

AISI304 不锈钢箔振镜扫描激光微焊接工艺

杜伟哲, 黄婷, 曹政, 栾琳, 张庆伟, 肖荣诗*

北京工业大学激光工程研究院高功率及超快激光先进制造实验室, 北京 100124

摘要 振镜扫描激光微焊接是激光微焊接的发展方向。采用基模光纤激光器及振镜系统对厚度为 100 μm 的 AISI304 不锈钢箔进行平板扫描焊接, 对比研究了氩气保护与无气体保护时的激光微焊接工艺, 建立了两种条件下激光微焊接的工艺窗口。结果表明: 无气体保护时, 激光微焊接会产生不稳定过渡区, 其产生机理不是热导焊接模式和深熔焊接模式的交替出现, 而是氧化导致的深熔焊接过程不稳定; 气体保护可以避免不稳定过渡区的产生, 并扩大焊接工艺窗口。

关键词 激光技术; 不锈钢箔; 光纤激光微焊接; 气体保护; 过渡区; 工艺窗口

中图分类号 TG456.7

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.1102006

Galvanometer Scanning Laser-Micro-Welding of AISI304 Stainless-Steel Foil

Du Weizhe, Huang Ting, Cao Zheng, Luan Lin, Zhang Qingwei, Xiao Rongshi*

*High-Power and Ultrafast Laser Manufacturing Laboratory, Institute of Laser Engineering,
Beijing University of Technology, Beijing 100124, China*

Abstract Laser-micro-welding based on galvanometer scanning has attracted great interest. Herein, bead-on-plate scanning micro-welding of 100- μm -thick AISI304 stainless steel foil is conducted by using a single-mode fiber laser equipped with a galvanometer scanning system. A comparative study is conducted on the laser-micro-welding processes with/without Ar-gas protection, and process windows of laser-micro-welding for the both conditions are established. Results show that an unstable transition zone exists during laser-micro-welding without gas shielding. The unstable transition zone is generated during the deep penetration welding mode alone, rather than during the alternation of thermal conductivity welding mode and deep penetration welding mode, as reported previously. The oxidation during laser-micro-welding results in an unstable deep penetration welding mode, during which a transition zone is formed. Furthermore, by applying gas shielding, we find that the unstable transition zone is eliminated, and the welding-process window is expanded.

Key words laser technique; stainless steel foil; fiber laser micro-welding; gas shielding; transition zone; process window

OCIS codes 350.3390; 060.2430; 120.5800; 160.3900

1 引 言

随着科学技术的发展, 仪器设备的不断小型化和精密化对微连接技术提出了新的挑战 and 更高要求。激光具有聚焦光斑尺寸小、能量密度高、能量和光斑大小精确可控以及良好的光束可达性等特点, 适用于各种材料和零件的微焊接。目前, 激光微焊接已广泛应用于电子、医疗设备、仪器仪表、汽车、航空航天等领域^[1-4]。随着激光技术的进步, 激光微焊

接也从最初的脉冲激光微点焊和脉冲激光微缝焊发展到连续激光微缝焊^[5]。其中, 基于基模连续或准连续光纤激光器和扫描振镜系统的激光微缝焊成为当前激光微焊接的研究热点^[6-10]。光纤激光器具有光束质量好、电光转换效率高、体积小、成本低、使用维护方便^[11]等特点, 而扫描振镜系统通过振镜摆动可使光束偏转, 实现焦点的运动, 具有惯性小、速度快等特点, 成为激光微焊接的发展方向。Patschger 等^[6-7]采用光纤激光器和振镜扫描系统在没有气体保

收稿日期: 2019-05-29; 修回日期: 2019-06-26; 录用日期: 2019-07-03

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB1104803)

* E-mail: rsxiao@bjut.edu.cn

护的条件下,对厚度分别为 $50\ \mu\text{m}$ 和 $100\ \mu\text{m}$ 的钛、镍、铝、不锈钢箔材进行激光微焊接实验,获得了相应箔材全熔透而又不产生烧穿和驼峰的工艺窗口;并且,Patschger 等基于焊缝表面形貌随输入激光能量的变化来区分热导焊和深熔焊,发现在热导焊和深熔焊之间存在一个焊缝宽度随机变化的过渡区。Seiler 等^[8]对大气环境下金属箔材激光微焊接驼峰的影响因素进行了系统的实验研究。为了提高焊缝质量,Petrich 等^[9]采用振镜扫描方式在真空室中对 AISI304 不锈钢进行激光微焊接实验,发现当真空度达到 $1\ \text{mbar}$ ($1\ \text{bar}=100\ \text{kPa}$) 时,可以获得表面干净、无氧化的焊缝。Ismail 等^[10]使用振镜扫描系统和单模光纤激光器在气体压力为 $1\ \text{atm}$ ($1\ \text{atm}=101325\ \text{Pa}$) 且密封的玻璃气室内对厚度分别为 $20\ \mu\text{m}$ 和 $50\ \mu\text{m}$ 的 AISI304 不锈钢进行搭接焊和平板扫描焊工艺研究,得到了成形良好、无氧化的焊缝。

显然,保护气氛或真空环境可以有效避免激光微焊缝氧化,提高焊缝质量。但是,气体保护对振镜扫描激光微焊接焊缝成形烧穿和驼峰等的影响规律尚未有人进行系统的研究。本文采用振镜扫描系统

和基模光纤激光对厚度为 $100\ \mu\text{m}$ 的 AISI304 不锈钢进行平板扫描焊接,以研究气体保护对激光微焊接过渡区、焊缝成形与焊接工艺窗口的影响。

2 实验条件及方法

实验布置如图 1 所示,采用 IPG-YLS3000 基模光纤激光器(德国 IPG),其波长为 $1070\ \text{nm}$,额定功率为 $3000\ \text{W}$,单个模块功率调节范围为 $30\sim 500\ \text{W}$;振镜系统为 fellate fl6240 振镜系统(苏州菲镭泰克激光技术有限公司),焦距为 $354\ \text{mm}$,焦斑直径为 $55\ \mu\text{m}$ 。装夹工具为自制紫铜夹具,保护气由上半部分夹具端面的气嘴通入,经由内部的气槽平行于工件表面吹出。实验材料是厚度为 $100\ \mu\text{m}$ 的 AISI304 不锈钢箔,试样尺寸为 $20\ \text{mm}\times 100\ \text{mm}\times 0.1\ \text{mm}$ 。

焊接前使用丙酮溶液对试样进行 $10\ \text{min}$ 的超声清洗,然后用去离子水冲洗,在室温下干燥。焊接实验采用平板扫描焊接方式,激光焦点位于材料表面;保护气体为氩气,气体流量为 $20\ \text{L}/\text{min}$ 。改变激光功率和焊接速度,研究有、无气体保护时焊缝成形的基本规律,在每组参数下重复焊接 3 次。

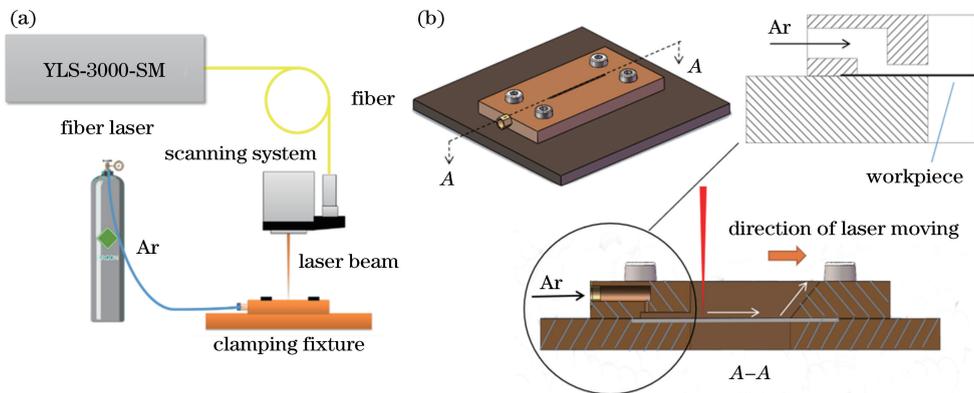


图 1 示意图。(a)焊接实验布置示意图;(b)夹具示意图

Fig. 1 Diagrams. (a) Diagram of experimental setup; (b) clamping fixture

焊后首先采用 OLYMPUSGX51 金相显微镜(日本 OLYMPUS)观察焊缝表面成形情况,然后沿垂直于焊缝方向截取焊缝横截面样品,并对样品进行镶样、研磨、抛光和腐蚀处理,腐蚀液为三氯化铁-盐酸溶液(三氯化铁 $10\ \text{g}$,盐酸 $30\ \text{mL}$,蒸馏水 $120\ \text{mL}$),最后采用 OLYMPUSGX51 金相显微镜观察焊缝横截面形貌。

3 实验结果与讨论

3.1 气体保护对不稳定过渡区的影响

图 2 所示为有、无气体保护条件下,焊接速度为 $40\ \text{mm}/\text{s}$ 时,不同激光功率(P)下得到的焊缝的表面

及横截面形貌。可见:在无气体保护条件下,当激光功率为 $30\ \text{W}$ 时,焊缝连续,熔宽均匀,表明焊接过程稳定;随着激光功率增大到 $50\sim 60\ \text{W}$,焊缝熔宽时窄时宽,说明焊接过程变得不稳定;当激光功率增加到 $80\ \text{W}$ 后,焊缝熔宽又变得连续、均匀,说明焊接过程变回稳定状态。采用气体保护后,在上述激光功率范围内,所有焊缝熔宽都是连续、均匀的,没有出现与无气体保护时类似的焊接过程不稳定的过渡区。从焊缝横截面形貌(不稳定过渡区的焊缝横截面为熔宽最窄处的横截面)可以看出:无论有、无保护气体,当激光功率为 $30\ \text{W}$ 时,试样均未焊透;而当激光功率大于 $50\ \text{W}$,所有试样均完全焊透。

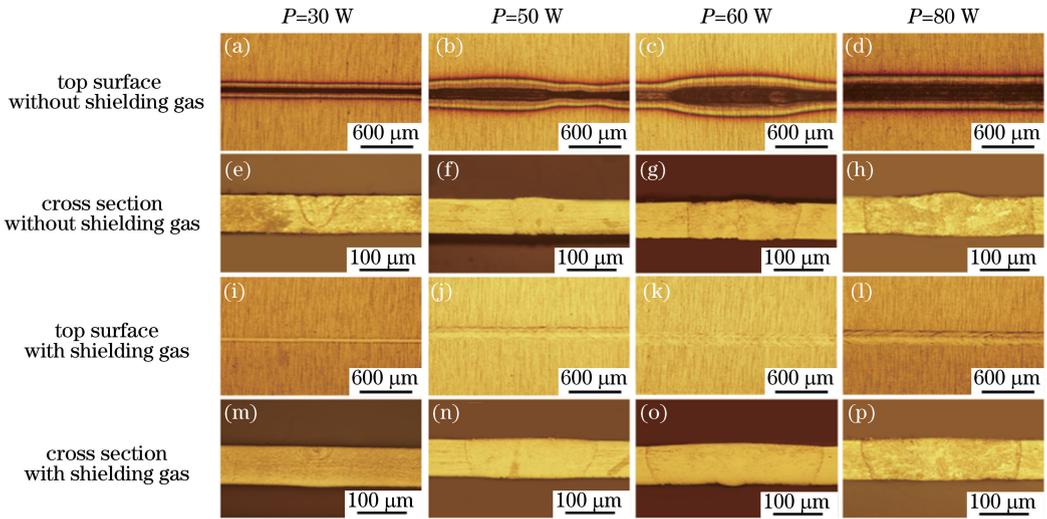


图 2 不同激光功率下得到的焊缝的表面与横截面形貌

Fig. 2 Surfaces and cross sections of weld under different laser powers

图 3 所示分别为有、无气体保护条件下,当激光功率为 50 W 时,不同焊接速度(v)下得到的焊缝的正、反表面形貌。从图 3 可以看出,在以上工艺参数条件下,所有试样完全焊透。在无气体保护的条件下,当焊接速度为 30 mm/s 时,焊缝熔宽起伏变化明

显,焊接过程不稳定;随着焊接速度增大,熔宽趋于均匀一致,当焊接速度增大到 60 mm/s 时,焊缝熔宽均匀一致,说明此时焊接过程稳定。采用气体保护后,焊缝熔宽均匀一致,焊接过程中没有出现不稳定现象。

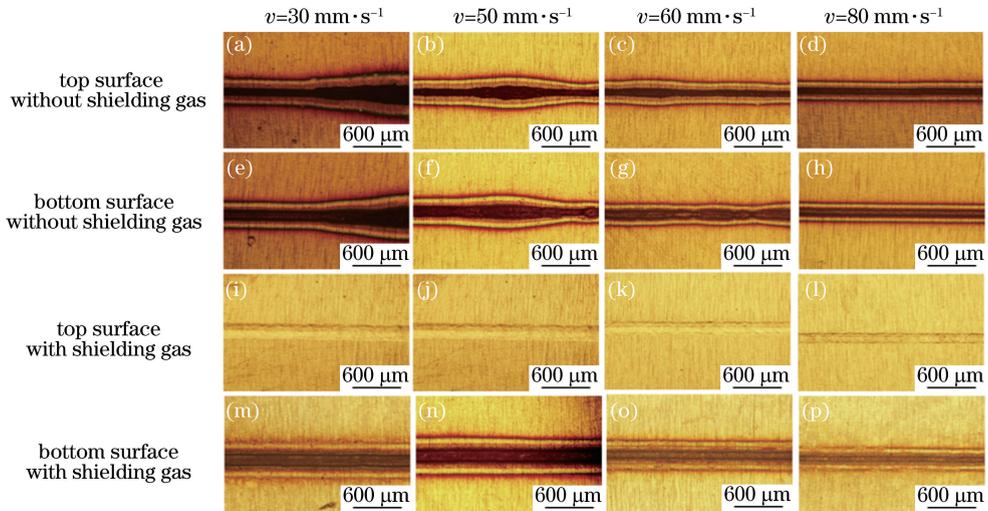


图 3 不同焊接速度下得到的焊缝的表面形貌

Fig. 3 Surface morphologies of weld under different welding speeds

激光的宏观焊接主要有 3 种焊接模式:热导焊接、深熔焊接和模式不稳定过渡焊接。模式不稳定过渡焊接的特征为热导焊接和深熔焊接两种模式交替出现,表现为熔宽和熔深的跳变^[12]。Patschger 等^[6]基于无气体保护激光微焊接不稳定过渡区的焊缝熔宽跳变与激光宏观焊接模式不稳定过渡焊接的熔宽跳变极其相似这一现象,认为激光微焊接不稳定过渡区的形成机理与激光宏观焊接模式不稳定过

渡焊接相同,即热导焊接和深熔焊接两种模式交替出现。但是,本文实验结果表明激光微焊接不稳定过渡区的产生并不是热导焊接和深熔焊接两种模式交替出现的模式不稳定过渡焊接,而是过程不稳定的深熔焊接,理由如下:

从图 2 可以看出:在气体保护的条件下,激光功率为 30 W 时得到的焊缝熔宽窄,熔深浅,为典型的热传导型焊缝;当激光功率达到 50 W 时,焊缝熔宽

变大,试样完全焊透,而且焊缝连续均匀,表明此时的焊接模式转变为稳定的深熔焊接。这说明在本文实验条件下,激光微焊接模式转变的临界功率不超过 50 W。无保护气体时,试样表面因激光加热氧化,材料对激光的吸收率将会增加,焊接模式转变的临界功率将会降低^[13]。因此,在无气体保护的条件下,激光功率为 50~70 W 时出现的熔宽波动不是热导焊接和深熔焊接两种模式交替出现的结果,而是深熔焊接过程不稳定造成的。

从图 3 可以看出,在无气体保护的条件下,低速焊接时出现了熔宽跳变现象,而当焊接速度达到 60 mm/s,可实现稳定的深熔焊接。焊接速度越小,激光作用时间越长,焊接热输入越大,因此,在低速焊接时出现的熔宽跳变现象,显然不是热导焊接和深熔焊接两种模式交替出现造成的,只能是深熔焊接过程不稳定造成的。

无气体保护时,在一定条件下的深熔焊接过程中,焊缝熔宽的波动可能与深熔焊接的动态行为及氧化有关。大量研究表明,激光深熔焊接是一个深熔小孔和熔池剧烈波动的动态过程^[14]。在合适的工艺条件下,这一动态过程是大体上有一定规律的,宏观上表现为焊接过程稳定和焊缝成形连续均匀。而当工艺条件不合适或受一些随机因素干扰时,这种有规律的波动会被破坏,宏观上表现为焊接过程不稳定,导致各种形式的焊接缺陷产生^[15-17]。在激光微焊接过程中,当没有保护气体时,试样表面的氧化会影响材料对激光的吸收率。在一定的工艺条件下,深熔焊接过程的波动会使氧化过程不连续和不均匀,从而导致吸收率剧烈变化,致使焊接过程不稳定。从图 2 可以看出,当焊接速度一定时,随着激光功率增大,焊接热输入增大,激光作用区的氧化加剧,氧化导致吸收率的变化趋于稳定,焊接过程从不稳定的深熔焊接过渡到稳定的深熔焊接。从图 3 可

以看出,当激光功率一定时,随着焊接速度增大,焊接热输入减小,氧化反应减弱,氧化对焊接过程的影响随之减小,焊接过程逐步从不稳定的深熔焊接过渡到稳定的深熔焊接。

3.2 焊接工艺窗口

为获得合适的工艺参数从而得到连接可靠、成形良好的焊缝,可通过改变激光功率和焊接速度得到焊接工艺窗口。焊接热输入过大时会产生焊穿缺陷,过小时则会出现未焊透现象;在一定的激光功率条件下,焊接速度过大时会出现焊接驼峰。图 4 所示为有、无气体保护下对应的焊接工艺窗口,由图 4 可知,气体保护对工艺窗口产生一定影响。

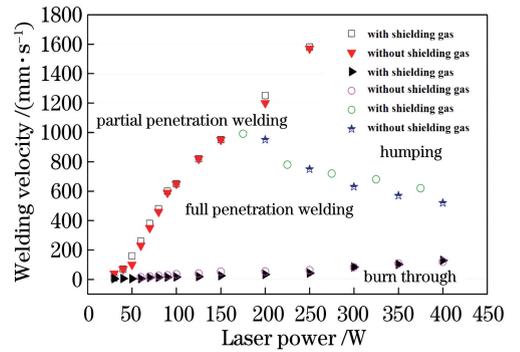


图 4 激光微焊接工艺窗口

Fig. 4 Process window of laser-micro-welding

3.2.1 气体保护对临界烧穿工艺参数的影响

在有、无气体保护条件下,通过改变激光功率和焊接速度得到的焊缝表面形貌如图 5 所示。可以看出:无保护气体时均出现了烧穿,而有保护气体条件下却得到表面成形良好的焊缝,没有产生烧穿。对比图 5(d)和图 5(h)可知:在无气体保护条件下,当激光功率为 100 W、焊接速度为 30 mm/s 时,焊缝产生了烧穿;在有气体保护条件下,在相同的激光功率下,焊接速度降低至 20 mm/s,仍能得到表面成形良好的焊缝。

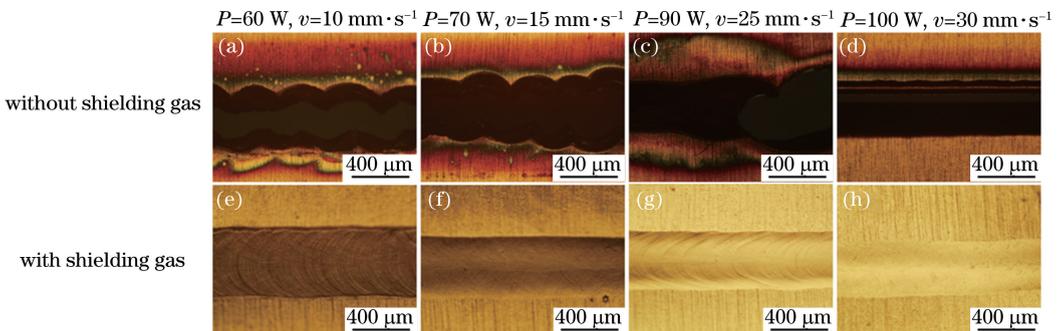


图 5 不同工艺参数下得到的临界烧穿焊缝表面形貌

Fig. 5 Surface morphologies of critical burn-through weld under different process parameters

激光深熔焊接时,小孔前端的金属熔化量和蒸发量随着焊接热输入的增大而增大,当金属蒸气压力和熔池重力超过表面张力时,就会产生烧穿。

Ni氧化的标准自由能大于Fe氧化的标准自由能,所以溶于铁液中的Ni不易发生氧化。氧化产生的氧化物使得材料对激光的吸收率增大,从而增大焊接热输入。同时,氧化反应的反应焓为负值,氧化

时释放的热量进一步增加了热输入,因而易产生烧穿。

3.2.2 气体保护对临界焊透工艺参数的影响

在有、无气体保护条件下,以30 W激光功率和40 mm/s焊接速度得到的焊缝的横截面形貌如图6所示。可见,在热导模式下,气体保护焊缝的熔深小于无气体保护焊缝的熔深。

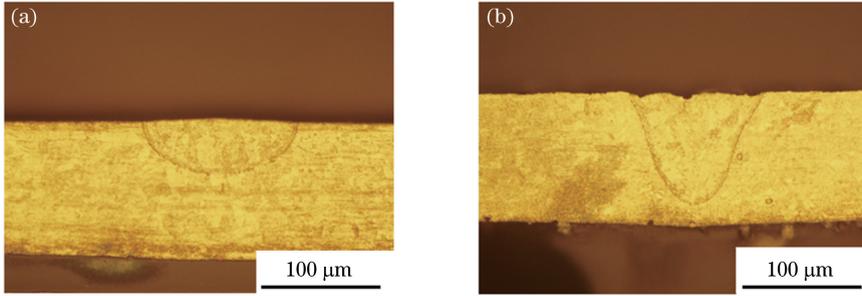


图6 不同工艺条件下得到的热导焊接焊缝的横截面形貌。

(a) 氩气保护, $P=30\text{ W}$, $v=30\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$; (b) 无气体保护, $P=30\text{ W}$, $v=40\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$

Fig. 6 Cross sections of thermal conductive weld in different processing conditions. (a) With shielding gas, $P=30\text{ W}$, $v=30\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$; (b) without shielding gas, $P=30\text{ W}$, $v=40\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$

图7分别为在深熔模式下以焊透临界速度得到的焊缝的正、反面形貌,可以看出,转变为深熔模式

后,有气体保护的焊缝成形更为稳定,可以达到的临界焊接速度更大。

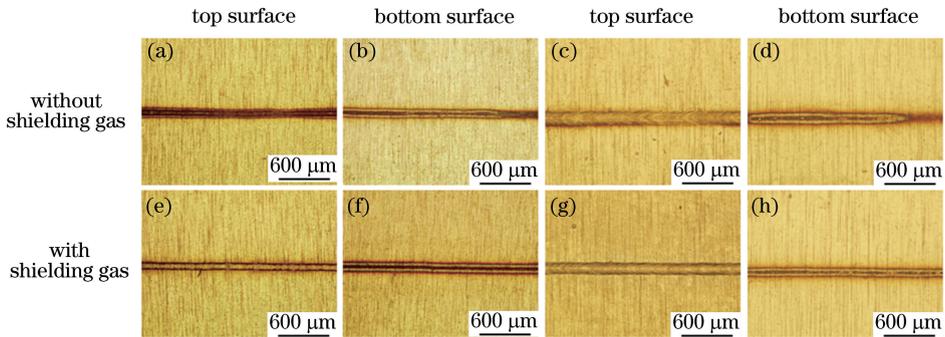


图7 在焊透临界速度下得到的焊缝的表面形貌。(a)(b)(e)(f) $P=50\text{ W}$, $v=180\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$; (c)(d)(g)(h) $P=60\text{ W}$, $v=260\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$

Fig. 7 Surface morphologies of weld at the critical speed of penetration welding.

(a)(b)(e)(f) $P=50\text{ W}$ and $v=180\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$; (c)(d)(g)(h) $P=60\text{ W}$ and $v=260\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$

当激光功率小于30 W时,焊接模式为热导焊,无气体保护条件下焊缝的氧化使得材料吸收了更多的能量,所以无气体保护的焊透临界速度大于气体保护的焊透临界速度。

当激光功率为50 W时,焊接模式为深熔焊。如前所述,没有气体保护时,材料的氧化会对深熔焊接过程产生影响,但是随着焊接速度增大,材料的氧化减弱,氧化的影响减小。深熔焊接总是伴随着羽辉的产生,而羽辉会对入射激光产生作用,从而对焊接过程产生一定程度的影响^[18]。采用气

体保护时,保护气流对羽辉有一定的控制作用,焊接过程较无保护气体条件下更稳定,有利于扩大临界焊透窗口。

3.2.3 气体保护对驼峰临界速度的影响

图8所示为无保护气体条件下,当焊接速度为1000 mm/s,激光功率分别为100,250,450,500 W时得到的焊缝的横截面形貌。当激光功率为100 W时,焊缝未焊透,功率增大到250 W后出现了明显的焊接驼峰。焊接驼峰是一种出现于高速焊接时的焊接缺陷^[19]。

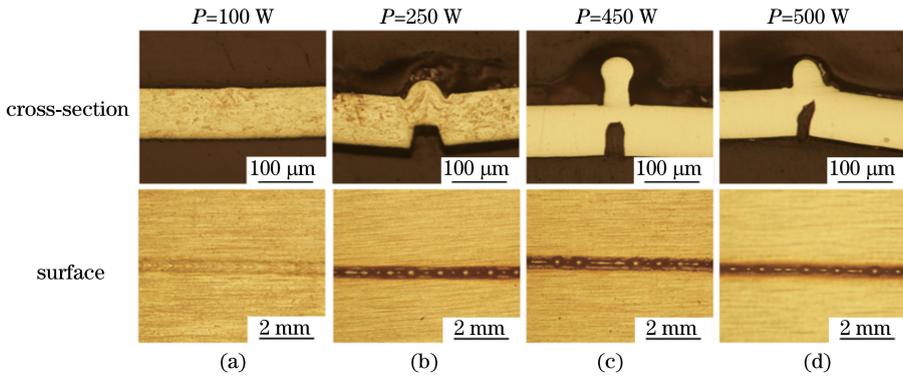


图 8 无气体保护条件下, $1000 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 焊接速度和不同激光功率下得到的焊缝的横截面及表面形貌

Fig. 8 Cross sections and surface morphologies of weld with $1000 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ welding speed under different laser powers without gas shielding

根据 Fabbro^[14] 对焊接驼峰的研究可知: 在高速焊接条件下, 主熔流(小孔前壁产生的由小孔底部向后流动的熔流)由小孔前壁底部向后方强烈偏转, 靠近母材部分的熔流冷却凝固, 流速减慢, 中心部分的熔流高速向上偏转, 由于瑞利不稳定性熔流断裂形成驼峰。

图 9 所示为在有、无气体保护条件下, 当激光功率为 250 W, 焊接速度为 750 mm/s 以及激光功率为 300 W, 焊接速度为 650 mm/s 时得到的焊缝的横截面形貌。可以看出, 在相同焊接参数下, 无气体保护时会产生明显的驼峰缺陷, 而有气体保护时驼峰不明显。

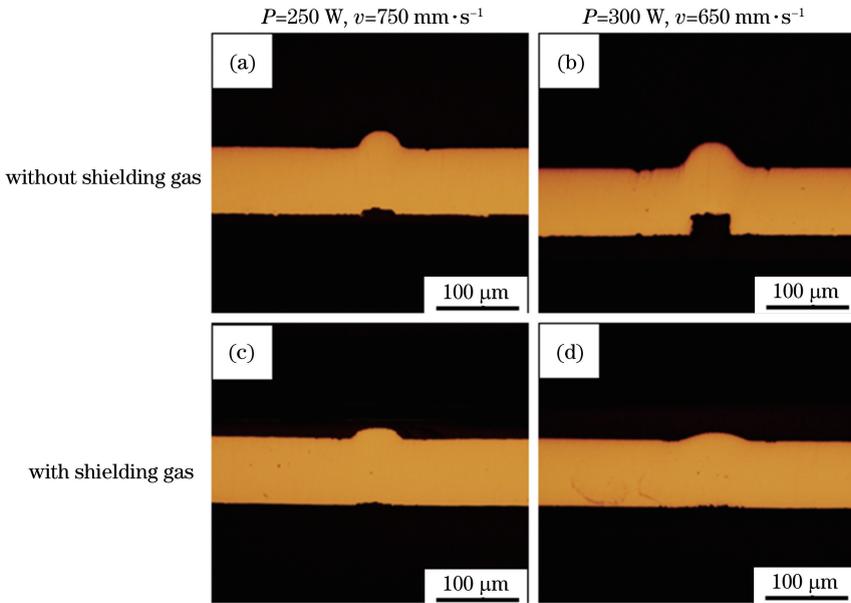


图 9 在有、无气体保护下以驼峰临界速度得到的焊缝的横截面形貌

Fig. 9 Cross section morphologies of weld at critical hump speed with and without gas shielding

从图 9 和图 4 可以看出, 随着激光功率增大, 驼峰临界速度降低。这是因为随着激光功率增大, 焊接热输入增大, 小孔前壁产生的熔流体积增大, 中心熔流的流速增加, 所以随着激光功率增大, 出现驼峰的临界速度降低。而对于氩气氛围下的焊接过程, 熔池表面液态金属的表面张力 (1.16 N/m) 较空气氛围下的 (1.87 N/m) 小^[7,20], 表面液态金属的表面张力小有利于焊缝金属的铺展, 所以与无气体保护条件相

比, 氩气保护可以提高出现焊接驼峰的临界速度。

4 结 论

采用基模光纤激光器对厚度为 $100 \mu\text{m}$ 的 AISI304 不锈钢箔进行了平板扫描焊接, 对比研究了有、无气体保护时的焊接工艺, 得出以下主要结论: 没有气体保护时, 激光微焊接在稳定热导焊和稳定深熔焊之间存在不稳定过渡区; 采用气体保护后, 不稳

定过渡区消失。没有保护气体时激光微焊接不稳定过渡区的产生不是热导焊接和深熔焊接两种模式交替出现的模式不稳定焊接,而是氧化造成的深熔焊接过程不稳定。气体保护可以在一定程度上降低焊穿临界速度,提高稳定深熔焊接的焊透临界速度和出现驼峰的临界速度,扩大稳定深熔焊接的工艺窗口。

参 考 文 献

[1] Huang Y D, Ke L M, Feng J C, *et al.* Application and research progress of micro-connection technology in implantable medical devices [J]. *Welding & Joining*, 2012(7): 28-33.
黄永德, 柯黎明, 冯吉才, 等. 微连接技术在植入式医疗器件中的应用及研究进展[J]. *焊接*, 2012(7): 28-33.

[2] Lu L B, Wang H P, Guan Y C, *et al.* Laser microfabrication of biomedical devices [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(1): 0102005.
卢立斌, 王海鹏, 管迎春, 等. 激光微加工技术制备生物医用器械的现状与进展[J]. *中国激光*, 2017, 44(1): 0102005.

[3] Zhao X K, Xing D S, Liu D Y. Research and application development on laser micro joining technology [J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2017(12): 28-34.
赵兴科, 邢德胜, 刘大勇. 激光微连接技术研究与应用进展[J]. *航空制造技术*, 2017(12): 28-34.

[4] Oliveira J P, Miranda R M, Braz Fernandes F M. Welding and joining of NiTi shape memory alloys: a review[J]. *Progress in Materials Science*, 2017, 88: 412-466.

[5] Hopkins R E, Buzawa M J. Optics for laser scanning [J]. *Optical Engineering*, 1976, 15(2): 150290.

[6] Patschger A, Bliedtner J, Bergmann J P. Process-limiting factors and characteristics of laser-based micro welding[J]. *Physics Procedia*, 2014, 56: 740-749.

[7] Patschger A, Bliedtner J. Constraints and optimization of the laser microwelding process of thin metal foils[J]. *Journal of Laser Applications*, 2017, 29(2): 022408.

[8] Seiler M, Patschger A, Tianis L, *et al.* Experimental determination of influencing factors on the humping phenomenon during laser micro welding of thin metal sheets [J]. *Journal of Laser Applications*, 2017, 29(2): 022413.

[9] Petrich M, Stambke M, Bergmann J P. Examinations on laser remote welding of ultra-thin metal foils under vacuum conditions [J]. *Physics Procedia*, 2014, 56: 768-775.

[10] Ismail M I S, Okamoto Y, Uno Y. Numerical simulation on micro-welding of thin stainless steel sheet by fiber laser [J]. *International Journal of Electrical Machining*, 2011, 16: 9-14.

[11] Yu X, Luo J Q, Xiao X S, *et al.* Research progress of high-power ultrafast fiber laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(5): 0508007.
余霞, 罗佳琪, 肖晓晟, 等. 高功率超快光纤激光器研究进展[J]. *中国激光*, 2019, 46(5): 0508007.

[12] Zhang X D, Chen W Z, Ren J L, *et al.* Laser welding mode transition and influence of thermal focusing on mode transition [J]. *Proceedings of SPIE*, 1996, 2888: 306-315.

[13] Zuo T C. *Advanced manufacturing in the 21st century: laser technology and engineering* [M]. Beijing: Science Press, 2007: 35-36.
左铁钊. 21世纪的先进制造: 激光技术与工程[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 35-36.

[14] Fabbro R. Dynamic approach of the keyhole and melt pool behavior for deep penetration Nd-Yag laser welding [J]. *AIP Conference Proceedings*, 2008, 1047(1): 18-24.

[15] Kawahito Y, Mizutani M, Katayama S. High quality welding of stainless steel with 10 kW high power fibre laser [J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2009, 14(4): 288-294.

[16] Kawahito Y, Mizutani M, Katayama S. Elucidation of high-power fibre laser welding phenomena of stainless steel and effect of factors on weld geometry [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2007, 40(19): 5854-5859.

[17] Katayama S, Kawahito Y, Mizutani M. Elucidation of laser welding phenomena and factors affecting weld penetration and welding defects [J]. *Physics Procedia*, 2010, 5: 9-17.

[18] Zou J L, Li F, Niu J Q, *et al.* Effect of laser-induced plume on welding process during high power fiber laser welding [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(6): 0603005.
邹江林, 李飞, 牛建强, 等. 高功率光纤激光焊接羽辉对焊接过程的影响[J]. *中国激光*, 2014, 41(6): 0603005.

[19] Berger P, Hügel H, Hess A, *et al.* Understanding of humping based on conservation of volume flow [J]. *Physics Procedia*, 2011, 12: 232-240.

[20] Wen J L. The influence of gas mixtures on the surface tension of stainless steel during welding [J]. *Journal of Shenyang Institute of Mechanical and Electrical Technology*, 1984, 6(2): 25-29.
温瑾林. 保护气体成分对不锈钢焊接时表面张力的影响[J]. *沈阳机电学院学报*, 1984, 6(2): 25-29.