

胡强,罗号,岳小明,等. 剪切挤压-轧制复合成形对 6016 铝合金织构及动态性能的影响[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2023, 38(3):70-76. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2023.03.009

HU Q, LUO H, YUE X M, et al. Effect of Shear Extrusion-Rolling Process on Texture and Dynamic Properties of 6016 Aluminum Alloy [J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2023, 38(3):70-76. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2023.03.009

# 剪切挤压-轧制复合成形对 6016 铝合金织构及动态性能的影响

胡强<sup>1\*</sup>, 罗号<sup>1,2</sup>, 岳小明<sup>1,2</sup>, 刘文辉<sup>1,2</sup>

(1.湖南科技大学 机电工程学院,湖南 湘潭 411201;

2.湖南科技大学 高温耐磨材料及制备技术湖南省国防技术重点实验室,湖南 湘潭 411201)

**摘要:**采用 X 射线衍射、分离式霍普金森压杆等研究剪切挤压-轧制工艺对 6016 铝合金织构和动态力学性能的影响.结果表明:常规轧制后 6016 板材具有较强的  $\beta$  取向线轧制织构,而剪切挤压-轧制成形的 6016 铝合金板材中形成了大量的剪切织构 r-Cube $\{001\}\langle 110\rangle$ 及 r-Copper $\{112\}\langle 011\rangle$ ,其相较于常规轧制织构有一定弱化.固溶后,2 种工艺的板材中都以再结晶织构 Cube $\{001\}\langle 100\rangle$ 为主,但剪切挤压-轧制工艺制备的板材中剪切织构的体积分数要比常规轧制板材高 60%,这更有利于板材成形.在模拟烤漆工艺后的动态冲击过程中,2 种板材均有明显的正应变速率强化效应,而剪切挤压-轧制工艺则能进一步提高 6016 铝合金板材的应变率敏感性和吸能效果.

**关键词:**6016 铝合金;剪切挤压-轧制;织构;动态力学行为

中图分类号: TG376

文献标志码: A

文章编号: 1672-9102(2023)03-0070-07

## Effect of Shear Extrusion-Rolling Process on Texture and Dynamic Properties of 6016 Aluminum Alloy

HU Qiang<sup>1</sup>, LUO Hao<sup>1,2</sup>, YUE Xiaoming<sup>1,2</sup>, LIU Wenhui<sup>1,2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

2. Key Lab of High Temperature Wear Resistant Materials Preparation Technology of Hunan Province, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

**Abstract:** The effects of shear extrusion-rolling on the texture and dynamic mechanical properties of 6016 aluminum alloy are studied by X-ray diffraction and split Hopkinson pressure bar. Results shows that the conventional rolling sheet of 6016 aluminum alloy has a strong  $\beta$ -orientation rolling texture, while a large number of shear textures r-Cube $\{001\}\langle 110\rangle$  and r-Copper $\{112\}\langle 011\rangle$  are formed in the shear extrusion-rolled sheet, which are weakened compared with the conventional rolling preferred orientation. After the solution treatment, the recrystallized texture Cube $\{001\}\langle 100\rangle$  is dominated by the two different processes. The volume fraction of the shear texture in the shear extrusion-rolling process sheet is 60% higher than that of the conventional rolled sheet, which is more conducive to sheet metal forming. During the dynamic impact process of the simulated process of

收稿日期: 2022-03-22

基金项目: 湖南省自然科学基金资助项目(2020JJ6027)

\*通信作者, E-mail: 451595880@qq.com

the two kinds of process plates, the plates have obvious strain rate enhancement, showing a positive strain rate correlation. Moreover, the shear extrusion rolling process can further improve the strain rate sensitivity and energy absorption effect of the 6016 aluminum alloy.

**Keywords:** 6016 aluminum alloy; shear extrusion-rolling; texture; dynamic mechanical behavior

近年来,汽车保有量的不断增长致使能源和环境污染问题日渐突出,而汽车轻量化是节约能源、减少汽车尾气排放量的重要手段<sup>[1]</sup>.由于6系铝合金具有优良的耐腐蚀和焊接性能,没有冲压吕德斯线,是实现汽车轻量化的首选材料之一<sup>[2]</sup>.但现阶段6系铝合金在应用过程中存在各向异性较强、冲压成形性能较差、烤漆硬化强度较低等问题;同时,6系铝合金被用于汽车车身,对碰撞时的吸能有着严格的要求,其动态冲击性能的优劣也对汽车铝合金轻量化的快速发展有着重要的影响<sup>[3-4]</sup>.因此,开展6系铝合金板材成形工艺和成形后动态冲击性能的研究,对汽车行业的发展具有重要的意义.

当前铝合金板材主要以轧制成形为主,常规轧制板材织构组分主要为 $\beta$ 取向线织构,经过固溶后板材的织构以Cube织构为主,这使得板材的各向异性较强,冲压成形性能差<sup>[5]</sup>.因此,众多研究者通过优化合金成分,热处理工艺及塑性变形工艺来改善合金的性能<sup>[6-8]</sup>.陈吉湘等<sup>[9-10]</sup>研究等通道挤压(ECAP)对6061铝合金的影响,发现经过ECAP处理后6061铝合金的细晶组织具有良好的热稳定性,与该合金在常规轧制退火后出现的Cube织构不同,经过ECAP-退火处理后合金中的主要织构为r-Cube;SU等<sup>[11]</sup>采用累积叠轧(ARB)的方法轧制AA6061铝合金,结果表明:板材在5个道次后,晶粒得到有效细化,表层的织构为r-Cube织构,中心层的织构为Copper和r-Cube织构,且随着轧制道次的增加,r-Cube织构的体积分数逐渐增加.此外,众多研究者将大塑性变形技术与其他塑性加工技术相结合,进一步改善合金的性能. SHEN等<sup>[12]</sup>将ECAP与轧制工艺相结合,不仅提高了AA5083铝合金的强度,同时也显著改善了合金的应变硬化效应;BAHADORI等<sup>[13]</sup>发现ECAP与冷轧(CR)复合工艺不仅可以有效减小纯铜合金的晶粒尺寸,还可以改善晶粒分布的不均匀性,进而提高合金的强度以及延展性.

上述研究表明复合成形技术能够有效地改善合金性能.团队在前期的研究中提出了一种制备高性能板材的剪切挤压-轧制复合成形方法,该方法能在引入剪切织构的同时弱化板材织构强度,提高铝合金板材表面质量及成形性能<sup>[14]</sup>.现阶段关于剪切挤压-轧制复合成形工艺对6016铝合金板材性能的影响还鲜有报道.因此,本文以6016铝合金为研究对象,采用剪切挤压-轧制复合成形新工艺制备6016铝合金板材,并与常规轧制工艺制备的6016铝合金板材相比较,从而揭示剪切挤压-轧制复合成形工艺对6016铝合金板材的织构及动态力学性能的影响,为提高6016铝合金板材的成形性能及实际生产提供指导.

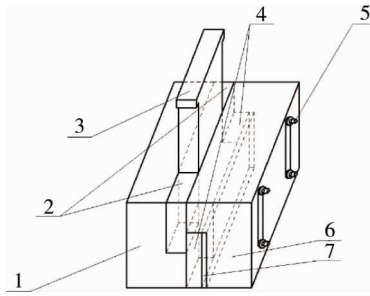
## 1 实验材料及方法

本实验原材料为6016铝合金铸锭,化学成分如表1所示.利用电火花切割机将铸锭加工成尺寸为50 mm×16 mm×12 mm(RD×TD×ND)的长方体试样,再对试样进行均匀化处理(540 °C/30 h).常规轧制时,将经均匀化处理的试样按照等压下率原则,在460 °C条件下经多道次热轧得到厚度为8 mm的板材,道次间在460 °C保温10 min.将8 mm热轧板材空冷至室温后进行酸洗去除氧化皮,再在室温下按照等压下率原则进行多道次常规冷轧将板材减薄至4 mm.进行剪切挤压-轧制复合成形加工时,利用油压机和自行设计、制造的剪切挤压模具(如图1所示),对均匀化的试样在室温下进行剪切挤压试验.剪切挤压变薄制度为12—10—8 mm,剪切挤压速度为5 mm/s,在第二道次时将试样旋转180°,按照等压下率原则在室温下将剪切挤压后的试样进行多道次冷轧,直至板材厚度为4 mm.将2种方法所得试样依次进行固溶处理(550 °C/5 min),预时效(160 °C/10 min),室温自然时效(14 d),最终进行模拟烤漆(175 °C/30 min).为叙述方便,将常规轧制态4 mm板材简记为NR态板材,将剪切挤压-轧制态4 mm板材记为SER态板材,将固溶后的板材分别记为NR-S4态板材和SER-S4态板材,将模拟烤漆后的板材分别记为NR-T8X态板材和SER-T8X态板材.

表 1 6016 铝合金的化学成分(质量分数)

| Alloy | Si   | Mg   | Cu   | Fe    | Mn    | Ti    | Zn     | Al   |
|-------|------|------|------|-------|-------|-------|--------|------|
| 6016  | 1.48 | 0.47 | 0.18 | 0.099 | 0.025 | 0.032 | 0.0084 | Bal. |

在 2 种轧制板材中心宏观变形相对均匀的部位分别切取宏观织构测定试样(尺寸为 8 mm×8 mm)和动态冲击实验试样(尺寸为  $\Phi 5$  mm×4 mm).宏观织构测定使用 Brucker D8 Discovery X 射线织构应力仪进行测定.采用分离式霍普金森压杆(Split Hopkinson Pressure Bar, SHPB)进行不同应变速率的动态冲击试验.宏观织构测定与动态冲击试验均在室温下进行.



1-左成形块;2-上成形块;3-压杆;4-下成形块;5-螺栓;6-右成形块;7-板厚调节垫块  
图 1 剪切挤压示意图

## 2 结果与讨论

### 2.1 板材宏观织构的演变

图 2 为 NR 和 SER 态板材固溶前的(111)极图.6016 铝合金板材经 NR 和 SER 工艺后,2 种板材的织构存在明显差异.NR 态板材的最大极密度为 2.70,且表现出典型的层式特征.SER 态板材的最大极密度为 2.31,相比于 NR 态板材,其极密度降低了 14.44%.

图 3 为 NR 态与 SER 态板材中各织构的体积分数图.从图 3a 可以看出:NR 态板材主要存在 Brass  $\{011\} \langle 211 \rangle$ , Copper  $\{112\} \langle 111 \rangle$ , S  $\{123\} \langle 634 \rangle$ , Goss  $\{110\} \langle 100 \rangle$ , r-Cube  $\{001\} \langle 110 \rangle$  以及 Cube  $\{001\} \langle 100 \rangle$  织构,其织构体积分数分别为 28.49%, 14.71%, 10.70%, 9.86%, 8.29%, 7.41%.NR 态板材中黄铜织构特征最为明显,晶粒取向聚集在  $\beta$  取向线附近,表现出较强的面心立方金属形变织构特征.在 SER 态板材中(如图 3b 所示),合金织构组分明显不同于 NR 态板材,此时合金的织构组分主要以旋转立方织构 r-Copper  $\{112\} \langle 011 \rangle$  和剪切织构 r-Cube  $\{001\} \langle 110 \rangle$  为主,其织构体积分数分别为 49.28%, 11.05%.同时也出现了轧制变形过程中  $\beta$  取向线上的 Copper  $\{112\} \langle 111 \rangle$ , Brass  $\{110\} \langle 112 \rangle$  织构,织构体积分数依次为 10.50%, 6.51%.另外,板材内还含有再结晶织构 Goss  $\{110\} \langle 100 \rangle$  和 Cube  $\{001\} \langle 100 \rangle$  立方织构,体积分数分别为 8.47% 和 5.18%.相比于 NR 态板材,经过剪切挤压后的 SER 态板材中 r-Cube  $\{001\} \langle 110 \rangle$  剪切织构的体积分数比 NR 态板材增加了 24.97%,同时产生了 r-Copper  $\{112\} \langle 011 \rangle$  旋转立方织构, $\beta$  取向线上的 S 织构消失,其他 2 种  $\beta$  取向线上的织构体积分数明显减少.

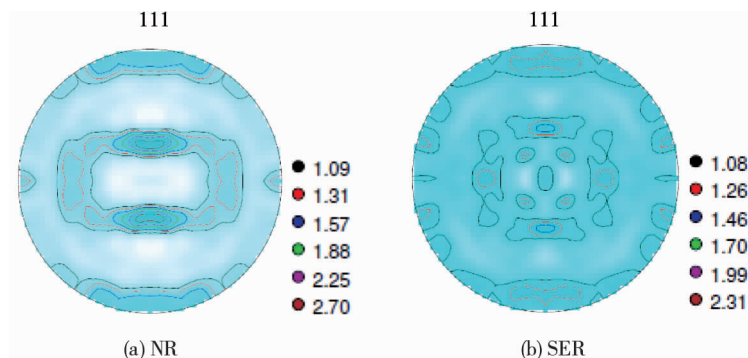


图 2 轧制态试样的(111)极图

在热轧过程中,铝合金的再结晶过程受热轧温度的影响,进而影响板材形变织构和再结晶织构的演变<sup>[15]</sup>.NR 工艺中的热轧温度为 460 ℃,在热轧过程中会发生动态再结晶并形成再结晶织构,在后续的冷轧过程中,再结晶织构会在轧制时逐渐向  $\beta$  取向线上旋转演变为轧制织构,同时 Cube 织构还会在轧制过程中经其他旋转路径旋转至 Goss 织构后再旋转至  $\beta$  取向线<sup>[15-16]</sup>.因此,在 NR 态板材中  $\beta$  取向线上的织构体积分数最多,而再结晶织构体积分数较少.然而,在 SER 态板材中,板材在成形过程中受到较大的剪切变形,织构组分主要以旋转立方织构 r-Copper 为主,剪切织构 r-Cube 次之.同时,板材在变形过程中受温度的影响较小,发生动态再结晶形成再结晶织构的能力有限.因此, $\beta$  取向线上的织构和再结晶织构含量较少.现有研究表明<sup>[17-18]</sup>:铝合金板材内  $\{111\}$  面强剪切织构有利于板材的成形性能,但常规变形铝合金板材在  $\{111\} \langle 110 \rangle$  滑移系作用下,形成以  $\beta$  取向线为主的非  $\{111\}$  面织构.经过 SER 复合工艺后,板材内  $\beta$  取向线上织构的体积分数明显减少,剪切织构的体积分数大幅度增加,有利于 6016 铝合金板材的成形.

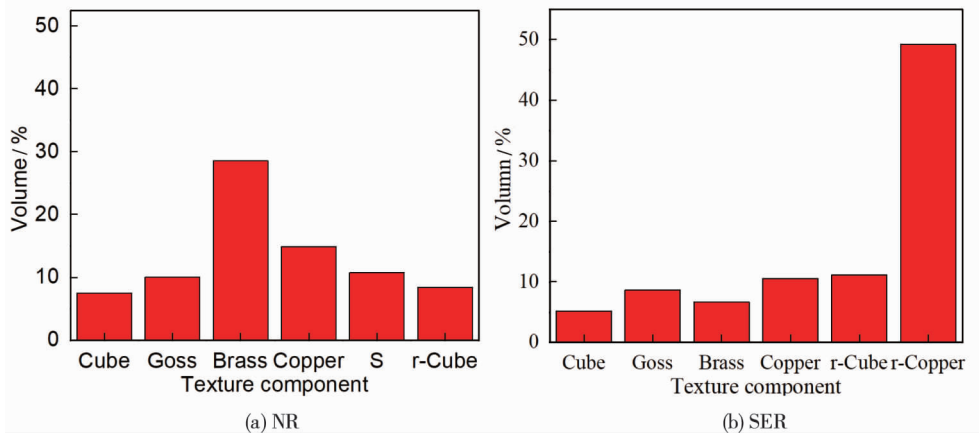


图 3 轧制态试样织构的体积分数

图 4 为 NR 和 SER 态板材固溶后的 (111) 极图.板材固溶后,NR-S4 和 SER-S4 态板材基体组织都发生了再结晶.NR-S4 态板材的最大极密度为 2.30,SER-S4 态板材的最大极密度为 2.23.与图 2 中 NR 和 SER 态板材相比,固溶后 2 种板材的极密度降低,织构弱化.

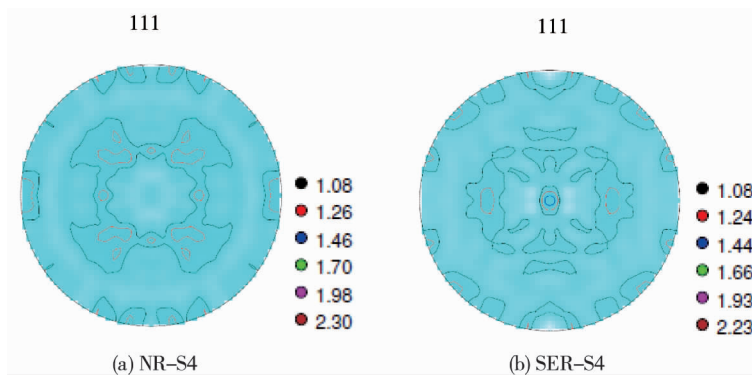


图 4 固溶态试样的(111)极图

图 5 为 NR-S4 态与 SER-S4 态板材中各织构的体积分数图.从图 5 可以看出,固溶后的 NR-S4 态板材中以再结晶 Cube  $\{001\} \langle 100 \rangle$  织构为主,其体积分数为 47.38%.此外,还含有 r-Cube  $\{001\} \langle 110 \rangle$ , Brass  $\{011\} \langle 211 \rangle$ , Goss  $\{110\} \langle 100 \rangle$  和 Copper  $\{112\} \langle 111 \rangle$  织构,其体积分数分别为 10.62%, 9.15%, 2.58% 和 2.47%.在 SER-S4 态板材中再结晶 Cube  $\{001\} \langle 100 \rangle$  的体积分数为 41.29%,在板材所有织构组分中占主导地位,同时,板材中还含有 E  $\{111\} \langle 110 \rangle$ , Goss  $\{110\} \langle 100 \rangle$ , Brass  $\{011\} \langle 211 \rangle$ , Copper  $\{112\} \langle 111 \rangle$ , r-Cube  $\{001\} \langle 110 \rangle$  和 S  $\{123\} \langle 634 \rangle$  织构,其体积分数分别为 10.30%, 7.96%, 6.73%, 5.43%, 6.69% 和 4.93%.对比 NR-S4,SER-S4 态板材织构可以得出,固溶后 2 种板材中都以再结晶 Cube  $\{001\} \langle 100 \rangle$  织构为主,但相比于 NR-S4 态板材,SER-S4 态板材中再结晶 Cube  $\{001\} \langle 100 \rangle$  织构的体积分数要低 14.75%.同

时, SER-S4 态板材中剪切织构(r-Cube 织构、E 织构)的体积分数比 NR-S4 态板材中剪切织构(r-Cube 织构)的体积分数高 60%。

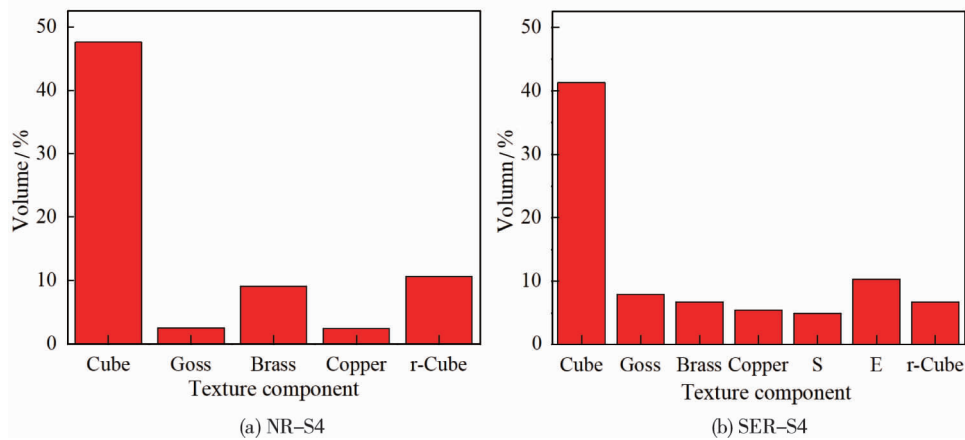


图5 固溶态试样织构的体积分数

经过固溶处理后, NR-S4 和 SER-S4 态板材织构都以再结晶 Cube 织构为主.同时, 2 种板材  $\beta$  取向线上的织构种类有明显的不同, SER-S4 态板材中保留了少量的 S 织构, 而 NR-S4 态板材中无 S 织构. 由于板材经过 NR 和 SER 工艺后, 形变组织内产生了大量的位错, 累积了形变储能. 在固溶过程中, 该储能将为再结晶提供驱动力, 促进板材的再结晶过程, 进而产生再结晶织构(Cube 织构和 Goss 织构)<sup>[19]</sup>. 同时, 固溶过程中板材  $\beta$  取向线上的 Copper 和 Brass 这 2 种织构也会向 Cube 织构转变, 促进 Cube 织构的产生. 但是, 随着剪切变形的增加, Cube 织构的形成速度也相应减弱<sup>[20]</sup>. 因此, SER-S4 态板材中再结晶 Cube 织构的体积分数少于 NR-S4 态板材. 相比 NR 工艺, SER 工艺能增加板材中的剪切织构并减少固溶后的再结晶织构.

## 2.2 板材动态力学性能

图 6 为模拟烤漆后试样在不同应变率下的真应力-真应变曲线. 由图 6 可得出: 模拟烤漆后 2 种试样的真应力-真应变曲线均有明显的弹性变形和塑性变形阶段. 2 种成形工艺下的板材均表现出明显的应变率强化, 即流变应力随应变率的提高呈增大趋势, 表现出正应变率相关. 在高速冲击时, 材料受到应变率硬化和热软化的共同作用, 当应变率低于临界值( $\leq 3\ 000\ \text{s}^{-1}$ )时, 以应变率硬化为主导<sup>[21]</sup>. 随着应变率增加, 可动位错密度增加, 与基体中的强化相粒子发生强烈的交互作用, 板材的流变应力也随之升高, 表现出应变率强化效应<sup>[22]</sup>. 在相同的应变率下, SER-T8X 试样的流变应力值都明显高于 NR-T8X 试样, 这表明经过 SER 工艺后, 板材的应变率强化效果要比 NR 工艺更明显.

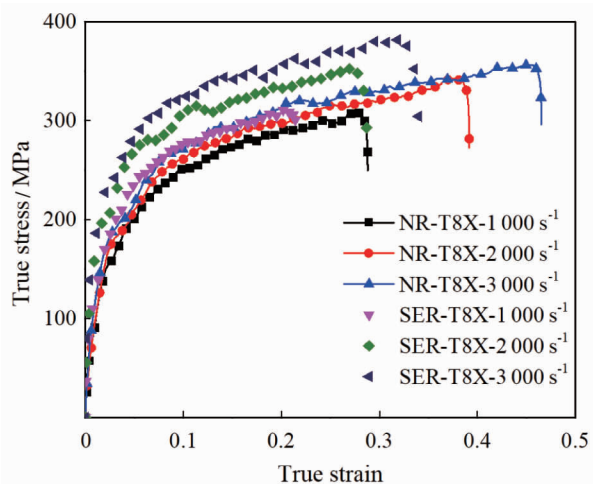


图6 模拟烤漆工艺后试样的动态力学行为

图 7 给出了应变为 0.05 与 0.10 时, 2 种不同变形工艺板材在不同应变率下的应变率敏感因子(简记



为  $m$ ) 曲线,其  $m$  值的计算公式为<sup>[23]</sup>

$$m = \left( \frac{\partial \ln \sigma}{\partial \ln \dot{\epsilon}} \right)_{\epsilon_i}$$

式中: $\sigma$  为流动应力; $\dot{\epsilon}$  为应变率; $\epsilon_i$  为加载应变.从图7可以得出:在应变为0.05和0.10时,SER-T8X试样的  $m$  值要比 NR-T8X 试样分别高62.5%,51.5%.同一应变下,SER-T8X试样的对数真应力和  $m$  值明显大于 NR-T8X 试样,表现出更强的应变率敏感性,应变率的强化效果更明显.由于铝合金成形板材中剪切织构的引入有利于提高板材的应变率敏感性<sup>[24]</sup>,因此,模拟烤漆后 SER-T8X 板材的应变率敏感性更强,应变率强化效果更明显.

在应变率分别为1 000,2 000,3000 s<sup>-1</sup>时,NR-T8X 和 SER-T8X 试样单位体积吸收能量如表2所示,样品单位体积吸收能量  $W$  的计算公式为<sup>[25]</sup>

$$W = \int_0^{\epsilon_e} \sigma d\epsilon.$$

式中: $\sigma, \epsilon$  为真应力和真应变; $\epsilon_e$  为最大应变.

从表2可以得出:相同应变率时,SER-T8X 试样吸收的能量比 NR-T8X 试样分别提高了10.2%,14.7%,13.6%.铝合金成形板材中剪切织构的引入有利于提高板材单位体积吸收的能量<sup>[24]</sup>.因为板材经过 SER 工艺后剪切织构的体积分数要比 NR 工艺高,所以 SER-T8X 板材的吸能效果明显强于 NR-T8X 板材.

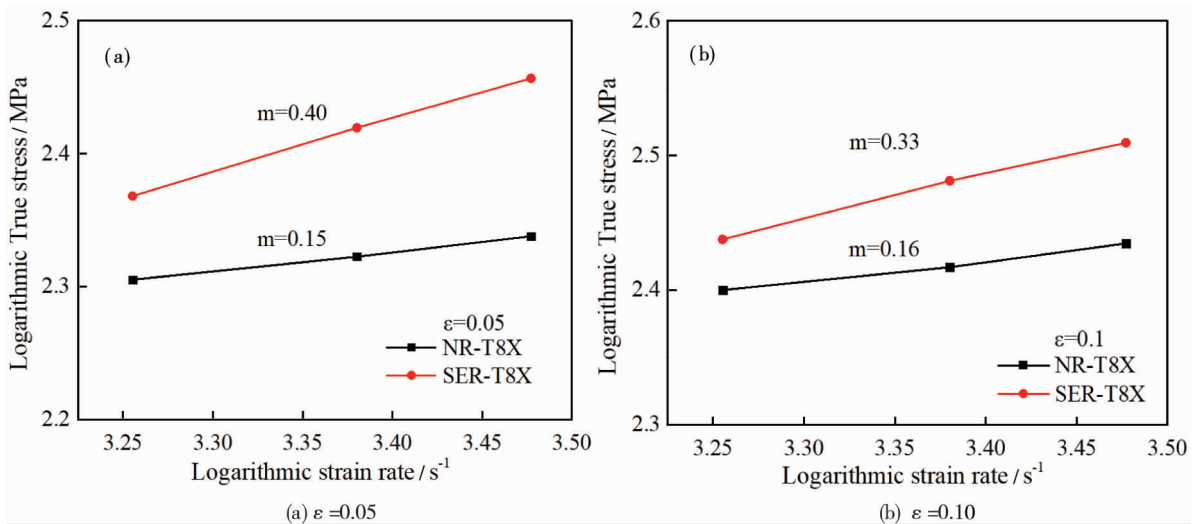


图7 烤漆后试样的应变速率敏感指数

表2 不同成形工艺时样品每单位体积吸收能量

| 成形工艺    | 样品单位体积吸收的能量           |                       |                       | W |
|---------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|---|
|         | 1 000/s <sup>-1</sup> | 2 000/s <sup>-1</sup> | 3 000/s <sup>-1</sup> |   |
| NR-T8X  | 50.13                 | 75.24                 | 98.94                 |   |
| SER-T8X | 55.24                 | 86.30                 | 112.38                |   |

### 3 结论

1) 6016 铝合金经 NR 工艺处理后板材中具有较强的  $\beta$  取向线织构,而 SER 工艺处理后板材中存在较强的剪切织构.在相同压下量时,SER 工艺弱化织构的能力强于 NR 工艺.

2) 固溶处理后,2 种不同工艺的板材都发生了再结晶,板材中的织构类型都以再结晶 Cube {001} <100> 织构为主,且都含有一定量的剪切织构,但 SER-S4 板材中剪切织构的体积分数要比 NR-S4 板材高 60%,且其板材中的织构较为分散,织构强度较弱.

3) 2 种成形工艺的板材均有明显的应变率强化,表现出正应变率相关.SER 工艺后的 6016 铝合金在

应变为 0.05 和 0.10 时,对应变率的敏感性要比 NR 试样分别高 62.5%,51.5%。当应变率为  $2\ 000\ \text{s}^{-1}$  时, SER 工艺板材的单位体积吸收能量比 NR 板材提高了 14.7%,吸能效果更好。

### 参考文献:

- [1] 汪建强,郭丽丽,李永兵.6016 铝合金板材微观组织及力学性能的试验研究[J].锻压技术,2019,44(2):164-171.
- [2] LEE C J, KIM J Y, LEE S K, et al. Parametric study on mechanical clinching process for joining aluminum alloy and high-strength steel sheets[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2010, 24(1): 123-126.
- [3] UBERTALLI G, MATTEIS P, FERRARIS S, et al. High strain rate behavior of aluminum alloy for sheet metal forming processes[J]. Metals, 2020, 10(2): 242.
- [4] 华家辉,徐从昌,林天豪,等.6XXX 铝合金防撞梁总成在动静态载荷下的变形行为[J].塑性工程学报,2019,26(6):199-205.
- [5] 陈扬,赵刚,刘春明,等.冷轧 6111 铝合金板材固溶处理后的再结晶织构[J].中国有色金属学报,2006,16(2):333-338.
- [6] ZHONG H, ROMETSCH P A, CAO L, et al. The influence of Mg/Si ratio and Cu content on the stretch formability of 6xxx aluminium alloys[J]. Materials Science and Engineering A, 2015, 651: 688-697.
- [7] JIN S, NGAI T, LI L, et al. Influence of natural aging and pre-treatment on the precipitation and age-hardening behavior of Al-1.0Mg-0.65Si-0.24Cu alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 742: 852-859.
- [8] ENGLER O, SCHAFFER C, MYHR O R. Effect of natural ageing and pre-straining on strength and anisotropy in aluminium alloy AA 6016[J]. Materials Science and Engineering: A, 2015, 639: 65-74.
- [9] 陈吉湘,王卫国,林燕,等.等径角挤压和单向轧制高纯 Al 再结晶晶界面的取向分布[J].金属学报,2016,52(4):473-483.
- [10] 覃继宁,张荻,张国定,等.6061 铝合金 ECAP 变形后退火组织稳定性和织构变化[J].中国有色金属学报,2005,15(4): 519-523.
- [11] SU L, LU C, GAZDER A A, et al. Shear texture gradient in AA6061 aluminum alloy processed by accumulative roll bonding with high roll roughness[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2014, 594: 12-22.
- [12] SHEN J, CHEN X, HAMMOND V, et al. The effect of rolling on the microstructure and compression behavior of AA5083 subjected to large-scale ECAE [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 695: 3589-3597.
- [13] BAHADORI S R, DEGHANI K, BAKHSHANDEH F. Microstructure, texture and mechanical properties of pure copper processed by ECAP and subsequent cold rolling[J]. Materials Science and Engineering A, 2013, 583: 36-42.
- [14] 刘文辉,罗号,陈宇强,等.制备高性能板材的剪切挤压-轧制复合成形方法与装置:ZL201710345501.7[P].2018-11-16.
- [15] 杨正斌.热处理及预变形对汽车车身用 Al-Mg-Si 合金组织与性能的影响[D].赣州:江西理工大学,2017.
- [16] 高琪妹,曹力生,于晓丹.6111 铝合金板材加工过程中织构的演变[J].轻合金加工技术,2009,37(1):30-36.
- [17] 丁灿培.道次压下率对异步轧制 6016 铝合金板材微结构及性能的影响[D].广州:广东工业大学,2019.
- [18] 张克龙,张继祥,刘运腾,等.6016 铝合金冷轧显微组织和织构的演变[J].稀有金属材料与工程,2017,46(6): 1559-1565.
- [19] 张继祥,岳乾坤,张克龙,等.固溶处理对 6016 铝合金冷轧板组织与织构的影响[J].热加工工艺,2017,46(10): 228-232.
- [20] 李辉,王家毅,阎昭辉,等.热轧 Al-Mg-Si 合金厚度方向显微组织及织构梯度演化[J].稀有金属,2019,43(3): 265-273.
- [21] 佟有志,祝国川,李明原,等.7B52 铝合金动态力学性能及断裂行为研究[J].铝加工,2018,243(4):40-45.
- [22] 刘文辉,何圳涛,唐昌平,等.变形条件对 2519A 铝合金动态力学性能与组织演化的影响[J].材料工程,2016,392(1): 51-57.
- [23] GUNDEROV D V, MAKSUTOVA G, CHURAKOVA A, et al. Strain rate sensitivity and deformation activation volume of coarse-grained and ultrafine-grained TiNi alloys [J]. Scripta Materialia, 2015, 102: 99-102.
- [24] 邱群.等径角轧制 6016 铝合金板材的组织及力学性能研究[D].湘潭:湖南科技大学,2017.
- [25] YI F, ZHU Z, ZU F, et al. Strain rate effects on the compressive property and the energy-absorbing capacity of aluminum alloy foams[J]. Materials Characterization, 2001, 47(5): 417-422.