

放电能量对LA103Z/1060Al异种材料电磁脉冲焊接界面形貌的影响

孙随平, 谢吉林, 刘冠鹏, 王善林, 张体明, 陈玉华

(南昌航空大学 高端装备极端制造技术江西省重点实验室, 江西 南昌 330063)

摘要: 采用电磁脉冲焊接实现了LA103Z和1060Al异种材料的连接, 结合数值模拟和实验探究了放电能量对界面形貌的影响、波形的形成机制和界面元素扩散问题。结果表明: 感应磁场和感应电流分别与焊接电流大小和变化速率相关。放电能量的提高增大了1060Al受到的洛伦兹力, 提高了碰撞速度, 而碰撞角度几乎不受影响。回弹现象改变了1060Al和LA103Z的接触状态, 这是环形焊缝形成的关键。模拟和实际的界面形貌都为正弦波, 且波幅从32 kJ的3.02 μm 提高到了38 kJ的6.48 μm 。波形的形成源于界面上剪切作用及碰撞引发的剪切不稳定性及金属塑性流动共同作用。界面上没有观察到熔化现象, 接头最大剪切强度达到了铝母材的90.38%。模拟结果表明界面上的温度始终低于母材的熔点是接头力学性能提高的关键。

关键词: 镁锂合金; 电磁脉冲焊接; 数值模拟; 界面形貌

中图分类号: TG456.9

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2026)07-1783-10

1 引言

轻质材料替代传统钢材已成为全球热点, 镁合金和铝合金凭借低密度和高比强度广泛应用于航空、汽车等领域^[1-2]。然而, 传统AZ31镁合金的密排六方(hcp)结构在室温下滑移系不足, 限制了其塑性变形能力^[3-4]。通过添加锂元素制备的镁锂合金, 能够进一步降低密度并显著提升延展性。锂的体心立方(bcc)结构提供了更多滑移系, 且当锂含量为5.7wt%~10.3wt%时, 合金形成 $\alpha\text{-Mg}$ (hcp)与 $\beta\text{-Li}$ (bcc)双相组织, 兼具塑性和强度^[5]。

电磁脉冲焊接(electromagnetic pulse welding, EMPW)因其无热影响区、操作便捷和环境友好等优势, 成为了异种材料焊接的理想选择^[6-7]。现有研究已通过EMPW成功制备Mg/Al接头, 揭示了界面强化机制^[8]及焊接参数对界面形貌和力学性能的影响等问题^[9-10]。针对EMPW高速(300~700 m/s)、微秒级瞬时成形的特点, 数值模拟被广泛应用于界面形成^[11]、尾流演变^[12]和碰撞速度对形貌的影响分析等^[13]。然而, 当前研究多聚焦于传统AZ31镁合金, 对镁锂合金的EMPW研究近乎空白, 而模拟多集中于界面形貌演变, 对碰撞前的动态过程关注不足。

本研究采用EMPW实现镁锂合金与铝合金的焊接, 结合数值模拟分析放电能量对感应磁场和电流、洛伦兹

力及界面形貌的影响, 并通过实验探究了接头界面波形形成机制与元素扩散问题, 为镁锂合金电磁焊接工艺优化提供理论支撑。

2 实验

2.1 数值模拟

电磁脉冲焊接的原理如图1a所示, 当线圈中流过电流时, 线圈会产生一个快速变化的感应磁场, 这使得飞板上产生了感应电流, 感应电流的出现使飞板在磁场中受到了洛伦兹力的作用并开始朝靶板进行加速运动, 最终飞板和靶板高速撞击实现焊接。根据上述原理, 模拟可以分为以下3个步骤: (1)模拟飞板(1060Al)在感应磁场中承受洛伦兹力的过程, 该过程包括飞板从静止到加速及飞行完成所设定的碰撞间距, 这部分命名为电磁模块; (2)将电磁模块中飞板所受的电磁力导出并模拟飞板撞击和变形过程得到初始的碰撞速度和碰撞角度, 这部分命名为结构模块; (3)以碰撞速度和角度为初始条件, 采用光滑粒子流体动力学(smoothed particle hydrodynamics, SPH)的方式模拟界面上发生的撞击行为。

为研究放电能量对焊接接头的影响, 碰撞间距固定为1.5 mm, 数值模拟选用32、34、36和38 kJ 4组放电能量。在EMPW中, 不同放电能量的焊接电流变化趋势相

收稿日期: 2025-07-27

基金项目: 江西省自然科学基金(20242BAB23042); 江西省赣鄱英才计划(gpyc20240080); 国家自然科学基金(52175326); 江西省主要学科学术和技术带头人培养计划(20225BCJ23017)

作者简介: 孙随平, 男, 1998年生, 硕士生, 南昌航空大学 高端装备极端制造技术江西省重点实验室, 江西 南昌 330063, E-mail: 2203080503002@stu.nchu.edu.cn

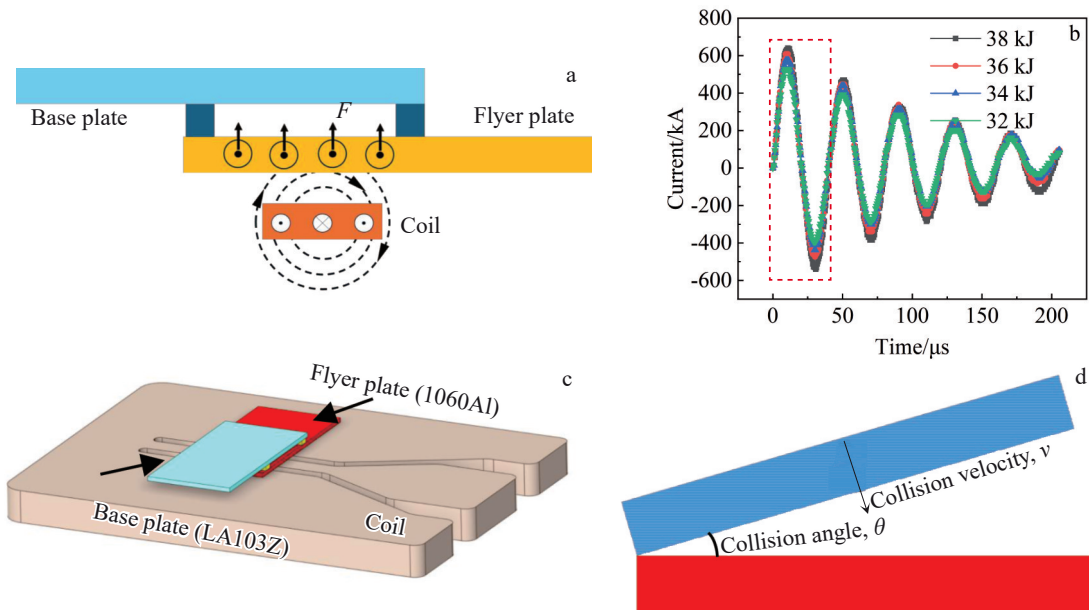


图 1 EMPW 作用原理、不同放电能量下的电流和模拟模型示意图

Fig.1 Schematic diagram of electromagnetic pulse welding (a); current vs. time curves under different discharge energies (b); schematic diagram of electromagnetic and structural modules (c); schematic diagram of SPH model (d)

似,如图 1b 所示,均表现为欠阻尼且逐渐衰减的形式。由于焊接时间极短,仅第 1 个周期的电流对焊接起作用,因此电磁模块中选取图 1b 中红色方框所示的第 1 个周期的电流作为焊接电流。此外,由于不同放电能量下电流的变化趋势相同,电磁-结构部分中反应电流变化对焊接的影响结果都采用 38 kJ 的电流。电磁模块和结构模块的模型示意图如图 1c 所示,按照实际的焊接进行了 1:1 还原,靠近线圈端是飞板(1060Al),远离线圈端是靶板(LA103Z)。电磁模块和结构模块的网格尺寸、时间步长参考了文献[14–15],电磁模块磁场边界中采用自然边界(Natural)条件,该条件适用于大多数磁场仿真场景。2 个模块之间采用了间接耦合的形式,为了保证数据映射的准确性,均采用相同的网格类型。图 1d 展示了 SPH 模拟的模型,SPH 是一种无网格模拟方法,将流场离散为具有质量、速度和能量的粒子,通过核函数估算动力学量^[16-17]。与传统拉格朗日或欧拉网格相比,SPH 避免了网格畸变和计算复杂性,更适合模拟高速碰撞过程。数值模拟的结果按照 EMPW 的作用原理的顺序进行了一一展示。

SPH 的模拟基于 Jonson-Cook 本构模型(公式(1)),该模型将屈服应力定义为塑性变形、应变速率和温度的函数,综合考虑了应变速率和温度效应,能够很好地反应材料在高应变速率下力学性能的变化和准确的预测金属材料的变形。采用 Mie-Gruneisen 模型中的 Shock 状态方程来描述材料的动力学行为,该方程在固体冲击波高压物态领域中应用广泛。为了减少对反射波的影响,SPH 中采用了自由边界条件^[18]。

$$\sigma = (A + B\epsilon^n) [1 + C \ln(\dot{\epsilon} / \dot{\epsilon}_0)] [1 - (T^*)^m] \quad (1)$$

式中, A 为材料的屈服强度, B 和 n 为材料硬化参数, C 为材料的软化参数, ϵ 为等效塑性应变, $\dot{\epsilon}_0$ 为参考应变速率, $\dot{\epsilon}$ 为实验应变速率, T^* 为无量纲温度, m 为热软化系数, 可以表示为:

$$T^* = \frac{T - T_r}{T_m - T_r} \quad (2)$$

式中, T 为绝对温度, T_r 是参考温度, T_m 为材料的熔点温度。式(1)的右边三项分别代表了等效塑性应变、应变速率和温度对流动应力的影响。模拟中所有用到的材料热物理性数据均采用文献[19–21]中的数据。

2.2 实验过程

选用的材料分别为 LA103Z 镁锂合金和 1060Al 商用铝合金。在电磁脉冲焊接过程中,为实现更好的焊接效果,飞板应该具有较好的塑性和良好的导电性。因此,选用冷轧的 1060Al 充当飞板,而 LA103Z 充当靶板,飞板和靶板的尺寸均为 80 mm×40 mm×1 mm (长×宽×厚)。LA103Z 为我国自主研发的镁锂合金,该合金的化学成份如表 1 所示, Li 元素的含量为 10.15wt%, 因此合金为 α -Mg 相和 β -Li 相组成的双相组织。实验中焊接装配过程和图 1c 保持一致,为了和模拟进行对照,实验中选择的参数和模拟相同。由于电磁脉冲焊接接头独特的环形焊缝结构,为避免切割对接头的性能产生影响,焊接结束后不对接头进行切割,而直接进行单轴拉伸试验来表征接头的力学性能。在垂直于接头的区域切割样品制备金相,并使用扫描电镜(SEM)在背散射电子(BSE)模式下对界面形貌和元素扩散进行表征分析。

表1 LA103Z的化学成分

Table 1 Chemical composition of LA103Z (wt%)

Li	Al	Zn	Fe	Cu	Si	Mg
10.15	3.02	3.05	<0.01	<0.01	<0.01	Bal.

3 结果与分析

3.1 电磁-结构耦合

在电磁脉冲焊接过程中,流过线圈的电流会在线圈周围产生一个随时间变化的磁场,这是1060Al飞板能够被加速的关键。图2a为38 kJ放电能量下线圈周围感应磁场在6个时刻的分布云图。在1个放电周期内,线圈产生的磁场强度呈现不断增减的变化趋势,其中磁场强度的峰值分别出现在第9 μs(34.92 T)和第29 μs(27.94 T)。在EMPW中,感应磁场的变化和输入线圈中的电流有着密切的关系,这能够用安培定律来描述:

$$B = u_0(I / 2\pi r) \tag{3}$$

式中, u_0 是真空磁导率, I 是电流, r 是线圈中心与任意一点的距离。由公式(3)表明,线圈中心产生的感应磁场强度和输入电流大小呈正比,和到线圈中心的距离成反比。

由于输入的电流表现为欠阻尼且不断衰减的形式,因此第9 μs时刻的输入电流要大于第29 μs,感应磁场强度也表现为相应的变化。需要指出的是,图2a不是磁场的矢量图,在实际焊接过程中随着流过线圈的电流方向发生变化,磁场的方向也会随之改变。感应磁场强度与放电能量的关系如图2b所示,随着放电能量从32 kJ增至38 kJ,线圈电流增大,磁场强度显著提升。而随着线圈距离的增加,如图2c所示(右上角的插图左侧绿色方框代表线圈,右侧蓝色箭头表示1060Al飞板厚度方向),感应磁场在飞板的厚度方向上大幅度的衰减,且各放电能量下磁场强度减弱的速度基本相同。

快速变化的磁场会在飞板上产生感应电流,随着磁场的不断变化,飞板上感应电流的大小和方向也会随着磁场的变化而变化。图3为在38 kJ放电能量下1个放电周期内1060Al飞板上不同时刻的感应电流大小和分布情况。感应电流集中分布于1060Al上的一个区域内(该区域位于线圈中间区域的正上方,如图1c),并在该区域上下两侧形成非对称闭合回路。由于该区域距线圈最近,磁场梯度最大,感应电流密度最高。感应电流和感应磁场一样保持不断增减的变化趋势,感应电流的峰值分别出现在第5和第25 μs。根据法拉第电磁感应定律,感应电流大

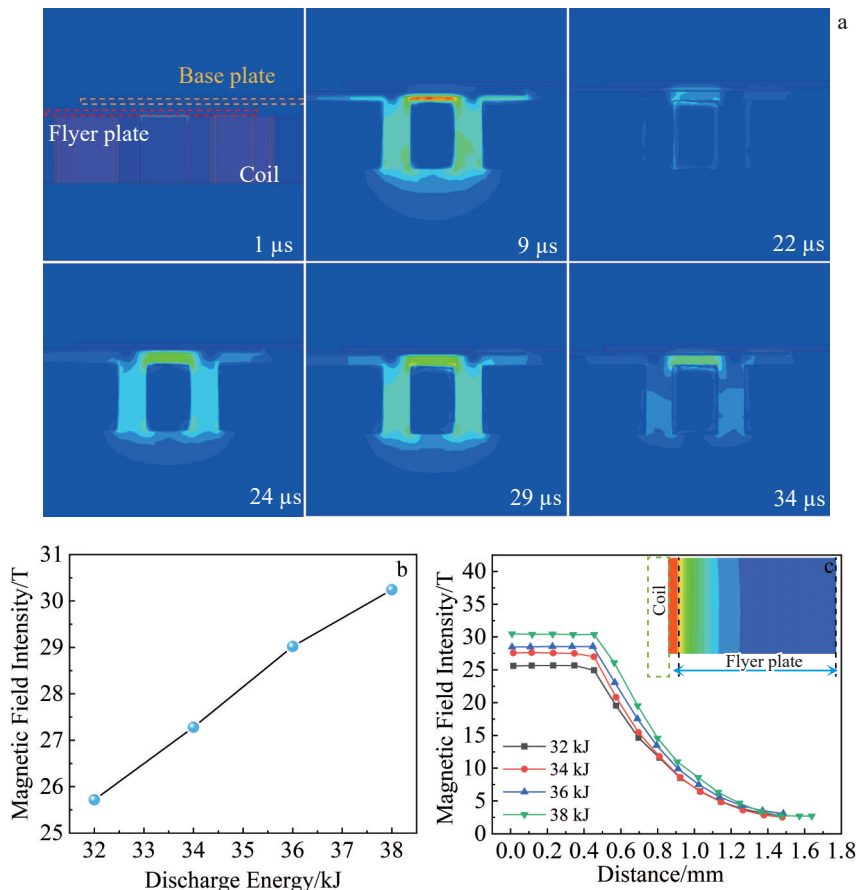


图2 感应磁场云图及感应磁场强度随放电能量和距离的变化关系

Fig.2 Contour plots of the induced magnetic field (a); variations of magnetic field intensity with discharge energy (b) and distance (c)

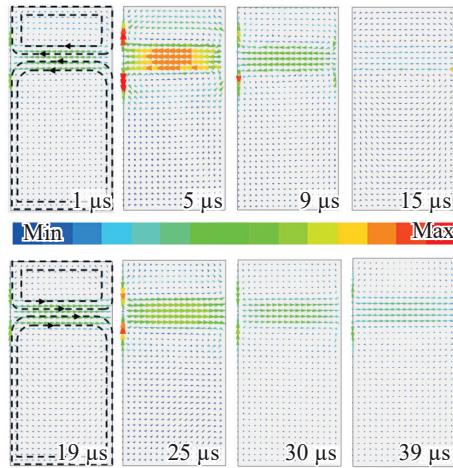


图3 一个放电周期内不同时刻下 1060Al 飞板上感应电流的大小和分布

Fig.3 Induced current magnitude and distributions on the 1060Al flyer plate at different moments within a discharge cycle

小取决于磁场变化率,而非磁场强度本身。线圈中电流流过的速率越大,感应磁场的变化就越快。由图 1b 可知,在第 5 和第 25 μs 时刻,电流的变化速率最大(斜率的绝对值最大),因此感应电流在这 2 个时刻达到最大值。在后半个周期,流过线圈的电流方向与前半个周期的电流方向相反,线圈产生的感应磁场的方向也与前半个周期相反,感应电流的方向也随之改变,而同样由于焊接电流不断衰减的特性,25 μs 时刻的感应电流小于第 5 μs 时刻。

感应电流的出现使得 1060Al 在线圈产生的磁场中受到洛伦兹力的作用。图 4 对 1 个周期下洛伦兹力在 1060Al 上的作用方向和分布进行了展示。由图 1b 可知,在 1 个放电周期内电流存在正反方向(电流流入线圈为

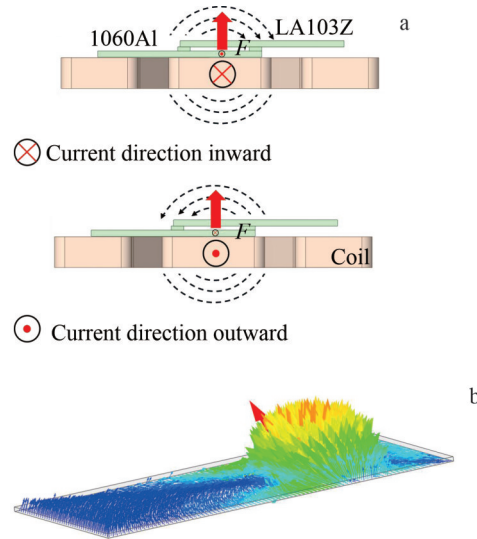


图4 洛伦兹力的方向判断和洛伦兹力在 1060Al 上的分布
Fig.4 Determination of Lorentz force direction (a) and Lorentz force distribution on 1060Al (b)

正,流出线圈为负),根据左手定则,感应电流与线圈磁场相位同步,这使得 1060Al 受到的洛伦兹力始终指向 LA103Z 的方向,如图 4a 所示。图 4b 进一步揭示了 1060Al 所受洛伦兹力的空间分布特征(以 38 kJ 放电能量为例):1060Al 受到的洛伦兹力主要分布在感应电流集中的区域,并沿径向逐渐衰减。洛伦兹力的这种分布方式是由于 1060Al 上不同位置到线圈距离不一样导致的,也是电磁脉冲焊接中碰撞区域形成椭圆状的环形焊缝的一个原因。

图 5 为在 38 kJ 放电能量下一个放电周期不同时刻下 1060Al 受到洛伦兹力的情况。洛伦兹力(F)的大小能够通过以下公式进行计算:

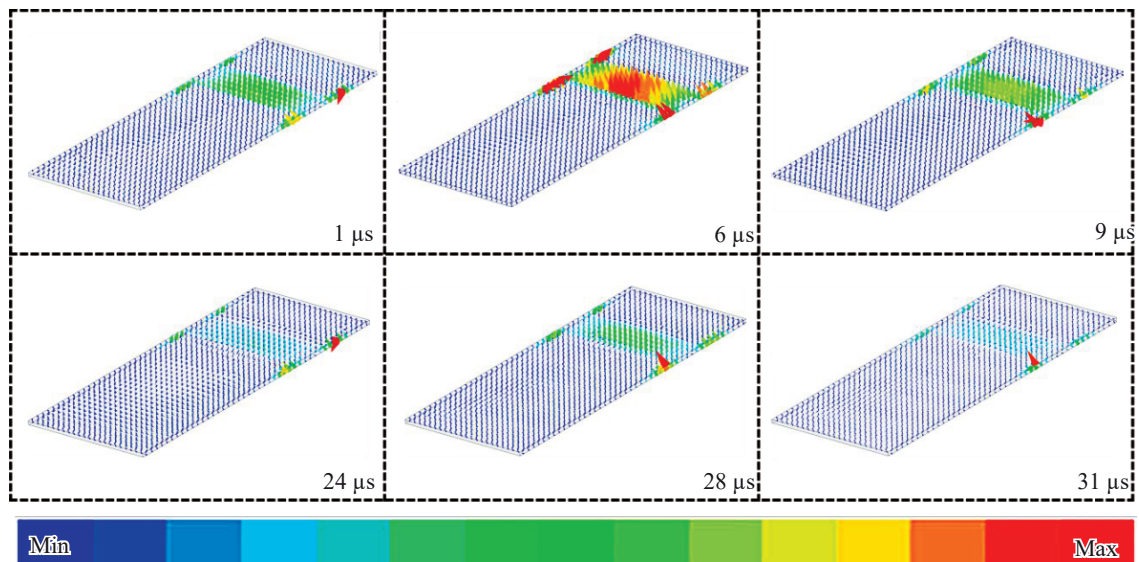


图5 1 个周期内不同时刻下 1060Al 上的洛伦兹力大小和分布

Fig.5 Lorentz force magnitude and distributions on the 1060Al at different moments within a cycle

$$\vec{F} = \vec{J} \times \vec{B} \quad (4)$$

式中, J 为电流密度, B 为磁感应强度。

由于感应磁场和感应电流呈现正弦函数的周期性变化,因此1060Al受到的洛伦兹力也呈现相应的变化。由第6 μs 时刻的洛伦兹力分布图可知,1060Al受到的洛伦兹力除了集中分布在感应电流区域外,在焊接区域两侧也出现了明显的集中现象。这是电流的集肤效应和边缘效应导致的。

1060Al在磁场中受到洛伦兹力的作用并在洛伦兹力的作用下加速朝向LA103Z进行撞击。图6为1060Al的碰撞和变形过程(38 kJ的放电能量下)。由图可知,1060Al在第8.69 μs 时刻最先接触到LA103Z并形成椭圆形的碰撞区域,然后随着碰撞的进行椭圆形碰撞区域不

断向外扩展。在第10.43 μs 时刻椭圆形焊接区域的中心位置开始出现回弹,在极短的时间内回弹结束,在碰撞区域形成了椭圆状的环形焊缝。椭圆状环形焊缝的形成和1060Al上洛伦兹力由中心往四周递减的分布方式有着密切的关系,这使得最先开始的碰撞是洛伦兹力最集中的区域,即以面的形式进行的。因此初始的碰撞角度为 0° ,而回弹现象发生后1060Al和LA103Z才形成一定的碰撞角度,并在一定的碰撞角度和碰撞速度的范围下实现了焊接,最后形成了椭圆状的环形焊缝和回弹后的未焊接区域。

图7a统计了不同的放电能量下1060Al飞板所受洛伦兹力的大小。由于感应磁场和感应电流同步变化,因

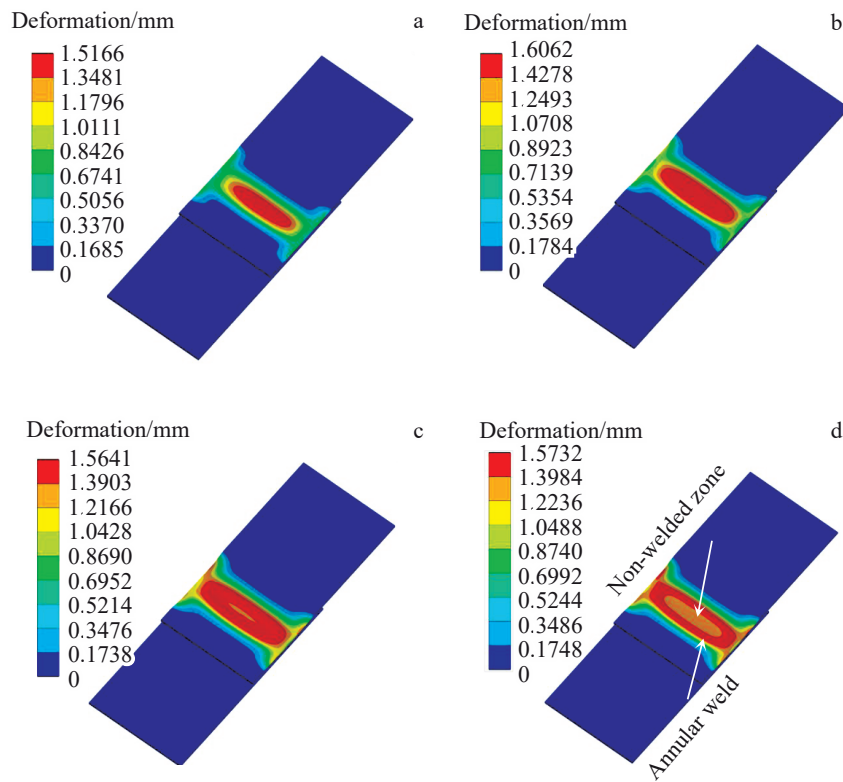


图6 1060Al飞板的变形过程

Fig.6 Deformation process of the flyer plate: (a) 8.69 μs , (b) 9.69 μs , (c) 10.43 μs , and (d) 10.72 μs

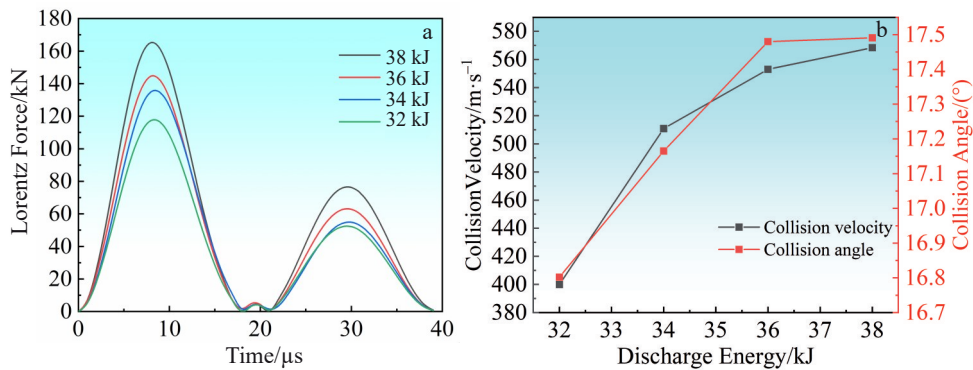


图7 洛伦兹力随放电能量的变化和1060Al碰撞速度与角度统计

Fig.7 Variations of Lorentz forces with discharge energy (a) and statistical analysis of collision velocity and angle for 1060Al (b)

此洛伦兹力的方向始终保持一致，而电流的衰减特性导致洛伦兹力的峰值在不断降低。随着放电能量的升高，感应磁场强度和感应电流都随之增大，1060Al所承受的洛伦兹力也逐渐增大。在不同的放电能量下，1060Al受到的洛伦兹力都保持类似的变化趋势。图7b对碰撞速度和角度进行了统计。随着放电能量的增大，1060Al所受的洛伦兹力增大，这导致在相同的碰撞间距下1060Al飞板的碰撞速度也随着增大。碰撞角度的大小随放电能量的增大变化不明显，在4个放电能量下碰撞角度均在17°左右，这是由于碰撞间距不变的结果。

3.2 SPH界面模拟

图8为放电能量38 kJ下SPH模拟的界面形貌。在界面上观察到了清晰的波形，且随着焊接的进行(焊接方向为从右到左)波形表现为先增大后减小的变化趋势。由图6可知，碰撞角度开始为0°并在回弹后逐渐增大，同时随着碰撞的进行，1060Al的动能也在逐渐降低，碰撞速度和角度的动态变化共同影响着界面上波的产生、发展和逐渐消失。图8b为金属射流的放大图，从图中能够观看到大量的射流颗粒，由于1060Al和LA103Z 2种合金的密度相近，这使得金属射流中同时存在2种粒子。金属射流能够清洁焊接表面，是实现2种材料产生冶金结合的重要条件。图8c为放大后的波形界面，在波谷附近观察到了尾流，尾流和波形的形成机制将在后续结合实验进行具体的分析。

图9为38 kJ放电能量下界面上温度、压力和塑性

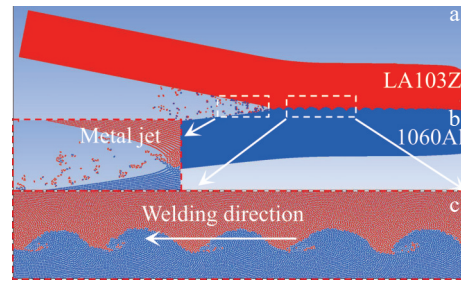


图8 38 kJ放电能量下接头的SPH的模拟形貌
Fig.8 SPH simulation morphologies of the joint under discharge energy of 38 kJ: (a) complete interface morphology; (b) magnified view of the metal jet; (c) enlarged view of a portion of the wavy interface

变形结果。由图9a的温度分布结果显示，高温区域(即红色区域)呈现颗粒状分布并集中在波谷附近的尾流区域，而界面上主要的温度变化在798.7~543.9 K之间(淡蓝色区域)。显然，高温区域是金属射流颗粒的温度，波形界面上的温度均低于任何母材的熔点。在控制碰撞间距不变的前提下，放电能量越高，飞板在碰撞过程中向内能转化的动能也越大。由38 kJ下的界面温度表明，在模拟中所有放电能量下的碰撞过程均没有产生熔化。碰撞角度的存在使得碰撞点处的压力最大并且压力以碰撞点为中心向四周递减，如图9b所示。图9c和9d展示了界面上塑性形变结果，在碰撞过程中，巨大的压力使得界面产生了严重的塑

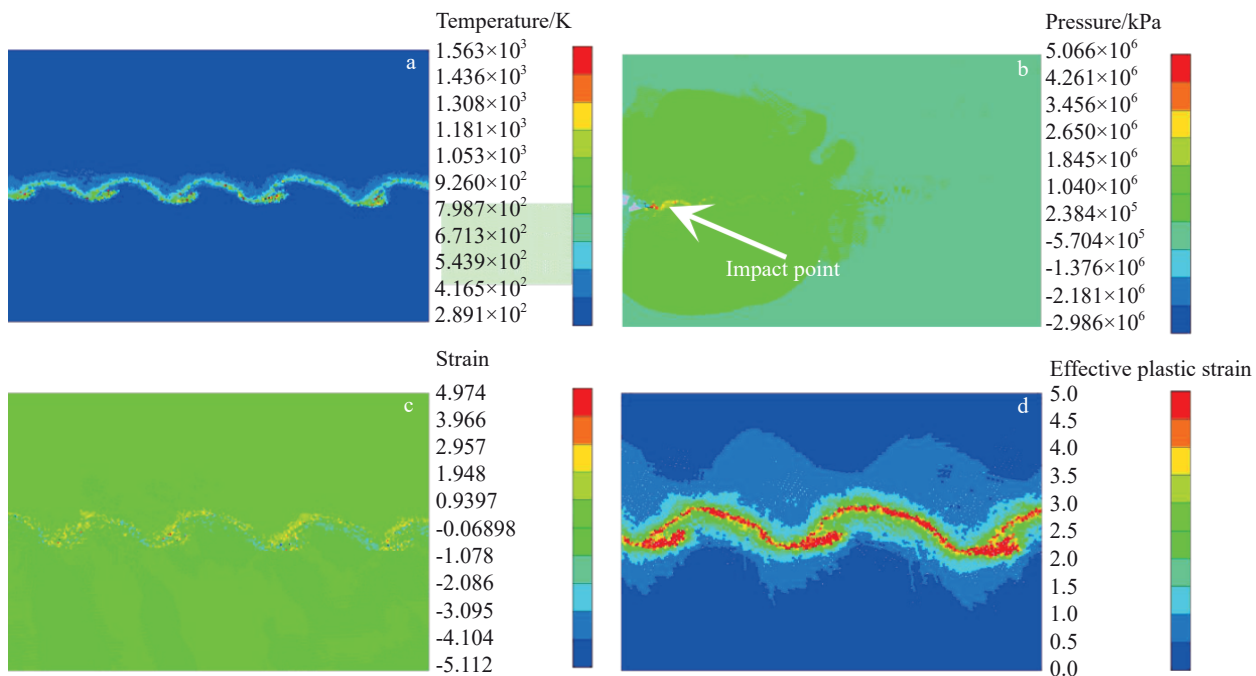


图9 38 kJ放电能量下SPH界面模拟结果

Fig.9 SPH interface simulation results under discharge energy of 38 kJ: (a) temperature distribution, (b) pressure distribution, (c) strain distribution, and (d) effective plastic strain distribution

性变形, 界面上的塑性应变最大达到了 4.974, 界面上各方向应变积累量最大值均为 5.0。

3.3 实验结果分析

图 10 为 1.5 mm 的碰撞间距 32、34、36 和 38 kJ 放电能量下 EMPW 1060Al/LA103Z 接头的界面形貌。在 4 组放电能量下, 界面上均观察到了明显的正弦波形貌且没有观察到明显的元素扩散和熔化现象。同时随着放电的能量增大, 界面上的波形在逐渐增大, 波幅的大小由 32 kJ 下的 $3.02\ \mu\text{m}$ 增大到了 38 kJ 下的 $6.48\ \mu\text{m}$ 。对于电磁脉冲焊接而言, 在界面处高速撞击剪切下的 2 种材料可以看做是 2 种流体, 这 2 种材料以不同的速率沿着焊接界面进行流动从而产生了 Kelvin-Helmholtz 不稳定性导致波形界面的形成。界面上的 Kelvin-Helmholtz 不稳定性越大, 波形越明显。根据结构模块中碰撞速度的模拟结果可知, 放电能量越大, 1060Al 的碰撞速度也越大。高放电能量下 1060Al 动能的增大增加了撞击过程中界面上动态不稳定性及局部压力, 从而形成了较大的波形。在电磁脉冲焊接中, 正弦波的形成一般表示接头有较高的结合强度。一方面, 相比于平直界面波形界面能够增大界面的结合长度; 另一方面, 正弦波的形成使得界面上形成一种机械互锁结构, 能够有效地加强界面间的结合。这表明界面上的温度始终低于 2 种母材的熔点, Mg、Al 2 种元素实现扩散而不形成金属间化合物是提升电磁脉冲焊接接头强度的关键。

图 11 为 38 kJ 放电能量下界面上波形的演变过程以及界面形貌。每一张图的焊接方向都是从右到左。首先

在碰撞速度水平分量的作用下, 2 种金属在界面上发生剧烈的剪切作用引发沿焊接方向上喷射的金属射流 (图 11a)。同时在碰撞速度垂直分量作用下使得垂直于界面方向上存在垂直的撞击行为。在高速的撞击过程中, 碰撞点处及附近区域的金属材料发生严重的塑性变形出现剪切不稳定性及金属的塑性流动。随着碰撞过程的进行, 下方的金属板向上凸起, 碰撞点处的金属塑性流动方向开始朝斜向下进行流动 (图 11b~11d)。而碰撞点处的剪切不稳定性以及向前的碰撞运动共同促使了在焊接前进侧波形处凹陷区域的形成 (图 11e)。斜向下运动的部分金属射流被凹陷区域捕获, 伴随着碰撞点的前移动, 凹陷区附近材料的塑性流动, 凹陷区域进一步受到挤压。由于凹陷区域空间有限, 使得凹陷区域内部的材料和捕获的金属射流运动进一步加快并促使了尾流的形成 (图 11f)。随这碰撞点的移动, 该过程在重复发生, 最后在界面上形成了连续的波形和尾流, 如图 11g 和 11h 所示。图 11i 和 11j 展示了模拟对应参数下实际焊接的接头界面形貌以及局部放大图像。同样的, 界面上形成了规则的波形形貌且在波上观察到了与模拟相似的不规则的尾流存在。

图 12 对 4 种不同放电能量下接头界面的模拟形貌以及 38 kJ 下界面更为细致的温度分布和线扫结果进行了展示。SPH 模拟的界面形貌和实际焊接的界面形貌都表现为正弦波, 同时随着放电能量的增大波形的尺寸增大。但相比于实际的接头界面形貌, 模拟中在波谷附近出现了更多的尾流, 这可能是模拟在理想真

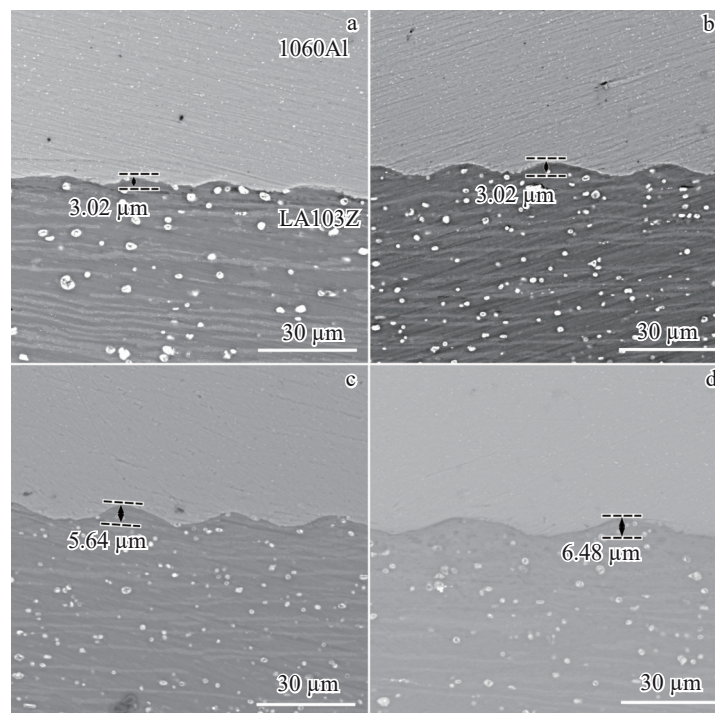


图 10 不同放电能量下接头界面的 SEM 照片

Fig.10 SEM images of the joint interface under different discharge energies: (a) 32 kJ, (b) 34 kJ, (c) 36 kJ, and (d) 38 kJ

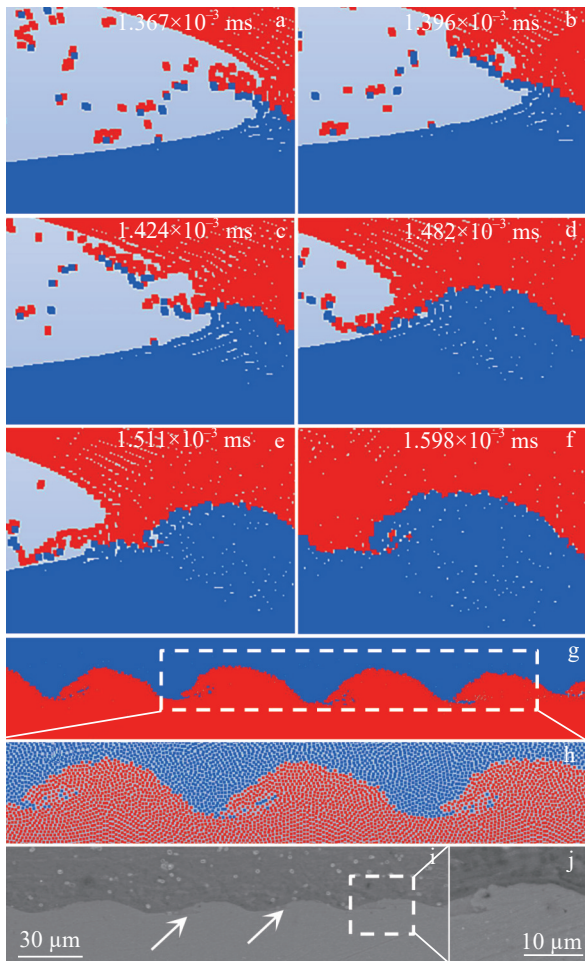


图 11 波形的形成过程和界面形貌

Fig.11 Wave formation process and comparative analysis of interface morphology: (a-f) wave formation process; (g) interface morphology at 38 kJ; (h) magnified view of the region marked in Fig. 11g; (i) corresponding welding interface morphology; (j) magnified view of the region marked in Fig.11i

空气氛下进行的,降低了 1060Al 动能的损失从而增加了碰撞过程中在金属塑性流动界面上形成更多的尾流。为了更好地反应界面上的温度区间,高于或等于 1106 °C 的温度均显示为红色,38 kJ 下界面的温度分布如图 12e 所示。高速撞击下的金属射流温度极高,表现为图中的红色区域,它绝大部分位于尾流区域,这使得尾流区域的温度较高,同时也验证了凹陷区域存在捕捉金属射流的过程。红色和黄色区域仅仅是零散的分布在尾流处,在波形的其它位置较少出现,界面上绝大位置的温度都维持在 376~559 °C 之间(浅蓝色区域)。图 12f 对 38 kJ 放电能量下界面处进行了 EDS 元素线扫分析,在过渡区上没有出现元素平台。根据模拟结果,尾流区域中一定数量的高温金属射流有引起周围区域温度升高从而导致局部熔化的可能,然而对比实验结果判断,电磁脉冲焊接 LA103Z 和

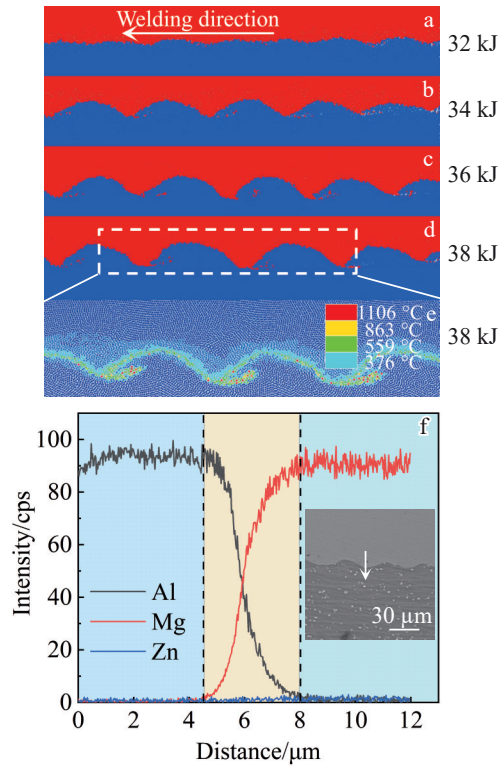


图 12 不同放电能量下 SPH 界面模拟形貌和 38 kJ 的界面温度分布、EDS 元素线扫描结果及线扫描位置

Fig.12 SPH-simulated interface morphologies under different discharge energies (a-d), interface temperature distribution at 38 kJ (e) and EDS element line scanning results and line scanning position at 38 kJ (f)

1060Al 界面上中没有熔化的现象。

图 13 为在碰撞间距为 1.5 mm 不同放电能量下试样的拉伸曲线。由于电磁脉冲焊接接头是搭接的形式,因此拉伸曲线展示的是载荷-位移曲线。在 4 个放电能量下接头均在界面处断裂,接头的剪切载荷随着放电能量的增大而增大,如图 13a 所示。图 13b 统计了这 4 种试样和铝母材的最大失效临界载荷。由图可知,当放电能量 32 kJ 时,接头的最大临界载荷只有 2762 N,仅是铝母材强度的 56.92%。当放电能量增大到 38 J 时,接头的最大临界载荷增大到了 4385 N,达到了铝母材强度的 90.38%。这表明在 1.5 mm 的碰撞间距下,增大放电能量,能够提高 EMPW 1060Al/LA103Z 接头的结合强度。同时,注意到随着放电能量从 32 kJ 增大到 38 kJ,最大临界载荷提高的幅度从刚开始的 41.49% 减小到了 2.12%。这表明在电磁脉冲焊接中,接头的强度随着放电能量而增大存在一个限度。这个限度出现的原因是电磁脉冲焊接需要在一定范围内的碰撞速度和碰撞角度。高于和低于这个范围都将无法实现焊接。然而尽管如此,如图 13c 所示,本研究所制备的 1060Al/LA103Z 接头避免了金属间化合物的形成,使得接头的力学性能已经超过了

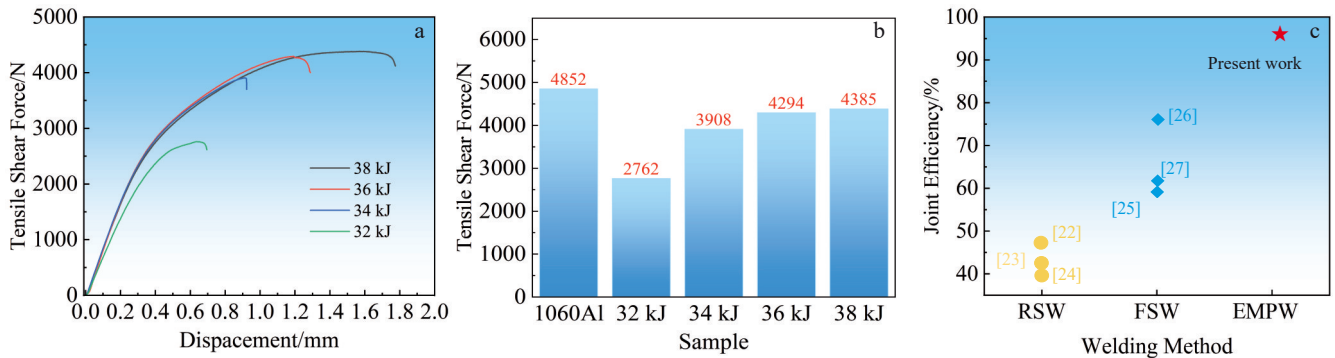


图13 接头的力学性能,不同焊接方法接头强度的比较及Mg/Al焊接接头效率对比

Fig.13 Mechanical properties of the joint and comparison of joint strengths using different welding methods: (a) tensile shear force vs. displacement curves of the joints under different charge energies; (b) statistics of the maximum tensile shear force of the 1060Al base material and the joints under different charge energies; (c) comparison of Mg/Al welding joint efficiency (RSW-resistance spot welding, FSW-friction stir welding)

其他很多焊接方法^[22-27]。

4 结论

1)在电磁脉冲焊接中,感应磁场的大小和线圈中流过的电流大小密切相关,而感应电流的大小则取决于线圈中电流的变化速率。随着放电能量的增加,线圈中的电流大小和变化速率均显著增大,导致1060Al所受洛伦兹力增强。回弹现象使得1060Al和LA103Z之间出现碰撞角,促使了环形焊缝的形成。此外,放电能量主要影响碰撞速度,而对碰撞角度的影响较小。

2)在所选的4个放电能量下,SPH模拟的界面形貌和实际的焊接形貌都为正弦波,且波形大小都表现为随放电能量的增大而增大的趋势。剧烈的剪切作用引发的金属射流和高速的碰撞作用引发剪切不稳定性,金属的塑性流动是波形形成的原因。

3)在所有放电能量条件下,LA103Z/1060Al均成功实现了焊接,界面呈现正弦波形貌,且未观察到金属间化合物的生成。SPH模拟进一步表明,LA103Z/1060Al界面的最高温度低于2种母材的熔点。在碰撞间距1.5 mm和放电能量38 kJ下,焊接接头的剪切强度达到了铝母材强度的90.38%。

参考文献 References

- [1] Kong Lingfei(孔令菲), Huang Xuqiang(黄须强), Zhou Huimin(周慧敏) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2023, 52(10): 3640
- [2] Yang Bowen, Ma Chuanchuan, Xue Chun et al. *Rare Metal Materials and Engineering*[J], 2023, 52(1): 125
- [3] Guo Xuefeng(郭学锋), Yang Wenpeng(杨文朋), Ren Fang(任昉) et al. *Hot Working Technology*(热加工工艺)[J], 2012, 41(24): 7
- [4] Mordike B L, Ebert T. *Materials Science and Engineering A*[J], 2001, 302(1): 37
- [5] Liu Qinyu(刘沁钰), Zhou Li(周利), Rong Xiaoyu(戎校宇) et al. *Materials Reports*(材料导报)[J], 2022, 36(10): 146
- [6] Kapil A, Sharma A. *Journal of Cleaner Production*[J], 2015, 100: 35
- [7] Zhang Wentao, Xie Jinlin, Chen Yuhua et al. *Scripta Materialia*[J] 2022, 210: 114434
- [8] Zhu Congcong, Xu Shiwei, Gao Wenli et al. *Journal of Magnesium and Alloys*[J], 2023, 11(7): 2366
- [9] Xie Jilin(谢吉林), Peng Cheng(彭程), Xie Wanxin(谢苑新) et al. *Materials Reports*(材料导报)[J], 2023, 37(5): 171
- [10] Zhou Yan(周言), Li Chengxiang(李成祥), Du Jian(杜建) et al. *Transactions of China Electrotechnical Society*(电工技术学报)[J], 2022, 37(2): 459
- [11] Chi Luxin, Liang Shifa, Wang Xinxin et al. *Materials Transactions*[J], 2022, 63(1): 33
- [12] Li J S, Raelison R N, Sapanathan T et al. *Acta Materialia*[J], 2020, 195: 404
- [13] Li Chengxiang, Wang Xianmin, Zhou Yan et al. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2023, 321: 118161
- [14] Zhang Yuhu(张玉虎). *Study on Weld Formation and Numerical Simulation of Aluminum/Steel Electromagnetic Pulse Welding*(铝/钢电磁脉冲焊接焊缝成型及数值模拟研究)[D]. Chongqing: Chongqing University of Technology, 2023
- [15] Su Dezhi(苏德智). *Study on Welding Process and Microstructure of Magnetic Pulse Welding for Aluminum-Copper Dissimilar Metal Plates*(铝-铜异种金属平板磁脉冲焊接工艺与微观结构研究)[D]. Chongqing: Chongqing University, 2018
- [16] Nishiwaki J, Sawa Y, Harada Y et al. *Materials Science Forum*[J], 2014, 794: 383
- [17] Liu M B, Zhang Z L, Feng D L. *Computational Mechanics*[J], 2017, 60: 513
- [18] Chen Yingzi(陈英子). *Numerical Simulation and Experimental*

- Study on Magnetic Pulse Welding of Aluminum/Titanium Plates* (铝/钛板件磁脉冲焊接数值模拟与实验研究)[D]. Chongqing: Chongqing University, 2022
- [19] Chen Zhijun, Qian Lingyun, Ji Baoping *et al.* *Journal of Manufacturing Processes*[J], 2023, 87: 260
- [20] Aizawa Y, Nishiwaki J, Harada Y *et al.* *Journal of Manufacturing Processes*[J], 2016, 24: 100
- [21] Zhou Yan(周言). *Study on Transient Process and Bonding Mechanism of Electromagnetic Pulse Welding of Copper-Aluminum Plates*(铜-铝板电磁脉冲焊接瞬态过程及接合机理研究)[D]. Chongqing: Chongqing University, 2021
- [22] Hayat F. *Materials & Design*[J], 2011, 32(4): 2476
- [23] Wang Ning(王宁). *Resistance Spot Welding of Aluminum Alloy and Magnesium Alloy*(铝合金与镁合金的电阻点焊)[D]. Luoyang: Henan University of Science and Technology, 2018
- [24] Zhao Peifeng(赵培峰), Zhang Qingyang(张清扬), Gu Weiwen(顾伟文) *et al.* *Hot Working Technology*(热加工工艺)[J], 2023, 52(11): 33
- [25] Dong Shaokang(董少康), Ma Yuhang(马宇航), Zhu Hao(朱浩) *et al.* *Transactions of the China Welding Institution*(焊接学报)[J], 2022, 43(12): 84
- [26] Lu Xiaowen(路尧文), Zhao Yadong(赵亚东), Cui Hongbao(崔红保) *et al.* *Hot Working Technology*(热加工工艺)[J], 2021, 50(17): 27
- [27] Alireza M, Arvin T, Atefeh S *et al.* *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2014, 24(5): 1317

Effect of Discharge Energy on Interface Morphology of LA103Z/1060Al Dissimilar Materials in Electromagnetic Pulse Welding

Sun Suiping, Xie Jilin, Liu Guanpeng, Wang Shanlin, Zhang Timing, Chen Yuhua

(Jiangxi Key Laboratory of Extreme Manufacturing Technology for High-End Equipment, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

Abstract: The connections of dissimilar materials LA103Z magnesium-lithium alloy and 1060Al alloy were achieved by electromagnetic pulse welding (EMPW). The effects of discharge energy on interface morphology, wave formation mechanisms, and element diffusion were systematically investigated through numerical simulations and experiments. The results indicate that the induced magnetic field and current are determined by the welding current's magnitude and rate of change, respectively. The increase in discharge energy enhances the Lorentz force experienced by 1060Al, thereby increasing the impact velocity, while the impact angle almost remains unaffected. The rebound phenomenon, which alters the contact state between the flyer plate and the target plate, is identified as the key factor in forming the annular weld seam. Both the simulated and actual interface morphologies are sinusoidal, with the amplitude increasing from 3.02 μm at 32 kJ to 6.48 μm at 38 kJ. The wave formation is attributed to shear-induced instability and metal-plastic flow triggered by high-speed collision. No melting is observed at the interface. The maximum shear strength of the joint reaches 90.38% of that of the aluminum base material. Numerical simulations confirm that the interface temperature remains below the melting points of both base materials, which is critical for improving the mechanical performance of the joint.

Key words: magnesium-lithium alloy; electromagnetic pulse welding; numerical simulation; interface morphology

Corresponding author: Xie Jilin, Ph. D., Professor, Jiangxi Key Laboratory of Extreme Manufacturing Technology for High-End Equipment, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, P. R. China, E-mail: xiejilin1990@126.com