

电子束焊接熔池流场数值模拟研究

王 堃¹, 蔡强顺²

(1. 海装西安局, 陕西 西安 710065; 2. 西安航天发动机厂, 陕西 西安 710100)

摘 要: 基于电子束焊接“钉型”焊缝特征, 建立了高斯面和旋转高斯衰减体复合热源模型, 采用 ANSYS FLOTTRAN CFD 有限元软件, 对焊接熔池流场进行了数值模拟, 研究了熔池内液态金属在温度场作用下涡漩流动过程, 电子束、熔池、液态金属蒸汽之间相互作用关系, 电子束匙孔效应、匙孔壁能量传递方式, 熔深方向液态金属流动机理等; 将 316L 不锈钢热物性参数输入复合热源模型, 通过仿真计算, 得到了 316L 不锈钢焊接工艺规范, 即加速电压为 60 kV, 电子束流为 30 mA, 焊接速度为 8 mm/s, 采用该规范焊接的 316L 不锈钢试件焊缝拉伸强度为 425 MPa, 满足设计要求。通过对比数值模拟与实际焊接结果表明: 模拟熔池形貌与实际焊缝形貌一致, 数值计算结果与焊接试验结果相吻合, 从而证明复合热源模型是正确和适用的。

关键词: 电子束焊接; 流场; 热源模型; 316L 不锈钢

中图分类号: V434-34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2015) 01-0098-07

Numerical simulation of EBW pool fluid flow field

WANG Kun¹, CAI Qiang-shun²

(1. Xi'an Bureau, Naval Equipment Department of China, Xi'an 710065, China

2. Xi'an Space Engine Factory, Xi'an 710100, China)

Abstract: Gauss area and rotary Gauss decay body hybrid heat source model was established based on the seam feature of nail-shaped electron beam welding (EBW). The weld pool fluid flow field in EBW was simulated numerically with the finite element software ANSYS FLOTTRAN CFD. The vortex flow of liquid-state metal in weld pool under temperature field, interaction among electron beam, weld pool and liquid-state metal vapor, electron beam keyhole effect and energy transmission pattern of keyhole wall as well as liquid-state metal flow mechanism along welding penetration were investigated. The welding specifications (60 kV accelerating voltage, 30 mA electron beam current and 8 mm/s welding speed) of 316L stainless steel were obtained by simulation calculation and solution that inputs thermophysical properties of 316L stainless steel into hybrid heat source model. Applying the above specifications, the welded joint tensile strength of 316L stainless steel specimen reached 425 MPa, which satisfies the design requirement. The comparison result of simulated weld

收稿日期: 2014-07-18; 修回日期: 2014-08-29

作者简介: 王堃 (1983—), 男, 工程师, 研究领域为机械电子工程

shape and actual weld shape indicates that numerical calculation results is in accordance with actual testing results, which proves the validity and applicability of the heat source model.

Keywords: electron beam welding; flow field; heat source model; 316L stainless steel

0 引言

电子束焊接(EBW)是在真空条件下利用汇聚的高速电子束流轰击工件接缝,将电子动能转变为热能,使被焊金属熔合的一种焊接方法。电子束焊接能量密度高,焊接深宽比大,焊接变形量小,焊接精度高,焊接质量稳定,易于实现自动化控制,广泛应用于航空、航天、兵器、电子、核工业等领域^[1,2]。

电子束能量密度高,瞬间可产生“匙孔”效应,传统的二维热源模型无法体现电子束在工件深度方向的挖掘作用,考虑了深度方向能量吸收的体热源,才能获得更为准确的模拟结果。目前

数值模拟研究主要集中在焊接过程温度场与应力场的分布领域^[3-5],而对匙孔内液态金属流动和驱动力的作用过程研究甚少。本文运用数值模拟建立由表面热源和内部体热源组成的复合热源模型,对电子束焊接熔池流场进行数值分析,从而得出最佳焊接工艺规范,以 316L 不锈钢为例,通过比较数值模拟与焊接试验结果,以验证复合热源模型的正确性和适用性。

1 不锈钢电子束焊接设计要求

为满足使用要求,设计文件对不锈钢工件(厚度 $\delta=20\text{ mm}$) 电子束焊接质量要求见表 1。

表 1 焊缝质量要求
Tab. 1 Quality requirements of welding seam

项 目	质量要求
力学性能	焊缝抗拉强度要求达到母材抗拉强度 80%以上
焊缝颜色	焊缝及其近缝区的颜色与母材颜色相近
焊缝表面	焊缝表面不允许有裂纹、烧穿等缺陷
焊缝宽度	正面焊缝宽度 $\geq 2\text{ mm}$
焊缝余高	焊缝余高 $<6.25\text{ mm}$
焊缝内部裂纹、未熔合	不允许
焊缝内气孔	单个气孔直径 $<\Phi 1.5\text{ mm}$

2 熔池流场数值模拟

2.1 模型与网格划分

本文采用 VOF 算法^[6]建立二维有限元模型,模型尺寸为 $20\text{ mm}\times 20\text{ mm}$,考虑熔池的流动性,在模型的上部建立了一个假想区域,流场模型分为焊缝区、固态区和流体流出区。由于熔池结构

是对称的,所以可取熔池流场模型的一半进行数值模拟,对于熔池及其周围单元区域采用较为密集的细网格进行划分,以提高计算精度;对于远离熔池的单元区域采用粗网进行格划分,以提高计算效率。流场模拟的单元为 FLUID141^[7],该单元可以用来建立流体和非流体区域瞬态或稳态流体模型,在流体区域求解粘性流体动量和能量守

恒方程,而在非流体区域求解能量方程^[8-9]。

蚀性能优良,应用范围广泛。316L 不锈钢热物性参数^[10-11]见表 2。

2.2 316L 不锈钢热物性参数

316L 为奥氏体不锈钢,焊接性能良好,耐腐

表 2 316L 不锈钢热物性参数

Tab. 2 Thermophysical properties of 316L stainless steel

温度/℃	密度/(kg·m ⁻³)	比热/(J·Kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	导热系数/(W·m·K ⁻¹)	焓×10 ³ /(J·m ⁻³)
20	7 966	0.470	13.31	9.76
200	7 893	0.508	16.33	1.75
400	7 814	0.550	19.47	2.59
600	7 724	0.592	22.38	3.48
800	7 630	0.634	25.07	4.41
900	7 583	0.655	26.33	4.90
1 000	7 535	0.676	27.53	5.40
1 200	7 436	0.719	29.76	6.49
1 420	7 320	0.765	31.95	7.42
1 460	7 320	0.765	32.0	8.79

2.3 控制方程

假设熔池内的流体是粘性不可压缩牛顿流体,液态金属做层流流动,并考虑到熔池内对流、传导、传热等因素。质量守恒方程为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho T) + \nabla \cdot (\rho \vec{V} T) = \nabla \cdot \left(\frac{k}{c} \nabla T \right) + S_T \quad (1)$$

式中: c 为比热; k 为导热系数; T 为温度; ρ 为密度。

2.4 流动边界条件

液体金属在表面张力作用下产生流动,表面的速度边界条件为

$$\mu \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{\partial \sigma}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2)$$

$$\mu \frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\partial \sigma}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial y} \quad (3)$$

$$w=0 \quad (4)$$

式中: μ 为粘度系数; σ 是液态金属的表面张力。

根据对称性,液态金属不能通过对称面,因此对称面内速度边界条件为

$$v=0; \frac{\partial u}{\partial y} = \frac{\partial v}{\partial y} = \frac{\partial w}{\partial y} = 0 \quad (5)$$

2.5 热源模型

电子束焊“钉头”状焊缝热源模型为复合热源模型,即由表面热源和内部体热源组成的复合热源模型,表面热源采用高斯面热源模型。

高斯面热源模型的数学表达式为^[12-13]

$$q_s = \frac{3Q_s}{2\pi r_s^2} \cdot \exp\left(\frac{-3r^2}{r_s^2}\right) \quad (6)$$

式中: q_s 为面热源模型能量密度; Q_s 为面热源模型的总能量; r_s 为面热源模型的热流分布半径; r 为任意一点到热源中心的距离。

电子束对熔池具有一定的冲击力可产生穿透作用,同时在金属蒸汽反冲力的作用下可形成深宽比大的焊缝^[14],此时,可采用旋转高斯体热源模型进行数值模拟,该模型还可兼顾电子束焊接匙孔效应、匙孔壁能量传递以及电子束焊接有效加热半径小的物理效应。

旋转高斯体热源模型函数为

$$q_v = q_v(0,0) \exp \left[\frac{-9}{\log \left(\frac{H}{z} \right) R_0^2} r_v^2 \right] \quad (7)$$

$$q_v(0,0) = \frac{3c_s Q_v}{\pi H \left(1 - \frac{1}{3} \right)} \quad (8)$$

式中: Q_v 为体热源的输入功率; r_v 为 z 方向平面上任意一点距离 z 轴中心的距离; H 为热源高度; c_s 为热源形状参数; R_0 为体热源开口端面半径。

$$q_v = q_v(0,0) \cdot u(z) \cdot \exp \left[\frac{-9}{\log \left(\frac{H}{z} \right) R_0^2} r_v^2 \right] \quad (9)$$

假设电子束焊接的有效功率为 Q 。复合热源模型中,面热源和体热源的功率分别为 Q_s 和 Q_v 。则有

$$Q = Q_s + Q_v = \eta U I_b \quad (10)$$

设面热源所占总功率的功率系数为 γ , 则有:

$$Q_s = \gamma Q = \gamma \eta U I_b \quad (11)$$

式中: U 为电子束加速电压; I_b 为电子束束流强度。

复合热源模型由旋转高斯体热源模型和表面高斯面热源模型复合而成,复合热源模型见图1。

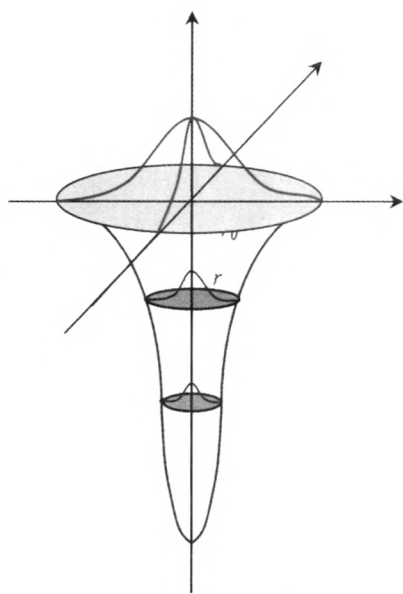


图1 复合热源模型示意图

Fig. 1 Hybrid heat source model

2.6 数值模拟流程

图2为数值模拟求解计算流程框图,求解控制方程由ANSYS软件中的FLOTTRAN CFD模块完成,具体计算过程为:将表2中316L不锈钢热物性参数和公式(6)~公式(11)运用到公式(1)中求解,得到有限元体的温度参数,温度高于熔点即为液态区,结合流动边界条件公式(2)~公式(5),采用有限体积法(FVM)离散控制方程^[15],用SIMPLE算法处理速度与压力的耦合关系,求解动量方程,即可得出流场分布。

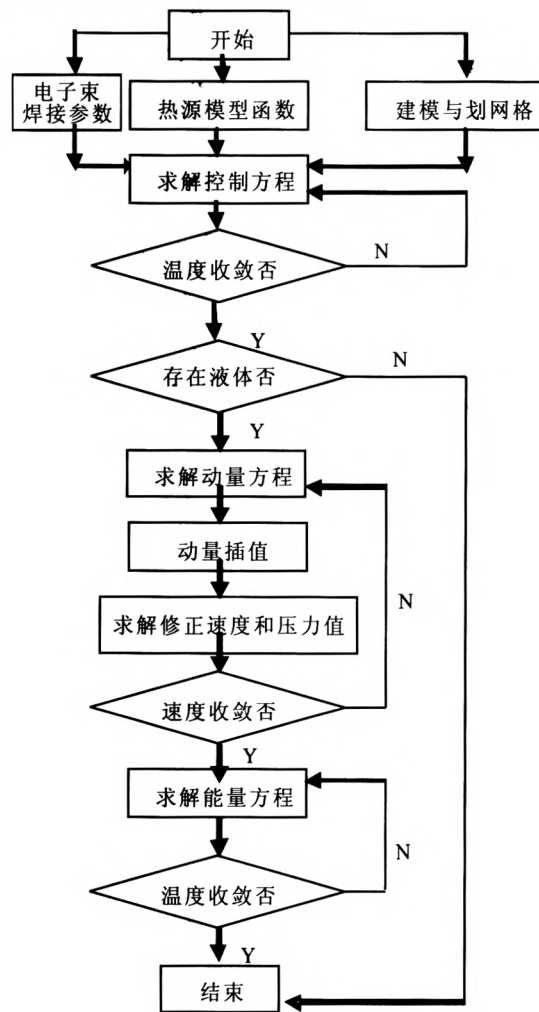


图2 模拟计算流程框图

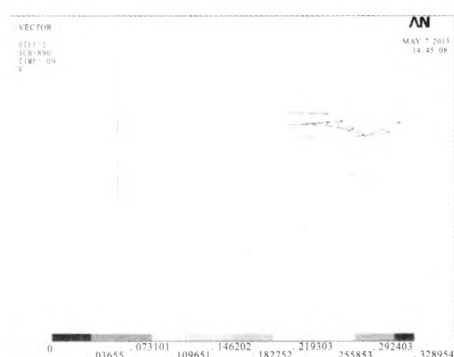
Fig. 2 Flowsheet of analog computation

2.7 数值模拟结果

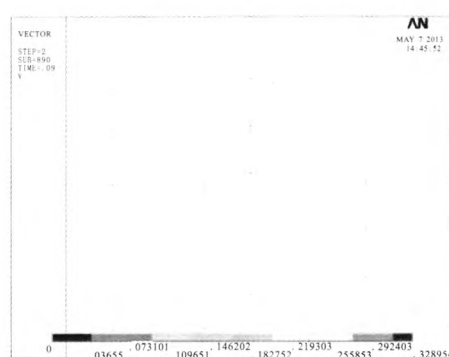
图3为匙孔形成过程(90 ms时刻)熔池不同位置处液态金属的流场图。由图3(a)可见,焊接过程中,在高速电子束流轰击作用下,金属表

面形成熔池, 熔池中心区出现凹陷, 同时熔池中心位置向周边移动, 熔池内液态金属在温度场作用下发生流动, 表面张力由熔池中心指向熔池边缘, 液态金属从表面张力高的中心位置处向表面张力低的边缘处流动, 即液态金属由里向外流动, 一直流至固-液界面处而发生转向, 再次流入熔池内部, 从而形成顺时针方向的涡漩。由图 3(b)可见, 匙孔壁和固-液界面中间位置处液态金属流动速度较大, 而两侧处液态金属流动速度

较小, 这是由于两侧处液态金属受到固态金属和匙孔蒸汽摩擦力阻碍所致。熔池内部液态金属是由下向上运动的, 这是由金属蒸汽反冲压力作用所致, 但由于液态金属流速较小, 并没有像表面金属那样形成闭合涡流。在熔深方向, 液态金属流动速度随熔深增大而减小, 在金属蒸汽反冲力作用下, 液态金属向上流动, 熔深越大金属蒸汽反冲力越小, 因此液态金属流动速度随熔深增大而减小。匙孔底部的液态金属流动不明显。



(a) 熔池上部液态金属流场矢量图



(b) 熔池中部液态金属流场矢量图

图 3 熔池不同位置处液态金属流场矢量图

Fig. 3 Vector diagram of liquid-state metal flow field at different positions of weld pool

以 316L 不锈钢作为焊接试件, 采用上述复合热源模型, 按照图 2 所示模拟计算流程框图的流程进行数值模拟, 即可得到 316L 不锈钢试件电子束焊接最佳工艺规范。第 1 组电子束焊接工艺参数为: 加速电压 60 KV, 电子束流 30 mA, 焊接速度 8 mm/s。第 2 组电子束焊接工艺参数为: 加速电压 60 KV, 电子束流 20 mA, 焊接速度 8 mm/s; 第 3 组电子束焊接工艺参数为: 加速电压 60 kV, 电子束流 40 mA, 焊接速度 8 mm/s。运用 ANSYS FLOTTRAN CFD 模块, 数值仿真 3 组焊接工艺参数, 可以得到 3 组焊接工艺参数下的数值仿真模拟结果, 即熔深与焊接参数之间的关系曲线, 见图 4。

由图 4 可见, 焊接参数 2 焊接的熔深太浅, 出现了未焊透现象; 焊接参数 3 焊接的熔深过大, 易造成焊穿等缺陷; 焊接参数一焊接所得的熔深与母材厚度 ($\delta=20$ mm) 基本相同。由此可以得到 316L 不锈钢工件最佳电子束焊接工艺规

范, 即电子束加速电压 60 kV, 电子束流 30 mA, 焊接速度 8 mm/s。

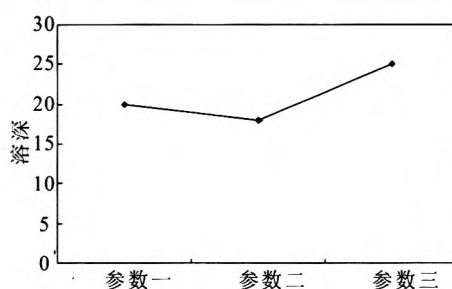


图 4 熔深与焊接参数数值模拟曲线

Fig. 4 Simulation curve of welding penetration with different welding parameters

3 316L 不锈钢试件焊接

采用 316L 不锈钢电子束最佳焊接工艺规范, 用两块 316L 不锈钢平板按照图 5 所示的电子束

焊接工艺流程完成了电子束焊接工艺试验, 两块 316L 不锈钢平板尺寸均为: $L(\text{长}) \times W(\text{宽}) \times H(\text{厚}) = 80 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ 。图 5 为 316L 不锈钢电子束焊接工艺流程框图, 焊接设备为 KL110 型脉冲真空电子束焊机。

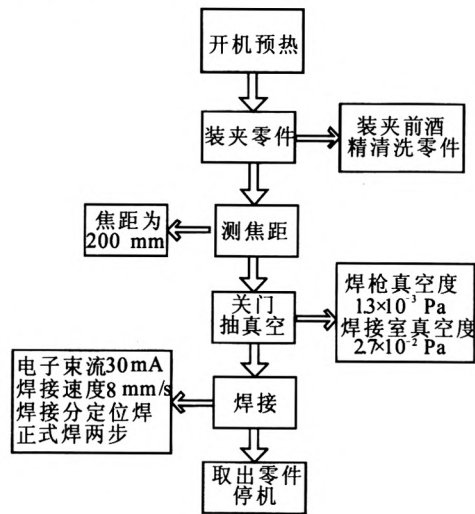


图 5 电子束焊接工艺流程框图
Fig. 5 Flowsheet of EBW

316L 不锈钢试件完成电子束焊接后, 经检测和检查焊缝质量结果见表 3。

316L 不锈钢试件电子束焊接工艺试验结果表明: 焊缝外观及其内部质量均达到了设计要求, 焊缝拉伸强度为 425 MPa, 达到了母材抗拉伸强度 (母材抗拉伸强度 $\sigma_b \leq 520 \text{ MPa}$) 的 80% 以上, 由此证明了复合热源模型的正确性和适用性, 同时也得到了母材厚度 $\delta=20 \text{ mm}$ 的 316L 不锈钢电子束焊接最佳工艺规范。



图 6 模拟的熔池形貌与实际焊缝金相形貌对比图片
Fig. 6 Comparison of simulated weld shape with actual weld joint metallographical morphology

表 3 316L 不锈钢试件焊缝质量
Tab. 3 Welding seam quality of 316L stainless steel specimen

焊缝质量	焊缝质量设计要求	实际焊缝质量
力学性能	焊缝抗拉强度要求达到母材抗拉强度 80% 以上	实际焊缝拉伸强度为 425 MPa, 达到了母材抗拉伸强度 (母材抗拉伸的 82% 强度 $\sigma_b \leq 520 \text{ MPa}$)
焊缝颜色	焊缝及其近缝区的颜色与母材颜色相近	颜色相近
焊缝表面	焊缝表面不允许有裂纹、烧穿等缺陷	无
焊缝宽度	正面焊缝宽度 $\geq 2 \text{ mm}$	正面焊缝宽度为 2.6 mm
焊缝余高	焊缝余高 $< 6.25 \text{ mm}$	焊缝余高为 2.5 mm
内部裂纹、未熔合	不允许	无
气孔	单个气孔直径 $< \Phi 1.5 \text{ mm}$	无

图 6 是采用复合热源模型, 运用图 2 所示的模拟计算流程框图的流程, 通过 ANSYS FLOTTRAN CFD 模块模拟的 316L 不锈钢熔池结果 (图 6 右侧) 与 316L 不锈钢采用上述最佳焊接工

艺规范焊接的实际焊缝横截面金相形貌 (图 6 左侧) 的比较结果图片。由图 6 可见, 两者均具有深宽比较大的“钉形”特征, 外观形状非常吻合, 而且熔点附近的等温线与实际焊缝的熔合线

轮廓也非常相近,由此证明,复合热源模型是正确的和适用的,模拟的 $\delta=20\text{ mm}$ 厚 316L 不锈钢电子束焊接流场是正确的和合理的。

4 结 论

通过研究电子束焊接“钉型”焊缝机理,采用复合热源模型,即高斯面和旋转高斯衰减体复合热源模型,运用 ANSYS FLOTTRAN CFD 有限元软件,得到了电子束焊接熔池流场数值模拟结果和 316L 不锈钢电子束焊接最佳工艺规范,即电子束加速电压为 60 kV,电子束流为 30 mA,焊接速度为 8 mm/s。采用该规范焊接的 316L 不锈钢试件焊缝拉伸强度为 425 MPa,达到了母材抗拉伸强度(母材抗拉伸强度 $\sigma_b \leq 520\text{ MPa}$)的 80%以上,满足设计要求,316L 不锈钢试件焊缝金相与 316L 不锈钢模拟熔池形貌图片比较表明:两者均具有深宽比较大的“钉形”特征,外观形状非常吻合,而且熔点附近的等温线与实际焊缝的熔合线轮廓也非常相近,由此证明,复合热源模型是正确的和适用的,模拟的 $\delta=20\text{ mm}$ 厚 316L 不锈钢电子束焊接流场是正确的和合理的。

参考文献:

[1] 何景山,张秉刚,张亚斌,等. 电子束深熔焊匙孔的研究现状[J]. 焊接, 2007 (6): 28-30.
 [2] 周琦,刘方军. 电子束深熔焊接过程匙孔动力学研究进展[J]. 焊接学报, 2001, 22(3): 88-92.
 [3] 汪建华. 焊接数值模拟技术及其应用[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2003.

[4] 陈芙蓉,霍立兴,张玉凤. 电子束焊接技术在工业中的应用与发展[J]. 电子工艺技术, 2002, 23(2): 56-58.
 [5] 倪红芳,凌祥,涂善东. 多道焊三维残余应力场有限元模拟[J]. 机械强度, 2004, 26(2): 218-222.
 [6] HIRT C W, NICHOLS B D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundary [J]. Computer Physics, 1981 (39): 201-225.
 [7] CARMIGNANI C, MARES R, TOSELLI G. Transient finite element analysis of deep penetration laser welding process in a single pass butt welded thick steel plate [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1999, 179(3): 197-214.
 [8] 吴甦,赵海燕,王煜,等. 高能束焊接数值模拟中的新型热源模型[J]. 焊接学报, 2004, 25(1): 91-94.
 [9] ANTHONY T R, CLINE H E. Surface rippling induced by surface tension gradients during laser surface melting and alloying[J]. Journal of Applied Physics, 1977, 48(9): 3888-3894.
 [10] 李春胜,黄德彬. 金属材料手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 587-596.
 [11] 丁启湛,丁成钢,史春园. 不锈钢的焊接[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009: 35-36.
 [12] 刘黎明,迟鸣声,宋刚,等. 镁合金激光-TIG 复合热源焊接热源模型[J]. 机械工程学报, 2006, 42(2): 82-85.
 [13] ARATA Y, ABE E, NABEGATA E N. Dynamic welding phenomena during EB-welding[C]//4th International Colloquium on Welding and Melting by Electron and Laser Beam. France: CEN SACLAY, 1988: 21-40.
 [14] 霍厚志. 激光深熔焊过程仿真技术[D]. 太原: 太原科技大学, 2009.
 [15] 赵勇. 基于力学平衡条件电子束焊接匙孔形态的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.

(编辑: 陈红霞)