

电磁超声作用下 Sn-9Zn 钎料在 SiC 表面铺展分析

张茗瑄, 马志鹏, 陈桂娟, 夏法锋, 于心沅

(东北石油大学, 大庆, 163318)

摘要: 基于 Comsol Multiphysics 软件, 通过建立电磁超声辅助钎焊模型, 研究洛伦兹力作用下钎料 Sn-9Zn 在 SiC 陶瓷表面的铺展行为. 结果表明, 在电磁超声作用下, 钎料表面出现塌陷并向外铺展, 伴随着钎料表面出现振动现象, 随后线圈下方的部分钎料断裂并飞溅, 中心处钎料收缩. 当线圈通入交变电流时, 在周边感生出方向呈周期性转换的交变磁场. 钎料内部洛伦兹力方向整体指向钎料外部, 在钎料边缘处逐渐指向母材表面, 线圈下方钎料所受水平和垂直方向的洛伦兹力高于其它部分, 最高时分别为 63.96 和 31.2 kN/m³, 顶部钎料在洛伦兹力、压力差和“坍塌效应”的共同作用下, 促进钎料铺展.

创新点: (1) 对钎料施加电磁超声并促进钎料的铺展.

(2) 提出了一种过程易控制, 并保护脆性材料的非接触钎焊方法.

关键词: 电磁超声; 磁场; 洛伦兹力; 铺展

中图分类号: TG454

文献标识码: A

doi: 10.12073/j.hjxb.20210629001

0 序言

在超声波辅助钎焊过程中, 超声波在钎料内传播时会产生空化作用, 在空化泡破裂的瞬间产生局部高温高压, 并产生冲击波, 破坏母材表面的氧化膜, 从而提高母材与钎料间的结合性能. 该技术无需使用钎剂即可获得良好的焊接接头, 因而在工业领域得到广泛地应用^[1-2]. 许志武等人^[3]以 Zn-Al 为钎料, 成功对 SiCp/Al 复合材料进行超声波辅助钎焊, 发现超声波可搅拌母材中的 SiC 复合增强相, 细化了焊缝的基体组织. Nagaoka 等人^[4]以 Sn-Zn 为钎料, 对于超细晶强化 1070 铝合金进行钎焊连接, 所得到的焊接接头抗拉强度达 150 MPa. 但是该方法易对脆性母材造成破坏, 过程难以控制, 从而影响试验结果. 而磁场作为一种无接触的控制手段, 具有非接触、污染小、操作简单等优点, 因而得到了研究者的关注^[5]. 王强等人^[6]发现在静磁场与交变磁场共同作用下, 液态金属内产生洛伦兹力, 从而形成与超声振动等效的机械力. 李阳等人^[7]设计了两种非接触电磁超声场的模型, 研究不同线圈

结构和电参数对洛伦兹力的影响, 发现优化线圈结构可以得到理想的磁场和洛伦兹力分布, 电流强度对洛伦兹力影响较大. 邓安元等人^[8-9]研究了交变磁场和复合磁场作用下液态金属表面的形变过程. 结果表明, 液态金属表面在交变磁场作用下出现波动现象, 而静磁场的存在可抑制该现象的发生.

目前的研究多以电磁场在冶金铸造领域的应用为主, 对应用于钎焊方面的研究尚在探索阶段, 因此提出了电磁超声辅助钎焊方法. 与超声波辅助钎焊相比, 二者都是通过向母材或钎料提供振幅与超声波频率等效的机械力, 实现钎料的铺展, 但是后者可以不与母材或钎料直接接触进行钎焊, 防止因超声波振动可能对母材造成开裂等影响, 且具有参数和过程易控制、对试验材料起到保护作用的优点. 因此通过 Comsol Multiphysics 软件, 对洛伦兹力作用下钎料的动态铺展过程进行数值模拟, 分析钎料内部的压力变化情况及铺展机理, 为电磁场在钎焊领域的应用提供理论指导.

1 基本原理与数学模型的建立

1.1 基本原理

图 1 所示为洛伦兹力的产生机理. 当线圈通入

交变电流时,会在周围空气中产生交变磁场,并且在钎料内感生出与交变电流方向相反、频率相同的涡流,该涡流可与交变磁场以及外加静磁场 Z 共同作用,在钎料内部产生洛伦兹力 F_1 和 F_2 ,在洛伦兹力的作用下,钎料发生铺展,同时钎料内部的液体分子也发生运动进而互相碰撞,从而钎料表面出现振动。

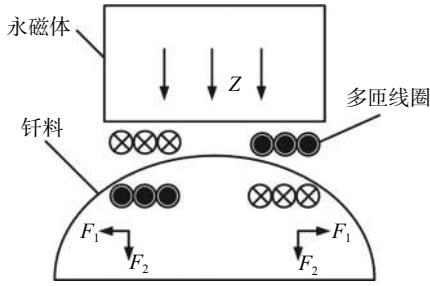


图 1 洛伦兹力产生机理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of Lorentz force generation mechanism

1.2 物理模型

采用 Comsol Multiphysics 软件对电磁超声作用下钎料的铺展情况进行多物理场建模分析,图 2 所示为建立的二维轴对称几何模型。整个模型包含在长方形的空气域中,母材为 SiC 陶瓷,钎料为 Sn-9Zn,多匝线圈材料为 Cu,永磁体为 NdFeB。

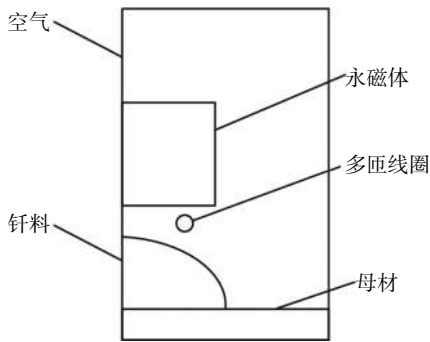


图 2 二维轴对称几何模型示意图

Fig. 2 Schematic diagram of two-dimensional axisymmetric geometric model

1.3 控制方程

由于涉及到电磁场和流体力学场的多场耦合,在 Comsol Multiphysics 软件中,选用“磁场”、“磁场,无电流”、“湍流”、“水平集”4 个物理场进行建模分析,其中模拟电磁超声的基本控制方程为^[10-11]

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (1)$$

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (2)$$

$$\nabla \times B = 0 \quad (3)$$

$$\nabla \cdot D = \rho_0 \quad (4)$$

式中: $\nabla \times$ 为旋度算子; $\nabla \cdot$ 为散度算子; D 为电通量密度; H , J , E 和 B 分别为磁场强度、交变电流密度、电场强度和磁通量密度 (或磁感应强度); ρ_0 为自由电荷密度。钎料内部的涡流密度为

$$J_E = -\sigma \frac{\partial B}{\partial t} \quad (5)$$

式中: σ 为电导率。

永磁体控制方程表示为

$$B_0 = \mu_0 \mu_r H + \mu_0 M_0 = \mu_0 \mu_r H + B_r \quad (6)$$

式中: μ_0 为真空磁导率; μ_r 为相对磁导率; M_0 为剩余磁化强度; B_r 为剩余磁场强度。感应电流和外加静磁场共同作用产生的洛伦兹力为

$$F = J_E (B + B_0) \quad (7)$$

在对钎料进行流体计算时,涉及的流场求解的基本控制方程如下^[12-14]。

连续性方程:

$$\frac{\partial(\rho \mu_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (8)$$

动量方程:

$$\frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[(\mu_i + \mu_j) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + F_i \quad (9)$$

低雷诺数 k- ε 紊流双方程:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho K) + \nabla \cdot (\rho U K) = \nabla \cdot \left[\left(\mu_0 + \frac{\mu_0}{\sigma_k} \right) \nabla \cdot K \right] + G - \rho \varepsilon \quad (10)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \varepsilon) + \nabla \cdot (\rho U \varepsilon) = \nabla \cdot \left[\left(\mu_0 + \frac{\mu_0}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \cdot \varepsilon \right] + C_1 G \frac{\varepsilon}{K} - \rho \varepsilon \quad (11)$$

有效粘度方程:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{K^2}{\varepsilon} \quad (12)$$

$$G = \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (13)$$

式中: ρ 为钎料密度; $u_{i(j)}$ 为不同坐标方向的速度分量; $x_{i(j)}$ 为不同坐标方向的坐标值; P 为压强; μ_i 为分子黏度系数; μ_j 为湍流黏度系数; F_i 为 x_i 方向上的电磁力密度; K 为湍流动能; U 为速度场; G 为有效粘度; ε 为湍动能耗散率; C_1 和 C_μ 为常数。模拟过程中各物质的物理参数如表 1 和表 2 所示^[15-17]。

表 1 SiC 陶瓷的物理性能
Table 1 Physical properties of SiC

弹性模量 E_1/GPa	泊松比 γ	密度 $\rho_1/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$
450	0.142	3.1

表 2 金属 Sn-9Zn 的物理性能
Table 2 The physical properties of Sn-9Zn

熔点 $T/^\circ\text{C}$	粘度 $\sigma/(\text{MPa}\cdot\text{s})$	密度 $\rho_2/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$
198.6	1.62(220 $^\circ\text{C}$)	5.904

基于上述方程组, 将模拟分为三部分: 第一部分为求解稳态电磁场, 此时受控材料为永磁体与钎料; 第二部分为求解瞬态电磁场, 此时受控材料为线圈与钎料. 在该模型中, 由于永磁体提供的静态磁场始终存在, 因此可当作背景场进行加载; 第三部分为求解流场, 此时受控材料为钎料.

模拟的初始条件为通入线圈的交变电流峰值 30 A, 频率 20 kHz, 线圈匝数 30 匝, 永磁体产生的

静磁场强度 1 T, 此时线圈通入的交变电流为

$$I = 30 \sin(2\pi \cdot 20\,000t) \quad (14)$$

2 结果与讨论

2.1 交变磁场分布情况

图 3 所示为一个周期内交变磁场的磁感应分布情况. 可以看出, 当超声波周期为 $T/6$ 时线圈周围感生出沿顺时针方向旋转的交变磁场 (图 3a). $2T/6$ 时磁感应强度增大, 并且线圈周围磁感应强度最高, 为 0.322 T (图 3b). $3T/6$ 时磁感应强度降低, 此时磁感应强度为 0.192 T (图 3c). $4T/6$ 时磁场方向由顺时针转换为逆时针旋转 (图 3d). $5T/6$ 时磁感应强度再次增大, 线圈周围磁感应强度最高值为 0.317 T (图 3e). $6T/6$ 时磁感应强度降低, 为 0.187 T (图 3f). 由此可以看出, 在电磁超声作用下, 交变磁场方向以线圈为中心, 在一个周期内发生顺时针和逆时针的转换, 与线圈越接近, 磁感应强度越大.

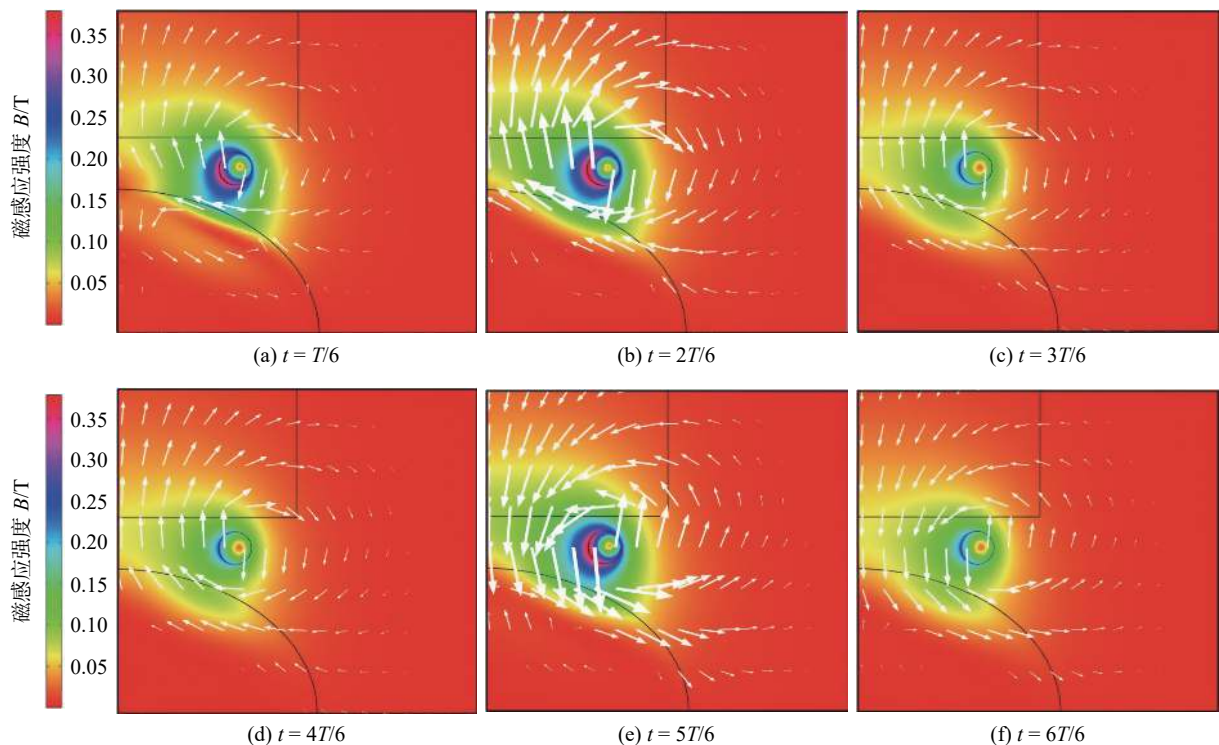


图 3 交变磁场的磁感应分布情况

Fig. 3 Distribution of magnetic induction of alternating magnetic field. (a) $t = T/6$; (b) $t = 2T/6$; (c) $t = 3T/6$; (d) $t = 4T/6$; (e) $t = 5T/6$; (f) $t = 6T/6$

2.2 静磁场分布情况

图 4 所示为电磁超声环境下静磁场的磁感应分布情况. 可以看出, 磁场方向呈向外侧扩散趋势, 与永磁体接近的钎料顶部所受磁感应强度最大, 为

0.354 T. 由于永磁体产生的静磁场恒定, 因此磁感应强度和方向不随时间变化.

2.3 电磁超声作用下钎料的铺展行为

在钎料内感生出的涡流、静磁场和交变磁场的

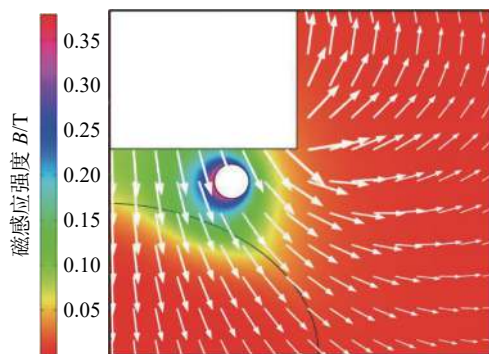


图 4 静磁场的磁感应分布情况

Fig. 4 Magnetic induction distribution of static magnetic

共同作用下, 钎料的铺展过程如图 5 所示. 可以看出, 没有电磁超声作用时, 钎料保持液滴状态. 随后在电磁超声作用下, 钎料表面向下塌陷, 钎料顶部呈凸起状, 并继续铺展. 当电磁超声作用时间为 38 ms 时钎料铺展面积达到最大值, 此时底部半径约为 14.8 mm, 同时钎料表面出现轻微振动. 最后位于线圈下方的部分钎料出现断裂, 并出现飞溅现象, 线圈下方部分钎料随时间增加而基本消失, 钎料发生收缩现象. 由此可以得出, 钎料内部在洛伦兹力的作用下发生铺展.

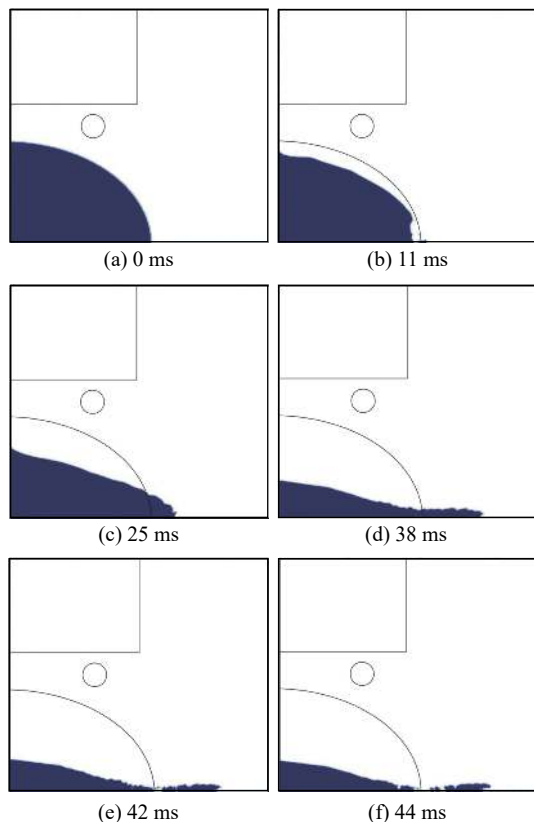


图 5 电磁超声作用下钎料的铺展过程

Fig. 5 Spreading process of the solder under the action of electromagnetic ultrasound. (a) 0 ms; (b) 11 ms; (c) 25 ms; (d) 38 ms; (e) 42 ms; (f) 44 ms

2.4 钎料铺展的驱动力分析

图 6 所示为钎料内部洛伦兹力的分布情况. 可以看出, 洛伦兹力方向整体指向钎料外部, 由于交变磁场与涡流共同作用产生的洛伦兹力在宏观上表现为垂直向下的斥力, 因此在钎料边缘处箭头逐渐指向母材表面. 提取钎料顶部的点 (A 点) 和底部边缘的一点 (B 点), 沿钎料表面对两点进行连线, 并对连线处的钎料所受洛伦兹力情况进行分析.

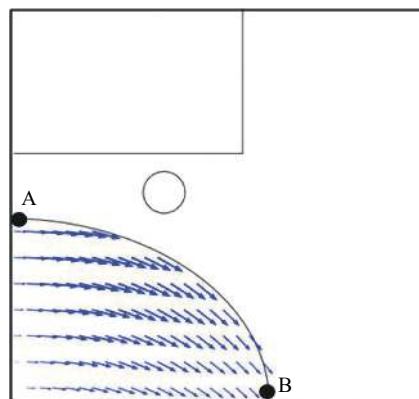
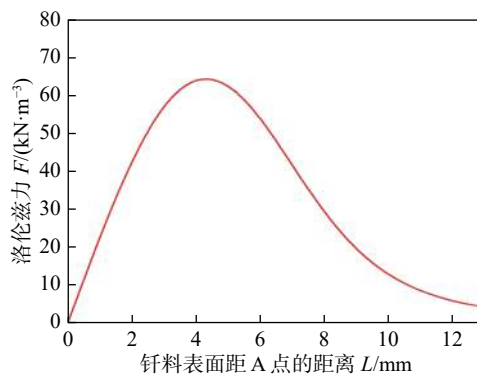


图 6 钎料内部洛伦兹力的分布

Fig. 6 Distribution of Lorentz force inside the solder

由图 6 可知, 钎料内的洛伦兹力存在水平向右 (x 方向) 和垂直向下方向 (y 方向) 的分量. 钎料表面沿 x 方向的洛伦兹力分布情况如图 7 所示. 可以看出, 沿 x 方向洛伦兹力呈先增大后减小的趋势, 线圈下方的部分钎料受到该方向的洛伦兹力较大, 最高时达 63.96 kN/m^3 , 由此可知, 图 5 中钎料铺展时所需的液体分子主要来自线圈下方的部分钎料.

图 7 钎料表面沿 x 方向的洛伦兹力分布Fig. 7 Lorentz force distribution along the x direction on the surface of the solder

钎料表面沿 y 方向的洛伦兹力分布情况如图 8 所示. 可以看出, 线圈下方的部分钎料受到该方向的洛伦兹力较大, 最高时达 31.2 kN/m^3 , 因此在图 5 中, 该位置的钎料在铺展过程中向下塌陷,

随后出现断裂现象. 由于钎料顶部所受洛伦兹力较小, 且液体内部存在表面张力, 因此该部分钎料在 11 ~ 25 ms 内呈凸起状, 因为弯曲液面存在 Laplace 压强差^[18], 当压力差达到一定程度时, 钎料顶部出现塌陷, 钎料边缘的液体分子会在“坍塌效应”^[19]的作用下继续铺展.

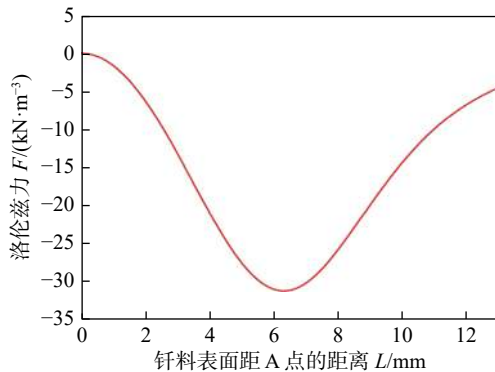


图 8 钎料表面沿 y 方向的洛伦兹力分布

Fig. 8 Lorentz force distribution along the y direction on the surface of the solder

3 结论

(1) 当电磁超声作用于钎料 Sn-9Zn 时, 钎料出现塌陷并向四周铺展, 表面出现振动现象, 随后线圈下方的部分钎料出现断裂并伴有飞溅现象, 中心处钎料收缩.

(2) 当线圈通入交变电流时, 线圈周边感生出的交变磁场在一个周期内发生顺时针和逆时针的转换, 与线圈接近的空气和钎料所受磁感应强度较大. 永磁体产生的静磁场呈整体向外侧扩散趋势.

(3) 在电磁超声作用下, 钎料内部的洛伦兹力方向整体指向钎料外部, 由于交变磁场与涡流共同作用产生的洛伦兹力在宏观上表现为垂直向下的斥力, 钎料边缘处的洛伦兹力逐渐指向母材 SiC 陶瓷表面, 线圈下方的部分钎料所受水平方向和垂直方向的洛伦兹力均高于其它部分, 最高时分别为 63.96 和 31.2 kN/m^3 , 说明铺展时所需的液体分子主要来自于该部分钎料, 顶部钎料由于所受洛伦兹力较小, 塌陷速度低, 随后在压力差和“坍塌效应”共同作用下, 促进了钎料继续铺展.

参考文献

[1] Xu Guojing, Leng Xuesong, Jiang Han, *et al.* Microstructure and

strength of ultrasonic-assisted brazed joints of $\text{Si}_3\text{N}_4/6061\text{Al}$ composites[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2020, 54: 89 – 98.

[2] Zhang Changan, Ji Hongjun, Xu Hongbo, *et al.* Interfacial microstructure and mechanical properties of ultrasonic-assisted brazing joints between Ti-6Al-4V and ZrO_2 [J]. *Ceramics International*, 2020, 46(6): 7733 – 7740.

[3] 许志武, 马星, 马琳, 等. 超声波作用下 SiCp/Al 复合材料焊缝的凝固组织及其断裂特征 [J]. *中国有色金属学报*, 2013, 23(1): 63 – 72.

Xu Zhiwu, Ma Xing, Ma Lin, *et al.* Solidified microstructure of SiCp/Al composites bonds under ultrasonic vibration and their fracture characteristics[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2013, 23(1): 63 – 72.

[4] Nagaoka T, Morisada Y, Fukusumi M, *et al.* Joint strength of aluminum ultrasonic soldered under liquidus temperature of Sn-Zn hypereutectic solder[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2009, 209(11): 5054 – 5059.

[5] 邓呈敏, 程东海, 张华, 等. 纵向直流磁场对铝铜熔钎焊接头组织和性能的影响 [J]. *焊接学报*, 2020, 41(10): 23 – 27.

Deng Chengmin, Cheng Donghai, Zhanghua, *et al.* Effect of microstructure and mechanical properties on Al-Cu welding-brazing joint assisted by longitudinal DC magnetic field[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2020, 41(10): 23 – 27.

[6] 王强, 赫冀成, 川合悟, 等. 磁声波对金属凝固组织的影响 [J]. *金属学报*, 2002, 38(9): 961 – 965.

Wang Qiang, He Jicheng, Kawai Satoru, *et al.* Effect of magnetoacoustic waves on solidification structures of metal[J]. *Acta Metallurgical Sinica*, 2002, 38(9): 961 – 965.

[7] 李阳, 邓安元, 张赛娟, 等. 局部高频磁场作用下金属液面变形和波动行为 [J]. *中国有色金属学报*, 2017, 27(4): 850 – 858.

Li Yang, Deng Anyuan, Zhang Saijuan, *et al.* Metal liquid surface deformation and fluctuation behavior under high-frequency local magnetic field[J]. *Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2017, 27(4): 850 – 858.

[8] 邓安元, 徐永义, 王恩刚, 等. 交变磁场作用下金属液面的变形和波动行为 [J]. *中国有色金属学报*, 2010, 20(4): 736 – 742.

Deng Anyuan, Xu Yongyi, Wang Engang, *et al.* Deformation and fluctuation behavior of meniscus with alternating magnetic field in mold[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2010, 20(4): 736 – 742.

[9] 邓安元, 王恩刚, 徐永义, 等. 复合磁场作用下金属液面行为的实验研究 [J]. *金属学报*, 2010, 46(8): 1018 – 1024.

Deng Anyuan, Wang Engang, Xu Yongyi, *et al.* Experimental research on melting surface behavior in mold under compound magnetic field[J]. *Acta Metallurgical Sinica*, 2010, 46(8): 1018 – 1024.

[10] Animasaun I L, Mahanthesh B, Jagun A O, *et al.* Significance of Lorentz force and thermoelectric on the flow of 29 nm CuO-water nanofluid on an upper horizontal surface of a paraboloid of

- volution[J]. Journal of Heat Transfer, 2019, 141(2): 022402.1 – 022402.9.
- [11] Garzón M, Pedro J Torres. Periodic solutions for the Lorentz force equation with singular potentials[J]. Nonlinear Analysis:Real World Applications, 2020, 56: 1 – 6.
- [12] Yue P, Xiao J, Xu K, *et al.* Mathematical model and analysis method of flow field separation[J]. Physics and Fluids, 2021, 33: 1 – 14.
- [13] Zhang J, Ma W. Data-driven discovery of governing equations for fluid dynamics based on molecular simulation[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2020, 892(A5): 1 – 18.
- [14] Wang X, Jiang Y, Qiao Y, *et al.* Numerical study of electroosmotic slip flow of fractional Oldroyd - B fluids at high zeta potentials[J]. Electrophoresis, 2020(41): 769 – 777.
- [15] Zhou Bofang, Zeng Zhichen, Cai Yuchen, *et al.* FEM simulation and verification of brazing SiC ceramic with novel Zr-Cu filler metal[J]. Materials, 2019, 12(20): 3380 – 3388.
- [16] 牛济泰, 程东锋, 高增, 等. SiC 颗粒增强铝基复合材料的连接现状 [J]. 焊接学报, 2019, 40(3): 155 – 160.
- Niu Jitai, Cheng Dongfeng, Gao Zeng, *et al.* Reviews on welding method of SiC particle reinforced aluminum matrix composites[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2019, 40(3): 155 – 160.
- [17] Gancarz T, Pstrus J, Gasior W, *et al.* Physicochemical properties of Sn-Zn and SAC + Bi alloys[J]. Journal of Electronic Materials, 2013, 42(2): 288 – 293.
- [18] Guo X, Chen C, Kang R, *et al.* Study of mechanical properties and subsurface damage of quartz glass at high temperature based on MD simulation[J]. Journal of Micromechanics and Molecular Physics, 2019, 4(2): 1 – 14.
- [19] Ba J K, Zhang Y, Wang X, *et al.* Effects of deposition time on the structure and properties of AZO thin films deposited on quartz glass by magnetron sputtering[J]. Key Engineering Materials, 2019, 4763: 63 – 67.

第一作者: 张茗瑄, 博士研究生; 主要研究方向为异种材料连接技术; Email: 1295777609@qq.com.

通信作者: 马志鹏, 博士, 教授; Email: mazhipeng77@163.com.

(编辑: 郑红)

[上接第 54 页]

- [14] Derekar K, Lawrence J, Melton G, *et al.* Influence of interpass temperature on wire arc additive manufacturing (WAAM) of aluminium alloy components[C]//MATEC Web of Conferences, EDP Sciences, 2019: 05001.
- [15] 孙佳孝, 杨可, 王秋雨, 等. 5356 铝合金 TIG 电弧增材制造组织与力学性能 [J]. 金属学报, 2021, 57(5): 665 – 674.
- Sun Jiexiao, Yang Ke, Wang Qiuyu, *et al.* Microstructure and mechanical properties of 5356 aluminum alloy TIG arc additive manufacturing[J]. Acta Metall Sinica, 2021, 57(5): 665 – 674.
- [16] 龙琼, 路坊海, 张玉兰, 等. Mg/Al 异种金属焊接技术的研究现状及最新进展 [J]. 轻金属, 2018(2): 47 – 53.
- Long Qiong, Lu Fanghai, Zhang Yulan, *et al.* Research status and latest progress of Mg/Al dissimilar metal welding technology[J]. Light Metal, 2018(2): 47 – 53.
- [17] 戴青松, 欧世声, 邓运来, 等. 5083 铝合金的热变形组织演变及晶粒度模型 [J]. 材料导报, 2017, 31(14): 143 – 146, 152.
- Dai Qingsong, Ou Shisheng, Deng Yunlai, *et al.* Thermal deformation microstructure evolution and grain size model of 5083 aluminum alloy[J]. Materials Review, 2017, 31(14): 143 – 146, 152.
- [18] Toda H, Oogo H, Uesugi K, *et al.* Roles of pre-existing hydrogen micropores on ductile fracture[J]. Materials Transactions, 2009, 50(9): 2285 – 2290.
- [19] Xue C, Zhang Y, Mao P, *et al.* Improving mechanical properties of wire arc additively manufactured AA2196 Al-Li alloy by controlling solidification defects[J]. Additive Manufacturing, 2021, 43: 102019.

第一作者: 何鹏, 硕士; 主要研究方向为电弧增材制造; Email: 745221671@qq.com.

通信作者: 柏兴旺, 副教授; Email: pancard@126.com.

(编辑: 郑红)