

电子束横焊 3 mm 纯铌板的熔池形态

房玉超, 杨子酉, 何景山

(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: 在电子束平焊全熔透情况下, 超导腔焊缝正面在反冲压力作用下易发生未焊满及塌陷等缺陷。采用合适的电子束横焊工艺参数, 得到了符合工艺要求的正面余高焊缝。并且建立了 3 mm 厚的高纯铌板横焊过程的二维模型, 针对不同的焊接参数分别设计了不同尺寸和形状的熔池, 结合 VOF 算法, 模拟焊接熔池里液态金属自由表面存在状态, 得到了不同焊接参数下熔池的演变过程。实验结果显示, 焊接熔宽随焊接线能量的升高而增大, 数值模拟与实验结果较吻合。

关键词: 电子束焊接; 横焊; 熔池形态; 金属铌

中图分类号: TG456.3

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2018)06-1896-05

铌是一种高熔点的稀有金属, 在航空航天、原子能、电子工业及医疗领域等有着广泛应用^[1]。特别是在超导材料工业领域, 铌以其较高的超导性能转变温度(-263.9 °C)和较好的机械性能, 成为高能加速器超导腔制造的理想材料之一^[2-4]。

在纯铌超导腔的加工制造过程中, 焊接成形质量的优劣直接影响着超导腔的性能, 进而影响高能加速器的频率稳定性。M. Kuehni 和 R. E. Hiller^[5]利用氩气保护 TIG 焊 (tungsten inert gas welding) 将 TESLA 型纯铌超导腔和不锈钢进行管板对接, 实验发现铌在加热至 400 °C 以上时易发生氧化并有裂纹倾向, 影响了铌的纯净度, 导致铌腔超导性能降低; 毛辉^[6]等采用脉冲 TIG 焊, 并在保护气中加入一定量的氦气以提高电弧挺度, 降低空气的氧化作用, 抑制了氧化和裂纹倾向。可见在铌的焊接过程中, 采取合适的方法抑制焊缝的氧化对超导腔成形后的超导性能有着重要的作用。

与 TIG 焊等在大气中进行的焊接方式不同, 电子束焊接在高真空下进行^[7]。电子束焊接纯铌直接而有效地避免了铌与空气中的氧等元素发生反应, 保证了铌材在焊接后的纯度。同时, 电子束热源具有很高的能量密度, 焊接过程中热影响区较小, 可以满足铌等高热导率材料的焊接需求。王峰^[8]等研究了低密度铌合金的电子束焊接性能, 并分析了焊接接头组织; 张弘宇^[9]等人对纯铌板进行电子束焊接试验, 采用合适的焊接工艺参数得到了成形较好的焊缝。

由于电子束焊接能量密度高, 在平焊薄板加热过程中, 金属大量蒸发产生大量金属蒸气对熔池的反冲压力使熔池下塌, 凝固后形成焊接塌陷缺陷。缺陷导致超导

腔内导体焊后无法将外表面磨平, 无法满足使用要求, 如图 1a 所示。经本课题组大量实验表明, 当选用合适的焊接参数从内导体外表面进行电子束横焊时, 在液态金属表面张力、固液界面吸附作用和熔池两侧金属板的支持力作用下, 正面焊缝凸起且液态熔滴不会流出, 成形后满足要求, 如图 1b 所示。焊接成形后的内导体可通过机械加工方法磨平, 使内导体的外表面平整度符合加速器超导腔的制造要求。

本研究建立了厚度 3 mm 的薄铌板电子束横焊模型, 并用 Fluent 商用 CFD 软件对焊接热源后方液态熔池进行模拟计算, 得到液态熔池的形成及焊缝成形规律。

1 数学模型

1.1 模型与网格划分

本工作只研究电子束热源经过后热源后方尚未凝固的熔池, 并做如下基本假设:

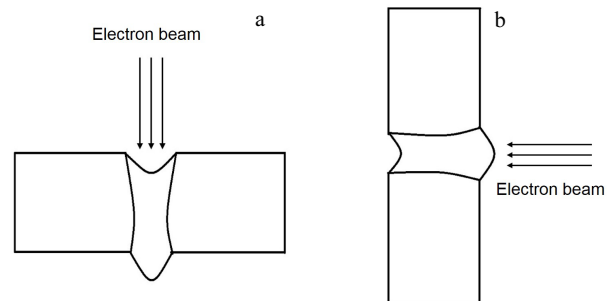


图 1 薄铌板电子束熔池模型

Fig.1 Weld pool models for EBW of thin Niobium plates:
(a) downward EBW and (b) horizontal EBW

收稿日期: 2017-11-27

作者简介: 房玉超, 男, 1985 年生, 博士生, 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, 电话: 0451-87261405, E-mail: yc.fang@hit.edu.cn

格总体积之比定义为 F 。当 $F=1$ 时，即代表该单元全部被该相流体所填充；当 $F=0$ 时，即代表该单元是无该流体的单元；当 $0 < F < 1$ 时，即代表该单元是界面单元。

VOF 算法守恒的传输方程：

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \mu \frac{\partial F}{\partial x} + \nu \frac{\partial F}{\partial y} + \omega \frac{\partial F}{\partial z} = 0 \quad (6)$$

式中， F 为单元内的流体体积分。

在流体流动过程中，各个网格中液体体积分随液体的运动发生改变。通过计算，得出每一瞬时、每一网格中流入与流出的流体体积，可得到每个网格的 F 值。利用几何重构技术 (geo-reconstruction)，便能够计算出每一时刻液体自由表面的形态。

1.5 初始条件和边界条件

在数值模拟过程中，几何模型中不同界面采用了不同的边界条件，如图 4 所示。

- (1) 固液界面 (wall)：该界面的温度为铌的熔点温度 (2468 °C)，考虑导热。
- (2) 气液界面 (interior)：在界面处设置表面张力。
- (3) 固气界面 (wall)：该界面与气体温度相同，不考虑导热。
- (4) 真空室 (wall)：该壁面温度为室温 300 K，考

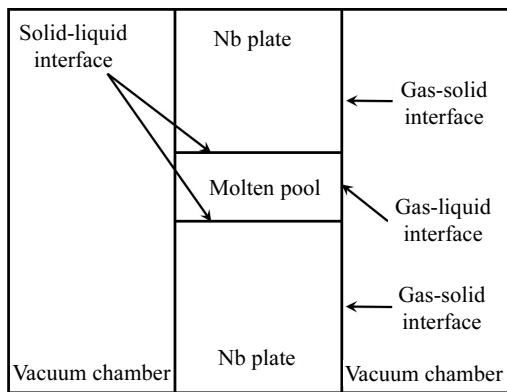


图 4 模型示意图

Fig.4 Sketch of the physical model

考虑稀薄气体的导热。

在计算过程中，为了保证连续性方程求解的收敛，计算域内的稀薄气体压强下限值取近似值 10.0 Pa 进行计算。

2 结果和讨论

2.1 熔池形态的模拟结果

在模型的建立过程中，设置了碗状、钉状和台状熔池来分别对应不同的电子束焊接参数，通过模拟计算分析熔池凝固前的存在状态。选取参数如表 2 所示的 6 组不同焊接参数进行模拟计算，得到不同焊接参数下的熔池在模拟开始不同时刻的熔池存在状态。使用表 2 中参数 I、II 进行模拟计算得到半熔透焊的焊缝；使用参数 III、IV、V、VI 进行模拟计算得到全熔透焊的焊缝。其中 2 个比较典型的模拟结果，即第 I 组和第 V 组焊接参数的模拟结果，在图 5 和图 6 中给出。

由图 5 可看出，薄铌板未焊透时，焊缝有一定程度的余高产生，熔池内液态金属量较少，在表面张力、重力的作用下达达到平衡，液态熔滴可以悬挂在熔池内，没有在重力作用下向侧面下滴。在图 6 中，薄铌板被焊穿，此时熔池有前后两个气液界面，熔池形状接近于圆台。焊缝正面相对于工件表面形成凸起，相应的背面焊缝向薄铌板内部方向收缩。

由图 6 中的焊缝轮廓线可以看出，焊接过程进行至 10 ms 时，焊缝水平中轴线的上下两部分熔池有着较大

表 2 模拟及实验验证中选取的焊接参数
Table 2 Welding parameters used in the experiment and the simulation

Parameter	I	II	III	IV	V	VI
Acceleration voltage/kV	60	60	60	60	60	60
Beam current/mA	30	40	50	45	55	60
Welding speed/mm·s ⁻¹	8	8	8	6	6	10
Penetration form	Half	Half	Full	Full	Full	Full

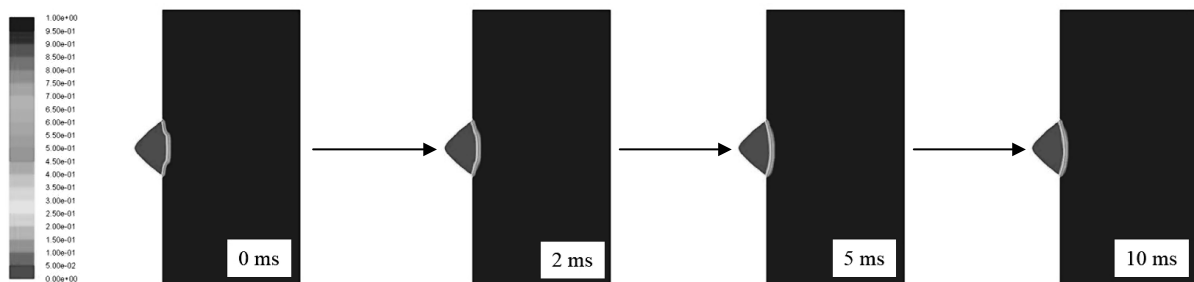


图 5 电子束流 30 mA，焊接速度 8 mm/s 时液态熔池状态

Fig.5 Molten pool states for EBW with 30 mA beam current and 8 mm/s weld speed

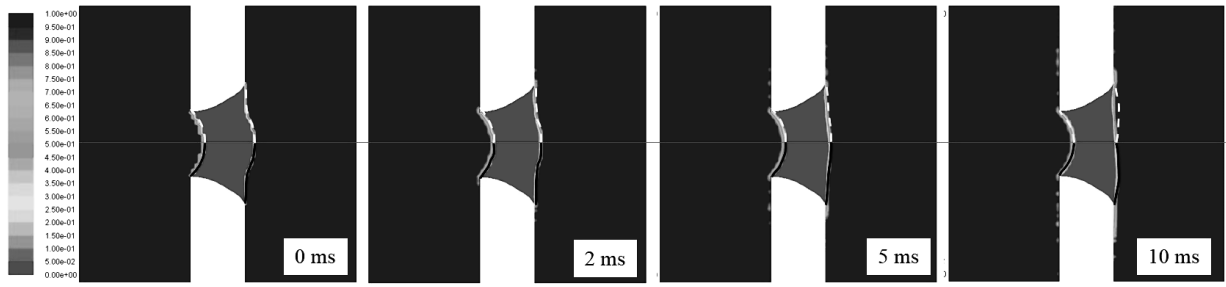


图 6 电子束流 55 mA，焊接速度 6 mm/s 时液态熔池存在状态

Fig.6 Molten pool states for EBW with 55 mA beam current and 6 mm/s weld speed

的不对称性，熔池有“下淌”趋势。焊接线能量较大时，焊缝熔宽增大，在焊接过程中熔池的体积较大，液态金属在重力作用下“下淌”的趋势明显；当液态金属较多时，在重力与表面张力的复合作用下，液态金属相对于薄铝板的凸出部分会出现上下震荡的现象，但未从薄铝板上滴落。当液态金属“下淌”到一定程度时，熔池自由液面的比表面积增大，表面张力数值相应增大，且方向与重力相反，直到大于重力使熔滴向上“回弹”，熔池自由表面逐渐变为球面，比表面积减小，表面张力数值再次小于重力，熔滴又“下淌”，如此反复，熔滴产生轻微的上下震荡，最后稳定，凝固。

2.2 焊缝成形

图 7 是不同焊接参数下焊缝横截面的形貌。从图中可以看出，当薄铝板未焊透时，正面焊缝产生了一定的余高，并且没有产生咬边；当薄铝板被全焊透时，正面焊缝余高增加，并且在与重力方向相反的一侧，有小咬边的形成，背面焊缝也有一定的余高生成，且在余高两侧产生了咬边。在焊接速度相同时，随着电子束流的增大，焊接熔深相应地增大，直至在薄铝板上形成全焊透焊缝。

使用表 2 中的 6 组实验参数分别进行数值模拟和实验验证，分别得到线能量与熔宽的关系，如图 8 所示。

随着焊接输入的线能量增大，熔宽也随之增大，在

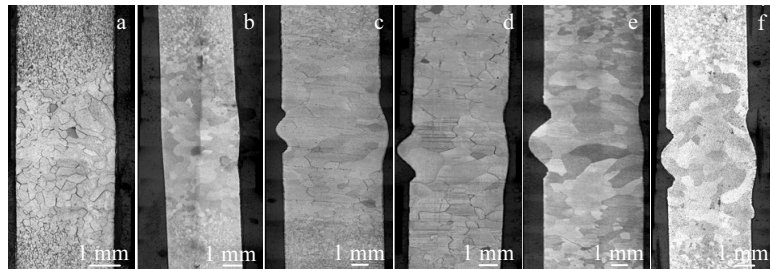


图 7 不同焊接参数下焊缝横截面形貌

Fig.7 Cross-sectional bead shape for different EBW parameters: (a) parameter I, (b) parameter II, (c) parameter III, (d) parameter IV, (e) parameter V, and (f) parameter VI

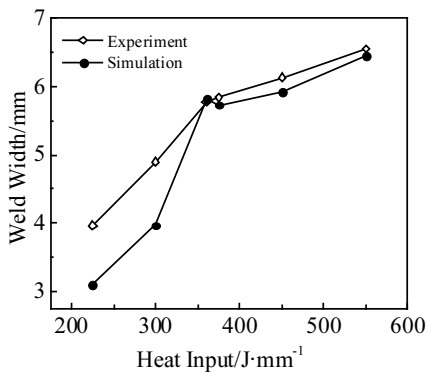


图 8 焊缝熔宽随线能量的变化

Fig.8 Weld width under different heat input

线能量达到 550 J·mm⁻¹ 时，熔宽约为 6.3 mm；数值模拟在熔宽的计算上与实验结果有相同的趋势，计算结果与实验较为吻合。

3 结论

1) 采用合适的电子束横焊工艺参数，克服了电子束平焊时由于金属蒸气的反作用力而导致焊缝下凹的问题，使薄铝板焊缝正面凸起；在焊缝正面形成较小的咬边缺陷，可通过后续机械加工方法去除，满足超导腔内导体焊后要求。

2) 对 3 mm 厚的高纯铝板横焊过程进行模拟，结果得到了不同焊接参数下熔池的演变过程，并通过实验得

到不同焊接参数下的焊缝横截面形貌。

3) 当焊接线能量大于 $360 \text{ J}\cdot\text{mm}^{-1}$ 时, 焊接过程为全熔透焊接, 随着焊接线能量的升高, 焊接熔宽相应增大, 实验验证与数值模拟结果有相同的趋势。

参考文献 References

- [1] Guo Rangmin(郭让民). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 1989(1): 74
- [2] Nageshwar Singh, Deo M N, Roy S B. *Physica C: Superconductivity and Its Applications*[J], 2017, 539: 1
- [3] Dieter Proch. *Reports on Progress in Physics*[J], 1998, 61(5): 431
- [4] Alex Gurevich. *Reviews of Accelerator Science and Technology*[J], 2012(5): 119
- [5] Kuchnir M, Hiller R E. *NASA STI/Recon Technical Report N*[J], 1993, 94: 24 614
- [6] Mao Hui(毛 辉), Ye Jianlin(叶建林), Dong Bin(董 斌) *et al. Hot Working Technology*(热加工工艺)[J], 2012, 41(3): 114
- [7] Zhang Binggang(张秉刚), Wu Lin(吴 林), Feng Jicai(冯吉才). *Welding*(焊接)[J], 2004(2): 5
- [8] Wang Feng(王 峰), Zheng Xin(郑 欣), Bai Run(白 润) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2013, 42(S2): 479
- [9] Zhang Hongyu(张弘宇), Li Zhongquan(李中泉), Qu Huamin(屈化民) *et al. China Mechanical Engineering*(中国机械工程)[J], 2015, 17: 2314
- [10] Guo Qingwei(郭青蔚), Wang Zhaoxin(王肇信). *Modern Niobium and Tantalum Metallurgy*(现代铌钽冶金)[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2009: 27
- [11] Yuan Zhangfu(袁章福), Ke Jiajun(柯家骏), Li Jing(李 晶). *Surface Tension of Liquid Metal and Alloy*(金属及合金的表面张力)[M]. Beijing: Science Press, 2006: 47

Molten Pool State for Horizontal EBW on 3mm Niobium Plate

Fang Yuchao, Yang Ziyou, He Jingshan

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

Abstract: In the case of downward EBW with full penetration, defects such as underfill and collapse on the face of weld may occur due to the recoil pressure. Proper horizontal EBW parameters were used to obtain weld with front reinforcement in accordance with the technical requirements. A 2-D model of the horizontal welding process for 3 mm niobium plate was established, and molten pool models with different sizes and shapes were built for different welding parameters. The VOF method was applied to simulate the free-surface state of molten pool metal in the welding process, and the evolution of molten pool for different welding parameters was obtained. Experiment results indicate that the weld width increases with the rise of heat input, and the simulation results agree with the experimental.

Key words: EBW; horizontal welding; molten pool state; niobium

Corresponding author: He Jingshan, Ph. D., Professor, State Key Laboratory of Advanced Welding and Joining, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, P. R. China, Tel: 0086-451-86418484, E-mail: jingshanhlj@hit.edu.cn