

DOI:10.11918/202006156

7N01 铝合金电子束定点焊熔池输运现象预测

刘成财¹, 刘 琛², 朱 智¹, 国旭明¹, 赵 野¹, 范晓琳¹, 郭芳显¹, 吕华毅¹

(1. 沈阳航空航天大学 材料科学与工程学院, 沈阳 110135; 2. 哈尔滨工业大学 空间环境与物质科学研究院, 哈尔滨 150001)

摘 要: 为有效改善真空电子束焊焊缝成形并抑制成形缺陷产生, 本文以 12 mm 厚 7N01 铝合金为研究对象, 基于 CFD 软件 Ansys Fluent 深入分析了电子束定点焊匙孔钻取过程及熔池传热和流体输运现象并进行了实验验证. 为真实反映电子束流能量密度空间分布特点, 建立了考虑束流活性区特征的自适应热源模型并采用 VOF 算法对气液界面进行实时追踪. 数值分析结果表明, 束流能量密度分布及与瞬态熔池/匙孔之间的耦合作用是直接决定焊缝成形良好与否的关键. 当束流处于下聚焦模式时, 特有的能量分布形式及其诱导的等离子体保温作用、金属蒸汽反冲压力、Marangoni 流以及热浮力的耦合向上输运作用 (最大流体速度为 15 m/s 左右), 导致最终焊缝余高的形成及钉头区域扩展. 由于深度方向上束流能量密度先增加后大幅降低, 导致熔深熔宽的增加速度出现类似的演变规律, 并且在匙孔底部可能诱发钉尖缺陷的产生. 此外, 研究还发现, 随着匙孔深度增加, 能量波动、金属蒸汽反冲压力与表面张力竞争作用逐渐加剧, 促使匙孔钻取过程具有周期性.

关键词: 7N01 铝合金; 电子束定点焊; 输运现象; 金属蒸汽反冲压力; 钉尖缺陷

中图分类号: TG456.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2021)02-0093-05

Prediction of transport phenomena of 7N01 aluminum alloy electron beam spot welding pool

LIU Chengcai¹, LIU Chen², ZHU Zhi¹, GUO Xuming¹, ZHAO Ye¹, FAN Xiaolin¹, GUO Fangxian¹, LÜ Huayi¹

(1. School of Materials Science and Engineering, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110135, China;

2. School of Space Environment and Physical Science, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: To effectively improve weld forming and inhibit forming defects, taking 12 mm-thick 7N01 aluminum alloy as research object, the keyhole drilling process as well as the heat and fluid transport phenomena of electron beam spot welding (EBSW) were analyzed by Ansys Fluent and validated by experiments. In order to reflect the beam energy density distribution, a self-adaptive heat source model considering the characteristics of the active zone of beam was established, and VOF algorithm was used to track the gas-liquid interface in real time. Numerical analysis results show that the beam energy density distribution and the coupling between the beam and the transient pool/keyhole were the key factors to determine weld forming. When the beam was in lower focus mode, the unique energy distribution and the induced plasma insulation, metal vapor recoil pressure, Marangoni flow, and upward transportations of thermal buoyancy (maximum flow rate at about 15 m/s) led to the weld reinforcement and the extension of nailhead area. The beam energy density in the depth direction increased first and then decreased significantly, which resulted in similar evolutions for the welding in depth and width directions and might induce the spiking defects adjacent to the keyhole bottom. In addition, it was found that with the increase in keyhole depth, the energy fluctuation as well as the competition between recoil pressure and surface tension gradually increased, which promoted the periodicity of keyhole drilling process.

Keywords: 7N01 aluminum alloy; electron beam spot welding; transport phenomena; metal vapor recoil pressure; spiking defect

7N01 铝合金 Al-Zn-Mg 系可热处理强化典型铝合金, 具有较高比强度、比刚度且耐腐蚀, 在轨道车辆及航空航天领域发挥着积极作用^[1-2]. 为实现中大厚度铝合金板材高品质可靠连接, 电子束焊 (EBW) 经常被采用. 但由于含有较多 Zn 和 Mg 等低沸点强化相形

成元素, 其焊接性并不良好, 孔洞类缺陷、咬边、背面驼峰等特种及常规成形缺陷问题依然显著^[3-4].

为解决上述问题, 必须对其熔池热流传输行为有较深刻理解. 目前为止, 有关该方面的研究已经经历从搭建实验平台观测过渡到基于数值仿真平台研究阶段^[5-7]. 其中, Rai 等^[6]在假定固定匙孔形状前提下比较分析了准稳态 EBW 及激光焊熔池 Marangoni 剪切力等流体驱动力分布特点; 罗怡等^[7]通过建立热流耦合模型较好地对不同重力条件下镁

收稿日期: 2020-06-30

作者简介: 刘成财 (1983—), 男, 博士, 讲师

通信作者: 刘成财, liuchengcai1983@163.com;

刘 琛, liuchen2016@hit.edu.cn

合金 EBW 冶金气孔的成因进行预测;此外,哈尔滨工业大学陈国庆教授^[8]及房玉超等^[9]分别基于类似数值模型对不同类型铝合金 EBW 环缝及直缝开展了熔池流体动力学行为研究. 尽管如此,目前鲜有关于 7N01 铝合金 EBW 熔池及匙孔动力学方面的系统研究报道.

为此,本文基于 Fluent 软件、VOF 追踪算法及自适应热源建立三维瞬态模型,数值探究 12 mm 厚 7N01 铝合金电子束定点焊(EBSW)熔池热场、流场及匙孔钻取等现象和相关机制. 对于优化工艺参数、改善中厚铝合金板焊缝成形、抑制孔洞类缺陷具有一定的指导意义.

1 数学建模细节

1.1 物理模型提出及假设条件

EBW 熔池输运行行为是焊缝成形及孔洞类缺陷形成的内因,直接受束流三维空间能量密度分布及与熔池/匙孔交互耦合作用影响. 为便于研究分析,选取下聚焦模式束流,即焦点位于工件表面以下某一深度,且在它活性区范围内变化率很小,超过这一范围变化率增加较为显著. 鉴于对束流空间轮廓测量的难度,它的能量密度分布由焊缝截面形貌尺寸最终确定. 图 1 给出了本文提出的 EBSW 物理模型.

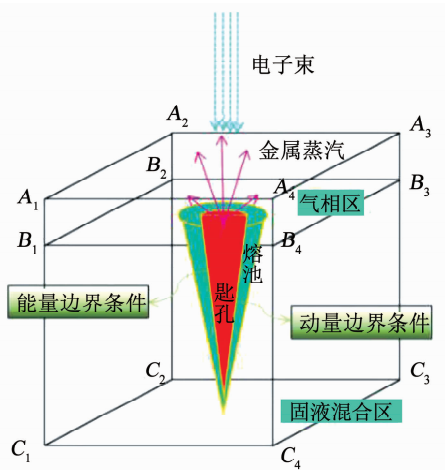


图 1 铝合金 EBSW 物理模型及计算域示意

Fig. 1 Schematic diagram of physical model and computational domain for aluminum alloy EBSW process

由于高能量密度束流会诱发匙孔,在金属蒸汽反冲压力、流体静压力、热浮力及表面张力的共同作用下完成钻孔过程. 需特别说明的一点,7N01 铝合金焊接蒸发激烈程度可能比不含低沸点合金元素的铝合金更高,匙孔波动可能更加频繁,这是由于其更低的表面张力以及更高的热膨胀系数. 鉴于整个匙孔钻取过程即从初始阶段一直到准稳态阶段强烈的不稳定性,为获取关键因素的影响规律,本文做出如

下假设:1) 母材初始温度 293 K,初始环境压力(即焊机真空室工作压力)为 5×10^{-2} Pa;2) 熔池流体流动假定为层流,其密度变化遵循 Boussinesq 假设;3) 不考虑金属蒸汽对匙孔壁的摩擦力及粘性耗损;4) 除密度外铝合金的材料物性参数为温度的函数.

1.2 控制方程组

在整个计算过程中,控制整个系统传热、流动及匙孔演变控制方程,主要包括连续性方程、能量守恒方程、动量守恒方程以及追踪气液界面变化的 VOF 方程等. 其中,自适应热源模型以及研究过程中涉及到的多种流体驱动力分别以源项形式在能量方程及动量方程中进行加载. 为节省篇幅,这里仅提供金属蒸汽反冲压力及表面张力的部分具体表达式,其他相关源项可参考作者早期发表的学术论文^[10].

金属蒸汽反冲力 P_r 采用 Semak 等^[11]提出的反冲压力模型来进行考虑,与表面张力 γ 公式分别表示为

$$P_r = 0.54P_0 \exp\left(\frac{\Delta H_{\text{evap}}}{RTT_b} \frac{T - T_b}{T - T_m}\right), \quad (1)$$

$$\gamma(T) = \gamma_m + \frac{d\gamma}{dT}(T - T_m). \quad (2)$$

式中: P_0 为标准环境压力, ΔH_{evap} 为蒸发潜热, T_b 为材料局部沸点温度, R 为气体常数, γ_m 为对应液相线温度 T_m (919 K) 时的表面张力, $d\gamma/dT$ 为表面张力温度梯度系数.

1.3 自适应热源模型

为精确数值仿真 EBW 匙孔效应及束流深穿作用,必须合理考虑电子束流空间能量密度分布. 以下聚焦模式为例,当初始束流刚轰击接触母材表面时,在束流到达焦点位置之前,随着匙孔深度不断增加,热流密度不断增加,诱发的金属蒸汽喷射及等离子体作用不断增强,靠近匙孔壁面的低速部分不断对匙孔开口部位进行预热,并导致钉头区域的出现. 随着匙孔深度的进一步增加,钉身部位不断加深直至达到准稳定状态. 需要强调的是,为了更加精确地反映电子束束径轮廓的空间变化,即考虑到活性区的影响,本文建立的自适应热源模型在工件深度方向上由两段复合而成,具体的表达式为

$$q(x, y, z) = \begin{cases} \frac{3\eta Q}{\pi r_{h1}^2} \exp\left(-3 \frac{x^2 + y^2}{r_{h1}^2}\right), & z_0 \leq z < z_f; \\ \frac{3\eta Q}{\pi r_{h2}^2} \exp\left(-3 \frac{x^2 + y^2}{r_{h2}^2}\right), & z_f \leq z \leq z_{h23}; \\ \frac{3\eta Q}{\pi r_{h3}^2} \exp\left(-3 \frac{x^2 + y^2}{r_{h3}^2}\right), & z > z_{h23}. \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} r_{h1} = r_f + a_1(z - z_f)^2, \\ r_{h2} = r_f + a_2(z - z_f)^2, \\ r_{h3} = r_{h23} + a_3(z - z_{h23})^2. \end{cases} \quad (4)$$

式中: r_{h1} 、 r_{h2} 、 r_{h3} 、 r_{h23} 分别为焊件上表面至焦点位置的任意半径(处于活性区上极限范围内)、焦点位置

以下至活性区下极限位置的任意半径、活性区下极限以下部位的任意半径; r_{h23} 为活性区下极限半径; a_1 、 a_2 、 a_3 分别为活性区上极限范围内束径变化率、活性区下极限范围内束径变化率、非活性区范围的束径变化率;分别为焦点半径位置及活性区下极限半径位置对应的 z 坐标;其余常规参数定义参见文献[10],这里不再重述。

1.4 边界条件及材料物性参数

图1也给出了建立的数学模型的初始条件及边界条件.其中,母材初始环境温度293 K,分别作用在侧壁面 $B_1B_2C_2C_1$ 、 $B_2B_3C_3C_2$ 、 $B_3B_4C_4C_3$ 、 $B_1B_4C_4C_1$ 和底面 $C_1C_2C_3C_4$ 上.环境压力设为 5×10^{-2} Pa.作用在匙孔壁面上的能量边界条件主要为热源源项及

蒸发和辐射散热损失,动量源项主要考虑金属蒸汽反冲压力、表面张力、流体静压力及热浮力等,具体表达式参见文献[9],这里不再重述。

本文采用的焊接规范参数包括加速电压为60 kV,电子束流为60 mA,定点焊接.为了更真实反映熔池流体输运行为,本文基于ICEM前处理软件建立了完整的EBSW有限体积模型,尺寸为16 mm×16 mm×14 mm,最密集区域为焊缝区,最小单元边长0.25 mm,焊缝区之外为热影响区及母材区域,采用渐变网格,模型单元总数110 352,节点总数为117 450.计算所需的7N01铝合金的材料热物理性能参数通过材料性能模拟软件JMatPro获得,相关参数见表1。

表1 7N01 铝合金热物理性能参数
Tab.1 Thermophysical properties of 7N01 aluminum alloy

密度 ρ / ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	固相热导率 k_s / ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	液相热导率 k_l / ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	固相比热容 c_s / ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	液相比热容 c_l / ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	熔化潜热 L_m / ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$)	蒸发潜热 L_{evap} / ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$)	表面张力系数 ($\text{d}\sigma/\text{d}T$) / ($\text{N} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	热膨胀系数 β / (K^{-1})
2 450	172	89	1 967	1 142	5.02×10^5	4.95×10^6	1.913×10^{-4}	6.85×10^{-5}

2 结果分析与讨论

2.1 数值模型验证

为了验证本文提出的数学模型及数值模拟结果的合理性与可靠性,图2给出了计算得到的焊缝宏观形貌与真实焊缝宏观形貌的对比图以及不同深度方向上的微观组织分布.由图可知,二者轮廓形貌比较吻合.此外,由于此时焊缝处于临界穿透状态,计算熔深与真实熔深相同.为了比较尺寸相对误差,这里计算了二者焊缝半熔宽及钉尖部位半宽的相对误差,分别为8.23%和7.66%.同时,由图可见,焊缝钉尖部位出现宏观钉尖缺陷,在中上部区域出现显微气孔缺陷.前者产生的具体原因已在文献[10]中进行阐述,后者产生原因则是由于该系列铝合金中含有较多Zn、Mg元素汽化所致^[12]。

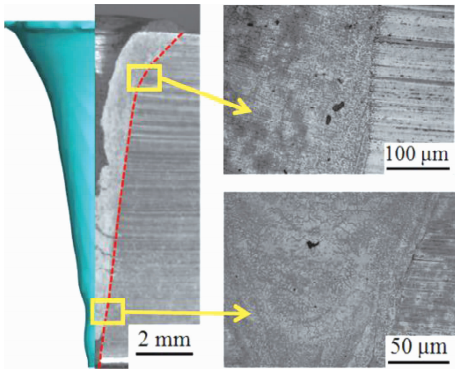


图2 EBSW 焊缝宏观形貌及显微组织分布
Fig.2 Weld bead morphology and microstructure distribution of EBSW

2.2 熔池温度场及流场演变分析

图3所示为在定点电子束轰击作用下,母材上表面从开始形成熔池、长大至准稳态阶段熔池瞬态温度场和流场的演变历程.由图3(a)可见,束流作用初始阶段,由于时间极为短暂,此时母材仅发生熔化而未汽化,仅在表面张力和热浮力作用下完成熔池中心区域液态金属向外的传热传质,此时熔池头部尺寸微小,流体输运速度也较小,维持在1.75 m/s左右.随着束流持续加热,在 $t = 2.5$ ms时发生汽化(图3(b)),由图可见此时产生少量的汽化飞溅物;与此同时,在金属蒸汽的反冲压力和Marangoni流的共同作用下,匙孔下方较深位置的液态金属不断被输运至母材表面外围形成余高金属,此时流体输运速度也有所增加,维持在2.35 m/s左右;随着匙孔持续钻取,熔池钉头区域不断长大(图3(c)~(f));当 $t = 50$ ms时(图3(g)),熔池钉头区域面积不再发生较明显长大,此后熔池逐渐进入准稳定状态,流体最大输运速度维持在15 m/s左右,该数值与文献[8]的预测结果比较一致,直至达到最大焊接时间(图3(h)).需要注意的一点是,当匙孔处于临界穿透状态时(图3(h)),由于束流与熔池耦合作用减弱,熔池钉头区域温度有较为明显的下降。

图4所示为上述对应时刻下焊缝横截面,即母材深度方向上的热流传输行为计算结果.由图可知,当达到汽化温度以后(图4(b)),在到达焦点位置之前匙孔钻取速度加快,随后钻孔速度不断衰减,直至达到准稳态匙孔深度(图4(c)~(h)).由图4(g)可见,当匙孔深

度增加至一定程度时,在靠近匙孔开口区域附近会出现较大面积的红色高温区域.这主要是由于束流能量

密度衰减诱导的堵孔现象.此时,钉尖部位开始出现冷壁,最终诱导钉尖缺陷的出现,如图 2 所示^[10].

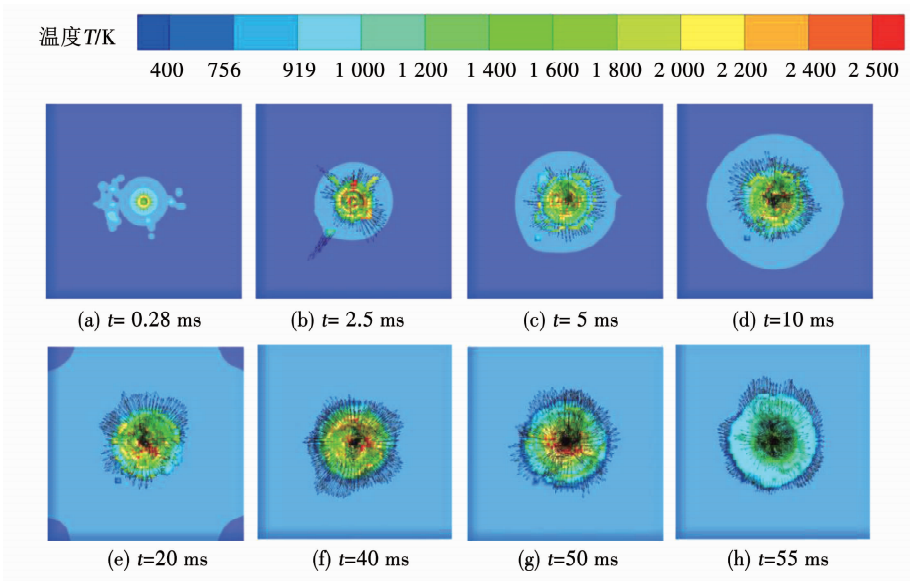


图 3 EBSW 匙孔钻取过程中母材上表面的热流耦合演变

Fig. 3 Evolution of thermal-fluid coupling at the upper surface of base metal during the drilling process of EBSW

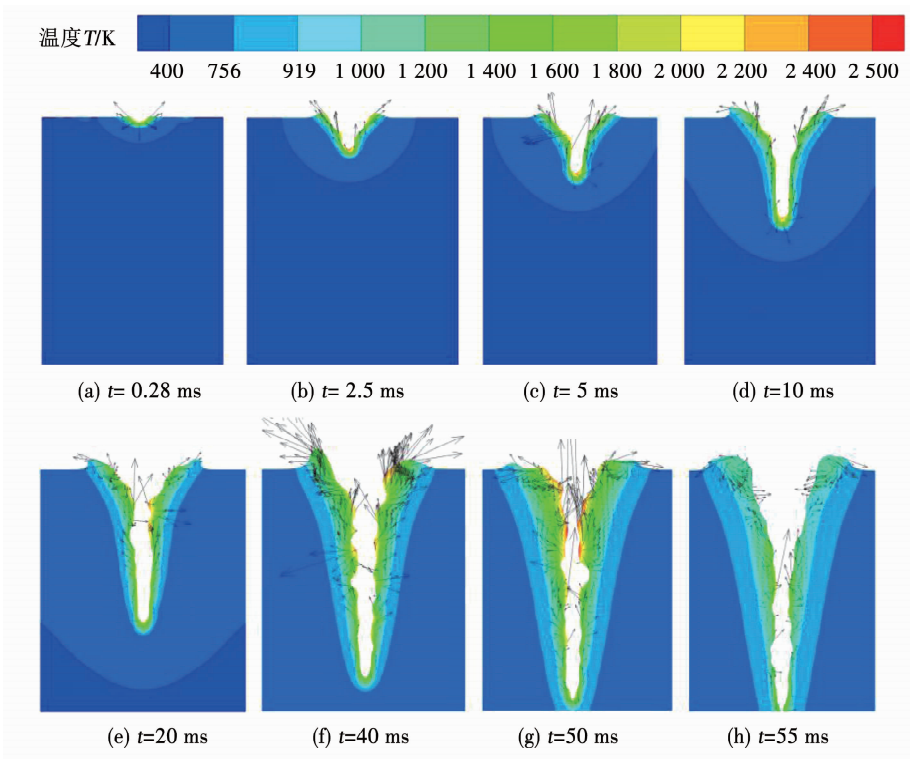


图 4 EBSW 匙孔钻取过程中母材横截面的热流耦合演变

Fig. 4 Evolution of thermal-fluid coupling at the cross-section of base metal during the drilling process of EBSW

2.3 匙孔长大与稳定过程分析

为节省篇幅,图 5 仅给出比较典型阶段的匙孔形貌演变数值结果.由图可见,在下聚焦模式下,匙孔具有明显的钉头和钉身轮廓.在选取的 4 个时刻下,我们可以清晰地观察到,金属蒸汽的喷射过程具有周期性,即它们的速度矢量幅值呈现周期性变化,

如图 5(a) ~ (d) 所示^[13].喷射之后由于金属蒸汽带走大量能量,匙孔底部壁温有所下降,需要一定时间回升才可实现再次蒸汽喷射过程,如图 4 对应时刻所示.在经历一小段时间吸收束流的能量,则会再次实现喷射过程.此外,在匙孔钉身侧壁除了可见由金属蒸汽喷射与 Marangoni 流共同诱导的向上流态

外,还可见由表面张力与金属蒸汽反冲压力竞争作用引起的波动凸起^[8].

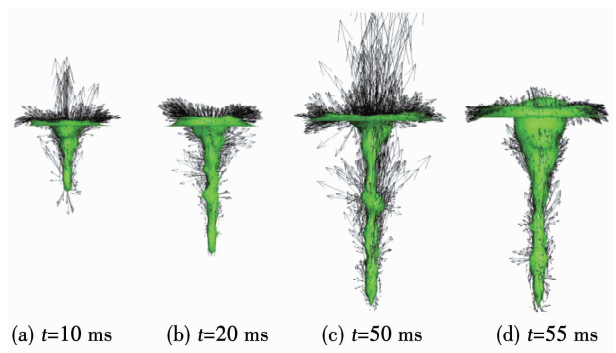


图5 EBSW 匙孔瞬态钻取过程计算结果

Fig.5 Calculation results of transient keyhole drilling process

图6 给出匙孔钻取阶段熔池熔深与熔宽随时间的演变趋势. 由图可见,随着时间的增加,起始阶段二者增加幅度都比较快,随后逐渐变缓,最后趋于稳定. 不同点在于,熔宽达到准稳定的时刻($t = 40\text{ ms}$ 左右)要早于熔深达到准稳定的时刻($t = 50\text{ ms}$ 左右).

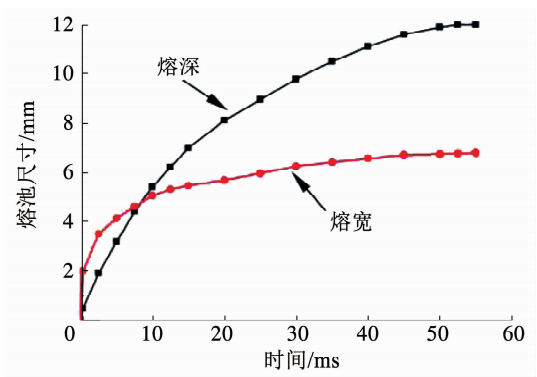


图6 熔池几何尺寸随时间的演变

Fig.6 Evolution of welding pool geometry over time

3 结 论

- 1) 通过7N01 铝合金下聚焦模式电子束定点焊真实焊缝形貌及组织分布验证了本文提出的热源模型及数学模型的合理性与可靠性,其焊缝半熔宽及钉尖部位半宽的相对误差分别为8.23%和7.66%.
- 2) 焊缝余高金属及钉头成形主要得益于匙孔钻取过程中蒸汽反冲压力、Marangoni 剪切流的向上热流输运以及高温等离子预热的共同作用.
- 3) 随着匙孔钻取深度增加,束流能量密度先增加后急剧减小,从而导致熔深熔宽的类似演变趋势并增加钉尖缺陷形成倾向.
- 4) 匙孔钻取过程具有周期性,它是匙孔壁上能量波动及蒸汽反冲压力与表面张力竞争作用的结果.

参考文献

[1] 梁志敏, 李亚博, 汪殿龙, 等. 7N01 铝合金脉冲 MIG 焊接接头组织与力学性能分析[J]. 电焊机, 2015, 42(2): 35
LIANG Zhimin, LI Yabo, WANG Dianlong, et al. Analysis of microstructure and mechanical properties of 7N01 aluminum alloy welding joints by pulsed MIG welding [J]. Electric Welding Machine, 2015, 42(2): 35. DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2015.02.08

[2] 王启明, 乔俊楠, 邹江林, 等. A7N01 铝合金光纤激光变极性 TIG 复合填丝焊接工艺研究[J]. 中国激光, 2016, 43(6): 602004.
WANG Qiming, QIAO Junnan, ZOU Jianglin, et al. Fiber laser-variable polarity TIG hybrid welding of A7N01 aluminum alloy with filler wire[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(6): 602004. DOI: 10.3788/CJL201643.0602004

[3] 金星烨, 宋广浩, 郑卫刚. 铝合金 A7N01 的激光-电弧复合焊接性能研究[J]. 热加工工艺, 2015, 44(3): 51
JIN Xingye, SONG Guanghao, ZHENG Weigang. Laser-arc hybrid welding properties of aluminum alloy A7N01 [J]. Hot Working Technology, 2015, 44(3): 51. DOI: 10.14158/j.cnki.1001-3814.2015.03.015

[4] 朱宗涛, 祝全超, 李远星, 等. 超声振动辅助 A7N01 铝合金激光-MIG 复合焊接组织及力学性能[J]. 焊接学报, 2016, 37(6): 80
ZHU Zongtao, ZHU Quanchao, LI Yuanxing, et al. Microstructure and mechanical property of A7N01 aluminum alloy welded by laser-MIG hybrid method with assisting ultrasonic vibration [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2016, 37(6): 80

[5] TONG H, GIEDT W H. A dynamic interpretation of electron beam welding[J]. Welding Journal, 1970, 49(6): 259

[6] RAI R, BURGARDT P, MILEWSKI J O, et al. Heat transfer and fluid flow during electron beam welding of 21Cr-6Ni-9Mn steel and Ti-6Al-4V alloy[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2009, 42(2): 5. DOI: 10.1088/0022-3727/42/2/025503

[7] LUO Yi, WU Wei, WU Guangfeng, et al. Influence of gravity state upon bubble flow in the deep penetration molten pool of vacuum electron beam welding [J]. Vacuum, 2013, 89: 26. DOI: 10.1016/j.vacuum.2012.08.008

[8] CHEN Guoqing, LIU Junpeng, SHU Xi, et al. Numerical simulation of keyhole morphology and molten pool flow behavior in aluminum alloy electron-beam welding[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 138: 879. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.04.112

[9] YANG Ziyou, FANG Yuchao, HE Jingshan. Numerical simulation of heat transfer and fluid flow during vacuum electron beam welding of 2219 aluminium girth joints[J]. Vacuum, 2020, 175: 109. DOI: 10.1016/j.vacuum.2020.109256

[10] LIU Chengcai, HE Jingshan. Numerical analysis of fluid transport phenomena and spiking defect formation during vacuum electron beam welding of 2219 aluminum alloy plate[J]. Vacuum, 2016, 132: 73. DOI: 10.1016/j.vacuum.2016.07.033

[11] SEMAK V, MATSUNAWA A. The role of recoil pressure in energy balance during laser materials processing[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1997, 30(18): 2541. DOI: 10.1088/0022-3727/30/18/008

[12] MIAO Haibin, YU Gang, HE Xiuli, et al. Comparative study of hybrid laser-MIG leading configuration on porosity in aluminum alloy bead-on-plate welding [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 91: 2681. DOI: 10.1007/s00170-016-9917-1

[13] CHO J H, FARSON D F, MILEWSKI J O. Weld pool flows during initial stages of keyhole formation in laser welding[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2009, 42: 1. DOI: 10.1088/0022-3727/42/17/175502