

基于搅拌摩擦加工的汽车钛合金 组织与性能研究

李莎莎¹, 王磊^{1*}, 吕欣蕊¹, 于丽丽²

(1. 沧州职业技术学院, 河北 沧州 061001; 2. 河北科技大学材料科学与工程学院, 河北 石家庄 050035)

摘 要:采用不同的主轴旋转速度和行进速度对铸态 Ti8LC 汽车钛合金进行了搅拌摩擦加工改性试验,并测试和对比分析了合金试样的显微组织和力学性能。结果表明,改性后合金内部晶粒明显细化、组织分布均匀性得到改善、力学性能显著提高。在轴肩下压量 0.2 mm 和主轴倾斜角度 2.5°不变的情况下,随主轴旋转速度从 200 r/min 增大到 400 r/min 或行进速度从 30 mm/s 加快到 90 mm/s,改性钛合金试样的晶粒先细化后粗化、力学性能先提高后下降。主轴旋转速度 300 r/min,行进速度 60 mm/s 时改性钛合金试样的力学性能最佳,抗拉强度和屈服强度分别为 1 046、729 MPa,延伸率为 12.7%;与铸态 Ti8LC 汽车钛合金相比,改性后试样的抗拉强度和屈服强度分别增大 118、125 MPa,其增幅分别达 12.7%、20.7%。

关键词:汽车钛合金; Ti8LC; 搅拌摩擦加工; 显微组织; 力学性能

中图分类号: TF823, TG146.2

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2022)03-0071-06

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2022.03.012

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



听语音
与作者
互动
聊科研

Study on the microstructure and mechanical properties of the automotive titanium alloy based on friction stir processing

Li Shasha¹, Wang Lei^{1*}, Lv Xinrui¹, Yu Lili²

(1. Cangzhou Technical College, Cangzhou 061001, Hebei, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050035, Hebei, China)

Abstract: In this investigation, the friction stir processing (FSP) method was used to modify the surface layer of an as-cast Ti8LC automotive titanium alloy using different spindle rotation speeds and travel speeds. In addition, the microstructure and mechanical properties of the alloy samples were tested and compared. The results show that the internal grains of the alloy are refined, and the uniformity of microstructure distribution and the mechanical properties are improved after FSP modification. When the shoulder depression is 0.2 mm, and the spindle inclination angle is 2.5°, the spindle rotation speed increases from 200 r/min to 400 r/min or travel speed from 30 mm/s to 90 mm/s. Meanwhile, the grains of FSP alloy samples are refined first and then coarsened, and the mechanical properties are improved first and then decreased. The best mechanical properties of the modified alloy samples can be obtained with the spindle rotation speed of 300 r/min and the travel speed of 60 mm/s. The tensile strength, yield strength and elongation are 1 046, 729 MPa and 12.7%, respectively. Compared with the as-cast Ti8LC

收稿日期: 2021-12-22

基金项目: 河北省自然科学基金资助项目(A2012209030)。

作者简介: 李莎莎(1988—), 女, 汉族, 河北沧州人, 硕士, 讲师, 主要从事汽车机械类、汽车电控类研究, E-mail: louzifan560975127@163.com; *通讯作者: 王磊(1987—), 女, 汉族, 河北沧州人, 硕士, 讲师, 主要从事材料科学类、汽车机械类、汽车服务类研究, E-mail: MoLiMoLi2017@163.com。

automotive titanium alloy, the tensile strength and yield strength of FSP modified alloy samples are increased by 118 MPa and 125 MPa (with a 12.7% and 20.7% amplitude), respectively.

Key words: automotive titanium alloy, Ti8LC, friction stir processing (FSP), microstructure, mechanical property

0 引言

钛合金的轻质、高强等特性吸引了汽车制造商的兴趣,也吸引了众多科研工作者的研究兴趣^[1-2]。孙凤等^[3]进行了钒微合金化汽车钛合金的轧制工艺优化。甘伟等^[4]探讨和分析了锻造温度对汽车用新型钛合金性能的影响。宋伟^[5]优化了汽车钛合金气阀的铸造工艺。王洪广^[6]分析了锻造温度对新型含铌汽车钛合金棒材性能的影响规律。张慧芳^[7]研究了汽车用钛合金表面双辉等离子 Mo 合金化层的制备及其摩擦磨损性能。任丽宏和徐英^[8]研究和分析了钛合金 3D 打印技术在汽车发动机零部件制作中的应用。我们都知道, Ti-6Al-4V 是应用最为广泛的钛合金。随着汽车工业对材料成本和性能要求的不断提高,市场迫切需要开发不含价格昂的贵合金元素的高性能、低成本钛合金。Ti8LC(Ti-6Al-2Mo-1.5Fe)合金是近年来新开发的一种低成本钛合金^[9],有望在汽车工业得到广泛应用,但其力学性能还不

够理想。搅拌摩擦加工(Friction Stir Processing,简称 FSP)是金属材料改性的有效途径。吕玉廷等^[10]分析了搅拌摩擦加工工具对镍铝青铜合金显微组织和机械性能的影响。史清宇等^[11]探讨了 FSP 制备碳纤维增强铝基复合材料的强韧化机理。王赛香和张大童^[12]分析了搅拌摩擦加工 MB8 镁合金的组织与力学性能分析。但目前还鲜见 FSP 改性钛合金的报道。为此,笔者尝试采用 FSP 方法对 Ti8LC 汽车钛合金进行改性试验,研究搅拌摩擦加工改性对 Ti8LC 汽车钛合金组织和力学性能的影响。

1 试验材料和方法

以海绵钛、Al-Mo 中间合金和 Fe-Mo 中间合金为原料,在真空自耗电弧炉中熔炼出合金铸锭,去除表面氧化物后得到方形铸态 Ti8LC 汽车钛合金试样,尺寸 100 mm×100 mm×200 mm,再切割成厚度为 5 mm 的合金试样。Ti8LC 汽车钛合金试样的化学成分如表 1 所示。

表 1 Ti8LC 合金试样化学成分
Table 1 Chemical composition of the Ti8LC alloy specimen

Al	Mo	Fe	C	N	H	O	其它杂质元素	Ti
5.958	2.016	1.492	0.022	0.015	0.011	0.106	<0.150	余量

在搅拌摩擦加工/焊接设备上进行铸态 Ti8LC 汽车钛合金试样的 FSP 改性试验,采用同行环结构的搅拌头,搅拌头针长 4.7 mm,轴肩直径 18 mm。由于钛合金 FSP 试验中,主轴旋转速度和行进速度

是极其重要的工艺参数,故设定轴肩下压量和主轴倾斜角度等工艺参数不变的情况下,改变主轴旋转速度和行进速度。Ti8LC 汽车钛合金试样采用的 FSP 工艺参数,如表 2 所示。

表 2 合金试样 FSP 工艺参数
Table 2 FSP Process parameters of the alloy specimen

试样编号	主轴旋转速度/(r·min ⁻¹)	行进速度/(mm·s ⁻¹)	轴肩下压量/mm	主轴倾斜角度/(°)
FSP1 [#]	200	60	0.2	2.5
FSP2 [#]	300	60	0.2	2.5
FSP3 [#]	400	60	0.2	2.5
FSP4 [#]	300	30	0.2	2.5
FSP5 [#]	300	90	0.2	2.5

用线切割方法切取金相试样,经磨制和抛光后采用如表 3 所示的金相腐蚀液,并在 PG18 型金相

显微镜下观察试样的显微组织。室温条件下,在 WE-300D 型液压万能试验机上进行试样的拉伸试

验,拉伸速度为 1 mm/min,并在 JSM6510 型扫描电子显微镜下观察试样的拉伸断口形貌。

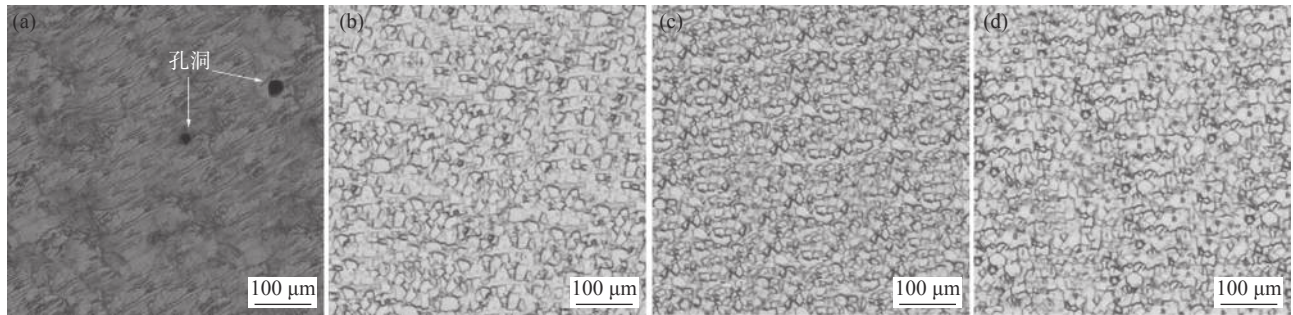
表3 金相腐蚀液组成

Table 3 Ratio of the metallographic corrosion agent mL			
氢氟酸	硝酸	无水乙醇	去离子水
15	10	20	105

2 试验结果

2.1 显微组织

铸态 Ti8LC 汽车钛合金试样(简称为铸态试样)和 FSP 改性 Ti8LC 汽车钛合金试样(试样编号分别为: FSP1[#]、FSP2[#]、FSP3[#],下同)的显微组织如图 1



(a) 铸态试样; (b) FSP1[#]试样; (c) FSP2[#]试样; (d) FSP3[#]试样

图1 合金试样显微组织

Fig. 1 Microstructures of the alloy specimens

在主轴旋转速度 300 r/min、轴肩下压量 0.2 mm 和主轴倾斜角度 2.5°等工艺参数不变的情况下,不同行进速度 FSP 改性 Ti8LC 汽车钛合金试样的显微组织如图 2 所示。从图 2 可以看出,主轴行进速度对 FSP 合金试样的显微组织也产生明显影响。行进速度 30 mm/s 时,合金试样内部未见明显孔洞等缺陷,晶粒较为粗大、组织分布均匀性较差;当行进速度加快到 60 mm/s 时,合金试样内部也

所示。从图 1 可以看出,铸态合金试样由层状 α 相和少量 β 相组成,组织较为粗大,并伴有少量孔洞。与铸态试样相比,FSP 改性后合金内部晶粒明显细化,呈现为等轴晶粒,组织分布均匀性得到明显改善,未见明显的内部孔洞。此外,从图 1 还可以看出,主轴旋转速度对 FSP 合金试样的显微组织产生明显影响。在行进速度 60 mm/s、轴肩下压量 0.2 mm 和主轴倾斜角度 2.5°等工艺参数不变的情况下,随主轴旋转速度从 200 r/min 增大到 400 r/min 时,合金试样内部晶粒先细化后粗化。当主轴旋转速度为 300 r/min 时,合金试样的晶粒最细小、组织分布最均匀。

未见明显孔洞等缺陷,晶粒明显细化、组织分布均匀性较佳;当行进速度进一步加快到 90 mm/s 时,合金试样内部出现明显的孔洞缺陷,晶粒大小不一、组织分布均匀性较差。由此可以看出,在主轴旋转速度 300 r/min、轴肩下压量 0.2 mm 和主轴倾斜角度 2.5°等工艺参数不变的情况下,行进速度 60 mm/s 时合金试样内部无缺陷、晶粒最细小、组织分布最均匀。



(a) 30 mm/s (FSP4[#]试样)

(b) 60 mm/s (FSP2[#]试样)

(c) 90 mm/s (FSP5[#]试样)

图2 不同行进速度 FSP 改性合金试样显微组织

Fig. 2 Microstructures of the alloy specimens by FSP with different travel speeds

2.2 力学性能

铸态 Ti8LC 汽车钛合金试样(简称为铸态试样)和 FSP 改性 Ti8LC 汽车钛合金试样的室温力学性能测试结果如图 3 所示。从图 3 可以看出,与铸态试样相比,FSP 改性后试样的抗拉强度和屈服强度得到明显提高,断后伸长率在较小范围内变化,FSP 使合金试样的力学性能得到明显改善。此外,从图 3 还可以看出,主轴旋转速度对 FSP 合金试样的室温力学性能产生显著影响。在行进速度 60 mm/s、轴肩下压量 0.2 mm 和主轴倾斜角度 2.5°等工艺参数不变的情况下,随主轴旋转速度从 200 r/min 增大到 400 r/min 时,合金试样的抗拉强度和屈服强度呈现出明显的先增加后减小的变化趋势,断后伸长率则在较小范围内先增加后减小。当主轴旋转速度为 300 r/min 时,合金试样(FSP2#试样)的抗拉强度和屈服强度达到最大值,分别较铸态试样增大 118、125 MPa,增幅分别为 12.7%、20.7%。由此可以看出,FSP 是 Ti8LC 汽车钛合金试样力学性能改善的一种有效途径。选择合适的主轴旋转速度,可以使合金试样的力学性能得到显著改善。

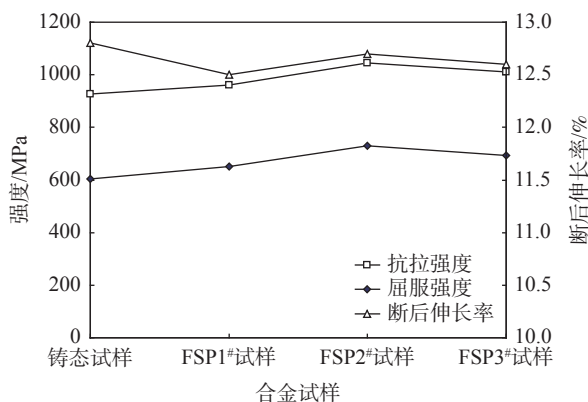


图 3 不同主轴转速下合金试样力学性能测试结果

Fig. 3 Tensile properties of the alloy specimens at different spindle rotation speeds

在主轴旋转速度 300 r/min、轴肩下压量 0.2 mm 和主轴倾斜角度 2.5°等工艺参数不变的情况下,不同行进速度 FSP 改性 Ti8LC 汽车钛合金试样力学性能测试结果如图 4 所示。从图 4 可以看出,行进速度对 FSP 合金试样力学性能也产生明显影响。随行进速度从 30 mm/s 加快到 90 mm/s,合金试样抗拉强度和屈服强度先提高后下降,断后伸长率在较小范围内先减小后增大,试样力学性能先提高后下降。当行进速度 60 mm/s 时,合金试样的抗拉强度和屈服强度达到最大值,分别为 1 046、

729 MPa,延伸率为 12.7%。当行进速度 90 mm/s 时,合金试样抗拉强度和屈服强度最低,试样力学性能最差,这主要是因为该参数下试样内部存在明显的孔洞缺陷,晶粒大小不一、组织分布均匀性较差。由此可以看出,行进速度不宜过高也不宜过低。

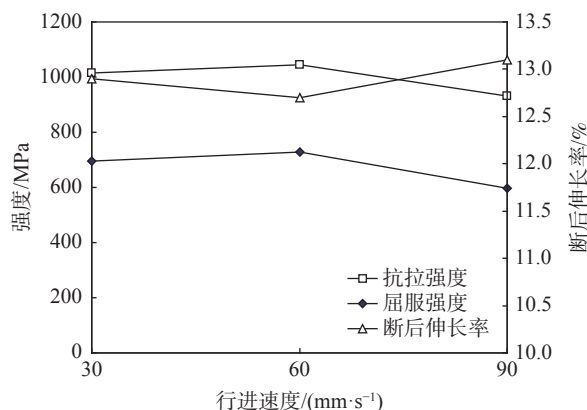


图 4 不同行进速度 FSP 改性合金试样力学性能

Fig. 4 Tensile properties of the alloy specimens by FSP at different travel speeds

2.3 拉伸断口组织

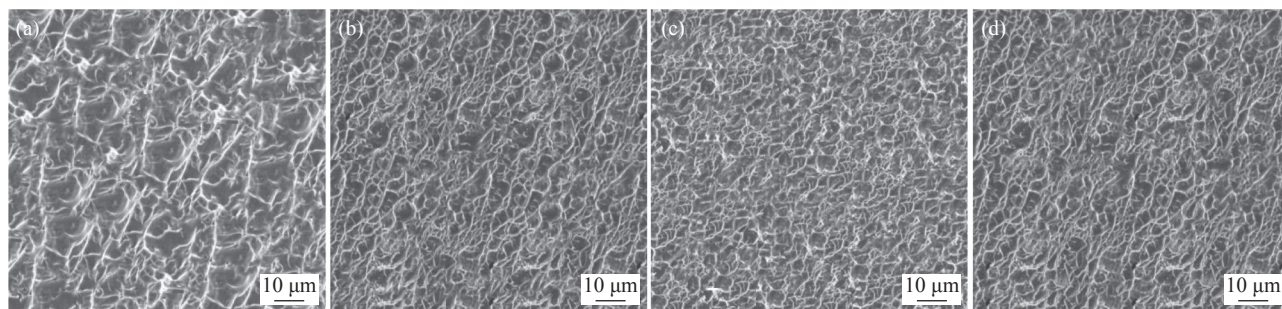
铸态 Ti8LC 汽车钛合金试样(简称为铸态试样)和 FSP 改性 Ti8LC 汽车钛合金试样的拉伸断口 SEM(扫描电子显微镜)形貌如图 5 所示。从图 5 可以看出,与铸态合金试样相比,FSP 合金试样的拉伸断口中韧窝更细小、更密集,展现出更好的力学性能。此外,从图 4 可以看出,主轴旋转速度对 FSP 合金试样的拉伸断口形貌影响较小,在行进速度 60 mm/s、轴肩下压量 0.2 mm 和主轴倾斜角度 2.5°等工艺参数不变的情况下,主轴旋转速度 300 r/min 时,合金试样拉伸断口形貌中的韧窝最为细小、最密集;主轴旋转速度 200 r/min 和 400 r/min 时,合金试样的拉伸断口形貌未有明显的差异。所有 FSP 试样拉伸断口都是由众多细小、密集的韧窝以及少量的撕裂棱组成,都呈现出较为明显的韧性断裂特征。

3 讨论与分析

FSP(搅拌摩擦加工)是金属材料改性的一种有效途径。它是基于非自耗搅拌头的高速旋转并行进,在摩擦生热和塑性挤压的联合作用下,使金属材料发生塑性流动,在其内部发生动态再结晶,从而使得铸态 Ti8LC 汽车钛合金试样内部的粗大晶粒发生破碎,再结晶,得到细小的等轴晶粒;此外,由于材料内部的塑性流动,使得铸态合金试样原有的孔洞等缺陷得到弥补,从而获得晶粒细小、组织分布均匀、

无孔洞等缺陷的 FSP 合金试样。在细晶强化作用下, FSP 合金试样的力学性能得到明显改善。所以,

FSP 改性是低成本 Ti8LC 汽车钛合金获得高性能的一种有效途径。



(a) 铸态试样; (b) FSP1[#]试样; (c) FSP2[#]试样; (d) FSP3[#]试样

图5 合金试样拉伸断口 SEM 形貌

Fig. 5 SEM images of the fracture surfaces of the alloy specimens

在 FSP 改性过程中, 主轴旋转速度和行进速度是极其重要的两个工艺参数。在轴肩下压量和主轴倾斜角度等工艺参数不变的情况下, 主轴旋转速度和行进速度共同决定着 FSP 过程中热量产生的多少。当主轴旋转速度过低、行进速度过快时, 合金试样在 FSP 过程中难以产生充足的热量, 从而导致合金内部晶粒难以发生充分的动态再结晶, 难以获得晶粒细小、组织分布均匀的 FSP 合金试样; 当增大主轴旋转速度或降低行进速度, 合金试样在 FSP 过程中产生充足的热量, 合金内部晶粒发生明显的动态再结晶, 从而获得内部晶粒细小、组织分布均匀的 FSP 合金试样, 显著改善合金试样的力学性能; 但是, 过大的主轴旋转速度或过低行进速度将导致合金试样在 FSP 过程中产生过多的热量, 多余的热量将导致内部晶粒发生粗化, 从而降低合金试样的力学性能^[1]。因此, 在 Ti8LC 汽车钛合金试样 FSP 改性过程中, 需要选择合适的主轴旋转速度和行进速度。只有当主轴旋转速度和行进速度选择合理时, 才能明显细化 Ti8LC 汽车钛合金的内部晶粒, 改善内部组织, 明显提高其力学性能。

4 结论

1) FSP(搅拌摩擦加工)是提高铸态 Ti8LC 汽车钛合金力学性能的有效途径。FSP 改性后合金内部晶粒明显细化、组织分布均匀性得到改善、力学性能明显提高。

2) 主轴旋转速度和行进速度是 Ti8LC 汽车钛合金 FSP 改性的重要工艺参数, 随主轴旋转速度从 200 r/min 增大到 400 r/min 时, 合金试样的晶粒先细化后粗化、抗拉强度和屈服强度表现出明显的先增加后减小变化趋势、断后伸长率则在较小范围内先增加后减小。行进速度对其影响与之类似。

3) 采用行进速度 60 mm/s、轴肩下压量 0.2 mm、主轴倾斜角度 2.5°和主轴旋转速度 300 r/min 对 Ti8LC 进行 FSP 改性后, 可获得试验范围内最佳的力学性能, 合金试样的抗拉强度、屈服强度和延伸率分别为 1 046、729 MPa、12.7%, 与铸态 Ti8LC 汽车钛合金相比, 试样的抗拉强度和屈服强度分别增大 118、125 MPa, 其增幅分别达 12.7%、20.7%。

参考文献

- [1] Zhang Yan, Pang Youjun, Li Yang. Titanium alloy and automobile lightweight technology[J]. Auto Time, 2019, (19): 12-14. (张妍, 庞有俊, 李杨. 钛合金与汽车轻量化技术[J]. 时代汽车, 2019, (19): 12-14.)
- [2] Chen Zhenglong, Yang Xiao. Application of titanium alloy in modern automobile industry[J]. Modern Components, 2017, (9): 46-47. (陈政龙, 杨晓. 钛合金在现代汽车工业中的应用[J]. 汽车工艺师, 2017, (9): 46-47.)
- [3] Sun Feng, Yin Xiaoli, Zhao Da. Rolling process optimization of vanadium microalloyed automobile titanium alloy[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2020, 41(3): 59-63.

- (孙凤, 尹晓丽, 赵达. 钒微合金化汽车钛合金的轧制工艺优化[J]. [钢铁钒钛](#), 2020, 41(3): 59–63.)
- [4] Gan Wei, Xiang Junfeng, Huang Fang. Effect of forging temperature on properties of new titanium alloys for automobiles[J]. *Ordinance Material Science and Engineering*, 2019, 42(5): 70–73.
(甘伟, 项俊峰, 黄芳. 锻造温度对汽车用新型钛合金性能的影响[J]. *兵器材料科学与工程*, 2019, 42(5): 70–73.)
- [5] Song Wei. Optimization of casting process for automobile titanium alloy air valves[J]. *Hot Working Technology*, 2018, 47(7): 102–104, 111.
(宋伟. 汽车钛合金气阀的铸造工艺优化[J]. *热加工工艺*, 2018, 47(7): 102–104, 111.)
- [6] Wang Hongguang. Influence of forging temperature on performance of a new type niobium-containing titanium alloy bar used in car[J]. *Forging & Stamping Technology*, 2018, 43(8): 13–16.
(王洪广. 锻造温度对新型含铌汽车钛合金棒材性能的影响[J]. *锻压技术*, 2018, 43(8): 13–16.)
- [7] Zhang Huifang. Preparation of Mo alloy coating on titanium alloy used in cars by double glow plasma alloying process and its friction and wear performance[J]. *Materials Protection*, 2017, 50(6): 88–90.
(张慧芳. 汽车用钛合金表面双辉等离子Mo合金化层的制备及其摩擦磨损性能[J]. *材料保护*, 2017, 50(6): 88–90.)
- [8] Ren Lihong, Xu Ying. Application of titanium alloy 3D printing technology in automobile engine parts manufacturing[J]. *Internal Combustion Engine & Parts*, 2021, (2): 213–214.
(任丽宏, 徐英. 钛合金3D打印技术在汽车发动机零部件制作中的应用[J]. *内燃机与配件*, 2021, (2): 213–214.)
- [9] Jia Weiju, Zeng Weidong, Duan Fengchuan, *et al.* Study on fatigue crack propagation behavior of low cost titanium alloy Ti8LC[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2009, 38(12): 2171–2174.
(贾蔚菊, 曾卫东, 段凤川, 等. Ti8LC低成本钛合金疲劳裂纹扩展行为研究[J]. *稀有金属材料与工程*, 2009, 38(12): 2171–2174.)
- [10] Lv Yuting, Nie Bin, Liu Guohao, *et al.* Effect of friction stir processing (FSP) tool on microstructures and mechanical properties of NiAl bronze alloy[J]. *Surface Technology*, 2019, 48(12): 102–107.
(吕玉廷, 聂彬, 刘国浩, 等. 搅拌摩擦加工工具对镍铝青铜合金显微组织和机械性能的影响[J]. *表面技术*, 2019, 48(12): 102–107.)
- [11] Shi Qingyu, Cao Xiong, Li Jiyan, *et al.* Improved mechanical properties in friction stir processed carbon fiber reinforced aluminum composites[J]. *Journal of Tsinghua University(Science and Technology)*, 2017, 57(8): 792–797.
(史清宇, 曹雄, 李积元, 等. FSP制备碳纤维增强铝基复合材料的强化机理[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2017, 57(8): 792–797.)
- [12] Wang Saixiang, Zhang Datong. Microstructure and mechanical properties of frictional stirring processed (FSP) MB8 magnesium alloy[J]. *Special Casting & Nonferrous Alloys*, 2011, 31(1): 83–86.
(王赛香, 张大童. 搅拌摩擦加工MB8镁合金的组织与力学性能分析[J]. *特种铸造及有色合金*, 2011, 31(1): 83–86.)

编辑 杨冬梅

国内首炉转子级海绵钛成功出炉

2022 年 5 月 15 日, 龙佰集团云南国钛公司顺利产出第一炉转子级海绵钛, 标志着龙佰集团转子级海绵钛生产线建设取得成功, 这是该集团乃至中国首炉可达到转子级标准的海绵钛, 破解了国内转子级海绵钛生产的“卡脖子”难题。

龙佰集团首炉转子级海绵钛的产出, 对促进企业乃至中国经济高质量发展意义重大。此举不仅较好实现 3 万 t/年转子级海绵钛生产目标由‘从无到有’向‘从有到多、从有到优’的转变, 为企业打造高端海绵钛生产基地开了好头, 而且将填补国内高端海绵钛的空白, 为下游客户提供优质产品。

摘自 <http://www.billionschem.com/newsinfo/10911/53753>