

高功率光纤激光深熔焊接小孔的形貌特征

赵乐, 曹政, 邹江林*, 韩雪, 肖荣诗

北京工业大学材料与制造学部激光工程研究院, 高功率及超快激光先进制造实验室, 北京 100124

摘要 采用高功率光纤激光对铜铪合金和低碳钢进行焊接, 基于熔池快速凝固保留小孔法对比研究了小孔的形貌特征。结果表明: 两种材料中均可保留小孔, 孔口直径明显比光斑直径大; 在铜铪合金中, 孔口形貌呈现为大小圆环相交的“葫芦”状, 位于焊接前方的小圆环直径与光斑直径相当, 大圆环的直径在毫米量级; 在低碳钢中可保留小孔的激光出光时间极短, 其熔池凝固时间较长, 且仅保留了小孔的大圆环区域。进一步的分析表明, 焊接过程中的孔口形貌可分为激光直接作用区(直径与光斑直径相当)和蒸气压力维持区(直径在毫米量级); 在数值模拟中构建激光焊接热源模型时应参考小孔的形貌特征。

关键词 激光技术; 光纤激光; 深熔焊接; 快速凝固; 铜铪合金; 小孔

中图分类号 TG456.7

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.1102005

Keyhole Morphological Characteristics in High-Power Deep Penetration Fiber Laser Welding

Zhao Le, Cao Zheng, Zou Jinglin*, Han Xue, Xiao Rongshi

High-Power and Ultrafast Laser Manufacturing Lab, Institute of Laser Engineering,

Faculty of Materials and Manufacturing, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China

Abstract In this study, the Cu-Hf alloy and low carbon steel are respectively welded using a high-power fiber laser. The morphological characteristics of keyholes obtained by freezing and preserving the keyholes in a molten pool are compared. The results show that the keyholes can be retained in both materials, and the diameter of a keyhole is obviously greater than that of a spot. The shape of the keyhole retained in the Cu-Hf alloy is similar to that of a “gourd” with the intersection of big and small rings. The diameter of the small ring located in front of the welding direction is equivalent to that of the spot, and the diameter of the large ring is in the order of a millimeter. In low carbon steel, the laser output time to retain a keyhole is very short, the solidation time of the molten pool is long, and only the large circle area of the keyhole can be retained. Further analysis shows that a keyhole morphology can be divided into two parts: the laser direct-action area and vapor pressure maintaining area. In numerical simulations, the morphological characteristics of a keyhole must be considered when building a suitable heat source model for laser welding.

Key words laser technique; fiber laser; deep penetration welding; rapid freezing; Cu-Hf alloy; keyhole

OCIS codes 140.3380; 160.3900; 120.3940; 140.3390

1 引言

高功率光纤激光具有输出功率高、焊接质量好、加工精度高和易于实现自动化等特点, 在焊接领域受到了研究人员的广泛关注^[1-2]。然而, 高功率光纤激光焊接存在着气孔多、飞溅剧烈、焊缝成形差等缺陷^[3-6], 严重制约了焊接构件的整体服役性能和光纤

激光焊接技术的发展。上述焊接缺陷的产生与激光深熔焊接小孔内激光能量转换过程中产生的熔化、蒸发、熔池流动、凝固相变等现象有关, 可借助实验^[7]或数值模拟^[8]等揭示其物理过程。研究小孔的形貌特征, 对于揭示激光束在小孔内的传输及能量耦合规律、构建合适的激光焊接热源模型及优化焊接工艺具有重要意义。

收稿日期: 2020-05-26; 修回日期: 2020-06-16; 录用日期: 2020-07-02

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51875007)、北京市教委科技计划一般项目(KM201710005014)

* E-mail: zoujianglin1@163.com

现阶段研究小孔形貌的方法包括同轴观测法^[9]、“三明治”模型观察法^[10]、X射线观测法^[11]、数值模拟^[12]以及对透明材料进行焊接^[13]等。Luo等^[14]以绿光作为照明光,基于同轴观测和灰度处理获得了小孔口和熔池的图像。张屹^[15]采用“三明治”方法对GG17玻璃与低碳钢进行激光焊接,从玻璃侧观测到了小孔的动态行为。Kawahito等^[11]对激光焊接不锈钢的过程进行了原位观察,探究了深熔小孔的形貌。然而,上述研究获得的小孔形貌均为小孔的二维形貌。何双等^[16]通过改变保护气体的比例发现,由于熔池凝固较快以及保护气的作用,失稳状态的小孔滞留于焊缝中,导致焊缝中存在较大的气孔。Zou等^[17]提出了一种熔池快速凝固保留深熔小孔法,但他并未就该方法的影响因素以及典型焊接材料中的小孔特征进行详细研究。

本文基于熔池快速凝固保留小孔法,对两种熔池凝固特性差异较大的材料——铜铍合金和低碳钢(典型常规焊接材料),进行了激光焊接实验,并研究了光纤激光深熔焊接小孔的三维形貌特征,以及工艺参数对低碳钢熔池中小孔闭合时间和小孔三维形貌的影响规律;最后计算了熔池的凝固时间,总结了深熔小孔三维形貌特征的形成机理。

2 实验方法

采用YLS-6000光纤激光器进行实验,该激光器的额定输出功率为6 kW。光束在芯径为200 μm 的光纤中进行传输。输出耦合准直镜的焦距为200 mm。采用焦距为300 mm的透镜聚焦,获得的光斑直径为0.32 mm。激光器的聚焦镜头装配于德国KUKA公司生产的机械手上。实验中,激光束垂直作用于板材表面,离焦量为零;板材静止,激光头随机械手移动。

采用熔池快速凝固法保留小孔。该方法的原理为控制激光的出光时间,以达到减小熔池中热输入的目的。利用控制激光器的计算机程序,将激光器的出光模式切换成调制出光时间模式,原理如图1(a)所示。在图1(a)中,相邻两出光时间间隔固定为50 ms,激光的出光时间为 t_1 。实验装置示意图如图1(b)所示。实验中采用平板扫描焊接方式,在同一次扫描焊接低碳钢过程中,焊接速度固定为2 m/min,激光的出光时间 t_1 从1 ms开始以1 ms的幅度逐渐增加至20 ms。出光时间 t_1 内激光的输出功率不变。将不同激光出光时间下

获得的焊缝切割开进行观察,观察到的图像可类比作是1000 frame/s摄像机拍摄到的小孔在不同时刻(闭合过程)的图像。

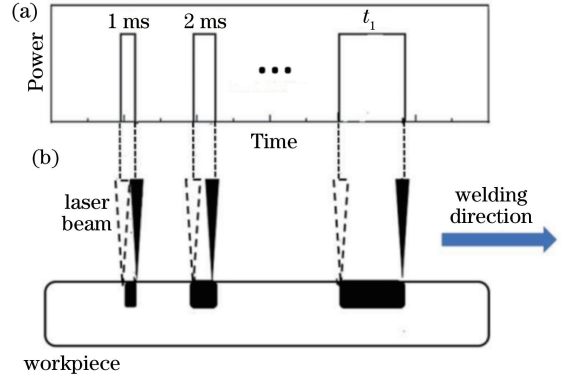


图1 实验原理。(a)调制出光;(b)平板扫描焊接
Fig. 1 Experimental principle. (a) Modulation of light;
(b) planar scanning welding

实验材料为铜铍合金和Q235低碳钢。低碳钢的化学成分(质量分数)为:0.12% C, 0.33% Mn, $\leq 0.30\%$ Si, $\leq 0.045\%$, $\leq 0.045\%$ P,其余为铁;铜铍合金中铍的质量分数约为35%,其余为铜。铜铍合金和Q235低碳钢试样的尺寸均为100 mm \times 50 mm \times 10 mm。

焊接前,先对材料表面进行磨削处理,然后用丙酮擦拭试样表面,以去除试样表面的杂质。焊后采用扫描电镜观察小孔口的形貌,并对小孔的尺寸进行测量。随后沿小孔口/焊缝中心线进行切割,采用光学显微镜观察焊缝截面。定义小孔开始闭合时的激光出光时间为小孔的闭合时间,通过观察焊缝截面中的小孔是否开始闭合来获取小孔的闭合时间。

3 实验结果

3.1 铜铍合金中深熔小孔的形貌特征

激光的出光时间 t_1 均设置为250 ms,当激光功率分别为3, 4, 6 kW时,光纤激光焊接铜铍合金获得的典型小孔口的形貌如图2所示。可见,当激光的出光时间长达250 ms时,在不同的激光功率下焊接铜铍合金时,依然可以采用熔池快速凝固的方式保留深熔小孔。小孔口的形貌呈现出类似于大、小圆环相交的“葫芦”状形貌,其中位于焊接前方的小圆环(半圆环)的直径约与光斑直径相当,如图2中A所示。而“葫芦”状小孔口后部的大圆环区域相较于图中A区域,其直径明显更大,如图2中的B所示。

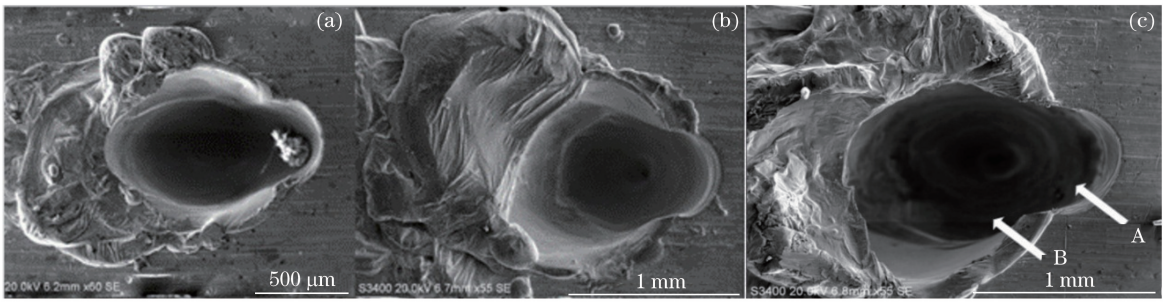


图 2 不同激光功率下小孔口的形貌。(a) 3 kW;(b) 4 kW;(c) 6 kW

Fig. 2 Images of keyhole at different laser powers. (a) 3 kW; (b) 4 kW; (c) 6 kW

分别在垂直于焊接方向上测量图 2 中 A 区域和 B 区域的直径,结果如图 3 所示。可见:改变激光功率后,A 区域的直径并没有明显改变,约为 0.4 mm,与激光光斑直径大致相当。此外,还可以发现该区域的金属熔化量很少,特别是焊接前方的熔化层很薄,该区域类似于激光直接作用于母材后在母材中形成的区域。B 区域的后部即为焊接熔池,该区域的直径随着激光功率的增大而增大,从 3 kW 激光功率时的 1 mm 左右增大至 6 kW 时的 1.6 mm 左右,且直径均在毫米量级。

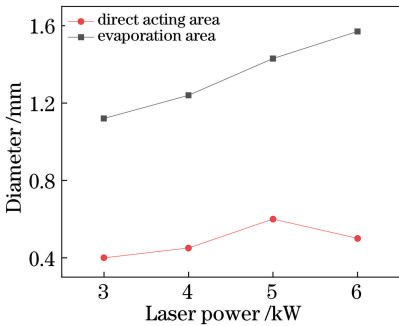


图 3 深熔小孔两部分尺寸随激光功率的变化规律

Fig. 3 Variation of size of two parts of deep penetration keyhole with laser power

3.2 低碳钢中深熔小孔的形貌特征

固定激光功率为 6 kW,将焊接材料更换为低碳钢,激光的出光时间 t_1 采用图 1 所示的调制出光时间,熔池凝固保留的典型深熔小孔口形貌如图 4 所示。可以看出,尽管激光的出光时间极短(热量很小),但激光焊接低碳钢获得的小孔口形貌依然近似为圆形,直径在毫米量级。即使出光时间很短,低碳钢熔池凝固后也并未获得类似于铜钎合金熔池凝固后保留下小孔口的现象。当激光出光时间在 1~4 ms 时,小孔并未发生闭合,小孔口边缘存在少量熔化的金属;当出光时间超过 7 ms 时,熔池中的小孔已出现明显的回填现象。

将图 4 中的焊缝沿中心线切开(垂直于焊接方

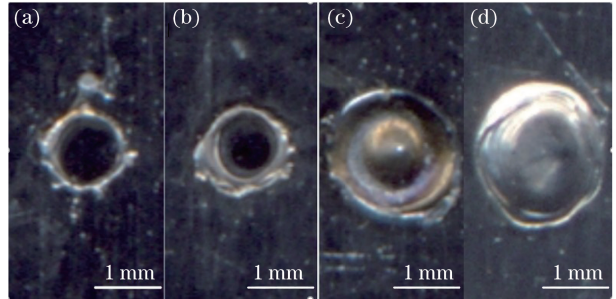


图 4 不同出光时间时小孔口的形貌。

(a) 1 ms;(b) 4 ms;(c) 7 ms;(d) 10 ms

Fig. 4 Images of keyhole at different light output time.

(a) 1 ms; (b) 4 ms; (c) 7 ms; (d) 10 ms

向),抛光腐蚀后观察焊缝/小孔的横截面形貌,结果如图 5 所示。通过小孔的横截面图可以清晰地看出:当出光时间在 0~4 ms 时,熔池凝固保留下来的小孔呈现为完全张开的状态,而且没有发生明显的闭合现象,此时小孔前壁的倾斜角约为 85° ,但前壁表面并非为平滑的直线,并且孔壁上几乎没有发现熔化的金属;而当激光的出光时间为 7 ms 时,小孔开始产生闭合现象;随着出光时间增加,小孔逐渐完全闭合。

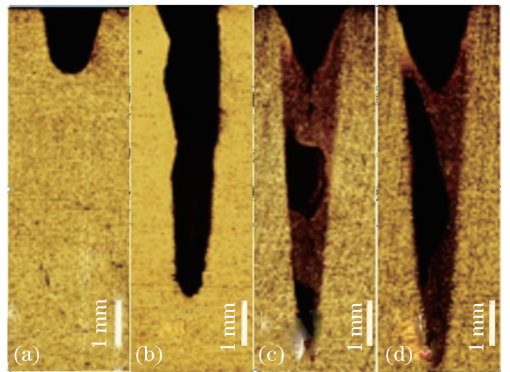


图 5 不同出光时间时小孔/焊缝的横截面形貌。

(a) 1 ms;(b) 4 ms;(c) 7 ms;(d) 10 ms

Fig. 5 Cross-section morphology of keyhole/weld at different light output time. (a) 1 ms; (b) 4 ms; (c) 7 ms; (d) 10 ms

将不同时刻的焊缝界面切开进行观察,当发现切割面存在回填时开始计时。图 6 为不同激光功率下获得的小孔开始回填对应的激光出光时间(本文将该条件下的时间称为小孔的闭合时间)。可以看出,激光功率越大,小孔的闭合时间越长。当激光功率小于 2 kW 时,激光焊接低碳钢熔池几乎不能凝固留下未闭合的深熔小孔;而当激光功率达到 6 kW 时,激光的出光时间约为 6 ms,此时仍可以保留完整未闭合的小孔,即小孔的闭合时间约为 6 ms。

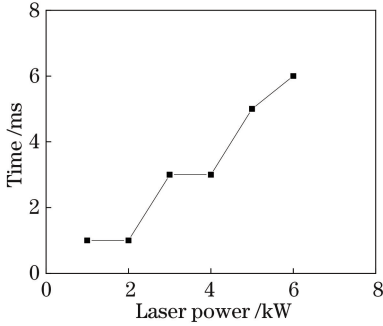


图 6 激光功率对小孔闭合时间的影响
Fig. 6 Influence of laser power on closing time of keyhole

3.3 熔池的凝固时间

当熔池凝固时间足够长时,在重力及表面张力等的作用下,激光停止出光后小孔附近的熔体会填充小孔区域,之后熔池凝固形成焊缝。因此,铜钎合金与低碳钢中的小孔形貌与金属保持熔融态的时间(凝固所需时间)具有一定关系。本文在激光出光时间较短的情况,利用 Marc 有限元模拟软件计算了激光停止出光后熔池的凝固时间。低碳钢和铜钎合金的物理参数参考纯铁和纯铜的参数^[13],设置单元格尺寸为 0.125 mm×0.125 mm×0.125 mm。由于本文仅计算停止热输入之后熔池的凝固时间,无需考虑其他因素,故而在模拟时采用常见的复合热源,即高斯面热源与高斯柱状体热源的组合^[13]。

在焊接速度为 2 m/min 的条件下,计算获得了不同激光功率下熔池的凝固时间随激光出光时间的变化规律,如图 7 所示。可以看出:在相同的出光时间内,激光功率越大,熔池凝固所需的时间越长;在相同的激光功率下,激光的出光时间越长,熔池凝固所需的时间便越长。当激光功率为 4 kW、出光时间为 7 ms 时,熔池快速凝固也需要 30 ms 左右的时间,显然,该时间远大于图 6 中测得的小孔闭合时间。

在激光深熔焊接中,小孔前壁的熔化厚度较小,

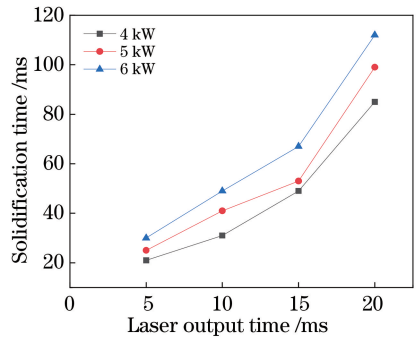


图 7 不同激光功率下熔池的凝固时间与激光出光时间的关系

Fig. 7 Relationship between solidification time of molten pool with laser output time at different laser powers

约为 0.5 mm^[17]。计算得到的熔池的深度为 0.2~0.6 mm 时,纯铁和纯铜熔池的凝固时间如图 8 所示。可见,随着熔化深度增大,熔池的凝固时间逐渐增加。小孔前壁的熔化厚度较薄(0.4 mm)时,铁熔池的凝固时间约为 30 ms,而铜熔池的凝固时间则仅为 4 ms 左右。两种材料熔池的凝固时间相差较大。

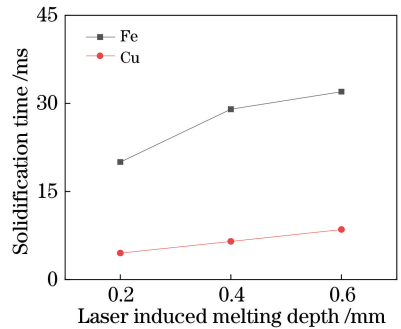


图 8 不同激光致熔化深度下熔池的凝固时间

Fig. 8 Solidification time of molten pool at different laser induced melting depth

4 分析与讨论

由图 2 可知,铜钎合金中小孔口的形貌为类似于大小圆环相交的“葫芦”状,小圆环的直径与光斑直径相当。在高功率光纤激光深熔焊接中,激光束直接辐照于小孔前壁^[18]。因此,位于焊接前方的小半圆环区域(图 2 中 A 区域)为激光直接作用区,光斑前沿与小圆环的前沿重合,光斑的后沿作用于小孔前壁的底部,如图 9 所示。焊接过程中小孔壁上的激光致蒸发蒸气(特别是激光束直接作用于小孔前壁上引起的剧烈的蒸发蒸气)会导致深熔小孔内部存在大于孔外大气压的蒸气压力^[19]。而小孔的尾部为熔池,且远离激光束,故而可确定小孔口“葫芦”状的后部大圆环区域(图 2 中的 B 区域)为孔内

蒸气压力推动尾部熔池达到力学平衡后形成的蒸气压力维持区,其直径在毫米量级。

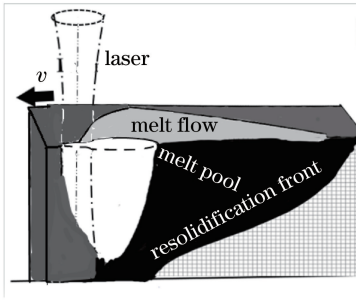


图9 激光作用下的小孔形貌示意图

Fig. 9 Schematic of small hole morphology under the action of laser

在光纤激光焊接铜铍合金时,激光的出光时间高达 250 ms 时,熔池也可以凝固保留下可以清楚区分出激光作用区和蒸气压力维持区的小孔(见图 2)。这说明铜铍合金熔池中小孔的闭合时间大于 250 ms。自激光出光时间开始,形成完整小孔的时间约为 10 ms^[20]。因此,在 250 ms 的出光时间内已形成了稳定的熔池和焊接过程。由于本实验中铜铍合金熔池的凝固时间较短,故可推测出铜铍合金熔池中保留的小孔为熔池快速凝固所致。而在激光焊接低碳钢时,极短的激光出光后,熔池的凝固时间也比 30 ms 长(见图 7),而可保留小孔的激光出光时间不超过 8 ms(见图 6),这表明低碳钢中的小孔并非仅为熔池快速凝固所致。

当激光停止出光后,孔内来不及消散的蒸气将维持小孔在一段时间内不坍塌。另外,激光出光时间小于 10 ms 时,小孔处于形成阶段^[20]。在该阶段,孔内蒸气压力以类似于“活塞效应”的方式将孔内部分熔体挤出,更利于熔池凝固后保留小孔。这两方面的原因可能是低碳钢熔池中能保留小孔的主要原因。由此可见,影响熔池保留深熔小孔的因素包括熔池的快速凝固特性和孔内蒸气压力。对于热导率高的材料(快速凝固特性明显),熔池中能够保留小孔三维形貌的主要因素是熔池的快速凝固;而对于热导率较低的材料,小孔的闭合时间极短,决定熔池中小孔三维形貌的主要因素是孔内的蒸气压力。

不同的材料通过熔池凝固方法保留的小孔的形貌存在较大差别。低碳钢中的小孔并未区分出激光作用区和蒸气压力维持区,这与低碳钢熔池的凝固时间较长有关(小孔前壁熔化厚度仅为 0.4 mm 时,熔池凝固也需要约 30 ms 的时间,见图 8)。熔池的凝固时间较长,说明该材料的热导率较低,故而在焊

接中或者激光停止出光后,激光作用区和蒸气压力维持区有足够的时间演化至难以区分。本实验中的差异主要体现在两种材料的热物理参数方面,故而推测认为,在高功率光纤激光焊接过程中,小孔均可分为激光作用区和蒸气压力维持区,而铜铍合金熔池在快速凝固后保留下来的小孔体现了焊接过程中小孔的实际形貌。

在高功率光纤激光深熔焊接中,激光束直接作用于小孔前壁表面,决定焊接熔深的是小孔前壁的一次吸收^[17]。小孔前壁位于小孔的激光直接作用区,该区域的直径与光斑直径大致相当,即焊接过程中激光束与激光直接作用区重合得较好。因此,在光纤激光深熔焊接数值模拟中构建热源模型时,应参考小孔激光直接作用区的形貌特征,特别是在模拟计算熔深时。根据图 2,熔宽与小孔内的蒸气压力维持区有关。因此,在计算熔宽、熔深时,需要考虑蒸气压力维持区的形貌。总之,在构建激光深熔焊接热源模型时,应参考小孔的形貌特征。

5 结 论

本文在高功率光纤激光扫描焊接铜铍合金和低碳钢过程中,采用熔池快速凝固保留小孔法,获得了熔池中小孔的形貌特征,并获得了如下结论:

- 1) 采用光纤激光焊接热物理参数差异大的材料时均可保留深熔小孔,小孔口的直径明显大于光斑直径。与铜铍合金相比,低碳钢熔池中可保留小孔的激光出光时间极短,熔池凝固时间较长。
- 2) 对于熔池凝固时间短的材料,影响其熔池中保留小孔的主要因素是熔池的快速凝固特性,该材料中的保留小孔可代表实际焊接过程中小孔的形貌特征;对于熔池凝固时间长的材料,影响其熔池中保留小孔的主要因素是孔内蒸气压力对熔池的影响。
- 3) 孔口形貌可分为蒸气压力维持区(直径在毫米量级)和激光直接作用区(直径与光斑直径相当);在构建激光深熔焊接热源模型时应参考小孔的形貌。

参 考 文 献

[1] Li M, Zhang W, Hua X M, et al. Investigation of plasma and metal transfer dynamic behavior during fiber laser GMAW-P hybrid welding [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(4): 0402008.
李敏, 张旺, 华学明, 等. 光纤激光与 GMAW-P 复合焊接等离子体及熔滴过渡动态特征研究 [J]. 中国激光, 2017, 44(4): 0402008.

[2] Ren Y, Wu Q, Zou J L, et al. Real-time monitoring

- of coaxial protection fiber laser welding of austenitic stainless steels[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(5): 0502003.
任勇, 武强, 邹江林, 等. 奥氏体不锈钢光纤激光同轴保护焊接的实时监测[J]. 中国激光, 2017, 44(5): 0502003.
- [3] Luo Y, Tang X H, Lu F G, et al. Effect of subatmospheric pressure on plasma plume in fiber laser welding [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 215: 219-224.
- [4] Gao M, Chen C, Hu M, et al. Characteristics of plasma plume in fiber laser welding of aluminum alloy [J]. Applied Surface Science, 2015, 326: 181-186.
- [5] Gen Y C, Fei C, Cong Z, et al. Welding defect suppression of stainless steel thick plate joint by 10-kW level laser welding[J]. Applied Laser, 2018, 38(2): 207-214.
- [6] Wang L D, Li M, Zou J L, et al. Multiple imaging characteristics of plasma in laser-tungsten inert gas arc hybrid welding [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(3): 0302008.
王利达, 李敏, 邹江林, 等. 激光-钨极稀有气体电弧复合焊接等离子体的多重成像特征[J]. 中国激光, 2019, 46(3): 0302008.
- [7] Cui H C, Lu F G, Tang X H, et al. Experimental research on fluidity of laser welded molten pool[J]. Chinese Journal of Lasers, 2011, 38(6): 0603004.
崔海超, 芦凤桂, 唐新华, 等. 激光焊接熔池流动性试验研究[J]. 中国激光, 2011, 38(6): 0603004.
- [8] Xia S Q, He J J, Wang W, et al. Simulation of three-dimensional transient behavior of molten pool in laser deep penetration welding[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(11): 1102004.
夏胜全, 何建军, 王巍, 等. 激光深熔焊熔池三维瞬态行为数值模拟[J]. 中国激光, 2016, 43(11): 1102004.
- [9] Kim J, Oh S, Ki H. A study of keyhole geometry in laser welding of zinc-coated and uncoated steels using a coaxial observation method[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 225: 451-462.
- [10] Ha N. Experimental study on characterisation behavior of keyhole during high power fiber laser deep penetration welding [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2018.
哈纳. 高功率光纤激光深熔焊接小孔特性行为实验研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2018.
- [11] 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, 2007, 40(19): 5854-5859.
- [12] Zhou M L. Study on temperature field of molten pool in laser welding of low carbon steel[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2014.
周明亮. 激光焊接低碳钢的熔池温度场研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2014.
- [13] Wang H Z, Zou Y. Microscale interaction between laser and metal powder in powder-bed additive manufacturing: conduction mode versus keyhole mode [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 142: 118473.
- [14] Luo M, Shin Y C. Vision-based weld pool boundary extraction and width measurement during keyhole fiber laser welding [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2015, 64: 59-70.
- [15] Zhang Y. Simulation of keyhole effect in laser deep penetration welding based on “sandwich” new method [D]. Changsha: Hunan University, 2005.
张屹. 基于“三明治”新方法的激光深熔焊接小孔效应的模拟研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2005.
- [16] He S, Chen H, Cai C, et al. Influence of He-Ar mixed shielding gas on laser-MIG hybrid welding characteristic of aluminum alloys[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(12): 1202005.
何双, 陈辉, 蔡创, 等. 氦-氩混合保护气体对铝合金激光-MIG 复合焊接特性的影响[J]. 中国激光, 2018, 45(12): 1202005.
- [17] Zou J L, Ha N, Xiao R S, et al. Interaction between the laser beam and keyhole wall during high power fiber laser keyhole welding [J]. Optics Express, 2017, 25(15): 17650-17656.
- [18] Matsunawa A, Semak V. The simulation of front keyhole wall dynamics during laser welding [J]. Journal of Physics D, 1997, 30(5): 798-809.
- [19] Chen X, Pang S Y, Chen W D, et al. Numerical simulation of metal vapor dynamics in transient keyhole during laser welding [C]//The 18th National Welding Academic Conference of Welding Society of China Mechanical Engineering Society. [S.l.: s. n.], 2013.
陈鑫, 庞盛永, 陈伟东, 等. 激光焊接瞬态小孔内部金属蒸气动力学数值模拟研究[C]//中国机械工程学会焊接学会第十八次全国焊接学术会议论文集. [出版地不详: 出版者不详], 2013.
- [20] Zhao L, Han X, Zou J L, et al. Experimental study on formation process of keyhole during fiber laser deep penetration welding [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 59(7): 071402.
赵乐, 韩雪, 邹江林, 等. 光纤激光深熔焊接小孔形成过程的实验研究[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 59(7): 071402.