

# 不同焊接速度下 2024 铝合金搅拌摩擦焊接头的显微硬度与拉伸性能

霍仁杰<sup>1,2</sup>, 金玉花<sup>2</sup>, 王广山<sup>1</sup>, 李海龙<sup>3</sup>

(1. 辽宁轨道交通职业学院机械工程系, 沈阳 110023; 2. 兰州理工大学省部共建有色金属先进加工与再利用国家重点实验室, 兰州 730050; 3. 宁德时代新能源科技有限公司, 宁德 352100)

**摘要:** 对 5 mm 厚 2024 铝合金板进行了不同焊接速度(20~100 mm·min<sup>-1</sup>)下的搅拌摩擦焊, 研究了焊接接头的显微硬度与拉伸性能。结果表明: 接头在垂直于焊缝方向上的显微硬度整体呈 W 形分布, 焊核区显微硬度高于热影响区与热机影响区的, 但仍低于母材的, 热影响区和热机影响区过渡位置的显微硬度最低; 随焊接速度的增大, 焊核区的平均显微硬度升高, 焊接接头的抗拉强度和伸长率均呈先增大后略微降低的趋势; 当焊接速度为 80 mm·min<sup>-1</sup> 时, 抗拉强度和伸长率均达到最大值, 分别为 347.2 MPa 和 7.8%; 接头在热机影响区与热影响区边界发生剪切断裂, 断裂位置与显微硬度最低位置相吻合, 接头的断裂方式为韧性断裂。

**关键词:** 2024 铝合金; 搅拌摩擦焊; 显微硬度; 拉伸性能

中图分类号: TG453.9

文献标志码: A

文章编号: 1000-3738(2019)01-0050-04

## Microhardness and Tensile Properties of Friction Stir Welded Joint of 2024 Aluminum Alloy at Different Welding Speeds

HUO Renjie<sup>1,2</sup>, JIN Yuhua<sup>2</sup>, WANG Guangshan<sup>1</sup>, LI Hailong<sup>3</sup>

(1. Department of Mechanical Engineering, Guidao Jiaotong Polytechnic Institute, Shenyang 110023, China; 2. State Key Laboratory of Advanced Processing and Recycling of Non-ferrous Metals, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 3. Contemporary Amperex Technology Co., Ltd., Ningde 352100, China)

**Abstract:** 2024 aluminum alloy plate with thickness of 5 mm was welded by friction stir welding at different welding speeds (20–100 mm·min<sup>-1</sup>). The microhardness and tensile properties of the welded joints were studied. The results show that the microhardness of the joint in the direction of perpendicular to the weld showed a W-shaped asymmetric distribution. The microhardness of the weld nugget zone was higher than that of the heat affected zone and the heat affected zone, but still lower than that of the base metal; the microhardness of the transition position between the heat affected zone and the thermo-mechanically affected zone was the lowest. With the increase of welding speed, the average microhardness of the weld nugget zone increased; the tensile strength and elongation of the welded joint increased first and then slightly decreased. When the welding speed was 80 mm·min<sup>-1</sup>, the tensile strength and elongation both reached the maximum values of 347.2 MPa and 7.8%, respectively. The shear fracture of the joint occurred at the transition position between the heat affected zone and the thermo-mechanically affected zone, and the fractured position corresponded well with the position with the lowest hardness. The fracture mode of the joint was ductile fracture.

**Key words:** 2024 aluminum alloy; friction stir welding; microhardness; tensile property

收稿日期: 2017-10-14; 修订日期: 2018-12-06

基金项目: 甘肃省高等学校基本科研业务费资助项目(01-0071)

作者简介: 霍仁杰(1988—), 男, 辽宁沈阳人, 助理讲师, 硕士研究生  
导师: 金玉花副教授

## 0 引言

2024 铝合金因具有较高的强度和硬度而广泛用于制造飞机的零部件, 如薄壁管件、隔框、翼梁、搭接蒙皮等<sup>[1-2]</sup>。目前, 铝合金的焊接方法主要包括钨

极气体保护焊、熔化极惰性气体保护焊、电子束焊、变极性等离子焊等,但是采用这些方法进行焊接后焊接接头系数较低,焊接熔池温度较高,焊缝中不可避免地会出现气孔、裂纹等缺陷。在搅拌摩擦焊过程中焊缝金属不发生熔化,在很大程度上避免了气孔、裂纹等缺陷的产生,所形成接头的显微组织致密,成形质量好,因而搅拌摩擦焊成为 2024 铝合金的首选焊接方法,并且该焊接方法已经广泛应用于轨道交通<sup>[3]</sup>、航空航天、船舶制造和海洋工业等领域。

目前,有关铝合金搅拌摩擦焊接头力学性能的研究主要集中在拉伸性能、疲劳性能等方面。研究表明,显微硬度与材料的其他性能具有一定的关系,例如:HEJAZI 等<sup>[4]</sup>通过显微硬度分布建立了 AA6061-T913 铝合金搅拌摩擦焊接头的显微硬度与组织和力学性能之间的关系;徐伟锋等<sup>[5]</sup>通过显微硬度结果建立了板厚方向上铝合金搅拌摩擦焊接头显微组织与力学性能之间的关系;HAO 等<sup>[6]</sup>研究了不同焊接工艺参数下沿焊缝中心方向的接头显微硬度变化规律,并得出了接头软化区宽度与工艺参数有关的结论。同时,显微硬度测试还具有成本低、操作简单、非破坏性等优点。但是,有关 2024 铝合金的显微硬度和其力学性能关系的研究较少。因此,作者对 5 mm 厚 2024 铝合金板进行了不同焊接速度下的搅拌摩擦焊,研究了接头显微硬度的分布规律,测试了接头的拉伸性能,分析了显微硬度与拉伸性能的关系。

## 1 试样制备与试验方法

试验材料为 2024-T4 铝合金轧制板,厚度为 5 mm,化学成分如表 1 所示。在试验材料上加工出尺寸 200 mm×160 mm×5 mm 的试样,在 FSW-3LM-015 型龙门式搅拌摩擦焊机上进行平对接焊

接试验,旋转速度恒定在 1 000 r·min<sup>-1</sup>,焊接速度分别为 20, 40, 60, 80, 100 mm·min<sup>-1</sup>,下压量为 0.19 mm,搅拌头倾斜角为 2.5°。选用 4Cr5MoSiV 模具钢搅拌头,其中搅拌针为  $\phi 4.7$  mm×4.7 mm 的圆柱体,轴肩采用内凹设计以增大塑化金属的流动空间,内凹角为 3°,轴肩直径为 18 mm。

表 1 2024 铝合金的化学成分(质量分数)

Table 1 Chemical composition of 2024 aluminum

alloy (mass )								%
Cu	Mg	Mn	Fe	Si	Cr	Ti	Zn	Al
3.8~4.9	1.2~1.8	0.5	0.5	0.5	0.1	0.15	0.25	余

焊后用线切割机垂直于焊接方向在焊接接头上截取平面尺寸为 15 mm×24 mm 的金相试样,经粗磨、细磨、抛光,用 Keller 试剂腐蚀后,在 FJ-4D 型倒置光学显微镜上观察接头不同区域的显微组织;在接头横截面上以焊缝为中心,在其两侧均取长 10 mm、厚 5 mm 的区域,用 HV-1000B 型维氏硬度计,每隔 0.5 mm 取点测显微硬度,加载载荷为 0.98 N,保载时间为 15 s,将不同位置的显微硬度绘制成 3D 曲面分布示意图和等值线示意图。按照 GB/T 228.1-2010,以焊缝为中心截取标距为 105 mm 的拉伸试样,采用 AG-10TA 型电子万能拉伸机进行室温拉伸试验,取样方向与焊接方向垂直,拉伸速度为 2 mm·min<sup>-1</sup>,不同焊接速度下测 3 个试样取平均值。采用 Quanta FEG-450 型场发射扫描电子显微镜(SEM)观察拉伸断口形貌。

## 2 试验结果与讨论

### 2.1 显微组织

由图 1 可知:在焊接速度为 80 mm·min<sup>-1</sup>条件下,焊接接头焊核区(NZ)在搅拌针强烈的搅拌作用下产生了大量的摩擦热并发生了严重的塑性变形,

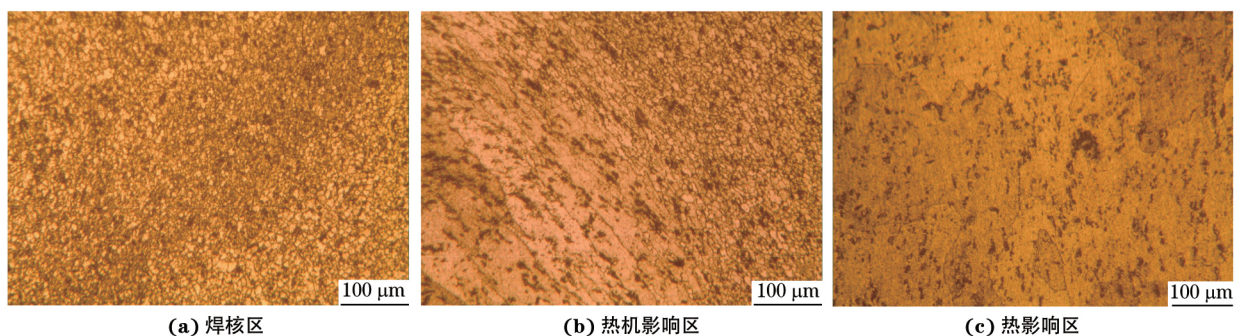


图 1 焊接接头不同区域的显微组织(焊接速度 80 mm·min<sup>-1</sup>)

Fig. 1 Microstructures of different zones of welded joint (welding speed of 80 mm·min<sup>-1</sup>): (a) weld nugget zone; (b) thermo-mechanically affected zone and (c) heat affected zone

导致该区域发生了动态再结晶,因此形成了细小的等轴晶组织;热机影响区(TMAZ)位于焊核区和热影响区(HAZ)之间,在搅拌针的搅拌作用下该区域产生了摩擦热并经历了严重的塑性变形,但均不及焊核区的强烈,因此没有形成动态再结晶组织,而是晶粒明显拉长;相较于焊核区和热机影响区,热影响区并没有发生塑性变形,仅仅经历了焊接热循环作用,因此仅发生了晶粒粗化。通过观察不同焊接速度下接头的显微组织可发现,接头的显微组织变化不明显,仅焊核区晶粒度随着焊接速度的增大而略有减小,因为不对其他焊接速度下的显微组织进行描述。

## 2.2 力学性能

### 2.2.1 显微硬度

由图 2 可知:接头在垂直于焊缝方向上的显微硬度整体呈 W 形分布,即由母材(BM)至热机影响区,显微硬度显著下降,由热机影响区到焊核区,显微硬度有所提高,但仍低于母材的。由图 3 可以看出,焊接接头母材的显微硬度最高,达到 136 HV;热影响区和热机影响区的过渡位置均出现了密集的等值线,这表明这一位置的显微硬度发生了显著的变化,且均为降低趋势,这是由于在热循环作用下热影响区晶粒发生粗化,而在摩擦热和塑性变形的作用下,热机影响区第二相发生部分溶解、团聚,晶粒拉长,这 2 个区域的软化非常明显,因此显微硬度显著降低,最低值为 88 HV;在热机影响区与焊核区的过渡区域也出现了密集的等值线,该位置显微硬度明显升高,最大值为 128 HV,但仍低于母材的,这是由于虽然焊核区第二相粒子发生了溶解,但在动态再结晶过程中组织中有细小弥散分布的第二相析出,形成等轴晶组织<sup>[7]</sup>,因此相比于热影响区与热机影响区,显微硬度有所提高。综上可知,热影响区和热机影响区的过渡位置是焊接接头的薄弱区域。

由图 3 还可以看出:在接头厚度方向上,焊核区

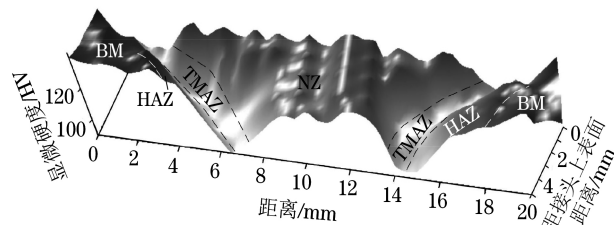


图 2 焊接接头显微硬度 3D 曲面分布示意(焊接速度  $80 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ )

Fig.2 Diagram of microhardness 3D surface distribution of welded joint (welding speed of  $80 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ )

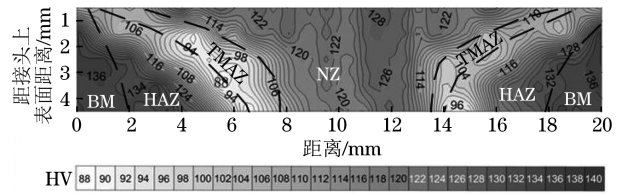


图 3 焊接接头显微硬度等值线示意(焊接速度  $80 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ )

Fig.3 Microhardness contour diagram of welded joint (welding speed of  $80 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ )

的显微硬度随距接头上表面距离的增加而降低,这是由于焊接接头的上表面与高速旋转的搅拌头轴肩及搅拌针紧密接触,在焊接过程中产生的摩擦热更多,同时轴肩强烈的压力作用使接头上表面的塑性变形更加剧烈而导致的。

由图 4 可知:母材的显微硬度在 133~138 HV,为接头显微硬度最大的区域,焊核区的显微硬度均明显高于热影响区和热机影响区的;当焊接速度由  $20 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  提高至  $100 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  时,焊核区的平均显微硬度由 117.8 HV 增大到 125.6 HV。

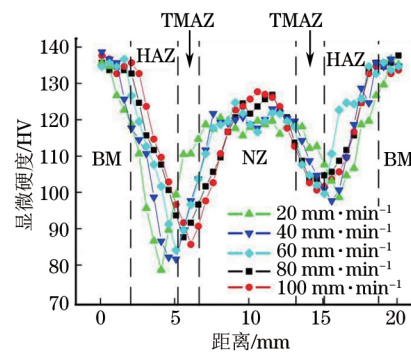


图 4 不同焊接速度下接头的显微硬度分布曲线

Fig.4 Microhardness distribution curves of joints at different welding speeds

### 2.2.2 拉伸性能

由图 5 可以看出:随着焊接速度的增大,焊接接头的抗拉强度和伸长率均呈先增大后略微降低的趋势;当焊接速度为  $80 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$  时,抗拉强度和伸长率均达到最大值,分别为 347.2 MPa 和 7.8%。

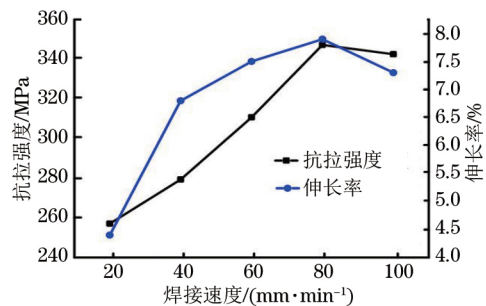


图 5 不同焊接速度下焊接接头的抗拉强度与伸长率

Fig.5 Tensile strength and elongation of welded joint at different welding speeds



随着焊接速度的增长,单位面积轴肩所产生的摩擦热减少,而搅拌针附近金属的塑性变形程度增大,塑性变形热占比增大,使得焊缝厚度方向上组织更加均匀,因此焊接接头的拉伸性能明显提高<sup>[7-8]</sup>;然而,当焊接速度过快时,在搅拌作用下产生的摩擦热和塑性变形热来不及传导,导致焊缝厚度方向上组织不均匀,甚至出现组织缺陷,因此当焊接速度大于 $80\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 时,接头的拉伸性能略有下降。

由图6可以看出:接头在热机影响区与热影响区过渡位置发生剪切断裂,颈缩不明显,且断口与拉伸方向成 $45^\circ$ ,断裂位置与由图3和图4分析得到的接头薄弱位置相一致,这表明显微硬度与接头的拉伸性能存在一定关系。由图7可以看出:拉伸断口上存在大量韧窝,说明断裂方式为明显的韧性断裂,韧窝是由第二相颗粒剥离后留下的;断口上还可观察到第二相颗粒劈裂和撕裂后留下的断面(A位置所示)。2024铝合金拉伸断口上韧窝的形成与第二相颗粒的分布密切相关,而韧窝的尺寸取决于第二相颗粒的间距;第二相颗粒对滑移起阻碍作用,从而在第二相颗粒与滑移面交界处造成应力集中,当应

力达到第二相颗粒与基体的结合强度时,第二相颗粒与基体剥离。

### 3 结论

(1) 随着焊接速度的增大,焊接接头的显微组织变化不明显,焊核区为细小的等轴晶组织,热影响区晶粒粗化,热机影响区晶粒拉长。

(2) 接头在垂直于焊缝方向上的显微硬度整体呈W形分布,焊核区显微硬度高于热影响区与热机影响区的,但仍低于母材的;当焊接速度由 $20\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 提高至 $100\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 时,焊核区的平均显微硬度由 $117.8\text{ HV}$ 提高到 $125.6\text{ HV}$ ;热影响区和热机影响区过渡位置的显微硬度最低,是焊接接头的薄弱位置。

(3) 随着焊接速度的增大,焊接接头的抗拉强度和伸长率均呈先增大后略微降低的趋势;当焊接速度为 $80\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 时,抗拉强度和伸长率均达到最大值,分别为 $347.2\text{ MPa}$ 和 $7.8\%$ ;接头在热机影响区与热影响区过渡位置发生剪切断裂,断裂位置与显微硬度最小位置相吻合,断裂方式为韧性断裂。

#### 参考文献:

- [1] 钱红丽,周琦,陈俐,等. 2024 铝合金光纤激光焊接头力学性能研究[J]. 焊接, 2013(3): 31-33.
- [2] 岳玉梅,周振鲁,姬书得,等.半螺纹搅拌针对2024铝合金搅拌摩擦搭接焊力学性能影响[J].焊接学报,2016,37(10):69-72.
- [3] 栾国红.搅拌摩擦焊接技术在轨道列车制造中的应用[J].焊接,2015(1): 7-12.
- [4] HEJAZI I, MIRSALEHI S E. Mechanical and metallurgical characterization of AA6061 friction stir welded joints using microhardness map[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2016, 26(9): 2313-2319.
- [5] 徐伟锋,刘金合,栾国红,等.厚板铝合金搅拌摩擦焊接头显微组织与力学性能[J].金属学报,2008,44(11):1404-1408.
- [6] HAO H L, NI D R, HUANG H, et al. Effect of welding parameters on microstructure and mechanical properties of friction stir welded Al-Mg-Er alloy[J]. Materials Science and Engineering: A, 2013, 559: 889-896.
- [7] MISHRA R S, MA Z Y. Friction stir welding and processing II[J]. Materials Science and Engineering: R,2005,50(1):1-78.
- [8] 严铿,雷艳萍,章正,等.铝合金搅拌摩擦焊时焊接速度与热输入的关系[J].焊接学报,2009,30(1):73-76.

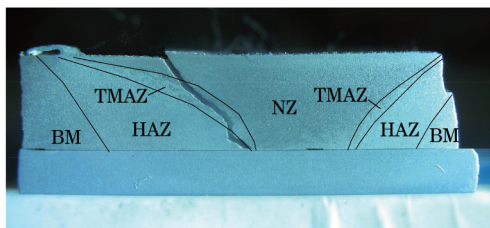


图6 拉伸试样断口横截面的宏观形貌(焊接速度 $80\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ )

Fig.6 Fracture cross-sectional macro-morphology of tensile specimen (welding speed of  $80\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ )

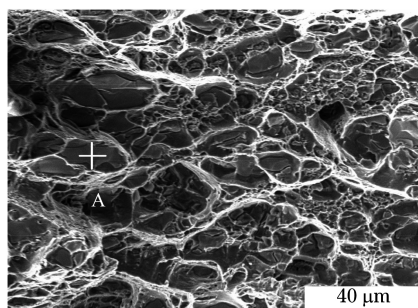


图7 拉伸试样断口的SEM形貌(焊接速度 $80\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ )

Fig.7 Fracture SEM morphology of tensile specimen (welding speed of  $80\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ )

欢迎来稿 欢迎订阅 欢迎刊登广告