

多道次搅拌摩擦加工对 5083-O 铝合金组织性能的影响

陈雨¹, 李晓华², 付明杰², 丁桦¹

(1. 东北大学材料与冶金学院, 辽宁沈阳 110819; 2. 中航工业北京航空制造工程研究所, 北京 100024)

摘 要: 在不同轴肩直径、搅拌头转速和搅拌头行进速度下, 对 2.7 mm 厚 5083-O 铝合金进行了多道次搅拌摩擦加工(multi-pass friction stir processing), 搭接率为 100%, 共进行 3 道次搅拌摩擦加工。研究结果表明, 加工区由细小的再结晶组织组成; 随着加工道次的增加, 加工区内部缺陷体积减少, 晶粒进一步细化, 析出相细化并均匀分布, 力学性能提高, 加工区最高抗拉强度可达 360 MPa, 延伸率也优于母材; 其中, 第二道次加工对材料组织和性能的影响最为明显。

关键词: 多道次; 搅拌摩擦加工; 5083-O 铝合金; 微观组织; 力学性能

中图分类号: TG 146.2

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2014)10-1422-05

Effect of Multi-pass Friction Stir Processing on Microstructures and Mechanical Properties of 5083-O Aluminum Alloy

CHEN Yu¹, LI Xiao-hua², FU Ming-jie², DING Hua¹

(1. School of Materials & Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. AVIC Beijing Aeronautical Manufacturing Technology Research Institute, Beijing 100024, China. Corresponding author: DING Hua, E-mail: hding@263.net)

Abstract: Multi-pass friction stir processing (3-pass FSP with 100% overlap) was conducted under different diameters of shoulders, rotation speeds and travel speeds to investigate the effect of processing parameters on the microstructures and the mechanical properties of 5083-O aluminum alloy. The results showed that the fine and dynamically recrystallized grains are observed in the FSP zone. With increasing the number of passes, the grain size and the tunnel defects decrease, the second phase particles are refined and distributed uniformly, the ultimate tensile strength reaches up to 360 MPa, and the elongation is higher than that of the base metal. The effect of the 2nd-pass on the microstructures and mechanical properties is most obvious.

Key words: multi-pass; friction stir processing; 5083-O aluminum alloy; microstructure; mechanical property

搅拌摩擦加工(friction stir processing, FSP)是 Mishra 等^[1]在搅拌摩擦焊基础上发展起来的一种新型的材料加工技术。其基本原理是通过将高速旋转的搅拌针压入材料内部, 通过搅拌头强烈的搅拌作用使被加工材料发生剧烈的塑性变形, 从而得到致密化、均匀化和细化的加工区组织。目前采用搅拌摩擦加工已经成功制备出了铝合金、镁合金等超细晶材料^[2]。

5083 铝合金属于防锈铝合金, 不可热处理强

化, 具有良好的塑性和抗腐蚀性, 密度低, 强度高, 被广泛地应用于航天和运输行业^[3]。5083 铝合金性能的提高主要依赖于形变强化^[4]。

对于单道次搅拌摩擦加工, 热输入量直接决定加工区塑性金属的流动性能, 进而影响其力学性能。Yoon 等^[5]研究了 2 mm 厚 A5052-O 铝合金的搅拌摩擦焊接, 结果表明晶粒尺寸随焊接速度的增加和搅拌头旋转速度的降低而减小。Sato 等^[6]研究了 T5 和 T6 状态下 6063 铝合金的搅拌

由图3可知,隧道的横截面面积随着加工道次的增加而减少。通过对各道次隧道横截面面积的比较可知,第二道次对于缺陷的改良作用最大。搅拌摩擦加工会对加工区材料进行热输入和机械搅拌,热输入不足会减弱金属的流动,使其不能填补搅拌针后方的空腔,最终形成内部的空洞或隧道缺陷。Kim等^[7]提出了计算式: $q = 4/3 \times \pi^2 \mu \omega P R^3$, 描述加工过程中的热输入量,其中 P 为下压力, ω 为搅拌头旋转速度, μ 为摩擦系数。考虑到行进速度对于热输入量的影响,将行进速度 v 引入前式并将摩擦系数 μ 和下压力 P 近似看作常数,可以得到 $q = \alpha (\omega/v) R^3$, α 为常数。将 400-200 和 400-400 试样所对应的参数代入上式,比较可知 400-200 试样热输入量较大,其加工区金属流动较为充分,而 400-400 试样热输入值不足以使金属充分地流动并填补搅拌针后方的空腔,其内部产生了隧道缺陷。由于每一道次加工都是待材料恢复室温后才进行的,因此每道次加

工区温度峰值是一致的. 增加加工道次, 相当于增加了搅拌作用的时间. 通过图 3 显示的隧道横截面对比可知, 搅拌作用会对加工区金属产生影响. 随着搅拌时间的增加, 金属流动更加充分, 金属对于搅拌针后部空腔的填补也越及时, 有效限制了缺陷的产生. 如果继续增加加工道次, 400 - 400 试样内部的隧道缺陷有可能被逐步消除.

2.2 加工道次对加工区微观组织的影响

单道次加工后原始母材与 400 - 200, 400 - 400 试样的金相组织照片和 400 - 400 试样对应的透射照片如图 4 所示. 与母材相比, 经搅拌摩擦加工后, 加工区晶粒明显的细化. 其中 400 - 200 试样的加工区晶粒尺寸约为 3 μm , 400 - 400 试

样加工区晶粒尺寸约为 1 μm . 从透射照片可以看出, 加工区密度较低, 晶粒为细小的等轴晶组织, 这是由于加工区内发生了动态再结晶造成的. 但单道次加工获得的加工区晶粒尺寸并不均匀. 在搅拌摩擦加工过程中, 晶粒会由于热作用粗化长大, 因此热输入量越大, 晶粒粗化越明显. 如前所述, 400 - 200 试样所对应的热输入量较大, 导致晶粒尺寸比 400 - 400 试样加工区晶粒尺寸大. 晶粒尺寸较大会降低材料的性能, 因此需要控制加工过程中的热输入量, 但热输入量不足, 又会引发加工区的内部缺陷. 热输入和晶粒尺寸的矛盾关系限制了单道次搅拌摩擦加工的工艺窗口, 增加了通过搅拌摩擦加工获得优良性能材料的困难.

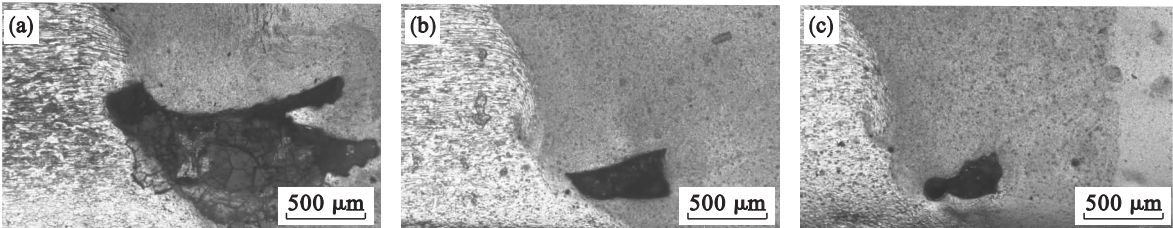


图 3 400 - 400 试样内部缺陷的金相照片
Fig. 3 Tunnel defects in FSP zone of sample 400 - 400
(a)—1 道次; (b)—2 道次; (c)—3 道次.

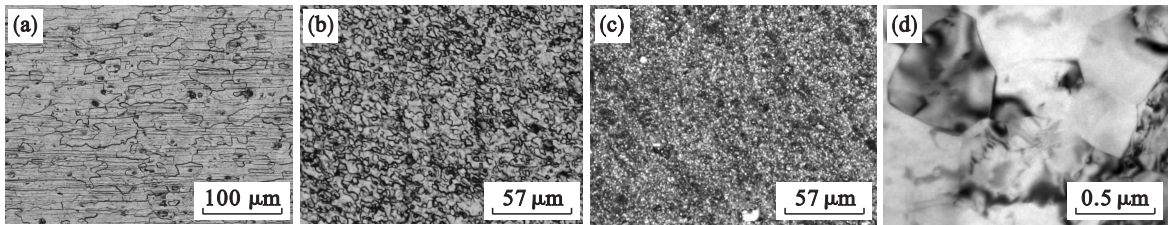


图 4 不同参数下加工区组织形貌
Fig. 4 Microstructures in FSP zone with different parameters
(a)—母材; (b)—400 - 200, 1 道次; (c)—400 - 400, 1 道次; (d)—TEM, 400 - 400, 1 道次.

为探究加工道次对材料微观组织的影响, 分别对 1 ~ 3 道次的 400 - 200 试样进行金相组织观测, 并对第一道次加工区组织进行了 EBSD 取向成像分析. 如图 5 所示, 随着加工道次的增加, 晶粒进一步细化. 进行单道次搅拌摩擦加工时, 加工时间较短, 加工区组织动态再结晶没有充分地进行. 从图 5d 可以看出, 经一道次加工, 加工区内晶粒的尺寸差别较大, 某些晶粒仍较为粗大. 搅拌摩擦加工可以使金属产生剧烈的塑性变形, 积累大量形变能, 并在变形过程中提供足够的热量, 促使加工区金属发生动态再结晶. 当达到动态再结晶温度时, 足够的变形时间有利于再结晶充分进行. 在此对单道次搅拌摩擦加工金属的变形时间进行计算. 一般认为, 加工区金属的变形时间为 $t = (d/v)^{[8]}$. 400 - 400 试样和 400 - 200 试样单道次的变形时间约为

0.6 和 1.8 s. 而变形时间又分为三个阶段, 分别为加热阶段、动态再结晶阶段及冷却阶段. 加工区金属实际发生动态再结晶的时间较短, 远小于金属的变形时间, 不能充分动态再结晶. 增加加工道次, 相当于增加了动态再结晶的时间, 从而保证动态再结晶能够更充分地进行, 使晶粒进一步细化. 对比图 5a ~ 5c 可以看出, 第二道次后, 晶粒细化程度最为明显, 说明此时加工区内部组织动态再结晶充分进行. 第三道次后, 由于动态再结晶已充分进行, 晶粒尺寸虽然有所减小, 但细化作用已不明显. 动态再结晶充分进行后, 继续增加加工道次将不会对晶粒尺寸造成显著的影响. 有研究表明^[9], 加工区的峰值温度是控制晶粒尺寸最主要的因素, 当加工区的峰值温度保持不变时, 其晶粒的尺寸会保持在一定范围内, 更多后续道次的加工并不能更明显地细化晶粒.

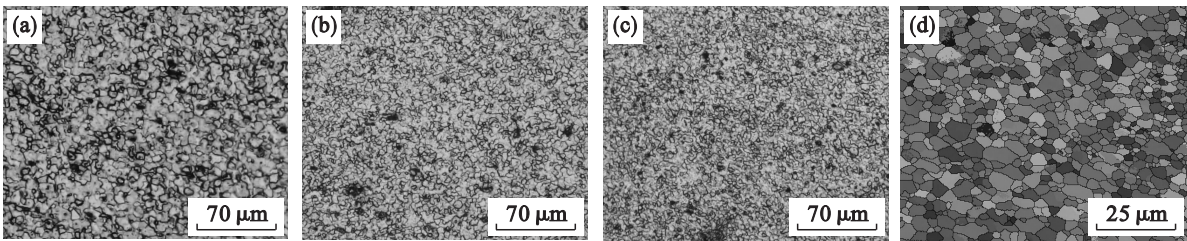


图 5 400-200 试样不同加工道次下加工区组织照片
Fig. 5 Microstructures in FSP zone under different passes of sample 400-200
(a)—1 道次; (b)—2 道次; (c)—3 道次; (d)—EBSD, 1 道次.

图 6 为 5083-O 铝合金不同参数下获得的加工区和母材的第二相粒子形貌及对第二相粒子的 EDS 分析. 通过 EDS 对第二相粒子的成分检测, 可以确定第二相粒子为 $Al_6(Mn, Fe)$. $Al_6(Mn, Fe)$ 的回溶温度高于 5083 铝合金的熔点, 因此在 FSP 的过程中, $Al_6(Mn, Fe)$ 不会发生回溶. 通过对不同参数下第二相粒子形貌的对比, 可以看出, 虽然 $Al_6(Mn, Fe)$ 并未发生回溶, 但受到了强烈的搅拌作用. 与母材相比, 加工区的析出相粒子发生了细化, 分布均匀. 对比 400-200 试

样和 400-400 试样加工区内的析出相可知, 当旋转速度保持恒定, 行进速度的降低更有利于细化析出相粒子. 随着加工道次的增加, 析出相粒子进一步细化, 说明充分的搅拌作用有利于将析出相破碎, 并使其随着加工区金属的流动均匀弥散地分布. 细化并且弥散分布的析出相粒子可以限制加工区晶粒的长大. 随着加工道次的增加, 更加细化且弥散分布的第二相粒子阻碍了晶粒的粗化, 加工区组织更加均匀.

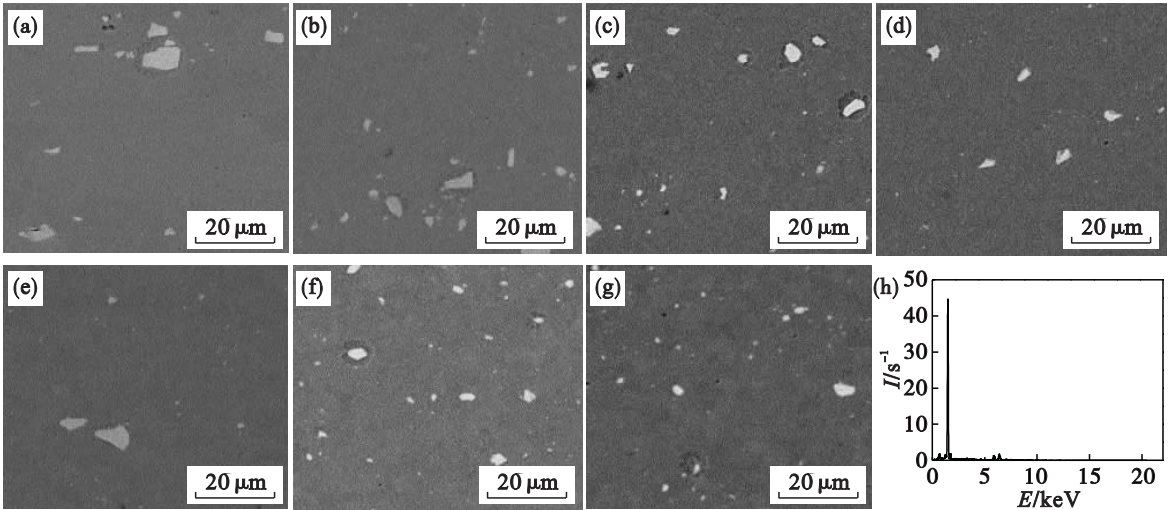


图 6 不同参数下加工区的第二相粒子形貌及 EDS 成分分析
Fig. 6 Microstructures of second phases and EDS pattern in FSP zone under different parameters
(a)—母材; (b)—400-400, 1 道次; (c)—400-400, 2 道次; (d)—400-400, 3 道次;
(e)—400-200, 1 道次; (f)—400-200, 2 道次; (g)—400-200, 3 道次; (h)—EDS.

2.3 加工道次对加工区性能的影响

细小的晶粒有利于提高材料的力学性能, 表 1 给出了加工区具体的抗拉强度和延伸率.

材料的强度随晶粒的细化而上升, 加工区材料的塑性优于母材. 其中 3 道次加工获得的 400-400 试样延伸率略有降低, 这可能是由于加工区内部隧道缺陷造成的.

400-400 试样加工区晶粒尺寸更为细小, 其强度高于 400-200 试样的性能. 在相同参数下,

表 1 5083-O 拉伸性能 Table 1 Tensile properties of 5083-O FSP		
样品	最大抗拉强度/MPa	延伸率/%
基材	314.0	32.00
400-200, 1 道次	326.6	33.67
400-200, 2 道次	339.3	34.50
400-200, 3 道次	346.1	35.50
400-400, 1 道次	343.7	32.00
400-400, 2 道次	356.2	33.80
400-400, 3 道次	361.8	29.80

随着加工道次的增加,加工区的力学性能增强.对比 1~2 道次和 2~3 道次性能增加的幅度,可知,随着加工道次的增加,加工区力学性能的增加速度减缓.

5083 铝合金的析出相粒子 $Al_6(Mn,Fe)$ 的回溶温度较高,加工过程 $Al_6(Mn,Fe)$ 粒子并未发生回溶,而细化了的 $Al_6(Mn,Fe)$ 粒子弥散分布,限制了晶粒的长大,有利于加工区力学性能的提高.5083 铝合金属于形变强化铝合金,其性能的提高主要依赖于形变强化,而 FSP 过程是一个剧烈的塑性变形过程,细晶强化效果对于提高 5083

性能较为明显.

对加工区进行显微硬度检测,结果如图 7 所示.对于小热输入量参数(400-400)下获得的试样,由于其加工区晶粒更为细小,细晶强化作用更为明显,加工区硬度值较高,最高值可达 1 050 MPa,远高于母材的硬度 750~800 MPa.而在大的热输入量(400-200)下,加工区晶粒尺寸较大,加工区硬度提高幅度较小,但也仍高于母材,其最高硬度约为 850 MPa.通过比较不同道次下硬度可知,随着加工道次的增加,加工区显微硬度波动程度减小,说明加工区组织的均匀性增加.

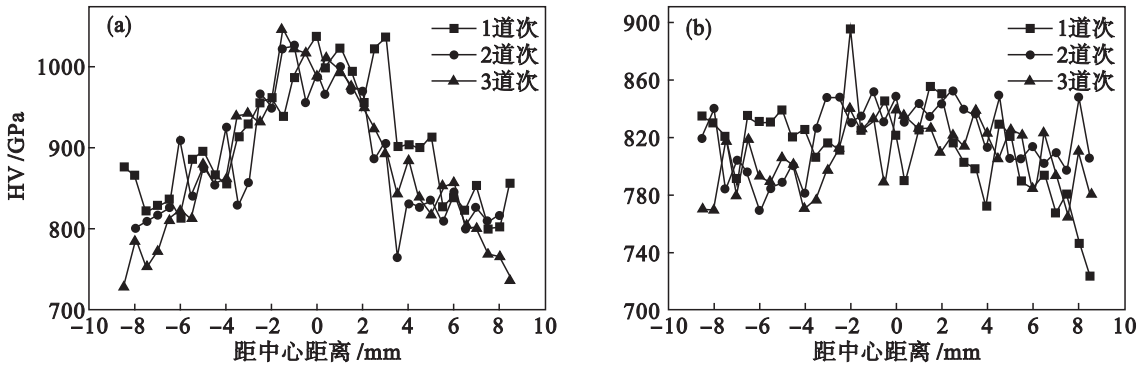


图 7 不同参数下显微硬度分布图
Fig. 7 Distributions of hardness under different parameters
(a)—轴肩直径 10 mm; (b)—轴肩直径 16 mm.

3 结 论

1) 对于 5083-O 铝合金的搅拌摩擦加工,热输入量不足会导致内部缺陷,增加后续的加工道次可以减少加工区的内部缺陷.当热输入量充足时,加工区内部金属流动呈周期性.

2) 对于单道次搅拌摩擦加工,再结晶进行不充分会造成组织不均匀.增加加工道次可以使再结晶充分进行,并在不增加热输入量的情况下使加工区组织得到进一步的细化.随着加工道次的增加,加工区最高强度可达 360 MPa,延伸率也优于母材.

参考文献:

[1] Mishra R S, Mahoney M W, McFadden S X, et al. High strain rate superplasticity in a friction stir processed 7075 Al alloy [J]. *Scripta Materialia*, 1999, 42(2): 163-168.

[2] 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.

[3] Hirata T, Oguri T, Hagino H, et al. Influence of friction stir

welding parameters on grain size and formability in 5083 aluminum alloy [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2007, 456: 344-349.

[4] Cui G R, Ma Z Y, Li S X. The origin of non-uniform microstructure and its effects on the mechanical properties of a friction stir processed Al-Mg alloy[J]. *Acta Materialia*, 2009, 57: 5718-5729.

[5] Yoon S O, Kang M S, Nam H B, et al. Friction stir butt welding of A5052-O aluminum alloy plates [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2012, 22: 619-623.

[6] Sato Y S, Urata M, Kokawa H. Parameters controlling microstructure and hardness during friction-stir welding of precipitation-hardenable aluminum alloy 6063 [J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2002, 33(3): 625-635.

[7] Kim Y G, Fujii H, Tsumura T, et al. Three defects types in friction stir welding of aluminum die cast alloy [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2006, 415: 250-254.

[8] Jata K V, Semiatin S L. Continuous dynamic recrystallization during friction stir welding of high strength aluminum alloys [J]. *Scripta Materialia*, 2000, 43(8): 743-749.

[9] Kwon Y J, Loureiro A. Microstructure and mechanical properties of friction stir welds in aluminum alloys 2024-T3, 5083-O and 6063-T6 [J]. *Materials Science Forum*, 2006, 516(6): 697-701.