

# 挤压温度对 AA7003 铝合金组织性能的影响

杜勋贵<sup>1, 2</sup>, 尤俊华<sup>1</sup>, 王顺成<sup>2</sup>, 周楠<sup>2</sup>

(1. 沈阳工业大学材料科学与工程学院, 辽宁沈阳 110870; 2. 广东省材料与加工研究所, 广东广州 510651)

**摘要:** 采用力学拉伸、扫描电镜、电子背散射衍射和电化学腐蚀等测试分析方法, 研究了不同挤压参数下7003铝合金的再结晶程度、织构和力学性能之间的关系。结果表明, 挤压温度为450 °C, 挤压速度为1 mm/s时, 合金的再结晶程度最大, 而且再结晶程度升高使合金的力学性能下降。当挤压温度为470 °C时, 出现较强的再结晶立方织构{001} <100>, 合金的抗拉强度和伸长率升高。因此可以得出结论, 立方织构可以提高挤压态7003铝合金的抗拉强度和伸长率。

**关键词:** AA7003铝合金; 挤压温度; 动态再结晶; 织构; 力学性能

## 作者简介:

杜勋贵(1992-), 男, 硕士生, 主要研究方向为铝合金的加工工艺。电话: 18842576981, E-mail: 18842576981@163.com

## 通讯作者:

尤俊华, 男, 教授。电话: 13464030232, E-mail: youjunhua168@163.com; 王顺成, 男, 教授。电话: 020-61086333, E-mail: wangunceng@163.com

中图分类号: TG146.2<sup>+1</sup>

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2019)05-0443-06

## 基金项目:

辽宁省高等学校创新人才支持计划(LR2018016); 广东省科学院院属骨干科研机构创新能力建设项目(2018GDASCX-0117); 广东省公益研究与能力建设项目(2017A070701029)。

## 收稿日期:

2018-12-17 收到初稿, 2019-02-27 收到修订稿。

AA7003合金属于Al-Zn-Mg系铝合金, 具有高的比强度和硬度、较高的耐蚀性和韧性, 在航空航天、交通运输和汽车船舶等行业中得到广泛应用<sup>[1-5]</sup>。在合金中添加Mn、Cr、Zr等元素, 可以阻碍再结晶的形核和长大过程, 对合金起到强化作用, 还能改善合金韧性和降低应力腐蚀开裂敏感性。用挤压方法生产铝材, 包括型材、板材和管材, 具有生产效率高、节约材料等优点<sup>[6]</sup>。其中, 挤压型材通常用于能量吸收系统, 例如车辆的保险杠系统, 以提高乘客的安全和保护。因此, 合金在挤压过程中材料的微观结构状态会影响最终产品的性能。

Al-Zn-Mg系合金的挤压温度范围较宽, 一般为370~520 °C。研究表明, 在不同温度下变形, 合金的再结晶程度差异较大, 寇琳媛等<sup>[7]</sup>研究了7150铝合金在300~450 °C的热压缩行为, 发现随着变形温度的升高和应变速率的降低, 合金中拉长的晶粒发生粗化, 亚晶尺寸增大, 再结晶晶粒在晶界交叉处出现, 并且晶粒数量逐渐增加; 合金热压缩变形的主要软化机制由动态回复逐步转变为动态再结晶。J.X. Zhang等<sup>[8]</sup>研究了初始晶粒尺寸对冷轧AA5182铝合金再结晶和再结晶织构的影响, 结果表明, 细晶合金的再结晶速度比粗晶合金快, 细晶合金的轧制织构由 $\beta$ 织构、Goss织构和残余立方织构组成, 而粗晶合金则表现出更强的 $\beta$ 轧制织构。Y.C. Chen等<sup>[9]</sup>研究了在50~300 °C温度范围内挤压温度对等径角挤压5052铝合金变形组织微观演变的影响, 研究发现, 提高挤压温度晶粒形态趋于等轴状, 计算出晶粒的长径比从2.7降低到1.5。薛杰等<sup>[10]</sup>研究了挤压温度对Al-Zn-Mg-Cu合金动态再结晶的影响, 发现硬取向的铜型织构和S织构能提高合金的强度。此外, 学者们还研究了合金成分、初始组织、变形预处理、变形程度和退火温度对再结晶和再结晶织构的影响<sup>[11-14]</sup>。然而, 目前关于AA7003挤压铝合金的再结晶组织、织构和力学性能的关系的研究报道较少。本研究的目的是探讨AA7003铝合金再结晶程度、织构和力学性能之间的关系; 为Al-Zn-Mg系铝合金加工工艺以及实际生产提供理论依据。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 试验材料

试验所用的7003铝合金是尺寸为 $\Phi 110$  mm  $\times$  400 mm半连续铸锭, 铸造过程中冷却水流量为1 500 L/h, 其主要合金成分见表1。将铸锭车去外皮至 $\Phi 100$  mm后在460 °C

下均匀化处理24 h, 水淬后将铸锭热挤压至60 mm × 6 mm板坯, 挤压比21:0。挤压参数见表2。在挤压过程中, 首先将模具设定为需要的温度, 然后将坯料插入挤压筒中。挤压时采用在线水淬, 之后再行合金组织观察和力学性能及电化学腐蚀性能测试。

## 1.2 试验方法

不同挤压条件下的板材沿挤压方向取样, 在SiC砂纸上水磨并用MgO悬浊液进行抛光, 挤压态试样所用腐蚀剂为1.5 mL HCl、1 mL HF、2.5 mL HNO<sub>3</sub>和95 mL H<sub>2</sub>O, 在Leica DM IRM光学显微镜下观察晶粒金相组织(观察位置均为平行于挤压方向的棒材芯部位置)。

采用传统的机械研磨和电解抛光方法制备了电子背散射衍射(EBSD)样品。用直流(DC)稳压电源在18~23 V进行10~30 s的电解抛光。电解抛光溶液由10%的高氯酸和90%的乙醇组成。之后使用配备OIM EBSD系统的扫描电镜对样品进行EBSD分析。

在不同挤压工艺条件下, 沿挤压方向从板材上切取长度为60 mm、宽度为6 mm的拉伸试样, 室温条件下在DNS200电子试验机上进行拉伸试验, 应变率为10<sup>-3</sup> s<sup>-1</sup>。在JEOL JXA 8100 EPMA扫描电镜上观察分析拉伸断口形貌。

## 2 结果与分析

图1给出了挤压AA7003铝合金淬火后中心部分的

表1 试验用合金化学成分

Table 1 Chemical composition of experimental AA7003 alloy

Zn	Mg	Mn	Cr	Zr	Fe	Si	Al
5.85	0.86	0.18	0.08	0.10	0.11	0.03	余量

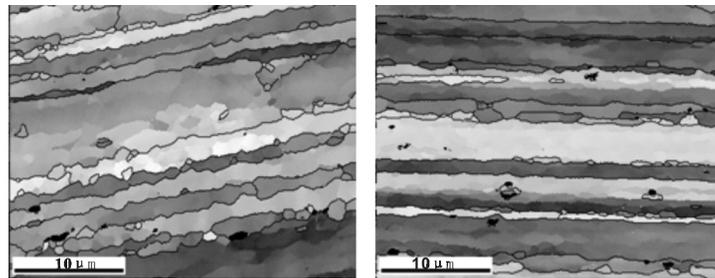
表2 不同挤压工艺参数

Table 2 Extrusion parameters under different extrusion processes

试样编号	挤压温度 / °C	坯料温度 / °C	挤压速度 / (mm · s <sup>-1</sup> )	挤压比
A	430	430	1	21
B	450	450	1	21
C	470	470	1	21
D	450	450	2	21
E	450	450	4	21

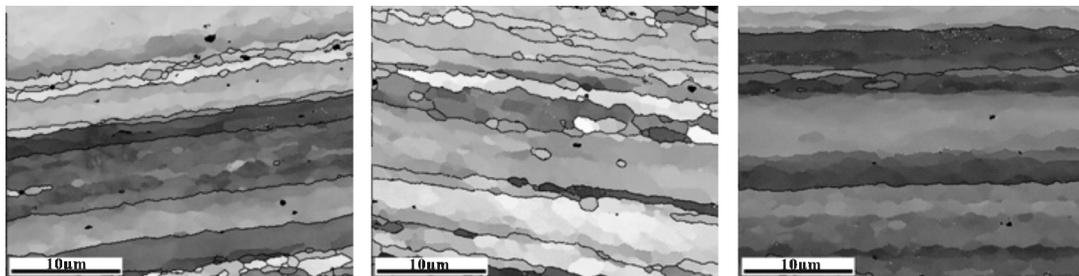
显微组织形貌。可以看出, 热挤压过程中不同的挤压工艺导致组织取向不同。晶粒沿挤压方向被拉长呈纤维状, 并在晶界处发生动态再结晶且形核不均匀。

图2给出了不同挤压工艺下晶粒尺寸分布图。从中可以看出, 挤压温度为450 °C, 挤压速度分别为1 mm/s和2 mm/s时, 小尺寸晶粒所占百分比最高, 大尺寸晶粒所占百分比最低, 表明样品在这些挤压工艺下具有较小的平均晶粒尺寸。



(a) 430 °C,  $v=1$  mm/s

(b) 450 °C,  $v=1$  mm/s



(c) 470 °C,  $v=1$  mm/s

(d) 450 °C,  $v=2$  mm/s

(e) 450 °C,  $v=4$  mm/s

图1 挤压态AA7003铝合金试样淬火后微观组织反极图

Fig. 1 Reverse pole diagram of microstructure of quenched AA7003 samples under different extrusion processes

图3是在5种挤压工艺下所有位错边界上的位错角的频率分布直方图。在图3中，大角度晶界的百分比相应较大，显示出高度的动态再结晶。不同挤压工艺下，AA7003铝合金的位错角差别不明显，大部分的位错角小于15°。根据晶粒取向的不同，5种挤压工艺下再结晶程度对应的大角度晶界数目不同。

铝合金的织构特征与其塑性变形和后续热处理密切相关。图4a、b和c给出了在相同速度、不同温度下挤压样品A、B和C的取向分布函数图。如图4a所示，A试样的织构成分主要由S{123}<634>织构和Goss{011}<100>织构组成，此外还观察到少量的Bs{011}<211>、Cu型织构{112}<111>和随机取向。随着挤压温度升高至470 °C，再结晶立方织构{001}<100>

强度增加。

图5给出了[100]（挤压方向）、[010]（法向）、[001]（横向）挤压试样的反极图，图5b为A试样沿挤压方向芯部反极图，可以看出沿挤压方向大多数晶粒取向接近<111>晶向族。当变形温度升高时，在<101>方向和<111>方向附近会产生较强的织构（如图5c）。随着挤压速度的进一步提高，<111>晶向族先强后弱（如图5b、d、e）。当挤压速度达到4 mm/s时，<111>晶向消失（如图5e）。

对试样进行拉伸试验来评价其力学性能，试验结果如图6所示。可以看出，A工艺下合金的抗拉强度较高，伸长率较低；抗拉强度、屈服强度和伸长率分别为453.8 MPa、353.2 MPa和11.9%。随着挤压温

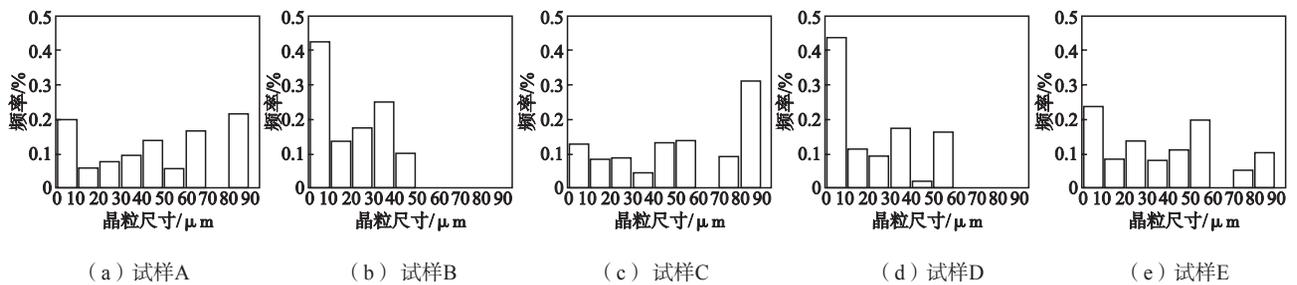


图2 不同挤压工艺条件下再结晶晶粒尺寸分布频率直方图

Fig. 2 Histograms of recrystallized grain size distribution of samples under different extrusion processes

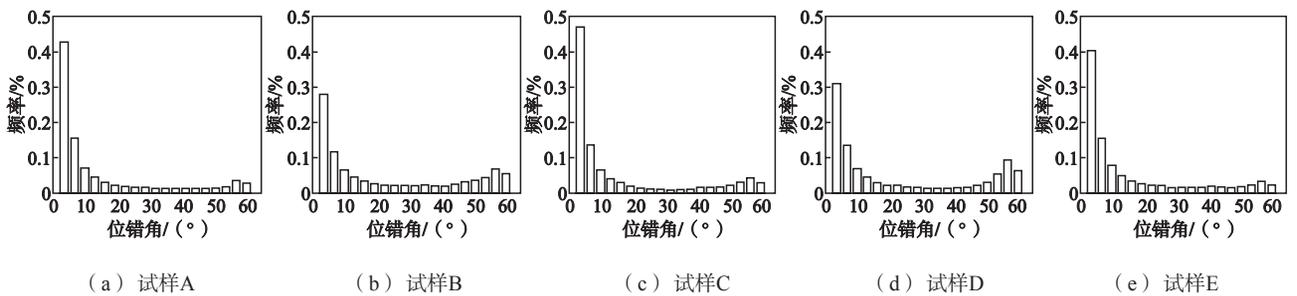


图3 不同挤压工艺条件下位错边界处位错角分布频率直方图

Fig. 3 Histograms of misorientation angles across all dislocation boundaries under different extrusion processes

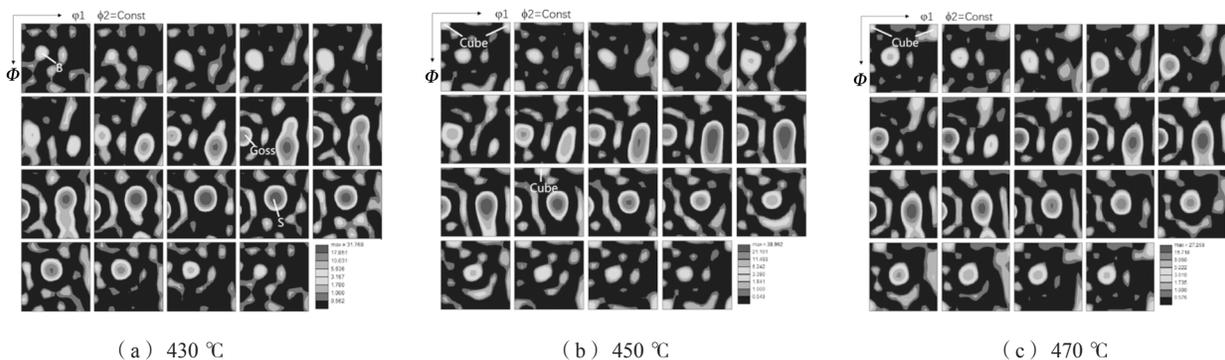


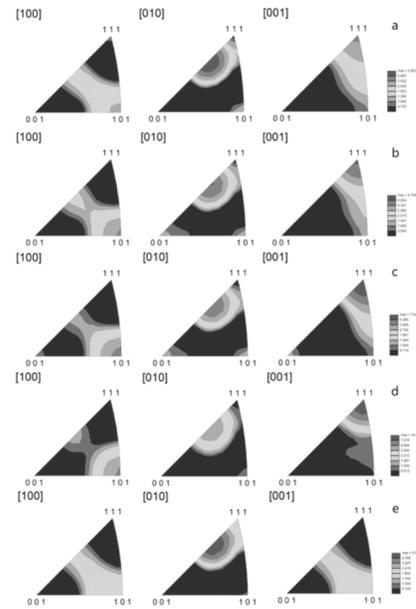
图4 不同挤压工艺合金的取向函数分布图

Fig. 4 ODFs of samples under different extrusion temperatures

度升高,合金的抗拉强度和屈服强度降低,但是伸长率升高,与A工艺相比,B工艺下合金的强度降低但是伸长率增加,抗拉强度、屈服强度和伸长率分别为442.5 MPa、346.8 MPa和12.8%。当挤压温度继续升高至470 ℃,挤压速度保持在1 mm/s时,抗拉强度和伸长率分别增加到475.9 MPa和13.9%,屈服强度变化不大。当挤压温度固定为450 ℃而挤压速度不同时,合金的力学性能如图6b所示。合金的力学性能和伸长率变化不大,说明力学性能对挤压速度的变化不敏感。

图7为不同挤压工艺下合金拉伸断口扫描照片。可以看出,所有合金均发生断裂,但是断口形貌不同。A试样和B试样均可观察到大尺寸和小尺寸的韧窝,并伴有少量的晶间裂纹产生。此外在断口表面可以观察到小尺寸韧窝周围的解理平台,如图7a、b所示。与图7a、b相比,图7c显示C工艺下合金的拉伸断口表面小尺寸韧窝数量增加且分布均匀,解理平台面积更小,说明合金的断裂韧性高,因此合金的伸长率高,这与图6a相一致。对局部组织放大,可以观察到大韧窝周围密集地分布着小尺寸韧窝,如图7f所示。从图7还可以看出,试样B、D和E的断口形貌并没有明显差别。

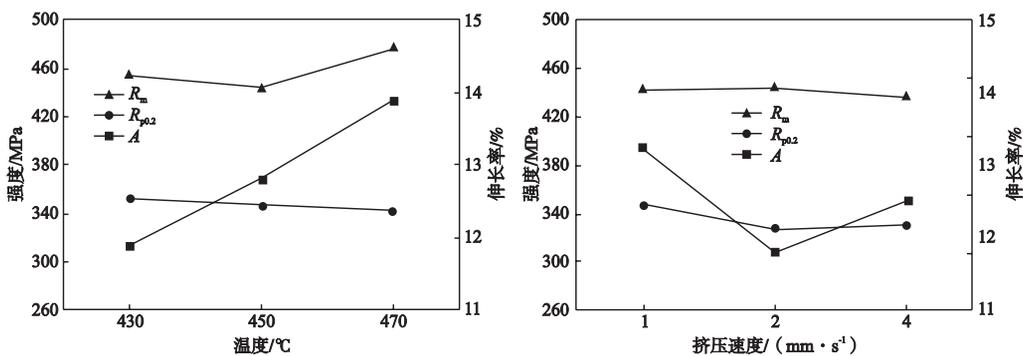
图8是不同挤压工艺下合金的交流阻抗谱。从图中可以看出,各工艺下合金的交流阻抗谱图都是由圆弧组成,其中在高频区的圆弧代表着在电化学腐蚀时材料表面的腐蚀难易程度。从图形上来说,在高频区的圆弧半径越大表明材料在电化学腐蚀时的阻抗值越大,也表明其耐蚀性越好;相反的,如果高频区的圆弧半径越小,代表材料阻值越小,耐蚀性越差。可以看到在高频区,圆弧半径从大到小依次是:A>E>C>D>B。表明挤压温度为430 ℃时,合金的阻抗值最大,耐蚀性最好;挤压温度为450 ℃时,合金的阻抗值最小,耐蚀性最差。



(a) 试样A; (b) 试样B; (c) 试样C;  
(d) 试样D; (e) 试样E

图5 不同挤压工艺合金的反极图  
Fig. 5 Inverse pole figures of samples under different extrusion processes

根据以上试验结果可以发现,再结晶程度和织构类型对拉伸性能有重要影响。在变形过程中,能量主要以位错的形式储存在材料中。能量的释放主要通过以下三种途径,即恢复、再结晶和晶粒粗化<sup>[15]</sup>。再结晶是指在一定储能驱动下大角度晶界的形成和迁移。在这个定义中,恢复可以不经过晶界的移动就能释放储能。研究发现,挤压温度是影响立方织构等再结晶织构的重要工艺参数。一方面当挤压温度为430 ℃和470 ℃时,与450 ℃挤压相比,小尺寸晶粒所占的比例



(a) 速度相同(1 mm/s),温度不同

(b) 温度相同(450 ℃),速度不同

图6 不同挤压参数下合金的力学性能

Fig. 6 Mechanical properties of AA 7003 alloy samples under different extrusion processes

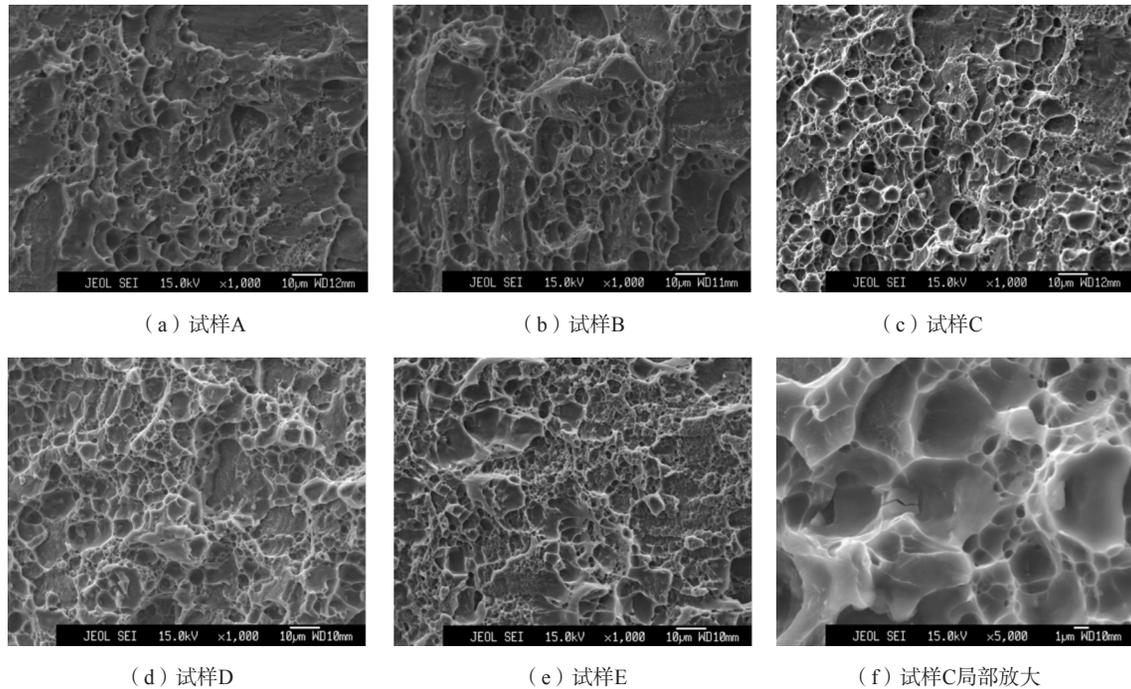


图7 拉伸断口扫描照片

Fig. 7 SEM micrographs of fracture surfaces under different extrusion processes

较小,这意味着450℃下的再结晶晶粒数量较多,如图2a、c所示;450℃时的再结晶程度较高,高于430℃和470℃的。同样的结论也可以从图3b、d中得出。在本研究中,由于再结晶程度的增加,力学性能下降,例如:当挤压温度从430℃升高到450℃,抗拉强度从453.8 MPa降低到442.5 MPa,再结晶现象明显,室温下合金的抗拉强度随再结晶程度增加而降低,试验结果和邓运来等人的研究结果一致<sup>[16]</sup>。另一方面,再结晶程度与450℃相比,470℃时合金的抗拉强度升高了33.5 MPa,说明再结晶程度降低了,如图7a所示。结合图4b分析可知,挤压温度为450℃时, $\phi 2=90^\circ$ ,立方织构的强度为1,S织构的强度为9。当挤压温度为470℃时,立方织构的强度为6,S织构的强度为1.8。S织构强度的减弱促进了立方织构的形成。已有研究表明<sup>[17-19]</sup>,S织构有利于立方织构的形成,这是由欧拉空间的位向关系所决定的,立方织构取向的晶粒往往与S取向的晶粒是 $40^\circ \langle 111 \rangle$ 的取向关系。根据Schmid定律,晶体受外力作用变形时,晶粒内部滑移系开动的难易程度和滑移系的数量和取向因子 $m = \cos \lambda \cdot \cos \phi$ 的大小有关,当变形沿 $0^\circ$ 与 $90^\circ$ 方向进行时,滑移系中有8个取向因子相等且最大,而在变形沿 $45^\circ$ 方向进行时,滑移系中只有4个取向因子相等且最大,开动应力略低,宏观表现为合金的抗拉强度提高,伸长率提高。再结晶立方织构的强度增加,其抗拉强度和伸长率分别增加到475.9 MPa和13.9%,可以得出结论:立方织构可以提高合金的抗拉强度和伸长率。

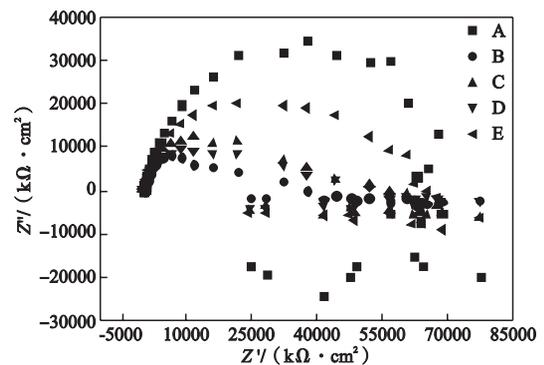


图8 不同工艺下合金的阻抗谱

Fig. 8 Impedance spectroscopy of alloys under different extrusion processes

### 3 结论

(1) 随着挤压温度从430℃增加到470℃,再结晶程度先增大后减小。试样B、D中再结晶晶粒所占比例最大,且挤压后的AA7003合金的强度随再结晶程度的增加而降低。

(2) AA7003合金的织构由三个组分组成,S $\{23\} \langle 634 \rangle$ 、黄铜织构 $\{011\} \langle 211 \rangle$ 和Goss $\{011\} \langle 100 \rangle$ 。

(3) 立方织构有利于抗拉强度和伸长率的提高。在470℃时试样具有较强的立方织构,因此抗拉强度和伸长率较高。

## 参考文献:

- [1] 刘兵, 彭超群, 王日初, 等. 大飞机用铝合金的研究现状及展望 [J]. 中国有色金属学报, 2010, 20 (9): 1705-1715.
- [2] 谢建新, 刘静安. 金属挤压理论与技术 [M]. 第2版. 北京: 冶金工业出版社, 2012.
- [3] 肖亚庆. 铝加工技术实用手册 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2004.
- [4] CHEN Q, XIA X, YUAN B, et al. Microstructure evolution and mechanical properties of 7A09 high strength aluminium alloy processed by backward extrusion at room temperature [J]. Materials Science & Engineering A, 2013, 588 (24): 395-402.
- [5] CHEN G, CHEN L, ZHAO G, et al. Microstructure analysis of an Al-Zn-Mg alloy during porthole die extrusion based on modeling of constitutive equation and dynamic recrystallization [J]. Journal of Alloys & Compounds, 2017, 710.
- [6] EIVANI A R, ZHOU J. Application of physical and numerical simulations for interpretation of peripheral coarse grain structure during hot extrusion of AA7020 aluminum alloy [J]. Journal of Alloys & Compounds, 2017, 725.
- [7] 寇琳媛, 金能萍, 张辉, 等. 7150铝合金高温热压缩变形流变应力行为 [J]. 中国有色金属学报, 2010, 20 (1): 43-48.
- [8] ZHANG J X, MA M, LIU W C. Effect of initial grain size on the recrystallization and recrystallization texture of cold-rolled AA 5182 aluminum alloy [J]. Materials Science & Engineering A, 2017, 690: 233-243.
- [9] CHEN Y C, HUANG Y Y, CHANG C P, et al. The effect of extrusion temperature on the development of deformation microstructures in 5052 aluminum alloy processed by equal channel angular extrusion [J]. Acta Material, 2003, 51 (7): 2005-2015.
- [10] 薛杰, 王有为, 张志豪, 等. 挤压温度对Al-Zn-Mg-Cu合金动态再结晶、时效组织和力学性能的影响 [J]. 中国有色金属学报, 2017 (11): 003.
- [11] LIU W C, ZHAI T, MAN C S, et al. Effect of initial texture on texture evolution in cold-rolled AA 5182 aluminum alloy [J]. Philosophical Magazine, 2004, 84 (31): 3305-3321.
- [12] LIU W C, YUAN H, HUANG M J. Effect of rolling reduction on the P{011}<455> recrystallization texture in a supersaturated Al-Mn-Mg alloy [J]. Metallurgical & Materials Transactions A, 2009, 40 (12): 2794-2797.
- [13] POORGANJI B, SEPEHRBAND P, JIN H, et al. Effect of cold work and non-isothermal annealing on the recrystallization behavior and texture evolution of a precipitation-hardenable aluminum alloy [J]. Scripta Materialia, 2010, 63 (12): 1157-1160.
- [14] LIAO L H, JIN H, GALLERNEAULT M, et al. Recrystallization behavior of a co-cast AA3xxx-AA6xxx aluminum alloy laminate-Effect of annealing conditions and cold reduction levels [J]. Materials Characterization, 2014, 94 (8): 215-226.
- [15] DOHERTY R D, HUGHES D A, HUMPHREYS F J, et al. Current issues in recrystallization: a review [J]. Materials Science & Engineering A, 1997, 238 (2): 219-274.
- [16] 邓运来, 王亚风, 林化强, 等. 挤压温度对Al-Zn-Mg合金力学性能的影响 [J]. 材料研究学报, 2016 (2): 87-94.
- [17] 张新明. 中间退火对高纯铝箔立方织构的影响 [J]. 材料工程, 2001, 32 (2): 85-88.
- [18] 曹零勇, 郭明星, 崔华, 等. 汽车用6111铝合金板材力学性能和织构研究 [J]. 材料热处理学报, 2013 (7): 118-123.
- [19] 王运雷. 退火过程中高纯铝箔微观组织演变及其再结晶行为的研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2016.

## Effect of Extrusion Temperature on Structure Properties of AA7003 Aluminium Alloy

DU Xun-gui<sup>1, 2</sup>, YOU Jun-hua<sup>1</sup>, WANG Shun-cheng<sup>2</sup>, ZHOU Nan<sup>2</sup>

(1. School of Materials Science and Engineering, Shenyang university of Technology, Shenyang 110870, China; 2. Guangdong Institute of Materials and Processing, Guangzhou 510651, China)

### Abstract:

The relations among recrystallization, texture and mechanical properties of AA7003 alloy under different extrusion processes were investigated by means of mechanical tensile, SEM, EBSD and electrochemical corrosion test. The results showed that the recrystallization extent reached maximum under the extrusion process conditions of  $T=450\text{ }^{\circ}\text{C}$  and  $v=1\text{ mm/s}$ , and the increase of recrystallization extent had a negative effect on the mechanical properties. Moreover, a relatively strong recrystallization cube orientation  $\{001\}\langle 100\rangle$  appeared when the extrusion temperature was  $470\text{ }^{\circ}\text{C}$ , which leads to a high tensile strength and elongation. Thus, it can be concluded that the cube texture is beneficial to the increase of tensile strength and elongation of extruded AA7003 alloy.

### Key words:

AA7003 alloy; extrusion temperature; dynamic recrystallization; texture; mechanical property