

能量比对双光束激光焊接特性的影响

马国龙, 李俐群*, 陈彦宾

哈尔滨工业大学先进焊接与连接国家重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001

摘要 系统研究了双光束焊接过程中能量比对焊缝成形以及能量利用率的影响,采用高速摄像技术实时观察了不同能量比下的熔池行为,分析了能量比对双光束焊接特性的影响机制。结果表明,随着能量比增大,双光束焊缝熔深先减小后增大,熔宽变化规律与之相反,并在能量比为50/50时获得最小熔深和最大熔宽。不同能量比下能量利用率差别较大,能量比为20/80和50/50时分别获得最大值32.7%和最小值27.8%。熔池尺寸同样受能量比的影响,随着能量比增大,熔池长度先增大后减小,而宽度一直减小。能量比对双光束焊接特性的影响主要归因于焊接过程中匙孔状态以及熔池流动方式的改变。

关键词 激光技术; 激光加工; 能量比; 双光束; 激光焊接; 焊接特性

中图分类号 TG456.7

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0302003

Effect of Energy Ratio on Dual Beam Laser Welding Characteristics

Ma Guolong, Li Liqun, Chen Yanbin

State Key Laboratory of Advanced Welding and Joining, Harbin Institute of Technology,
Harbin, Heilongjiang 150001, China

Abstract Effect of energy ratio on weld formation and energy efficiency in the dual beam welding process was systematically studied. Molten pool behaviors under different energy ratios were observed in real time by the high speed video system. Influence mechanism of the energy ratio on dual beam laser welding characteristics was also revealed. Results show that the weld penetration depth increases and then decreases as the energy ratio increases, while the weld width shows the opposite variation tendency. The minimum penetration depth and maximum width are obtained at the energy ratio of 50/50. Energy efficiency is significantly different from each other with different energy ratios. The maximum energy efficiency is 32.7% at the energy ratio of 20/80, while the minimum is 27.8% at the energy ratio of 50/50. Molten pool size is also affected by the energy ratio. Molten pool length increases first and then decreases, and the molten pool width always decreases with the increase of energy ratio. The effect of energy ratio on dual beam laser welding characteristics is mainly attributed to the variation of keyhole and molten pool flow pattern in the welding process.

Key words laser technique; laser processing; energy ratio; dual beam; laser welding; welding characteristics

OCIS codes 140.3390; 160.3900; 350.3850

1 引言

由于激光焊接具有其他焊接方法不具备的技术优势,因此得到了国内外学者广泛的关注和研究。但由于传统的单光束激光焊缝仍然存在焊缝成形差、气孔以及裂纹等问题,尤其是在焊接具有较大的热导率以及易挥发的材料时,难以获得良好的焊接质量,极大限制了激光焊接在各领域的工业应用。针对该问题,有学者提出一种双光束激光焊接技术用以改善单光束焊缝质量^[1]。研究表明,该技术可以明显提高焊接过

收稿日期: 2016-09-14; 收到修改稿日期: 2016-11-21

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFB1102100)

作者简介: 马国龙(1987—),男,博士研究生,主要从事双光束激光焊接方面的研究。E-mail: guolongma@163.com

导师简介: 陈彦宾(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事激光加工方面的研究。E-mail: chenyb@hit.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: liliqun@hit.edu.cn

程稳定性,改善焊缝成形^[2],减少焊接缺陷^[3-4]并改善焊缝微观组织^[5-7]。

与单光束激光焊接相比,双光束激光焊接包括两束激光,因此在焊接过程中会增加新工艺参数,如两束激光的排布方式、光斑间距以及能量比等,均会影响双光束焊缝质量。Shibata 等^[8]发现双光束焊接过程中光斑间距可以显著影响匙孔形状,进而影响焊缝成形和气孔率。Deutsch 等^[9]在双光束焊接薄板铝合金过程中发现当前光束能量大于后光束能量时可以明显改善焊缝成形。Harooni 等^[10]在双光束焊接镁合金搭接接头时发现采用前光束预热后光束焊接的方法可以减少界面气孔。杨璟等^[11]发现双光束光斑间距、能量分布以及排列方式均会影响焊缝横截面成形。

焊接过程中的热传输以及熔池行为是决定焊缝质量的重要因素。对双光束焊接来说,两束激光的能量分布(包括位置、大小等)的变化使焊接过程变得更加复杂。因此,本文着重分析不同能量比下的焊缝成形以及熔池行为,计算不同能量比时的能量利用率,揭示能量比对双光束焊接特性的影响规律。

2 实验材料及方法

实验材料为 321 不锈钢,实验件尺寸为 100 mm×50 mm×3.5 mm,其化学成分及含量如表 1 所示,其中 Bal.表示剩余组分全部为 Fe。实验采用平板堆焊方式,氩气作为保护气,焊接前用砂纸打磨实验件表面去除氧化层。

表 1 321 不锈钢的化学成分

Table 1 Chemical compositions of the 321 stainless steel

Component	C	Mn	Si	Cr	Ni	P	S	Ti	Fe
Mass fraction /%	0.049	1.180	0.460	17.380	9.010	0.034	0.013	0.230	Bal.

图 1 为双光束激光焊接实验装置示意图,主要包括双光束激光焊接系统及高速摄像系统。双光束激光焊接系统包括光纤激光器(YLS-10000, IPG 公司,最大输出功率为 10 kW,波长为 1.07 μm,光束直径为 0.26 mm)和包含分光模块的焊接头(YW50)。通过调节分光模块中楔形镜的位置即可将一束激光分成两束具有不同能量的激光,能量比调节范围为 50/50~80/20,相应能量密度分布如图 2 所示。高速摄像系统主要用于实时观察焊接过程中的熔池行为,包括高速摄像机(Camrecord 5000×2, Optronis 公司),其数据采集频率为 4000 frame/s;以及作为辅助光源的半导体脉冲激光器(CAVILUX HF, Cavitar 公司),其波长为 808 nm。具体的焊接工艺参数如表 2 所示,定义能量比 R 为沿焊接方向前光束与后光束的激光功率之比。

焊后将焊接接头切割、研磨、抛光后在质量分数为 10%的三氧化铬溶液中进行电解腐蚀;采用 Olympus 金相显微镜(SZX 12)观察焊缝横截面成形。

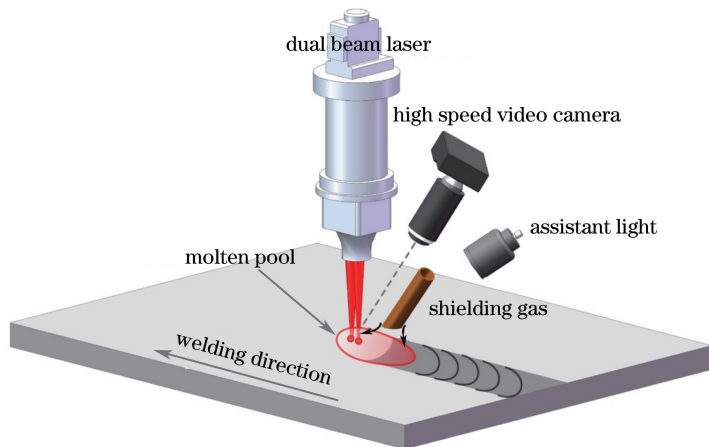


图 1 双光束激光焊接实验装置

Fig. 1 Experimental setup of the dual beam laser welding

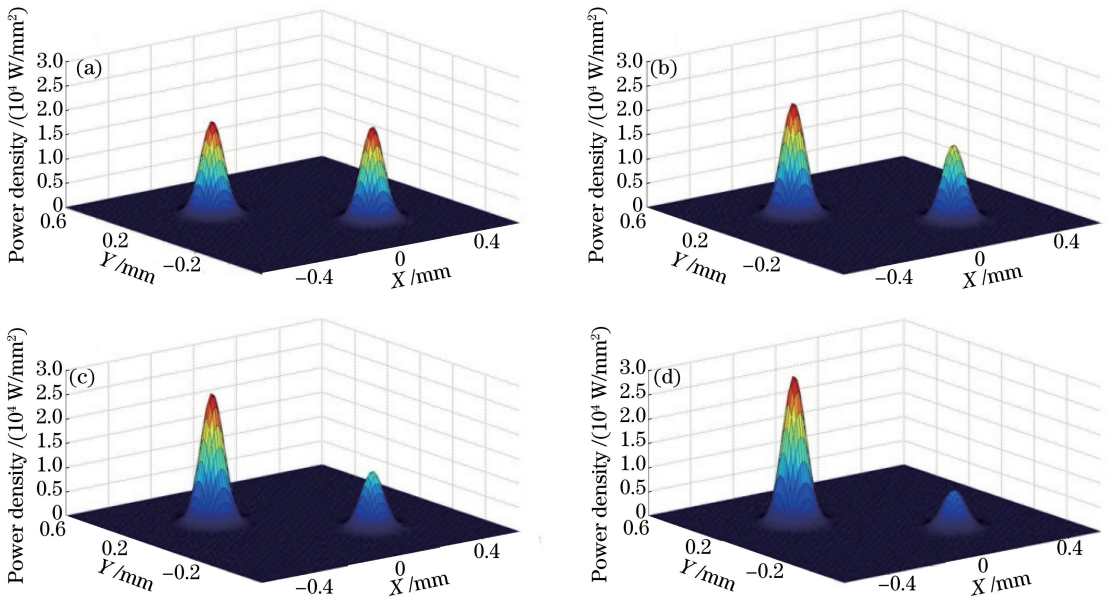


图 2 不同能量比下双光束激光能量密度分布示意图。(a) 50/50; (b) 60/40; (c) 70/30; (d) 80/20

Fig. 2 Energy density distributions of the dual beam laser under different energy ratios.

(a) 50/50; (b) 60/40; (c) 70/30; (d) 80/20

表 2 激光焊接工艺参数

Table 2 Laser welding parameters used in the experiments

Welding parameter	Value
Laser power P	2 kW
Dual beam energy ratio R	20/80, 30/70, 40/60, 50/50, 60/40, 70/30, 80/20
Beam interspacing L	0.6 mm
Beam configuration	Tandem
Welding speed v_w	4 m/min
Shielding gas flow rate	20 L/min

3 实验结果与讨论

3.1 焊缝成形

根据数值的大小将能量比 R 分为三个区间: $R < 1$, $R = 1$ (50/50) 和 $R > 1$ 。表 3 所示为不同能量比下的焊缝截面, 并对焊缝熔深、熔宽数据进行测量。可以发现, 当 $R < 1$ 时, 随着能量比增大, 焊缝熔深逐渐减小; $R = 1$ 时熔深达到最小值; $R > 1$ 时, 随着能量比增大, 熔深又逐渐增大。焊缝熔宽的变化与熔深相反: 随着能量比增大熔宽先增大后减小, $R = 1$ 时熔宽达到最大值。此外, 对具有相同能量的两束激光(能量比为 20/80 与 80/20、30/70 与 70/30), 当能量比 R 较小时具有更大的熔深和熔宽, 如当能量比分别为 30/70 和 70/30 时, 其熔深、熔宽分别为 2.53, 0.89, 2.34, 0.84 mm。但是对于能量比为 40/60 和 60/40 的焊缝, 前者熔深大于后者, 熔宽却小于后者。图 3 为焊缝熔深和熔宽随能量比变化的曲线图, 可以更清楚地表示能量比对焊缝成形的影响规律。

表 3 不同能量比下双光束焊缝横截面成形及相关数据

Table 3 Cross-sections and related data of the dual beam laser weld under different energy ratios

Energy ratio	20/80	30/70	40/60	50/50	60/40	70/30	80/20
Weld cross-section							
Penetration depth / mm	2.63	2.53	2.10	1.81	1.96	2.34	2.53
Width / mm	0.83	0.89	0.93	1.02	1.00	0.84	0.80

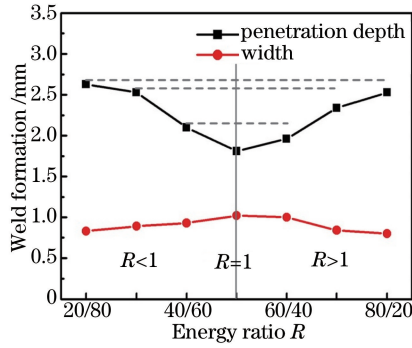


图 3 不同能量比下双光束焊接焊缝熔深与熔宽

Fig. 3 Weld penetration depth and width of the dual beam welding under different energy ratios

双光束激光焊接过程中,能量比的改变会影响双光束能量利用率和焊接过程中的热传输,进而影响最终的焊缝成形。Okada^[12]提出熔化效率的概念用来表征焊接过程能量利用率的大小,即熔化母材的能量占总输入能量的百分比;其余的能量则由于焊接过程中材料的反射、气化、热辐射和传导等现象损耗。熔化效率 E_M 的计算公式为

$$E_M = \frac{C_p \times \rho \times A \times v_w \times (T_1 - T_{ref})}{P}, \quad (1)$$

式中 C_p 为 321 不锈钢的比热容 ($0.78 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$), ρ 为密度 ($0.0072 \text{ g} \cdot \text{mm}^{-3}$), A 为焊缝熔化区面积, v_w 为焊接速度 ($66.7 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$), T_1 为熔点 (1727 K), T_{ref} 为焊接之前的材料温度 (298 K), P 为激光功率 (2000 W)。

焊缝熔化区为图 4 所示阴影区域。采用 Matlab 软件提取并计算焊缝熔化区面积,并根据(1)式计算出不同能量比下的熔化效率,结果如表 4 所示。可以发现,当 $R < 1$ 时,随着能量比增大,熔化效率逐渐减小; $R = 1$ 时达到最小值; $R > 1$ 时,熔化效率突然增大,然后随着能量比增大再次逐渐减小。当能量比为 20/80 时获得最大的熔化效率为 32.7%,能量比为 50/50 时熔化效率最小,为 27.8%,二者相比减小了 15%。通过以上分析可知,双光束焊接过程中能量比显著影响熔化效率即能量利用率。此外,对具有相同能量的两束激光,能量比为 20/80 和 30/70 时的熔化效率分别大于 80/20 和 70/30 时的熔化效率,即较小的能量比获得较大的熔化效率;但是能量比为 40/60 时的熔化效率却小于 60/40 时的熔化效率。

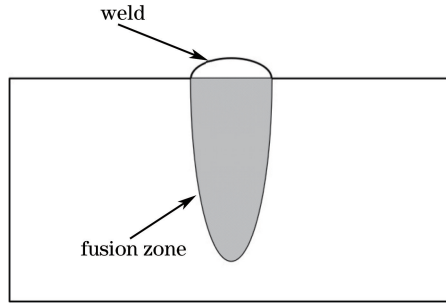


图 4 焊缝熔化区域示意图

Fig. 4 Schematic of the weld fusion zone

表 4 不同能量比下双光束焊接熔化区面积和熔化效率

Table 4 Weld fusion zone area and melting efficiency of the dual beam laser welding under different energy ratios

Energy ratio	20/80	30/70	40/60	50/50	60/40	70/30	80/20
Weld fusion zone area /mm ²	1.22	1.21	1.09	1.04	1.18	1.16	1.15
$E_M/\%$	32.7	32.4	29.2	27.8	31.6	31.0	30.8

3.2 熔池行为

焊接过程中的熔池行为是影响焊缝质量的重要因素。采用高速摄像技术实时观察了不同能量比下双光束焊接过程中的熔池行为,结果如图 5 所示。可以发现,当能量比为 50/50 时,熔池中存在两个独立的匙孔,焊接过程相对稳定。当能量比为 60/40 时,熔池中匙孔状态很不稳定,有时为两个单独匙孔,但两匙孔间相

相互作用剧烈使其很容易贯通形成一个沿焊接方向拉长的匙孔,此时原本存在于两匙孔间的熔体也被沿熔宽方向排出熔池形成飞溅,如图 5(b)所示,焊接过程不稳定。当能量比为 70/30 时,大能量光束在熔池中形成一个匙孔,小能量光束则不能形成匙孔,但会在熔池表面形成深度较浅的凹坑,如图 5(c)中亮色区域所示,焊接过程中熔池波动明显。当能量比为 80/20 时,大能量光束仍然在熔池中形成一个匙孔,且匙孔直径明显增大,小能量光束对熔池无明显作用,熔池波动更加剧烈。

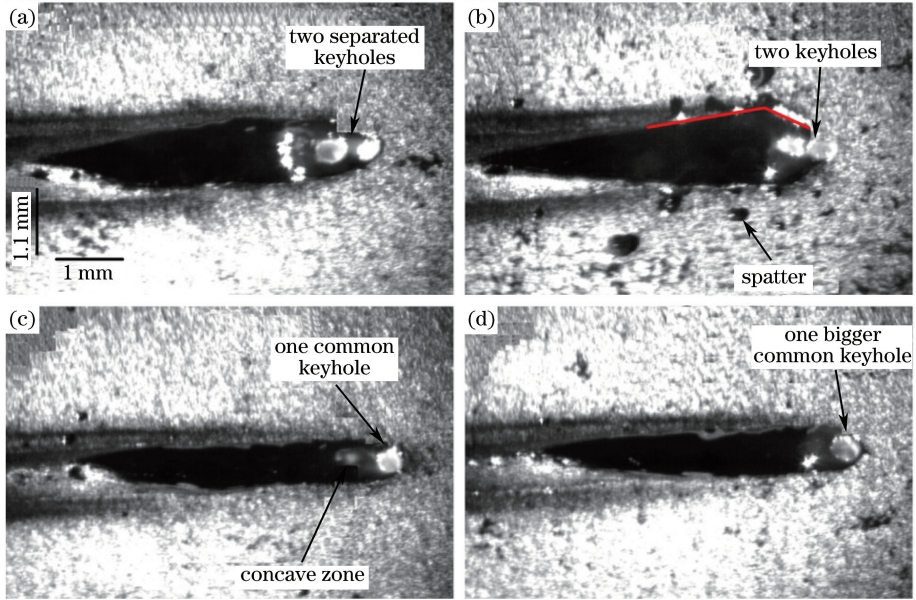


图 5 不同能量比下的双光束焊接熔池形态。(a) 50/50;(b) 60/40;(c) 70/30;(d) 80/20

Fig. 5 Molten pools of the dual beam laser welding under different energy ratios.

(a) 50/50; (b) 60/40; (c) 70/30; (d) 80/20

对不同能量比下的熔池形状及匙孔尺寸进行了分析。选取十个不同时间点下的高速摄像照片,分别测量熔池长度、宽度以及匙孔直径,将其平均值作为最终数据,结果如表 5 所示。当存在两个匙孔时,两个匙孔直径以“/”分隔。可以发现,在能量比 $R \geq 1$ 条件下,当熔池中具有两个匙孔时(能量比为 50/50 和 60/40),熔池长度随能量比增大而增大;当熔池中只有一个匙孔时(能量比为 70/30 和 80/20),熔池长度随着能量比增大而减小;且双匙孔熔池长度均大于单匙孔。随着能量比增大,熔池宽度逐渐减小,这与图 3 所示焊缝熔宽变化规律相同。随着能量比增大匙孔直径呈增大趋势。

表 5 不同能量比下双光束焊接熔池及匙孔尺寸

Table 5 Dimensions of molten pools and keyholes of the dual beam laser welding under different energy ratios

Energy ratio	50/50	60/40	70/30	80/20
Molten pool length /mm	5.35	5.64	5.10	4.97
Molten pool width /mm	1.07	1.02	0.80	0.77
Keyhole diameter /mm	0.35/0.50	0.44/0.40	0.47	0.54

3.3 能量比对焊接特性的影响机制

以上实验结果表明,能量比会影响双光束焊接过程中的能量利用率,进而对匙孔状态和熔体流动方式等熔池行为产生影响,最终导致焊缝成形的差别。下面将从能量利用率、匙孔状态以及熔体流动方式等方面分析能量比对双光束焊接特性的影响机制。

焊缝熔深主要由双光束中大能量光束的数值及其能量利用率决定。首先,能量比由 20/80 增大到 50/50,再增大到 80/20 时,其中大能量光束所占总能量的百分比由 80% 下降到 50%,然后又增大到 80%,因此导致了焊缝熔深先减小后增大的变化趋势,且能量比为 50/50 时熔深最小,如图 3 结果所示。其次,对具有相同能量的两束激光,焊接过程中当小能量光束在前时,会首先对实验件起到预热的作用,提高大能量光束的能量利用率(表 4),因此熔深会略大于大光束在前时的熔深。

激光焊接过程中,光束能量密度超过一定数值时会引起材料的强烈气化,一方面,在金属蒸气反作用力的作用下将熔体排出形成匙孔;另一方面,金属蒸气及等离子体会以高速喷出匙孔,在蒸气摩擦力的作用下带动熔池表面匙孔附近的熔体向四周流动^[13],且光束能量密度越高蒸气喷发摩擦力越大。双光束焊接过程中在双匙孔的作用下会在垂直于匙孔连线的方向形成增强的熔体流动^[14]。分析表 4 和图 5 结果可以发现,双匙孔状态下能量利用率低于单匙孔,这主要与双匙孔下材料气化、辐射等现象比单匙孔时更加剧烈,更多的热量被损耗有关。

对不同能量比下的熔体流动方式进行了分析,结果如图 6 所示。图 6 中灰色虚线所示为双焦点连线的中心位置。当能量比为 50/50 时,在熔池中形成两个独立的匙孔[图 5(a)],由于两束激光能量相同,作用在匙孔周围熔体的蒸气摩擦力相近,因此两匙孔之间的熔体可以在双焦点连线的中心位置形成直接指向熔宽两侧的加强流动,如图 6(b)所示。此时大量的热被传输到熔池两侧,使得母材得以熔化,因此熔池宽度以及最终焊缝熔宽均最大。

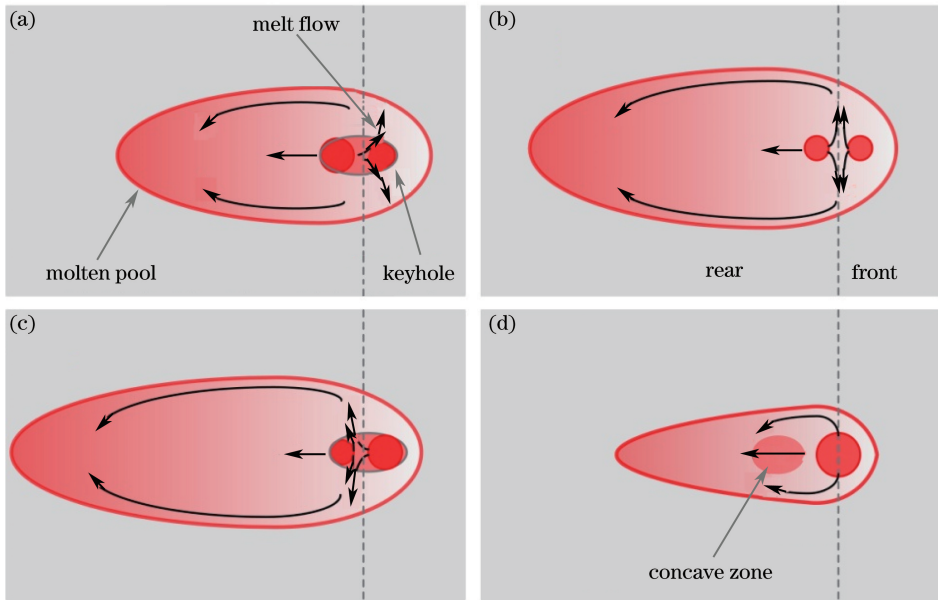


图 6 不同能量比下双光束焊接熔池流动方式示意图。(a) 40/60;(b) 50/50;(c) 60/40;(d) 70/30

Fig. 6 Molten pool flow patterns of dual beam welding under different energy ratios.

(a) 40/60; (b) 50/50; (c) 60/40; (d) 70/30

当能量比为 60/40 时,同样在熔池中形成两个匙孔[图 5(b)],但因前光束能量大于后光束,蒸气摩擦力对周围熔体的作用大于后光束,因此在这种不平衡力的作用下,两匙孔容易贯通,且在匙孔贯通时两匙孔间的熔体会被排出熔池外,形成飞溅。匙孔附近的熔体也在合力作用下形成指向熔池后部的增强流动,图 5 (b)中红色线所示熔池轮廓可以清楚地表明熔体流动趋势,因此导致熔池宽度以及最终焊缝熔宽减小。而更多的热量流向熔池后部导致熔池长度增加,如表 5 所示。当能量比为 40/60 时,同样在熔池中形成两个匙孔,小光束能量在前,大光束能量在后,蒸气摩擦力合力方向更加偏向熔池前部,使得热量集中于该区域而不能被有效传输到熔池宽度方向,因此熔池宽度和最终焊缝熔宽比能量比为 60/40 时进一步减小。另外,热量集中于熔池前部的高温区,增强了材料气化、辐射等现象,这也是其能量利用率低于能量比 60/40 时的原因。

当能量比为 70/30 时,熔池中大能量光束形成一个匙孔,小能量光束则在熔池表面形成稀薄等离子体,并在气化膨胀压力下在熔池表面形成凹坑,这也有利于材料对激光的吸收。此时沿熔宽方向的增强流动作用微弱,因此熔池长度和宽度比双匙孔时均减小。当能量比为 80/20 时,熔池中仅有大能量光束形成一个匙孔,虽然匙孔增大,但由于熔宽方向流动增强作用消失,因此熔池长度和宽度会进一步减小。当能量比为 20/80 以及 30/70 时,熔池中同样仅有一个匙孔存在,但前光束的预热作用提高了后光束能量利用率(表 4),使得匙孔附近熔体流速增大,因此熔池宽度以及焊缝熔宽比大光束在前时均有所增大,如表 3 结果所示。

4 结 论

研究了双光束焊接过程中能量比对焊缝成形以及能量利用率的影响。随着能量比的增大,双光束焊缝熔深先减小后增大,熔宽先增大后减小,在能量比为 50/50 时获得最小的熔深和最大的熔宽。熔深变化主要与双光束中能量较大的光束及其能量利用率有关。能量比会显著影响双光束焊接能量利用率:随着能量比增大能量利用率呈减小趋势,在能量比为 20/80 时获得最大值 32.7%,能量比为 50/50 时获得最小值 27.8%,比最大值减小 15%。能量比的改变会导致双光束焊接过程中匙孔状态和熔池形状的改变。当能量比 $R \geq 1$ 时,随着能量比增大,熔池中由双匙孔变为单匙孔,熔池长度先增大后减小,熔池宽度一直减小。能量比对双光束焊接特性的影响主要归因于其对焊接过程中匙孔状态以及熔池流动方式的改变。双匙孔状态下两匙孔之间相互作用形成的沿熔宽方向的增强流动有利于增大熔池尺寸。

参 考 文 献

- [1] Xie J. Dual beam laser welding[J]. *Welding Journal*, 2002, 81(10): 223-S-230-S.
- [2] Li Liqun, Chen Yanbin, Tao Wang. Research on dual-beam welding characteristics of aluminum alloy[J]. *Chinese J Lasers*, 2008, 35(11): 1783-1788.
李俐群, 陈彦宾, 陶 汪. 铝合金双光束焊接特性研究[J]. *中国激光*, 2008, 35(11): 1783-1788.
- [3] Lei Zhenglong, Li Ying, Chen Yanbin, *et al.* Effect of process parameters on porosity formation ratio in dual-beam laser welding of aluminum alloys with filler wire[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2013, 34(2): 40-44.
雷正龙, 李 颖, 陈彦宾, 等. 双光束激光填丝焊工艺对铝合金焊接气孔率的影响[J]. *焊接学报*, 2013, 34(2): 40-44.
- [4] Drezet J M, Lima M S F, Wagnière J D, *et al.* Crack-free aluminium alloy welds using a twin laser process[C]. *Safety and Reliability of Welded Components in Energy and Processing Industry*, 2008: 87-94.
- [5] Li Qiaoyan, Luo Yu, Wang Yajun, *et al.* Microstructure and mechanical properties of twin spot laser welding of 5052 aluminum[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2007, 28(12): 105-108.
李巧艳, 罗 宇, 王亚军, 等. 5052 铝合金双光点激光焊接组织与性能[J]. *焊接学报*, 2007, 28(12): 105-108.
- [6] Shi Y, Zhang H, Watanabe T, *et al.* CW/PW dual-beam YAG laser welding of steel/aluminum alloy sheets[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2010, 48(7-8): 732-736.
- [7] Yang Jing, Li Xiaoyan, Chen Li, *et al.* Microstructure and properties of twin spot laser welded joints of 1420 Al-Li alloy[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2011, 40(5): 871-874.
杨 璟, 李晓延, 陈 俐, 等. 1420 铝锂合金双光点激光焊接头组织性能[J]. *稀有金属材料与工程*, 2011, 40(5): 871-874.
- [8] Shibata K, Iwase T, Sakamoto H, *et al.* Process stabilization by dual focus laser welding of aluminum alloys for car body[C]. *SPIE*, 2003, 5121: 376-384.
- [9] Deutsch M G, Punkari A, Weckman D C, *et al.* Weldability of 1.6 mm thick aluminium alloy 5182 sheet by single and dual beam Nd:YAG laser welding[J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2003, 8(4): 246-256.
- [10] Harooni M, Carlson B, Kovacevic R. Dual-beam laser welding of AZ31B magnesium alloy in zero-gap lap joint configuration[J]. *Optics & Laser Technology*, 2014, 56: 247-255.
- [11] Yang Jing, Li Xiaoyan, Gong Shuili, *et al.* Joint formation by twin-spot laser welding of 1420 aluminium-lithium alloy [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2010, 31(12): 29-32.
杨 璟, 李晓延, 巩水利, 等. 1420 铝锂合金双光点激光焊接头成形[J]. *焊接学报*, 2010, 31(12): 29-32.
- [12] Okada A. Application of melting efficiency in welding and its problems[J]. *Journal of the Japan Welding Society*, 1977, 46(2): 53-61.
- [13] Fabbro R, Hamadou M, Coste F. Metallic vapor ejection effect on melt pool dynamics in deep penetration laser welding [J]. *Journal of Laser Applications*, 2004, 16(1): 16-19.
- [14] Hu J L, Tsai H L. Fluid flow and weld pool dynamics in dual-beam laser keyhole welding [C]. *ASME 2003 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, 2003: 41711.