

电子束扫描横焊薄铌板的熔池动力学行为

房玉超, 杨子酉, 丁睿, 董书雷, 何景山

(哈尔滨工业大学, 先进焊接与连接国家重点实验室, 哈尔滨, 150001)

摘要: 在电子束焊接过程中, 金属液体蒸发的反冲压力、表面张力、重力等驱动力共同作用于熔池, 对焊缝成形有显著影响。在扫描横焊的情况下, 电子束作用范围的扫描摆动和重力方向的旋转使熔池的动力学行为变得更复杂。采用试验和数值计算方法对电子束扫描横焊薄铌板的熔池形态和凝固后熔合区形貌进行研究, 数值模拟得到的熔池形态和熔合区形状与试验结果吻合。熔池流场分析结果表明, 半熔透熔池的驱动力主要为液态金属蒸发引发的反冲压力; 全熔透熔池的上表面 Marangoni 流动占主导, 表面张力与反冲压力共同作为熔池流动的驱动力; 重力与焊接扫描共同作用使得熔池两侧的质量分布和流场分布不对称, 造成了焊缝两侧熔合线的不对称。

关键词: 电子束扫描焊; 横焊; 反冲压力; 熔池动力学; 铌

中图分类号: TG 456.3 文献标识码: A doi: 10.12073/j.hjxb.20191122002

0 序言

作为一种高熔点金属和稀有金属材料, 铌在钢铁工业、航空航天、超导材料产业等先进材料应用领域占有重要的地位。一些含铌化合物、铌合金及纯铌具有较高的超导转变温度, 因此被广泛应用于多种工业超导器件的制造, 例如超导发电机、加速器磁体、超导储能装置及磁共振成像设备等。体材料纯铌由于同时具备高临界温度、高临界磁场和低表面电阻的特点, 而成为加速器射频超导腔的首选材料^[1-2]。

加速器超导腔对其表面形态和性能的要求较高, 焊缝质量直接影响着整个器件的性能和稳定性, 这使高纯铌的焊接成为了一个技术难点。Kuchnir 等人^[3]将高纯铌管穿过不锈钢板, 并采用 TIG 焊方法进行异种材料焊接, 结果表明纯铌在 400 ℃以上会迅速吸收氧气, 从而丧失其在超导腔中至关重要的纯度特性。在高真空下进行的电子束焊接, 可有效地避免纯铌在焊接过程中的纯度降低。张弘宇等人^[4]分别进行了纯铌板的电子束平焊的工艺研究, 得到了可行的电子束焊接参数。

焊接熔池的流动行为对焊缝成形有着很大的影响, 尤其是对高能束焊接等熔池流动较为剧烈的焊接方式, 所以电子束焊接的熔池动力学研究有着

重要意义。刘成财^[5-6]、罗怡^[7]、房玉超^[8]等人分别进行了铝合金、镁合金等材料的电子束焊接熔池形态的研究, 分析了熔池的传质和匙孔演变过程。Yang 等人^[9]对铝合金环焊缝的熔池动力学进行了研究, 并考虑了重力方向改变对熔池流动的影响。房玉超等人^[10]对纯铌板的电子束横焊工艺进行了研究, 并对热源后方的熔池形态进行了数学建模和计算。

针对电子束扫描焊的研究发现^[11-13], 电子束的扫描摆动可以显著改变熔池存在形态和凝固特性, 并影响焊接成形和焊缝的微观组织形貌。以下两个原因使得电子束扫描横焊的熔池的流动更为复杂: 重力方向的改变打破了熔池两侧的受力对称性; 扫描电子束热源以较快的速度移动且方向时刻改变。

采用试验和数值计算方法对电子束扫描横焊薄铌板的熔池形态和凝固后熔合区形貌进行观察和研究。对熔池内金属的流动进行了分析, 以研究焊缝在横焊条件下的熔池驱动力作用规律和熔池动力学特性。

1 试验和数学模型

1.1 焊接试验

模拟采用了 3 mm 厚的纯铌板和六种不同的焊接参数, 并进行了试验验证, 焊接参数见表 1。电子束的束斑直径为 0.5 mm, 加速电压为 60 kV, 并调

节不同的焊接电流和焊接速度。电子束扫描采用与焊接方向垂直线扫描方式, 电子束中心点的实际移动路径为一条正弦曲线, 扫描宽度为 1.5 mm, 扫描频率 40 Hz, 电子束工作距离为 200 mm。

表 1 试验和模拟中采用的焊接参数

Table 1 Welding parameters used in the experiment and the simulation

参数	加速电压 U_A /kV	束流 I_b /mA	焊接速度 v /(mm·s ⁻¹)
A	60	30	8
B	60	40	8
C	60	50	8
D	60	45	6
E	60	55	6
F	60	60	10

1.2 物理模型

电子束横焊模拟计算区域的模型示意如图 1 所示, 计算采用的网格尺寸为 0.2 mm, 使用的材料物理性质参数^[14-16]见表 2。

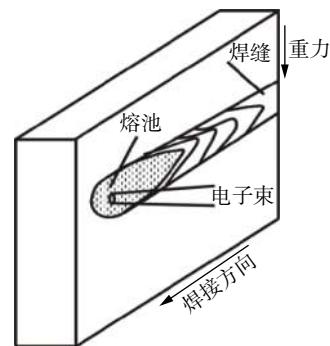


图 1 电子束横焊物理模型示意图

Fig. 1 Schematic sketch of the physical model

表 2 模拟中使用的纯铌材料物理性能参数

Table 2 Material properties used in the simulations (pure niobium)

原子序数 Z	密度 ρ_f /(kg·m ⁻³)	热导率 κ /(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	比热容 C_p /(J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	熔化潜热 ΔH_f /(kJ·kg ⁻¹)	蒸发潜热 ΔH_v /(kJ·kg ⁻¹)	熔点 T_s /K	沸点 T_b /K
41	7 690	54.1	268	284	7 341	2 750	5 017

1.3 控制方程

在模拟过程中, 求解 Navier-Stokes, 动量守恒方程、能量守恒方程及 VOF 等方程, 熔池内的液态金属被假设为牛顿不可压缩流体。

连续性方程

$$\nabla \cdot \vec{U} = 0 \quad (1)$$

式中: \vec{U} 为三维速度矢量。

动量守恒方程

$$\rho \frac{\partial \vec{U}}{\partial t} + \rho (\vec{U} \cdot \nabla) \vec{U} = -\nabla p + \nabla^2 \vec{U} + f_b \quad (2)$$

式中: ρ 为液体密度; p 为压强; f_b 为体积力, 其中包含重力。

能量守恒方程

$$\rho \frac{\partial H}{\partial t} + \rho (\vec{U} \cdot \nabla) H = \nabla \cdot (\kappa \nabla T) \quad (3)$$

式中: κ 为材料的导热系数; H 为焓值, 可由下列方程得出

$$H = C_p T + \beta \Delta H_f \quad (4)$$

式中: C_p 为材料的比热容; ΔH_f 为熔化潜热; β 由下面的公式求出

$$\beta = \begin{cases} 0, & T < T_s \\ \frac{T - T_s}{T_1 - T_s}, & T_s < T < T_1 \\ 1, & T > T_1 \end{cases} \quad (5)$$

VOF 方程

$$\frac{\partial F}{\partial t} + (\vec{U} \cdot \nabla) F = 0 \quad (6)$$

式中: F 为三维体单元中的液体体积分数。

1.4 边界条件

1.4.1 电子束热效应模型

模拟中的热流密度边界条件, 即热源模型, 采用电子束能量吸收和背散射模型进行计算。计算中考虑了电子与材料表面的物理作用实质, 即电子的移动、撞击表面、能量吸收与背散射作用, 同时实现热源模型与熔池自由界面耦合, 满足进行电子束焊熔池动力学研究的要求。

电子束的总能量被离散化分割成一定数量的能量单元, 以模拟电子的随机性。电子在束流聚焦面上的空间位置 (x_i, y_i) 分布服从二维高斯分布, 可由式(7)给出, 即

$$\begin{cases} x_i \sim N(0, \sigma_\phi^2) \\ y_i \sim N(0, \sigma_\phi^2) \end{cases} \quad (7)$$

式中: σ_ϕ 为总体标准差, 是与电子束束斑直径 ϕ 相关

的常数。

由于电子束的扫描作用, 电子束的位置随时间周期性变化。对于任意的能量单元 i , 其三维初始坐标 m_i 及初始移动方向 r_i 的计算公式分别为

$$m_i(x, y, z) = (v \cdot t + x_i, \frac{W}{2} \sin(2\pi f t) + y_i, z_0) \quad (8)$$

$$r_i(\mu, \nu, \omega) = m_i(x, y, z) - (v \cdot t, 0, z_0 + h) \quad (9)$$

式中: v 为焊接速度; t 为当前焊接经过时间; W 和 f 分别为扫描宽度与扫描频率; z_0 为材料上表面的 z_0 坐标; h 为电子束的工作距离。

确定了初始位置与移动方向后, 通过对能量单元的运动路径跟踪, 同时使用 VOF 法进行熔池的自由界面追踪, 可以求得电子能量的撞击位置 c_i 的坐标。最后再进行能量吸收与背散射率的计算, 得出总体的电子束能量吸收分布结果。

每个能量单元的初始能量由设定的电子束束流参数决定, 即

$$E_u = \frac{1}{n} U_A \cdot I_b \cdot \Delta t \quad (10)$$

式中: n 为离散化分割的总数; Δt 为数值计算中的时间步长。

对于计算域中的任意封闭体积域 D , 其单位体积内的电子束能量吸收率可由如下公式给出, 即

$$J_{ab} = \frac{\sum_{i=1}^n \theta_i E_u (1 - R_a k_a)}{V_D \Delta t} \quad (11)$$

$$\theta_i = \begin{cases} 0, & c_i \notin D \\ 1, & c_i \in D \end{cases} \quad (12)$$

式中: V_D 为体积域的体积, 当计算一个网格内的能量吸收率时, 其取值为网格体积; θ_i 为判定撞击点是否在该体积域内的因数; R_a 和 k_a 为与电子束背散射相关的比例系数。电子背散射率 R_a 为背散射随机事件发生概率, 与电子的加速电压大小及入射角有关。采用 Monte-Carlo 方法^[17] 计算得出了携带 60 keV 能量的电子在纯铌靶材上不同入射角度的背散射率, 结果如图 2 所示。如果电子发生背散射, 部分电子能量被吸收, 而背散射电子携带的比例为 k_a 的能量未被材料表面吸收, 比例系数 k_a 可由公式 (13) 和公式 (14) 给出^[18], 即

$$\frac{E_B}{E_0} = 0.613 + 0.003Z - 1.27 \times 10^{-5}Z^2 \quad (13)$$

$$k_a = \frac{E_B}{E_0} + (1 - \frac{E_B}{E_0}) \cdot \sin \alpha \quad (14)$$

式中: α 为电子入射角。

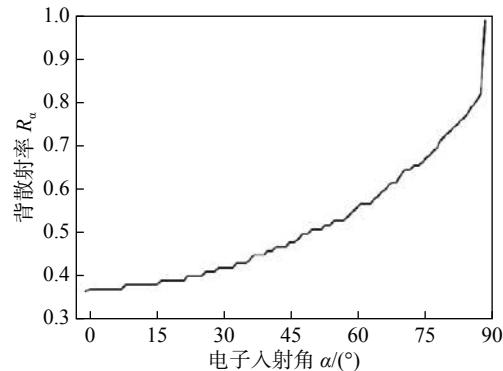


图 2 不同入射角的电子背散射率

Fig. 2 Back scattering rate of electron in different tilted angles, calculated with 60 kV electron beam on niobium substrate plate

1.4.2 蒸发

熔池表面在 T_0 温度下的单位面积蒸发率计算公式^[19-20] 为

$$j_v = (1 - \tau) P_s (m/2\pi k T_0)^{1/2} \quad (15)$$

式中: τ 为常数, 取值 $\tau = 0.2$; m 为粒子质量, 饱和蒸汽压 P_s 的计算采用 Batanov 等人^[21] 提出的公式, 即

$$P_s = P_0 \exp[(\lambda_e/k_B T_e)(1 - T_e/T_0)] \quad (16)$$

式中: P_0 和 T_e 分别为环境气压及该气压下的沸点; λ_e 为单位粒子的蒸发潜热; k_B 为玻尔兹曼常数。

1.4.3 反冲压力

由于 Knudsen 层的存在, 金属的蒸发引起的反冲压力计算变得较为复杂, 采用 Knight^[22] 建立的模型来近似计算反冲压力, 即

$$p_r = A \cdot P_s \quad (17)$$

式中: A 为常数, 取决于蒸发发生时的环境压力, 在真空环境下取 $A = 0.55$ 。

1.4.4 辐射传热

在真空环境下, 由对流造成的材料表面传热可忽略, 仅考虑辐射传热的能量边界条件

$$k \frac{\partial T}{\partial \vec{n}} = -\varepsilon_r \sigma (T^4 - T_\infty^4) \quad (18)$$

式中: T 和 T_∞ 分别为壁面温度和室温; ε_r 为材料表面的比辐射系数; σ 为 Stefan-Boltzmann 常数。

2 结果和讨论

2.1 熔池形态

在电子束焊接开始时, 电子束纵向穿入材料的表面, 并进行横向移动。在熔池形成之后, 由金属蒸

发引起的反冲压力作用在熔池表面而形成匙孔。部分金属受到挤压作用被向外排出,从而使熔池不断加深,直到达到最大穿透深度或形成全熔透。在各种驱动力作用下,熔池前部金属流动至熔池后部,并冷却凝固形成焊缝。在焊接结束时,一般采取逐渐减小焊接电流等方法,使熔池金属在凝固前填平

由于反冲压力造成的凹坑。

为了研究焊接过程中的熔池形态,在焊接结束时将焊接电流突然减小到0 mA,使熔池在填平凹坑前凝固。使用这种方法,不同焊接参数下的熔池在高温下的形态大部分得到保留,并使用三维光学显微镜进行形貌分析,结果如图3所示。

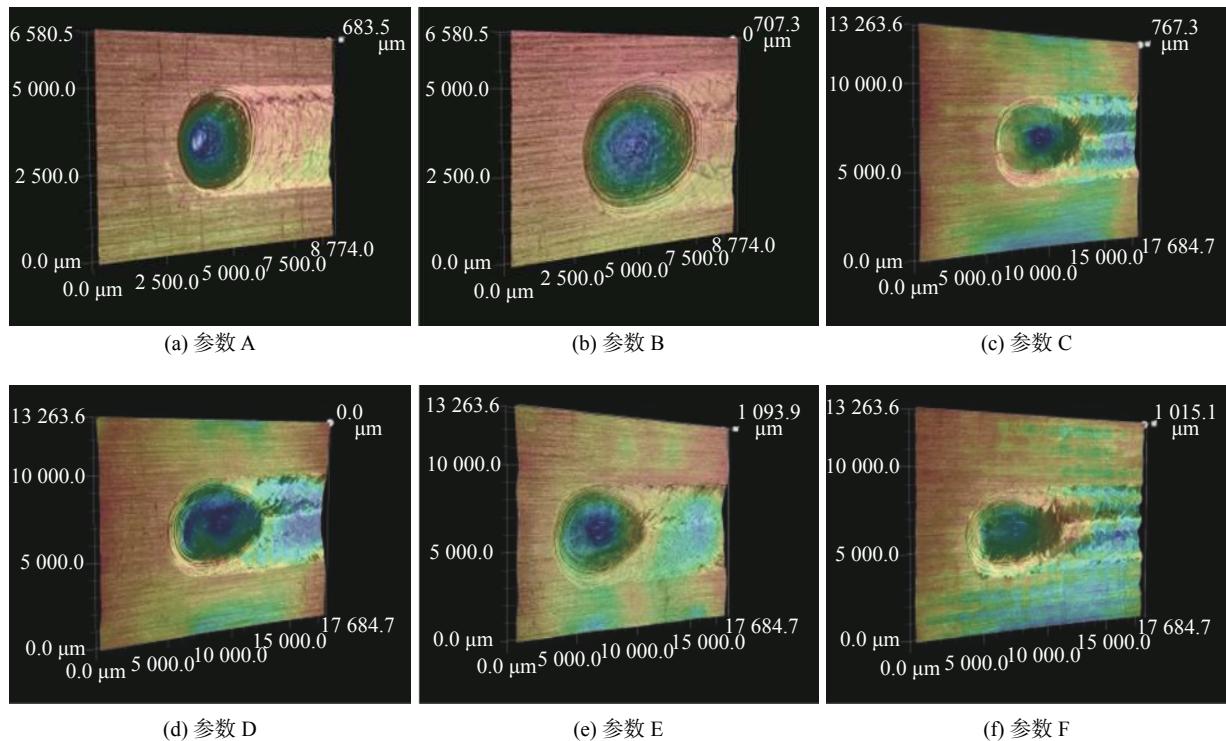


图3 熔池凹坑的正面三维光学显微云图

Fig. 3 3D-optical microscopic observation of frozen molten pool shape on the face of weld. (a) parameter A; (b) parameter B; (c) parameter C; (d) parameter D; (e) parameter E; (f) parameter F

对应的数值模拟的结果中也提取到熔池三维瞬态的熔池表面形态及温度场分布,如图4所示。对于焊接参数A和焊接参数B,由于焊接电流较小(低于40 mA),线能量也较低(低于300 J/mm),熔池的尺寸较小,熔透形式为半熔透;当焊接电流增大到45 mA以上、线能量增大到360 J/mm以上时,熔池的尺寸显著增大,熔透形式为全熔透。与半熔透焊相比,全熔透焊的熔池不仅在尺寸上较大,同时也具有比半熔透焊熔池更大的长宽比。熔池长宽比的差异表明全熔透与半熔透焊缝在熔池流动形式上可能存在根本差异。参数F具有最大的焊接速度(10 mm/s),而焊接熔池的长宽比较大,在熔池后部形成了水滴状拖尾,模拟得到的焊接熔池形态有相同的规律。

在六种焊接参数下的模拟结果预测的熔合线在图5中列出,并与试验得到的结果进行了对

比。从图5中可以看出,焊接线能量显著影响了熔合区的面积。在图5a和图5b中,在两个线能量较低的焊接参数下,熔深分别达到1.5和2.5 mm,为半熔透焊接,模拟结果与试验结果吻合较好;采用图5c~5f中的参数得到的模拟结果与试验结果都是全熔透形式,模拟得到的结果在熔深、正面熔宽、背面熔宽及熔合线角度等方面较准确地再现了试验结果。

模拟结果较难预测全熔透焊的背面凸起和咬边缺陷。模拟结果还显示,全熔透焊缝的熔池上下两侧熔合线具有不对称性,可能由于重力和电子束的扫描摆动造成了熔池上下两侧的不对称性增加。

2.2 熔池的流场分布

图6为沿着熔池中线剖面的流场分布图,分别选择了一个半熔透焊接参数B和一个全熔透焊接

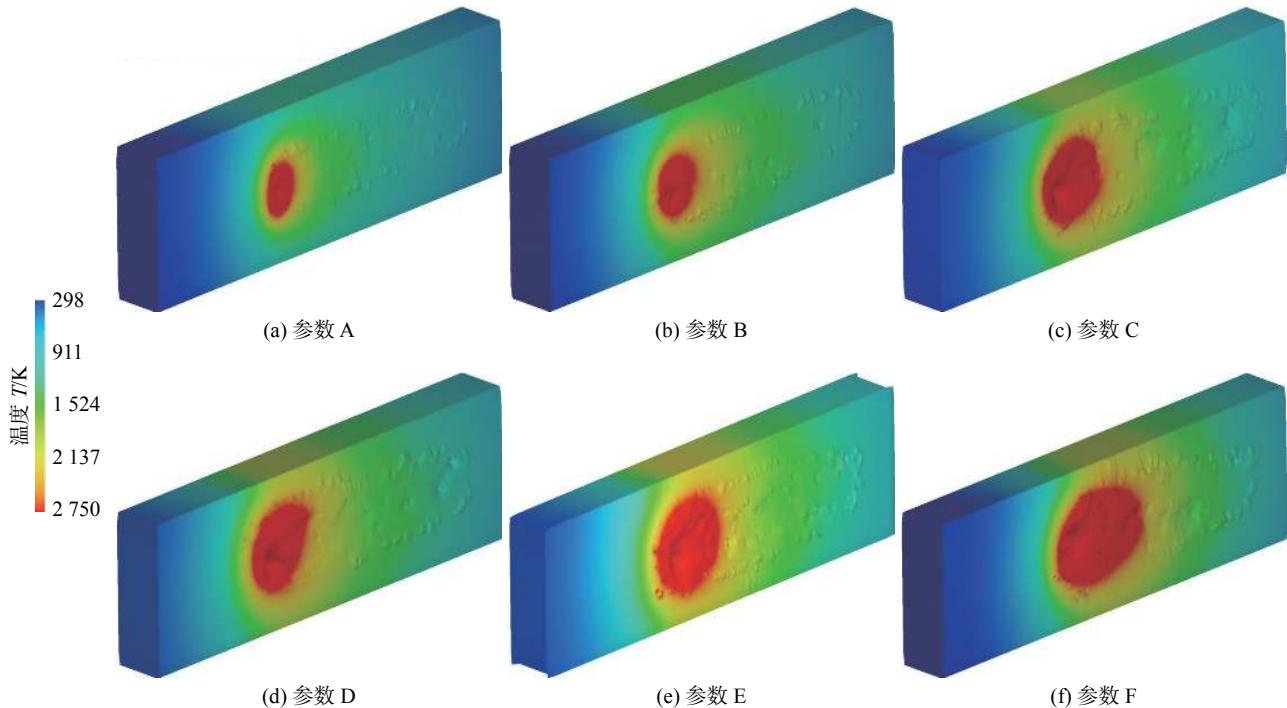


图 4 焊缝正面温度场及三维瞬态形貌(模拟结果)

Fig. 4 Temperature field and 3D morphology of weld pool surface(simulation result). (a) parameter A; (b) parameter B; (c) parameter C; (d) parameter D; (e) parameter E; (f) parameter F

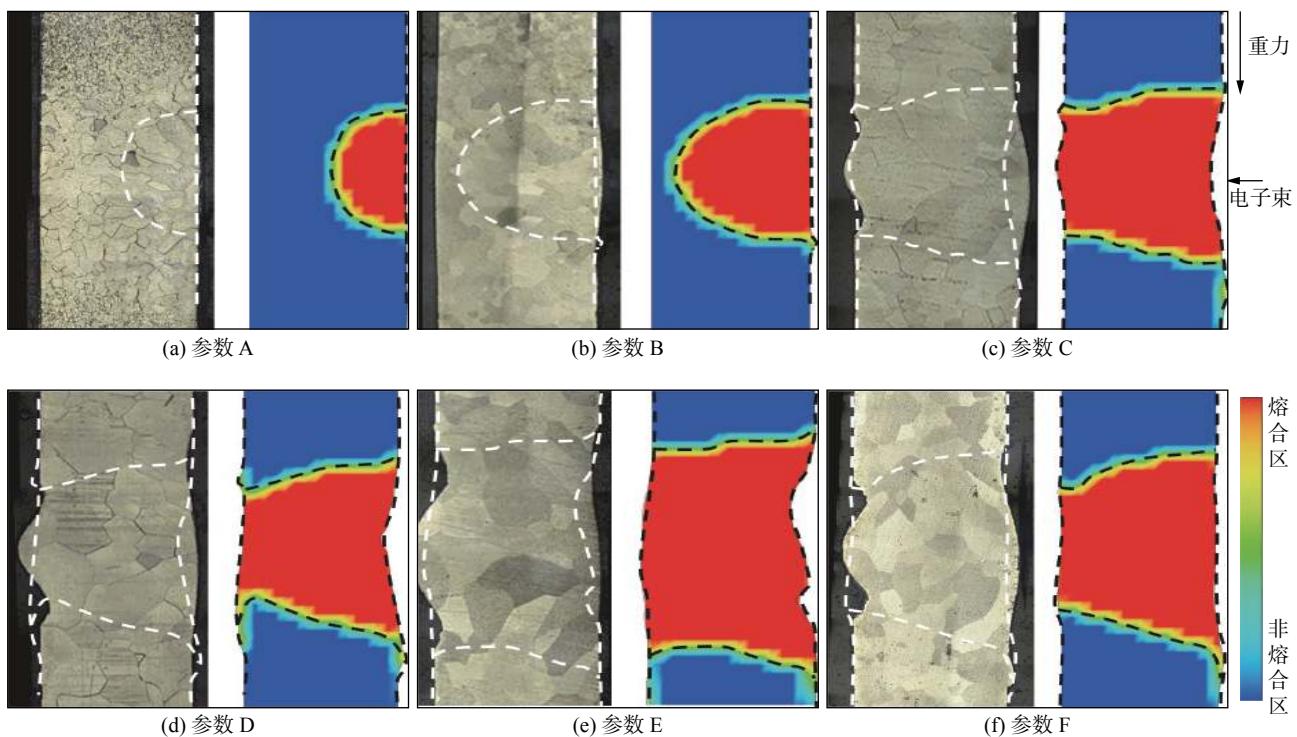


图 5 焊缝截面熔合线模拟结果与试验结果对比

Fig. 5 Fusion zone predicted from simulation compared with cross-sectional morphology of the weld bead observed from experiment. (a) parameter A; (b) parameter B; (c) parameter C; (d) parameter D; (e) parameter E; (f) parameter F

参数 E 进行对比。由图可以看出,全熔透与半熔透熔池的流场分布模式有较大不同。

半熔透熔池的流场分布较为简单,在熔池前部有一个逆时针的流动,熔池后方有一个顺时针的流

动;而全熔透熔池的流场分布则比较复杂,在熔池的前后部各有一个顺时针和一个逆时针的流动。在熔池的前壁与后壁,半熔透熔池的金属流动都是由下而上;而全熔透焊缝则是由上而下。在熔池的上

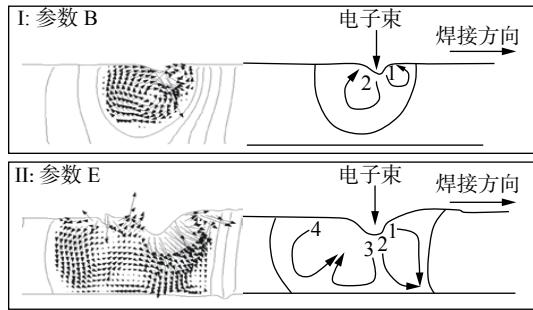


图 6 沿焊缝中线剖面的熔池流场

Fig. 6 Flow field of the weld pool longitudinal profile along the centerline

表面, 液体金属的流动是由前后两端流向中部的匙孔; 而全熔透熔池在熔池的上下表面皆为由中部流向前后两端. 半熔透熔池中部的高温液体在反冲压力作用下向深度方向流动, 并在经过熔池底部壁面和侧壁之后回到上表面. 较小的熔池总体尺寸使得液体流动的总行程较短, 所以在熔池上表面形成四周向中心的流动. 由此可见, 半熔透熔池的流动驱动力主要为蒸气反冲压力.

全熔透熔池没有固定的底部壁面, 高温液体在经过底面时的法向流动在熔池背面形成凸起, 需要在表面张力的作用下转变为切向流动. 同时较大的熔池总体尺寸使得液体流动的总行程增大, 故倾向于不经过侧壁回流至匙孔中心. 在熔池上表面, 靠近匙孔中心的电子束作用区域与周围的非电子束作用区域存在很大的温度梯度, 进而造成较大的表面张力梯度, 从而形成 Marangoni 流动. 由此可见, 在全熔透熔池中, 表面张力可能是其上、下表面由中心向前后两端流动的主要驱动力.

2.3 电子束扫描的影响

由于电子束的扫描摆动, 热源的加热中心周期性地偏离和回归焊缝的中心线. 图 7 显示了采用焊接参数 E 的全熔透焊熔池内温度场及流场随着时间的周期性变化. 图 7a 为距离熔池上表面 1 mm 处的断层剖面, 图 7b 为垂直于熔池顶面的横截面. 图中只表示出了温度高于熔点的熔池部分, 温度低于熔点的部分在图中显示为空白.

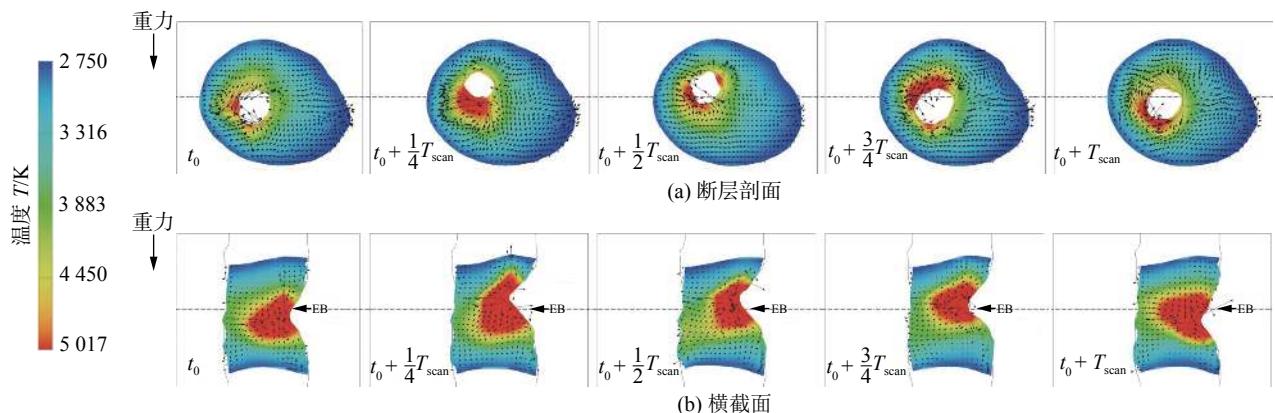


图 7 熔池流场的动态分析 (电子束扫描的影响)

Fig. 7 Dynamic fluid flow analysis (effect of the scanning of electron beam). (a) fault section; (b) cross section

选取了一个扫描周期 ($T_{\text{scan}} = 0.025 \text{ s}$) 内的 5 个特征时刻进行分析: $t_0 + 1/4T_{\text{scan}}$ 为电子束摆动至扫描宽度的上边缘时刻; $t_0 + 3/4T_{\text{scan}}$ 为电子束摆动至扫描宽度的下边缘时刻; t_0 , $t_0 + 1/2T_{\text{scan}}$, $t_0 + T_{\text{scan}}$ 为电子束经过焊缝中心线时刻.

当电子束垂直于焊接方向上下摆动时, 匙孔的位置也随之上下摆动, 但两者存在时间延迟. 虽然焊接速度较小 ($v = 6 \text{ mm/s}$), 但由于电子束扫描的原因, 束斑与材料表面的相对移动速度高达 120 mm/s , 故匙孔在垂直于焊接方向的迁移落后于电子束的移动.

扫描不仅使电子束热效应的作用范围加宽, 而且由于匙孔的迁移形成搅拌作用, 增进了熔池在垂

直于焊接方向上的流动. 同时由于熔池的重力作用, 熔池下半部分的液态金属多于上半部分, 熔池两侧由于重力形成了不对称性. 从图 7 还可以看出, 被电子束加热至接近沸点的高温液流更多地分布在焊缝的下半部分. 熔池下半部分的流体流速要普遍高于上半部分, 熔池的液态金属与下半部分的熔池壁面进行更多的热交换, 使得更多的固态金属熔化, 从而形成了不对称的熔合线.

3 结论

(1) 采用试验和模拟方法对电子束横焊纯铌薄

板的熔池动力学进行了研究, 模拟得到的结果与试验结果在熔池形态和熔合区形状上吻合较好。

(2) 半熔透熔池的驱动力主要为液态金属蒸发引发的反冲压力; 全熔透熔池内的液态金属流动更加复杂, 在熔池的上表面 Marangoni 流动占主导, 表面张力与反冲压力共同作为熔池流动的驱动力。

(3) 重力与焊接扫描共同作用使得熔池两侧的质量分布和流场分布不对称, 进而造成了焊缝两侧熔合线的不对称。

参考文献

- [1] Benin B. Materials for superconducting cavities[R]. DAPNIA-SEA-96-02, Gif-sur-Yvette, France: CEA Saclay, 1996
- [2] 温华明. 梯度射频超导腔及其功率耦合器材料的研究 [D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2005.
- [3] Kuchnir M, Hiller R E. Welding of niobium to stainless[J]. NASA STI/Recon Technical Report N, 1993, 94: 24614.
- [4] 张弘宇, 李中泉, 屈化民, 等. 薄铌板电子束焊接工艺研究 [J]. *中国机械工程*, 2015, 26(17): 2314 – 2317.
Zhang Hongyu, Li Zhongquan, Qu Huamin, et al. Study on electron beam welding of thin niobium plates[J]. *China Mechanical Engineering*, 2015, 26(17): 2314 – 2317.
- [5] 刘成财, 刘铖丹, 刘巍巍, 等. 2219 铝合金电子束焊接匙孔演变过程的数值模拟 [J]. *焊接学报*, 2016, 37(4): 115 – 118.
Liu Chengcai, Liu Chengdan, Liu Weiwei, et al. Numerical simulation of keyhole evolution for 2219 aluminum alloy electron beam spot welding process[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2016, 37(4): 115 – 118.
- [6] Liu Chengcai, He Jingshan, Fan Yongbin. Numerical analysis of thermal fluid transportation during electron beam welding of 2219 aluminum alloy plate and experimental validation[J]. *China Welding*, 2016, 25(2): 21 – 26.
- [7] 罗怡, 刘金合, 叶宏, 等. 镁合金真空电子束深熔焊接及焊缝成形数值模拟 [J]. *焊接学报*, 2010, 31(6): 65 – 68.
Luo Yi, Liu Jinhe, Ye Hong, et al. Numerical simulation on electron beam deep penetration welding and weld appearance of magnesium alloy[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2010, 31(6): 65 – 68.
- [8] 房玉超, 杨子酉, 何景山. 电子束点焊熔池的液态金属冲刷效应作用规律 [J]. *焊接学报*, 2019, 40(6): 137 – 142.
Fang Yuchao, Yang Ziyou, He Jingshan. Study on liquid metal flushing effect during electron beam spot welding[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2019, 40(6): 137 – 142.
- [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: 109256.
- [10] 房玉超, 杨子酉, 何景山. 电子束横焊 3 mm 纯铌板的熔池形态 [J]. *稀有金属材料与工程*, 2018, 47(6): 1896 – 1900.
Fang Yuchao, Yang Ziyou, He Jingshan. Molten pool state for horizontal EBW on 3 mm niobium plate[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2018, 47(6): 1896 – 1900.
- [11] Wang Shaogang, Wu Xinqiang. Investigation on the microstructure and mechanical properties of Ti-6Al-4V alloy joints with electron beam welding[J]. *Materials & Design*, 2012, 36: 663 – 670.
- [12] Trushnikov D N, Koleva E G, Mladenov G M. Effect of beam deflection oscillations on the weld geometry[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2013, 213: 1623 – 1634.
- [13] Chen Guoqing, Liu Junpen, Shu Xi, et al. Beam scanning effect on properties optimization of thick-plate 2A12 aluminum alloy electron-beam welding joints[J]. *Materials Science & Engineering A*, 2019, 744: 583 – 592.
- [14] 郭青蔚, 王肇信. 现代铌钽冶金 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2009.
- [15] Leitner M, Pottlacher G. Density of liquid niobium and tungsten and the estimation of critical point data[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2019, 50(A): 3646 – 3653.
- [16] Paradis P F, Ishikawa T, Yoda S. Non-contact measurements of surface tension and viscosity of niobium, zirconium, and titanium using an electrostatic levitation furnace[J]. *International Journal of Thermophysics*, 2002, 23(3): 825 – 842.
- [17] Joy D C. Monte carlo modeling for microscopy and microanalysis[M]. First ed, Oxford University Press, New York, 1995.
- [18] Kanaya K, Okayama S. Penetration and energy-loss theory of electrons in solid targets[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 1972, 5: 43 – 58.
- [19] Von Allmen M. Laser drilling velocity in metals[J]. *Journal of Applied Physics*, 1976, 47: 5460 – 5463.
- [20] Landau L D, Lifshitz E M. Statistical physics[M]. New York: Pergamon Press, 1969.
- [21] Batanov V A, Bunkin F V, Prokhorov A M. Evaporation of metallic targets caused by intense optical radiation[J]. *Soviet Physics JETP*, 1973, 36: 311 – 322.
- [22] Knight C J. Theoretical modeling of rapid surface vaporization with back pressure[J]. *American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal*, 1979, 17: 519 – 523.

第一作者简介: 房玉超, 1985 年出生, 硕士; 主要从事电子束焊接熔池动力学方面的研究工作; 发表论文 9 篇; Email: yuchao.fang@outlook.com.

通信作者简介: 何景山, 博士, 教授, 博士研究生导师; Email: jingshanhj@hit.edu.cn.