

电阻焊填补匙孔技术机理

邓黎鹏^{1,2}, 柯黎明², 刘金合¹

(1. 西北工业大学, 西安, 710072; 2. 南昌航空大学, 南昌, 330063)

摘要: 电阻焊填补匙孔技术 (FKBRW) 是最近提出的一种基于电阻焊原理的搅拌摩擦焊匙孔填补技术, 不但可以实现去除匙孔的目的, 对接头承载能力也有着积极的作用. 为了深入研究 FKBRW 机理, 以三相次级整流电阻点焊机为试验设备, 2024-T4 铝合金 1.5 mm + 1.5 mm 的搅拌摩擦点焊匙孔为填补对象, 搭建了填补压力动态行为监测平台, 研究了塞棒与匙孔壁的冶金结合形式及塞棒压入匙孔过程的动态行为. 结果表明, 塞棒与匙孔壁冶金结合有熔化连接和固相连接两种形式, 熔化连接区在接头中部, 固相连接区在接头上部和下部; FKBRW 技术机理是塞棒在填补压力及电阻热的联合作用下, 经历了软化-下压的反复过程, 最终与匙孔壁完全结合的焊补技术.

关键词: 搅拌摩擦焊; 电阻焊; 匙孔; 铝合金; FKBRW 技术

中图分类号: TG 456.9

文献标识码: A

doi: 10.12073/j.hjxb.20190708005

0 序言

电阻焊填补匙孔技术 (FKBRW) 是最近提出的一种基于电阻焊原理的搅拌摩擦焊匙孔填补技术, 不但可以实现去除匙孔的目的, 对接头承载能力也有着积极的作用^[1-3]. 搅拌摩擦焊技术及电阻焊技术在航空、航天、汽车、等工业制造领域均得到了较为广泛的应用, 因此, 采用 FKBRW 技术填补匙孔, 无需增加专用设备, 不会增加搅拌摩擦焊应用成本.

目前, 国内外学者提出了多种搅拌摩擦焊匙孔填补技术, 还有多种无匙孔搅拌摩擦焊接技术. 哈工大黄永宪等人^[4-6]提出了基于固态连接原理的填充式搅拌摩擦焊匙孔修复技术; 德国 GKSS 研究中心提出的回填式搅拌摩擦焊技术^[7-9], 并设计制作了伸缩式搅拌针; 西工大李文亚等人^[10-12]提出的无针式搅拌摩擦焊技术; 还有摩擦塞焊技术^[13-14], 熔焊填补技术^[15].

FKBRW 技术原理是采用电阻焊机将一段与搅拌摩擦焊件相同材质的塞棒压、焊入匙孔的简单过程. 为了进一步揭示 FKBRW 技术机理及推广应用, 尤其是在厚板搅拌摩擦焊匙孔填补方面的应用, 使用扫描电镜、光学显微镜观察塞棒与匙

孔壁的界面, 根据其组织形貌、晶粒形态判断结合方式; 基于试验设备搭建电极压力监测平台, 监测填补压力动态行为, 藉此判断塞棒压入过程.

1 试验平台搭建及材料

试验设备是一台功率为 300 kVA 的三相次级整流电阻点焊机, 并基于该点焊机, 搭建了满足研究需要的试验平台, 如图 1 所示, 加装了压力传感器. 该压力传感器是利用石英晶体的压电效应特性制作而成, 即当电极压力作用到该晶体的上、下表

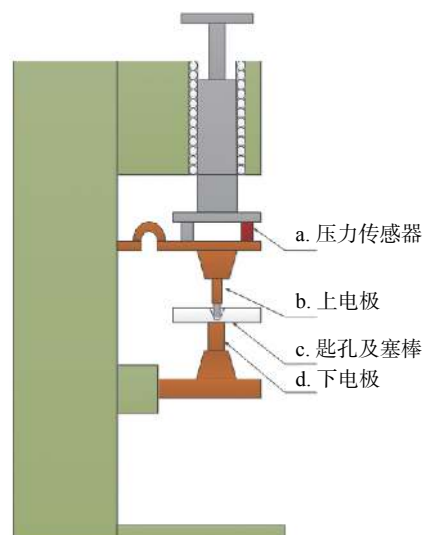


图 1 试验平台示意图

Fig. 1 Sketch of upper and lower electrode

面时,其内部产生极化现象,并在上下表面产生符合相反、大小相等的电荷;电荷的大小与压力呈线性关系.试验过程中,传感器上的偏移电荷经电荷放大器放大后由数据采集系统采集,为后期分析填补压力的动态行为提供数据基础.

如图2所示,试验所焊材料为硬铝合金 2024-T4,厚度 1.5 mm,搭接装配,在试片中部制备如图2a所示的匙孔,匙孔深度 2.5 mm,上部直径 3.5 mm,底部直径 3.0 mm;塞棒形状如图2b所示,由棒材截取加工而成,直径为 3.4 mm,长度 4.0 mm;匙孔内壁有搅拌针螺纹回转痕迹,有助于提高塞棒与匙孔的接触电阻、分散流经两者的电流线.

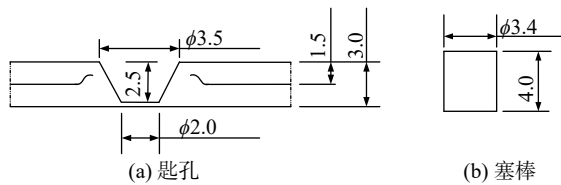


图2 匙孔及塞棒尺寸图(mm)

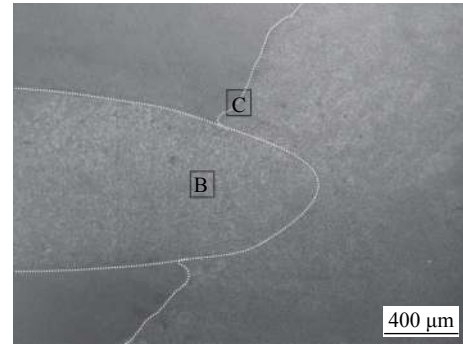
Fig. 2 Dimension of keyhole and plug. (a) keyhole; (b) plug

2 试验结果及分析

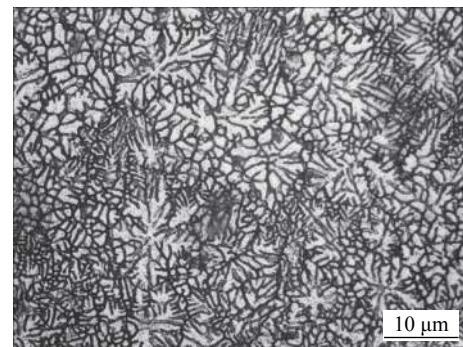
填补工艺参数主要是填补电流 37 kA,填补压力 12 kN,填补时间 200 ms. 通过光学显微镜及扫描电镜详细分析了匙孔被电阻焊压塞棒填补后的搅拌摩擦点焊接头横截面形貌;搭建了填补过程电极压力的数据采集系统,并基于该系统,结合接头横截面形貌,研究了 FKBRW 填补匙孔技术的过程及机理.

2.1 接头形貌分析

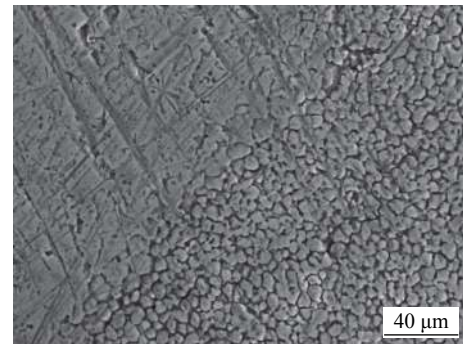
图3是填补后的接头(下文简称接头)宏观及微观形貌.横截面宏观形貌见图3a所示,同电阻点焊接头一样,塞棒中部区域有一个明显的焊点,图3a中字母B标定的位置,其直径超出了该区域的匙孔直径,即其突破了塞棒与匙孔的结合面,进入了搅拌摩擦焊点区域,根据电阻点焊基本原理,该区域必定经历了熔化再结晶的过程;图3b是该区域的局部放大形貌,显示该区域组织结构主要是等轴枝晶;塞棒与匙孔的结合面完全消失,因此,经过 FKBRW 填补后的接头中部区域,塞棒与匙孔之间属熔化连接.



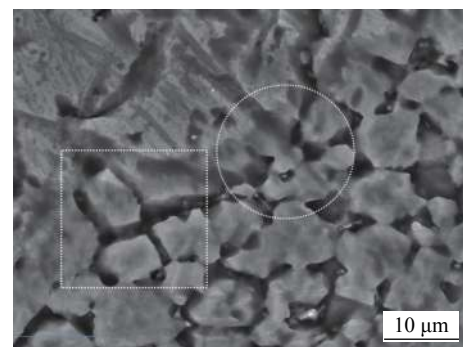
(a) 宏观形貌



(b) B区局部放大



(c) C区局部放大



(d) C区进一步放大

图3 填补后接头宏观及微观形貌

Fig. 3 Photo of filled joint of FSSW. (a) macrophoto for filled keyhole; (b) local enlargement for zone B; (c) local enlargement for zone C; (d) local enlargement for zone C further

熔化连接区以外的塞棒与匙孔之间的结合面在宏观形貌中仍然可见,见图3a所示,熔核以上及以下区域均有界面线.取其上部字母C标定的位置

的放大观察,发现塞棒与匙孔之间的结合面处的晶粒已经共融,形成了冶金结合,见图 3c 所示,左侧塞棒晶粒尺寸明显大于右侧匙孔壁(搅拌摩擦点焊接头)区域的晶粒尺寸,说明该区域未经历熔化再结晶的过程;且大晶粒与小晶粒之间的未见结合面间隙,进一步放大观察,见图 3d 所示,仍未观察到间隙,仅有腐蚀后的晶界存在。

塞棒一侧的大晶粒在填补压力及电阻热的联合作用下,产生了动态再结晶,形成了尺寸较小的晶粒,挤入接头匙孔壁侧小晶粒晶界,甚至融入小晶粒,形成冶金结合,见图 3d 的圆形标志区。图 3d 方形标志区内,匙孔壁侧的小晶粒在填补过程中同样受填补压力及电阻热的联合作用,被挤入塞棒侧大晶粒的晶界,并与大晶粒局部形成冶金结合。根据压焊原理,上述冶金结合属于固相连接。FKBRW 填补技术提供了固相连接所需的热量及压力,但固相连接需要结合面紧密压合。下文将依据填补压力的动态行为,研究分析圆柱形塞棒与倒圆台形匙孔壁之间压合面的形成过程。

2.2 填补过程动态行为分析

根据电阻焊加热公式

$$Q_{\text{形}} = I^2 \cdot (r_{\text{体}} + r_{\text{接触}}) \cdot t - Q_{\text{散}} \quad (1)$$

式中: $Q_{\text{形}}$ 是形成接头的有效热量,是决定塞棒与匙孔壁连接效果的主要因素之一; $Q_{\text{散}}$ 是填补过程中散失的热量,与填补压力大小密切相关; I 是填补电流; t 是填补时间; $r_{\text{体}}$ 是填补电流流经路径中塞棒与匙孔壁的体电阻,塞棒与匙孔完全压合之前,其数值基本不变; $r_{\text{接触}}$ 是塞棒与匙孔壁间的接触电阻,随着塞棒与匙孔间压合状态的变化而变化。因此,填补压力 F 既影响热量散失效率,又影响塞棒与匙孔间压合状态,且由于上电极及其附属加压机构的惯性力的影响,使得填补压力成为一个动态变化量,自建平台监测其动态行为见图 4 所示。

压力曲线动态行为特征呈现明显的随时间 t 阻尼震荡现象,且在震荡中回升,说明作用在塞棒上端面的上电极与塞棒一起下压,其中塞棒在接触电阻热的作用下出现软化变形现象,但每次软化量逐渐减小,即塞棒压入量逐渐减小。图 5 是在匙孔底部附近观察到的塞棒与侧壁连接状态,该部位冶金结合发生在填补过程的最后阶段,可基本反映压合前塞棒与匙孔壁界面变化形态。填补压力的动态行为是塞棒下压过程的宏观表现;相对而言,匙孔壁

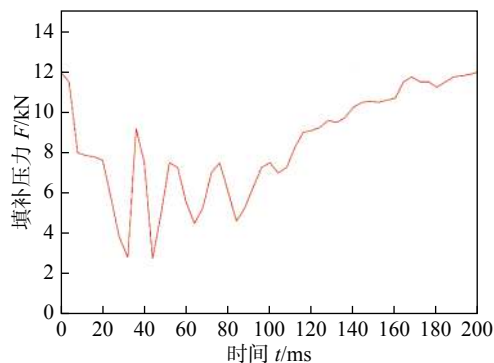


图 4 填补压力动态行为曲线

Fig. 4 Dynamic curve of filling force

散热明显,温度较低,塞棒发热严重,散热差,温升明显,因此,塞棒在下压过程中,匙孔壁作用在塞棒上的剪切力迫使接触部位的高温塑性金属晶粒滑移或脱离塞棒并被挤入界面空隙处,此为塞棒下压过程的微观表现。随着塞棒不断压入,与匙孔壁贴合面增加,电流密度下降,接触电阻减小,一次下压,挤出塑性金属量减少,下压量减小,此为压力曲线震荡行为的原因。

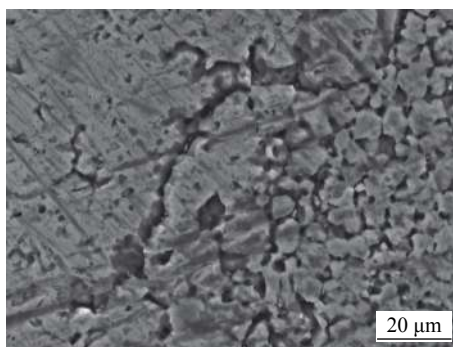


图 5 塞棒与匙孔底部连接状态

Fig. 5 Bonding between plug and keyhole in the bottom

塞棒与匙孔壁接触部位电流线密度较大,产热、膨胀,随后进入软化变形阶段,即下压过程,由于惯性力导致上电极失压;塞棒软化部分被完全挤压进入匙孔后,未软化的部分再次阻碍塞棒被压入匙孔,上电极压力逐渐回升,塞棒热量逐渐积聚,进入软化阶段;随着塞棒变形量越来越大、塞棒与匙孔壁贴合程度越来越好,散热效果得以改善,热量积聚速率减缓,软化量减小,因此压力曲线振幅逐渐减小,且周期拉长,直至塞棒与匙孔完全冶金结合,接头区域导电及散热面积增加,即使仍有填充电流流过,产热与散热进入动态平衡阶段,压力逐渐趋于平稳。此时,塞棒与匙孔的大部分接触电阻消失,塞棒体电阻是主要热源,在上、下电极及搅拌

摩擦焊件散热的条件下,接头中部逐渐形成熔化连接,其周围区域在热传导、残留接触电阻发热及填补压力的复合作用下,形成固相连接。

FKBRW 技术机理是填补压力推动塞棒压入匙孔,在接触电阻热、体电阻热和电极压力及电极和工件散热的复合作用下,塞棒与匙孔壁接触部位不断被软化-下压-软化-下压-软化……完全压合至静止加热状态,最终与匙孔壁完全冶金结合,匙孔被塞棒完全填补。

3 结论

(1) 基于 FKBRW 技术的搅拌摩擦点焊填补后接头,其塞棒与匙孔壁结合有熔化连接和固相连接两种形式,熔化连接区在接头中部,固相连接区在接头上部和下部。

(2) FKBRW 技术机理是填补压力推动塞棒压入匙孔,塞棒经历了软化-下压的反复过程,最终与匙孔壁完全冶金结合,匙孔被塞棒完全填补。

(3) 填补压力动态行为监测方法及自建平台可以有效地反映塞棒压入匙孔的过程。

参考文献

- [1] Deng L P, Li S H, Ke L M, *et al.* Microstructure and fracture behavior of refill friction stir spot welded joints of AA2024 using a novel refill technique[J]. *Metals*, 2019, 9(3): 286.
- [2] Deng L P, Ke L M, Liu J H. Filling technique for keyhole of friction stir spot welding based on the principles of resistance spot welding[J]. *China Welding*, 2019(3): 1-8.
- [3] 邓黎鹏,柯黎明,刘金合.基于压焊原理的搅拌摩擦焊匙孔填补技术[J].*焊接学报*, 2019, 40(6): 107-111.
Deng Lipeng, Ke Liming, Liu Jinhe. A key-hole filling technology for friction stir welding based on the theory of pressure welding[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2019, 40(6): 107-111.
- [4] 黄永宪,韩冰,吕世雄,等.基于固态连接原理的填充式搅拌摩擦焊匙孔修复技术[J].*焊接学报*, 2012, 33(3): 5-8.
Huang Yongxian, Han Bing, Lü Shixiong, *et al.* Filling friction stir welding for repairing keyhole based on principle of solid state joining[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2012, 33(3): 5-8.
- [5] Huang Y, Han B, Tian Y, *et al.* New technique of filling friction stir welding[J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2011, 16: 497-501.
- [6] Han B, Huang Y X, Lü S X, *et al.* AA7075 bit for repairing AA2219 keyhole by filling friction stir welding[J]. *Materials & Design*, 2013, 51(10): 25-33.
- [7] Zhou L, Liu D, Nakata K, *et al.* New technique of self-refilling friction stir welding to repair keyhole[J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2012, 17(8): 649-655.
- [8] Zhang G F, Jiao W M, Zhang J X. Filling friction stir weld keyhole using pin free tool and T shaped filler bit[J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2014, 19(2): 98-104.
- [9] Martin R, Thomas G, Ucecu S, *et al.* Keyhole closure using friction spot welding in aluminium alloy 6061-T6[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2016, 237(11): 12-18.
- [10] Li W Y, Lin J F, Zhang Z H, *et al.* Improving mechanical properties of pinless friction stir spot welded joints by eliminating hook defect[J]. *Materials & Design*, 2014, 62(10): 247-254.
- [11] Chu Q, Li W Y, Yang X W, *et al.* Microstructure and mechanical optimization of probeless friction stir spot welded joint of an Al-Li alloy[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2018, 34(10): 1739-1746.
- [12] Chu Q, Li W Y, Yang X W, *et al.* Microstructure and morphology evolution of probeless friction stir spot welded joints of aluminum alloy[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2018, 252(2): 69-80.
- [13] Hynes N R, Abeyram M N. Simulation on friction taper plug welding of AA6063-20Gr metal matrix composite[J]. *International Conference on Condensed Matter and Applied Physics*, 2016, 1728(1): 178-186.
- [14] Metz D F, Barkey M E. Fatigue behavior of friction plug welds in 2195 Al-Li alloy[J]. *International Journal of Fatigue*, 2012, 43(10): 178-187.
- [15] 王国庆,赵刚,郝云飞,等.2219 铝合金搅拌摩擦焊缝匙孔缺陷修补技术[J].*宇航材料工艺*, 2012, 42(3): 24-28.
Wang Guoqing, Zhao Gang, Hao Yunfei, *et al.* Technology for repairing keyhole defect for FSW joint of 2219 aluminum alloy[J]. *Aerospace Material and Technology*, 2012, 42(3): 24-28.

第一作者简介: 邓黎鹏, 1979 年出生, 博士研究生, 副教授; 主要从事电阻焊、搅拌摩擦焊工艺与设备方面的科研和教学工作; Email: denglipeng@nchu.edu.cn.

(编辑: 曲畅)