

加工转速对含 Sc 7055 合金组织与力学性能的影响

余灿梅 谢金财 刘崇宇 江鸿杰 秦芳诚

(桂林理工大学材料科学与工程学院)

摘要 研究了搅拌摩擦加工(Friction Stir Processing, FSP)旋转速率对 Sc 含量为 0.25% 的 7055 铝合金(7055-0.25Sc)微观组织与力学性能的影响。结果表明,7055-0.25Sc 合金在搅拌摩擦加工过程中,低转速(300 r/min)能有效地抑制基体晶粒以及 η 相的粗化,而高转速(1 500 r/min)会导致 η' 相溶解。FSP 虽然可提高 7055-0.25Sc 母材的伸长率,但也会降低其强度。对于 FSP 试样,FSP-300 试样表现出最高的伸长率,而 FSP-1500 试样表现出最高的强度。

关键词 铝合金;搅拌摩擦加工;显微组织;力学性能

中图分类号 TG146.21;TG113.25

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2022.04.012

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effects of Rotation Rate on the Microstructure and Mechanical Properties of Sc Containing 7055 Al Alloy

Yu Canmei, Xie Jincai, Liu Chongyu, Jiang Hongjie, Qin Fangcheng

(College of Material Science and Engineering, Guilin University of Technology)

Abstract: The effects of rotation rate on microstructure and mechanical properties of 7055-0.25Sc Al alloy during friction stir processing(FSP) were investigated. The results indicate that the low rotation rate (300 r/min) can effectively inhibit the coarsening of grains and η phase, while high rotation rate (1 500 r/min) leads to the dissolution of η' phase. The elongation of 7055-0.25Sc alloy is enhanced by FSP, which, however, also reduces the strength. For the FSP specimens, the FSP-300 exhibits the highest elongation and the FSP-1500 exhibits the highest strength.

Key Words: Al Alloy, Friction Stir Processing, Microstructure, Mechanical Properties

7xxx 合金(Al-Zn-Mg-Cu)具有密度低、强度高、塑性好等特点,因而在航空制造业得到广泛应用^[1,2]。高 Zn、Cu、Zr 含量的 7055 合金在具有高抗拉强度的同时还具有优异的塑性^[3]。进一步优化 7055 合金的力学性能有助于扩大其在工程领域的应用。

细化晶粒是提高铝合金力学性能的重要方法之一^[4]。大量研究表明,Sc 能够细化铸态、变形态及热处理态 7xxx 合金的晶粒,进而优化其力学性能^[5~12]。除了元素添加,等通道角挤压^[13]、高压扭转^[14]、累积叠轧^[15]及搅拌摩擦加工(Friction Stir Processing, FSP)^[16]等剧烈塑性变形方法制备细晶结构铝合金也已获得广泛应用。

FSP 是基于搅拌摩擦焊接(Friction Stir Welding, FSW)的原理发展起来的^[16,17],具有工艺简单、高效的特点,因此受到广泛关注。研究发现,FSP 还能有效地

优化 7xxx 合金的热加工性能^[18~20]。然而,目前关于 FSP 态含 Sc 7xxx 合金室温力学性能的研究报道较少。本课题以 Sc 含量(质量分数,下同)为 0.25% 的 7055 铝合金(7055-0.25Sc)为原材料,探索 FSP 旋转速率对其微观组织与力学性能的影响,最终获得具有优异室温力学性能的 FSP 态 7xxx 合金,旨在为其应用提供参考。

1 试验方法与材料

基体材料(BM)是厚度为 3 mm 的 7055-0.25Sc 合金板材,该合金经过热轧、470 °C × 1 h 固溶以及 120 °C × 12 h 时效处理。合金成分(质量分数)为:7.81% 的 Zn、1.93% 的 Mg、2.24% 的 Cu、0.16% 的 Zr、0.25% 的 Sc,余量为 Al。

采用进给速度为 100 mm/min,旋转速率分别为 300、800 和 1 500 r/min 的加工工艺对 7055-0.25Sc 合

收稿日期:2021-09-16;修改稿收到日期:2021-11-05

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51601045)

第一作者简介:余灿梅,女,1999 年出生,本科生,广西桂林(541004),E-mail:2796253334@qq.com

通信作者:刘崇宇,男,1984 年出生,副教授,广西桂林(541004),E-mail:ley261@glut.edu.cn

引用格式:余灿梅,谢金财,刘崇宇,等.加工转速对含 Sc 7055 合金组织与力学性能的影响[J].特种铸造及有色合金,2022,42(4):455-458.

YU C M, XIE J C, LIU C Y, et al. Effects of rotation rate on the microstructure and mechanical properties of Sc containing 7055 Al alloy [J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2022, 42(4):455-458.

金进行 FSP, 获得的 FSP 试样分别记为 FSP-300、FSP-800、和 FSP-1500。搅拌工具的凹型轴肩直径为 10 mm, 搅拌针为锥形, 针长、根部直径、头部直径分别为 2.7、5 及 2.5 mm。

采用 Leica-DMi8 光学显微镜(OM)、S-4800 扫描电镜(SEM)及其电子背散射衍射(EBSD)、JEM-2010 透射电镜(TEM)观察试样的微观组织和断口形貌。采用 Instron-3369 万能力学试验机进行拉伸性能测试, 拉伸方向平行于 FSP 方向, 拉伸应变速率为 $4 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 。

2 试验结果与讨论

图 1 为 7055-0.25Sc BM 的 OM 照片。可以看出, 固溶和时效热处理并未消除 7055-0.25Sc 轧制薄板的纤维状变形组织, 同时在 BM 中未观察到再结晶晶粒。

图 2 为 7055-0.25Sc BM 的 TEM 照片。可以看出, 在 BM 中观察到两种沉淀物。固溶热处理过程中, Sc 和 Zr 在 Al 基体中形成共格 $\text{Al}_3(\text{Sc}, \text{Zr})$ 析出相^[21]。鱼眼状颗粒为 $\text{Al}_3(\text{Sc}, \text{Zr})$ 沉淀相, 其中一些 $\text{Al}_3(\text{Sc}, \text{Zr})$ 相位于位错和晶界(GBs)附近。更小的沉淀物为 $\text{Zn}_2\text{Mg}(\eta'$ 和 $\eta)$ 相, 固溶后的人工时效处理促进了 Mg、Zn 原子结合, 并形成 Zn_2Mg 析出相。

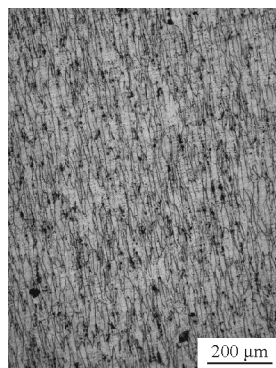


图 1 BM 的 OM 照片

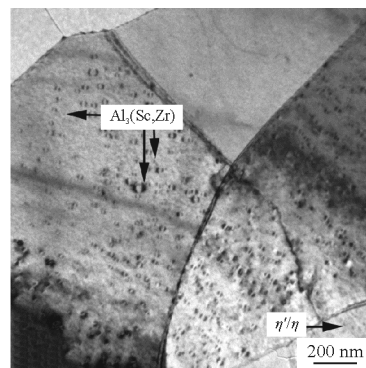


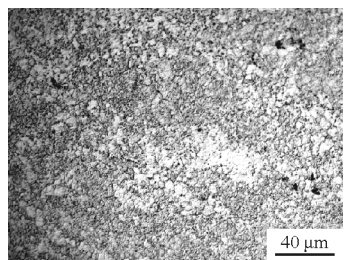
图 2 BM 的 TEM 照片

Fig.1 OM image of BM

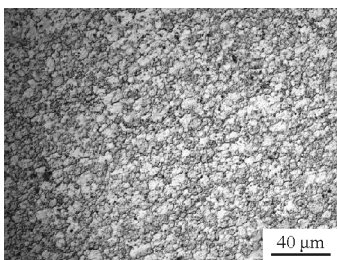
Fig.2 TEM image of BM

7055-0.25Sc 合金中的纳米 $\text{Al}_3(\text{Sc}, \text{Zr})$ 相在轧制和固溶处理过程中可钉扎晶界和位错(见图 2), 有效地抑制再结晶。因此, 在热处理后的合金中, 细小的纤维状变形晶粒得以保留(见图 1)。

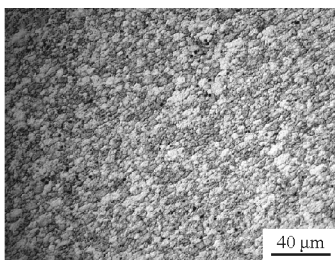
图 3 和图 4 分别为 FSP 试样的 OM 和 EBSD 照片。OM 的分辨率限制了对 FSP-300 晶粒的观察(见图 3a), 采用 EBSD 可清晰看到该试样的晶粒结构为等轴状的完全再结晶晶粒, 其平均晶粒尺寸约为 $2.2 \mu\text{m}$ (见图 4)。随着转速增加, FSP 试样的晶粒尺寸略有增加(见图 3b 和图 3c), FSP-1500 的平均晶粒尺寸约为 $5 \mu\text{m}$ (见图 3d)。



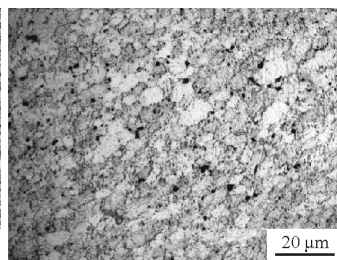
(a) FSP-300



(b) FSP-800



(c) FSP-1500, 低倍



(d) FSP-1500, 高倍

图 3 不同转速下 7055-0.25Sc 合金的 OM 照片

Fig.3 OM images of 7055-0.25Sc alloy at different rotation rates

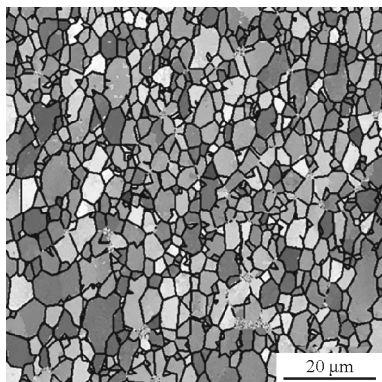


图 4 FSP-300 晶粒结构 EBSD 照片

Fig.4 EBSD map showing grain structure of FSP-300 specimen

FSP 可以有效地细化 7055-0.25Sc 合金的晶粒。降低转速可减少 FSP 过程中的热输入^[22,23], 因此, 低转速工艺能够更有效地抑制 FSP 试样的再结晶晶粒粗化(见图 3)。

图 5 为 FSP 试样的 TEM 照片。可以看出, 在所有 FSP 试样中均可观察到 $\text{Al}_3(\text{Sc}, \text{Zr})$ 和 η 析出相。FSP-300 试样中的 η 沉淀相上可观察到 $\text{Al}_3(\text{Sc}, \text{Zr})$ 颗粒(见图 5a)。当转速增加到 800 r/min 时, FSP 试样中 η 相的尺寸和密度均有所增加(见图 5b)。与其他两个 FSP 试样相比, FSP-1500 试样中的 η 相密度更低, 但尺寸更大。在该试样的晶界处能够观察到 $\text{Al}_3(\text{Sc}, \text{Zr})$ 颗粒(见图 5c)。

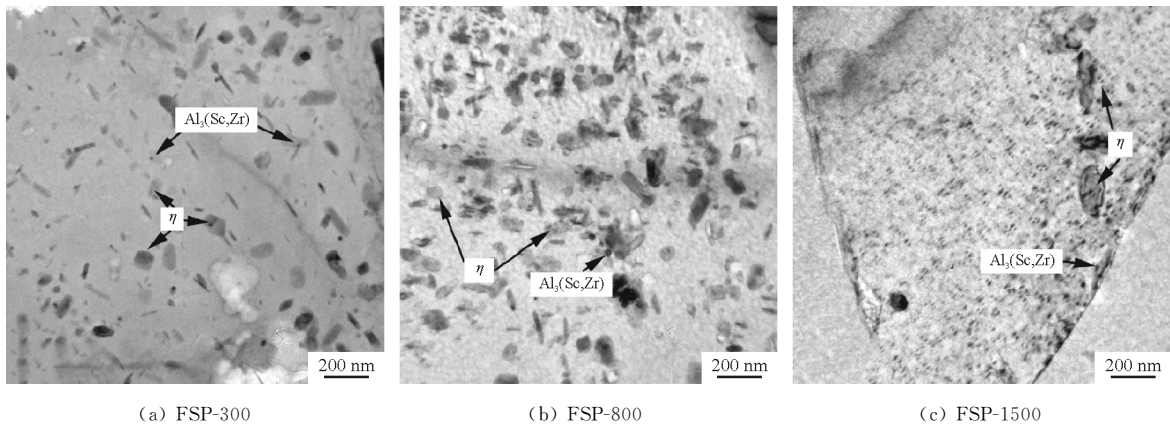


图 5 不同转速下 7055-0.25Sc 合金试样的 TEM 显微组织

Fig.5 TEM images of 7055-0.25Sc alloy at different rotation rates

FSP 过程中产生的高温促进了 7055-0.25Sc 合金的沉淀相析出、粗化及演化。纳米尺寸的 $\text{Al}_3(\text{Sc}, \text{Zr})$ 颗粒与铝基体的界面处具有高界面能, 这为 Zn_2Mg 相析出提供了优先形核位点。因此, FSP 试样中的 η 相在 $\text{Al}_3(\text{Sc}, \text{Zr})$ 颗粒上析出。增加转速可以增加 FSP 的热输入量, 进而促进 7055-0.25Sc 合金中沉淀物粗化。因此相比于 FSP-300 试样, FSP-800 试样中 η 相的尺寸和密度均更大(见图 5b)。在 1 500 r/min 获得的热输入量最高, 高温在促进 η 相析出和粗化的同时, 还促使原有的 η' 相回溶。因此 FSP-1500 中的 η 相比其他试样尺寸更大但密度更低。在 FSP 过程中纳米 $\text{Al}_3(\text{Sc}, \text{Zr})$ 相同样可起到晶界钉扎作用(见图 5c), 因此, 高热输入量并未显著地粗化 FSP 试样的晶粒尺寸(见图 4d)。

图 6 为 BM 和 FSP 试样的应力-应变曲线。与 BM 相比, 各 FSP 试样强度有所降低, 但伸长率更高。对于 FSP 试样, FSP-300 的塑性最好, 其伸长率高达 18%; FSP-1500 具有最高强度, 达到 590 MPa。

由微观结构分析可知 FSP 对 7055-0.25Sc 合金强度的影响为: 通过晶粒细化提高合金的细晶强化和由 η' 亚稳相消失所引起的软化。两种作用相互竞争, 净效应导致 FSP 后 7055-0.25Sc 合金的强度低于 BM。

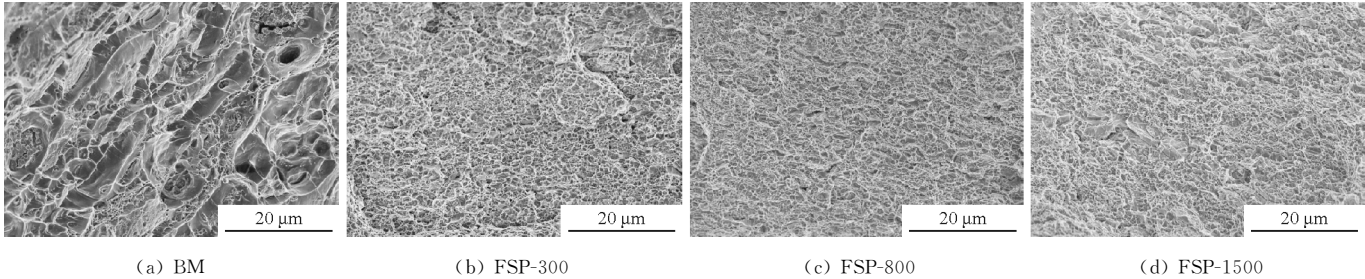


图 7 不同试样的拉伸断口形貌

Fig.7 Tensile fracture morphologies of different specimens

增加转速会降低 FSP 试样的伸长率(见图 6)。高转速的 FSP 导致 η 相粗化, 粗化的 η 相在拉伸过程中

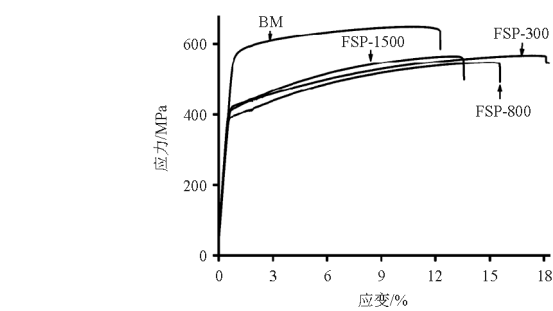


图 6 BM 和 FSP 试样的应力-应变曲线

Fig.6 Stress-strain curves of BM and FSP specimens

相比于 FSP-800, FSP-300 的晶粒和 η 相更细, 晶界和析出强化效应更显著, 因此 FSP-300 的强度高于 FSP-800 强度。与 FSP-1500 相比, FSP-300 同样表现出更高的晶界和析出强化效应。然而, 在高转速 FSP 过程中, BM 中的 η' 相溶入 Al 基体中, 提高了试样的固溶强化效应, 进而导致其强度高于其他 FSP 试样。

图 7 为 BM 和 FSP 试样的拉伸断口形貌。可以看出, 与 BM 相比, FSP 试样断裂面的韧窝更细小且更均匀, 这是因为该试样的晶粒更细且更均匀。拉伸过程中, FSP 试样中的细等轴晶粒结构特征可使应力重新分布, 进而阻止应变局域化。因此, FSP 试样在失效前能够实现较大的伸长率。

会成为裂纹的优先形核点。另外, 粗大的 η 相和 Al 基体之间界面结合强度较低, 会成为裂纹的优先扩展路

径,进而导致拉伸试样的塑性失稳和提前断裂。因此,FSP-300在失效前表现出最高的伸长率。

3 结 论

(1)7055-0.25Sc合金在FSP过程中,低转速(300 r/min)能够有效抑制再结晶晶粒的粗化,FSP-300试样的平均晶粒尺寸约为 $2.2\ \mu\text{m}$ 。

(2)增大转速导致FSP试样中的 η 相粗化。以1 500 r/min进行FSP加工时,7055-0.25Sc合金中 η 相的析出、粗化以及原有 η' 相的溶解同时发生。

(3)FSP提高了7055-0.25Sc合金的塑性,却降低了其强度。FSP-300试样表现出最高的塑性;而FSP-1500试样在更高的固溶强化作用下,表现出最高的抗拉强度。

参 考 文 献

- [1] WEI L L, PAN Q L, HUANG H F, et al. Influence of grain structure and crystallographic orientation on fatigue crack propagation behavior of 7050 alloy thick plate[J]. Int. J. Fatigue, 2014, 66: 55-64.
- [2] WEI L L, PAN Q L, WANG Y L, et al. Characterization of fracture and fatigue behavior of 7050 aluminum alloy ultra-thickplate[J]. J. Mater. Eng. Perform., 2013, 22: 2 665-2 672.
- [3] LIU S D, ZHANG X M, CHEN M A, et al. Influence of aging on quench sensitivity effect of 7055 aluminum alloy[J]. Mater. Character., 2008, 59: 53-60.
- [4] LIU C Y, ZHAN G X, XIA C Q, et al. Effects of Sc addition and rolling on the microstructure and mechanical properties of Al-35Zn alloys[J]. Mater. Sci. Eng., 2017, A703: 45-53.
- [5] ZHANG M, LIU T, HE C N, et al. Evolution of microstructure and properties of Al-Zn-Mg-Cu-Sc-Zr alloy during aging treatment[J]. J. Alloys Compd., 2016, 658: 946-951.
- [6] DENG Y, YIN Z M, DUAN J Q, et al. Evolution of microstructure and properties in a new type 2 mm Al-Zn-Mg-Sc-Zr alloy sheet[J]. J. Alloys Compd., 2012, 517: 118-126.
- [7] ZHOU W B, LIU C Y, YU P F, et al. Effect of scandium on microstructure and mechanical properties of high zinc concentration aluminum alloys[J]. Mater. Character., 2017, 127: 371-378.
- [8] LI G, ZHAO Q, LIU T, et al. Effect of Sc/Zr ratio on the microstructure and mechanical properties of new type of Al-Zn-Mg-Sc-Zr alloys[J]. Mater. Sci. Eng., 2014, A617: 219-227.
- [9] WU L M, SEYRING M, RETTENMAYR M, et al. Characterization of precipitate evolution in an artificially aged Al-Zn-Mg-Sc-Zr alloy[J]. Mater. Sci. Eng., 2010, A527: 1 068-1 073.
- [10] DENG Y, YIN Z M, ZHAO K, et al. Effects of Sc and Zr microalloying additions on the microstructure and mechanical properties of new Al-Zn-Mg alloys[J]. J. Alloys Compd., 2012, 530: 71-80.
- [11] DENG Y, PENG B, XU G F, et al. Effects of Sc and Zr on mechanical property and microstructure of tungsten inert gas and friction stir welded aerospace high strength Al-Zn-Mg alloys[J]. Mater. Sci. Eng., 2015, A639: 500-513.
- [12] HE Z B, YIN Z M, LIN S, et al. Preparation, microstructure and properties of Al-Zn-Mg-Sc alloy tubes[J]. J. Rare Earths, 2010, 28: 641-646.
- [13] ZHA M, LI Y J, MATHIESEN R H, et al. Microstructure evolution and mechanical behavior of a binary Al-7Mg alloy processed by equal-channel angular pressing[J]. Acta Mater., 2015, 84: 42-54.
- [14] SHA G, TUGCU K, LIAO X Z, et al. Ring, strength, grain refinement and solute nanostructures of an Al-Mg-Si alloy(AA6060) processed by high-pressure torsion[J]. Acta Mater., 2014, 63: 169-179.
- [15] LIU C Y, YU L, MA M Z, et al. Dynamic precipitation of Al-Zn alloy during rolling and accumulative roll bonding[J]. Philos. Mag. Lett., 2015, 95: 543-546.
- [16] MISHRA R S, MA Z Y. Friction stir welding and processing[J]. Mater. Sci. Eng., 2005, R50: 1-78.
- [17] THOMAS W M, NICHOLAS E D, NEEDHAM J C, et al. Friction stir welding [P]. Great Britain Patent Application. NO: 9125978.8, 1991.
- [18] MA Z Y, LIU F C, MISHRA R S, et al. Superplastic behavior of micro-regions in two-pass friction stir processed 7075Al alloy[J]. Mater. Sci. Eng., 2009, A505: 70-78.
- [19] WANG K, LIU F C, MA Z Y, et al. Realization of exceptionally high elongation at high strain rate in a friction stir processed Al-Zn-Mg-Cu alloy with the presence of liquid phase[J]. Scripta Mater., 2011, 64: 572-575.
- [20] CHARIT I, MISHRA R S. Low temperature superplasticity in a friction-stir-processed ultrafine grained Al-Zn-Mg-Sc alloy[J]. Acta Mater., 2005, 53: 4 211-4 223.
- [21] ZHU H L, DAHLE A K, GHOSH A K, et al. Effect of Sc and Zn additions on microstructure and hot formability of Al-Mg sheet alloys[J]. Metall. Mater. Trans., 2009, A40: 598-608.
- [22] LI B, PAN Q L, HUANG X, et al. Microstructures and properties of Al-Zn-Mg-Mn alloy with trace amounts of Sc and Zr[J]. Mater. Sci. Eng., 2014, A616: 219-228.
- [23] XUE P, XIAO B L, ZHANG Q, et al. Achieving friction stir welded pure copper joints with nearly equal strength to the parent metal via additional rapid cooling[J]. Scripta Mater., 2011, 64: 1 051-1 054.

(编辑:栗万仲)

欢迎使用在线稿件处理系统

投稿、查稿、审稿

敬请登录 www.special-cast.com