

TU2 无氧铜的真空电子束焊接性能的有限元数值模拟分析^①

尹中会¹, 王慧纯¹, 王少秋¹, 马建国², 刘振飞²

(1.安徽理工大学机械工程学院, 安徽淮南 232001; 2.中国科学院等离子体物理研究所特种焊接技术安徽省重点实验室, 安徽淮南 232000)

摘要: 为了在保证焊接接头质量的同时降低焊接能量消耗, 通过 SYSWELD 仿真软件对 TU2 无氧铜电子束焊接时的焊接工艺参数进行优化。建立了 30 mm 厚 TU2 无氧铜板焊接模型与边界条件, 根据电子束焊接的实际情况确定热源模型, 改变焊接过程中能量消耗数值进行焊接仿真分析, 并与实际焊接结果进行对比验证。结果表明, 当双椭球热源能量输入为 1 260 J/mm、3D 高斯热源能量输入为 5 000 J/mm 时, 不仅能保证铜板焊透, 而且焊接消耗能量低, 仿真得到的焊接熔池形貌和实际焊接结果基本一致, 证明仿真设定的焊接参数在 TU2 焊接中的可行性, 可为 TU2 焊接工艺参数优化提供依据。

关键词: TU2; 无氧铜; 焊接; 电子束焊接; 焊接熔池; 温度场; 应力场; 仿真分析

中图分类号: TG456.3

文献标志码: A

doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2025.04.033

文章编号: 0253-6099(2025)04-0180-06

Finite Element Analysis of Electron Beam Welding Performance of TU2 Oxygen-Free Copper

YIN Zhonghui¹, WANG Huichun¹, WANG Shaoqiu¹, MA Jianguo², LIU Zhenfei²

(1.School of Mechanical Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, Anhui, China; 2.Anhui Provincial Key Laboratory of Special Welding Technology, Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Science, Huainan 232000, Anhui, China)

Abstract: For reducing energy consumption while ensuring weld joint quality, the welding process parameters for electron beam welding of TU2 oxygen-free copper were optimized with SYSWELD simulation software, and a finite element model with appropriate boundary conditions was established for a 30-mm-thick TU2 copper plate. A heat source model was determined based on the actual situation of electron beam welding, and simulation analysis was made by imputing varied energy consumption value in the welding process, with the obtained simulation results compared with actual welding results. It is shown that with a double-ellipsoidal heat source input of 1 260 J/mm and a 3D Gaussian heat source input of 5 000 J/mm, a full penetration weld with the lowest energy consumption can be achieved. The simulation results show that the obtained morphology of molten pool is almost the same with that in the actual welding, proving that the welding parameters set in the simulation analysis are feasible for TU2 welding. It is concluded that this study can provide a reliable reference for optimizing the parameters in welding of TU2 oxygen-free copper.

Key words: TU2; oxygen-free copper; welding; electron beam welding; molten pool; temperature field; stress field; simulation analysis

国际热核聚变实验堆 (ITER) 计划旨在通过托卡马克装置验证核聚变作为清洁能源的可行性, 集成了国际聚变能源研究的最新成果, 综合了大型超导磁体技术、中能高流强加速器技术等世界顶尖技术^[1]。我

国承担 ITER 项目中的任务之一是制造超导磁体馈线 (Feeder) 系统, Feeder 系统的重要部件之一是高温超导电流引线, 其中室温终端、翅片换热器和高温超导段均使用 TU2 无氧铜^[2]。无氧铜材料熔点较高, 又具有

① 收稿日期: 2025-02-24

基金项目: 安徽省重点实验室开放基金 (2021SW1005)

作者简介: 尹中会 (1970—), 女, 安徽六安人, 副教授, 硕士研究生导师, 主要从事矿山机械和特种焊接研究。E-mail: zhhyin.an126@163.com

通信作者: 王慧纯 (1999—), 女, 江西抚州人, 硕士研究生, 主要从事矿山机械和特种焊接研究。E-mail: 3028756005@qq.com

极好的导热性,常规焊接方法热量不集中导致热量瞬间散失,并且厚度越大热量散失越明显,从而使焊接难度大大增加。近年来,有许多学者研究了铜及铜合金与异种金属的焊接性能,使用的主要焊接方式^[3]有激光焊、搅拌摩擦焊、MIG 焊等,但对于无氧铜电子束焊接研究较少。真空电子束焊接相较于传统焊接拥有更高的能量级和能效比,能量损失更小,并且避免了空气污染,较其他热源更容易控制和计算,更容易实现精准焊接^[4]。电子束焊接为高能束焊接,属于自熔焊接,无需焊材填充,主要依赖调整焊接工艺参数来降低热裂纹倾向。因此,本文使用有限元软件仿真分析与试验相结合的方法进一步优化焊接参数。

1 仿真模型的建立与焊接参数的设置

1.1 仿真试验条件及几何模型

近年来,科研人员在使用 SYSWELD 软件的过程中发现该软件在建模与网格划分上操作复杂,不够直观,针对这一问题,ESI 集团研发了 Visual-Environment 系列软件,使软件建模、网格划分、前后处理更加直观方便,但其核心仍为 SYSWELD 分析系统。本文采用 Visual-Environment 软件进行建模、网格划分和处理操作,并用 SYSWELD 软件对 TU2 无氧铜电子束焊接接头的温度场、应力场和变形场进行模拟分析,探讨焊接工艺参数对焊接接头残余应力、焊接变形的影响。

首先建立焊接模型。电子束焊接的能量可以调节,被焊接金属厚度范围为 0.05~300 mm,可以不开坡口,一次焊接成型,因此直接建立理想焊件模型。试板尺寸为 150 mm×150 mm×30 mm。电子束焊接光束集中在对接的焊缝处,为了使仿真更加准确和方便,网格划分时焊接区域的网格需要更加精细,远离焊接区域的网格需稍微稀疏(即从板材边缘到焊缝区域,网格细化程度逐渐提高),最终建立如图 1 所示的仿真网格模型。

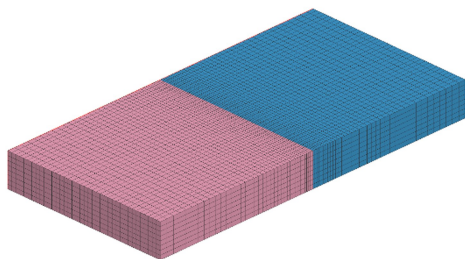


图 1 仿真网格模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of grid in simulation model

1.2 边界条件与材料性能参数

边界条件主要是确保焊件不发生刚性位移,同时

不产生过度约束,焊接时,要对焊件 X 方向、Y 方向、Z 方向进行位移约束,固定住其 6 个自由度,不让其产生位移。边界条件如图 2 所示,两侧为装夹位置。

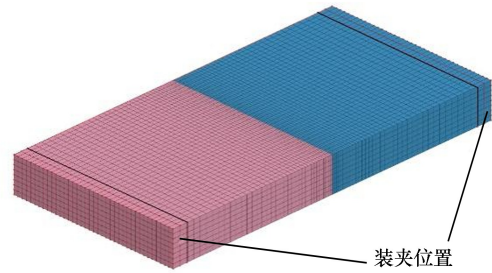


图 2 边界条件示意图

Fig. 2 Schematic diagram of boundary condition

本文研究所采用材料为 TU2 无氧铜,材料的高温物性参数通过查阅航空航天材料手册及外延得到,为了简化计算,密度取 $8\,930\text{ kg/m}^3$,泊松比取 0.33。

1.3 热源模型

焊缝的热力学耦合由材料的相变、高温热集中度和热传导组成,焊接温度场是影响焊缝组织性能的主要参数,是影响焊缝质量的关键。因此要保证其仿真计算的可靠性,必须保证焊接热循环曲线的准确性。合理的热源模型是计算精度的关键。当前可采用的热源模型有面热源、柱热源、双椭球热源、高斯锥体热源、高斯面热源、混合热源以及其他热源。电子束焊接特有的“匙孔”效应会导致焊缝成型的机理更加复杂,熔池内部存在空腔等各种物化反应^[5]。因此选择合适的热源模型能够更好地反映电子束焊接的熔池特征。

随着电子束焊接有限元研究的逐步推进,单一热源已经不能满足研究需要,也无法反映焊接过程中的真实情况,组合热源模型更适合电子束的有限元模拟,焊接焊缝的形貌大多呈 V 形,因此可以采用双椭球热源模型和高斯面热源模型的复合模型。复合热源模型见图 3。

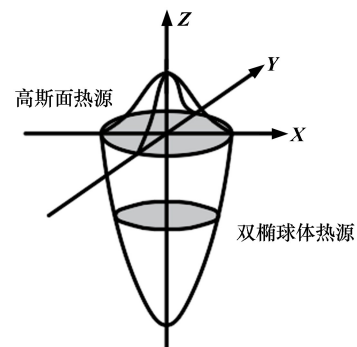


图 3 复合热源模型

Fig. 3 Composite heat source model

双椭球热源模型的前、后半部分椭球内热源分布函数为:

$$q(x, y, z) = \begin{cases} \frac{6\sqrt{3}f_1Q}{a_1bc\pi\sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{3x^2}{a_1^2} - \frac{3y^2}{b^2} - \frac{3z^2}{c^2}\right), & x \geq 0 \\ \frac{6\sqrt{3}f_2Q}{a_2bc\pi\sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{3x^2}{a_2^2} - \frac{3y^2}{b^2} - \frac{3z^2}{c^2}\right), & x < 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: x, y, z 分别为空间点的坐标值; f_1 和 f_2 分别作为热流密度的分布函数, $f_1+f_2=2$; Q 为输入的热源有效功率, $Q=\eta UI$ (η 为热源效率; U 为焊接电压,kV; I 为焊接电流,mA); a_1, a_2, c 均为定义椭圆的参数,互不影响,可取不同的值,其确定方法见文献[6]。

高斯面热源模型为:

$$q_v(r, z) = \frac{9e^3Q}{\pi(e^3 - 1)(z_e - z_i)(r_e^2 + r_e r_i + r_i^2)} \cdot \exp\left(-\frac{3r^2}{r_0^2}\right) \quad (2)$$

式中: e 为常数,取2.718; r_0 为光束直径; r 为试件上任意点至电弧加热斑点的距离; z_e, z_i 分别为试件上、下表面 z 轴坐标; r_e, r_i 分别为板材上、下表面热流密度半径。

1.4 焊接参数

焊接过程中,电子束流高速冲击试件产生巨大热量,使焊件温度产生剧烈变化,导致焊接残余应力和焊接变形的产生。本文在3 mm/s的焊接速度下,通过改变电子束流的大小对30 mm厚TUZ无氧铜板进行焊接模拟。焊接热源输入量计算公式为:

$$Q = \frac{IU}{v} \quad (3)$$

式中, v 为焊接速度,mm/s。

根据已完成试验^[7]可知,加速电压150 kV、电子束流120 mA时可焊透无氧铜板。焊接速度为3 mm/s时,由公式计算可得,复合热源总能量输入为6 000 J/mm,具体能量输入通过仿真软件调整复合热源数值获得,挑选具有代表性的13组仿真校核数据汇成表1。由表1可知,焊透30 mm厚无氧铜板所需的最低能量为:双椭球热源能量输入1 260 J/mm、3D高斯热源能量输入5 000 J/mm。

为研究热源数值大小对无氧铜的温度场与应力场分布的影响,以能量输入为变量,进行3组温度场与应力场的仿真分析对比,热源能量输入数据如表2所示。

2 焊接仿真温度场模拟分析

为了更好地预测与评估残余应力与变形对焊接强

表1 仿真校核数据

Table 1 Data checking of simulation model

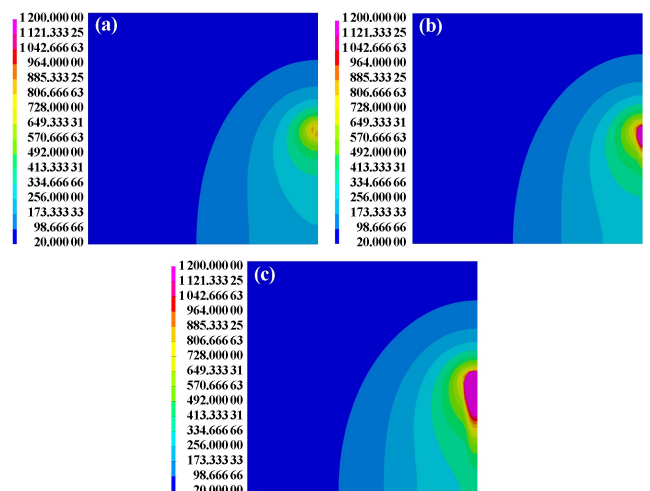
组别	3D高斯热源能量输入/ (J·mm ⁻¹)	双椭球热源能量输入/ (J·mm ⁻¹)	仿真结果
1	3 000	3 000	未焊透
2	4 000	2 000	未焊透
3	5 000	1 000	未焊透
4	3 500	3 000	未焊透
5	4 500	2 000	焊透
6	5 500	1 000	焊透
7	4 000	2 500	未焊透
8	5 000	1 500	焊透
9	5 000	1 260	焊透
10	5 000	1 250	未焊透
11	5 260	1 000	未焊透
12	4 260	2 000	未焊透
13	4 000	2 260	未焊透

表2 3组无氧铜焊接仿真热源能量输入

Table 2 Three sets of heat inputs in oxygen-free copper welding simulation

组别	3D高斯热源能量输入/ (J·mm ⁻¹)	双椭球热源能量输入/ (J·mm ⁻¹)
A	4 000	1 260
B	5 000	1 260
C	5 000	2 260

度的影响,焊接温度场的模拟准确性至关重要。图4为3组焊接仿真中段(焊接稳定25 s时)的温度云场分布。焊接温度云场沿焊缝对称分布,截取左侧图,余下图同理。由图4可知,由于电子束焊接能力集中且无氧铜导热率较高,在焊接过程中,3组焊接热影响区整体呈椭圆状,区域较小,且随着热源能量输入增加而增大。

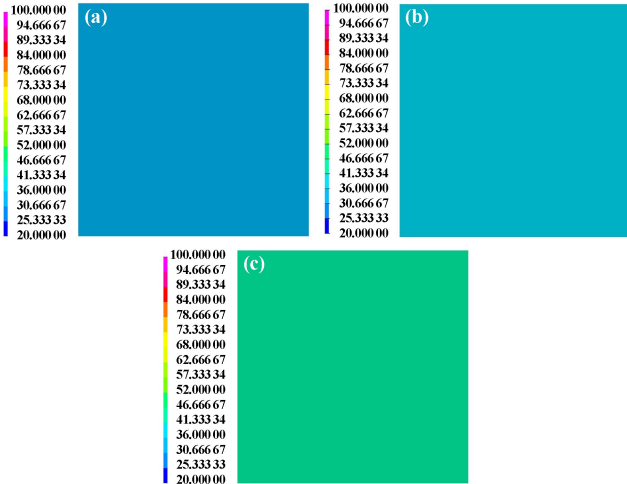


(a) A组; (b) B组; (c) C组

图4 3组焊接仿真中段的温度云场

Fig.4 Temperature fields in the middle stage of three sets of welding simulation

图 5 为 3 组焊接仿真真空冷却 3 600 s 时的局部温度云场。由图 5 可知,冷却 3 600 s 后,A 组温度为 36 ℃,B 组温度为 39 ℃,C 组温度为 42 ℃。出现这种情况的原因是在真空环境下只有热辐射在进行散热,冷却速度慢,3 组样品冷却后温度递增也是热输入的增加使得热辐射散热需要更多的时间。



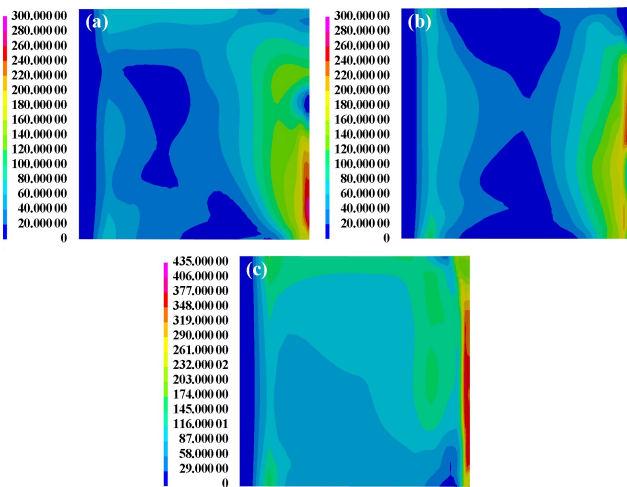
(a) A 组; (b) B 组; (c) C 组

图 5 3 组焊接仿真冷却 3 600 s 时的局部温度云场

Fig. 5 Local temperature fields in three sets of welding simulation after cooling for 3 600 seconds

3 焊接仿真应力场模拟分析

由于 3 组模拟 B 组为最佳参数,取 B 组模拟进行焊接残余应力规律的研究,不同时刻的焊接应力云图如图 6 所示。由图 6 可知, $t = 30$ s 时,焊接残余应力主要分布在焊接热源经过区域和边界条件加持区域,距



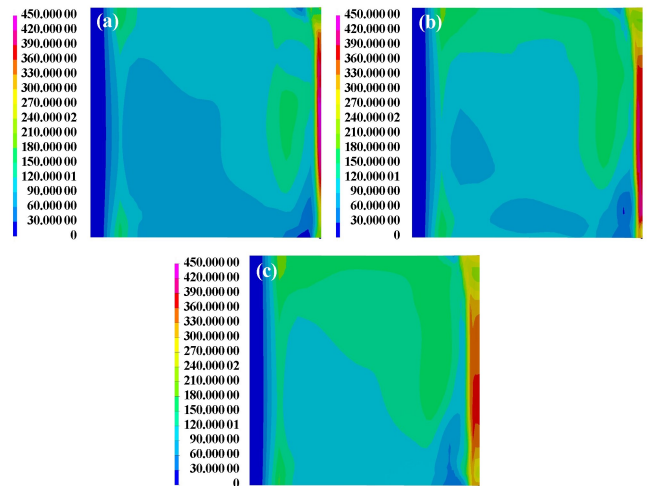
(a) $t = 30$ s; (b) $t = 50$ s; (c) $t = 1 700$ s

图 6 B 组焊接仿真不同时刻的焊接应力云图

Fig. 6 Stress distribution at different time in group B welding simulation

离焊接热源较远的区域为无应力状态,热源中心熔池区域也处于无应力状态,这是因为在热源的加载下熔池区域内的金属状态为熔融液态,而液态金属是不存在残余应力的。 $t = 50$ s 时,在焊接结束时刻,残余应力主要存在于焊缝以及焊缝两边热影响区域,从焊接起始点到热源经过的区域残余应力较大,焊接刚结束时刻在结束点的残余应力较低。这是由于焊接刚刚结束,材料还在处于较高的温度状态,焊缝金属还没有冷却,残余应力还没有形成。 $t = 1 700$ s 时,焊接初始点的残余应力开始降低,焊缝两边的残余应力由初始点到结束点逐渐增大,随着距离焊缝处越来越远,残余应力也越来越低。

图 7 为 3 组焊接模拟焊后的残余应力云图。从图 7 可以看出, $t = 3 600$ s 时,残余应力在热影响区域最大,在热影响区域和边界条件加持区域之间残余应力逐渐降低,在充分冷却后边界加持区域也有残余应力的产生,比焊接过程中只有边界加持产生的残余应力大,这是由于热源影响到边界加持区域,残余应力增大。且随着焊接时电子束能量增加,最大残余应力区域逐渐增大。



(a) A 组; (b) B 组; (c) C 组

图 7 3 组焊接模拟焊后的残余应力云图

Fig. 7 Residual stress distribution after welding in three sets of simulation

在焊接过程中,焊接样板由于受到非线性温度场变化产生的热应力而产生塑性形变,在焊接完成后,由于温度降低,一部分热应力被释放,但残余的应力仍在焊件内存在,从而导致焊件出现形变。因此研究焊接样板焊后的横向与纵向残余应力是非常有必要的。

图 8 为 3 组焊接板材的焊后横向残余应力云图。由图 8 可知,焊件的横向残余应力主要集中在焊缝周围并表现为拉应力,其应力值大小由焊缝中心处向外递减。随着电子束能量增加,横向残余应力增大,3 组

焊接板材的最大拉应力分别为 309、343 和 334 MPa。

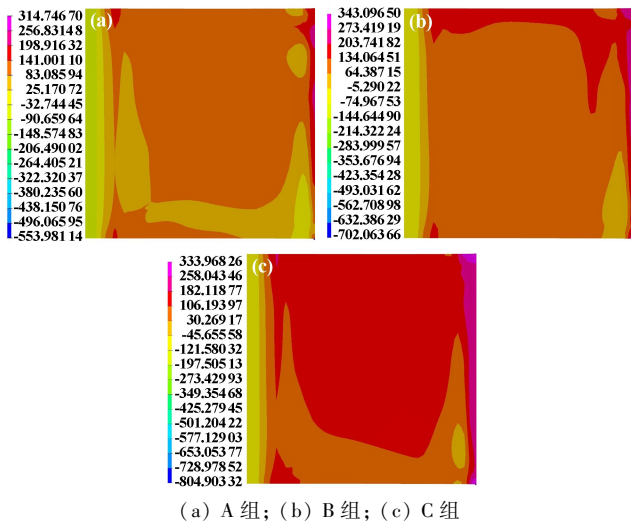


图 8 3 组焊接仿真焊后横向残余应力云图

Fig.8 Transverse residual stress distribution after welding in three sets of welding simulation

图 9 为 3 组焊接板材的焊后纵向残余应力云图。由图 9 可知,纵向残余应力主要集中在焊缝、热影响区域与边界条件加持区域。且随着输入能量增加,板材的纵向残余应力逐渐增大。焊缝两侧与装夹侧的纵向残余应力表现为拉应力,而焊缝处的区域表现为压应力,纵向残余应力的截面图清晰表现了焊缝处拉应力与压应力的范围,3 种焊接板材的纵向最大拉应力分别为 173、190 和 212 MPa。

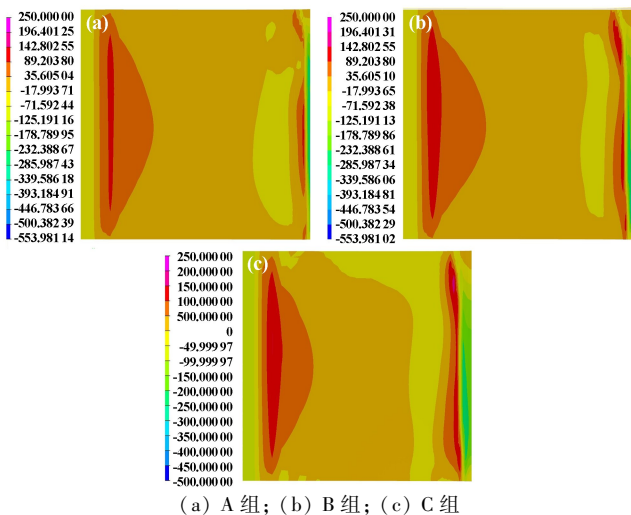


图 9 3 组焊接仿真焊后纵向残余应力云图

Fig.9 Longitudinal residual stress distribution after welding in three set of simulation

4 仿真结果验证

为了验证不同热源能量输入下的 TU2 无氧铜真

空电子束焊接的温度场与应力场的仿真结果的可靠性,本文采用优化后焊接工艺参数得出的仿真结果与实际试验结果^[7]进行了比较。采用特种焊接技术安徽省重点实验室的真空电子束焊接系统,试验材料为 150 mm × 150 mm × 30 mm 的 TU2 无氧铜板,焊接设备为高压真空电子束焊接系统,电子束功率 0~60 kW,真空室容积 66 m³,采用 150 kV 的加速电压,3 组焊接电子束流分别为 100、120 与 140 mA。3 组熔池数据如表 3 与表 4 所示。结果显示,试验材料的形貌、尺寸与仿真模型基本一致。

表 3 焊接仿真结果

Table 3 Welding simulation results

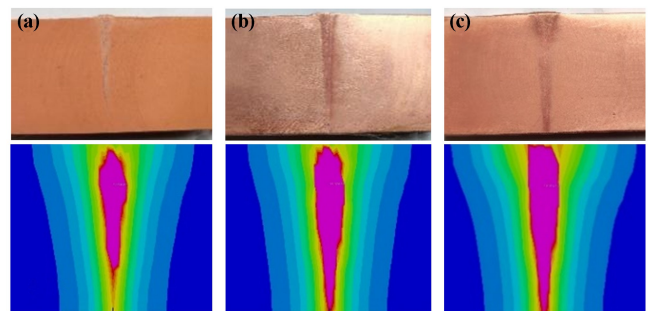
组别	熔池顶部宽度/mm	熔池中部宽度/mm	熔池底部宽度/mm
A	5.5	4.0(深 3.0 mm 处)	0.62(深 26 mm 处)
B	7.8	4.6(深 3.5 mm 处)	1.20(深 30 mm 处)
C	8.7	5.9(深 4.0 mm 处)	2.30(深 30 mm 处)

表 4 实际焊接试验结果

Table 4 Actual welding test results

组别	熔池顶部宽度/mm	熔池中部宽度/mm	熔池底部宽度/mm
A	5	3.0(深 3.0 mm 处)	0.5(深 26 mm 处)
B	7	3.5(深 3.5 mm 处)	0.7(深 30 mm 处)
C	8	5.0(深 4.0 mm 处)	1.5(深 30 mm 处)

3 组试验结果和有限元模拟结果对比,试验的熔池形貌均略小于模拟的熔池形貌,误差在 1 mm 左右。这是由于仿真结果是在完全理想的情况下进行的,并且对仿真热源参数进行了优化调整。受实际条件限制,试验使用的电子束流大小有些许不同,导致试验结果与模拟结果的差异,但在焊缝熔池轮廓上试验结果与仿真结果都是“铁钉”形貌,二者基本吻合。图 10 为真空电子束焊接熔池形貌与仿真结果对比图,上部为实际焊接体,下部为仿真结果。



(a) A 组; (b) B 组; (c) C 组

图 10 实际焊接熔池形貌与仿真结果对比

Fig.10 Comparison of morphology of molten pool between actual and simulated welding

5 结论

1) 采用高斯面热源与双椭球热源的复合热源模型能够较好地表现出真空电子束焊接的匙孔效应。

2) 3D 高斯热源数值为 5 000 J/mm、双椭球热源数值为 1 260 J/mm 时,能在保证铜板焊透的同时能量输入最小。

3) 仿真热源能量输入数值略大于实际焊接热源能量输入值,但熔池形貌特征基本吻合,验证了本文所建立的热源模型与仿真的准确性。

参考文献(References):

- [1] 李建刚. 托卡马克研究的现状及发展[J]. 物理, 2016,45(2):88-97.
LI Jiangang. The status and progress of Tokamak research[J]. Physics, 2016,45(2):88-97.
- [2] 张远斌,武松涛,宋云涛,等. ITER 超导馈线系统的设计[J]. 核聚变与等离子体物理, 2005,25(3):195-199.
ZHANG Yuanbin, WU Songtao, SONG Yuntao, et al. A design of superconducting feeder system for ITER[J]. Nuclear Fusion and Plasma Physics, 2005,25(3):195-199.
- [3] 罗章,孙有平,何江美,等. 水溅冷却对铝合金搅拌摩擦焊接头组织、结构及力学性能的影响[J]. 矿冶工程, 2024,44(5):153-158.
LUO Zhang, SUN Youping, HE Jiangmei, et al. Effect of water splat cooling on microstructure, texture and mechanical properties of friction stir welded aluminum alloy joints[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2024,44(5):153-158.

- [4] 高会良,陈洪胜,王文先,等. 铝/铜层状复合板真空电子束焊接行为[J]. 航空学报, 2023,44(19):276-288.
GAO Huiliang, CHEN Hongsheng, WANG Wenxian, et al. Vacuum electron beam welding behavior of Al/Cu bimetallic composite plate [J]. 2023,44(19):276-288.
- [5] 夏小维. 大型复杂形体真空室窗口颈圈电子束焊接模拟及工艺研究[D]. 合肥:中国科学技术大学, 2020.
XIA Xiaowei. Research on electron beam welding simulation and welding process for port stubs of vacuum vessel sectors with large complex contour[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2020.
- [6] 莫春立,钱百年,国旭明,等. 焊接热源计算模式的研究进展[J]. 焊接学报, 2001,22(3):93-96.
MO Chunli, QIAN Bainian, GUO Xuming, et al. The development of models about welding heat sources' calculation[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2001,22(3):93-96.
- [7] 尹中会,杨建军,王少秋,等. 无氧铜电子束焊接试验与分析[J]. 焊管, 2022,45(6):14-18.
YIN Zhonghui, YANG Jianjun, WANG Shaoqiu, et al. Electron beam welding test and analysis of oxygen-free copper[J]. Welded Pipe and Tube, 2022,45(6):14-18.

引用本文:尹中会,王慧纯,王少秋,等. TU2 无氧铜的真空电子束焊接性能的有限元数值模拟分析[J]. 矿冶工程, 2025,45(4):180-185.

YIN Zhonghui, WANG Huichun, WANG Shaoqiu, et al. Finite element analysis of electron beam welding performance of TU2 oxygen-free copper[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(4):180-185.