$ 相比,工件的抗点蚀能力有所提高。Salazar等<sup>[12]</sup>研究了熔化极稀有气体保护焊5 mm不锈钢时,在保护气体中添加氮气对接头性能的影响,试验结果表明,氮气的最佳含量在3%~5%,焊缝的耐蚀性能与母材的接近。然而,这些研究主要侧重于双相不锈钢焊缝的组织调控,对于氮元素在奥氏体不锈钢激光焊缝组织调控方面的研究鲜有报道。

本文建立了一种光纤激光焊过程侧吹气体和金属蒸气的流体模型,计算了金属蒸气温度场和速度矢量场,分析了不同侧吹气体种类及其流量对焊接区域的影响,在此基础上设计并优化了一种通过侧吹气体提升焊缝金属中氮元素含量的方法。

## 2 试验条件和流程

试验材料采用SUS304奥氏体不锈钢板,其化学成分见表1。焊接试样厚度为8 mm,长度为250 mm,宽度为150 mm。激光焊接试验前,使用丙酮擦拭板材表面去除油污等杂质。

表1 奥氏体不锈钢化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical compositions of austenitic stainless steel (mass fraction, %)

Element	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	N	Fe
Content	0.07	0.46	0.78	0.032	0.006	8.1	18.32	0.011	Bal.

采用德国IPG公司生产的YLS-10000-CW光纤激光器进行平板堆焊,试验装置如图1所示。焊接过程中,激光器输出功率为7 kW,焊接速度为1.2 m/min,离焦量为-6 mm。为了考察侧吹气体对焊缝组织的影响,分别采用氩气和氮气作为侧吹气体,其气体流量设为10,20,30 L/min。

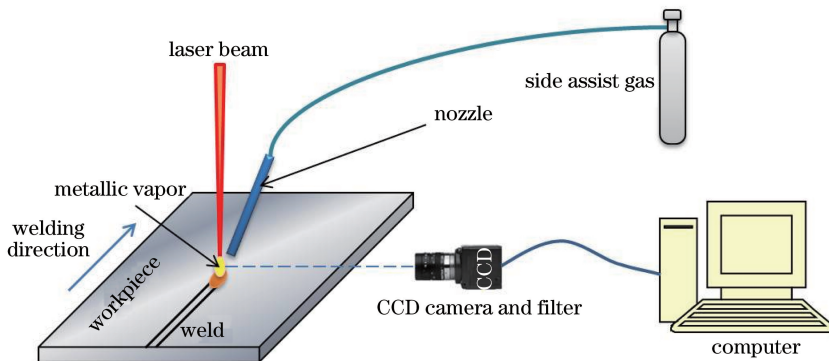


图1 试验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

焊接试验完成后,对所有焊接接头进行取样、打磨、抛光,将其置于由 5 g 三氯化铁、20 mL 盐酸和 100 mL 无水乙醇制备得到的三氯化铁盐酸溶液中,在 3 V 的电压条件下电解 10 s 左右。利用金相显微镜和扫描电子显微镜观察焊缝宏观尺寸和微观形貌,采用能谱分析仪及美国 LECO 公司的 TC-436 氮氧含量测试仪进行氮元素含量测定,试样尺寸为 2 mm×4 mm×10 mm,氮含量分析取样位置如图 2 所示。

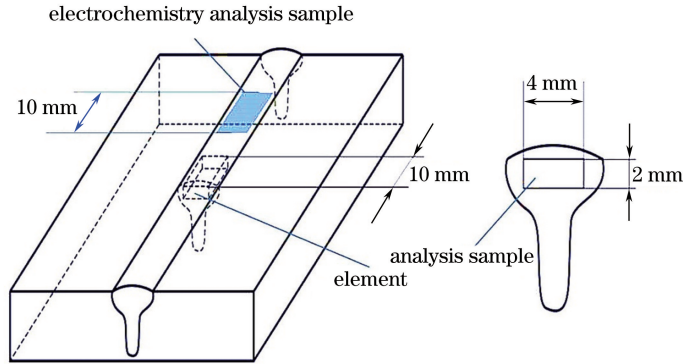


图 2 氮元素含量分析和电化学分析的取样位置

Fig. 2 Sampling location of content analysis and electrochemistry analysis of nitrogen element

采用德国 ZAHNER 公司的 Zennium-40332 型电化学工作站对焊缝金属进行测试,测试面尺寸为 5 mm×10 mm,试样截取位置如图 2 所示。使用质量分数为 3.5% 的氯化钠溶液作为导电介质,采用常规的三电极体系,辅助电极为铂片,参比电极为饱和甘汞电极,试验温度为 23 °C,电位扫描速度为 1 mV/s。试样进行动电极化试验之前,首先在开路状态下保持 60 min,观察并保证开路电位稳定,从而使得整个系统达到平衡。测量 -1.0~1.5 V 的电极电位变化,通过电化学工作站记录电流电压变化过程。

### 3 模拟计算

基于计算流体动力学原理,采用 Fluent 软件建立了一种激光焊的侧吹气体和金属蒸气交互模型,如图 3 所示。计算域为  $-20 \text{ mm} \leq x \leq 20 \text{ mm}$ ,  $0 \leq y \leq 40 \text{ mm}$ ,  $-20 \text{ mm} \leq z \leq 20 \text{ mm}$ ,点  $(0,0,0)$  处为入射激光焦点。侧吹喷嘴内径为 8 mm,喷嘴底部至工件表面的垂直距离为 8 mm。inlet 1 为侧吹气体入口,与水平面成  $45^\circ$ 。inlet 2 为简化的匙孔模型,匙孔直径为 1 mm,金属蒸气从匙孔中喷出,喷出方向为垂直水平面向上,侧吹气体方向延长线对准匙孔中心。将 inlet 1 和 inlet 2 均设置为速度入口,侧吹气体和金属蒸气分别以一定的初始温度和初始速度从 inlet 1 和 inlet 2 中喷出,工件表面 EFGH 设置为 wall,表面 AEFB、BFGC、CGHD、DHEA、ABCD 设置为压力出口。

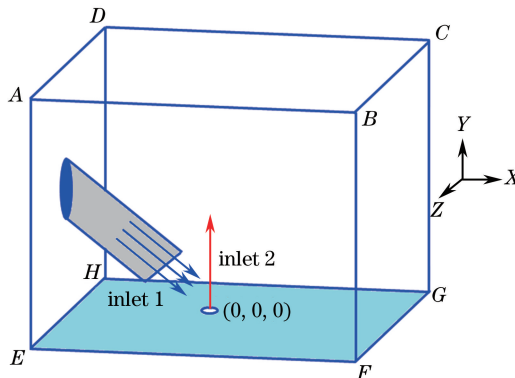


图 3 计算模型

Fig. 3 Calculation model

模拟过程中侧吹气体分别为氮气和氩气,相关物理参数见表 2。

表 2 氮气和氩气物理参数

Table 2 Physical parameters of N<sub>2</sub> and Ar

Gas	Molecular weight	Thermal conductivity / [W/(cm·K)]	Density / (kg/m <sup>3</sup> )	Ionization energy / eV
N <sub>2</sub>	28.01348	0.0002598	1.2506	14.534
Ar	39.948	0.0001772	1.7824	15.759

焊接过程中金属蒸气的形态和温度如图 4 所示。观察发现,当氩气和氮气分别作为侧吹气体时,金属蒸气的分布范围均随着侧吹气体流量的增加而减小。采用氩气作为侧吹气体进行激光焊时,匙孔外金属蒸气的分布范围略大一些,特别是金属蒸气外层分布范围。采用氮气侧吹时,金属蒸气在入射激光路径上的高度得到有效抑制。当氮气流量达到 30 L/min 时,金属蒸气 3000 K 等温线的高度低于 1 mm,这说明氮气对金属蒸气具有较强的抑制能力,有利于被焊接材料吸收激光能量。氮气与氩气的电离能相似,但氩气的导热系数小于氮气的;此外,氮气作为双原子气体,在高温下发生分解并吸收金属蒸气的热量。因此,在相同条件下,氩气作为保护气体时的金属蒸气高度比氮气的稍高。

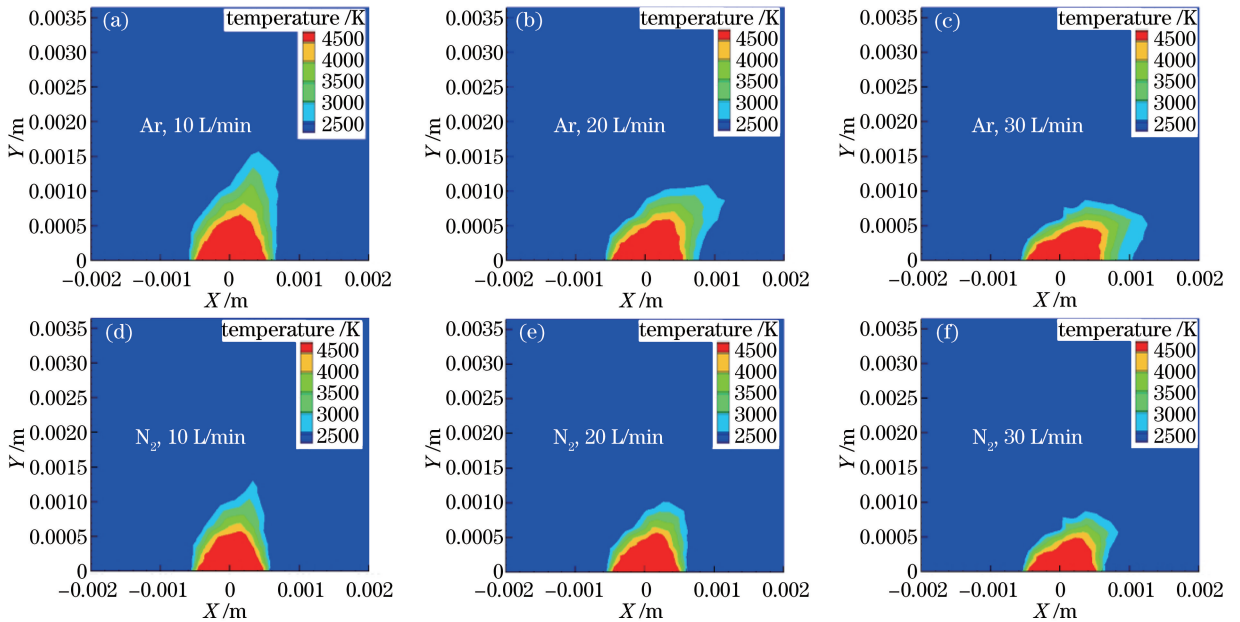


图 4 金属蒸气温度场

Fig. 4 Temperature field of metallic vapor

不同侧吹气体条件下的金属蒸气和侧吹气体的速度矢量如图 5 所示。结果表明,两种侧吹气体对金属蒸气的吹扫作用较为相似。对于侧吹气管置于入射激光前方的焊接过程而言,采用氮气侧吹时,金属蒸气后方的气流漩涡相对较弱,这有利于保护气体与熔池的交互行为。

## 4 试验结果和讨论

### 4.1 对焊缝成形的影响

不同侧吹气体和气体流量的接头横截面如图 6 所示。焊缝内未发现气孔、未熔合等缺陷,所有焊缝均具有典型的上宽下窄激光焊特征。对光纤激光焊而言,侧吹气体对焊缝熔深和表面宽度的影响并不显著。电弧焊时,为了维持焊接过程的稳定,获得合格的焊缝成形,通常需要控制保护气中氮气的比例,使得焊缝中通过保护气体渗氮变得非常困难。光纤激光焊试验结果表明,纯氮气侧吹并不会干扰光纤激光与材料的交互过程,这使得通过侧吹气体增加焊缝氮含量具有较好的工艺性。

### 4.2 对焊缝金属成分和组织的影响

焊缝的化学成分和焊接过程的热输入是决定接头组织的关键因素,对于不同保护气成分的焊接过程,其他焊接参数保持不变,可以认为焊接过程的热输入是基本相同的,因此,焊缝金属成分是决定组织的关键因

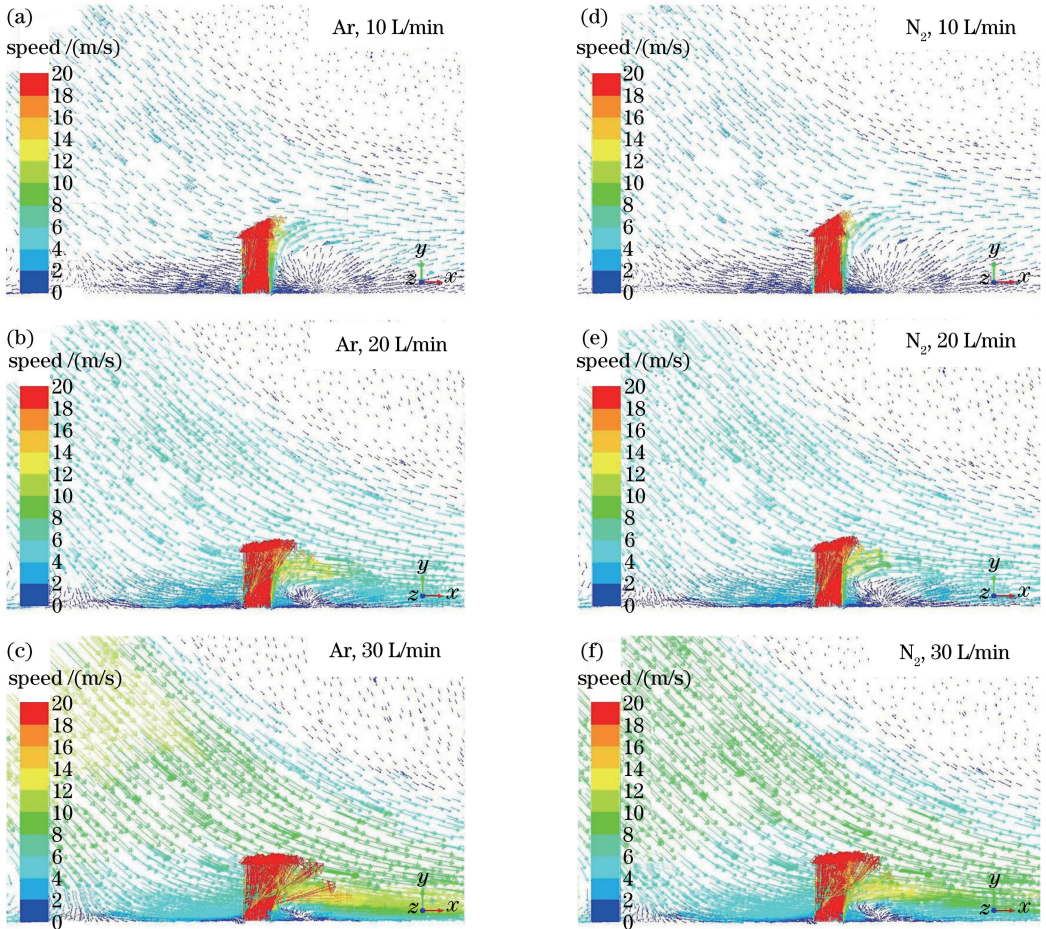


图 5 气体速度场

Fig. 5 Velocity field of gas

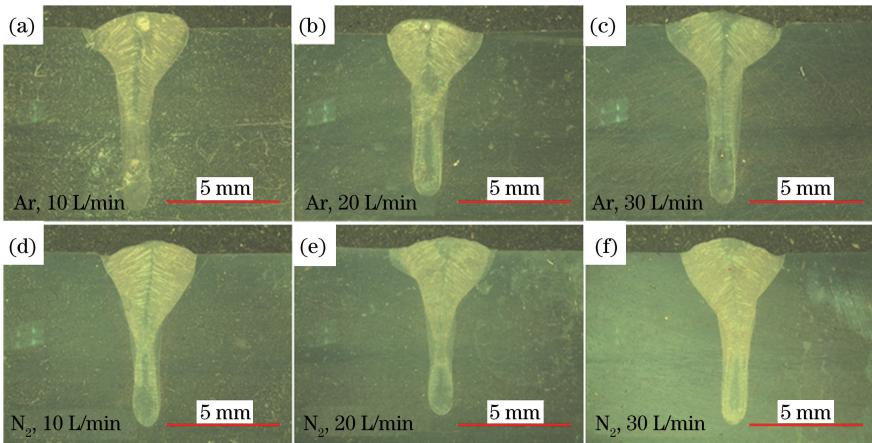


图 6 焊缝横截面照片

Fig. 6 Cross-section images of welds

素。利用氮氧联合测定仪,采用脉冲加热稀有气体熔融热导法进行分析,得到不同侧吹气体条件下的焊缝金属上表层区域氮元素含量,如图 7 所示。

观察发现,采用氮气作为侧吹气体时,焊缝金属中氮元素的含量显著高于氩气作为侧吹气体时焊缝的,且随着氮气流量的增加,焊缝金属中氮元素的质量分数逐步升高。氩作为稀有元素,不会参与焊接过程中的冶金化学反应;而氮是一种活性元素,能够参与焊接过程中的化学反应。在光纤激光的作用下,氮气可以分

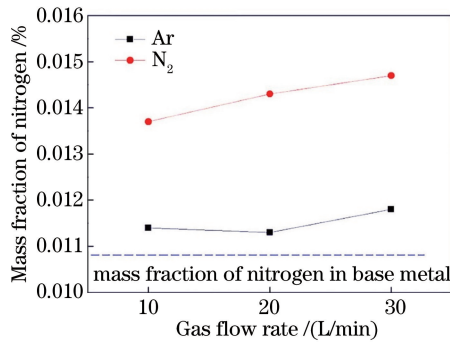


图 7 焊缝金属中氮元素质量分数

Fig. 7 Mass fraction of nitrogen element in weld metals

解为氮原子,从而能够被熔池吸收并溶解,而且光纤激光焊接过程中的金属蒸气比 CO<sub>2</sub> 激光焊接时的要少,电离程度也更小,从而更有利于氮的吸收。Dong 等<sup>[13]</sup>研究表明,纯铁溶液在 1600 °C、一个大气压的氮气环境中,氮元素的溶解度为 0.045 % (质量分数),在 CO<sub>2</sub> 激光焊接过程中,随着保护气中氮气分压的增大,氮元素的溶解度增大。在光纤激光焊接过程中,随着保护气中氮气含量不断增大,不锈钢焊缝中的氮含量升高。

利用晶间腐蚀的方法,将抛光试样用质量分数为 10% 的氢氧化钠水溶液电解腐蚀焊缝样品,采用数字相片处理技术得到焊缝截面中的金相照片,如图 8 所示,其中蓝色区域为奥氏体相,白色部分为铁素体相,相应的铁素体含量见表 3。从图 8 和表 3 中可以发现,采用氮气作为侧吹气体时,焊缝上部氮气流量的增加,有效促进了奥氏体的形成,焊缝金属中的铁素体含量得到有效抑制。随着氮气流量增加,焊缝金属中氮元素进一步提高,铁素体含量继续降低。当氮气流量为 30 L/min 时,焊缝金属中铁素体体积分数降至 6.8%,比采用 20 L/min 氩气侧吹时的降低了 34.6%。

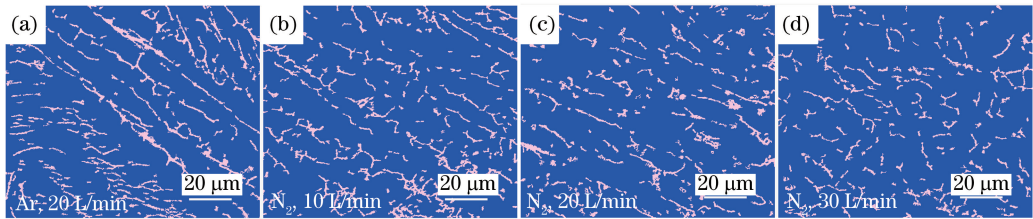


图 8 焊缝金属中铁素体分布

Fig. 8 Distribution of ferrite in weld metals

表 3 焊缝金属铁素体含量

Table 3 Ferrite content in weld metals

Gas	Flow rate /(L/min)	Volume fraction of ferrite /%
Ar	20	10.4
	10	9.4
N <sub>2</sub>	20	8.1
	30	6.8

激光焊接过程中,熔池首先形成铁素体,之后转变为奥氏体,随着氮含量的增加,奥氏体在高温下的稳定性得到改善,从而使得焊缝中奥氏体含量增多,从热力学和动力学两方面促进了铁素体向奥氏体的转变<sup>[14]</sup>。

### 4.3 对焊缝耐蚀性的影响

根据电化学工作站的电流、电压的变化数据,得到图 9 所示的电极化曲线,其中  $E$  为电压, $i$  为电流密度。利用电化学工作站处理得到的自腐蚀电流密度和自腐蚀电压等特征值见表 4。

自腐蚀电位体现在腐蚀热力学上,表征腐蚀的难易程度,自腐蚀电位越高,抗腐蚀能力越强。分别采用氩气和氮气侧吹时,焊缝金属自腐蚀电位的差别并不显著。点蚀电位的高低决定了发生点蚀的难易程度,点蚀电位越高,抗点蚀性能越好。对比氮气和氩气保护的两种情况,氩气侧吹时焊缝表面的点蚀电位与母材的接近,而氮气侧吹时,点蚀电位略有提高,特别是当氮气流量增加至 30 L/min 时。这是因为焊缝金属中氮

元素含量增加,氮元素有利于提高不锈钢的耐点蚀性能,而铁素体含量的降低有助于改善焊缝组织的均匀性,这也有助于抑制点蚀。

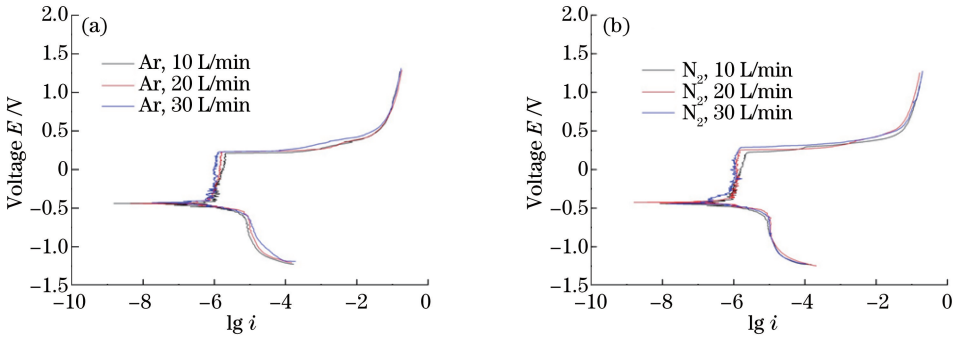


图 9 不同侧吹气体下焊缝金属的极化曲线。(a) 氩气;(b) 氮气

Fig. 9 Polarization curves of weld metal with different side assist gases. (a) Ar; (b) N<sub>2</sub>

表 4 不同侧吹气体下焊缝金属的极化曲线参数

Table 4 Polarization curve parameters of weld metals with different side assist gases

Gas	Flow rate / (L/min)	AnodeTafel slope /mV	CathodeTafel slope /mV	Self-corrosion voltage /V	Pitting corrosion voltage /V	Self-corrosion density /( $A \cdot cm^{-2}$ )	Polarization resistance /( $\Omega \cdot cm^2$ )
Ar	10	202	102	-0.443	0.214	$9.829 \times 10^{-7}$	$2.994 \times 10^4$
	20	214	93.2	-0.424	0.251	$6.212 \times 10^{-7}$	$4.538 \times 10^4$
	30	271	96.9	-0.443	0.280	$5.229 \times 10^{-7}$	$5.927 \times 10^4$
N <sub>2</sub>	10	97.3	103	-0.439	0.209	$5.161 \times 10^{-7}$	$4.210 \times 10^4$
	20	104	94.8	-0.440	0.225	$4.039 \times 10^{-7}$	$5.332 \times 10^4$
	30	257	98.6	-0.429	0.229	$4.115 \times 10^{-7}$	$7.519 \times 10^4$

## 5 结 论

采用氩气或氮气作为侧吹气体可以在奥氏体不锈钢光纤激光焊的过程中获得稳定的焊接过程和良好的焊缝成形。模拟结果显示,采用氮气侧吹时,金属蒸气的范围略小,熔池上方的气流漩涡相对较弱;采用氮气作为侧吹气体,能够有效提高不锈钢焊缝金属中的氮元素含量,促进奥氏体形成,从而抑制焊缝金属中铁素体的含量;同时,随着奥氏体不锈钢焊缝金属中氮元素含量的增加,焊缝金属的点蚀电位略有提高。

## 参 考 文 献

- [1] 吉章红. 奥氏体不锈钢焊缝铁素体含量对性能的影响[J]. 中国特种设备安全, 2012, 28(12): 18.
- [2] 胡万伦. 奥氏体不锈钢焊缝中铁素体形成机理及作用[C]. 成都: 全国核材料学术交流会, 2006: 84-86.
- [3] He Defu, Cao Zhiliang, Zhou Zhijiang, *et al.* Ferritic content of austenitic stainless steel weld seam and its measurement methods[J]. Welded Pipe and Tube, 2007, 30(5): 30-35.  
何德孚, 曹志樑, 周志江, 等. 奥氏体不锈钢焊管焊缝铁素体含量及其测定[J]. 焊管, 2007, 30(5): 30-35.
- [4] Chen L D, Tan H, Wang Z Y, *et al.* Influence of cooling rate on microstructure evolution and pitting corrosion resistance in the simulated heat-affected zone of 2304 duplex stainless steels[J]. Corrosion Science, 2012, 58: 168-174.
- [5] Fang Fei, Li Jingyuan, Wang Yide. Solidification mode and microstructure of nitrogenous stainless steels[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2014, 36(11): 1490-1496.  
房 菲, 李静媛, 王一德. 含氮不锈钢凝固模式及显微组织研究[J]. 北京科技大学学报, 2014, 36(11): 1490-1496.
- [6] Deng Baozhu, Ma Chengyong, Peng Yun, *et al.* Effect of nitrogen on solidification mode and microstructure of 316L stainless steel[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2010, 31(5): 89-92.  
邓宝柱, 马成勇, 彭 云, 等. 氮对 316L 不锈钢焊缝凝固模式和组织的影响[J]. 焊接学报, 2010, 31(5): 89-92.
- [7] Bauer B, Topic A, Kralj S, *et al.* Influence of the gas composition on the geometry of laser-welded joints in duplex stainless steel[J]. Materiali in Tehnologije, 2011, 45(5): 413-419.
- [8] Li Zhuji, Lü Junxia, Zhou Jianglin, *et al.* Microstructure and mechanical property of joints in laser welding of stainless

steels with nitrogen shielding gas[J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(12): 1202006.

李竹洁, 吕俊霞, 邹江林, 等. 氮气保护不锈钢激光焊接接头组织及力学性能[J]. 中国激光, 2016, 43(12): 1202006.

- [9] Lai R, Cai Y, Wu Y, *et al.* Influence of absorbed nitrogen on microstructure and corrosion resistance of 2205 duplex stainless steel joint processed by fiber laser welding[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2016, 231: 397-405.
- [10] Kim S T, Kim S Y, Lee I S, *et al.* Effects of shielding gases on the microstructure and localized corrosion of tube-to-tube sheet welds of super austenitic stainless steel for seawater cooled condenser[J]. Corrosion Science, 2011, 53(8): 2611-2618.
- [11] Kim S T, Jang S H, Lee I S, *et al.* Effects of solution heat-treatment and nitrogen in shielding gas on the resistance to pitting corrosion of hyper duplex stainless steel welds[J]. Corrosion Science, 2011, 53(5): 1939-1947.
- [12] Salazar J M G D, Soria A, Barrena M I. The effect of N<sub>2</sub> addition upon the MIG welding process of duplex steels[J]. Journal of Materials Science, 2007, 42(13): 4892-4898.
- [13] Dong W, Kokawa H, Sato Y S, *et al.* Nitrogen absorption by iron and stainless steels during CO<sub>2</sub> laser welding[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2003, 34(1): 75-82.
- [14] Muthupandi V, Srinivasan P B, Shankar V, *et al.* Effect of nickel and nitrogen addition on the microstructure and mechanical properties of power beam processed duplex stainless steel (UNS 31803) weld metals[J]. Materials Letters, 2005, 59(18): 2305-2309.