

保护气体对薄板 A304 光纤激光焊接接头形貌和力学性能的影响

樊宇¹, 李沛智^{1*}, 柳岸敏², 陈正¹, 郭跃¹

¹中国矿业大学材料科学与工程学院, 江苏 徐州 221008;

²常州信息职业技术学院, 江苏 常州 213164

摘要 在不同气压的高纯 N₂、Ar 及 N₂/Ar 混合气体保护条件下, 采用光纤激光器对厚度为 2 mm 的奥氏体 304 薄板进行了焊接试验, 研究了保护气体压强、气体类型和混合比例对焊接接头形貌及力学性能的影响。结果表明, 保护气体压强越大, 焊缝熔深就越大, 但气体压强对焊缝强度和硬度无明显影响。使用 N₂/Ar 混合气体作为保护气体时, N₂ 在保护气体中所占比例越大, 焊缝的熔深就越大, 而且使用不同比例的保护气体得到的焊缝均呈“丁”字形; 保护气体类型及比例对焊缝强度和硬度没有显著影响, 但焊缝的强度和硬度均大于母材。

关键词 激光技术; 光纤激光焊接; 保护气体; 焊缝熔深; 力学性能

中图分类号 TG456.7 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.011404

Effect of Shielding Gas on Joint Morphology and Mechanical Property of Fiber Laser Welding of A304 Thin Sheet

Fan Yu¹, Li Peizhi¹, Liu Anmin², Chen Zheng¹, Guo Yue¹

¹ School of Materials Science and Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221008, China;

² Changzhou College of Information Technology, Changzhou, Jiangsu 213164, China

Abstract Under different protection conditions of shielding gases composed of pure N₂, pure Ar, or N₂/Ar mixing, one experiment of fiber laser welding of 304 austenitic thin plate with a thickness of 2 mm is conducted, and the effects of shielding gas pressure, gas type, and mixing ratio on the weld joint morphology and mechanical property are investigated. The results indicate that the larger the shielding gas pressure is, the larger the weld penetration depth becomes, but the gas pressure has no obvious influence on the weld strength and hardness. When the N₂/Ar mixing gas is used as the shielding gas, the larger the N₂ content ratio is, the larger the penetration depth becomes, and the tee-headed weld is kept no matter what the content ratio of shielding gas is. The type and content ratio of shielding gas have no obvious influence on the weld strength and hardness, but the strength and hardness are both larger than those of substrate.

Key words laser technique; fiber laser welding; shielding gas; weld penetration depth; mechanical property

OCIS codes 140.3390; 140.3510; 160.3900

1 引言

在激光焊接过程中, 金属材料表面会产生光致等离子体。光致等离子体会吸收、折射一部分激光能量,

收稿日期: 2016-07-25; 收到修改稿日期: 2016-09-14; 网络出版日期: 2016-12-28

基金项目: 中央高校基本科研基金(2014QNA09)、江苏省自然科学基金青年基金(BK20150205)、江苏省产学研前瞻性研究基金(BY2015023-02)

作者简介: 樊宇(1983—), 男, 博士, 讲师, 硕士生导师, 主要从事激光成形技术工艺与装备方面的研究。

E-mail: fanyu@cumt.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: 13813471035@163.com

使激光能量不能直接传输到被焊金属材料表面,从而降低金属材料表面的激光功率密度,进而影响焊缝熔深,甚至产生焊接缺陷^[1]。

为了降低光致等离子体对焊缝的影响,在激光焊接中通常使用高速喷嘴向焊件喷送保护气体,利用大流量气体将光致等离子体吹开^[2]。肖荣诗等^[1]研究了 He、Ar、N₂ 和 CO₂ 四种不同辅助气体对 CO₂ 激光焊接结构钢焊缝熔深的影响,发现焊缝熔深由小到大的辅助气体排列顺序为 Ar、N₂、CO₂、He。刘键等^[3]研究了保护气体对 Nd:YAG 激光焊接奥氏体不锈钢焊缝力学性能的影响,发现在保护气体作用下接头抗拉强度变化平稳。Sathiya 等^[4]将 He、Ar、N₂ 和 O₂ 四种气体进行不同比例的混合,研究了 CO₂ 激光-电弧复合焊接接头的力学性能,发现焊件焊缝的硬度和强度均大于母材;当使用的保护气体中存在 N₂ 时,焊缝中的硬质氮化物相使得焊缝硬度变大、冲击韧性变小。李耿等^[5]使用光纤激光器研究了 He、N₂、Ar 三种气体以及不同比例混合的 Ar/He 混合气体对焊缝熔深的影响,发现焊缝熔深由大到小的保护气体排列顺序为 He、N₂、Ar,且 Ar/He 混合气体中 He 含量越高或者保护气体的总流量越大,焊缝熔深就越大。关于保护气体在大功率 CO₂ 激光焊接中的作用的研究已经很多,而关于保护气体的类型和比例对光纤激光焊接的焊缝力学性能影响的研究鲜有报道。

光纤激光器是激光质量非常好的、以光纤作为激光介质的固体激光器,其发出的激光在光路传输过程中不会发生分离和变形。光纤激光器的波长约为 1.06 μm,远小于 CO₂ 激光器 10.6 μm 的波长,激光波长越短,激光光子越容易被金属材料吸收。此外光纤激光器的衰减度约为 10 dB/km,比固体激光器少几个数量级^[6]。由于光纤激光焊接的效果与其他激光焊接方法的效果有较大区别,研究保护气体在光纤激光焊接中的作用是十分必要的。

2 试验材料与方法

2.1 试验材料

激光焊接试验所用的材料为厚度 2 mm 的奥氏体 304 不锈钢薄板,试样尺寸为 110 mm×150 mm。其具体化学成分和力学性能见表 1、2。

表 1 奥氏体 304 不锈钢化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical compositions of 304 austenitic stainless steel (mass fraction, %)

Element	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Fe
Content	0.0630	0.6880	1.1450	0.0275	0.0001	8.8250	18.2675	Bal.

表 2 奥氏体 304 不锈钢的力学性能^[7]

Table 2 Mechanical property of 304 austenitic stainless steel^[7]

Yield strength /MPa	Tensile strength /MPa	Elongation at break /%	Reduction of area /%	Brinell hardness /HB	Rockwell hardness /HRC	Micro-hardness /HV
≥205	≥520	≥40	≥50	≤187	≤90	≤200

2.2 试验设备

激光焊接设备由 500 W 光纤激光焊接器、10 m 长光纤、激光专用焊接头、精密冷干机、气氛分布控制箱、冷水机、空气压缩机等组成,激光焊接接头侧吹气体如图 1 所示。侧吹空气可防止熔渣飞溅污染镜片,而保护气体的作用是吹开焊接头下方的光致等离子体,因此保护气体对焊缝有影响。

2.3 试验方法

试验分别使用纯度为 99.999% (体积分数) 的高纯 Ar、高纯 N₂ 气体及 N₂/Ar 混合气体,在 0.10~0.30 MPa 的气体压强下对 2 mm 厚奥氏体 304 不锈钢薄板进行激光焊接。在进行 N₂/Ar 混合气体焊接试验时,固定一个气体的压强为 0.10 MPa,另一个气体的压强分别取 0.10, 0.15, 0.20, 0.25, 0.30 MPa 与其混合进行焊接。焊接功率、焊接速度等试验工艺参数见表 3。

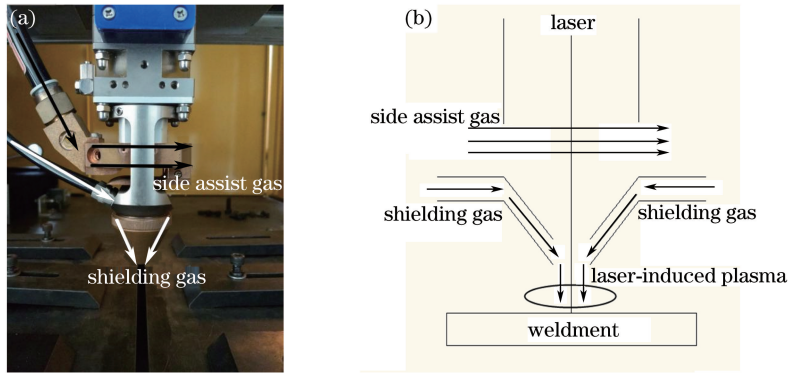


图 1 激光焊接头及气路系统。(a)实物图;(b)示意图

Fig. 1 Laser welding joint and gas system. (a) Physical map; (b) schematic diagram

表 3 激光焊接参数

Table 3 Parameters for laser welding

Parameter	Content
Laser power	500 W
Welding mode	Butt
Defocusing amount	0
Welding speed	0.8 m/min
Focal length	135 mm
Spot diameter	0.5 mm

利用线切割方法将焊件切成尺寸为 $5\text{ mm} \times 5\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ 的试样。使用甲基丙烯酸甲酯和义齿基托树脂镶样,然后使用砂纸对试样进行打磨及抛光,使用王水腐蚀表面约 15 s。试样制作完成后使用日本 Olympus 公司生产的 PMG3 倒置式光学显微镜研究焊缝显微组织及性能。

参照拉伸试样国标 GB/T228-2002,利用线切割方法制备奥氏体 304 不锈钢激光焊接接头拉伸试样,试样尺寸如图 2 所示。线切割后的试样需经过砂纸打磨以消除线切割加工痕迹、减少其对拉伸试验结果的影响。平行试验重复三次。采用国产的 HV-5 小负荷维氏硬度计进行显微硬度测试,从焊缝中心位置起向焊缝外每隔 0.5 mm 取一个测试点,压头载荷为 9.807 N,持续加载 10 s。

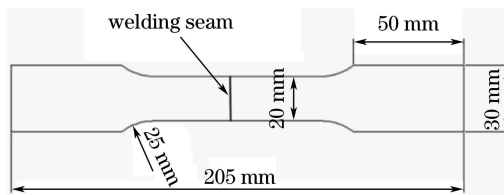


图 2 拉伸试样尺寸

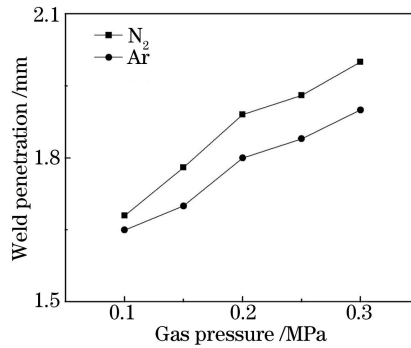
Fig. 2 Dimension of tensile specimen

3 试验结果和讨论

3.1 保护气体对熔深的影响

保护气体种类和气体压强与熔深的关系如图 3 所示。从图中可以看出,随着气体压强的增大,焊缝的熔深会随之增加。当气体压强较小时,保护气体难以将熔池上方的光致等离子体吹散,因此熔深较小;随着气体压强的增大,气体流量增大,保护气体去除熔池上方等离子体的作用加强,减轻了光致等离子体的屏蔽作用,使得熔深增大。

在相同气体压强下,使用 N_2 作为保护气体比使用 Ar 的熔深大,因为气体的电离电压和导热性决定了熔深。激光焊接中,在表面金属蒸气等离子体的作用下,保护气体被击穿转变为燃烧波(LSC)等离子体后,才可能出现等离子体对激光的屏蔽现象^[8]。表 4 为 Ar 和 N_2 的电热物理性能,其中气体的导热系数是在

图3 在不同气体压强下, N₂ 和 Ar 对焊缝熔深的影响Fig. 3 Effects of N₂ and Ar on weld penetration depth under different gas pressures

173 K条件下的数值,气体的密度是在 0 °C、101.3 kPa 条件下的数值。从表 4 可以看出,Ar 的电离电压略大于 N₂ 的电离电压,N₂ 比 Ar 更容易被电离形成等离子体,从而对激光产生更严重的等离子体屏蔽现象。因此,在相同条件下,理论上使用 N₂ 作为保护气体进行焊接可得到熔深更浅的焊缝。然而实际并非如此,这是因为保护气体的热导率同样会影响等离子体对激光的屏蔽。

表 4 气体的电热物理性能

Table 4 Electrothermal physical property of gas

Gas	Relative molecular mass	Thermal conductivity / [W/(m·k)]	Density / (kg/m ³)	Ionization voltage /V
Ar	39.94	0.0177	1.782	15.7
N ₂	28.02	0.0228	1.25	14.5

在激光焊接中,要想出现光致等离子体对激光的屏蔽现象,焊件表面的光致等离子体必须维持足够的高度。激光焊接产生光致等离子体后,光致等离子体与外界会发生热传导和热辐射的能量损失,要想维持一定的高度就必须满足光致等离子体的维持条件。如果光致等离子体的高度正好维持激光输入能量与光致等离子体损失能量的平衡,此时正好满足光致等离子体的维持条件^[9]。如果只考虑光致等离子体热传导和热辐射的能量损失,光致等离子体的维持条件可表示为^[10]

$$\frac{d}{dr} \left(r\lambda \frac{dT}{dr} \right) + H = IA, \quad (1)$$

式中 r 为距等离子体中心的径向距离, λ 为热传导率, T 为温度, H 为热辐射功率密度, A 为等离子体对入射激光的吸收率, I 为激光功率密度。以上所有参数在激光光斑半径 r_F 范围内取平均值,则(1)式可改写为^[10]

$$\lambda T / r_F^2 + \langle H \rangle = I_m A, \quad (2)$$

式中 $\langle H \rangle$ 为热辐射功率密度平均值, I_m 为光致等离子体的维持阈值。从(2)式可以看出,光致等离子体的维持阈值与保护气体的热传导性有关,保护气体的热传导性越好,激光产生的能量越容易传导出去,光致等离子体的维持阈值也就越高,光致等离子体的高度也就越低。在相同条件下,光致等离子体的高度越低,越不易出现光致等离子体屏蔽激光的现象^[11]。当保护气体为 N₂ 类分子气体时,这些气体分子在高功率密度激光下会发生分子分解而产生光致等离子体,因此光致等离子体吸收的能量还必须用来补偿气体分子分解产生的能量损失,从而提高光致等离子体的维持阈值。由于 N₂ 属于分子气体,N₂ 的光致等离子体的维持阈值高于 Ar 的光致等离子体的维持阈值,在相同气压下使用 N₂ 作为保护气体的熔深比使用 Ar 作为保护气体的熔深要大。

混合气体试验对应的熔深如图 4 所示。从图中可以看出,焊缝的熔深随着混合气体压强的增大而增加。当混合气体压强相同时,N₂ 所占的气体压强比例越大,焊缝的熔深就越大。这与单一类型气体作为保护气体的原理相同,是 N₂ 等离子体的维持阈值高于 Ar 等离子体的维持阈值导致的。

3.2 保护气体对拉伸性能的影响

当使用 N₂(0.30 MPa)、N₂(0.25 MPa)/Ar(0.10 MPa)混合气体和 Ar(0.30 MPa)/N₂(0.10 MPa)混合气体作为保护气体时,焊件被焊透,试样的拉伸断裂位置位于远离焊缝和热影响区的母材;而使用其他参数

保护气体时,焊件没有被焊透,焊件的拉伸断裂位置位于焊缝。保护气体压强与抗拉强度的关系如图 5 所示。由图可以看出,焊件的抗拉强度随着气体压强的增大而增加;使用 N_2 作为保护气体比使用 Ar 的焊件抗拉强度大;混合气体中 N_2 的气体压强比例越大,焊件的抗拉强度越大。

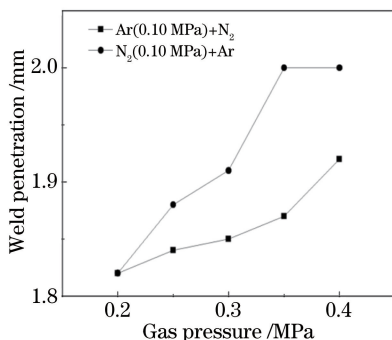


图 4 混合气体气压对焊缝熔深的影响

Fig. 4 Effect of mixing gas pressure on weld penetration depth

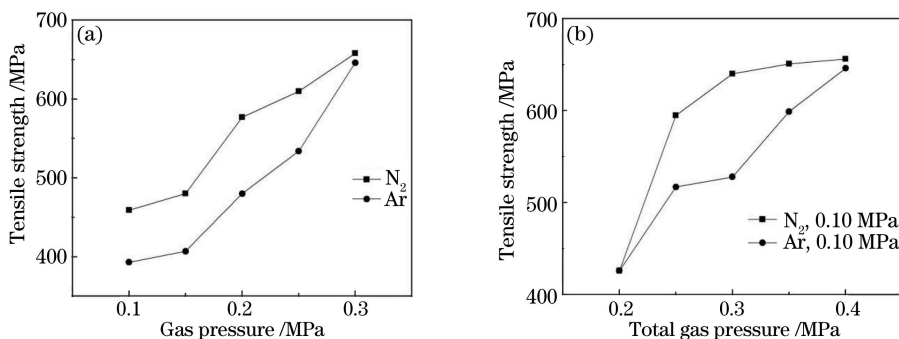


图 5 不同种类保护气体下的气压对焊件抗拉强度的影响。(a)单一保护气体;(b)混合保护气体

Fig. 5 Effect of gas pressure on tensile strength of welds. (a) Single kind of shielding gas; (b) mixing shielding gas

比较图 3 和图 5 可以发现,焊件的抗拉强度与焊缝的熔深有关,焊缝熔深越大抗拉强度也越大。当焊件被焊透时,试样的拉伸断裂位置位于母材,焊缝的抗拉强度高于母材抗拉强度。从图 6 可以看出,母材区域由晶粒较粗大的等轴晶组成,熔合线附近母材的晶粒没有明显长大,不存在明显的热影响区。焊缝区域发生晶粒细化的晶体主要是沿垂直于熔合线的方向生长的柱状晶^[12]。焊缝的边缘靠近固相金属,导热率高、温度梯度较大、结晶速度较小,因此成分过冷区较小,有利于柱状晶的形成。柱状晶依附于母材晶粒生长,当晶粒最容易生长的方向与散热最快方向一致时,晶粒沿垂直于熔合线方向向焊缝中心生长^[13]。焊缝区域较母材区域的晶粒尺寸细,根据霍尔佩奇公式可以推测出焊缝的强度大于母材的强度,这与试验结果相符合^[14]。

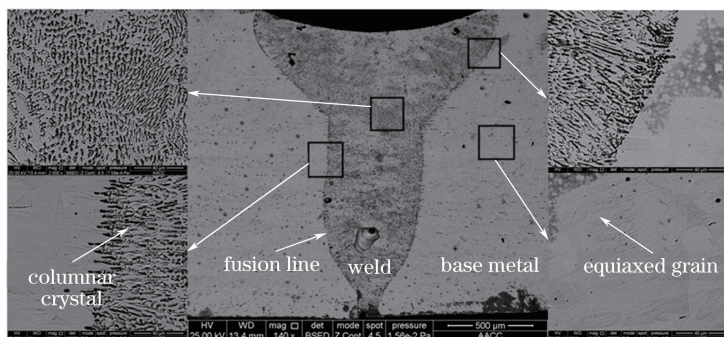


图 6 光纤激光焊接接头的微观组织

Fig. 6 Microstructure of weld joint by fiber laser welding

3.3 保护气体对焊缝硬度的影响

使用不同气体压强的 N_2 作为保护气体的焊件显微硬度如图 7 所示。从图中可以看出,保护气体的压

强和类型对焊缝的硬度没有影响;无论使用何种保护气体,焊缝的硬度均大于母材的硬度。从图 6 可以看出焊缝金属的晶粒细化,因此焊缝的硬度高于母材的硬度。熔合线到母材之间区域的硬度没有太大的变化,这是因为熔合线附近不存在明显的晶粒粗大的热影响区。

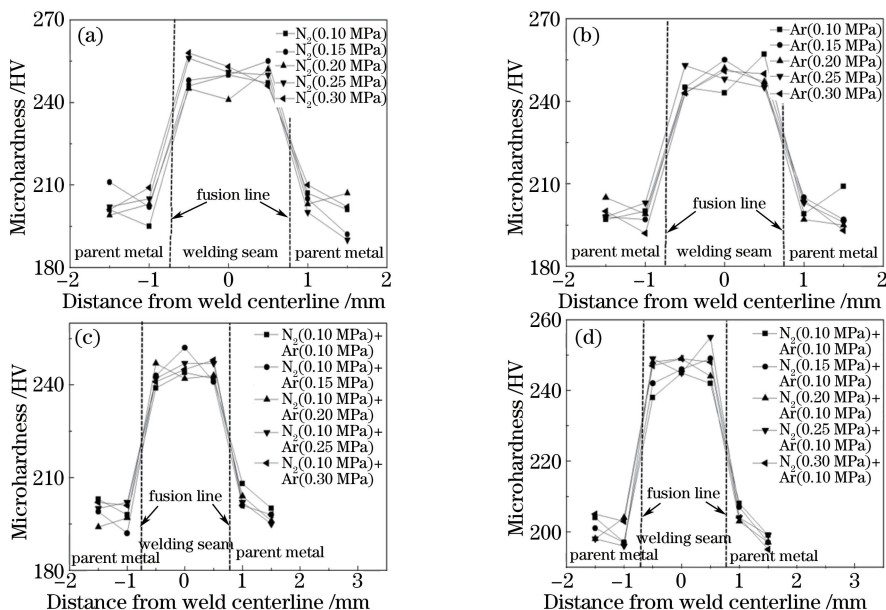


图 7 保护气体对焊件显微硬度的影响。(a)纯 N_2 ; (b)纯 Ar; (c)不同压力下的 Ar+0.10 MPa 的 N_2 ; (d)不同压力下的 N_2 +0.10 MPa 的 Ar

Fig. 7 Effect of shielding gas on micro-hardness of welds. (a) Pure N_2 ; (b) pure Ar; (c) 0.10 MPa N_2 mixing with Ar with different pressures; (d) 0.10 MPa Ar mixing with N_2 with different pressures

N_2 可以抑制光致等离子体的形成,从而提高激光的热输入量。 N_2 可以被母材轻微吸收,作为比碳元素更为有效的固溶强化元素,氮元素进入焊缝会提高焊缝的硬度^[5]。图 8 是使用 N_2 作为保护气体焊接的焊缝 X 射线衍射(XRD)图谱,其中 2θ 为衍射角。通过 MDI Jade 软件分析可知,焊缝中没有氮化物, N_2 没有进入焊缝中,焊缝物质为铁镍合金。在激光焊接过程中, N_2 没有进入焊缝中形成氮化物,且 Ar 与 N_2 的热传导率相差不大,改变保护气体的种类和气压对熔池冷却速度影响不大,对焊缝组织没有明显影响,因此保护气体对焊缝的硬度没有明显影响。

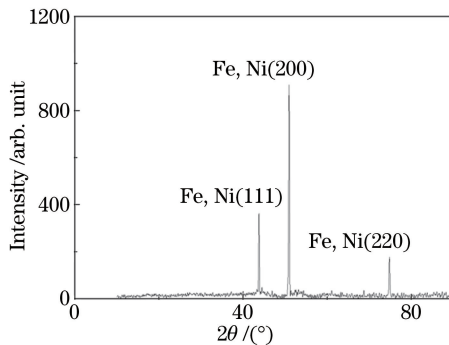


图 8 纯 N_2 作为保护气体时,焊接后的焊缝 XRD 图谱

Fig. 8 XRD pattern of welds after welding with pure N_2 as shielding gas

4 结 论

采用光纤激光器在不同气压的高纯 N_2 、高纯 Ar 及 N_2 /Ar 混合气体保护条件下,焊接了厚度为 2 mm 的奥氏体 304 不锈钢薄板,研究了焊缝形貌与力学性能。保护气体类型及比例对焊缝的强度和硬度没有显著影响,焊缝的强度和硬度均大于母材。研究结论如下:1) 保护气体的压强越大,越容易将焊缝上方的光致

等离子体吹散,焊缝的熔深就越大;2)在相同气压下, N_2 作为保护气体比Ar得到的焊缝熔深更大;3)使用 N_2/Ar 混合气体作为保护气体时, N_2 在保护气体中所占气体压强比例越大,焊缝的熔深就越大,且使用不同比例的保护气体,焊缝均呈现出激光深熔焊典型的“丁”字形;4)保护气体类型及比例对焊缝的强度和硬度没有显著影响,焊缝的强度和硬度均大于母材的。

参 考 文 献

- [1] Xiao Rongshi, Mei Hanhua, Zuo Tiechuan. Influence of assistant gases on the shielding thresholds of laser induced plasma during high power CO_2 laser penetration welding[J]. Chinese J Lasers, 1998, 25(11): 1045-1050.
肖荣诗,梅汉华,左铁钏.辅助气体对 CO_2 激光焊接光致等离子体屏蔽的影响[J].中国激光,1998,25(11):1045-1050.
- [2] Zhang Linjie, Zhang Jianxun, Wang Rui, *et al.* Effects of side assist gas on weld shaping in laser welding process of thin stainless plate[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2006, 35(s2): 39-44.
张林杰,张建勋,王蕊,等.侧吹气体对不锈钢薄板激光焊接焊缝成形的影响[J].稀有金属材料与工程,2006,35(s2):39-44.
- [3] Liu Jian, Shi Yan, Liu Jia, *et al.* Effect of shielding gas on laser welding of austenitic stainless steel[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(5): 051402.
刘键,石岩,刘佳,等.保护气体对奥氏体不锈钢激光焊接的影响[J].激光与光电子学进展,2014,51(5):051402.
- [4] Sathiya P, Mahendra Kumar Mishra, Soundararajan R, *et al.* Shielding gas effect on weld characteristics in arc-augmented laser welding process of super austenitic stainless steel[J]. Optics & Laser Technology, 2013, 45: 46-55.
- [5] Li Geng, Zhang Lin, Gao Ming, *et al.* Influence of shielding on fiber laser welding of stainless steel[J]. Casting Forging Welding, 2011, 40(23): 126-129.
李耿,张林,高明,等.保护气体对不锈钢光纤激光焊接的影响[J].金属铸锻焊技术,2011,40(23):126-129.
- [6] 李亚江,李嘉宁,等.激光焊接/切割/熔覆技术[M].北京:化学工业出版社,2012:40.
- [7] 江利,张太超,崔永丽.现代金属材料及应用[M].徐州:中国矿业大学出版社,2009:170.
- [8] Xiao R S, Zuo T C, Volz R. Experimental research on the influence of laser-induced plasma on the beam focusing during high-power CO_2 laser materials processing[J]. Chinese J Lasers, 1998, B7(6): 550-554.
- [9] Locke E, Hoag E, Hella R. Deep penetration welding with high-power CO_2 lasers[J]. Journal of Quantum Electronics, 1972, 8(2): 245-249.
- [10] Fowler M C, Smith D C. Ignition and maintenance of subsonic plasma waves in atmospheric pressure air by cw CO_2 laser radiation and their effect on laser beam propagation[J]. Journal of Applied Physics, 1975, 46(1): 138-150.
- [11] Hosseini Motlagh N S, Parvin P, Jandaghi M, *et al.* The influence of different volume ratios of He and Ar in shielding gas mixture on the power waste parameters for Nd:YAG and CO_2 laser welding[J]. Optics & Laser Technology, 2013, 54: 191-198.
- [12] Fan Y, Chen Z, Zhang C H, *et al.* A comparison of microstructure and mechanical properties of welded thin Ti6Al4V with three different types of laser[J]. Material Research Innovations, 2015, 19(s4): s187-s192.
- [13] Chen Qinglei. Study on the microstructures and mechanical properties of laser welded SUS301L austenitic stainless steel [D]. Chang Chun: Jilin University, 2012.
陈庆雷. SUS301L奥氏体不锈钢激光焊接头组织与力学性能的研究[D].长春:吉林大学,2012.
- [14] Fan Yu, Tian Wenteng, Li Zongpei, *et al.* Third-generation of left ventricular assist device in pulsed Nd:YAG laser welding[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(s2): s214012.
樊宇,田文腾,李宗佩,等.应用脉冲式Nd:YAG激光焊接心脏辅助装置[J].光学学报,2015,35(s2):s214012.