

3003铝合金与0Cr18Ni10Ti不锈钢气化冲击焊接界面行为

吴媛媛¹, 谷晓亚², 刘晓余², 苏珊³

1. 石家庄财经职业学院 河北石家庄 050200

2. 河北新莱曼建筑科技有限公司 河北石家庄 051330

3. 石家庄铁道大学机械工程学院 河北石家庄 050043

摘要: 针对Al、Fe元素物理化学性能差异大, 常规焊接方法焊接性差、接头强度低等问题, 通过数值模拟与试验研究相结合的方法, 分析不同的碰撞速度、碰撞角度对3003铝合金和0Cr18Ni10Ti不锈钢气化冲击焊接界面行为及产物分布的影响。使用光滑粒子动力学 (SPH) 方法对气化冲击焊接过程中分析界面行为及温度分布情况进行分析, 研究不同的工艺参数条件对界面波形特征的影响规律, 得出界面射流产生的条件和界面特征的形成机理, 比较不同工艺条件下得到的界面波形特征的变化趋势和界面产物的分布特点。数值模拟和试验结果对推广气化冲击焊接在异种金属材料上的工程应用具有重要的意义。

关键词: 异种材料; 气化冲击焊接; 数值模拟; 界面行为

Interfacial behavior of vaporization foil actuator welding of 3003 aluminum alloy and 0Cr18Ni10Ti stainless steel

WU Yuanyuan¹, GU Xiaoya², LIU Xiaoyu², SU Shan³

1. Shijiazhuang Vocational College of Finance and Economics, Shijiazhuang 050200, Hebei, China

2. Hebei Xinlaiman Construction Technology Co. Ltd., Shijiazhuang 051330, Hebei, China

3. Shijiazhuang Tiedao University, School of Mechanical Engineering, Shijiazhuang 050043, Hebei, China

Abstract: Considering the significant differences in the physical and chemical properties of aluminum and iron, the poor weldability of conventional welding methods, and the low joint strength, this study analyzes the effects of various collision speeds and angles on the interface behavior and product distribution in vaporization foil actuator welding of 3003 aluminum alloy and 0Cr18Ni10Ti stainless steel through a combination of numerical simulation and experimental research. The SPH method is employed to analyze the interface behavior and temperature distribution during the vaporization foil actuator welding process, and the influence of various process parameters on the interface waveform characteristics is examined. The conditions for the generation of interface jets and the formation mechanism of interface characteristics are determined, and the changing trends of interface waveform characteristics and the distribution characteristics of interface products under different process conditions are compared. The numerical simulation and experimental results are highly significant for the engineering application of vaporization foil actuator welding in dissimilar metal materials.

Keywords: dissimilar material; vaporization foil actuator welding; numerical simulation; interfacial behavior

基金项目: 河北省自然基金面上项目 (E2021210117)。

1 序言

在交通运输工具领域,白车身自重对燃油经济性具有十分显著的影响。对于传统燃油汽车,每减重100kg,每百公里油耗可降低0.4L,CO₂排放可减少1kg,若每辆车每年平均运行2万km,每年可降低油耗80L,减少CO₂排放约200kg;对于纯电动汽车,质量每降低10%,电耗可降低5.5%,续航里程增加5.5%^[1]。减轻车身质量对实现节能减排具有重要的现实意义。

铝合金具有密度小、质量轻、高比强度和高刚度的优点^[2, 3],使用铝合金替代钢作为制造材料,能够有效地实现产品轻量化设计的目标。铝合金和高强钢在物理化学性质上存在较大差异^[4],传统的焊接工艺(如熔化焊^[5]、压力焊^[6]和钎焊^[7]等)在实际应用中存在很多问题。

铝合金和高强钢性能差异性大,为可靠焊接提出技术挑战^[7]。高速冲击焊接(High Velocity Impact Welding, HVIW)是一种固态连接技术,具有无热影响区、金属间化合物少等优点^[8]。高速冲击焊接技术包括爆炸焊^[9](EXW)、电磁脉冲焊接^[10](MPW)、气化冲击焊接^[11](VFAW)。这些技术的工作原理基本相同,即对焊接的飞板施加一个冲击力,飞板高速撞击靶板,在撞击力和射流的作用下形成可靠的冶金结合。

气化冲击焊接采用高压电容充放电,通过金属箔气化驱动飞板与靶板撞击来实现焊接。相较于爆炸焊,不涉及炸药的存储、运输和使用,安全性更高。与电磁脉冲焊接相比,气化冲击焊接使用金属箔取代线圈成为消耗品,成本远小于线圈,经济性更高,在异种材料焊接领域有着广泛的应用前景^[12]。

目前,气化冲击焊接工艺已实现了大部分金属组合的焊接,但其界面行为和界面机理未明确。为完善异种材料气化冲击焊接界面结合机理,本研究采用数值模拟与试验相结合的方法,研究冲击速度与冲击角度对界面行为、产物和分布的影响规律,从而明确气化冲击焊接铝合金与高强钢界面结合机理,为气化冲击焊接在汽车产业白车身中的应用提供技术支撑。

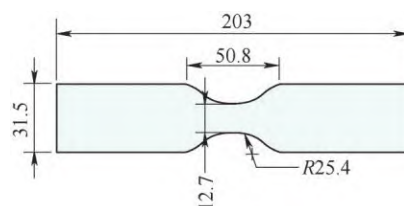
2 试验材料与方法

试验中所用飞板材料为3003铝合金,靶板材料

为0Cr18Ni10Ti不锈钢。3003铝合金飞板外形尺寸为70mm×70mm×1.02mm,0Cr18Ni10Ti不锈钢靶板外形尺寸为70mm×140mm×4mm。

铝箔材质为1100铝合金,其外形尺寸如图1所示。按设计尺寸将多层铝箔叠加夹紧后,采用水切割的方法加工。

气化冲击焊接技术是在电磁脉冲成形技术上发展而来的,可以使用电磁脉冲成形电源。试验采用的电源为MAGNEFORM-16的电磁脉冲成形电源,最大充电能量16kJ,电压为8.16kV,电容426μF。试验中所用电源和焊接工装如图2所示。



a) 铝箔外形尺寸



b) 铝箔实物

图1 试验用铝箔



a) 焊接电源



b) 焊接工装

图2 气化冲击焊接电源和焊接工装

本文采用数值模拟方法分析界面碰撞行为,在无网格算法中,光滑粒子动力学(Smoothed Particle Hydrodynamics, SPH)较为常用。在计算大变形问题时,使用网格法难以避免出现因网格畸变而导致运算减缓甚至中止的情况,此时光滑粒子动力学算法是一种更好的选择。由于光滑粒子动力学粒子具有很好的流动性,更容易从基体中剥离出来,因此非常适合模拟气化冲击焊接过程中界面的射流现象及界面波的形成过程。本文在研究中建立的飞板

与靶板碰撞模型是二维模型，因此面网格单元类型选用稳定的四边形，综合考虑计算结果的精确度和计算效率，研究模型划分的网格单元边长设置为 $10\mu\text{m}$ 。

3 碰撞速度对界面行为的影响

异种金属接头界面金属间化合物的性能直接决定界面的性能。能量输入为 8kJ ，间隙为 3mm 的3003铝合金和0Cr18Ni10Ti不锈钢界面形貌如图3所示。由图3可知，3003铝合金和0Cr18Ni10Ti不锈钢界面结合区域主要由未熔合区、金属间化合物结合区和波形紧密结合区3部分组成。受铝箔形状的影响，界面中心处中间层与飞板碰撞角度为零，从而使该区域无法形成可靠的结合。碰撞由中心区域往外侧扩展，在设定的碰撞角度下，界面在碰撞产生的热量作用下，界面处形成了长度约 2mm 厚度不均匀的金属间化合物结合区域，最厚处约 $28\mu\text{m}$ ，3003铝合金侧呈平直状，0Cr18Ni10Ti不锈钢侧呈不规则波浪形，且在界面金属间化合物处卷入了一些破碎的不锈钢粒。

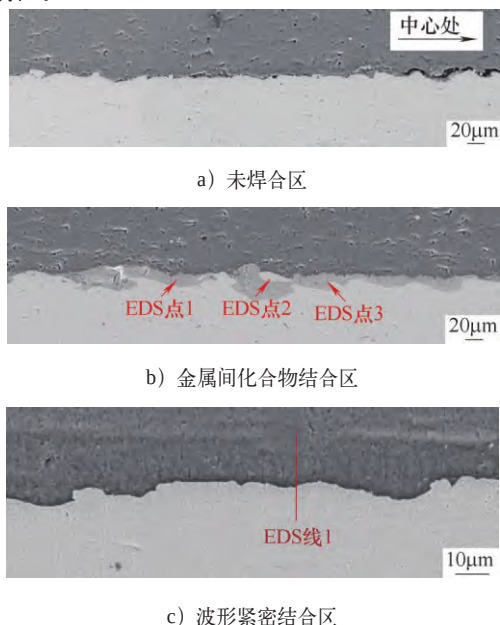


图3 界面结合不同区域形貌

出现波形不对称的主要原因是3003铝合金和0Cr18Ni10Ti不锈钢的物理性能差异较大。在界面处的大冲击力作用下，界面处的金属间化合物连接区域的厚度呈随能量输入增大而减小的趋势，金属间化合物连续分布区域的长度随能量输入的增大而增大。当金属间化合物结合区域在能量输入为 6kJ 时，

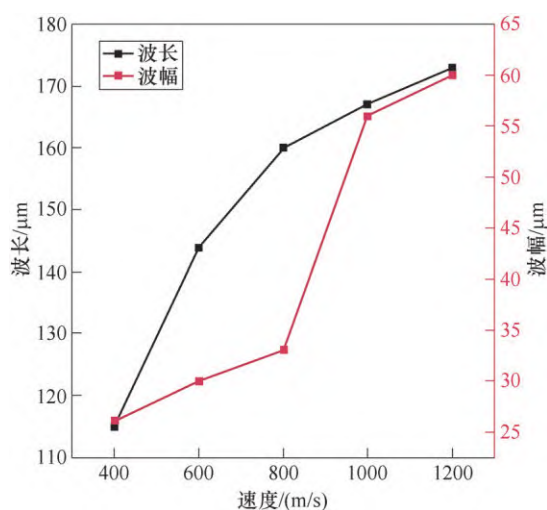
厚度最大，约为 $50\mu\text{m}$ ，最长连续分布区域长度约 $300\mu\text{m}$ 。当能量输入增加到 8kJ 时，界面厚度减小到 $28\mu\text{m}$ ，连续分布金属间化合物结合区域长约 2mm 。当能量输入达到 10kJ 时，界面处金属间化合物结合区域的长度进一步增大，达到 4mm ，金属间化合物呈间断性分布，最厚处 $25\mu\text{m}$ 。

随着能量输入的增大，金属间化合物区的厚度先增大后减小。从抗剪及抗拉性能测试后试样失效区域可看出，3003铝合金和0Cr18Ni10Ti不锈钢界面的结合区域外侧强度高于中心侧，所有接头失效区域均位于中心区域。在气化冲击焊接工艺过程中，碰撞角度随着距离中心位置的增大而增大，位于波状结合区域靠近中心侧的碰撞角度小于外侧，该区域的连接效果较外侧更差。中间区域的碰撞角度基本为零，使得该区域的连接效果差。

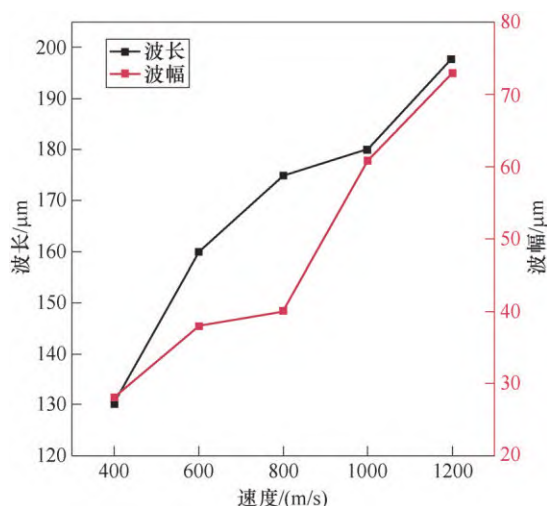
铝箔气化过程中，因为脉冲电流的上升时间很短（ $8\sim 12\mu\text{s}$ ），所以作用于铝箔上的能量的热扩散可以基本忽略不计，能量基本作用于铝箔，在达到一定程度后随着铝箔气化后的膨胀而释放，从而作用于紧贴铝箔的飞板，使飞板获得一个较大的加速度。为研究冲击速度对界面行为的影响，数值模拟试验中设置其余参数不变，只改变飞板冲击速度的大小，通过模拟计算得到不同速度下界面的焊接动态过程。飞板的初始速度设置为 400m/s 、 600m/s 、 800m/s 、 1000m/s 和 1200m/s 。

现有的研究表明，气化冲击焊接接头强度及可靠性与界面波形结合区域的长度和波幅有显著关联，通过分析各种速度条件下波形的波长和波幅来研究冲击速度对界面形状的影响。不同碰撞角度对界面波长和波幅的影响如图4所示。由图4可知，碰撞角度较小时，界面波形结合特征不明显；当碰撞角度达到 12° 时，界面处出现明显的波状结合区域。

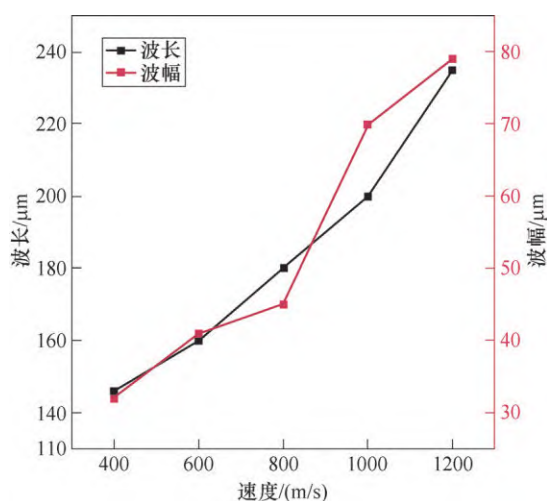
当碰撞角度为 16° 时，不同碰撞速度下的界面波状结合形貌如图5所示。当碰撞角度不变时，飞板的波状结合区域的长度与波幅随碰撞速度的增大而明显增大。碰撞速度较小时，碰撞界面接近平直形状，不能观察到连续且规则的波形图像。随着设定的飞板初始速度不断增大，可以在焊接结合界面观察到一段连续的波形，波的形成方向与碰撞点的移动方向一致。



a) 碰撞角度为12°



b) 碰撞角度为16°



c) 碰撞角度为20°

图4 不同碰撞角度对界面波长和波幅的影响

由图5可看出,当飞板的初始速度为400m/s时,在飞板与靶板的结合界面可以观察到轻微起伏的波

形结合带,但是波形的波长和波幅较小;当飞板的初始速度增大到600m/s时,界面波形更加明显,波长增加,波幅增加;当飞板的初始速度增加到800m/s,波长和波幅进一步增大;当飞板冲击速度继续增大到1000m/s时,在界面产生的波形特征更加明显,但是在连接界面开始出现一些裂纹和裂缝,将会对结合界面的强度造成不利影响;当冲击速度到达1200m/s时,飞板撞击靶板后出现回弹现象,无法形成高强度的稳定连接。

随着飞板的冲击速度增大,在冲击焊接碰撞点附近可以观察到细小的金属射流。金属射流是一种在冲击焊接过程产生的正常现象,其飞溅的方向与焊接点的移动方向相同。由于飞板与靶板在短时间内以较高的速度发生碰撞,碰撞点处的应力超过材料的强度,导致部分金属材料从基体脱落形成金属射流,金属射流产生位置一般在碰撞点的前方,金属射流在产生的同时不断冲刷靶板的表面,清除靶板材料表面的氧化物和污渍,促使靶板内部暴露出的材料与飞板材料进行结合。



a) 碰撞速度为400m/s



b) 碰撞速度为600m/s



c) 碰撞速度为800m/s



d) 碰撞速度为1000m/s



e) 碰撞速度为1200m/s

图5 不同碰撞速度界面形貌(碰撞角度16°)

采用扫描电镜能谱分析仪对界面处的成分及元

素扩散情况进行定量分析,图3b中的1~3点的元素含量见表1。由表1可看出,界面处的金属间化合物化学成分随着碰撞角度的变化不大,根据Al和Fe的比值大体上可以推测为AlFe和Al₃Fe。金属间化合物的存在表明界面处两侧的金属发生了熔化,并伴有冶金反应的发生。随着碰撞角度的增大,这一层金属间化合物的成分、厚度和形态有所不同。

表1 界面处不同区域元素含量(质量分数)(%)

测试点	Al	Cr	Fe	Ni	Mn	Si	Ti
1	41.8	9.1	42.56	4.64	1.53	0.2	0.17
2	0.77	18.19	69.79	8.77	2.02	0.34	0.12
3	42.49	8.79	41.17	5.53	1.8	0.14	0.08

对3003铝合金和0Cr18Ni10Ti不锈钢界面处(见图3c中EDS线1)进行元素线扫描,结果如图6所示。从图6可看出,对于界面紧密结合区域和金属间化合物过渡区域,铝和不锈钢界面处的Al、Fe的含量曲线并非陡然垂直上升或下降,而是有一个斜率,这种现象表明在界面处出现了元素的扩散现象。

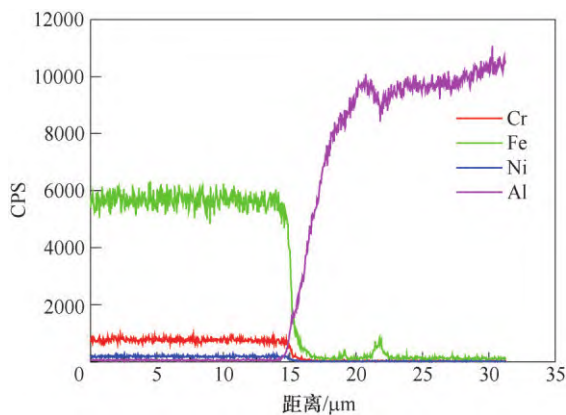


图6 界面元素线分布

4 界面产热分析

在气化冲击焊接过程中,飞板与靶板高速撞击的塑变性能与绝热剪切作用,界面温度升高,界面局部的基体材料达到熔点后熔化,实现异种材料的冶金结合。图7所示为碰撞角度为20°、碰撞速度为

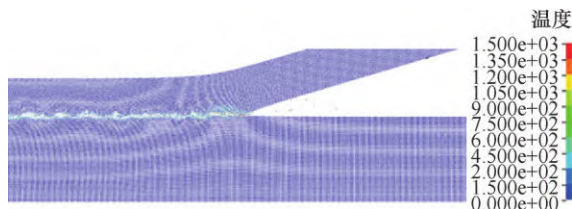


图7 界面温度分布情况

1200m/s时界面的温度分布情况。

由图7可看出,高温区域集中在两种材料的结合界面附近,形状呈现为细长的波浪形,高温区所覆盖的区域与焊接界面变形区域的波形相似。在铝板与钢板的碰撞点附近的温度高于周围区域,局部温度高于1500℃。碰撞点前方飞溅出来的金属射流温度远高于焊接结合面两侧的温度,这说明了由于过高的压力和温度使部分铝板材料熔化并以颗粒的形式脱离飞板,因此形成金属射流。随着碰撞速度的增加,界面的波形尺寸增加,变形程度增大,焊接结合界面处的高温区域扩大,铝合金材料中达到熔点的区域增大。

5 结束语

本文采用试验数据与数值模拟结合的方法,分析不同碰撞速度和碰撞角度3003铝合金与0Cr18Ni10Ti不锈钢界面形貌及产物,结论如下。

1) 界面结合由未熔合区、金属间化合物结合区和紧密结合区3部分组成。波峰高度和两波间隔从中心区域向外逐渐增大。随着能量输入的增大,波峰高度和两波间隔也随之增大,波状结合区域距中心的距离也增大,界面波状结合区域的宽度和波峰间隔随碰撞角度的增大而改变。

2) 界面结合强度主要由金属间化合物结合区和紧密结合区长度决定。界面在冲击力作用下产生温升,形成金属间化合物和元素扩散达到结合的目的。

参考文献:

- [1] 韩立军, 郭院波. 汽车轻量化车身先进连接技术的应用与发展[J]. 金属加工(热加工), 2021(4): 1-6.
- [2] 王龙权, 尹天天, 张岩, 等. 7xxx高强铝合金熔化焊研究进展[J]. 焊接, 2023(8): 44-54.
- [3] 吴志鸣, 李金龙, 彭章祝. 轨道交通车体用铝合金材料及其焊接技术[J]. 金属加工(热加工), 2021(2): 5-10.
- [4] 张明瑞, 向婷, 高志伟, 等. 高强钢焊接接头优化方法研究现状[J]. 金属加工(热加工), 2024(6): 64-72.
- [5] GAO K, YE K, GONG J F, et al. Effect of post-weld heat treatment on microstructure and mechanical properties of induction pressure welded joint for (下转第45页)

由式(12)可知,焊丝直径越小,熔滴表面张力越小,在平焊过程中对熔滴过渡的阻碍越小,熔滴能更容易脱离焊丝。缆式焊丝是由7根细丝构成,焊接时,熔滴必然先由细丝熔化而成,细丝直径是普通单根焊丝直径的1/3,小熔滴的表面张力远小于普通单根焊丝,更容易脱离焊丝,这也是缆式焊丝埋弧焊高效节能的一个原因。

5.5 缆式焊丝电弧旋转力分析

熔化的母材金属熔滴受到包括重力、表面张力、电磁力、斑点压力及等离子力等多种力的综合作用。与普通单根焊丝埋弧焊不同,缆式焊丝埋弧在焊接过程中,随着焊丝端部不断熔化,焊丝相对发生旋转,产生电弧旋转力 F_r 。

缆式焊丝焊接时的送丝速度是 V ,则外围丝的相对旋转速度是 V_1 ,即

$$V_1 = V \tan \alpha \quad (13)$$

式中 α ——缆式焊丝捻角($^\circ$)。

产生的电弧旋转力 F_r 为

$$F_r = \frac{m(V \tan \alpha)^2}{d} \quad (14)$$

式中 m ——熔滴质量(g);

d ——构成缆式焊丝的细丝直径(mm)。

电弧旋转力 F_r 的存在使熔滴产生离心力,将熔滴甩离焊丝,增大了金属熔滴的过渡速度,减少了金属熔滴在焊丝端部停留的时间,这也是缆式焊丝高效节能的一个原因。

综合缆式焊丝的特性(缆式焊丝干伸长、焊丝电阻热、熔滴表面张力及焊丝电弧旋转力),使得缆式焊丝埋弧焊相对于单丝焊丝埋弧焊具有熔敷率大、降低能耗的优势。

6 结束语

缆式埋弧焊丝与普通单焊丝埋弧焊相比,综合耗电量降低约20%,缆式焊丝埋弧焊高效节能特性使其优势显著,具有极大的推广意义。2016—2022年的近7年时间,我国焊丝埋弧焊的年消耗量从44.8万t上升到73.7万t,若用缆式焊丝代替普通单根焊丝进行埋弧焊接,按每吨缆式焊丝用电量约2520kW·h计算,每年可为我国节约5亿kW·h,创造巨大的经济效益,而且对于环境保护等方面也具有重要的长远意义。

参考文献:

- [1] 潘际奎. 展望21世纪焊接科研[J]. 中国机械工程, 2000, 11(2): 21-25.
- [2] 林尚杨. 我国焊接生产现状与焊接技术的发展[J]. 船舶工程, 2005, 27(S1): 15-24.
- [3] 李峰. 49丝埋弧焊焊接方法研究[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2013.
- [4] 杨志东. 新型粗丝埋弧焊工艺研究[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2013.
- [5] 王允. 缆式焊丝堆焊稀释率及堆焊层性能研究[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2015.

MW 20240621

(上接第40页)

A283GRC steel and 5052 aluminum alloy[J]. Materials Today Communications, 2023, 37: 106975-106984.

- [6] 谭钦文. 镁/钛异种材料电阻点焊接头形成机理[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2021.
- [7] 肖逸锋, 张楠鑫, 吴靓, 等. 钎焊间隙对钎焊接头残余应力的影响[J]. 焊接, 2023(12): 17-22.
- [8] 吴方亮. 激光调控含能材料高速冲击焊接研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2023.
- [9] 冯亮, 范艳柳. 复合钢板Q235B/SUS304L的焊接[J]. 金属加工(热加工), 2011(24): 46-47.
- [10] 李成祥, 许晨楠, 周言, 等. 铜-铝电磁脉冲焊接界

面形成过程的原子扩散行为[J]. 焊接学报, 2024, 45(3): 22-31.

- [11] ANUMPA V, STEAVEN H, BERT L, et al. Vaporizing foil actuator: A tool for collision welding[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2013, 213(12): 2304-2311.
- [12] CHEN SH H, HUO X CH, GUO CH X, et al. Interfacial characteristics of Ti/Al joint by vaporizing foil actuator welding[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2018, 263: 73-81.

MW 20240525