

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2024.03.04

电脉冲轧制6061Al电热耦合模型及 电弧加热机理分析

闫志航¹, 王文先^{1*}, 卞功波¹, 张 涵¹, 张婷婷²

1. 太原理工大学 材料科学与工程学院, 山西 太原 030024

2. 太原理工大学 机械与运载学院, 山西 太原 030024

摘要: 通过COMSOL Multiphysics仿真软件模拟高频脉冲电流激励时两板间界面处电弧的产生。讨论了在高频脉冲电流激励下, 两块具有一定角度的金属板在电脉冲辅助轧制过程中界面处产生电弧的条件, 并结合电磁学分析了电弧的形成机理。结果表明, 在电脉冲辅助轧制过程中, 除了焦耳加热外, 还存在电弧加热现象, 当加载300 A电流和10 kHz频率时, 可以产生电弧并使两块铝板结合形成焊点。随着电流的增加, 电弧温度和电势差也相应增加。在800 A电流下, 电弧温度可达4 210 K, 电势差可达54.5 V, 已达到电弧形成的条件, 但产生的电弧并不稳定。电弧的存在不仅瞬间加热了板材, 提高了界面结合强度, 而且在电弧力的作用下更容易形成波纹界面。模拟结果显示, 加载800 A电流下可以产生超过4 000 K的电弧, 并且在第一个脉冲周期内形成; 并拟合了电弧产生的热源方程; 为电脉冲辅助轧制研究提供了新思路。

关键词: 电脉冲轧制; 电弧热分析; 超声波电弧; 高频脉冲电流; 粗糙表面

中图分类号: TG335.11 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2024)03-0024-06

Modeling of Electrothermal Coupling and Analysis of Arc Heating Mechanism of 6061Al in Electric Pulse Rolling

YAN Zhihang¹, WANG Wenxian^{1*}, BIAN Gongbo¹, ZHANG Han¹, ZHANG Tingting²

1. College of Materials Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China

2. College of Mechanical and Vehicle Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China

Abstract: In this article, the COMSOL Multiphysics simulation software is used to simulate the generation of arcs in a circuit when excited by a high-frequency pulsed current. Under the excitation of high-frequency pulse current, the conditions of arc generation near the surface tip of two metal plates with a certain angle and rough surface are discussed, and the formation mechanism of the arc is analyzed combined with electromagnetics. The results show that in the electric pulse-assisted rolling process, in addition to Joule heating, there is also the phenomenon of arc heating, which can generate an arc and cause two aluminum plates to combine to form a welded joint when loaded with a current of 300 A and a frequency of 10 kHz. As the current increases, the arc temperature and potential difference increase accordingly. At a current of 800 A, the arc temperature is 4 210 K and the potential difference is 54.5 V. The conditions for arc formation have been met, but the resulting arc is not stable. When loaded at 800 A, an arc of over 4 000 K can be generated and a welded joint formed within the first pulse cycle, and the heat source equation for arc generation is fitted.

Keywords: electric pulse assisted rolling; arc thermal analysis; ultrasonic arc; high-frequency pulse current; rough surface

引用格式: 闫志航, 王文先, 卞功波, 等. 电脉冲轧制6061Al电热耦合模型及电弧加热机理分析[J]. 电焊机, 2024, 54(3): 24-29.

Citation: YAN Zhihang, WANG Wenxian, BIAN Gongbo, et al. Modeling of Electrothermal Coupling and Analysis of Arc Heating Mechanism of 6061Al in Electric Pulse Rolling[J]. Electric Welding Machine, 2024, 54(3): 24-29.

收稿日期: 2023-04-12 修回日期: 2024-01-21

基金项目: 国家自然科学基金(52075360)

作者简介: 闫志航(1997—), 男, 硕士, 主要从事先进材料连接及其界面行为。

通讯作者: 王文先(1963—), 男, 教授, 博士。E-mail: wangwenxian@tyut.edu.cn。

0 引言

电脉冲辅助轧制是一种新的成形技术,可以有效提高金属的可加工性^[1-3]。电脉冲辅助轧制中脉冲电流的作用机理分为热效应和非热效应。热效应被认为是局部焦耳加热,即电阻加热^[4-5],非热效应是电子风力^[6-7]、磁效应^[8]和原子键弱化^[9]。然而,在实际电脉冲辅助轧制过程中,出现了电火花以及材料的局部融化,而在焦耳加热的单独作用下是无法达到任一材料的熔点,这表明在电脉冲辅助轧制过程中存在焦耳加热以外的加热模式。高频电源的引入允许在存在间隙的两个平板之间形成电弧^[10];在断路器的研究中,也会产生不稳定的电弧^[11];材料表面粗糙度的存在使得电流密度集中,从而更容易形成电弧。因此,推测在电脉冲辅助轧制过程中也可以形成电弧。

由于电弧产生所需时间短、温度高的特点,对板材表面的加热效果良好,电弧产生的冲击力可以去除氧化膜、金属间脆性等影响界面结合强度的因素,提高复合板材的性能。本文利用高频电流的趋肤效应和邻近效应,将电流密度集中在界面角,研究在界面夹角附近是否会产生电弧。在一端已经进入轧辊复合后形成通路,能否在两凸起间形成电弧进行了有限元数值模拟。

1 试验方法和模型细节

1.1 试验程序

试验过程使用高频电脉冲辅助轧制,如图1a所示,轧制的两块金属板均为铝板,在夹具之间以一定角度固定。两块铝板的一端已经通过轧制层压,电源的两极连接到两块铝板另一端。在实际试验中,板材表面一定处于粗糙状态,如图1b所示,这也为电弧产生创造了条件。在电脉冲辅助轧制过程中,会产生大而耀眼的电火花,层压后两块铝板上均出现许多焊点,如图1c所示。

数值模拟所建立的二维电弧模型如图1e所示。模型中的上极板与脉冲电源的正极相连,下极板与脉冲电流的负极相连,初始电流方向如箭头所示。使用两个凸块代替近尖端位置处的表面粗糙度,以

探索在近尖端处产生单个电弧。通过改变电流以及凸块之间的间距等参数,研究电弧产生所需的条件。模型中的两个铝板已结合区添加了具有等效粗糙度的等效电阻。脉冲电流波形如图1d所示。脉冲电流是占空比为50%的正弦高频交流电,即电流在周期中的 $T/4$ 和 $3T/4$ 达到其峰值,电流在 $T/2$ 时等于0,频率均为10 kHz以上。

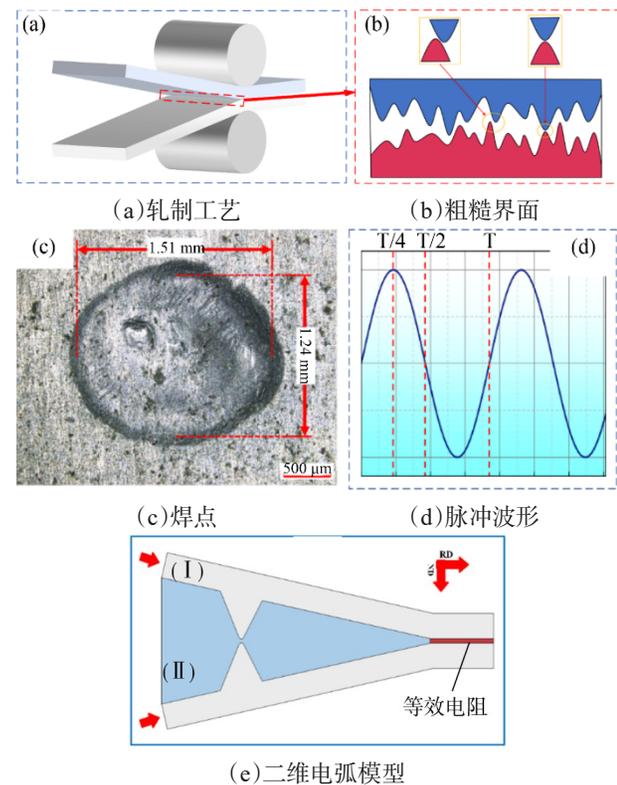


图1 轧制工艺及模型示意

Fig. 1 Rolling process and model diagram

1.2 基本假设和控制方程

采用以下假设来简化模型:电弧区处于局部热力学平衡状态;气体流动状态是蠕动流动,与金属蒸汽无关;此外,假设电弧等离子体在光学上是薄的。基本控制方程式如下:

电场方程:

$$\nabla \cdot J = Q_{j,v} \quad (1)$$

$$J = \sigma E + \frac{\partial D}{\partial t} + J_e \quad (2)$$

$$E = -\nabla V \quad (3)$$

磁场方程:

$$\nabla \times H = J \quad (4)$$

$$B = \nabla \times A \quad (5)$$

$$J = \sigma E + j\omega D + J_e \quad (6)$$

$$E = -j\omega A \quad (7)$$

式中 E 为电场强度, D 为磁通密度, H 为磁场强度, B 为磁通密度, J 为电流密度, σ 为介电常数。 ∇ 是向量的旋度, 这是 nabla 算子和向量函数叉积的结果。

电磁热耦合方程:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q_e \quad (8)$$

$$Q_e = Q_{rh} + Q_{ml} \quad (9)$$

$$Q_{rh} = \frac{1}{2} \operatorname{Re}(\mathbf{J} \cdot \mathbf{E}^*) \quad (10)$$

$$Q_{ml} = \frac{1}{2} \operatorname{Re}(i\omega \mathbf{B} \cdot \mathbf{H}^*) \quad (11)$$

非平衡热源方程:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q \quad (12)$$

$$Q = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{5k_B T}{2q} \right) (\nabla T \cdot \mathbf{J}) + E \cdot \mathbf{J} + Q_{rad} \quad (13)$$

洛伦兹力方程:

$$F = \mathbf{J} \times \mathbf{B} \quad (14)$$

式中 C_p 为恒压比热容 [单位: $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$]; T 为开尔文温度 (单位: K); ρ 为固体密度 (单位: kg/m^3); \mathbf{u} 为当模型的一部分在材料中移动时由平移运动子节点定义的速度场 (单位: m/s); k 为固体导热系数; Q_e 为热源电磁损耗, Q_{rh} 是电阻损耗, Q_{ml} 是磁损耗 (单位: W/m^3)。

1.3 计算域和边界条件

为了获得精确的计算结果并促进模型收敛, 使用了用户定义的网格类型, 三角形和四边形网格, 网格总数为 15 394, 最小质量元素为 0.504 1, 平均元素质量为 0.888 2。具体信息如图 2a 所示。在拟

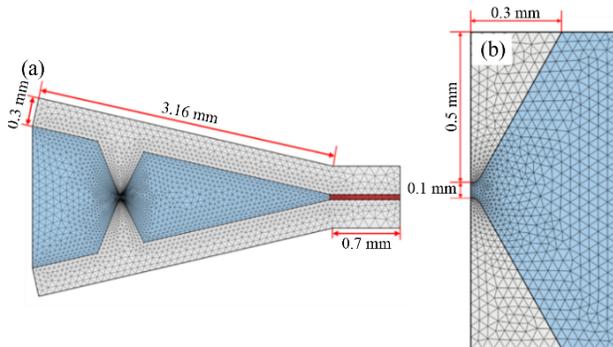


图2 有限元模型网格和尺寸

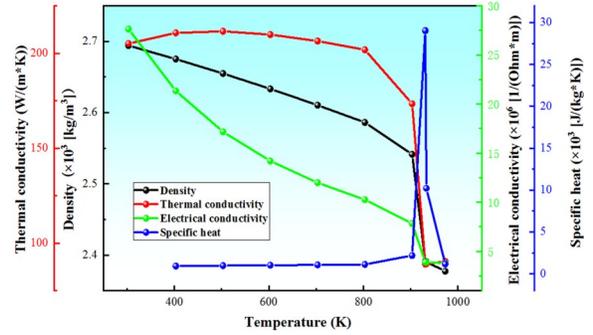
Fig. 2 Finite element model mesh and dimension information

合热源模型中, 使用三角形网格, 网格总数为 1 449, 最小质量元素为 0.625 9, 平均元素质量为 0.895, 如图 2b 所示。模型中的固体材料为 6061Al, 其化学成分如表 1 所示, 其温度相关的热物理参数由 JmatPro 软件计算, 如图 3a 所示。模型中的流体区域材料是空气, 其温度相关的热物理参数由 COMSOL 软件内置给出, 如图 3b 所示。

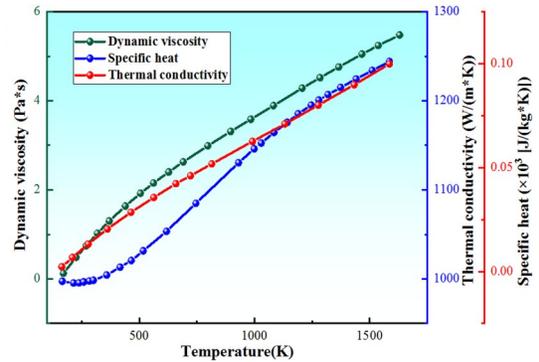
表 1 6061Al 的化学成分 (质量分数, %)

Table 1 Chemical composition of 6061Al (wt. %)

Cu	Mn	Mg	Zn	Cr	Ti	Si	Fe
0.15	0.15	0.8	0.25	0.04	0.15	0.4	0.1



(a) Al6061 材料的热物理参数



(b) 空气材料的热物理参数

图3 模型所用到的材料物性参数

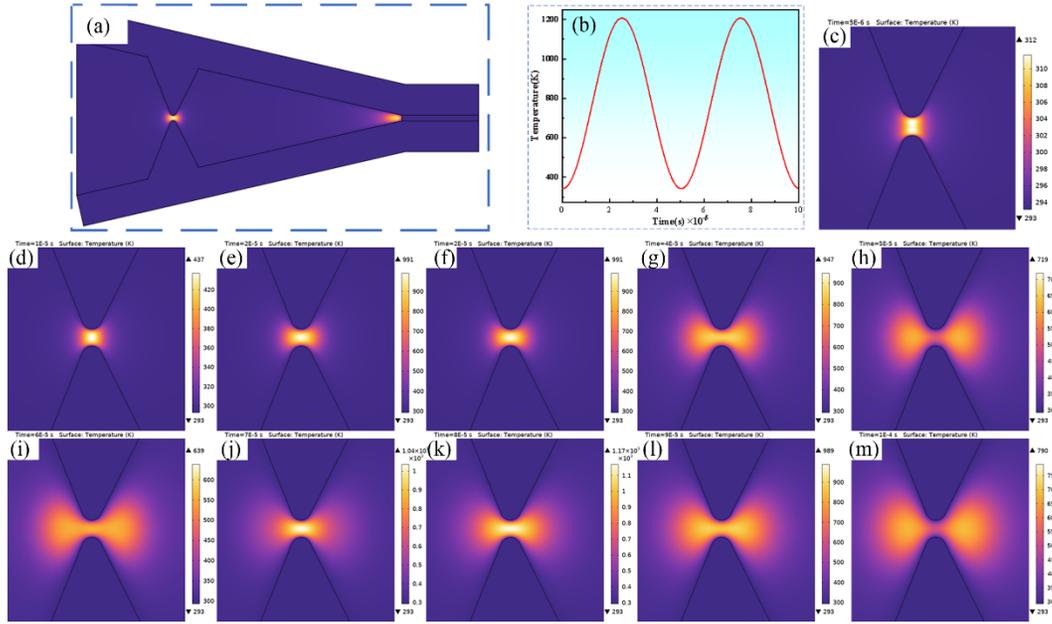
Fig. 3 Physical property parameters of materials used in the model

2 结果和讨论

在试验过程中, 加载 300 A、10 kHz 电流的电脉冲辅助轧制之后, 铝板上出现了焊接接头, 如图 1a 所示。但在实际温度测量过程中, 整个装置外表面的温度最大值仅为 600 K, 不满足焊接接头出现的条件。因此, 假设在电脉冲辅助轧制过程中存在除焦耳加热之外的加热机制。因此, 对这一现象进行

了有限元模拟。计算了 300 A 电流、10 kHz 频率下的温度分布。图 4a 为整个空间的温度分布, 其中产生的热量集中在两个凸起之间, 有少量分布在夹角处。图 4b 为一个脉冲周期的温度变化曲线。在一个周期内, 温度随电流脉冲变化而变化。也就是说, 温度在 $T/4$ 与 $3T/4$ 时达到 1 200 K 以上的最大值。图 4c~4m 为一个周期内电弧形态的变化。电

弧呈现椭圆凹形, 与焊接电弧的椭球形或双椭球形^[12]不同, 电脉冲辅助轧制形成的电弧将由上下凸起之间的间距以及曲率确定, 但大致呈现椭圆凹形状。电弧形态将随着时间不断扩大, 电弧温度将随图 4b 中的曲线变化。因此, 在 10 kHz 频率下, 电弧会在 2.5×10^{-5} s 内形成, 即 1/4 个周期内形成^[13], 并在 2.5×10^{-5} s 时第一次达到温度最大值。



(a)整体温度分布; (b)温度变化曲线; (c)~(m)半个周期内的温度变化

图 4 300 A、10 kHz 下温度分布

Fig. 4 Temperature distribution at 300 A, 10 kHz

为了研究不同电流对温度和电场的影响, 分别在 300 A、500 A 和 800 A 电流下进行了模拟。图 5a、5b 分别显示了前半周期两凸起之间的温度和电势差变化曲线。随着负载电流值的增加, 两个凸起之间的电弧温度和电势差增加。在 300 A、500 A、800 A 时, 电弧温度分别达到 1 190 K、2 080 K、4 210 K, 并且电弧面积随着电流值的增加而扩大; 两凸起之间的电势差分别达 20.5 V、34.1 V、54.5 V。电弧温度和电势差都达到电弧形成的条件^[14]。对于 6061 铝合金的电脉冲处理, 理论上电弧温度达到氧化铝的熔点 2 327 K 时, 就可以去除表面氧化膜, 露出新鲜的金属, 以达到更好的复合效果。当加载电流为 800 A 时, 电弧温度远大于 2 327 K, 达到去除板材表面氧化铝的条件。

为了得到电弧的热源方程, 对二维电弧模型进行重新建模计算。重新建立的模型是一个二维旋

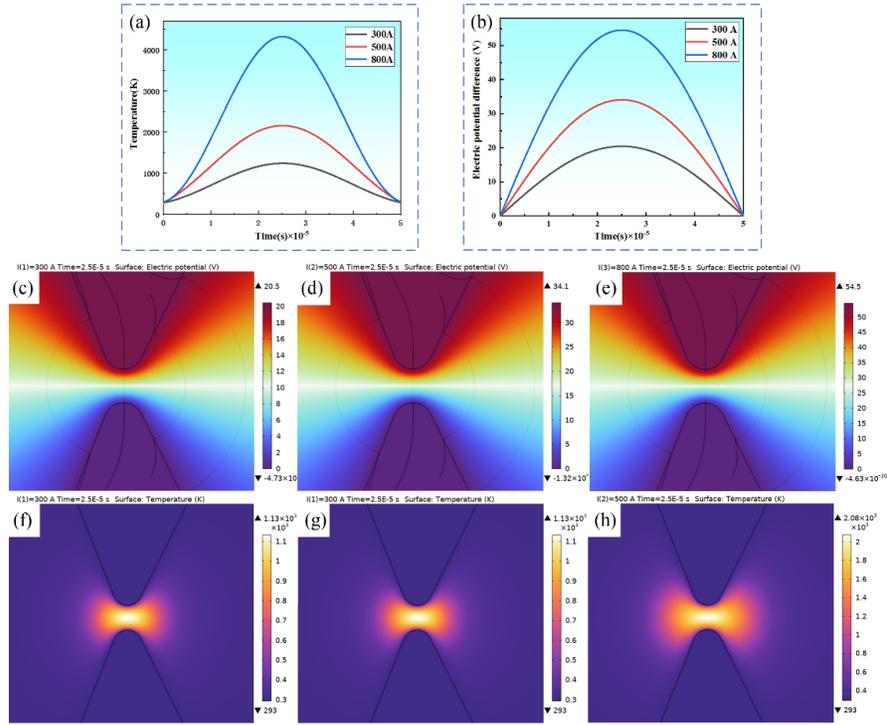
转模型, 模型和网格划分见图 6a, 其中最左侧的旋转轴模拟了两个凸起之间的电弧形态。在添加边界条件时, 在两个凸起的上端和下端直接加入了等效于二维模型的脉冲电压。模拟结果中的温度分布见图 6b。与二维模型相比, 电弧形态和电弧温度高度一致, 因此该模型用于拟合电弧热源方程。

双椭球热源和高斯热源是用于模拟弧焊过程的常用热源模型。在该模拟中, 高斯热源被用作参考来拟合生成的电弧。采用切片法对形成的热源进行拟合, 即分别拟合 $x-z$ 平面与 $x-y$ 平面联合表示热源方程。图 6c、6d、6e 分别表示 $x-z$ 平面内。图 6f、6g、6h 分别表示三个时刻的 $x-y$ 平面电弧三个时刻的温度分布及形态。

热通量密度满足如下高斯分布:

$$q(r) = q(0) \cdot e^{(-C \cdot r^2)} \tag{15}$$

式中 $q(r)$ 为半径 r 处的表面通量 (单位: W/m^2); q



(a)温度变化曲线;(b)电势变化曲线;(c)~(e)加载电流 300 A, 500 A, 800A 下的电场强度分布;(f)~(h)对应的温度分布

图 5 不同电流下温度及电势分布

Fig. 5 Temperature and potential distribution at 300 A, 500 A, and 800 A

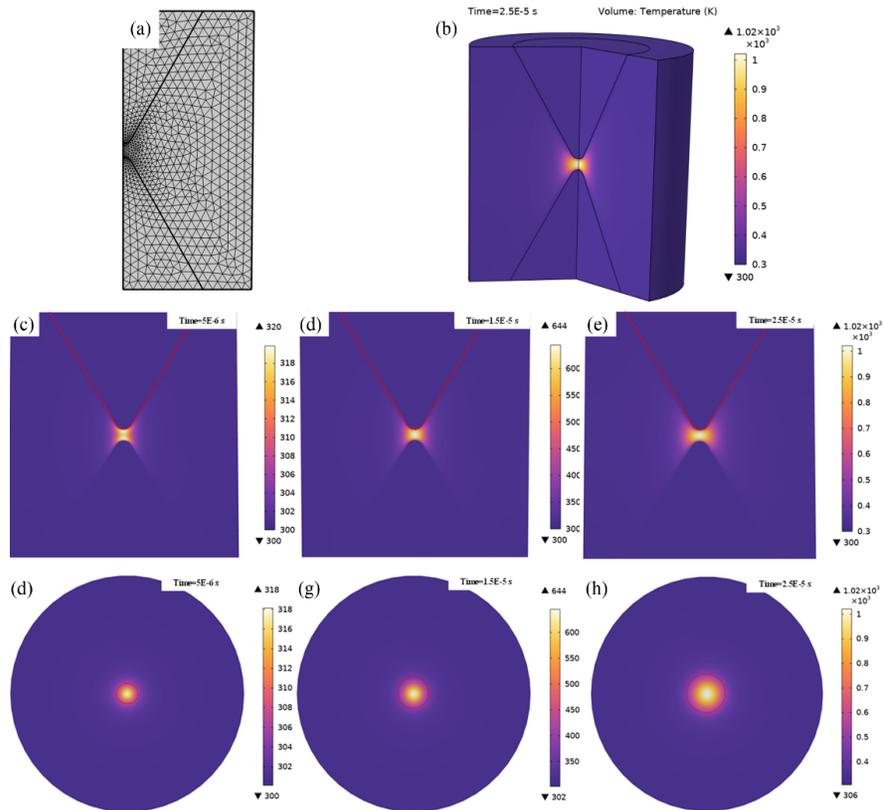


图 6 重建模型及结果

Fig. 6 Reconstruction model and results

(0)为热源中心的最大通量(单位:W/m²); C 为浓度系数(单位:m⁻²); r 为距热源中心的径向距离(单位:m)。

$$q = k \cdot S \cdot \frac{\partial \Delta T}{\partial d} \quad (16)$$

式中 k 是导热系数; S 是接触面积; d 是导热距离; ΔT 是温差。高斯热源的一个变体使用以下方程拟合得到图6e的热源方程。

$$q(r) = q_{max} \cdot e^{-(a \cdot x^2 + b \cdot z^2)} \quad (17)$$

拟合结果 $a=31.20$, $b=10.90$ 。

使用 Gauss2D 方程拟合图6h的热源方程:

$$q = q_{max} \cdot e^{\left(-0.5 \cdot \left(\frac{x-x_c}{w_1}\right)^2 - 0.5 \cdot \left(\frac{y-y_c}{w_2}\right)^2\right) + c} \quad (18)$$

式中 $x_c=0$, $y_c=0$, $w_1=w_2=0.05$, $c=35.04$ 。

3 结论

(1)当加载800 A的电流时,电脉冲辅助轧制工艺可以在两板的界面处产生温度为4 000 K或更高的电弧,但这不是稳定的焊接电弧,而是瞬时电弧,可用于铝合金板材的瞬时加热及氧化膜的去除。当加载更高的电流时,会产生更高温度的电弧。

(2)电脉冲辅助轧制后板材表面可以形成焊点,结合本研究的模拟可得出,加载高频电流时两板间可以达到产生电弧的条件,且电弧首次产生的时间为1/4个脉冲周期,电弧呈现椭圆凹形,由上下凸起之间的间距和曲率确定。加载更高频率的脉冲电流可以使一定时间内产生的电弧数量增加,即加热次数更多。

(3)采用切片法分别对两个方向的热源进行拟合,得到了有效的热源拟合方程。电弧的产生也为电脉冲辅助轧制提供了新的研究方向。

参考文献:

- [1] Roh J H, Seo J J, Hong S T, et al. The mechanical behavior of 5052-H32 aluminum alloys under a pulsed electric current [J]. *International Journal of Plasticity*, 2014, 58: 84-99.
- [2] Wang X, Xu J, Shan D, et al. Modeling of thermal and mechanical behavior of a magnesium alloy AZ31 during electrically-assisted micro-tension [J]. *International Journal of Plasticity*, 2016, 85: 230-257.
- [3] Ren X W, Wang Z J, Fang X, et al. The plastic flow model in the healing process of internal microcracks in pre-deformed TC4 sheet by pulse current [J]. *Materials & Design*, 2020, 188: 108428.
- [4] Rahnama A, Qin R. Room temperature texturing of austenite/ferrite steel by electropulsing [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 42732.
- [5] Zhang X, Li H, Zhan M, et al. Extraordinary effect of the δ phase on the electrically-assisted deformation responses of a Ni-based superalloy [J]. *Materials Characterization*, 2018, 144: 597-604.
- [6] Li D, Yu E, Liu Z. Microscopic mechanism and numerical calculation of electroplastic effect on metal's flow stress [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2013, 580: 410-413.
- [7] Zhang X, Li H, Zhan M, et al. Electron force-induced dislocations annihilation and regeneration of a superalloy through electrical in-situ transmission electron microscopy observations [J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2020, 36: 79-83.
- [8] Molotskii M, Fleurov V V. Magnetic effects in electroplasticity of metals [J]. *Phys Rev B Condens Matter*, 1995, 52(22): 15829-15834.
- [9] Kim M J, Yoon S, Park S, et al. Elucidating the origin of electroplasticity in metallic materials [J]. *Applied Materials Today*, 2020, 21: 100874.
- [10] Yang X D, Li X H, Li Q. Discharge crater formation simulation coupled by thermo-fluid analysis of arc plasma in EDM [J]. *Procedia CIRP*, 2020, 95: 232-237.
- [11] Guan C, Ding J, Yao X, et al. Study on Short-circuit current interruption characteristics of Double-break fast vacuum circuit breaker within the minimum arcing time [J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2023, 147: 108865.
- [12] Wu H, Chang Y, Guan Z, et al. Arc shape and microstructural analysis of TIG welding with an alternating cusp-shaped magnetic field [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2021, 289: 116912.
- [13] Wang B, Zhu D, Ding R, et al. Simulation of arc crater formation and evolution on plasma facing materials [J]. *Nuclear Materials and Energy*, 2021, 27: 100964.
- [14] Zhao S, Zhang C, Zhang Y, et al. Influence of Partial Arc on Electric Field Distribution of Insulator Strings for Electrified Railway Catenary [J]. *Energies*, 2019, 12(17), 3295.