

## 不锈钢薄板高速激光焊驼峰焊道形成倾向及其影响因素\*

裴莹蕾<sup>1)</sup> 单际国<sup>1,2)</sup> 任家烈<sup>1)</sup>

1) 清华大学机械工程系, 北京 100084

2) 清华大学先进成形制造教育部重点实验室, 北京 100084

**摘要** 研究了 SUS304 不锈钢薄板光纤激光焊接时激光功率、焊接速度、保护气对焊道驼峰倾向的影响规律, 利用 Ti 示踪元素和 CCD 图像, 考察了熔池的流动状态. 结果表明, 焊道驼峰倾向对激光功率不敏感; 当焊接速度超过 18 m/min 时, 焊缝出现驼峰现象, 且驼峰倾向随着焊接速度的提高而增大; 当焊接速度和功率一定时, 不同保护气流方向的焊缝驼峰倾向有明显差异, 与焊接方向同向吹送保护气有助于降低驼峰倾向. 分析认为, 焊接速度的提高使熔池流动更加剧烈, 进而增加了驼峰倾向; 与焊接方向反向吹送保护气体, 焊缝几何形状呈“柱状”, 与焊接方向同向吹送保护气体, 焊缝的几何形状呈“杯状”, “杯状”焊缝增加了 U 形区域的截面积, 降低了熔池流动的剧烈程度, 进而降低了驼峰倾向. 通过调整保护气流方向改变焊缝的几何形状以增加 U 形区域的截面积, 是降低驼峰倾向的可行途径.

**关键词** 高速激光焊, 驼峰倾向, 熔池流动, 焊接工艺, 奥氏体不锈钢

中图法分类号 TG456.7

文献标识码 A

文章编号 0412-1961(2012)12-1431-06

## STUDY OF HUMPING TENDENCY AND AFFECTING FACTORS IN HIGH SPEED LASER WELDING OF STAINLESS STEEL SHEET

PEI Yinglei<sup>1)</sup>, SHAN Jiguo<sup>1,2)</sup>, REN Jialie<sup>1)</sup>

1) Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084

2) Key Laboratory for Advanced Materials Processing Technology, Ministry of Education, Tsinghua University, Beijing 100084

Correspondent: SHAN Jiguo, professor, Tel: (010)62782286, E-mail: shanjg@mail.tsinghua.edu.cn

Manuscript received 2012-07-11, in revised form 2012-09-16

**ABSTRACT** The fiber laser was used to weld austenitic stainless steel SUS304 sheet at the speed of 24 m/min. The effects of laser power, welding speed and shielding gas on humping tendency have been investigated. The melt flow in the molten pool under different welding parameters was studied by Ti tracer method and CCD visual detection system. The results show that the humping tendency is not sensitive to the laser power. The humping is formed when welding speed exceeds 18 m/min, and goes up with the increasing of welding speed. The humping tendency is completely different as changing the direction of shielding gas under constant welding speed and laser power, and it is reduced when the shielding gas direction follows the welding direction. It can be explained that, with the increasing of welding speed, the melt flow becomes fierce, and the humping tendency goes up. The weld shape turns to the “columnar weld”, when the shielding gas direction against the welding direction; the weld shape turns to the “cup weld” when the shielding gas direction follows the welding direction. The “cup weld” expanded “U area” which gentles the melt flow and reduces humping tendency. Therefore, adjusting the shielding gas direction to expand the “U area” is an effective approach to reduce the humping tendency.

**KEY WORDS** high speed laser welding, humping tendency, melt flow in the molten pool, welding process, austenitic stainless steel

\* 收到初稿日期: 2012-07-11, 收到修改稿日期: 2012-09-16

作者简介: 裴莹蕾, 男, 1985 年生, 博士生

DOI: 10.3724/SP.J.1037.2012.00416

驼峰焊道是指当焊接速度较高时, 焊缝金属沿焊道表面出现的周期性起伏现象, 驼峰处熔融金属在焊缝上堆积, 相邻的驼峰之间出现咬边. 驼峰的产生恶化了焊缝表面成形, 焊后打磨增加了不必要的生产工序. 伴随着驼峰产生

的咬边<sup>[1]</sup>,降低了接头有效截面积,在咬边处引起应力集中,降低了结构承受动负荷的能力.驼峰焊道普遍存在于多种焊接方法中<sup>[2,3]</sup>,已经成为高效可靠连接亟待解决的问题.

国内外学者对驼峰焊道的形成机理进行了广泛研究<sup>[4-11]</sup>, Nguyen 等<sup>[4-6]</sup>实验观察了电弧焊驼峰焊道的形成过程,并给出了其产生的原因.当焊接速度较高时,虽然激光焊和电弧焊都会伴随着熔池的拖长以及高速向后的金属流动,但二者熔池的几何形态及受力状态是不同的.激光焊形成深而窄的熔池而电弧焊形成浅而宽的熔池,另外激光焊过程中伴随着小孔动态变化以及高速金属蒸气的喷发,也不像电弧焊那样存在电磁力和熔滴对熔池的冲击力.因此有关电弧焊驼峰焊道的研究成果不能完全适用激光焊.有学者<sup>[12-15]</sup>对激光焊驼峰焊道的产生进行了研究,但这些研究局限于观察熔池表面的流动以及金属蒸气的形态变化,对于焊接工艺参数对熔池流动的影响以及熔池流动与驼峰倾向的关系还缺乏深入认识.本工作研究了焊接工艺参数对激光焊驼峰倾向的影响规律,采用 Ti 示踪元素和熔池 CCD 图像考察了不同焊接工艺参数下熔池的流动状态,并据此分析得到了驼峰焊道产生的关键影响因素,对抑制高速焊时驼峰的产生具有参考价值.

## 1 实验材料及方法

激光焊接设备为 YLR-2000 型光纤激光器(光斑直径为 0.13 mm),四轴三联动工作台可实现的最高焊接速度为 24 m/min.焊接试样是厚度为 1 mm 的 SUS304 不锈钢板,采用平板堆焊方法.焊前打磨并用丙酮清洗试样表面油污.离焦量为 0 mm,保护气体是 99.9% 的 Ar,气流量为 20 L/min.本文正向吹送保护气是指气流从熔池的头部吹向熔池尾部,反向吹送保护气是指气流从熔池尾部吹向头部.采用 AM1101 型摄像机对焊接熔池进行视觉检测,通过图像标定提取熔池形状和尺寸.

利用 100  $\mu\text{m}$  厚的 Ti 板作为示踪材料,置于焊缝深度方向上的不同位置(图 1),在保证总厚度(1.6 mm)不变条件下,进行激光表面堆焊,考察不同焊接工艺参数下焊缝凝固后 Ti 的分布情况. Ti 板置于上部(图 1a),便于观察熔深较小时的熔池流动状态,其他情况下 Ti 板置于中部(图 1b).使用 JSM-7001F 型场发射扫描电镜(SEM)和能谱仪(EDS)分别获得焊缝横截面形貌和元素分布情况.图 2 是焊接速度 24 m/min,焊接功率 2 kW,离焦量为 0 mm 反向 45° 吹送保护气下焊缝横截面的形貌和 Ti, Fe, Cr 元素面扫描结果,用 Ti 的分布状态反推焊接过程中熔池的流动状态.以 1 cm 的焊缝长度为一个单位,利用百分表测量一个单位长度上驼峰的高度最大值,每道焊缝测量 6 组取平均值作为整条焊缝驼峰的

高度.取焊缝中部 6 cm 长区域为测量区域,统计测量区域驼峰数量,并除以测量区域的长度得到驼峰的周期.

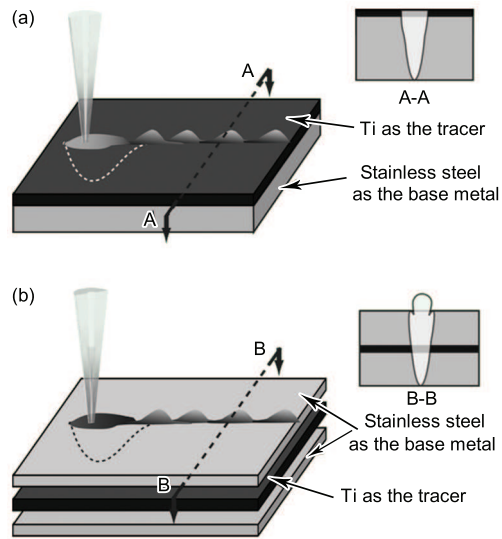


图 1 Ti 板的放置位置示意图

Fig.1 Schematic of Ti tracer position

- (a) place Ti on the surface of weld  
(b) place the Ti tracer in the middle of the weld

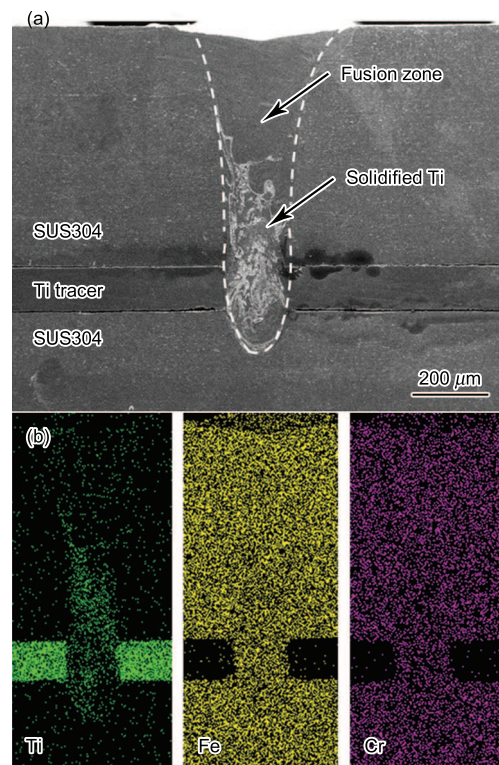


图 2 焊缝内的元素分布图

Fig.2 Element distribution of the weld at a speed of 24 m/min, a power of 2 kW and a 0 mm defocusing distance, 45° backward shielding gas  
(a) SEM image of cross-section with Ti tracer  
(b) EDS analysis of Ti, Fe and Cr element distribution

### 2 实验结果

在焊接速度为 22 m/min, 45° 正向吹送保护气、保证熔透的前提下, 统计不同功率下驼峰的高度和周期的变化情况, 结果如图 3 所示. 可见, 驼峰高度与驼峰周期随激光功率变化不明显. 在焊接功率为 2 kW, 45° 正向吹送保护气条件下, 焊接速度分别为 12, 18 和 24 m/min 时, 焊缝的表面成形和熔池的形态如图 4 所示. 可以看出, 随着焊接速度的增加, 熔池被逐渐拉长, 焊缝表面成形逐渐

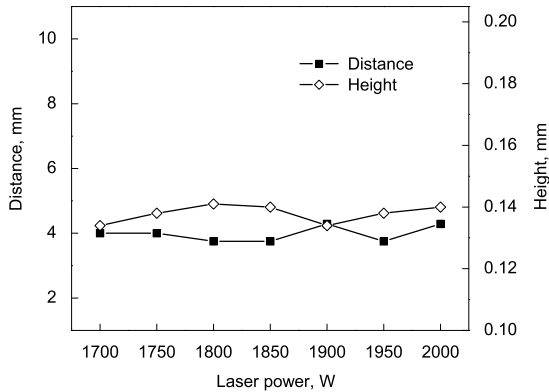


图 3 不同功率条件下驼峰倾向变化曲线

Fig.3 Humping forming tendencies under different laser power at 22 m/min

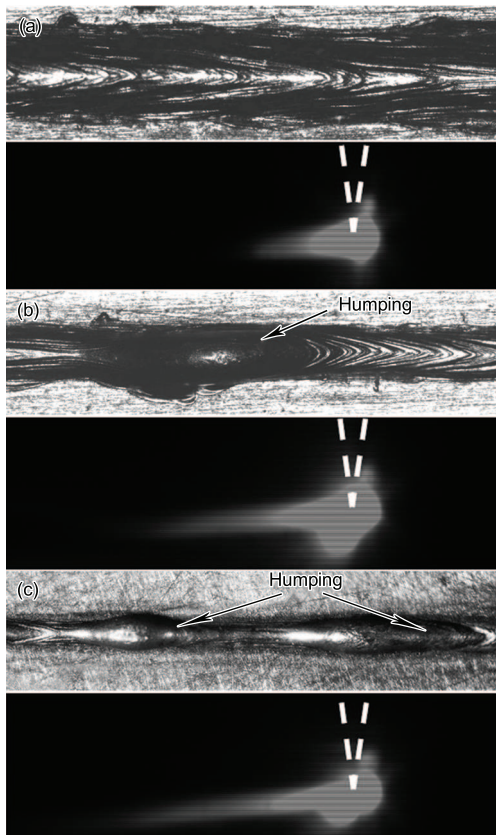


图 4 不同速度下焊缝表面成形及熔池几何形态

Fig.4 Weld bead formation (upside) and shape (underside) of molten pool under 2 kW and different welding speed

(a) 12 m/min (b) 18 m/min (c) 24 m/min

恶化, 当焊接速度高于 18 m/min 时, 焊缝表面出现了驼峰现象. 图 5 统计了不同焊接速度下 (>18 m/min) 驼峰的高度和周期的变化情况. 发现, 随着焊接速度的提高, 驼峰倾向增加, 表现为驼峰高度的增大和驼峰周期的减小.

采用设备的极限工作条件, 即功率为 2 kW, 焊接速度为 24 m/min, 改变保护气体的吹送角度 (正向吹送 15°—75°, 反向吹送 15°—75°), 观察驼峰倾向与气体吹送方向的关系. 不同吹送角度时驼峰高度与周期的变化情况如图 6 所示. 可见, 采用正向吹送保护气时, 驼峰周期随保护气角度的变化不明显, 驼峰高度在 60° 时有极小值 (图 6a);

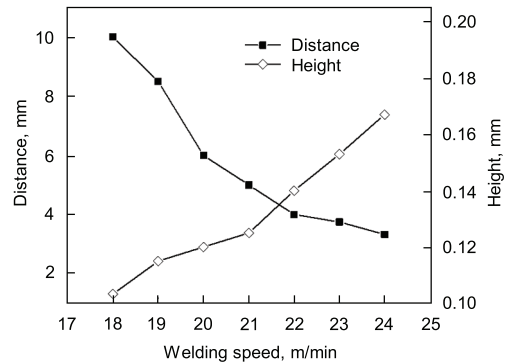


图 5 不同焊接速度条件下驼峰倾向变化曲线

Fig.5 Humping forming tendencies under different welding speed at 2 kW

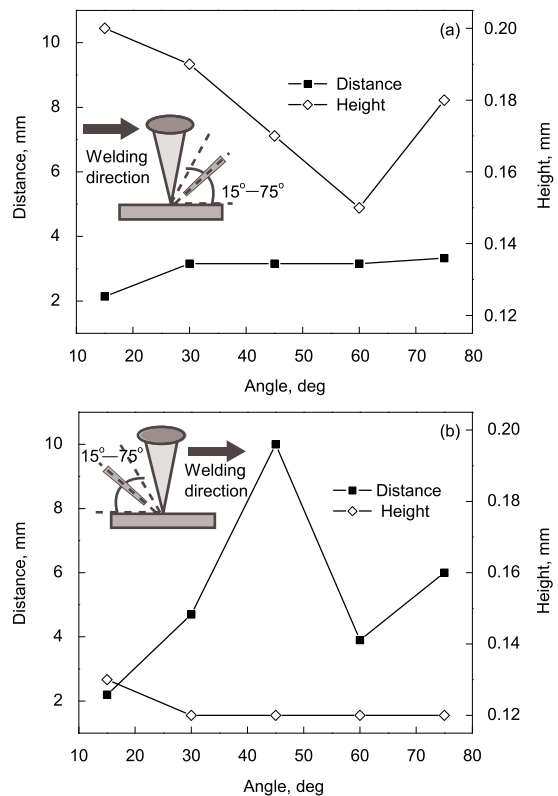


图 6 不同保护气角度下驼峰倾向变化曲线

Fig.6 Humping forming tendencies under different nozzle angle for forward direction (a) and backward direction (b) under 2 kW and 24 m/min

与正向吹送情况相比, 反向吹送的驼峰倾向降低, 表现为驼峰高度减少, 驼峰周期增大, 且在反向  $45^\circ$  时得到了驼峰倾向的极小值 (图 6b).

### 3 分析讨论

图 7 给出了不同焊接速度和激光功率条件下 Ti 示踪元素在熔池内部的分布状态. 对比 2 kW, 24 m/min (图 7a) 与 1 kW, 12 m/min (图 7b) 发现, 在保证热输入不变的条件下, 高速焊熔池流动剧烈, 流体向下流动的趋势更加明显, Ti 元素扩散到焊缝深度方向 80% 处. 低速焊熔体流动相对平稳, Ti 元素扩散到焊缝深度方向 40% 处. 对比 2 kW, 12 m/min (图 7c) 与 2 kW, 24 m/min (图 7a) 发现, 在保证功率不变的情况下提高速度, 熔池流动的剧烈程度也有增加趋势, Ti 实际扩散深度增加, 其相对扩散深度由 40% 增加到了 80%. 据此可以认为, 速度的提高能够显著增加熔池流动的剧烈程度. 对比 2 kW, 12 m/min (图 7c) 与 1 kW, 12 m/min (图 7b) 发现, 激光功率的提高并没有显著增加熔池流动, 虽然 Ti 实际扩散深度略有增加, 但相对扩散深度仍保持在熔深的 40% 左右, 说明功率对于熔体流动剧烈程度的影响不明显.

图 8 是焊接速度变化引起的熔池流动状态变化的示意图. 图 8a 中小孔前部金属熔化后将绕小孔流动并填充小孔后方坍塌的区域. Kawahito 等<sup>[16]</sup> 研究激光深熔焊时, 也发现小孔前部 W 粒子流向熔池尾部的现象. 取小孔中心处熔池横截面 (图 8b), 可见, 熔融金属从小孔前部流向后部通过一 U 形区域. 单位时间通过 U 形区域的熔融

金属体积等于小孔向前移动时后方坍塌所需填充的体积. 填充体积约为焊接速度和小孔截面积的乘积, 对比不同焊接速度的激光焊过程, 填充的体积是不同的 (图 8c). 单位时间内高速焊小孔产生的填充空间大于低速焊时小孔产生的填充空间. 假设 U 形区域面积不变, 高速焊下熔融金属通过横截面的流速高于低速焊, 且流速的增加与焊接速度的增加呈正比. 熔融金属以高速冲向熔池后方, 使熔池内金属流动更加紊乱. 因此可以认为, 焊接速度的提高促使单位时间向熔池尾部流动的熔融金属体积增大, 流速增高, 熔池流动的剧烈程度提高.

图 9a 和 b 为保持焊接速度和功率不变, 不同保护气流方向下焊缝横截面几何形状及熔池流动状态. 发现, 在同样的焊接速度和功率条件下, 二者的驼峰倾向不同, 熔池内部流动的剧烈程度也不同. 高速剧烈的熔池流动对应高的驼峰倾向, 低速平缓的流动对应低的驼峰倾向. 可以认为, 产生驼峰的直接原因是熔池内部的剧烈流动, 焊接速度是通过影响熔池流动进而影响驼峰倾向的. 由图 9a 和 b 可见, 正向和反向  $45^\circ$  吹送保护气 2 种工艺参数下焊缝的几何形态存在明显的差异, 正向吹送时焊缝为“柱状”, 而反向吹送使得焊缝的几何形状由“柱状”变成“杯状”, Fabbro<sup>[12]</sup> 和张林杰等<sup>[17]</sup> 的研究也有类似结论. 从“柱状焊缝”转变成“杯状焊缝”, 熔池的内部流动明显变平缓, 驼峰倾向显著降低. 沿小孔中心界面切取熔池尾部分析内部的流动情况, 如图 9c 和 d 所示. 可见, 同样的焊接速度条件下, 小孔后方坍塌需要填充的体积是相同的,

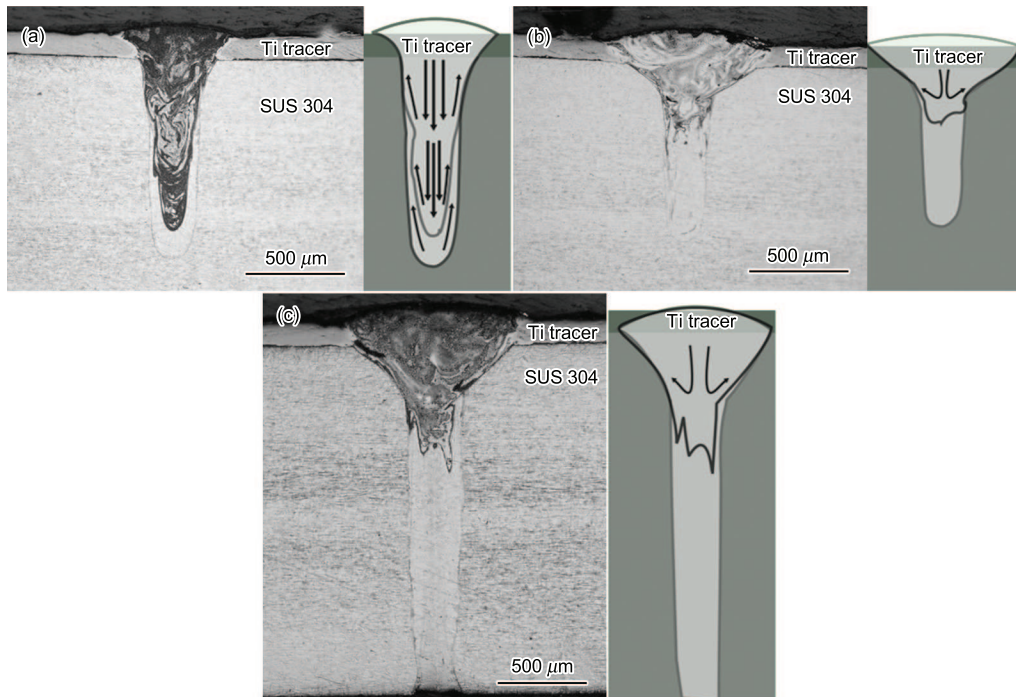


图 7 不同工艺条件下 Ti 示踪元素在熔池内部的流动状态

Fig. 7 Ti tracer distribution of the weld (left) and schematic of Ti tracer flow (right) under different laser power and welding speed

(a) 2 kW, 24 m/min      (b) 1 kW, 12 m/min      (c) 2 kW, 12 m/min

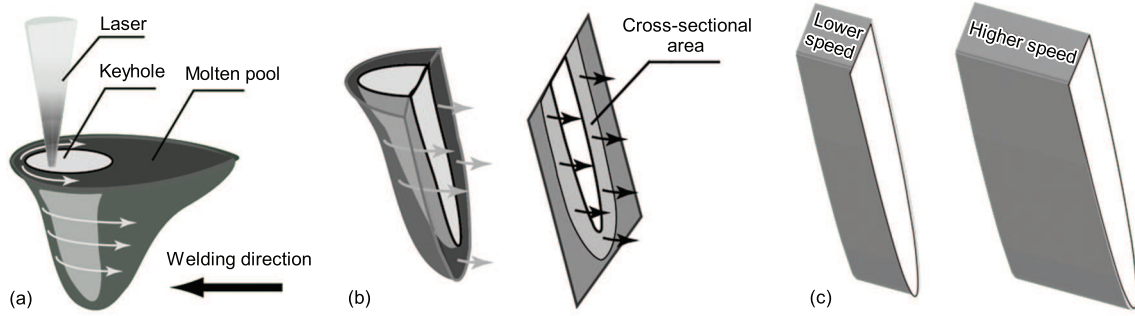


图 8 熔池流动分析示意图

Fig.8 Analysis of the melt flow at the low and high welding speed

- (a) schematic of the melt flow, melt metal flows from forward to backward of the keyhole
- (b) cross-section of the molten pool along the central line of keyhole
- (c) comparison of cavity volume in low and high speed welding

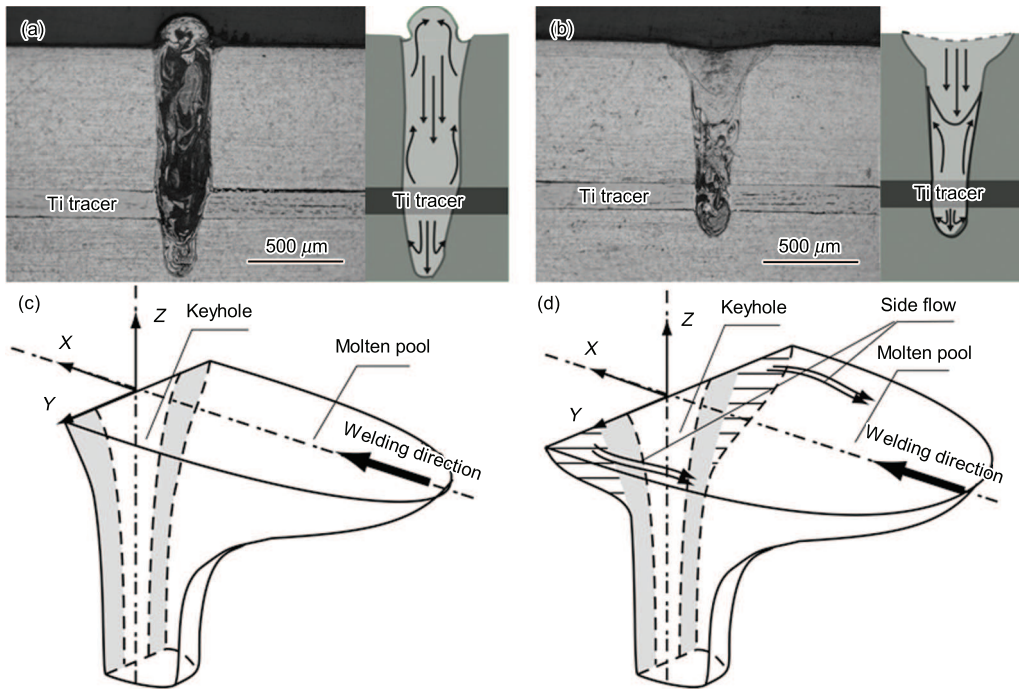


图 9 不同焊缝几何形状下熔池的流动状态和流动分析

Fig.9 Melt flow pattern (a, b) and corresponding analysis of the different geometrical shapes (c, d) at 2 kW, 24 m/min

- (a) “columnar weld”, 45° forward shielding gas
- (b) “cup weld”, 45° backward shielding gas
- (c) melt flow analysis for “columnar weld”
- (d) melt flow analysis for “cup weld”

但熔融金属从小孔前方流向后方时经过 U 形区域的截面积是不同的,“杯状焊缝”在近表面处增加了 2 个侧向流动通道(图 9d),使得流体的流速降低,熔池流动变平缓,驼峰倾向降低.因此通过改变焊缝的几何形状,调整 U 形区域的截面积,能够改善熔池的流动状态,是降低驼峰倾向的可行途径.

关于熔池流动是如何影响驼峰的产生,国内外学者给出了很多模型.主要包括流体流动模型<sup>[18-22]</sup>、Rayleigh’s capillary 不稳定性<sup>[23,24]</sup>和 Kelvin-Helmholtz 不稳定性<sup>[25]</sup>等等,这些模型都能解释驼峰

产生过程中的一部分现象,但目前还没有形成一种普遍接受的模型能够解释驼峰的产生.所以,关于熔池流动对驼峰倾向的影响作用仍需要进一步研究.

### 4 结论

(1) 高速激光焊时,驼峰倾向对激光功率的变化不敏感;当焊接速度超过 18 m/min 时,焊缝出现驼峰现象,且驼峰倾向随着焊接速度的提高而增大;当焊接速度和功率一定时,不同保护气流方向的焊缝驼峰倾向有明显差异,反向吹送保护气有助于降低驼峰倾向,且在反向 45° 时有极小值.

(2) 焊接速度的提高导致单位时间内小孔后方因坍塌而需要填充的体积增加, 在 U 形区域截面积不变的前提下, 小孔前方的熔融金属绕小孔向后方流动的速度增加, 熔池流动变的更加剧烈, 驼峰倾向提高; 反向吹送保护气体使得焊缝几何形状由“柱状”变成“杯状”, 增加了 U 形区域的截面积, 降低了熔融金属的流动速度, 熔池流动的剧烈程度降低, 驼峰倾向降低.

(3) 高速剧烈的熔池流动对应高的驼峰倾向, 低速平缓的熔池流动对应低的驼峰倾向, 产生驼峰倾向的直接原因是熔池内部的剧烈流动. 通过调整保护气流方向改变焊缝的几何形状以增加 U 形区域的截面积, 能够改善熔池的流动状态, 是降低驼峰倾向的可行途径.

### 参考文献

- [1] Albright C E, Chiang S. In: Santa C ed., *ICALEO'88 proceedings*, Berlin/IFS: Springer, 1988: 207
- [2] Nguyen T C, Weckman D C, Johnson D A, Kerr H W. *Sci Technol Weld Join*, 2006; 11: 618
- [3] Wei P S. *J Heat Transfer*, 2011; 133: 031005-1
- [4] Nguyen T C, Weckman D C. *Sci Technol Weld Join*, 2005; 10: 447
- [5] Nguyen T C, Weckman D C, Johnson D A. *Weld J*, 2007; 86: 360
- [6] Hu Z K, Wu C S. *Acta Metall Sin*, 2008; 44: 1445 (胡志坤, 武传松. 金属学报, 2008; 44: 1445)
- [7] Chen J, Wu C S. *Acta Metall Sin*, 2009; 45: 1070 (陈 姬, 武传松. 金属学报, 2009; 45: 1445)
- [8] Wu C S, Hu Z K, Zhang Y M. *Proc Inst Mech Eng*, 2009; 233B: 751
- [9] Ueyama T, Ohnawa T, Tanaka M, Nakata K. *Sci Technol Weld Join*, 2005; 10: 750
- [10] Soderstrom E, Mendez P. *Sci Technol Weld Join*, 2006; 11: 572
- [11] Cho M H, Farson D F. *Metall Mater Trans*, 2007; 38B: 305
- [12] Fabbro R. *J Phys*, 2010; 43D: 445501
- [13] Katayama S, Yoheia A, Mizutania M, Kawahitoa Y. In: Elsevier P O ed., *Lasers in Manufacturing 2011-Proc 6th Int WLT Conference on Lasers in Manufacturing*, Netherlands: Physics Procedia, 2011: 75
- [14] Kawahito Y, Mizutani M, Katayama S. *J Phys*, 2007; 40D: 5854
- [15] Wei P S, Chuang K C, Ku J S, Debroy T. *IEEE Trans Comp Packag Manufact Technol*, 2012; 2: 383
- [16] Kawahito Y, Mizutani M, Katayama S. *Sci Technol Weld Join*, 2009; 14: 588
- [17] Zhang L J, Zhang J X, Wang R, Gong S L. *Rare Met Mater Eng*, 2006; S2: 39 (张林杰, 张建勋, 王 蕊, 巩水利. 稀有金属材料与工程, 2006; S2: 39)
- [18] Berger P, Hügel H, Hess A, Weber R, Graf T. In: Elsevier P O ed., *Lasers in Manufacturing 2011 - Proc 6th Int WLT Conference on Lasers in Manufacturing*, Netherlands: Physics Procedia, 2011: 232
- [19] Eriksson I, Powell J, Kaplan A F H. *Sci Technol Weld Join*, 2011; 16: 636
- [20] Chen J. *PhD Thesis*, Shandong University, Jinan, 2009 (陈 姬. 山东大学博士学位论文, 济南, 2009)
- [21] Amara E H, Fabbro R. *Appl Phys*, 2010; 101A: 111
- [22] Mendez P F, Eagar T W. *Weld J*, 2003; 82: 296
- [23] Bradstreet B J. *Weld J*, 1968; 47: 314
- [24] Gratzke U, Kapadia P D, Dowden J, Kroos J, Simon G. *J Phys*, 1992; 25D: 1640
- [25] Kumar A, Debroy T. *Weld J*, 2006; 85: 292

(责任编辑: 毕淑娟)