

搅拌摩擦加工 5086 铝合金的微观组织与阻尼行为

于博文¹ 江鸿杰¹ 杨振兴^{1,2} 刘崇宇¹ 张 平¹

(1.桂林理工大学广西有色金属及特色材料加工教育部重点实验室; 2.广西南南铝加工有限公司)

摘 要 采用搅拌摩擦加工(FSP)技术对 5086 铝合金进行单次道加工,并对材料的微观结构、力学性能、储能模量和阻尼行为进行研究。研究表明,5086 铝合金经 FSP 后,合金中晶粒得到细化,且第二相颗粒数量和位错密度明显降低。经 FSP 后 5086 铝合金的伸长率显著提高,其中低转速 FSP 试样的伸长率为 22%,比母材提高了 83%;在 350 ℃时,低转速 FSP 试样的内耗值高达 0.068,比母材内耗值高 55%;当应变量高于 0.06%时,合金中更多的小晶界发生滑移运动,诱发晶界阻尼,使得 FSP 试样的阻尼性能均明显优于母材。5086 铝合金储能模量分别随着温度和应变的升高而增加,且 FSP 试样的储能模量均明显高于母材。

关键词 搅拌摩擦加工;5086 铝合金;微观组织;阻尼行为

中图分类号 TG146.21;TG453.⁺⁹

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2021.05.011

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Microstructure and Damping Behavior of 5086 Aluminum Alloy by Friction Stir Processing

Yu Bowen¹, Jiang Hongjie¹, Yang Zhenxing^{1,2}, Liu Chongyu¹, Zhang Ping¹

(1.Key Laboratory of New Processing Technology for Nonferrous Metal & Materials, Ministry of Education, Guilin University of Technology; 2.Alnan Aluminium Co., Ltd.)

Abstract: Friction stir processing (FSP) technology was used for single pass processing of 5086 aluminum alloy. The microstructure, mechanical properties, storage modulus and damping behavior of the alloy were investigated. The results reveal that the grain in 5086 aluminum alloy is refined after FSP, and the number of second phase particles and dislocation density are decreased obviously. After FSP, the elongation of 5086 aluminum alloy is significantly enhanced, and the elongation of low rotation speed FSP sample reaches 22%, which is 83% higher than that of base metal. At 350 ℃, the internal friction value of low rotation speed FSP is 0.068, which is 55% higher than that of base material. When the strain is higher than 0.06%, small grain boundaries occur to slip and induce grain boundary damping, which takes the damping properties of FSP samples superior to that of base metal. The storage modulus of 5086 aluminum alloy is increased with the increase of temperature and strain, respectively, and the storage modulus of FSP samples is significantly higher than that of base metal.

Key Words: Friction Stir Processing, 5086 Aluminum Alloy, Microstructure, Damping Behavior

5086 铝合金是 Al-Mg 系合金中较为常用的一种变形铝合金,属于不可热处理强化型铝合金。5086 铝合金由于其密度低、比强度高、耐腐蚀、焊接性和成形性好等特点,被广泛应用于制造行李箱盖、发动机罩、车门等汽车覆盖件以及船舶龙骨和外壳等^[1,2]。随着科技的发展,汽车和船舶领域对其产品减振降噪性的要求不断提高,而改善其零部件材料的阻尼性能是实现减振降噪的关键因素之一,因此,开发高阻尼 Al-Mg 合金具有较高的工程价值与广阔的市场应用前景。目前,国内外

研究者对 Al-Mg 系合金的研究主要集中在加工成形性、抗腐蚀性和合金化设计等方面,对于 Al-Mg 系铝合金阻尼性能方面的研究不多。

位错、晶界和界面阻尼是铝合金的主要阻尼机制,通过减少铝合金中溶质原子、第二相等钉扎作用以及晶粒细化增加合金中可移动晶界数量,能有效地改善合金的阻尼性能^[3]。SRIKANTH N 等^[4]研究发现,Al-Mg 合金的阻尼性能跟位错与溶质原子 Mg 的交互作用有关,且 Mg 溶质原子越少合金内耗值越高。ZHANG Y

收稿日期:2020-11-09;修改稿收到日期:2020-12-01
基金项目:国家自然科学基金资助项目(52061011);广西科技重大专项资助项目(桂科 AA17202007)
第一作者简介:于博文,男,1999 年出生,学士,广西桂林(541004),E-mail:1248177926@qq.com
通信作者:江鸿杰,男,1980 年出生,讲师,广西桂林(541004),E-mail:jhj2014@glut.edu.cn
引用格式:于博文,江鸿杰,杨振兴,等. 搅拌摩擦加工 5086 铝合金的微观组织与阻尼行为[J]. 特种铸造及有色合金, 2021, 41(5): 575-579.
YU B W, JIANG H J, YANG Z X, et al. Microstructure and damping behavior of 5086 aluminum alloy by friction stir processing[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(5): 575-579.

等^[5]对 A356 铝合金进行累积叠轧焊 (ARB) 晶粒细化处理后,发现晶粒细化能有效改善合金的阻尼性能。JIANG H J 等^[6]研究发现,搅拌摩擦加工 (friction stir processing, FSP) 后得到的超细晶结构 Al-Mg-Si 铝合金中存在大量的晶界,在高应变或较高温条件下,这些晶界的滑移有利于提高合金的阻尼性能。搅拌摩擦加工技术可对铝合金材料进行改性,细化合金晶粒和第二相粒子^[7,8],减少合金基体中的溶质原子、第二相等钉扎作用^[9],有利于改善合金的阻尼性能。因此,本课题利用 FSP 工艺制备出具有细晶结构的 5086 铝合金,研究 FSP 工艺对 5086 铝合金微观结构、力学性能和阻尼性能的影响,并阐明 FSP Al-Mg 合金的阻尼行为机制,为高阻尼 Al-Mg 合金材料的设计和制备提供参考。

1 试验方法

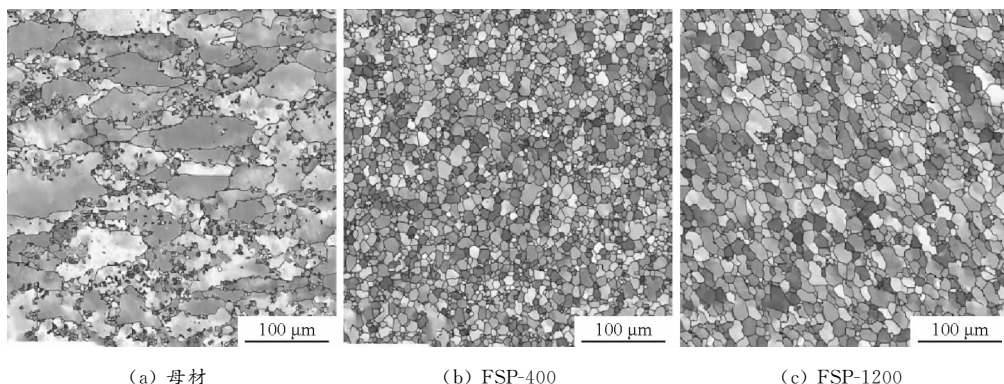
选用 3 mm 厚的 5086-H112 铝板为原材料,采用 SXT-010 龙门移动式数控搅拌摩擦焊机对尺寸为 150 mm×150 mm 的 5086-H112 铝板进行搅拌摩擦加工,其 FSP 区域尺寸为 100 mm×4 mm×3 mm,搅拌头转速分别为 400 r/min 和 1 200 r/min,进给速度均为 100 mm/min,试样分别命名为 FSP-400 和 FSP-1200,并沿着平行于 FSP 进给方向在 FSP 区域截取测试试样。采用附带电子背散射衍射技术 (EBSD) 的日立 S-4800 型扫描电镜 (SEM) 对 FSP 试样及其母材 (The base metal, BM) 进行晶粒结构和断口形貌观察;采用 JEM-2010 透射电镜 (TEM) 观察铝合金的晶粒、位错以及第

二相颗粒等微观结构;采用岛津 MODEL 型万能试验机进行拉伸测试,拉伸速率为 $4 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$;用单悬臂应变控制模式在 DMA Q800 动态热机械分析仪上测试试样的阻尼性能 (即内耗值,常用应变滞后于应力的相位角 $\tan \delta$ 来表征),试样尺寸为 25 mm×4 mm×1.2 mm,测试频率和振幅分别为 1 Hz 和 10 μm ,测试温度区间为 28~360 $^{\circ}\text{C}$,升温速率为 5 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 。

2 试验结果与讨论

2.1 5086 铝合金的微观结构

图 1 为 5086 铝合金母材、TSP-400 和 TSP-1200 试样的电子背散射 (EBSD) 晶粒结构照片。由图 1a 可见,母材中存在两种尺寸和形态结构不同的晶粒,其中细长粗大的晶粒平均晶粒尺寸约为 55 μm ,而小的等轴再结晶晶粒平均晶粒尺寸约为 2 μm 。由图 1b 和图 1c 可知,FSP-400 和 FSP-1200 试样的平均晶粒尺寸分别为 8.2 μm 和 10.5 μm ,可见经 FSP 后 5086 铝合金的晶粒尺寸明显细化,低转速 FSP 试样的平均晶粒尺寸比高转速 FSP 试样小。在 5086 铝合金 FSP 过程中,FSP 能有效地破碎粗大的晶粒,使得晶粒细化,但 FSP 过程的热输入促使被破碎的细小晶粒和母材原有的细小等轴晶 (约为 2 μm) 发生再结晶长大,其晶粒破碎细化效果优于再结晶长大作用;在高转速 FSP 过程中,热输入量较大,被 FSP 破碎的细小晶粒发生再结晶长大现象显著,而当 FSP 转速较低时,热输入量较小,晶粒发生



(a) 母材 (b) FSP-400 (c) FSP-1200
图 1 5086 铝合金母材、TSP-400 和 TSP-1200 试样晶粒结构的 EBSD 照片

Fig.1 EBSD images of grain structure of 5086 alloy

再结晶现象不明显,更有利于获得细小的晶粒。

图 2 为 5086 铝合金的母材、TSP-400 和 TSP-1200 试样 TEM 照片。由图 2a 可见,5086 铝合金母材试样中存在大量粗大的第二相颗粒和高密度的位错,这些第二相主要为 Al_6Mn 、 Al_3Mg_2 和 Mn-Fe-Al 金属间化合物^[3,10]。由图 2b 和图 2c 可知,经 FSP 后 5086 铝合金中的第二相颗粒数量和位错密度明显降低,且在 FSP-

1200 试样中只存在极少量的第二相颗粒。这主要是由于在低转速 FSP 过程中,其塑性变形过程会导致合金中的第二相颗粒分解^[6,11];而在高转速 FSP 过程中,热输入量较大,合金温度升高,不仅促使镁元素在铝合金中的固溶度增加,造成大量富镁相被溶解,还使得合金基体中的位错线被溶解,导致 FSP 试样呈现出较低的位错密度。

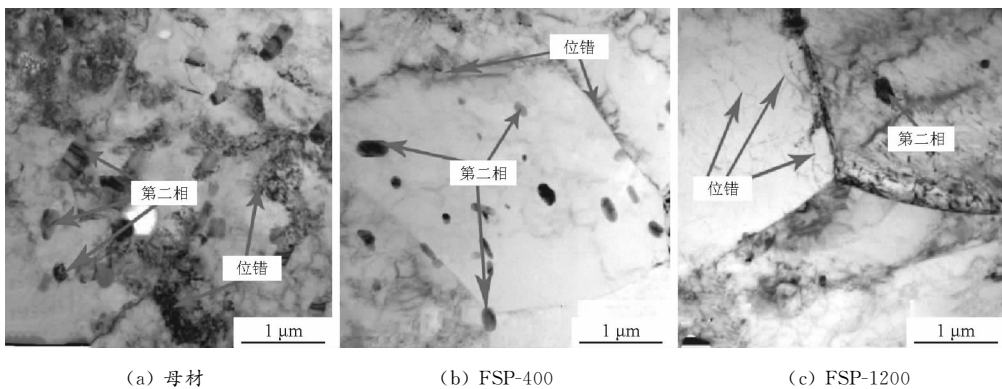


图 2 5086 铝合金母材、TSP-400 和 TSP-1200 试样的 TEM 照片

Fig.2 TEM images of 5086 aluminum alloy

2.2 5086 铝合金的力学性能

图 3 为 5086 铝合金母材(BM)、FSP-400 和 FSP-1200 试样的应力-应变曲线。可以看出,母材、FSP-400 和 FSP-1200 试样的屈服强度分别为 232、162 和 161 MPa,抗拉强度分别为 331、323 和 315 MPa,伸长率分别为 12%、22%和 21%。在拉伸过程中,所有试样的应力-应变曲线均出现锯齿形屈服现象,呈现出不规则的塑性失稳现象,称为 Portevin-Le Chatelier 效应^[2]。经 FSP 后 5086 铝合金的屈服强度明显降低,抗拉强度变化不大,但其伸长率显著提高,其中 FSP-400 试样的伸长率比母材提高了 83%。结合图 1 和图 2 可知,一方面 5086 铝合金经 FSP 后,其位错密度减少,位错强化作用被削弱,使得 FSP 试样的屈服强度降低;另一方面 FSP 能有效地细化合金基体中的晶粒和第二相颗粒,优越的晶界平衡、低密度位错以及均匀分布在铝基体的细小颗粒,导致材料在变形过程中不易发生应力集中^[12],有利于改善 FSP 铝合金的伸长率。此外,由于

FSP 过程使得合金晶粒细化,但位错密度减少,合金在获得细晶强化的同时,其位错强化作用被削弱,这两种相反的作用机制使得 FSP 后 5086 铝合金的抗拉强度变化不大。

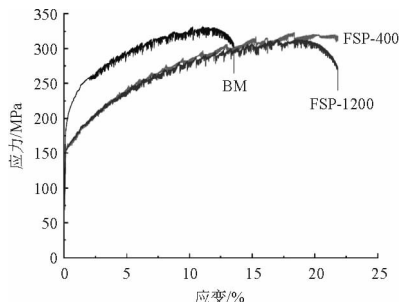


图 3 母材、FSP-400 和 FSP-1200 试样的应力-应变曲线

Fig.3 Stress-strain curves of BM, FSP-400 and FSP-1200 samples

图 4 为 5086 铝合金母材、FSP-400 和 FSP-1200 试样的拉伸断口形貌。由图 4a 可见,母材的断口表面存在许多韧窝,也存在少量的河流花样裂纹,说明存在少

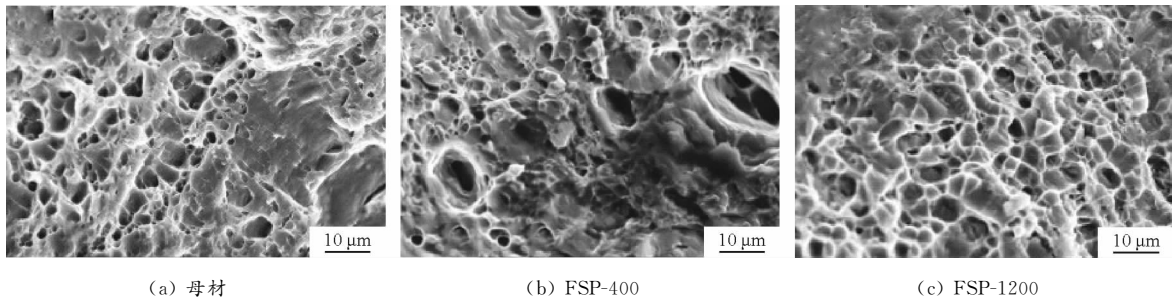


图 4 5086 铝合金母材、TSP-400 和 TSP-1200 试样的拉伸断口形貌

Fig.4 Tensile fracture morphology of 5086 aluminum alloy

量的解理断裂,其断裂方式为脆性和塑性的混合型断裂模式。从图 4b 和图 4c 可以看到,由于许多小韧窝集聚成尺寸较大的韧窝,使得 FSP-400 试样断口表面出现部分较大的韧窝,说明合金的塑性较好,这与试样的伸长率较高一致;而 FSP-1200 试样的断口表面存在大量的细小韧窝,FSP 试样的断裂方式均为韧性断裂类型。

2.3 5086 铝合金的阻尼行为

图 5 为 5086 铝合金母材、FSP-400 和 FSP-1200 试样在振动频率为 1 Hz、振幅为 10 μm 条件下的内耗-温度曲线。可以看出,5086 铝合金母材、FSP-400 和 FSP-1200 试样的内耗值均随着温度的升高而增大。当温度高于 180 ℃时,FSP-400 试样的内耗值明显高于母材,

而 FSP-1200 试样的内耗值却低于母材。在 350 ℃ 时, FSP-400 试样的内耗值高达 0.068, 比母材内耗值 (0.044) 高 55%。可见, FSP-400 试样的阻尼性能明显优于母材, 低转速 FSP 有利于改善 5086 铝合金的阻尼性能。有研究表明, 不同温度条件下, 铝合金的阻尼贡献机制不同, 低温时, 铝合金以位错阻尼机制为主, 呈现出低阻尼特性, 所以低温时铝合金阻尼性能差异不大, 而高温时, 铝合金以晶界和界面阻尼机制为主, 呈现出较高的阻尼特性, 温度越高阻尼性能差异越大^[3,6,13]。结合图 1 和图 2 分析可知, FSP-400 试样中存在大量的细小晶界以及第二相与基体间的界面, 在高温 (180 ℃ 以上) 振动过程中, 这些细小晶界和界面发生滑移, 晶界和界面阻尼机制被激活, 导致机械能转化为热能, 合金内耗值增加, 两种阻尼机制的协同增强作用使得 FSP-400 试样的高温阻尼性能最好。而 FSP-1200 试样中只有极少量的第二相, 在高温振动过程中, 这些第二相引发的界面阻尼影响极小, 与母材相比, 虽然 FSP-1200 试样晶粒细化在一定程度上促进了晶界阻尼作用, 但由于其基体中第二相颗粒几乎消失, 使得界面阻尼的作用大幅削弱, 导致 FSP-1200 试样整体的高温阻尼性能低于母材。

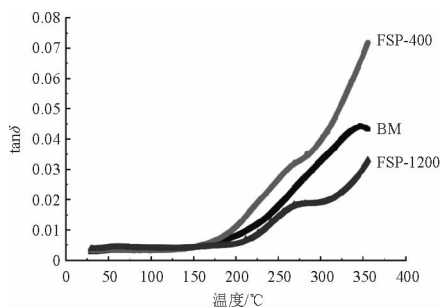


图 5 母材、FSP-400 和 FSP-1200 试样的内耗-温度曲线图
Fig.5 Internal friction-temperature curves of BM, FSP-400 and FSP-1200 samples

图 6 为 5086 铝合金母材、FSP-400 和 FSP-1200 试样在振动频率为 1 Hz、温度为 28 ℃ 下的内耗-应变曲线图。可以看出, 当应变值低于 0.06% 时, 5086 铝合金母材、FSP-400 和 FSP-1200 试样的内耗值均随着应变的增加而增大, 当应变值高于 0.06% 时, 母材的内耗值趋于稳定, 而 FSP-400 和 FSP-1200 试样的内耗值仍随着应变值增加而增大, 且 FSP 试样的内耗值明显高于母材。当应变值为 0.16% 时, FSP-400 和 FSP-1200 试样的内耗值分别为 0.008 5 和 0.010 7, 比母材内耗值 (0.006 9) 高 23% 和 55%。结合图 1 和图 2 分析可知, 在 5086 铝合金母材中存在大量的位错和第二相颗粒, 在振动过程中诱发位错滑移, 发生位错阻尼。在低应变阶段, 位错线受到如合金中第二相和界面等强钉扎而无法脱钉, 表现为低阻尼特性; 随着应变增加, 合金中更多

的位错发生滑移运动, 使得合金的内耗值逐渐增大^[14,15]; 当应变值增加到一定程度 (0.06%) 后, 由于第二相颗粒的钉扎作用和位错互相缠结, 使得发生滑移的位错数量趋于稳定, 导致母材的内耗值无明显变化。FSP 试样基体中存在大量的小晶界, 且第二相颗粒较少, 减小了对晶界的钉扎作用, 更有利于晶界滑移。在较大的应变振动过程中, 部分小晶界发生滑移运动, 诱发晶界阻尼。随着应变增加, 合金中更多的小晶界发生滑移运动, 使得合金的内耗值逐渐增大。

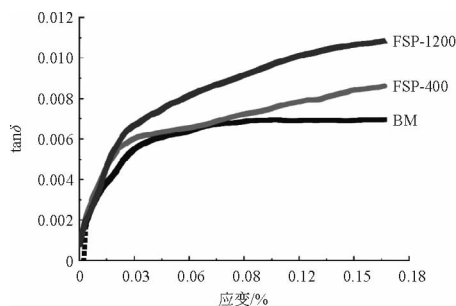
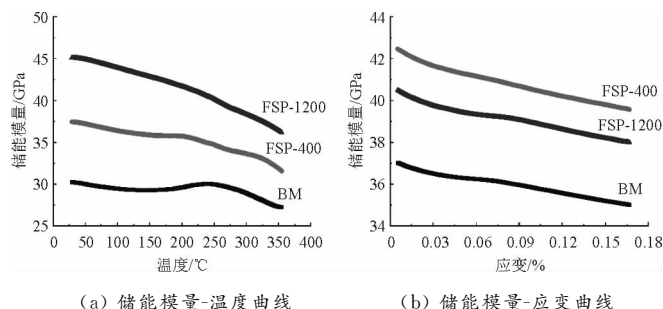


图 6 母材、FSP-400 和 FSP-1200 试样的内耗-应变曲线图
Fig.6 Internal friction-strain curves of BM, FSP-400 and FSP-1200 samples

2.4 5086 铝合金的储能模量

图 7 为母材、FSP-400 和 FSP-1200 试样的储能模量测试曲线, 其中图 7a 是在振动频率为 1 Hz、振幅为 10 μm 条件下的储能模量-温度曲线, 图 7b 是在振动频率为 1 Hz、温度为 28 ℃ 下的储能模量-应变曲线。由图 7 可知, 5086 铝合金储能模量分别随着温度和应变的升高而降低, 且 FSP 试样的储能模量明显高于母材。在 50 ℃ 时, FSP-1200 试样的储能模量为 45.096 GPa, 比母材储能模量 (30.226 GPa) 高 49%; 当应变值为 0.16% 时, FSP-400 试样的储能模量为 39.667 GPa, 比母材储能模量 (35.087 GPa) 高 13%。这是由于 FSP 试样中存在大量的晶界, 在振动形变过程中, 这些晶界的存在使得合金中的应变强烈地滞后于应力, 晶界处产生应力集中, 使得形变后残留内应力增加^[16], 有利于改善 5086 铝合金的储能模量。



(a) 储能模量-温度曲线 (b) 储能模量-应变曲线
图 7 母材、FSP-400 和 FSP-1200 试样的储能模量测试曲线图
Fig.7 Test curves of storage modulus of BM, FSP-400 and FSP-1200 samples

3 结 论

(1)经搅拌摩擦加工后 5086 铝合金的晶粒明显细化,且合金中第二相颗粒数量和位错密度明显降低;搅拌摩擦加工旋转速度越高,合金中第二相颗粒数量越少,而低转速搅拌摩擦加工更有利于细化晶粒。

(2)搅拌摩擦加工能有效地细化铝合金基体中的晶粒和第二相颗粒,降低基体中的应力集中,有利于改善铝合金的伸长率,经搅拌转速为 400 r/mm 加工试样的伸长率比母材提高了约 83%。

(3)5086 铝合金的内耗值均随着应变的增加而增大,且搅拌摩擦加工试样的阻尼性能明显优于母材;5086 铝合金内耗值随着温度的升高而增大,当温度高于 180 ℃时,经搅拌转速为 400 r/mm 加工试样的内耗值高于母材,但经搅拌转速为 1 200 r/mm 加工试样的内耗值却低于母材;在高温(180 ℃以上)振动条件下,经搅拌转速为 400 r/mm 加工试样中大量的细小晶界以及第二相与基体间的界面发生滑移,晶界和界面阻尼机制被激活,这两种阻尼机制的协同增强作用使其高温阻尼性能最好,而经搅拌转速为 1 200 r/mm 加工试样中只有极少量的第二相,界面阻尼贡献小,导致其高温阻尼性能低于母材。

(4)5086 铝合金的储能模量分别随着温度和应变的升高而降低,搅拌摩擦加工试样中存在大量的晶界,这些晶界处产生的应力集中,导致形变后合金的残留内应力增加,使得搅拌摩擦加工试样的储能模量明显高于母材。

参 考 文 献

[1] 景启明,何建贤,赵启忠,等. 5086 铝合金冷轧板的退火工艺研究[J]. 热加工工艺, 2018, 47(4): 242-244.

[2] 苑锡妮,杨兵,曾渝. 5XXX 系铝合金汽车板研究进展[J]. 轻合金加工技术, 2018, 46(6): 8-13.

[3] JIANG H J, ZHANG B, LIU C Y, et al. Mechanical and damping behavior of age-hardened and non-age-hardened Al alloys after friction stir processing[J]. Acta Metallurgica Sinica (English Letters), 2019, 32(9): 1 135-1 141.

[4] SRIKANTH N, CALVIN H K F, GUPTA M. Effect of length scale of alumina particles of different sizes on the damping characteristics of an Al-Mg alloy[J]. Materials Science and Engineering, 2006, A423(1): 189-191.

[5] ZHANG Y, MA N, LE Y. Mechanical properties and damping capacity after grain refinement in A356 alloy[J]. Materials Letters, 2005, 59(17): 2 174-2 177.

[6] JIANG H J, LIU C Y, ZHANG B, et al. Simultaneously improving mechanical properties and damping capacity of Al-Mg-Si alloy

through friction stir processing [J]. Materials Characterization, 2017, 131: 425-430.

[7] 薛鹏,张星星,吴利辉,等. 搅拌摩擦焊接与加工研究进展[J]. 金属学报, 2016, 52(10): 1 222-1 238.

[8] 杨振兴,江鸿杰,刘崇宇,等. 搅拌摩擦加工对 ZL108 合金结构及阻尼性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2018, 38(11): 1 257-1 261.

[9] MISHRA R S, MA Z Y. Friction stir welding and processing[J]. Materials Science and Engineering, 2005, R50: 1-78.

[10] ABOZEID E F. Mechanical and electrochemical characteristics of solutionized AA6061, AA6013 and AA5086 aluminum alloys[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2019, 8(2): 1 870-1 877.

[11] LIU J, YAO P, ZHAO N Q, et al. Effect of minor Sc and Zr on recrystallization behavior and mechanical properties of novel Al-Zn-Mg-Cu alloys[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2016, 657: 717-725.

[12] 马英义,宛亚坤,王景新. 6082 铝合金热轧工艺研究[J]. 轻合金加工技术, 2000, 28(6): 11-12.

[13] LIU C G, YU L M, MA Z Q, et al. Damping capacity of Al-12Si composites effected by negative thermal expansion of $Y_2W_3O_{12}$ particle inclusions[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2020, 9(5): 9 985-9 995.

[14] 刘刚,孙雅丽,胡津,等. Bi_2O_3 涂覆 $Al_{18}B_4O_{33}$ 晶须增强铝基复合材料的阻尼性能[J]. 金属学报, 2010, 46(8): 979-983.

[15] MA Z, HAN F, WEI J, et al. Effects of macroscopic defects on the damping behavior of aluminum and Zn-27Al alloy[J]. Metallurgical & Materials Transactions, 2001, A32(10): 2 657-2 661.

[16] 周高峰,江鸿杰,刘崇宇,等. 粉末冶金梯级烧结法制备多孔 Al-30Zn 合金及其阻尼性能[J]. 特种铸造及有色合金, 2019, 39(12): 111-114.

(编辑:栗万仲)

力劲发布 9 000 t 压铸机并签约瑞立

力劲 9000T 智能压铸单元全球发布会暨签约仪式,在力劲集团(宁波)压铸生产基地(宁波力劲科技有限公司)隆重举行。来自各级铸造及压铸行业协会、压铸企业、模具企业及媒体代表,共同见证了 9 000 t 超大型压铸机的全球发布、力劲集团 & 瑞立集团大型智能压铸单元签约仪式。同期,主办方还举办了“2021 宁波压铸产业发展高峰论坛”、“力劲宁波压铸机工厂开放日”活动。

力劲集团、瑞立集团、发那科三方相互签约仪式,在宁波力劲科技有限公司培训中心进行。其中,根据力劲集团与瑞立集团签署的战略合作协议,瑞立集团将引进 3 台套合模力分别为 6 800、8 000、9 000 t 的超大型压铸单元。

(摘自压铸周刊)