

微贮箱移动电子束焊接传热数值分析

张魏静, 杨建文, 刘占一, 王振旺, 石晓波

(西安航天动力研究所 液体火箭发动机技术重点实验室, 西安 710100)

摘 要: 建立了某姿轨控发动机推进剂贮箱移动电子束焊接热源的焊接温度场数值仿真模型, 采用锥体热源描述电子束焊接热源, 通过等价比热容法来处理熔化潜热, 得到电子束焊接过程中贮箱温度、焊接熔池形状和尺寸随时间的变化状况。结果表明: 仿真计算所得贮箱温度与实测数据的差异小于10%。在焊接过程中, 利用安装在贮箱外表面的纯铜散热盘可以将贮箱半膜处的温度从503 K降低至364 K以下, 避免了焊接过程中贮箱温度过高出现结构损伤。该计算方法与结构散热方式可为其他产品的焊接提供借鉴与参考。

关 键 词: 微贮箱; 电子束焊接(EBW); 锥体热源; 等价比热容; 传热

中图分类号: V434.14

文献标志码: A

Numerical analysis of heat transfer of moving EBW in micro propellant tank

ZHANG Wei-jing, YANG Jian-wen, LIU Zhan-yi,
WANG Zhen-wang, SHI Xiao-bo

(Science and Technology on Liquid Rocket Engine Laboratory,
Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China)

Abstract: Numerical model of analyzing temperature field for propellant tank with moving resource electron-beam welding (EBW) was set up, with which the heat source of EBW was described by cone source and the latent heat of melting was determined by means of equivalent specific heat. Time evolutions of temperature distribution on tank, molten pool shape and size were obtained. Results showed that, the error ratio of temperature between calculation and measurement was less than 10%. During the later welding process, the pure copper radiator plate installed on the outer surface of the tank could be used to reduce the temperature of the diaphragm of propellant tank from 503 K to lower than 364 K, avoiding the structure damage due to high temperature. The calculation method and heat radiation figuration can also be adopted to other products' welding process.

Key words: micro propellant tank; electron-beam welding (EBW); cone heat source; equivalent specific heat; heat transfer

焊接技术作为一种常用的加工方法, 在液体火箭制造过程中处于重要的地位。电子束焊接采用高能量密度的电子束作为焊接热源, 利用在真空中聚焦形成的高能量密度的电子束熔化金属形

成焊接接头, 可大大减小热影响区, 提高焊接强度, 近年来获得了广泛应用。在焊接过程中, 被焊金属随着热量的输入和传播, 经历了加热、融化以及随后的连续冷却等一系列过程, 其焊接加热区

收稿日期: 2015-05-12

作者简介: 张魏静(1981—), 女, 工程师, 硕士, 主要从事液体火箭发动机传热与冷却研究。

引用格式: 张魏静, 杨建文, 刘占一, 等. 微贮箱移动电子束焊接传热数值分析[J]. 航空动力学报, 2017, 32(1): 35-41. ZHANG Wei-jing, YANG Jianwen, LIU Zhanyi, et al. Numerical analysis of heat transfer of moving EBW in micro propellant tank[J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(1): 35-41.

域局部集中、加热速度快、加热和冷却不均匀、焊件受热区域不断变化并包含多种传热方式,焊接热过程比一般热处理条件下的热过程复杂。20 世纪 40 年 Rosenthal 和 Rykalin 建立了 Rosenthal-Rykalin 公式体系,用于焊接热过程解析计算,但由于 Rosenthal-Rykalin 公式本身固有的不足,致使温度计算产生较大偏差,即便研究者对其进行了诸多修正,仍无法从源头上解决问题^[1-7]。电子计算机的发展推动了数值模拟在焊接热过程计算中的应用,数值模拟方法能够处理焊接过程中各种复杂的边界条件、热源分布和非线性问题,因此在焊接热过程的研究中得到了广泛的应用。研究者针对电子束焊接过程,利用数值模拟方法开展了诸多仿真研究工作,获得了在电子束焊接条件下金属平板的焊接温度场分布及焊接应力分布,并分析了焊接参数及焊接工艺对焊接质量的影响规律^[8-13]。然而大多数研究者的关注范围多为熔池区域或焊缝本身,对于焊接过程有可能对焊件造成的热损伤,以及焊接时焊件整体的热响应鲜见有详细报道。

某型姿轨控发动机的推进剂微贮箱尺寸小、壁面薄,外径不足 100 mm、壁厚为 1 mm 多,在加工过程中采用了电子束焊接技术,用于将两薄壁贮箱半球焊接在一起。微贮箱橡胶半膜对温度较敏感,其限温范围为 393 K,而半膜固定位置距离焊缝又较近,很容易造成超温。本文以该姿轨控发动机推进剂微贮箱为研究对象,利用数值模拟方法计算得到电子束焊接过程中贮箱的热状态,分析不同焊接参数对贮箱特别是半膜安装部位的热影响,并预测出贮箱的动态温度分布以及熔池几何形状和尺寸的变化过程,确定出合适的焊接工艺参数,以保证焊接过程中焊件安全。

1 计算模型

1.1 理论基础

电子束焊接过程为非线性瞬态热传导问题,笛卡儿坐标系中的三维非线性瞬态导热问题的控制方程为

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{\Phi} \quad (1)$$

式中 ρ , c 和 λ 分别为微元体的密度、比热容和导热系数; τ 为时间; $\dot{\Phi}$ 为单位时间内单位体积中内热源的生成热。

1.2 电子束焊基本特征

在真空条件下进行电子束焊时,电子被大约厚为 $10 \mu\text{m}$ 的表面层吸收,并产生热量。如果其功率密度足够高,焊缝形成不再依靠热传导,而是聚成功率密度很高的电子束撞击到工件表面,将电子的动能转变为热能,迅速熔化和蒸发金属。在高压金属蒸气作用下,熔化的金属被排开,电子束深入工件内部继续撞击深处的固态金属,同时很快在被焊工件上钻出一个锁形小孔(见图 1),小孔周围被液态金属包围,随着电子束与工件的相对移动,液态金属沿小孔周围流向熔池后部,逐渐冷却、凝固形成了焊缝,随着小孔深度的增加,热流作用半径不断减少,最终形成具有很大深宽比的钉状焊缝^[14-15],图中 v 为焊件相对移动速度。

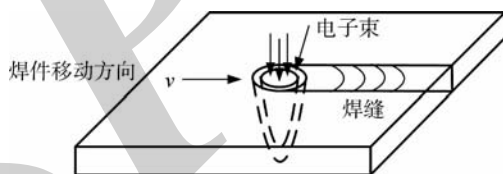


图 1 移动电子束焊接示意图

Fig. 1 Sketch map of moving EBW

1.3 焊接热源模型

按照热源作用方式不同,可将焊接热源当作集中热源、平面分布热源或体积分布热源处理。对于高能束流焊,在焊接时会产生较大的焊缝深宽比,焊接热源的热流密度不仅作用在焊件表面上,也沿焊件厚度方向作用,此时的焊接热源须按恰当的体积分布热源来描述。常用的体积分布热源模型有双椭球体体积分布热源、锥体热源、曲面衰减型体积分布热源等^[16]。为了考虑电子束焊热流沿焊件厚度方向的分布,同时针对其上宽下窄的钉形焊缝结构特点,文中的计算采用锥体热源模型来描述电子束焊接热源特征。

三维锥体热源模式实质是一系列平面高斯热源沿焊件厚度方向叠加,而每个截面的热流分布沿厚度方向呈线性衰减,而热流密度在 z 轴(电弧中心线)上保持不变。对于三维锥体热源,在任一垂直于 z 轴的平面内,可将热流分布表示为^[16]

$$q_v(r, z) = q_{v0} e^{-\frac{3r^2}{r_0^2}} \quad (2)$$

式中 q_{v0} 是热流密度的最大值; r_0 是热流分布半径; r 是径向距离。

如图 2 所示,热流分布半径 r_0 沿厚度方向呈线性衰减。锥体热源的高度 $H = z_e - z_i$; 焊件上、

下表面的 z 方向坐标分别是 z_e 和 z_i ; 焊件上、下表面的热流分布半径分别是 r_e 和 r_i . 则

$$r_0(z) = r_e - (r_e - r_i) \frac{z_e - z}{z_e - z_i} \tag{3}$$

$$q_{v_0} = \frac{9\eta IUe^3}{\pi(e^3 - 1)} \cdot \frac{1}{H(r_0^2 + r_0r_i + r_i^2)} \tag{4}$$

$$q_v(r, z) = \frac{9\eta IUe^3}{\pi(e^3 - 1)} \cdot \frac{1}{H(r_0^2 + r_0r_i + r_i^2)} \cdot e^{-\frac{3r^2}{r_0^2}} \tag{5}$$

式中 $r_0 = r_0(z) = r_e - (r_e - r_i) \frac{z_e - z}{z_e - z_i}$, U 为焊接电压, I 为焊接电流, η 为焊接热效率.

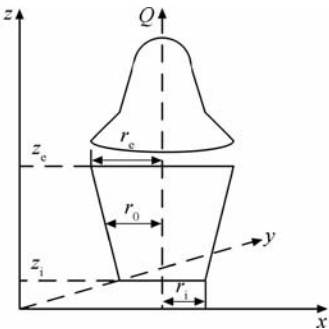


图 2 锥体热源模型示意图

Fig. 2 Sketch map of cone heat source model

1. 4 焊接工艺参数

焊接工艺分为 3 组, 具体工艺参数见表 1.

表 1 电子束焊接工艺参数
Table 1 Process parameters of EBW

编号	电压/ kV	电流/ mA	速度/ (m/s)	焊接舱压强/ 10 ⁻³ Pa
1	60	15.5	0.2	8
2	60	7.7	0.2	8
3	60	7.7	0.1	8

贮箱壳体材料为不锈钢 1Cr18Ni9Ti, 焊接过程中采取在贮箱两端螺纹嘴部分加持的固定方式.

1. 5 仿真计算基本假设

电子束焊接过程中, 对传热的影响因素较多, 因此在仿真模拟过程中对某型因素进行了如下简化或假设:

1) 焊接熔池内的液体金属在多种力的作用下产生剧烈的流动, 传热以对流为主; 在熔池外部的固体区域, 传热以热传导方式为主. 由于本次工作的关注重点为焊接过程中贮箱整体的温度变化

情况, 而非熔池内部的详细流动与传热状态. 因此在计算焊接温度场时, 不考虑熔池内部液态金属的流动情况, 而是用固体导热来模拟电子束焊接的传热过程;

2) 不考虑熔池表面结构的变化, 认为其一直保持平整外表面;

3) 由于目前缺乏贮箱半膜在超温状态下的传热特性参数, 加之其与贮箱壁面间的传热面积较小, 相应的热传递量也较少, 因此决定在建立计算模型时将半膜略去;

4) 计算中不考虑贮箱两端夹具对传热的影响, 将螺纹接嘴部分当作绝热边界;

5) 由于焊接过程在真空环境中进行, 所以无对流换热, 仅考虑贮箱外表面向环境的辐射散热;

6) 贮箱初始温度与环境一致, 取 293 K.

1. 6 材料物性参数

贮箱壳体材料不锈钢的热物性参数取自文献[17], 高温段的数据通过外推法和内插法获得. 在焊接过程中, 金属熔化吸收相变潜热, 此时材料温度基本上保持在熔点附近. 对潜热的处理, 决定选用物理意义较明确、应用较广泛的等价比热容法. 即在金属材料的液相线温度与固相线温度之间, 比定压热容按如下方法取值[16, 18]:

$$c_{p, ss} = \frac{e_{liq} - e_{sol}}{T_{liq} - T_{sol}} \tag{6}$$

式中 T_{liq} 为液相线温度, T_{sol} 为固相线温度, e_{liq} 为液相线温度对应的比内能, e_{sol} 为固相线温度对应的比内能.

1. 7 物理模型和网格划分

通过在 Fluent 软件中编写用户自定义函数 (user-defined function, UDF) 来描述焊接锥体热源, 从而实现模拟电子束对贮箱的加热作用. 在贮箱的实际焊接过程中, 电子束热源沿贮箱表面作圆周运动, 为简化计算, 结合贮箱表面焊缝的几何特征, 根据相对运动, 将运动方式转变为热源位置不移动, 贮箱绕定轴旋转. 即在计算时将热源固结于坐标原点, 热源深度沿 z 轴方向, 令贮箱绕 y 轴以 0.2 m/s 的速度旋转, 这样可以省去对热源运动轨迹的描述. 计算所用的几何模型与坐标系关系如图 3 所示.

计算网格的好坏直接影响到数值仿真的收敛性和计算精度, 结构化网格具有网格生成速度快、网格质量好、数据结构简单, 且计算结果较易收敛和准确的优点, 所以决定将计算对象进行结构化

网格划分. 由于电子束焊接的能量密度非常高, 在焊接区电子束的聚焦束斑直径约为 $\phi=0.5\text{ mm}$ (用 $\phi=2\text{ mm}$, $\phi=3\text{ mm}$ 阴极), 因此在网络划分时在焊缝附近采用小的网络尺寸 (为了达到求解精度, 单元大小至少与光斑大小相当), 而在远离焊缝的区域采用较大的网络尺寸. 网格划分示意图如图 4.

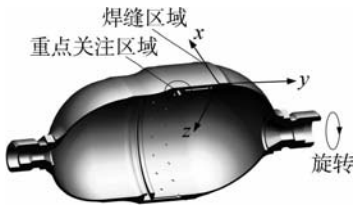


图 3 几何模型与坐标系关系

Fig. 3 Relationship between geometry model and coordinate system

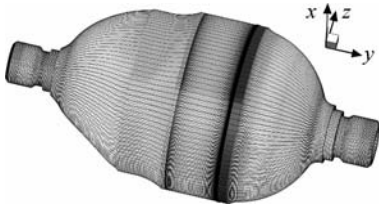


图 4 贮箱网格划分

Fig. 4 Mesh generation of tank

2 计算结果与分析

2.1 不同工艺参数结果

分别采用表 1 中各组工艺参数作为焊接热源条件, 对贮箱进行非稳态传热计算. 由于当焊接停止后, 尽管没有焊接热源继续输入热量, 但焊缝区域积聚的热量仍将通过热传导方式向贮箱低温部分传递, 同时贮箱还以辐射方式向外散热, 最终温度将趋于一致. 因此将整个求解计算过程分为焊接和冷却两个阶段, 工艺编号 1 与工艺编号 2 的焊接时间为 11.5 s , 冷却时间为 300 s ; 工艺编号 3 的焊接时间为 23 s , 冷却时间为 300 s . 通过数值仿真计算得到半膜安装部位的最高温度以及不同参数下的熔深情况, 结果列于表 2.

表 2 各参数条件下所获得的主要结果

Table 2 Main results with different process parameters

工艺编号	半膜安装部位最高温度/K	熔深情况
1	681	焊透
2	503	临界焊透
3	701	焊透

从表 2 中的数据可以看出, 采用工艺 1 与工艺 3 时焊件焊透, 半膜安装部位的温度远远超过了橡胶膜的许用温度 393 K , 会造成半膜损伤. 采用工艺 2 时, 焊件临界焊透, 半膜安装部位的温度较其他两个工况有较大降低, 但仍比许用温度高. 在 3 种工艺参数中, 工艺 2 相对较为理想, 若选用工艺 2 的参数组合来完成贮箱焊接, 必须需采取一定的散热措施以保证半膜不超温. 为阻挡焊接时积蓄在贮箱上的热量向半膜安装区传递, 同时促进贮箱尽快散热, 决定在贮箱外表面安装导热性良好的纯铜散热盘, 使一部分热量转移到铜热沉上, 同时散热盘又增大了散热面积, 利于贮箱更快散热. 纯铜散热盘所处的轴向位置处于焊缝与半膜安装区域之间, 并与贮箱外壁紧密贴合, 安装示意图如图 5.

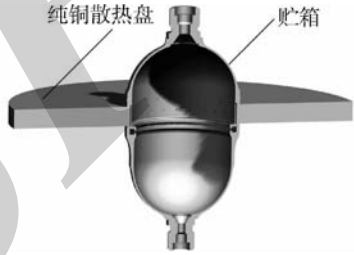


图 5 散热盘安装示意图

Fig. 5 Sketch map of radiator plate position

2.2 安装铜散热盘后结果

当安装铜散热盘后, 采取工艺 2 参数对贮箱焊接, 先进行定位焊, 冷却 650 s 后再进行正式焊接. 对该过程进行仿真计算, 结果显示贮箱经过定位焊与正式焊接后, 贮箱半膜安装部位所能达到的最高温度为 364 K , 可以预见半膜的温度将不会超过 364 K . 图 6 为该区域的仿真计算结果与实际测温结果的对比, 可以看出两者趋势较为一致,

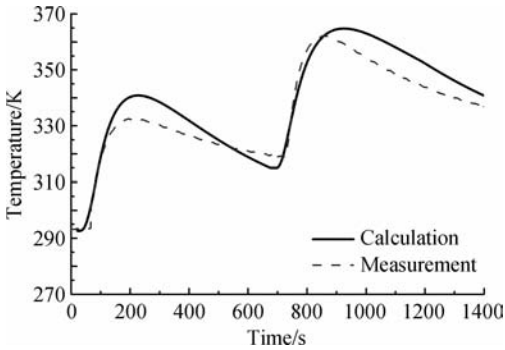


图 6 计算结果与测量结果对比

Fig. 6 Comparison of calculation and measurement data

计算所得的温度结果比实测值略高,这主要是因为在前文所述的简化假设条件下,模型中少了半膜这个热容元件以及两端加持部位的散热通道,使得计算结果偏高。但计算值与实测值的差异不超过 10%,在工程上是可以接受的。

图 7 分别表示不同时刻焊件表面温度场分布

状况,可以看出随着时间(t)的推移,贮箱壳体温度逐渐升高,温度场的范围逐渐扩大。随着电子束的移动,高温区域沿贮箱周向移动。大约在 4.5 s,焊接温度场的变化已经很微小,此时热源周围的温度分布接近恒定,可认为此时温度场已经达到了准稳态。

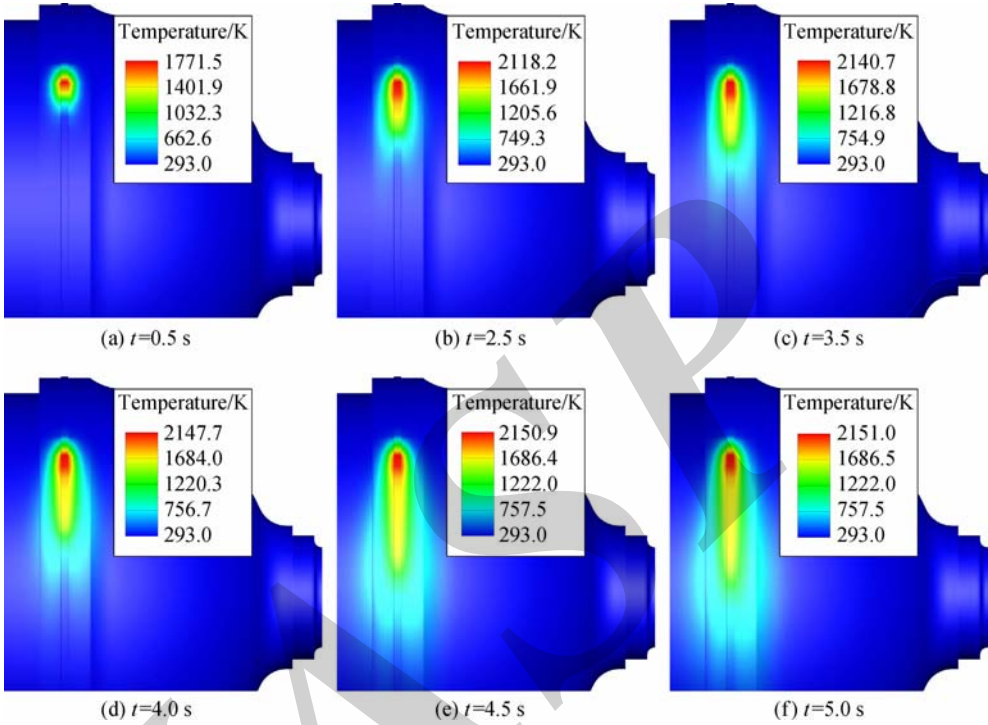


图 7 各时刻热源附近温度场分布

Fig. 7 Temperature distribution around heat source in different times

在贮箱温度场纵截面上,由于焊接速度的影响,电子束后侧的温度场增大范围大于前侧的增大范围。从温度场分布三维图(图 8)可以看出,焊接方向的熔池前沿由于迅速加热至熔化,温度梯度较大;焊接方向的熔池后沿,加热熔化后的焊缝逐渐凝固冷却,温度梯度分布趋于缓和。

图 9 为焊接熔池上表面形状在焊接开始后的

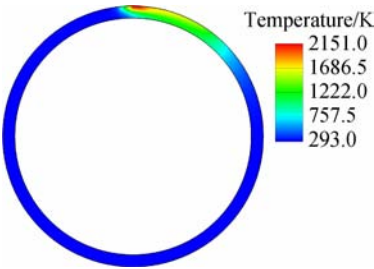


图 8 $t=4.5$ s 时热源附近纵截面处温度分布

Fig. 8 Temperature distribution around heat source on vertical section at $t=4.5$ s

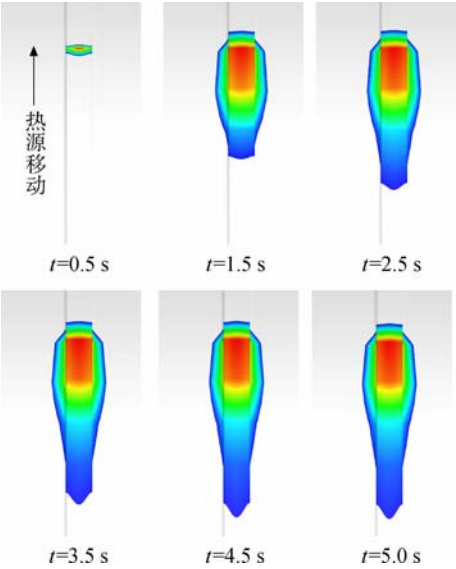


图 9 焊接熔池上表面形状变化过程

Fig. 9 Variation of top face shape of molten pool

动态变化过程。从图中可以看出,随着焊接过程的进行,焊接熔池随着焊件热源的移动向上旋转并不断长大。由于焊接速度的影响,焊接熔池在长度上的增长比宽度上的增长明显,熔池上表面形状也由开始焊接时的近似椭圆形逐渐变为蝌蚪形。

图10是焊接熔池的熔宽和熔深随时间的变化曲线。从图中可见,熔池的宽度和深度在焊接热源作用下短时间内增大到较大值而达到准稳态,接下来的增幅变化很小。以上这些特征均符合电子束焊接热源集中、焊接热影响区较小、焊缝具有高深宽比的特点。

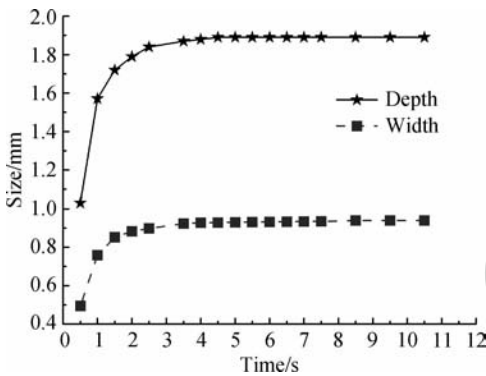


图10 焊接熔池深度和宽度随时间的变化曲线

Fig. 10 Variation curves of molten pool depth and width with time

3 结论

本文选择了合适的焊接参数,根据电子束焊接的特征建立微贮箱焊接过程传热模型,通过数值模拟方法得到焊接过程贮箱的温度分布及熔池形态,得出如下结论:

- 1) 选用合适工艺参数并采用有效的散热措施,可保证在焊接过程中焊件不受到损伤。
- 2) 通过比较数值模拟结果与实测数据发现两者比较吻合,证明所采用的计算模型较为合理。
- 3) 采用数值模拟方法预测出电子束焊接过程中贮箱温度以及熔池形状和尺寸的演变过程,可提前判断焊接过程是否会对产品造成意外损伤、加工风险,并可为焊接工艺参数的确定提供参考。

参考文献:

- [1] Rosenthal D. The theory of moving source of heat and its application to metal treatments[J]. Journal of Heat Transfer, 1946, 43(11): 849-866.
- [2] 雷卡林. 焊接热过程计算[M]. 庄鸿寿, 徐碧宇, 译. 北京: 中国工业出版社, 1958.
- [3] Nguyen N T, Ohta A, Matsuoka K, et al. Analytical solutions for transient temperatures of semi-infinite body subjected to 3-D moving heat source[J]. Welding Journal, 1999, 78(8): 265-274.
- [4] Ghosh A, Chattopadhyaya S. Analytical solutions for transient temperatures distribution of semi-infinite body subjected to 3-D moving heat source of submerged arc welding process[J]. Welding Journal, 2004, 83(3): 82-93.
- [5] Pardo E. Prediction of weld pool and reinforcement dimensions of MIG/MAG welds using a finite-element model[J]. Metallurgical and Materials Transactions; B, 1989, 20(12): 937-947.
- [6] Tekriwal P, Mazumder J. Finite element analysis of three-dimensional transient heat transfer in GMA welding[J]. Welding Journal, 1988, 67(7): 150-156.
- [7] Kumar S, Bhaduri S C. Three-dimensional finite element modeling of gas metal arc welding[J]. Metallurgical and Materials Transactions; B, 1994, 25(6): 435-441.
- [8] 刘敏, 陈士宣, 康继东, 等. 钛合金平板电子束焊接残余应力数值分析[J]. 航空动力学报, 2001, 16(1): 63-66.
LIU Min, CHEN Shixuan, KANG Jidong, et al. Numerical model for the temperature and stress fields of moving EBW in titanium alloy plates[J]. Journal of Aerospace Power, 2001, 16(1): 63-66. (in Chinese)
- [9] 曾庆继, 徐连勇, 韩永典, 等. 钛合金(TC4)电子束焊接模拟[J]. 焊接学报, 2014, 35(11): 109-113.
ZENG Qingji, XU Lianyong, HAN Yongdian, et al. Finite element numerical simulation of electron beam welding of TC4 titanium alloy[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2014, 35(11): 109-113. (in Chinese)
- [10] 陈细亮, 卜文德, 柯黎明, 等. 6 mm 厚高温合金电子束焊接温度场数值模拟[J]. 南昌航空大学学报, 2014, 28(1): 21-26.
CHEN Xiliang, BU Wende, KE Liming, et al. Numerical simulation on electron beam welding temperature field of 6 mm-thickness heat-resisting superalloy [J]. Journal of Nanchang Hangkong University, 2014, 28(1): 21-26. (in Chinese)
- [11] 王西昌, 左从进, 刘方军, 等. 基于 SYSWELD 软件的 TC4 电子束焊接过程的数值模拟[J]. 新技术新工艺, 2007, 1(1): 8-11.
WANG Xichang, ZUO Congjin, LIU Fangjun, et al. Numerical simulation of the EBW of TC4 alloy plate based on SYSWELD[J]. New Technology and New Process, 2007, 1(1): 8-11. (in Chinese)
- [12] 罗怡, 刘金合, 叶宏, 等. AZ61 镁合金真空电子束焊接温度场数值模拟[J]. 焊接学报, 2009, 30(3): 73-76.
LUO Yi, LIU Jinhe, YE Hong, et al. Numerical simulation on temperature field of electron beam welding of AZ61 magnesium alloy[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2009, 30(3): 73-76. (in Chinese)
- [13] 王堃, 蔡强顺. 电子束焊接熔池流场数值模拟研究[J]. 火

箭推进,2015,41(1):98-104.

WANG Kun, CAI Qiangshun. Numerical simulation of EBW pool fluid flow field[J]. Journal of Rocket Propulsion,2015,41(1):98-104. (in Chinese)

[14] 杜则裕,李亚江,邹增大,等. 材料焊接科学基础[M]. 北京:机械工业出版社,2012.

[15] 邱葭菲,陈云祥,王瑞权,等. 焊接方法与设备使用[M]. 北京:机械工业出版社,2013.

[16] 武传松. 焊接热过程与熔池形态[M]. 北京:机械工业出版社,2007.

[17] 《中国航空材料手册》编辑委员会. 中国航空材料手册[M]. 北京:中国标准出版社,1988.

[18] 王狂飞,历长云,崔红保,等. 钛合金成形过程数值模拟[M]. 北京:冶金工业出版社,2009.

(编辑:王碧琚)