

7075 铝合金搅拌摩擦焊接头组织及性能

王希靖 孙桂苹

(兰州理工大学甘肃省有色金属新材料国家重点实验室,兰州 730050)

摘 要 对航空用 5 mm 厚的 7075 铝合金搅拌摩擦焊试样热处理前后的焊缝微观组织及性能进行了研究。结果表明:当搅拌头旋转速度 400 r/min、焊接速度 40 mm/min 时,接头拉伸强度达到 353 MPa,是母材强度的 78.5%;焊核区为等轴晶;经热处理后接头拉伸强度值达到母材强度的 83.0%;硬度的最低处在前进侧热机影响区;断口的微观形貌表现为具有强化相的韧窝特征,且断裂几乎发生在前进侧的热机影响区。由此认为,7075 铝合金搅拌摩擦焊接头的薄弱点在热机影响区。

关键词 搅拌摩擦焊,微观组织,7075 铝合金

Microstructure and Properties of Friction Stir Welding Joints for 7075 Aluminum Alloy

Wang Xijing Sun Guiping

(State Key Laboratory of Advanced Non-Ferrous Metal Materials, Gansu Province, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050)

Abstract Microstructure and properties before and after heat treatment of friction stir welded 5 mm aero aluminum alloy 7075 were investigated. The results show that with the rotating speed of stirring joint at 400 r/min and welding speed at 40 mm/min, tensile strength can reach to 353 MPa which is 78.5% of base metals; Weld nugget is composed of equiaxed grains; After heat treatment the tensile strength can reach to 83.0% of base metals; The lowest hardness appears in the thermomechanically affected zone (TMAZ) of advancing side. The fractography possesses a simple characteristics of strengthening phases and the strain fracture appears in TMAZ of advancing side of joints. From this view, the weak points of friction stir welding aluminum alloy 7075 occur in the TMAZ.

Key words Friction stir welding, Microstructure, 7075 aluminum alloy

1 前言

搅拌摩擦焊与传统工艺相比具有连接温度低、焊后残余应力小、接头性能高等优点^[1-3]。目前应用搅拌摩擦焊连接的材料有 Mg 合金、Pb、Zn、Cu、不锈钢、低碳钢等同种或异种材料。7075 铝合金是一种可热处理强化的 Al-Mg-Zn-Cu 系超硬铝合金材料,熔铸方便、成形性好、经轧制能获得比较理想的板材,通过热处理可使它获得优良的综合性能。

7075 铝合金的焊接主要采用惰性气体保护焊(MIG 焊),焊后焊缝中容易出现焊接变形和气孔,残余应力较大,且对应力腐蚀敏感,不能充分发挥材料的性能。利用搅拌摩擦焊技术可以更好地保持基体材料的力学性能,并能减少或消除熔焊时产生的焊接

缺陷^[4-5]。本文选取 5 mm 厚的 7075 铝合金进行单道平板对接搅拌摩擦焊,研究该合金焊接接头热处理前后的组织与力学性能。

2 实验

搅拌摩擦焊机为 FSW-3LM-015。搅拌头轴肩直径为 20 mm,搅拌针直径为 5 mm,长度为 4.8 mm。焊接工艺参数为:搅拌头旋转速度为 400 r/min,搅拌头沿焊缝方向的焊接速度为 40 mm/min。焊接试验使用的材料为 5 mm 厚的 7075 铝合金轧制板材,其化学成分与力学性能见表 1。焊接后对成形良好的焊接接头制作金相试样观察组织形貌并进行显微硬度试验。在 Me-F3 金相光学显微镜上观察微观组织,用 HX-1000TM 型显微硬度计进行显微硬度试

收稿日期:2008-07-04;修回日期:2008-10-22

作者简介:王希靖,1956 年出生,博士生导师,主要从事焊接新技术及焊接质量控制方面的研究。E-mail: wangxj@lut.cn

验,在岛津 AG-10TA 电子万能拉伸机上进行拉伸试验。腐蚀剂成分为:2 mL HF、3 mL HCl、5 mL HNO₃、190 mL H₂O,腐蚀时间为 10 s。热处理工艺为:固溶温度 466 ℃×2 h,室温水淬;120 ℃×24 h 人工时效。

表 1 7075 铝合金化学成分

Tab 1 Chemical composition of aluminum alloy 7075

%(质量分数)						
Zn	Mg	Cu	Si	Fe	Mn	Al
5.5	2.4	1.22	0.4	0.5	0.3	余量

3 结果与分析

3.1 工艺参数对焊件拉伸强度的影响

对接头进行力学性能试验见表 2,在搅拌头旋转速度为 400 r/min,焊接速度为 40 mm/min 时,焊件的拉伸强度为 353 MPa,达到母材强度的 78.5%。

由表 2 可知试样在热处理后拉伸强度明显提高,为母材强度的 83.0%,证明在该参数下 7075 铝合金板经搅拌摩擦焊后其接头力学性能良好,在经过热处理后可获得更高拉伸强度。

表 2 接头的拉伸强度

Tab 2 Tensile strength of joints

状态	转速 /r·min ⁻¹	焊速 /mm·min ⁻¹	拉伸强度 /MPa	接头与母材 强度比/%
热处理前	400	40	353	78.5
热处理后	400	40	385	83.0

3.2 宏观形貌分析

图 1 为铝合金接头横断面,其中 A 区为焊核区,材料在该区发生了剧烈的变形,在焊核区可以观察到洋葱环形貌,它的形成是由于当搅拌头旋转沿焊缝走过时,不断向搅拌头的返回边挤压塑性金属流的结果;B 区为热机影响区 (TMAZ),材料在该区有变形迹象,但由于搅拌头的旋转作用,左右两边的流线方向有所不同;C 区为热影响 (HAZ),B 区和 C 区有较明显的分界。

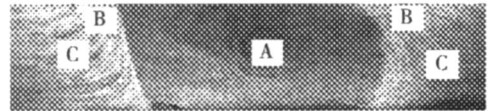
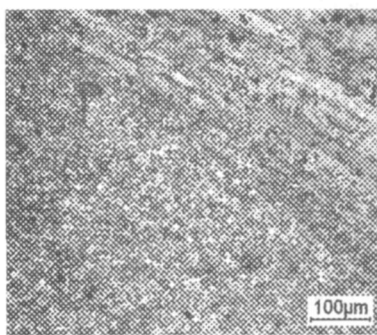


图 1 接头横截面照片

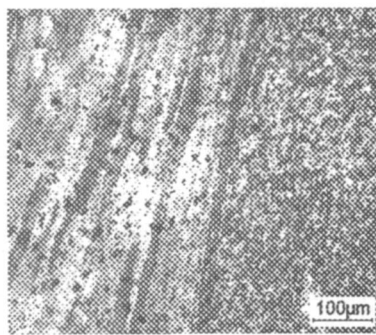
Fig 1 Section macrograph of joints

3.3 微观组织分析

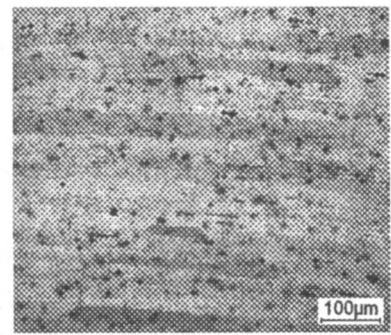
母材和焊缝区的分界线在前进面和后退面不同,前进面分界线比较明显如图 2(b)和(e),后退面的分界线比较模糊如图 2(a)和(d)。这种现象的出现是由于搅拌摩擦焊时,搅拌头经过区域的金属处于完全塑性状态,两侧的金属根据离搅拌头的距离远近不同而处于不同的塑性状态,并且都会随着搅拌头的旋转而塑性流动,但塑性流动方向不一致。在前进面,焊缝金属塑性流动方向与母材金属塑性流动方向相反,使母材金属与焊缝金属之间存在很大的相对变形差;在后退面,金属塑性流动方向与母材金属塑性流动方向相同。



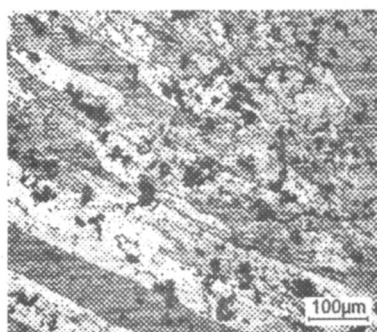
(a) 后退侧



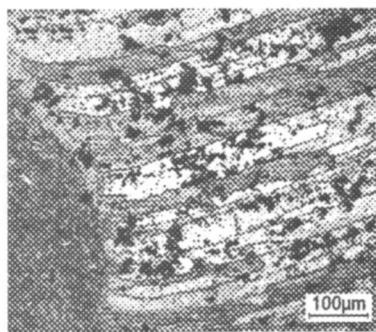
(b) 前进侧



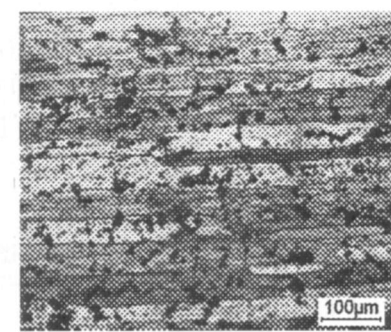
(c) 母材



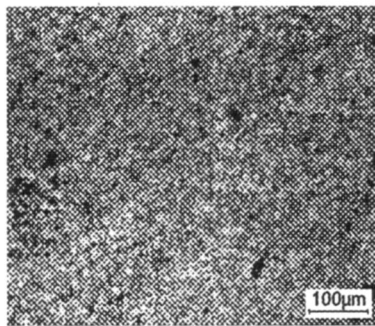
(d) 热处理后后退侧



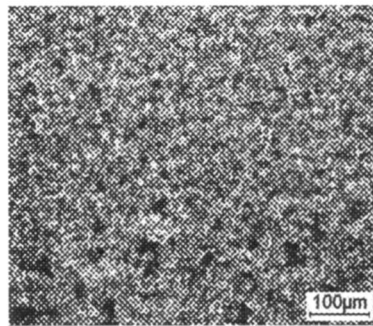
(e) 热处理后前进侧



(f) 热处理后母材



(g) 焊核区



(h) 热处理后焊核区

图 2 焊接接头微观组织

Fig 2 Microstructure of welding joints

由图 2 中 (g) 和 (h) 可以看出, 焊核区晶粒细小均匀, 呈等轴晶, 这是由于在搅拌头的作用下, 不断地形成再结晶晶核, 并发生有限的长大所致, 搅拌头对晶粒的破碎作用也会使该区晶粒细小。而热机影响区的晶粒受到搅拌头肩轴的挤压作用, 使得晶粒被拉长, 但晶粒变形没有焊核区剧烈。母材为典型的轧制状态, 微观形貌为沿轧制方向的板条组织。热处理后焊核区晶粒比原始状态更为细小, 显微组织晶粒呈扁平状或近等轴状分布。过渡区分界线较之前模糊, 板条组织逐渐消失。轧制组织由再结晶组织与变形的板条状组织组成, 化合物被破碎并沿轧制方向排列, 基体析出相数量较热处理前多和弥散分布均匀且弥散度大。

3.4 显微硬度分析

图 3 为 7075 铝合金搅拌摩擦焊接头热处理前后的显微硬度分布图。

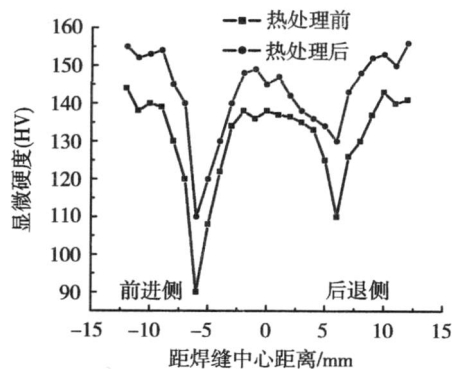


图 3 显微硬度分布图

Fig 3 Microhardness distribution

由图 3 可知, 过渡区硬度低于母材, 这是由于过渡区内温度的作用, 可能使弥散分布的细小强化相发生了集聚, 材料出现了过时效; 在焊核区尽管强化相

已固溶于基体, 但在焊核区发生了动态再结晶使得晶粒细化, 进而使得硬度升高。硬度的最低处出现在前进侧的热机影响区。热处理后接头的显微硬度明显提高, 硬度值分布更为均匀。这是由于固溶处理在不提高合金元素总含量的前提下提高了固溶体的过饱和度, 使固溶的合金淬火后过饱和固溶体浓度提高, 经时效后具有更高的强度, 从而提高材料的综合性能。

3.5 拉伸试样断口分析

焊缝的前进侧热机影响区是焊缝的最薄弱处。这是因为在力学性能测试时, 几乎所有试样被拉断均断裂在前进侧的热机影响区, 这与显微硬度图相吻合。通过其微观组织可以看到, 前进侧过渡区晶粒突变较大, 拉伸断口微观形貌如图 4 所示, 表现为具有强化相的韧窝特征。

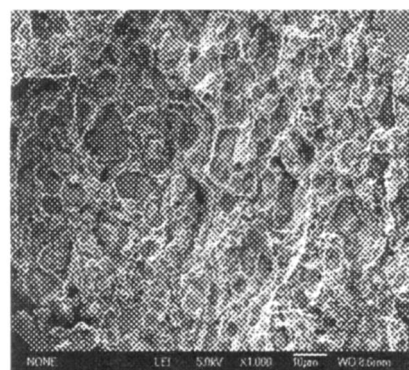


图 4 断口微观组织形貌

Fig 4 Microstructure of fracture

7075 铝合金的主要强化机制为析出强化, 金相照片中弥散分布着含 Fe、Si 的强化相, 这些强化相主要是 $Mg_{23}(Al, Zn)_{49}$ 和 $Mg(Zn, AlCu)$ 这些强化相的强度、塑性和弹性模量等均与基体不同, 塑性变形时,

滑移沿基体滑移面进行,强化相阻碍滑移的作用。滑移的结果使强化相与滑移面交界处造成应力集中。随着应变量的增大,塞积群中的位错增多,应力集中加剧。当集中应力达到强化相本身的强度或强化相与基体的界面结合强度时,便导致强化相本身折断或与界面脱离,便形成最初开裂的微孔。随着加载的升高和基体塑性变形的加剧,该局部的材料被拉长,微孔钝化。此时微孔间的材料犹如颈缩试样,在继续变形中伸长,并最终以内颈缩方式断裂,内颈缩的发展使微孔长大,局部断裂导致微孔连结,微孔连结遗留的痕迹便是断口上的韧窝。

图 5 为扫描电镜观察的单级时效拉伸试样的断口形貌,部分杂质元素难溶于甚至不溶于固溶体,在板材轧制过程中破碎,它们的形态和分布在随后的热处理中很少发生变化。这些破碎的脆性粒子在合金中起到缺口的作用,当基体受到应力作用发生塑性变形时,在颗粒的内部或颗粒与基体的边界产生空洞或孔隙,萌生微细裂纹。随着应力的增加,这些微裂纹逐渐长大,当裂尖附近局部区域内的应力超过材料的断裂强度后,基体发生断裂。

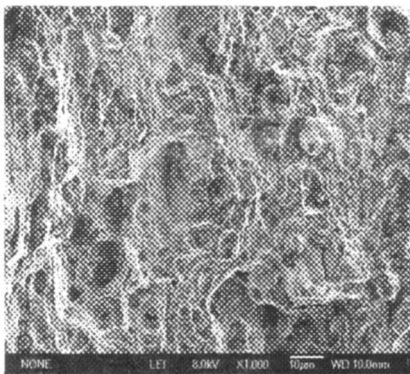


图 5 热处理后断口微观组织形貌

Fig 5 Microstructure of fracture after heat treatment

4 结论

(1) 实现了 5 mm 厚 7075 铝合金的搅拌摩擦焊, 搅拌头旋转速度为 400 r/min, 焊接速度为 40 mm/min; 拉伸强度达到 353 MPa, 经热处理后接头拉伸强度是母材强度的 83.0%, 力学性能良好。

(2) 7075 铝合金搅拌摩擦焊接头焊核区为细小的等轴晶。热处理后焊核区晶粒更为细化, 显微组织晶粒呈扁平状或近等轴状分布。轧制组织由再结晶组织与变形的板条状组织组成, 化合物被破碎并沿轧制方向排列, 但不明显。

(3) 7075 铝合金搅拌摩擦焊接头 TMAZ/HAZ 过渡区硬度低于母材, 是焊件的薄弱环节。硬度的最低处出现在前进侧热机影响区。经热处理后接头的显微硬度明显提高, 硬度值分布更为均匀。

参考文献

- 1 王训宏, 王快社, 徐可为等. LF2 铝合金搅拌摩擦焊接头的疲劳特性. 特种铸造及有色合金, 2006; 26(6): 379~380
- 2 赵行华, 林三宝, 吴林. 2014 铝合金搅拌摩擦焊接过程塑性金属流变可视化. 焊接学报, 2005; 26(6): 73~76
- 3 栾国红, North T H, 郭德伦等. 铝合金搅拌摩擦焊接头行为分析. 焊接学报, 2002; 23(6): 62~66
- 4 贺地求, 邓航, 周鹏展. 2219 厚板搅拌摩擦焊组织及性能分析. 焊接学报, 2007; 28(9): 13~16
- 5 王大勇, 冯吉才, 王攀峰. 搅拌摩擦焊接 Al-Li 合金接头的微观组织及力学性能. 金属学报, 2004; 40(5): 504~508

(编辑 李洪泉)