

引用格式: 韩泽平, 曹丽杰. AA2195-AZ31B 搅拌摩擦焊温度场数值模拟[J]. 热加工工艺, 2025, 54(15): 59-64+71.

DOI: 10.14158/j.cnki.1001-3814.20230822
<http://www.rjggy.net> rjggy@vip.163.com

AA2195-AZ31B 搅拌摩擦焊温度场数值模拟

韩泽平, 曹丽杰

(上海工程技术大学 机械与汽车工程学院, 上海 201620)

摘要:利用 ABAQUS 软件及 DFLUX 子线接口建立了 AA2195 铝锂合金和 AZ31B 镁合金搅拌摩擦焊的热源数值模型, 研究焊接参数对温度分布的影响, 并与试验结果进行对比验证。结果表明: 转速在 2000 r/min, 焊接速度在 900 mm/min 时获得较好的焊缝; 垂直于焊缝的横向温度分布中, 峰值温度出现在距离对接线 1 mm 左右的 AZ31B 镁合金侧, AA2195 铝锂合金侧的最高温度在焊缝中心的对接线上; 沿着焊深方向最高温度有向对接线侧偏移的趋势; 峰值温度与焊接速度呈逆相关, 与转速呈正相关; 焊接速度的改变相较于转速的变化对温度的影响更显著; 焊缝质量随着焊接速度的增加得到改善; 通过 Arrhenius 方程描述粘连和飞边缺陷的形成, 当焊接温度升高时, 粘连和飞边缺陷形成的可能性增加。

关键词: 搅拌摩擦焊; 温度场; 数值模拟; AA2195 铝锂合金; AZ31B 镁合金

中图分类号: TG453[·]9

文献标识码: A

文章编号: 1001-3814(2025)15-0059-06

Numerical Simulation of Temperature Field during AA2195-AZ31B Friction Stir Welding

HAN Zeping, CAO Lijie

(School of Mechanical and Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

Abstract: Using ABAQUS software and DFLUX subroutine interface, a numerical model of the heat source was established for the friction stir welding of AA2195 Al-Li alloy and AZ31B Mg alloy. The effect of welding parameters on the temperature distribution was studied and it was compared with the experimental results. The results show that the best weld is obtained at rotation speed of 2000 r/min and welding speed of 900 mm/min. In the transverse temperature distribution vertical to the weld, the peak temperature appears at the side of the AZ31B Mg alloy about 1 mm away from the joint line, while the highest temperature at AA2195 Al-Li alloy side is at the joint line of the weld center. The highest temperature along the weld depth has a tendency to shift towards the joint line. The peak temperature is inversely correlated with the welding speed and positively correlated with the rotation speed. The effect of the welding speed on the temperature is more significant than that of the rotation speed. The quality of the weld improves as the welding speed increases. The formation of adhesive and flash defects is described by the Arrhenius equation, which shows that the probability of adhesive and flash defects formation increases as the welding temperature increases.

Key words: friction stir welding; temperature field; numerical simulation; AA2195 Al-Li alloy; AZ31B Mg alloy

铝锂合金和镁合金以其密度低、高比强度、高比刚度和加工性能良好等优点, 在航空航天和汽车等行业应用广泛^[1-2]。在汽车制造和航空航天等领域势必会涉及铝锂合金与镁合金的异种合金连接, 如何

处理铝锂合金构件和镁合金构件的连接, 就成了铝锂/镁合金研究的重点方向。搅拌摩擦焊接是一种固态连接技术, 具有焊接效率高等优点, 被广泛应用于汽车和航空航天领域铝镁等有色金属的焊接^[3]。搅拌摩擦焊热输入主要来源于搅拌头, 热输入过大或过小, 都会产生焊接缺陷, 出现表面飞边、焊接裂纹或者未焊透等, 会直接影响焊接接头的使用性能。因此有必要对异种合金搅拌摩擦焊的温度场进行模拟研究。卢翔等^[4]研究 DP590 钢和 AA6061-T6 铝合金对接的异种金属搅拌摩擦焊, 采用 ABAQUS 软

收稿日期: 2023-03-29 修回日期: 2024-09-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(41807235)

作者简介: 韩泽平, 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 搅拌摩擦焊数值模拟; E-mail: 2942151857@qq.com

通讯作者: 曹丽杰, 女, 副教授, 硕士, 主要研究方向: 轻合金激光焊接技术、摩擦学行为; E-mail: clj@sues.edu.cn

件建立了热源模型,研究不同工艺参数对温度场的影响。费鑫江^[5]采用 ANSYS 软件建立 Q235 钢和 AA6061 铝合金的热源模型,计算并分析了工艺参数对工件温度场的影响。Al-Roubaiy 等^[6]使用 COMSOL 软件来预测搅拌摩擦焊过程中 5083-H116 铝合金和纯铜的温度。Bhattacharya 等^[7]使用 ABAQUS 软件仿真 AA6063 铝合金和 DHP 铜搅拌摩擦焊过程的热分布和材料流动行为。马英磊等^[8]利用 ABAQUS 软件分析了搅拌头转速对 6061 铝合金和 AZ31 镁合金的搅拌摩擦焊搭接接头的影响。本课题建立了 AA2195 铝锂合金和 AZ31B 镁合金的异种合金搅拌摩擦焊热源模型,使用 ABAQUS 软件进行温度场数值模拟,通过改变焊接参数研究温度的分布,并与试验结果进行对比验证。

1 数值模拟

1.1 热源模型

搅拌摩擦焊热源模型的产热主要来自两部分:一部分是搅拌头和工件之间的摩擦产热,另一部分是材料塑性变形产热。在模拟中假设热量的来源主要来自两个区域:一个区域是轴肩和材料接触的区域,另一个区域是搅拌针和材料接触的区域。本文基于鄢东洋等^[9]提出的热源模型对 AA2195 铝锂合金和 AZ31B 镁合金进行搅拌摩擦焊温度场数值模拟,使用 Fortran 语言编写 DFLUX 子程序,再利用 ABAQUS 子程序接口将移动热源加载到搅拌摩擦焊模型中。

1.1.1 轴肩产热模型

在热源模型中,将轴肩面热源设为表面热源,其热流量随轴肩半径的增大呈线性增加,且与焊缝呈轴对称关系。

搅拌头总产热:

$$Q_{tot} = \eta M_z \omega = \frac{2\pi n \eta M_z}{60} \quad (1)$$

式中: Q_{tot} 表示搅拌头总产热; η 表示热利用率,这里取 1,表示不包括塑性变形的产热; M_z 表示搅拌头扭矩; n 表示搅拌头转速; ω 表示搅拌头角速度。

轴肩产热:

$$Q_s = \alpha Q_{tot} \quad (2)$$

式中: Q_s 表示轴肩产生的热量; α 表示轴肩产热在总产热中的占比,这里取 0.75。

轴肩热流密度:

$$q_s(r) = \frac{3Q_s r}{2\pi(R_3^3 - R_2^3)}, (R_2 \leq r \leq R_3, z=0) \quad (3)$$

式中: q_s 表示轴肩的热流密度; R_3 表示轴肩半径; R_2 表示搅拌针底部半径; r 表示轴肩上任意一点到搅拌针轴线的距离; z 表示轴肩到搅拌针端面的距离。

1.1.2 搅拌针产热模型

在热源模型中,搅拌针处的热量被视为热量均匀的体热源,搅拌针采用圆台型搅拌针。

搅拌针产热:

$$Q_p = (1-\alpha)Q_{tot} \quad (4)$$

式中: Q_p 表示搅拌针产生的热量; $1-\alpha$ 表示搅拌针产热在总产热中的占比,这里取 0.25。

搅拌针热流密度:

$$q_p(r) = \frac{3Q_p}{\pi H(R_2^2 + R_2 R_1 + R_1^2)}, (r < R_2, 0 \leq z \leq H) \quad (5)$$

式中: q_p 表示搅拌针的热流密度; R_1 表示搅拌针底部半径; H 表示搅拌针长度。

1.2 有限元模型

1.2.1 几何模型及材料物理参数

利用 ABAQUS 软件的 DFLUX 子程序接口把移动热源加载到模型之中,进行瞬态温度场的求解。模拟采用的镁合金板和铝锂合金板尺寸均为 200 mm×80 mm×2 mm,搅拌头形状及参数如图 1 所示,为简化计算,搅拌头设为不带螺纹。AZ31B 镁合金和 AA2195 铝锂合金的热物理参数分别如表 1、表 2 所示,镁合金密度为 1780 kg/m³,铝锂合金的密度为 2710 kg/m³。

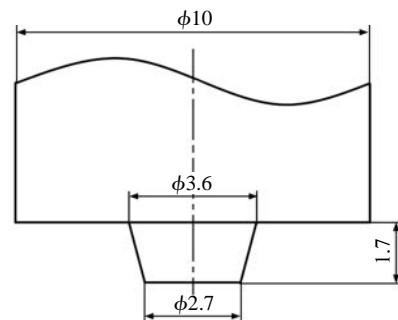


图 1 搅拌头尺寸(mm)
Fig.1 Sizes of the stirring tool (mm)

1.2.2 网格划分

模拟采用的镁合金板和铝锂合金板的焊接方式为对接。为了提高仿真精度和计算效率,网格划分采用中间密两边疏的划分方式,且均被划分为 30000 个 DC3D8 单元,工件网格划分的效果如图 2 所示。

表 1 AZ31B 的材料参数
Tab.1 Material parameters of AZ31B

温度 /℃	导热系数 / $(W \cdot m^{-1} \cdot ^\circ C^{-1})$	比热容 / $(J \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ C^{-1})$
20	96.4	1050
100	101	1130
200	105	1170
300	109	1210
350	113	1260

表 2 AA2195 的材料参数
Tab.2 Material parameters of AA2195

温度 /℃	导热系数 / $(W \cdot m^{-1} \cdot ^\circ C^{-1})$	比热容 / $(J \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ C^{-1})$
25	125	900
100	130	910
200	155	950
300	180	1020
400	187	1100
500	220	1120
600	225	1120

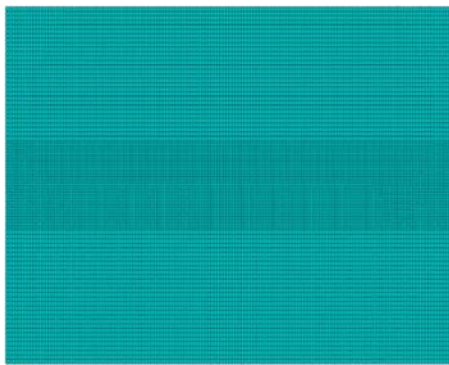


图 2 工件网格划分
Fig.2 Workpiece meshing

1.2.3 边界条件

设置工件初始温度为 25℃。焊接过程中,工件上表面和四个侧面均与空气接触,设置对流换热系数为 35 W/(m²·℃),工件下表面与垫板接触,散热更快,对流换热系数设置为 1000 W/(m²·℃)。在模型创建时,采用同一几何体赋予不同材料的截面属性,所以镁合金和铝锂合金之间的对流导热处于相对平衡状态^[4]。材料的表面热辐射系数为 0.2。

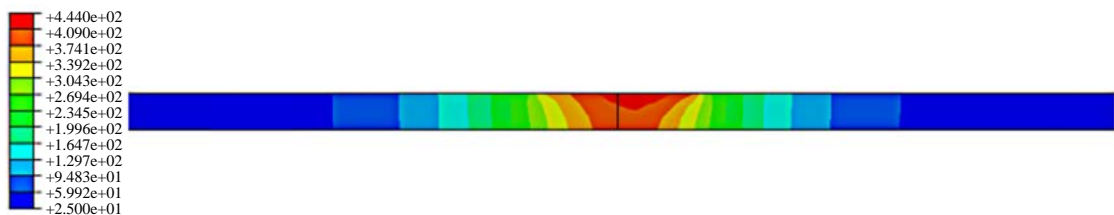


图 4 工件横截面温度云图(℃)
Fig.4 Temperature cloud diagram of cross section of the workpiece (℃)

2 模拟结果与分析

2.1 温度场分析

图 3 为搅拌摩擦焊接过程的温度云图,上侧材料为 AZ31B 镁合金,下侧材料为 AA2195 铝锂合金,焊接参数为转速 2000 r/min,焊接速度 900 mm/min。图 3(a)为搅拌头插入工件 0.5s 时的温度云图,表面温度场呈圆形,焊缝两侧温度较为对称,温度由内向外逐渐降低;图 3(b)为 t=3s 预热结束阶段,圆形温度场左侧温度受到工件左侧壁面与空气的对流换热作用导致温度梯度比右侧低;图 3(c)为稳定焊接阶段,云图呈椭圆形,镁合金侧最高温度为 443.4℃,铝锂合金侧最高温度为 429.1℃,镁合金侧最高温度比铝锂合金侧高 14.3℃,且铝锂合金侧温度梯度小于镁合金侧,这是由于铝锂合金热传导系数大于镁合金。

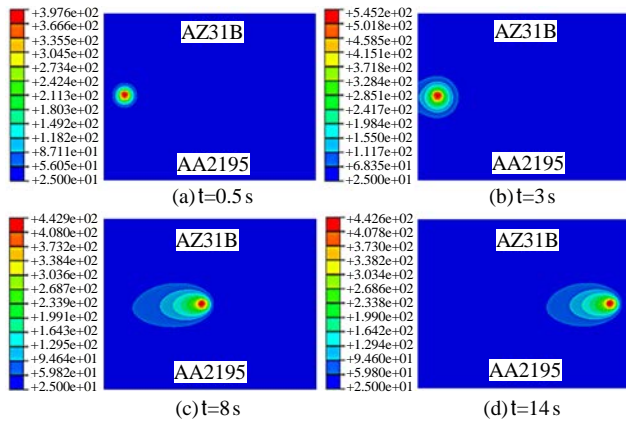


图 3 焊接温度云图(℃)
Fig.3 Temperature cloud diagrams of welding (℃)

图 4 为搅拌头在焊缝中心截面处的温度云图。可以看出,云图左右温度明显呈不对称分布,右边镁合金侧温度要高于铝锂合金侧,峰值温度沿焊接深度方向逐渐降低,且越靠近底部温度下降越快。这是因为热源对轴肩的影响沿焊接深度方向减小,且工件底部与垫板接触,散热更快。

2.2 焊缝方向温度循环

为了深入研究焊接过程中温度的分布情况,在

距离焊缝初始位置 80、100、120 mm 处分别取特征点 A、B、C,取点位置如图 5 所示。图 6 显示了焊缝中心 3 个特征点处的热循环曲线,当热源接近并到达特征点时,特征点的温度迅速上升,此时的热量主要来自于搅拌头的摩擦产热。热源离开后,特征点温度迅速下降,呈急升急降趋势。随着焊接结束,特征点温度进入缓慢下降阶段。随着热源的移动,3 个特征点的峰值温度没有太大变化,稳定焊接阶段,焊缝峰值温度稳定在 440℃左右,没有超过 AA2195 铝锂合金(550℃)和 AZ31B 镁合金(600℃)的熔点。

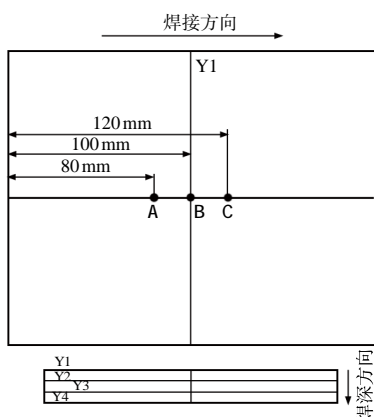


图 5 特征点和路径选取

Fig.5 Selection of feature points and paths

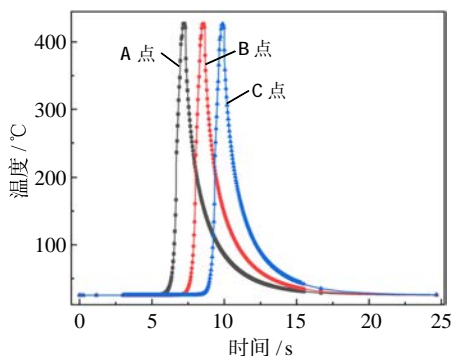


图 6 焊缝中心特征点的热循环曲线

Fig.6 Thermal cycle curves of feature points in weld center

2.3 垂直于焊缝方向的温度场分布

为研究工件中部垂直于焊缝横截面的温度分布,选择图 5 中垂直于焊缝处的截面,沿着焊深方向取 4 个路径:Y1、Y2、Y3、Y4 进行研究,路径间距均为等距。图 7 为移动热源中心经过工件中部时横截面各路径的温度曲线。结合图 4 和图 7 可以看出,温度呈抛物线分布,从焊缝中心对接线到工件的两侧,镁合金侧呈先增大后减小的趋势,铝锂合金侧呈持续减少的趋势,从轴肩两侧一直减小到两板两侧。此外,铝锂合金侧的温度减小程度小于镁合金侧,这意

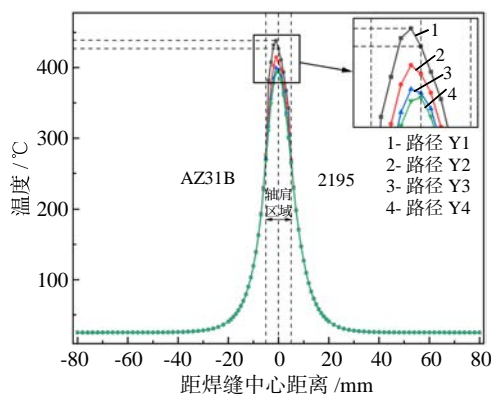


图 7 横截面不同路径的温度分布

Fig.7 Temperature distribution of different paths of the cross section

味着铝锂合金侧的温度梯度小于镁合金侧。路径 Y1、Y2、Y3 的温度曲线可以看到最高温度分布在镁合金侧距离对接线左侧 1 mm 处,分别约为 438.3、414.9、399.7℃,铝锂合金侧最高温度在焊缝对接线上,分别约为 426.9、409.5、394.6℃,两板峰值温度分别相差 11.4、5.4、5.1℃,这是因为镁合金侧的摩擦系数以及切应力比铝锂合金侧大,同样的轴向压力下,镁合金板升温更快,随着热量的传递,镁合金的热导率较低导致焊缝的峰值温度出现在镁合金侧。随着焊深距离的增加,沿着路径 Y4 的温度分布曲线可以看到最高温度向对接线侧偏移,这是由于底部受搅拌头的影响较小,底部与垫板接触散热快,导致铝锂合金板和镁合金板温度分布更加均匀。从图 4 截面云图可以观察到底部云图颜色更加均匀,说明沿着焊深方向的峰值温度有向镁合金和铝锂合金对接线侧移动的趋势。

2.4 焊接参数对温度分布的影响

研究不同焊接参数下搅拌摩擦焊温度分布的变化,并与试验结果进行对比验证。首先,固定转速为 1000 r/min,然后改变焊接速度,分别为 50、150、300 mm/min。其次,固定转速为 2000 r/min,然后改变焊接速度,分别为 300、600、900 mm/min。

不同参数下截面路径 Y1 的温度分布曲线模拟结果如图 8 所示。根据图 8 中的结果,当转速为 1000 r/min 时,50、150、300 mm/min 焊接速度的峰值温度分别为 559.6、520.2、509.7℃,随着焊接速度的增加,峰值温度分别下降 39.4、10.5℃。当转速为 2000 r/min 时,300、600、900 mm/min 焊接速度的峰值温度分别为 536.9、481.1、438.3℃。随着焊接速度的增加,峰值温度分别下降 55.8、42.8℃。可以看出,

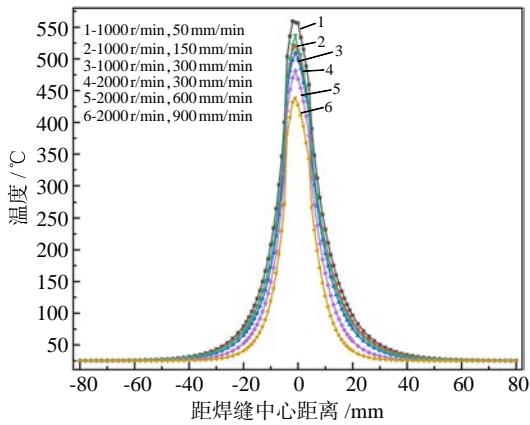


图 8 不同参数下截面路径 Y1 的温度分布曲线

Fig.8 Temperature distribution curves of Y1 path on the section under different parameters

随着焊接速度的增加,峰值温度下降明显。

图 9 为不同焊接参数下的焊接结果。通过仿真和试验结果的对比,从图 9(a)发现在转速为 1000 r/min,焊速为 50 mm/min 时,峰值温度已经达到铝锂合金的熔点,且为镁合金熔点的 93%。这导致焊缝出现毛刺、飞边、熔化和粘连等缺陷。由于温度过高导致材料粘连在搅拌头周围,如图 10 所示。如图 9(b)、(c)所示,随着焊接速度的增加,焊缝的质量有所改善,但仍有飞边、毛刺等缺陷。在转速为 2000 r/min 时,图 9(d)、(e)、(f)的焊接结果显示,在不同的焊接速度下,峰值温度下降明显,但仍有飞边等缺陷。图 9(d)中,焊接温度虽没达到材料熔点,但仍较高,达到铝锂合金的 81.3%~97.6%,镁合金的 89.5%。图 9(e)中,温度达到材料熔点的 80%~90%,在搅拌摩擦焊焊接温度的范围之内。图 9(f)中,温度达到材料熔点的 80%。随着焊接速度的增加,焊接纹路越来越清晰,飞边缺陷有所改善。

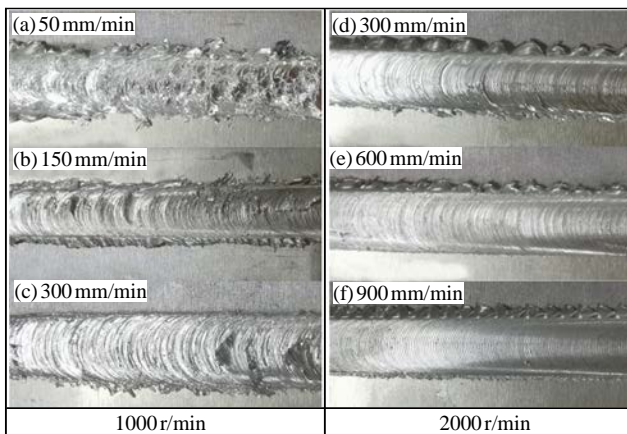


图 9 不同焊接参数下的焊接结果

Fig.9 Welding results under different welding parameters



图 10 材料粘连

Fig.10 Material adhesion

在搅拌摩擦焊过程中,焊接速度、转速和温度的关系可以用式(6)描述^[10]:

$$\frac{T}{T_m} = K \left(\frac{\omega^2}{v \times 10^4} \right)^\alpha \quad (6)$$

式中:T 表示焊接温度; T_m 表示材料的熔点; ω 表示搅拌头的转速; v 表示焊接速度; K 和 α 为常量。

上述结果和公式(6)显示,转速 ω 固定,改变焊接速度 v , 峰值温度 T_{max} 与焊接速度 v 呈逆相关,这是因为焊速增加,摩擦产热量减少,单位热流密度也随之减少。固定焊接速度 v 为 300 mm/min 时,改变转速为 1000、2000 r/min, 得到的峰值温度 T_{max} 分别为 509.7、536.9°C, 峰值温度 T_{max} 与转速 ω 呈正相关,这是因为转速增加,摩擦产热量增加,单位热流密度也随之增加,峰值温度上升。焊接速度固定,改变转速时的温度差距并不大,说明在该参数下转速的影响较小,而焊接速度的改变对温度和焊缝质量有着较大的影响,焊接速度对温度场的影响比转速对温度场的影响更加显著,且焊缝的质量随着焊接速度的增加而得到改善,转速在 2000 r/min,焊接速度在 900 mm/min 时获得焊缝质量最佳。因此,在进行搅拌摩擦焊时,需要根据材料的特性和实际需要,合理选择焊接参数,以保证焊接质量和效率。

2.5 温度对焊接缺陷的影响

2.5.1 温度对粘连缺陷的影响

根据仿真和试验结果的对比,发现主要的焊接缺陷是由温度引起的粘连和飞边,可以使用 Arrhenius 方程进行描述。

在搅拌摩擦焊接过程中,如果焊接区域温度过高或者摩擦过程中受到过大的压力,容易出现粘连现象,如图 9(a)所示,此时,焊接接头会出现严重的缺陷,严重影响接头的性能。温度和搅拌摩擦焊接中

产生粘连的关系可以用以下公式描述^[11]:

$$A=k\exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (7)$$

式中: A 表示反应速率常数; k 表示 Boltzmann 常数; E_a 表示反应的活化能; R 表示气体常数; T 表示焊接温度。这个公式描述了化学反应在高温下发生的速率和温度的关系,这里的粘连可以看作是一个化学反应的过程。随焊接温度 T 升高,化学反应的速率常数 A 会变大,粘连的可能性也会增加。当转速为 1000 r/min 时,根据公式(6)和(7),随着焊接速度 v 的增加,搅拌头和材料接触时间逐渐减小,导致温度 T 逐渐下降,化学反应的速率常数 A 减小,粘连缺陷逐渐得到改善,如图 9(a)~(c)所示。虽然公式中的反应速率常数 A 可以反映粘连缺陷的发生可能性,但是粘连缺陷并不是一种化学反应过程,因此不能完全用化学反应的速率常数来描述。粘连的发生涉及多种因素,如摩擦加热、压力、摩擦系数等,需要更加全面地考虑这些因素,才能更准确地描述粘连缺陷的形成。

为了避免粘连缺陷的形成,在搅拌摩擦焊接过程中,需要通过焊接参数来控制焊接热输入,降低反应速率常数 A ,以减少粘连的可能性。

2.5.2 温度对飞边缺陷的影响

飞边缺陷是指焊接接头中出现的高度不一的边缘,通常由于焊接头部的不均匀加热和金属材料的塑性变形造成。温度是影响飞边缺陷形成的重要因素之一。搅拌摩擦焊接中温度和飞边缺陷之间的关系可以通过式(8)描述^[12-13]:

$$V=k\exp\left(\frac{Q}{RT}\right) \quad (8)$$

式中: V 为固态金属材料的体积流变速率; k 为 Boltzmann 常数; Q 为激活能; R 为气体常数; T 为焊接温度。该公式描述了温度和金属材料流变速率之间的关系。在搅拌摩擦焊接中,焊接头部会受到搅拌工具的旋转和下压力的作用,导致金属材料发生塑性变形和流变行为。随着焊接温度 T 的升高, Q 的值减小,这意味着金属材料的流变速率 V 增加,这会加剧金属材料的塑性变形和流变,进而导致飞边缺陷形成的概率增加。当转速为 2000 r/min 时,根据式(6)和(8),随着焊接速度 v 的增加,搅拌头和材料接触时间逐渐减小,导致温度 T 逐渐下降,流变速率 V 减小,减少了金属的塑性变形和流变,进而减少了飞边缺陷,如图 9(d)~(f)所示。这个公式只能描述温

度和金属材料流变速率之间的关系,反映缺陷发生的可能性,不能直接用来描述飞边缺陷的形成机理和规律。飞边缺陷的形成是一个相对复杂的过程,需要考虑多种因素的综合作用,如材料的物理性质、搅拌工具的形状和参数、焊接过程的条件等,才能更加精确地描述飞边缺陷的形成。

为了避免形成飞边缺陷,在搅拌摩擦焊接过程中,需要控制焊接参数来控制热输入,以减少金属材料的塑性变形和流变行为,从而降低飞边缺陷的发生率。

3 结论

(1) 当转速为 2000 r/min,焊接速度为 900 mm/min 时获得较好的焊缝;焊缝路径上的特征点温度热循环具有陡升陡降的趋势,且稳定焊接过程峰值温度变化趋于稳定;垂直于焊缝的横向温度分布中,峰值温度出现在距离对接线 1 mm 左右的 AZ31B 镁合金侧,铝锂合金侧的最高温度在焊缝中心的对接线上,沿着焊深方向最高温度有向对接线侧偏移的趋势;铝锂合金侧温度梯度小于镁合金侧。

(2) 搅拌头旋转速度不变,随着焊接速度的增加,焊缝峰值温度随之下降,峰值温度与焊接速度呈逆相关;焊接速度不变,随着转速的增加,峰值温度随之上升,峰值温度与转速呈正相关;焊接速度的改变相较于转速的变化对温度的影响更显著;焊缝质量随着焊接速度的增加得到改善。

(3) 温度是影响搅拌摩擦焊接中粘连和飞边缺陷的主要因素;可通过 Arrhenius 方程描述粘连缺陷和飞边缺陷的形成,当焊接温度升高时,增加了粘连和飞边缺陷形成的可能性。

参考文献:

- [1] 李文林. 2195 铝锂合金无减薄搅拌摩擦焊及匙孔修复研究 [D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2020.
- [2] 李新迪. AZ31B 镁合金板材液压胀形工艺数值模拟研究 [D]. 西安:长安大学,2020.
- [3] Sharghi E, Farzadi A. Simulation of temperature distribution and heat generation during dissimilar friction stir welding of AA6061 aluminum alloy and Al-Mg₂Si composite [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 118:3147-3159.
- [4] 卢翔,邵良臣,李志勇,等. DP590 钢/AA6061-T6 铝合金异种金属对接搅拌摩擦焊温度场的数值模拟 [J]. 热加工工艺, 2021, 50(1):151-155.

(下转第 71 页)

量减小。在摩擦过程中,消耗的强化层颗粒与航空液压油形成混合润滑状态,进一步减小摩擦系数,使耐磨性能增强。而经微弧氧化强化的试块,摩擦磨损位置的强化层已完全损失掉,随之消耗基材,耐磨性减弱,与其周围的微弧氧化层形成明显的分界。

3 结论

(1) TC6 钛合金表面硬度低,经过离子氮化、真空渗碳、化学镀镍及微弧氧化工艺强化处理后得到不同强化相的高硬度层。

(2) TC6 钛合金黏着倾向大,耐磨性差,在设定的载荷下,与 15-5PH 钢对磨时,自身不耐磨,摩擦系数为 0.82,磨损率为 $4.96 \times 10^{-4} \text{mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ 。

(3) 4 种表面改性强化工艺均使得钛合金表面硬度增加,耐磨性能显著增强。经过离子氮化、真空渗碳以及化学镀镍强化后,摩擦系数及磨损率下降显著,耐磨效果优良且都优于微弧氧化。

参考文献:

- [1] 付艳艳,宋月清,惠松晓,等. 航空用钛合金的研究与应用进展[J]. 稀有金属,2006,30(6):850-856.
- [2] 李梁,孙健科. 钛合金的应用现状及发展前景[J]. 稀有金属材料与工程,2014,43(12):3114-3119.
- [3] 熊华,茹菊红,唐长斌,等. TC6 合金柱塞表面改性对耐磨性能的影响[J]. 金属热处理,2012,37(7):37-41.
- [4] 姬寿长,李争显,罗小峰,等. TC21 钛合金表面无氢渗碳层耐磨性分析[J]. 稀有金属材料与工程,2014,43(12):3114-3118.
- [5] Khoperia T N. Investigation of the substrate activation mechanism and electroless Ni-P coating ductility and adhesion [J]. Microelectronic Engineering, 2003, 69: 391-399.
- [6] Yerokhin A L, Nie X, Leyland A, et al. Characterisation of

oxide films produced by plasma electrolytic oxidation of a Ti6Al4V alloy[J]. Surf. Coat. Technol.,2000,130:195-206.

- [7] 王宝云,李争显,马东康. 钛及钛合金表面强化技术[J]. 稀有金属快报,2005(7):5-6
- [8] Tang B, Wu P Q, Li X Y, et al. Tribological behavior of plasma Mo-N surface modified Ti-6Al-4V alloy[J]. Surface and Coatings Technology,2004,179(2/3):333-339
- [9] 张高会. 钛及钛合金 Ti6Al4V 双层辉光离子无氢渗碳及无氢碳氮共渗的研究[D]. 太原:太原理工大学,2004.
- [10] 胡信国,王殿龙,戴长松,等. 不同磷含量化学镀镍层硬度和耐蚀性能[J]. 电镀与精饰,2003,22(3):18-21.
- [11] 范红富,闫红娟,张翼,等. 热处理对钛基化学镀 Ni-P 镀层性能的影响[J]. 材料热处理学报,2008(4):153-156.
- [12] Wang Y M, Lei T Q, Guo L X, et al. Fretting wear behaviour of microarc oxidation coatings formed on titanium alloy against steel in unlubrication and oil lubrication [J]. Applied Surface Science,2005,23:8113-8120.
- [13] 杨闯,彭晓东,刘静,等. TC4 钛合金低压真空氮化改性层的制备与性能[J]. 材料工程,2015,43(3):78-82.
- [14] 杨闯,刘静,马亚芹,等. TC4 钛合金真空渗氮组织与性能[J]. 材料热处理学报,2015,36(7):188-192.
- [15] 赵润宇,杨峰,颜志斌,等. TA2 钛合金真空渗碳层组织及性能研究 [J]. 贵州师范大学学报(自然科学版),2017,35(6):99-103.
- [16] 林翠,赵立才. TC4 钛合金表面化学镀 Ni-P 合金耐磨层研究[J]. 稀有金属材料与工程,2013,42(3):507-512.
- [17] 杜楠,王帅星,赵晴. TC4 钛合金微弧氧化复合膜的结构及摩擦磨损性能[J]. 稀有金属材料与工程,2013,42(3):621-624.
- [18] 汤金刚,刘道新,唐长斌,等. 辉光离子渗氮对 Ti6Al4V 合金在航空煤油中摩擦学性能的影响[J]. 机械科学与技术,2014(7):33-37.
- [19] 姬寿长,李争显,罗小峰,等. TC21 钛合金表面无氢渗碳层耐磨性分析[J]. 稀有金属材料与工程,2003,20(8):41-45.
- [20] 杨苗,邢亚哲,陈永楠. 钛合金表面功能性涂层的制备与研究进展[J]. 热加工工艺,2018,47(24):15-20. [1]

(上接第 64 页)

- [5] 费鑫江. 钢-铝异种金属激光加热辅助搅拌摩擦焊数值模拟和试验研究[D]. 长沙:湖南大学,2017.
- [6] Al-Roubaiey A O, Nabat S M, Batako A D L. Experimental and theoretical analysis of friction stir welding of Al-Cu joints [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,2014,71(9):1631-1642.
- [7] Bhattacharya T K, Das H, Jana S S, et al. Numerical and experimental investigation of thermal history, material flow and mechanical properties of friction stir welded aluminium alloy to DHP copper dissimilar joint [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,2017,88(1):847-861.
- [8] 马英磊,郑洋,张建军,等. 铝/镁搅拌摩擦焊异质接头热-力场仿真研究[J]. 焊接技术,2021,50(3):6-10.
- [9] 鄢东洋,史清宇,吴爱萍,等. 铝合金薄板搅拌摩擦焊接残余

变形的数值分析[J]. 金属学报,2009,45(2):183-188.

- [10] Zheng F Y, Wu Y J, Peng L M, et al. Microstructures and mechanical properties of friction stir processed Mg-2.0 Nd-0.3 Zn-1.0 Zr magnesium alloy [J]. Journal of Magnesium and Alloys,2013,1(2):122-127.
- [11] Mishra R S, Ma Z Y. Friction stir welding and processing[J]. Materials Science and Engineering R,2005,50(1/2):1-78.
- [12] You J, Zhao Y, Miao S, et al. Effects of welding physical fields on the microstructure evolution during dynamic-stationary shoulder friction stir welding[J]. Journal of Materials Research and Technology,2023,23:3219-3231.
- [13] Nandan R, DebRoy T, Bhadeshia H. Recent advances in friction-stir welding:process,weldment structure and properties [J]. Progress in Materials Science,2008,53(6):980-1023. [1]