

# 超细晶建筑装饰铝合金的摩擦磨损性能研究

周 佳

(马鞍山师范高等专科学校 艺术设计系,安徽 马鞍山 243000)

**摘要:**采用 X 射线衍射仪、摩擦磨损试验机和扫描电镜等手段,测试分析了固溶态、T6 态和 ECAP 时效态 6063 铝合金的物相组成、显微组织和摩擦磨损性能。结果表明,固溶态、T6 态和 ECAP 时效态 6063 铝合金的主要物相都为  $\alpha$ -Al 相、 $\beta$ -Mg<sub>2</sub>Si 相、 $\beta'$ -Mg<sub>1.7</sub>Si 相和  $\beta''$ -Mg<sub>5</sub>Si<sub>6</sub> 相,但是 ECAP 时效态 6063 铝合金的  $\beta$  相、 $\beta'$  相和  $\beta''$  相的衍射峰更强;相同载荷下,平均摩擦系数和磨损率从大至小的顺序为固溶态 > T6 态 > ECAP 时效态,即 ECAP 时效态 6063 铝合金具有相对较低的摩擦系数和更好的耐磨性,这主要与 ECAP 时效处理可以起到细晶强化和弥散强化作用有关。

**关键词:**6063 铝合金;固溶态;T6 态;ECAP 态;摩擦磨损性能

**中图分类号:**TG146.2;TG115 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-349X(2021)03-0015-07

**DOI:**10.16160/j.cnki.tsxyxb.2021.03.004

## Study on the Friction and Wear Properties of Ultrafine Grain Aluminum Alloy for Architectural Decoration

ZHOU Jia

(Department of Art and Design, Ma'anshan Teacher's College, Ma'anshan 243000, China)

**Abstract:** By means of X-ray diffractometer, friction and wear testing machine and scanning electron microscope, the phase composition, microstructure, and friction and wear properties of 6063 aluminum alloy are tested and analyzed in solution state, T6 state and ECAP aging state. The results show that the main phases of 6063 aluminum alloy in the above three states are all  $\alpha$ -Al phase,  $\beta$ -Mg<sub>2</sub>Si phase,  $\beta'$ -Mg<sub>1.7</sub>Si phase and  $\beta''$ -Mg<sub>5</sub>Si<sub>6</sub> phase, but the diffraction peaks of  $\beta$  phase,  $\beta'$  phase and  $\beta''$  phase are stronger in ECAP aging state 6063 aluminum alloy; The order of the average friction coefficient and wear rate from large to small under the same load is: solution state > T6 state > ECAP aging state. That is to say, ECAP aging state 6063 aluminum alloy has relatively lower friction coefficient and better wear resistance, which is mainly related with the strengthening effect of ECAP aging treatment on fine grain and dispersion.

**Key Words:** 6063 aluminum alloy; solution state; T6 state; ECAP state; friction and wear properties

我国城镇化和工业化的快速推进,给建筑铝型材行业带来了巨大发展机遇,我国已经成  
为世界上最大的铝型材生产基地和消费市场。目前,由建筑铝型材制作的框、扇结构的门窗已

**基金项目:**安徽省教育科学基金项目(2019xqsxzx05;2019xqsxzx06)

**作者简介:**周佳(1982—),男,江苏南通人,讲师,博士,主要从事环境材料研究。

经被广泛使用<sup>[1]</sup>,这主要与其具有密度低(约为钢、铜或黄铜密度的 1/3)、比强度高、耐腐蚀好、装饰性好和使用寿命长等优点有关<sup>[2-3]</sup>。然而,与 7000 系等铝合金相比,主要用作建筑铝型材的 6000 系铝合金的强度和耐磨性等还需要进一步提升,目前通过微合金化、固溶时效热处理和大塑性变形等技术改善可时效强化型 6000 系铝合金强塑性的研究很多<sup>[4-7]</sup>,但是对作为建筑铝型材重要考核指标的摩擦磨损性能方面的研究还相对较少,因此,在等通道转角挤压(ECAP)等大塑性变形技术可有效提升材料强塑性的基础上,进一步研究此技术对建筑铝型材耐磨性能的影响以及考察磨损机制具有重要意义。

### 1 材料与方法

试验材料为由西南铝业(集团)有限责任公司提供的热挤压建筑装饰用 6063 铝合金棒材(Φ22 mm),具体化学成分如表 1 所示。

表 1 6063 铝合金的化学成分 (wt%)

元素	Mg	Si	Cu	Cr	Mn	Fe	Zn	Ti	Al
含量/%	0.62	0.45	0.08	0.05	0.09	0.17	0.04	0.05	余量

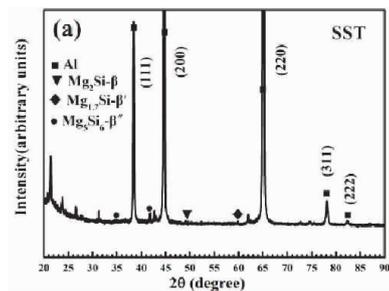
将 6063 铝合金圆棒试样加工成 20 mm×20 mm×100 mm 的试样,在 Nabertherm LV 15/11/P330 型热处理炉中对其进行 555 °C 保温 1.5 h 的固溶处理,并水淬至室温,得到固溶态 6063 铝合金(记为 SST);固溶处理后继续对试样进行 170 °C 保温 3 h 的时效处理,并水淬至室温,得到 T6 态 6063 铝合金(记为 T6);对固溶处理后的试样按 Bc 路径进行 4 道次等通道转角挤压变形(ECAP)处理,模具预热温度为 110 °C,第一次挤压前保温时间为 8 min,挤压速度为 4 mm/s,两通道内交角和外接弧角分别为 90°和 20.6°,然后进行 170 °C 保温 3 h 的时效处理,并水淬至室温,得到等通道转角挤压+动态时效的 6063 铝合金(记为 ECAPed at 110 °C,简称 ECAP 时效态)。

采用帕纳科 Empyrean 锐影 X 射线衍射仪对不同状态 6063 铝合金进行 X 射线衍射分析,Cu 靶 Ka 辐射,扫描速率为 5°/min;室温摩擦磨损试验在 UMT-2 型多功能摩擦磨损试验

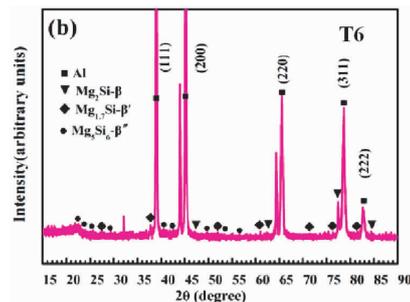
机上进行,对磨材料为 Φ4 mm 的 440-C 钢球,载荷介于 5~25 N,滑动速度和时间分别为 0.02 m/s 和 20 min;磨损失重采用 GH-202 型电子天平进行称量,并以 3 组试样的平均值计算磨损率;采用 SuperView W1 型光学 3D 表面轮廓仪对磨损表面进行尺寸测定;采用 JSM-7100F 型场发射扫描电镜观察磨损形貌,并采用附带能谱分析仪对微区成分进行测试。

### 2 试验结果与分析

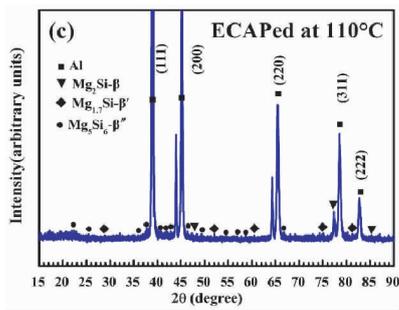
图 1 为不同状态 6063 铝合金的 X 射线衍射分析结果。固溶态、T6 态和 ECAP 时效态 6063 铝合金的主要物相都为 α-Al 相、β-Mg<sub>2</sub>Si 相、β'-Mg<sub>1.7</sub>Si 相和 β''-Mg<sub>5</sub>Si<sub>6</sub> 相,但是 T6 态和 ECAP 时效态 6063 铝合金的(200)(220)和(311)晶面附近都出现了相对比固溶态试样更强的卫星峰<sup>[8]</sup>,且 β-Mg<sub>2</sub>Si 相、β'-Mg<sub>1.7</sub>Si 相和 β''-Mg<sub>5</sub>Si<sub>6</sub> 相的衍射峰更强。固溶态试样的衍射峰已经出现了少量 β 相、β'相和 β''相,这主要是因为热挤压态 6063 铝合金中的这些析出相在固溶处理后并未完全回溶<sup>[9]</sup>,而时效或 ECAP 时效处理后,过饱和 6063 铝合金中会有大量析出相产生,且 ECAP 时效态 6063 铝合金中的 β''相衍射峰最强,相对含量更高<sup>[10]</sup>。



(a) 固溶态



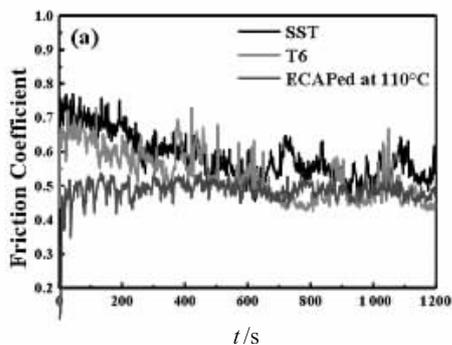
(b) T6 态



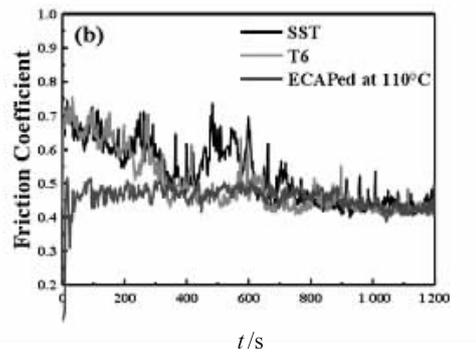
(c) ECAP 时效态

图 1 不同状态 6063 铝合金的 XRD 图谱

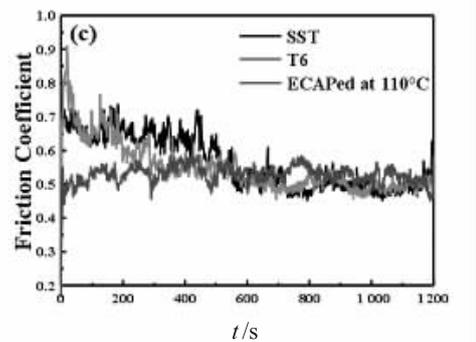
图 2 为不同状态 6063 铝合金的摩擦系数曲线,载荷分别为 5 N,10 N,20 N 和 25 N。对比分析可知,不同载荷下固溶态和 T6 态 6063 铝合金的摩擦系数曲线相似,都表现为初始阶段摩擦系数迅速上升,之后有一定程度波动并在时间达到 600 s 附近时趋于稳定,这主要是由于刚开始摩擦磨损时的摩擦副需要承受较大切向力,从而导致摩擦系数升高<sup>[11]</sup>,在随后当 6063 铝合金试样表面磨平,摩擦系数会有一定程度降低,这个阶段称为跑合阶段;相较而言,ECAP 时效态 6063 铝合金的摩擦系数曲线则表现出明显不同的特征,初始摩擦磨损阶段的摩擦系数虽也会迅速上升,但是上升幅度明显小于其他两种状态,且跑合阶段的波动幅度较小,基本在 100 s 附近时已经处于较为稳定的状态。可见,固溶态和 T6 态 6063 铝合金从跑合阶段到稳定阶段的时间明显大于 ECAP 时效态,这主要与前两者在摩擦磨损时需要克服的最大静摩擦力更大有关<sup>[12]</sup>。



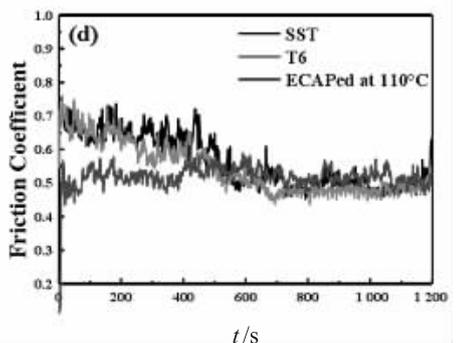
(a) 5 N



(b) 10 N



(c) 20 N



(d) 25 N

图 2 不同状态 6063 铝合金的摩擦系数曲线

图 3 为不同状态 6063 铝合金的平均摩擦系数测试结果。在相同状态下,随着载荷从 5 N 增加至 25 N,6063 铝合金的平均摩擦系数呈现先减小而后增大的特征,载荷 10 N 时的平均摩擦系数相对较小。这主要是因为较低载荷下(5 N)6063 铝合金表面的致密氧化膜还没有形成,载荷 10 N 时 6063 铝合金表面的摩擦温度升高并形成致密氧化膜,可以起到一定程度的减摩作用<sup>[13]</sup>,而较大载荷下(>20 N),摩擦力对摩擦系数的影响大于氧化膜,所以平均摩

擦系数又呈现上升趋势。在相同载荷下,平均摩擦系数从大至小的顺序为固溶态>T6 态>ECAP 时效态;T6 态 6063 铝合金的平均摩擦系数小于固溶态,这主要与时效后合金中析出了起强化作用的第二相有关<sup>[14]</sup>,而 ECAP 时效态 6063 铝合金摩擦系数的减小除与起强化作用的第二相大量析出有关外,还与此时合金具有更小的晶粒尺寸有关<sup>[8]</sup>。

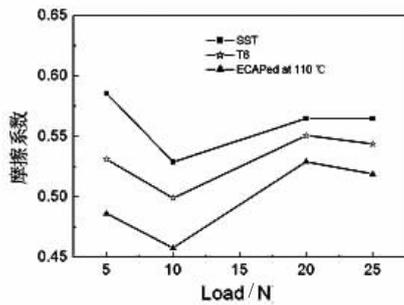


图 3 不同状态 6063 铝合金的平均摩擦系数

图 4 为不同状态 6063 铝合金的磨损率测试结果。对比分析可知,随着载荷从 5 N 增加至 25 N,固溶态、T6 态和 ECAP 时效态 6063 铝合金的磨损率都呈现为逐渐增大的趋势,且相同载荷下,磨损率从大至小的顺序为固溶态>T6 态>ECAP 时效态。磨损率的测试结果与平均摩擦系数的测试结果相吻合,即 ECAP 时效态 6063 铝合金具有相对较低的摩擦系数和更好的耐磨性。

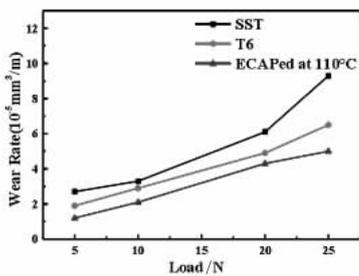
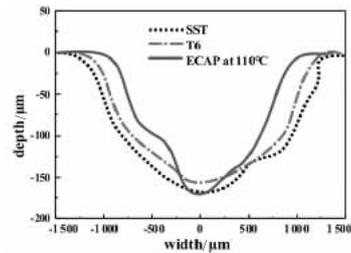


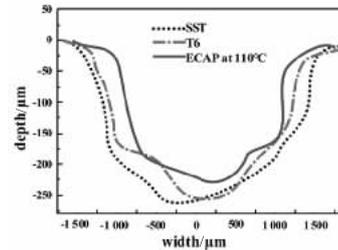
图 4 不同状态 6063 铝合金的磨损率

图 5 为不同状态 6063 铝合金的磨痕横截面形貌,载荷分别为 10 N 和 25 N,表 2 列出了这两种载荷下的磨痕尺寸测量结果。当载荷为 10 N 时,磨痕宽度从高至低的顺序为固溶态>T6 态>ECAP 时效态,而 ECAP 时效态的磨损深度则相对略大,这可能与摩擦磨损过程中磨

屑对 6063 铝合金表面产生了局部刮擦有关<sup>[15]</sup>,整体而言,ECAP 态 6063 铝合金的磨损体积最小,其次为 T6 态 6063 铝合金。当载荷为 25 N 时,磨痕宽度和磨痕深度从高至低的顺序为固溶态>T6 态>ECAP 时效态,ECAP 时效态 6063 铝合金的磨损体积在 3 种合金中是最小的。可见,载荷为 10 N 和 25 N 时,ECAP 时效态 6063 铝合金相较固溶态和时效态 6063 铝合金有更好的耐磨性能。



(a) 10 N



(b) 25 N

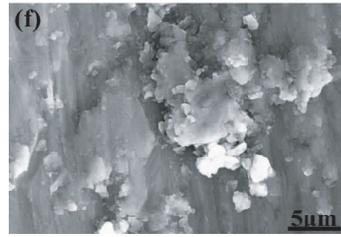
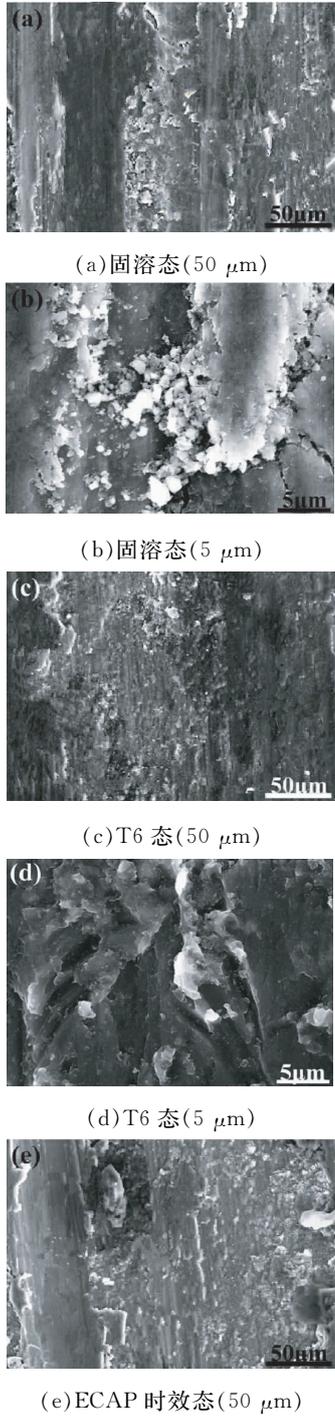
图 5 不同载荷作用时 6063 合金的磨痕横截面形貌

表 2 不同状态 6063 铝合金的磨痕尺寸测试结果

载荷/N	磨痕参数/ $\mu\text{m}$	固溶态	T6 态	ECAP 时效态
10	宽度	2 610	2 574	2 166
	深度	177	166	178
25	宽度	3 389	3 386	2 807
	深度	261	259	245

图 6 为不同状态 6063 铝合金的表面磨损形貌,载荷为 25 N。固溶态 6063 铝合金表面可见明显撕裂、犁沟以及氧化膜破裂而产生的磨屑颗粒(图 6a,图 6b),磨损机制主要为疲劳磨损+黏着磨损+氧化磨损;T6 态和 ECAP 时效态 6063 铝合金表面都可见磨屑颗粒、局部剥层以及黏着现象,磨损机制主要为黏着磨损+少量剥层磨损+少量磨粒磨损+少量氧化磨损,且相对而言,T6 态 6063 铝合金的黏着磨

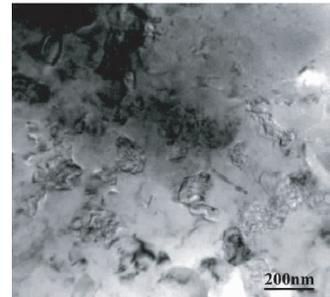
损相较 ECAP 时效态更加严重。对固溶态、T6 态和 ECAP 时效态 6063 铝合金磨损表面进行能谱分析,结果显示,3 种状态的 6063 铝合金其表面氧含量(质量分数)分别为 30.75%, 28.80%和 14.00%,由此可见,ECAP 时效态 6063 铝合金相较固溶态和 T6 态 6063 铝合金具有更好的抗氧化性能。



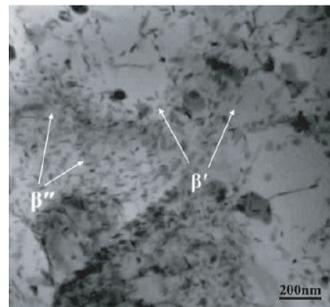
(f)ECAP 时效态(5 μm)

图 6 不同状态下 6063 铝合金的表面磨损形貌

图 7 为不同状态 6063 铝合金的透射电镜显微(TEM)形貌。经过 ECAP 处理后,6063 铝合金中可见尺寸 60~450 nm 的纳米晶粒存在,平均晶粒尺寸约为 245 nm,这主要是因为 ECAP 处理过程中合金经过大塑性变形而发生了再结晶的缘故<sup>[16]</sup>,可见,ECAP 处理可以明显细化 6063 铝合金的晶粒;ECAP 时效态 6063 铝合金中可见大量弥散析出的纳米级杆状  $\beta'$  相和针状  $\beta''$  相,这些纳米级析出相可以起到弥散强化的作用<sup>[17]</sup>。在细晶强化和弥散强化的共同作用下,6063 铝合金的强塑性和硬度会有所增加,相应的耐磨性也会得到提升。



(a)ECAP 态



(b)ECAP 时效态

图 7 不同状态下 6063 铝合金的 TEM 形貌

### 3 结论

(1)固溶态、T6 态和 ECAP 时效态 6063 铝

合金的主要物相都为  $\alpha$ -Al 相、 $\beta$ -Mg<sub>2</sub>Si 相、 $\beta'$ -Mg<sub>1.7</sub>Si 相和  $\beta''$ -Mg<sub>5</sub>Si<sub>6</sub> 相,但是 ECAP 时效态 6063 铝合金的  $\beta$ -Mg<sub>2</sub>Si 相、 $\beta'$ -Mg<sub>1.7</sub>Si 相和  $\beta''$ -Mg<sub>5</sub>Si<sub>6</sub> 相的衍射峰更强。

(2)固溶态和 T6 态 6063 铝合金从跑合阶段到稳定阶段的时间明显大于 ECAP 时效态;相同状态下,6063 铝合金的平均摩擦系数会随着载荷增加呈现先减小而后增大的特征;在相同载荷下,平均摩擦系数从大至小的顺序为固溶态>T6 态>ECAP 时效态。

(3)随着载荷从 5 N 增加至 25 N,固溶态、T6 态和 ECAP 时效态 6063 铝合金的磨损率都呈现为逐渐增大的趋势,且相同载荷下,磨损率从大至小的顺序为固溶态>T6 态>ECAP 时效态,磨损率的测试结果与平均摩擦系数的测试结果相吻合,即 ECAP 时效态 6063 铝合金具有相对较低的摩擦系数和更好的耐磨性。

(4)固溶态 6063 铝合金的磨损机制主要为疲劳磨损+黏着磨损+氧化磨损;T6 态和 ECAP 时效态 6063 铝合金的磨损机制主要为黏着磨损+少量剥层磨损+少量磨粒磨损+少量氧化磨损。

**参考文献:**

[1] 李奎明,姚炳强. 我国工业建筑压型铝合金板围护体系现状及发展趋势[J]. 轻金属, 2016(5):53-55.

[2] 刘静安. 建筑铝合金结构挤压材模具的设计与制造[J]. 轻合金加工技术, 2014, 42(11):43-48.

[3] 王莹,郝雨,胡申成. 挤压工艺参数对挤压态新型铝合金建筑型材性能的影响[J]. 锻压技术, 2018, 43(4):154-158.

[4] 齐文艳,柴金义. 铸锻复合成形参数对建筑用 6061-V 铝合金性能的影响[J]. 热加工工艺, 2021, 50(1):81-84.

[5] 李文娟,李翠花. 建筑幕墙新型铝合金型材的挤压工艺优化[J]. 热加工工艺, 2020, 49(17):108-111.

[6] 张照方,张雷顺. 建筑用 2524 铝合金表面

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/MAO 膜组织及摩擦性能分析[J]. 真空科学与技术学报, 2020, 40(7):599-603.

[7] 吴俊臣. 预变形对建筑用新型铝合金低温性能的影响[J]. 热加工工艺, 2015, 44(12):83-85.

[8] TAŃSKI T, SNOPIŃSKI P, HILSER O. Microstructure and mechanical properties of two binary Al-Mg alloys deformed using equal channel angular pressing[J]. Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, 2017, 48(5):439-446.

[9] 张翔,王晓溪,张德坤,等. ECAP 挤压道次对 6063 铝合金力学性能及耐磨性的影响[J]. 锻压技术, 2019, 44(2):61-67.

[10] KUMAR N, MISHRA R S, HUSKAMP C S, et al. The effect of friction stir processing on the microstructure and mechanical properties of equal channel angular pressed 5052Al alloy sheet[J]. Journal of Materials Science, 2011, 46(16):5527-5533.

[11] EL-DANAF E A. Mechanical properties, microstructure and micro-texture evolution for 1050AA deformed by equal channel angular pressing (ECAP) and post ECAP plane strain compression using two loading schemes[J]. Materials & Design, 2012, 34:793-807.

[12] VENKATACHALAM P, KUMAR S R, RAVISANKAR B, et al. Effect of processing routes on microstructure and mechanical properties of 2014 Al alloy processed by equal channel angular pressing[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2010, 20(10):1822-1828.

[13] 刘满平,韦江涛,李毅超,等. 等通道转角挤压 Al-Mg-Si 铝合金的动态时效特性和力学性能[J]. 材料研究学报, 2016, 30(10):721-730.

- [14] VENKATACHALAM P, RAVISANKAR B, KUMARAN S. Microstructure and mechanical properties of 2014 Al alloy processed by equal channel angular pressing (ECAP) [J]. *International Journal of Microstructure and Materials Properties*, 2010, 5(1): 88 - 100.
- [15] 许晓静, 王子路, 陆文俊, 等. 固溶—大变形—时效下 7085 铝合金的强化机理[J]. *稀有金属材料与工程*, 2017, 46(4): 1008 - 1012.
- [16] ZHANG Z, LIU M, YU Y, et al. Microstructural characterization of an Al-Mg-Si aluminum alloy processed by equal channel angular pressing [J]. *Materials Science Forum*, 2013, 745 - 746: 303 - 308.
- [17] KHELFA T, REKIK M A, MUÑOZ-BOLAÑOS J A, et al. Microstructure and strengthening mechanisms in an Al-Mg-Si alloy processed by equal channel angular pressing (ECAP) [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 95(1-4): 1165 - 1177.
- (责任编辑:李秀荣)
- 
- (上接第5页)
- [3] DONG R G, RAKHEJA S, SCHOPPER A W, et al. Hand-transmitted vibration and biodynamic response of the human hand-arm; a critical review [J]. *Critical Reviews TM in Biomedical Engineering*, 2001, 29(4): 393 - 439.
- [4] BESA A J, VALERO F J, SUNER J L, et al. Characterization of the mechanical impedance of the human hand-arm system; the influence of vibration direction, hand-arm posture and muscle tension [J]. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 2007, 37(3): 225 - 231.
- [5] ADEWUSI S, RAKHEJA S, MARCOTTE P, et al. Distributed vibration power absorption of the human hand-arm system in different postures coupled with vibrating handle and power tools [J]. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 2013, 43(4): 363 - 374.
- [6] 曹阳, 马雄位, 张永江, 等. 井窖孔制作机关键部件振动及其沿手臂传递特性研究 [J]. *中国农机化学报*, 2020, 41(2): 46 - 53.
- [7] DONG R G, SCHOPPER A W, MCDOWELL T W, et al. Vibration energy absorption (VEA) in human fingers-hand-arm system [J]. *Medical engineering & physics*, 2004, 26(6): 483 - 492.
- [8] KARNIEL A, INBAR G F. The use of a nonlinear muscle model in explaining the relationship between duration, amplitude, and peak velocity of human rapid movements [J]. *Journal of Motor Behavior*, 1999, 31(3): 203 - 206.
- [9] 李文彬, 安静贤. 人体手臂的机械阻抗与振动能量吸收 [J]. *北京林业大学学报*, 1995, 17(S2): 1 - 6.
- [10] 陈位宫. 人手臂振动的生物力学模型与振动病 [J]. *噪声与振动控制*, 1988(2): 33 - 39.
- [11] FRITZ M. An improved biomechanical model for simulating the strain of the hand-arm system under vibration stress [J]. *Journal of Biomechanics*, 1991, 24(12): 1165 - 1171.
- (责任编辑:李秀荣)