

气流辅助增强匙孔激光焊熔深增加机理

沈显峰, 滕文华, 许超, 张伟超

(中国工程物理研究院 机械制造工艺研究所, 绵阳 621900)

摘 要: 采用直径为 0.8 mm 的气流喷嘴直吹匙孔, 开展了不同吹气方向、气流入射点位置及流量下的激光焊试验, 为获得增强的匙孔效应和增加的熔深. 通过等值线图分析获得了优化的气流参数, 最大熔深较传统激光焊增加了约 38%. 合适入射点位置和流量的增强匙孔气流, 不仅压制了等离子体, 还将匙孔口部的液态金属向下压, 使得匙孔口部明显扩大、熔深增加、焊缝成形良好, 匙孔内等离子体的流向发生了改变, 因而熔池内液态金属的流向也发生了变化; 入射点位置偏后时, 其作用区域为匙孔后方熔池, 将液态金属向熔池后方推, 会导致驼峰焊道的产生.

关键词: 激光焊; 辅助增强匙孔气流; 熔深增加机理; 等离子体压制; 参数优化

中图分类号: TG 456.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2015)02-0039-04

0 序 言

随着国内航空航天、海洋平台、大型舰船、核电^[1,2]等重大工程项目的不断推进, 对构件的焊接提出了焊缝更深、变形更小等越来越高的要求. 激光焊接具有能量密度高且可精确控制、焊接单位热输入低、焊缝深宽比大、焊接变形小、焊缝晶粒细小、接头质量高等特点^[1,2], 但其焊接熔深受设备激光功率等限制, 因此增加熔深可为拓展激光焊在国内重大工程中的应用奠定基础.

增加激光焊熔深的途径主要包括激光-电弧等复合焊接方法^[3]、活性激光焊接方法^[4]、激光填丝多层焊接方法^[5]和气流辅助激光焊^[6,7]等. Fan 等人^[4]认为活性激光焊接熔深增加主要是活性剂改变了焊接熔池表面张力的温度系数, 进而改变了熔池的流动模式. Fabbro 等人^[6]认为, 低焊接速度的气流辅助激光焊, 由于辅助气流的存在, 稳定了匙孔, 激光束不会被波动的匙孔后壁阻断, 从而增加了熔深. 但现有气流辅助激光焊多采用内径为 2 mm 的气流喷嘴, 而激光焊接匙孔远小于这个尺寸, 因而气流多作用于熔池. 为达到气流辅助增强匙孔的效果, 文中采用内径为 0.8 mm 的小喷嘴直吹匙孔, 促使匙孔下凹以增加熔深. 采用更小直径气流喷嘴后, 焊接熔深等对气流参数的敏感性将明显增加, 气流辅助激光焊改变为气流辅助增强匙孔激光焊. 文中研究不同的增强匙孔气流吹气方向、气流入射点

位置、气体流量对焊接熔深的影响规律, 然后根据典型焊缝横截面形貌以及焊接过程高速摄像监测结果, 分析熔深增加、熔宽减小的原因, 并探讨不同气流入射点位置的熔深增加机理.

1 试验方法

试验材料为 10 mm 厚的 1Cr18Ni9Ti 不锈钢, 试件尺寸为 200 mm × 90 mm × 10 mm, 其化学成分(质量分数)为 $w_C \leq 0.12\%$, $w_{Si} \leq 1.00\%$, $w_{Mn} \leq 2.00\%$, $w_P \leq 0.035\%$, $w_S \leq 0.030\%$, $w_{Ni} = 8.00\% \sim 11.00\%$, $w_{Cr} = 17.00\% \sim 19.00\%$, $w_{Ti} = 0.50\% \sim 0.80\%$, 余量为 Fe.

试验采用的激光加工机最大功率为 1.5 kW 的 DC015 Rofin-sinar 的 CO₂ 气体激光器, 反射聚焦镜的焦距为 150 mm. 喷嘴布置与焊接方向如图 1 所示. 熔池保护气体为氩气, 喷嘴直径 3.8 mm, 入射角 γ 约 60°, 喷嘴口部离工件表面高度约 20 mm. 增强匙孔气流采用氩气, 喷嘴直径为 0.8 mm, 入射角 θ 约 45°, 喷嘴口部离工件表面高度 2 mm, 其喷嘴位置通过精确的微调装置进行调节. 高速摄像机为德国 Optronis 的 CL600X2 高速摄像机, 全分辨率 1 280 × 1 024 下可达 500 帧/s; 采用 30 W 的 808 nm 激光光源照明, 使用 1 片中心波长为 808 nm 带宽为 10 nm 的窄带滤光片滤光.

焊接前采用丙酮清洗试件表面. 试验中激光聚焦于工件表面, 激光功率 1 500 W, 焊接速度 0.8 m/min, 熔池保护气体流量均采用 15 L/min, 增强匙孔气体流量为 0 ~ 7 L/min.

收稿日期: 2013-08-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51005219); 中国工程物理研究院发展基金重点资助项目(2013A0203008)

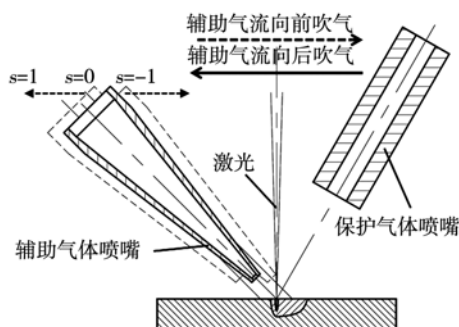


图1 喷嘴布置与焊接方向示意图

Fig. 1 Setup of nozzles and welding directions in gas-jet-assisted keyhole laser welding

2 试验结果与讨论

2.1 增强匙孔气流吹气方向和入射点位置及气体流量对熔深的影响和工艺参数优选

改变增强匙孔气流的吹气方向、入射点位置、气体流量,得到了不同焊接熔深. 根据试验获得的数据,绘制如图2所示的等值线,其中图2a为向后吹气,图2b为向前吹气;横坐标为气体流量,纵坐标为气流入射点位置,等值线表示为熔深.

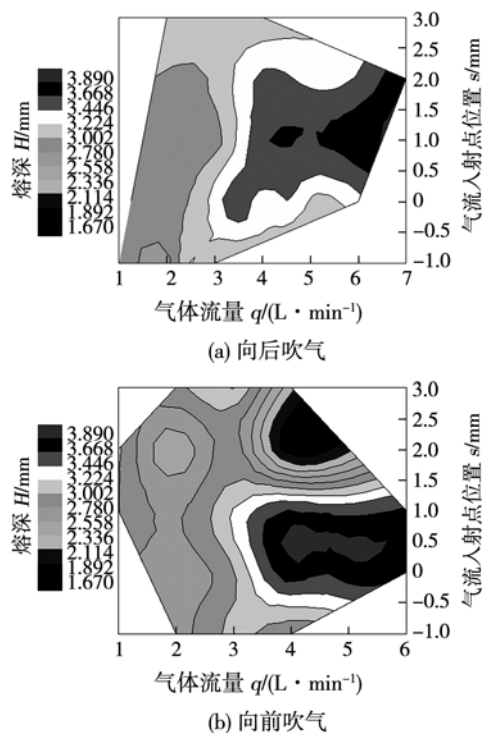


图2 气流入射方向和位置及流量对熔深影响的等值线

Fig. 2 Contour of penetration depth base on incident direction, position and flow rate of keyhole-assisted gas jet

从图2可以看出:(1)向后吹气的气流敏感性小

于向前吹气的气流敏感性. 向后吹气(图2a)比向前吹气(图2b)的等值线要疏得多,这就表明了其气体流量的敏感性较小. 向后吹气时熔深分布较为均匀,气体流量从1~7 L/min 基本都获得了一定程度的熔深增加;而向前吹气时,熔深分布较为分散,出现较多熔深减少的情形,成形不良的比例也较高. (2)向后吹气的气流入射点位置优化范围为0~2 mm,气体流量优化范围为3~6 L/min. 气流入射点距匙孔为0,1,2 mm,气体流量在3,4,5,6 L/min 时,获得了较为稳定的熔深增加. 入射点的最佳位置在1 mm 处,气体流量为4,5,6 L/min 时都获得了30%以上的熔深增加,最大熔深增加了38%. (3)向前吹气的气流入射点位置优化范围为0~1 mm,气体流量优化范围为4~6 L/min. 气流入射点距匙孔为0,1 mm,气体流量在4,5,6 L/min 时,熔深增加较为显著. 入射点的最佳位置在0 mm 处,气体流量为4,5,6 L/min 时都获得了32%以上的熔深增加,最大熔深增加了约37%.

分析熔深增加最大点的特征,还可以看出,除了气流入射点与入射角应与匙孔位置相匹配外,气体流量还应与喷嘴距工件表面的距离相匹配,过大或过小的气体流量都不能获得预期的熔深增加效果. 与向后吹气的入射点最佳位置相比,向前吹气的最佳位置离激光束更近,这主要是匙孔处需要一定压力的辅助气流才能获得一定程度的熔深增加.

2.2 熔池横截面的熔池流动分析和熔深增加机理

采用增强匙孔气流后,熔池形状变化明显. 不同气体流量下的典型焊缝横截面见图3. 无增强匙孔气流时,焊缝呈典型的“酒杯”形(图3a),焊缝上部 and 下部两部分区别明显;加入增强匙孔气流后,焊缝呈“胡萝卜”形(图3b,c),焊缝形状变化比较平缓,熔深明显增加,而熔宽明显减小.

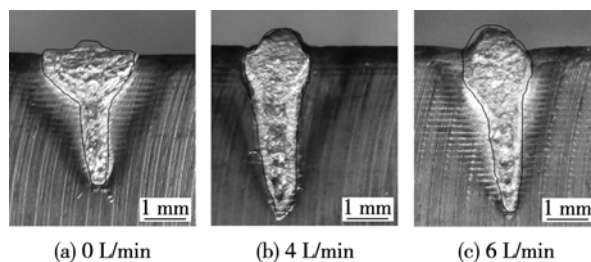


图3 不同辅助气体流量下的焊缝横截面形貌(向前吹气)

Fig. 3 Crosssection of weld at different flow rates with forward keyhole-assisted gas jet

在熔深增加机理方面,图4给出了增强匙孔气流对液态金属流动方向的影响. 由于匙孔内部物理

机制的复杂性,增强匙孔气流主要作用于匙孔口部,因此文中仅讨论匙孔上部的变化,而不考虑匙孔中下部复杂的形状变化和物理机制. 当无增强匙孔气流时(图4a),由于等离子体喷发异常剧烈,向上剧烈喷发的等离子体带动其周围的液态金属向上运动^[8],在焊缝表面由于惯性作用,从内向外的液态金属流动造成了较宽的顶部焊缝. 当增强匙孔气流存在时(图4b),向上喷发的等离子体被较强的气流压制,在未熔化的焊缝壁附近向下运动,带动周围的液态金属也向下运动,从而进一步增加了熔深.

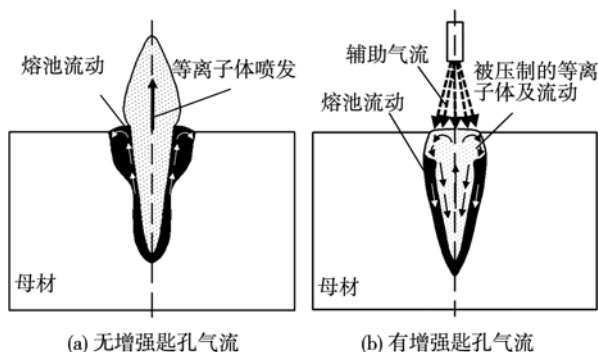


图4 增强匙孔气流对等离子体和熔池流动方向的影响
Fig. 4 Flow of plasma and molten pool with and without keyhole-assisted gas jet in crosssection

图5给出了高速摄像监测到的等离子体与熔池的图像. 拍摄视角为焊缝纵截面,方法为高温玻璃遮挡金属试板;摄像机拍摄速率为5 000 帧/s,曝光时间10 μ s. 无增强匙孔气流时(图5a),等离子体主要分布于匙孔的上方. 而增强匙孔气流存在时(图5b),大部分等离子体被压制到熔池表面以下,同时由于较强的气流作用,匙孔口部的液态熔池出现了一定程度的凹陷. 由此可见,气流辅助增强匙孔激光焊的熔深增加,是受气流压制的匙孔内等离子体改变了其周围液态金属的流动方向造成的.

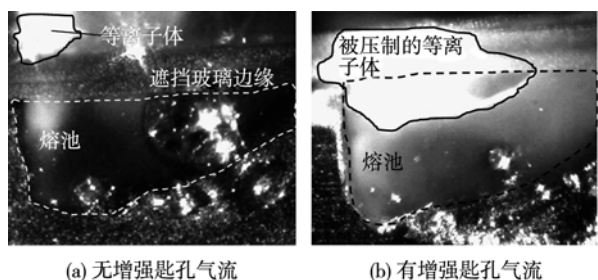


图5 高速摄像监测到的等离子体与熔池的图像
Fig. 5 Images of plasma and molten pool with and without keyhole-assisted gas jet captured by high speed camera

2.3 不同气流入射点位置的熔池流动分析和熔深增加机理

增强匙孔气流向后吹气和向前吹气时熔深增加机制类似,以向后吹气为例分析熔池流动和熔深增加机理. 根据气流入射点不同,可分为:(1)气流入射点位置为正值,其作用点为匙孔口部的前方,对熔池、匙孔和等离子体作用很小;(2)气流入射点位置为0,其作用点为匙孔口部中心,获得的焊缝形貌、熔池表面形貌和熔池流动示意图见图6;(3)气流入射点位置为负值,其作用点为匙孔口部后方的熔池,其获得的焊缝形貌、熔池表面形貌和熔池流动示意图见图7. 试验时增强匙孔气体流量均为6 L/min.

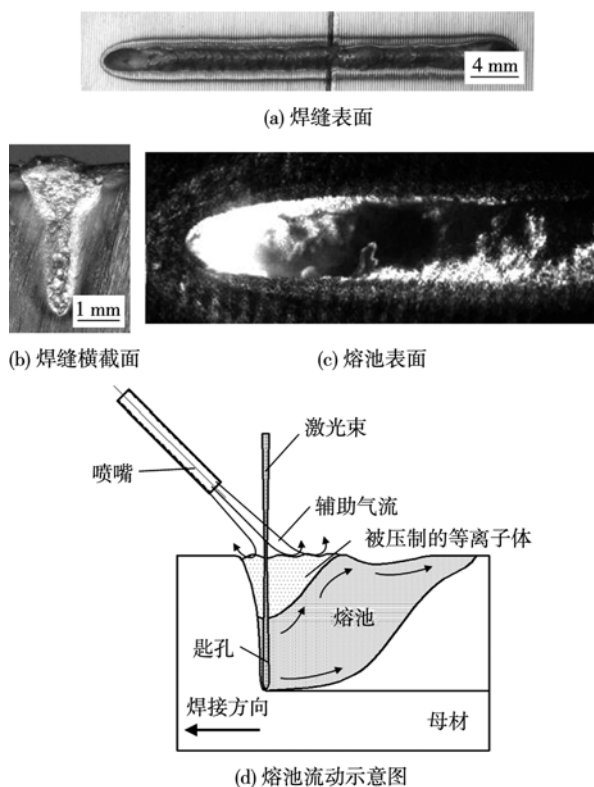


图6 增强匙孔气流入射点正对匙孔口部时的熔池流动
Fig. 6 Molten pool flow with appropriate incident point of keyhole-assisted gas jet

增强匙孔气流入射点为匙孔口部中心时,理想的气流强度应刚好将等离子体封在匙孔中,促使匙孔下陷、增加熔深,且未对熔池产生不利扰动. 而实际情况如图6所示,从焊缝表面成形(图6a)和焊缝形貌(图6b)看,焊缝成形良好. 但增强匙孔气流强度较理想情况更大,不仅压制了等离子体,还将匙孔口部的液态金属向下压,匙孔口部显著扩大(图6c). 较强的气流还将匙孔后部的液态金属向后方吹,引起了后方熔池的波动(图6d),但熔池波动的幅度较小,未产生不良影响.

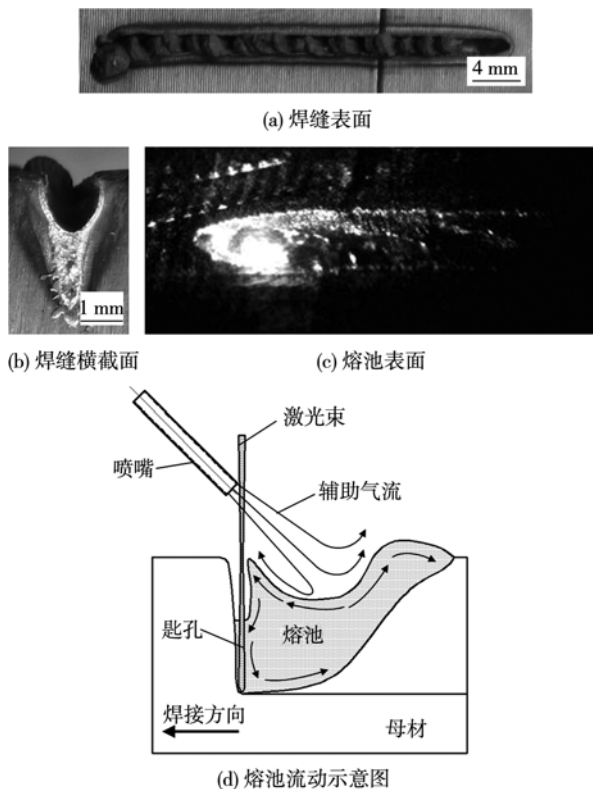


图 7 增强匙孔气流入射点偏后时的熔池流动

Fig. 7 Molten pool flow with lagging incident point of keyhole-assisted gas jet

增强匙孔气流入射点位置偏后时的情况如图 7 所示,产生类似于驼峰焊道的焊道形貌(图 7a,b),并且熔池表面凹陷严重(图 7c).此时气流作用的区域主要是熔池而不是匙孔(图 7d),到达熔池表面的气流一部分将液态金属向匙孔口部挤,一部分将液态金属向熔池后方推.前者对增加熔深有利,前挤的液态金属压制了等离子体,再加上增强匙孔气流吹除了匙孔上方的部分等离子云,因此其熔深比不加气流也有所增加,而后者对焊缝成形有害,导致驼峰焊道的产生.

3 结 论

(1) 增强匙孔气流的吹气方向、气流入射点位置、气体流量对熔深影响的等值线图分析结果表明,向后吹气的气流敏感性小于向前吹气的气流敏感性,并分析获得了优化的气流参数范围,最大熔深较传统激光焊增加了约 38%.

(2) 辅助增强匙孔激光焊接时,匙孔内等离子体受到增强匙孔气流的压制,其向上喷发的流向发

生改变,在未熔化的焊缝壁附近转而向下运动,进而造成熔池内部液态金属的流向也向下运动.

(3) 合适入射点位置和流量的增强匙孔气流,不仅压制了等离子体,还将匙孔口部的液态金属向下压,匙孔口部明显扩大,焊缝成形良好;而偏后入射点位置的气流,主要作用区域为熔池,将液态金属向熔池后方推,会导致驼峰焊道的产生.

参考文献:

- [1] 国家自然科学基金委员会工程与材料科学部. 机械工程学科发展战略报告(2011~2020)[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [2] 吴世凯, 杨武雄, 肖荣诗, 等. 电站锅炉用 HR3C 新型奥氏体耐热钢的激光焊接[J]. 焊接学报, 2008, 29(6): 93-96.
Wu Shikai, Yang Wuxiong, Xiao Rongshi, *et al.* Laser welding of new type austenite heat resistant steel HR3C for ultra supercritical boilers[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2008, 29(6): 93-96.
- [3] 秦国梁, 李小宇, 王旭友, 等. Nd: YAG 激光 + 脉冲 GMAW 复合热源焊接参数对焊缝熔宽的影响[J]. 焊接学报, 2006, 27(9): 73-76.
Qin Guoliang, Li Xiaoyu, Wang Xuyou, *et al.* Influences of Nd: YAG laser + pulsed GMAW arc hybrid welding parameters on weld width[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2006, 27(9): 73-76.
- [4] Fan Ding, Zhang Ruihua, Nakata K, *et al.* YAG laser welding with surface activating flux[J]. China Welding, 2003, 12(2): 83-86.
- [5] Zhang X D, Ashida E, Tarasawa S, *et al.* Welding of thick stainless steel plates up to 50 mm with high brightness lasers[J]. Journal of Laser Applications, 2011, 23(2): 022002-1-7.
- [6] Fabbro R, Slimani S, Doudet I, *et al.* Experimental study of the dynamical coupling between the induced vapour plume and the melt pool for Nd-YAG CW laser welding[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2006, 39(2): 394-400.
- [7] 沈显峰, 黄文荣, 滕文华, 等. 辅助增强匙孔气流对激光焊接不锈钢组织和显微硬度的影响[J]. 焊接学报, 2013, 34(4), 19-22.
Shen Xianfeng, Huang Wenrong, Teng Wenhua, *et al.* Effects of keyhole-assisted gas jet on microstructure and microhardness in laser welding of stainless steel[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2013, 34(4), 19-22.
- [8] Kamimuki K, Inoue T, Yasuda K, *et al.* Prevention of welding defect by side gas flow and its monitoring method in continuous wave Nd: YAG laser welding[J]. Journal of Laser Applications, 2002, 14(3): 136-145.

作者简介: 沈显峰,男,1977 年出生,博士,高级工程师. 主要从事高能束加工技术研究. 发表论文 20 余篇. Email: xianfeng_shen@163.com