

文章编号: 1004 - 0609(2004)01 - 0069 - 05

Al-Cu-Li 合金搅拌摩擦焊接头的微观组织和力学性能^①

王大勇, 冯吉才, 刘会杰, 狄 欧

(哈尔滨工业大学 现代焊接生产技术国家重点实验室, 哈尔滨 150001)

摘 要: 采用搅拌摩擦焊方法对 2mm 厚的 Al-Cu-Li 合金轧制板进行了焊接。接头内形成了焊核区、热机影响区和热影响区。焊核区由细等轴再结晶组织构成; 热机影响区内的组织发生较大的弯曲变形, 并在热循环的作用下发生了回复反应; 热影响区形成了粗大的板条状组织。实验结果表明: 在 200mm/min 的焊接速度下, 接头的拉伸强度最高, 达到 393MPa, 断裂形式为韧性和脆性的混合型断裂; 在 500mm/min 的焊接速度下, 接头强度为 267.7MPa, 断裂形式为脆性断裂。

关键词: 搅拌摩擦焊; Al-Cu-Li 合金; 接头组织; 力学性能

中图分类号: TG453

文献标识码: A

Microstructures and mechanical properties of friction-stir welding joint of Al-Cu-Li alloy

WANG Da-yong, FENG Ji-cai, LIU Hui-jie, DI Ou

(State Key Laboratory of Advanced Welding Production Technology,
Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: Friction-stir welds of Al-Cu-Li aluminum rolled sheet material in 2mm thickness were completed and the joint microstructures could be divided into three regions, namely, welded nugget zone(WNZ), thermally-mechanically affected zone(TMAZ) and heat affected zone(HAZ). And there are much difference for microstructures among the above three zones: the microstructures within the WNZ, in which dynamic recrystallization occurred, consist of refined, equiaxed grains; those within the TMAZ, in which recovery occurred, consist of highly deformed grains; those within the HAZ consist of coarse lath grains. Mechanical property measurement and fracture analysis demonstrate that the peak tensile strength of the joint is 393MPa at 200mm/min and the fracture mode is ductile/brittle mixed fracture; and at 500mm/min, tensile strength of the joint is 267.7MPa, and the fracture mode is brittle fracture.

Key words: friction-stir welding; Al-Cu-Li alloy; joint microstructures; mechanical property

铝锂合金具有低密度、高比强度和比刚度、优良的低温性能、良好的耐腐蚀性能和超塑性等优点, 是一种理想的航空航天结构材料, 用铝锂合金取代常规的铝合金可使结构减轻 10%~15%, 刚度提高 15%~20%。焊接铝锂合金可用钨极气体保护焊、熔化极气体保护焊^[1-3]、钎焊^[4, 5]、电子束焊^[6]、激光焊^[7, 8]、压力焊、变极性等离子弧焊^[9]

和扩散焊^[10, 11]等方法, 但这些方法在焊接过程中存在以下问题: Li 元素在高温下易蒸发, 导致合金元素的损失; Li 与 H₂O 和 CO₂ 反应, 易形成焊接气孔; 铝锂合金凝固温度区间较宽, 且连接温度较高, 在接头冷却过程中易形成凝固裂纹和液化裂纹。

搅拌摩擦焊(简称 FSW)是一种新的连接方法,

① 基金项目: 国家 863 计划资助项目(2002AA724040)

收稿日期: 2003 - 03 - 03; 修订日期: 2003 - 06 - 02

作者简介: 王大勇(1973 -), 男, 博士研究生。

通讯作者: 王大勇, 电话: 0451 - 86418735; E-mail: wdy1973@pa18.com

通过高速旋转的搅拌头与被焊材料表面间生成的摩擦热而实现的固相连接^[12-17]。采用搅拌摩擦焊连接 Al-Cu-Li 合金, 由于连接温度较低, 因而避免了合金中 Li 元素的挥发损失, 焊后接头无气孔, 无裂纹, 残余应力小, 接头性能好。因此, 本文作者拟进行 Al-Cu-Li 合金的搅拌摩擦焊接, 研究接头的微观组织和力学性能。

1 实验

实验用材料为 2mm 厚的 Al-Cu-Li 合金板, 其主要化学成分见表 1。

表 1 Al-Cu-Li 合金的主要化学成分

Table 1 Main chemical compositions of Al-Cu-Li alloy (mass fraction, %)

Cu	Li	Al
3.97	1.07	94

搅拌头的主要参数如下: 轴肩直径为 12mm, 搅拌针直径为 4mm, 长度为 1mm。试件尺寸为: 150mm × 120mm × 2mm, 焊前用钢丝刷将与轴肩接触的母材表面及接合面处来回轻微擦拭, 以去除氧化膜, 然后用丙酮或乙醇将接头位置附近清理干净。用卡具将试件刚性固定在钢背板上后, 将搅拌头以 1500r/min 的转速慢慢插入接合面内, 搅拌头沿接合线方向的行走速度为 100~500mm/min。

焊后用线切割机沿焊件接头横界面截取尺寸为 15mm × 7mm × 2mm 的薄片, 并镶嵌制成金相试样, 用金相砂纸将接头横界面表面手工逐级研磨, 再用氧化镁溶液抛光。用硝酸、盐酸和氢氟酸的水溶液对抛光后的试样进行化学腐蚀, 然后置于光学显微镜下对接头组织形貌进行分析。在电子万能试验机 (Instron-1186) 上对接头进行拉伸测试, 并采用 S-750 扫描电镜观察断口形貌。

2 结果与讨论

2.1 接头微观组织

Al-Cu-Li 合金焊前为轧制状态, 微观形貌为沿轧制方向的板条状组织, 如图 1 所示。

Al-Cu-Li 合金搅拌摩擦焊后接头形成以下 3 种区域: 焊核区 (简称 WNZ), 热机影响区 (简称 TMAZ) 和热影响区 (简称 HAZ), 如图 2 所示。

图 3 所示为 FSW 接头的微观组织。各区的组

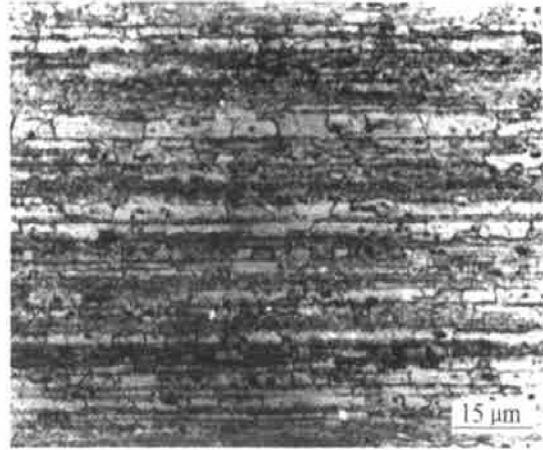


图 1 Al-Cu-Li 合金的微观组织

Fig. 1 Microstructure of Al-Cu-Li alloy

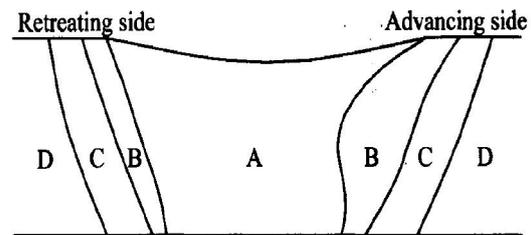


图 2 FSW 接头组织分布

Fig. 2 Microstructural distribution of FSW joint

A—Weld nugget zone;
B—Thermal-mechanical zone;
C—Heat affected zone; D—Matrix material

织与母材的原始板条状组织存在较大的差异, 图 3 (a) 为接头内焊核区、热机影响区和热影响区在光学显微镜下的形貌。可以看到在焊缝上表面轴肩与母材接触面附近形成了一个柄。这说明从与轴肩接触的母材表面至对应的下表面整个厚度方向材料所经受的热循环和机械搅拌作用不同, 存在热机作用梯度, 其变化趋势为从上表面至下表面热机作用逐渐减弱。

焊核区和热机影响区的界面位于搅拌针附近, 在这 2 个区的界面处组织结构没有过渡, 界面两侧形成结构明显不同的组织, 如图 3(b) 所示。

焊核区位于接头的中心, 该区由于受到搅拌头强烈的搅拌作用, 经受了较高温度的热循环, 组织发生动态再结晶, 由母材原始的板条状组织转变为细小的等轴再结晶组织, 见图 3(c) 所示。

热机影响区在搅拌头的搅拌作用下, 母材内的原始板条状组织发生了较大程度的弯曲变形, 并且局部区域在热循环的作用下发生回复反应, 在板条



图 3 FSW 接头的微观组织

Fig. 3 Microstructures of FSW joint
 (a)—FSW joint consisting of WNZ, TMAZ
 and HAZ; (b)—Interfacial microstructure
 between WNZ and TMAZ; (c)—WNZ;
 (d)—TMAZ; (e)—HAZ

状组织内形成了回复晶粒组织,如图 3(d)所示。热影响区是没有受到搅拌头机械搅拌作用的区域,但在焊接过程中受到了热循环的作用,导致该区内母材的原始板条状组织发生粗化,如图 3(e)所示。对比图 1 和图 3(e),可以看出热影响区中板条宽度明显变大。

2.2 接头力学性能

当搅拌头转速为 1500r/min,行走速度为 100 ~ 500mm/min 时,接头的力学性能测试结果如图 4 所示。当行走速度为 100mm/min 时,接头的拉伸强度较低,为 331.4MPa;随着行走速度的提高,接头强度提高,当行走速度为 200mm/min 时,接头强度最高,为 393MPa,达到母材的 70%;随着行

走速度的进一步提高,接头强度逐渐下降,行走速度为 500mm/min 时,接头的强度值下降到 267.7MPa,仅为母材的 48%。

由图 4 还可以看出接头强度与延伸率随着行走速度的变化具有相同的趋势。即接头强度值较低时,接头的延伸率也较低;当接头强度提高时,延伸率也相应的随着提高。

图 5 所示为搅拌摩擦焊接头断口的微观形貌。由图 5(a)可见,在较低行走速度 200mm/min 下所获得的接头断口既有韧性断裂后所留下的韧窝和剪切唇,也存在发生穿晶断裂后所留下的晶体断裂表面,其断裂形式为塑性断裂和穿晶脆性混合型断裂。由图 5(b)可见,在较高行走速度 500mm/min 下所获得的接头断口,表面特征为穿晶脆性断裂后

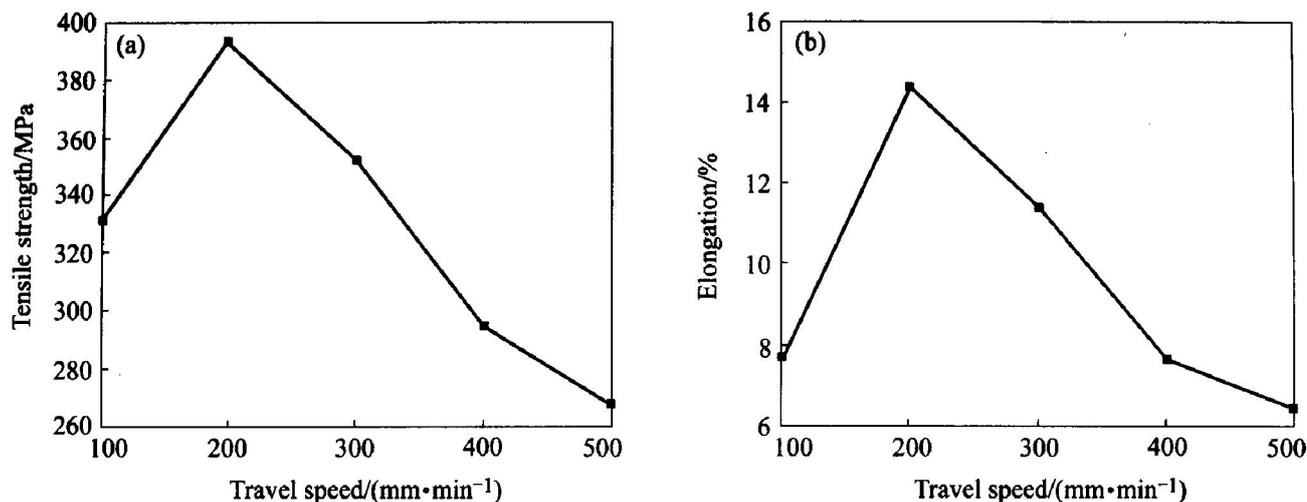


图4 接头力学性能与搅拌头行走速度的关系

Fig. 4 Relationships between mechanical property of joint and travel speed

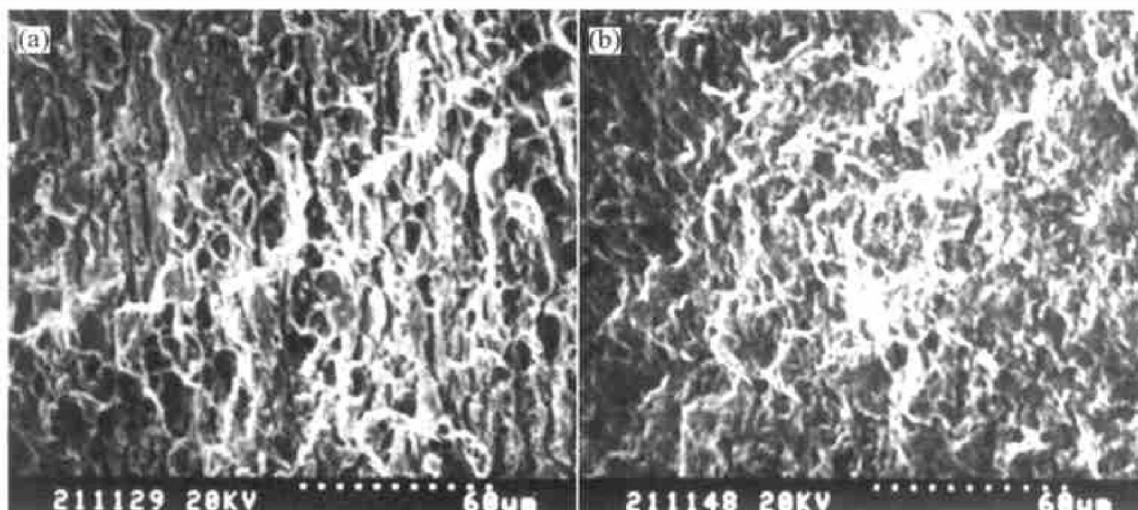


图5 Al-Cu-Li合金搅拌摩擦焊接头断口微观形貌

Fig. 5 Fracture surface morphology of FSW joint

Travel speed: (a) 200mm/min; (b) 500mm/min
ω = 1500r/min

所留下的晶体断裂表面。

3 结论

1) 采用搅拌摩擦焊方法实现了高强 Al-Cu-Li 合金的连接。接头由焊核区、热机影响区和热影响区构成：焊核区位于焊缝中心，发生了动态再结晶而形成了细小的等轴晶组织；热机影响区在搅拌头的机械搅拌作用下发生较大程度的弯曲变形，并在热循环的作用下形成回复晶粒；热影响区的组织在热循环的作用下发生粗化。

2) 搅拌头行走速度为 200mm/min 时，接头的拉伸强度和延伸率最高，分别为 393MPa 和 14.4%。

3) 在较低行走速度下，接头的断裂形式为韧性和脆性混合型断裂；而在较高的行走速度下，接头断裂模式为脆性断裂。

REFERENCES

[1] WANG Chur-sheng, YIN Shi-qiang, CHEN Yu, et al. Strength and microstructure of 2091 AlLi alloy TIG welded joint[J]. China Welding, 2000, 9(5): 48-52.

[2] Gokhale A A, Rao K P, Reddy G M. Effect of filler metal composition on the microstructure of AlLi alloy (1441) welds[J]. International Journal for the Joining of Materials, 1998, 10(3-4): 98-107.

[3] Ramulu M, Rubbert M P. Gas tungsten arc welding of AlLi-Cu alloy 2090[J]. Welding Journal, 1990, 69(3):

- 109 - 114.
- [4] 王忠平, 贺 勇, 贺运佳. 钎缝间隙对 2090Ce 铝锂合金钎焊接头组织性能的影响[J]. 西北工业大学学报, 1998, 16(1): 142 - 146.
- WANG Zhong-ping, HE Yong, HE Yun-jia. Effect of joint gap on strength of 2090Ce Al-Li alloy brazed joint [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 1998, 16(1): 142 - 146.
- [5] Murthy V S R, Abhijit D, Malleshm P, et al. Role of surface finish in contact brazing[J]. J Mater Sci Lett, 1999, 18(2): 167 - 169.
- [6] Chen S C, Huang J C. Comparison of post-weld microstructures and mechanical properties of electron and laser-beam welded 8090 Al-Li alloy plates[J]. Materials Transactions, JIM, 1999, 40(10): 1069 - 1078.
- [7] Kamalu J N, McDermid D, Steen W M. Laser joining of Al-Li (8090) alloy sheets for superplastic forming[J]. LIA, 1991, 74(3): 178 - 185.
- [8] Whitaker I R, McCartney D G. Fracture of bead-on-plate CO₂ laser welds in the Al-Li alloy 8090[J]. Scripta Metallurgica et Materialia, 1994, 31(12): 1717 - 1722.
- [9] Sanders, Jeffrey H. Investigation of grain boundary chemistry in Al-Li 2195 welds using Auger electron spectroscopy[J]. Thin Solid Films, 1996, 277(5): 121 - 127.
- [10] de Salazar G J M, Quinones J, Martin J J. TEM characterization of diffusion bonding of superplastic 8090 Al-Li alloy[J]. Scripta Materialia, 1996, 34(4): 617 - 623.
- [11] Ubhi H S, Bowen A W. Micro-texture analysis of diffusion bonded interfaces in Al-Li alloy sheet[J]. Mater Sci Forum, 1993, 157(6): 1305 - 1312.
- [12] Sutton M A, Yang B, Reynolds A P, et al. Microstructural studies of friction-stir welds in 2024-T3 aluminum [J]. Mater Sci Eng A, 2002, 32(2): 160 - 166.
- [13] Mishra R S, Mahoney M W. Friction stir processing: a new grain refinement technique to achieve high strain rate superplasticity in commercial alloys[J]. Mater Sci Forum, 2001, 357 - 359: 507 - 514.
- [14] Jata K V, Semiatin S L. Continuous dynamic recrystallization during friction stir welding of high strength aluminum alloys[J]. Scripta Mater, 2000, 43(8): 743 - 749.
- [15] Hassan Kh A A, Norman A F, Price D A, et al. Stability of nugget zone grain structures in high strength Al alloy friction stir welds during solution treatment[J]. Acta Materialia, 2003, 51(8): 1923 - 1936.
- [16] LI Ying, Trillo E A, Murr L E. Friction-stir welding of aluminum alloy 2024 to silver[J]. J Mater Sci Lett, 2000, 19(12): 1047 - 1051.
- [17] Jata S V, Sankaran K K, Ruschau J J. Friction stir welding effects on microstructure and fatigue of aluminum alloy 7050-T7451[J]. Metall Mater Trans A, 2000, 31(9): 2181 - 2192.

(编辑 陈爱华)