



引用格式:洪浩洋,杜向阳,何涛,等.挤压道次对2024铝合金ECAP变形的影响[J].轻工学报,2020,35(1):95-101.

中图分类号:TG376.2 文献标识码:A

DOI:10.12187/2020.01.012

文章编号:2096-1553(2020)01-0095-07

# 挤压道次对2024铝合金ECAP变形的影响

Effect of extrusion pass on ECAP deformation of 2024 aluminum alloy

洪浩洋,杜向阳,何涛,东星倩,高建焯

HONG Haoyang, DU Xiangyang, HE Tao, DONG Xingqian, GAO Jianye

**关键词:**  
等通道转角挤压;  
挤压道次;金属流动性;  
高强度铝合金;有限元

上海工程技术大学机械与汽车工程学院,上海201620

*School of Mechanical and Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620*

**Key words:**  
equal channel angular  
pressing (ECAP);  
extrusion pass; metal  
fluidity; high strength  
aluminum alloys;  
finite element

**摘要:**以2024铝合金为研究对象,采用Deform-3D有限元软件对试件进行数值模拟和A路径8道次ECAP实验,研究在不同挤压道次下试件变形过程中金属流动性、挤压载荷和等效应变的变化情况。结果表明:试件的头部和尾部区域金属流动网格呈现弯曲变形,中部区域呈现纯剪切变形,且随道次的增加变形程度显著增强;挤压载荷随挤压道次的增加呈现先上升后下降的趋势,其变化受试件强度影响;试件等效应变值的大小与挤压道次成正比关系,且等效应变值从试件靠近内转角区域出现由大到小的层状分布,3道次后出现应变分布均匀性下降的趋势。

收稿日期:2019-12-17

基金项目:国家自然科学基金项目(51805314);国家重点研发项目(2018YFB1307900);上海市科委重点攻关资助项目(16030501200)

作者简介:洪浩洋(1990—),男,辽宁省沈阳市人,上海工程技术大学硕士研究生,主要研究方向为金属塑性成形。

通信作者:杜向阳(1970—),男,上海市人,上海工程技术大学副教授,博士,主要研究方向为机械制造及其自动化。

**Abstract:** Taking 2024 aluminum alloy as the research object, Deform-3D finite element software was used to conduct numerical simulation of the specimen and 8-pass ECAP experiment of path A, and the changes of metal fluidity, extrusion load and equivalent strain in the deformation process of the specimen under different extrusion passes were studied. The results showed that the metal flow mesh in the head and tail region of the specimen presented bending deformation, while the central region presented pure shear deformation and the deformation degree increased significantly with the passes. The extrusion load increased first and then decreased with the increase of the extrusion pass, which was affected by the strength of the specimen. The size of the equivalent strain value of the specimen was proportional to the number of extrusion passes, and the equivalent strain value was distributed in layers from large to small from the area near the inner corner of the specimen, and the uniformity of strain distribution decreased after 3-pass.

## 0 引言

高强度铝合金因质量轻、强度高、不易腐蚀等优点,被广泛使用在汽车、船舶、航空航天、能源装备等领域<sup>[1-2]</sup>. 其中,2XXX系铝合金由于其优异的加工和力学性能,一直是航空航天装备制造的重要材料. 随着我国制造业的发展,对高强度铝合金的需求日益增大. 在铝合金加工工艺中,等通道转角挤压 ECAP (equal channel angular pressing) 可在不改变材料外形的情况下,极大地细化材料晶粒尺寸,显著提高材料的强度和硬度,故该加工工艺具有重要的研究意义<sup>[3-8]</sup>.

相较于其他大塑性变形技术,ECAP 的主要特点是其等效应变值可以随着挤压道次的增加而不断累积. 此前,国内外业内学者对 ECAP 挤压道次、材料微观组织、宏观力学性能之间的内在联系进行了大量研究. 刘腾等<sup>[9]</sup>通过对双相镁合金进行多道次挤压后发现, $\alpha$ 相在1道次时,变形方式为孪生,后续道次为位错滑移,而 $\beta$ 相在各道次均为位错滑移. M. Kawasaki等<sup>[10]</sup>通过对99.99%高纯度铝合金进行12道次挤压后发现,经1—4道次挤压后,铝合金的微观组织从细长亚晶粒向等轴晶演变,经4—12道次挤压后,铝合金的平均晶粒尺寸无明显变化. 刘英等<sup>[11]</sup>对AZ31镁合金进行12道次挤压后发现,随着挤压道次的增加,其晶粒不断细

化,伸长率也不断增加,但抗拉强度先增大后减小. 汪建敏等<sup>[12]</sup>对纯铜进行10道次 ECAP 后发现,晶粒会随着挤压道次的增加不断细化,而硬度值在前几道次挤压后就已经达到饱和,后续道次挤压的增加对于硬度的提升没有意义. 而后汪建敏等<sup>[13]</sup>又发现,对于高层错能金属,只需要4道次挤压就可以得到均匀的微观组织,而对于低层错能金属,需要8道次挤压才可以得到理想的微观组织. 郭廷彪等<sup>[14]</sup>通过对单晶铜和多晶铜多道次 ECAP 发现,其微观组织会出现均匀分布的等轴晶、高密度的大角度晶界和晶界上的非平衡组织. 然而,现有挤压道次对材料 ECAP 变形行为影响的研究主要集中在微观组织方面,对宏观上金属流动性、应变分布等的研究相对较少. 鉴于此,本文拟采用有限元数值模拟方法,分析挤压道次对金属流动性、挤压载荷、等效应变的影响,进而通过实验进行验证,以期对 ECAP 制备工艺的优化提供参考.

## 1 有限元数值模拟方案

有限元数值模拟可以通过数值解析的方法来模拟某一过程基本数值的变化情况,从而获得对该过程的定量认识. 本文采用 Deform-3D 有限元软件模拟 ECAP 过程,分析工件在 ECAP 过程中不同道次的变形情况,以缩短开发周期、降低成本. 在有限元数值模拟中,设定工件为塑性体,忽略模具变形,将其设定为刚性体. 采用

剪切摩擦模型,将工件与下模、工件与冲头之间的摩擦系数设为0.1.选用内角为 $120^\circ$ ,外角为 $25^\circ$ 的挤压通道.冲头下行挤压速率为 $1.3\text{ mm/s}$ ,挤压温度为 $20\text{ }^\circ\text{C}$ ,每道次设置350步,每步行程为 $0.3\text{ mm}$ .为提高模拟精度,将初始网格划分为32 000个四面体单元网格,在数值模拟过程中,当网格畸变干涉为单元边长的0.7时,网格将自动重新划分.2024铝合金材料模拟参数为:弹性模量 $68\ 900\text{ MPa}$ ,泊松比0.33,热扩散系数 $2.2 \times 10^{-5}\text{ m}^2/\text{s}$ ,热传导率 $180.195\text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ,热辐射系数0.7,伯格矢量模量 $2.78 \times 10^{-9}\text{ b/m}$ .建立的有限元3D模拟模型如图1所示.

对于材料流变应力与应变的关系,采用Deform材料库中的关系曲线进行模拟计算. ECAP过程中的各道次累积等效应变值忽略摩

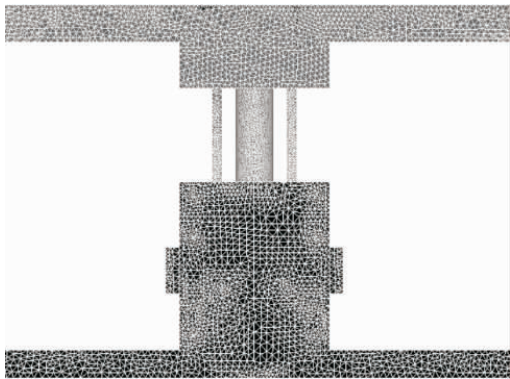


图1 有限元3D模拟模型

Fig. 1 Finite element 3D simulation model

擦力所得公式<sup>[15]</sup>为

$$\varepsilon_N = N \left[ \frac{2\cot\left(\frac{\Phi}{2} + \frac{\Psi}{2}\right) + \Psi\csc\left(\frac{\Phi}{2} + \frac{\Psi}{2}\right)}{\sqrt{3}} \right]$$

其中, $\varepsilon_N$ 为累积等效应变, $\Phi$ 为通道内模角, $\Psi$ 为通道外模角, $N$ 为挤压道次.

## 2 数值模拟结果与分析

### 2.1 挤压道次对金属流动性的影响

以边长为 $2\text{ mm}$ 的正方形为体单元,对试件进行均匀网格划分,在ECAP过程中追踪试件正方形网格变化情况,从而得到试件8道次的金属流动网格,其中,A路径1—3道次金属流动网格见图2,用以观察试件前3道次开始挤压、挤压到中间和挤压结束时的金属流动性.图中,1P代表第1道次,以此类推;试件主要分为3个变形区,I区为试件与冲头接触的头区,II区为试件的中部变形区域,III区为试件尾区.

由图2a)可以看出,在第1道次挤压至中间时,试件头部未发生明显变形;拐过扇形区的中部区域,网格拉长方向与试件前进方向呈现 $30^\circ$ 拉伸;尾区的金属网格出现弯曲现象.这说明,当试件拐过内角后,在纯剪切力的作用下,发生了充分的剪切变形,试件尾部呈现弯曲变形现象.通过对试件网格进一步观察可以发现,试件金属流动网格接近通道内转角区域的网格

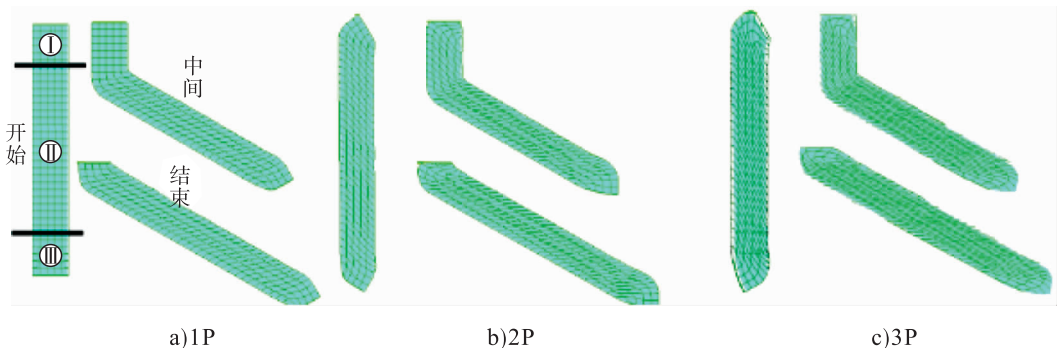


图2 A路径1—3道次金属流动网格

Fig. 2 1,2,3-pass metal flow net in route A

间隙要小于外转角区域,这说明金属接近通道内转角区域与外转角区域的金属流动速度不一致,这也是导致试件头部上翘的原因之一。

由图 2b) 可以看出,在第 2 道次挤压过程中,随着冲头行程的增加,在摩擦力和试件抵抗塑性变形力的作用下,试件头部区域的尖端首先被压平,呈现出弯曲变形特性. 中部变形区域在经过内角后的网格与试件前进方向依然保持 30° 倾斜拉伸现象,只是网格更为密集. 试件尾部翘曲角度出现小幅度增长。

由图 2c) 可以看出,该道次试件继承上一个道次的网格变化特性. 试件头部的弯曲变形网格越来越明显;中间变形区的网格分布更加密集;尾部试件上翘角度出现小幅度变化。

4—8 道次的网格总体变化趋势与第 3 道次一样,都是头部不断重复被压平的过程,应变不断积累;中间变形区网格间隙越来越小,表明剪切塑性变形影响逐渐加强;尾部随着道次的增加不断出现小幅度上翘. A 路径 ECAP 工艺每道次试件取出后,不经过旋转直接放入通道进行下一道次挤压,是出现这种规律的主要原因。

### 2.2 挤压道次对挤压载荷的影响

为考察挤压载荷大小变化的根本原因,对挤压载荷和翘曲角度进行联合分析. 通过分析金属流动性发现,试件发生翘曲现象的主要原因是试件内外转角处金属流动速度不一致. 而影响试件金属流动性的主要因素是试件的强度、表面材料状态和试件尾部拐过内角发生翘曲现象后受到的下通道尺寸限制. 实验时,使用二硫化钼润滑试件,模拟中设置摩擦系数为 0.1,且模具尺寸不随挤压道次的变化而改变,所以试件翘曲角度的变化主要受试件强度的制约. 当试件强度偏高时,尾部塑性变形抵抗力较大,翘曲角度变化就会偏小;当试件强度偏低时,尾部塑性变形抵抗力较小,翘曲角度变化就

会偏大. 图 3 反映的是 8 道次挤压的平均载荷与翘曲角度之关系. 由图 3 可以看出,翘曲角度在 1—2 道次大幅度上升,在 3 道次保持不变,3 道次后呈现缓慢上升趋势,这说明,在经过 2,3 道次 ECAP 后试件强度显著提高,3 道次后试件强度会下降。

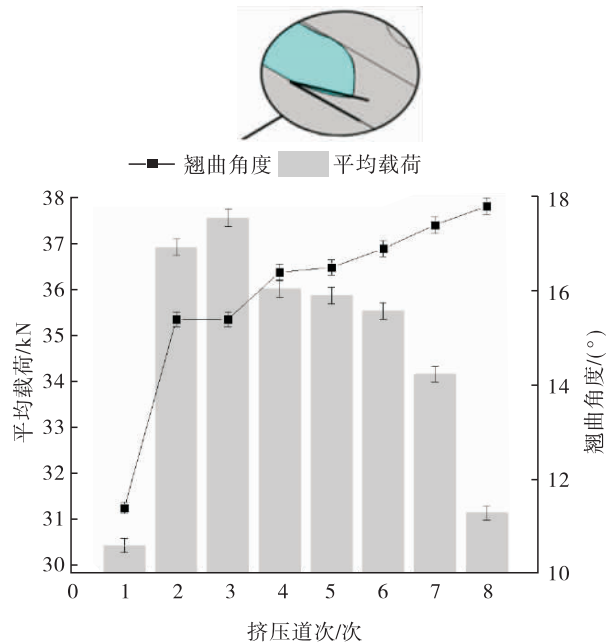


图 3 8 道次挤压的平均载荷与翘曲角度之关系  
Fig. 3 Relationship between the average load and warpage angle of 8-pass extrusion

在前 3 道次,平均载荷总体呈上升趋势,并在 3 道次达到平均载荷峰值 37.5 kN,4 道次后开始出现下降趋势. 平均载荷在 2 道次上升最为剧烈,8 道次下降最为迅速. 3 道次之前平均载荷与翘曲角度正相关,3 道次后转变为负相关. 综合上述分析发现,当试件强度增大时,平均载荷与翘曲角度正相关,强度减小时转变为负相关. 这种强度随着道次增加呈现先增大后减小的现象,在业内其他学者的实验研究中也发现. 田佳等<sup>[16]</sup> 在研究 ECAP 对 7075 铝合金组织与力学性能的影响时发现:1 道次 ECAP 后铝合金的抗拉强度增加较大,第 2 和 3 道次趋于平缓,4 道次后抗拉强度开始减小. 这

说明试件在 ECAP 过程中,随着挤压道次的增加,其强度会出现先增大后减小的趋势.李娇等<sup>[17]</sup>通过研究发现,这种现象主要是因为,在试样挤压道次增加后,晶粒进一步细化并产生更多的晶界,具有较高层错能的铝合金又易导致位错出现交错、滑移、攀移,造成位错堵塞和位错割阶进而增大试件强度.金属存在动态回复与再结晶的过程,使得位错逐渐消失.所以当位错湮灭量超过位错增殖时,试件强度开始减小.

综上所述,挤压平均载荷与翘曲角度变化的关系由试件强度决定,3道次前变化关系为正相关,3道次后变化关系为负相关.试件强度变化造成挤压平均载荷会随着道次的增加出现先上升后下降趋势.实验时选用 A 路径 ECAP 制备 2024 铝合金、挤压 3 道次,所得试件强度较好.

### 2.3 挤压道次对等效应变的影响

ECAP 是通过重复多次挤压获得累积等效应变而使晶粒细化的加工工艺.等效应变是直接影响晶粒细化和试件性能的重要参数,其均匀性影响试件力学性能和晶粒尺寸分布.等效应变均匀性由某一应变在整体应变区域的占比和不同应变沿试样的径向分布决定.图 4 为 A 路径 8 道次挤压后试件纵向截面的等效应变云图.

由图 4 可以看出,试件内转角附近的等效应变值偏高,各道次等效应变值由内转角附近

到外转角附近依次递增,并在 2 道次后呈现明显的层状分布;各道次试件尾部并没有产生完整剪切变形,造成其等效应变一直呈现偏小状态;各道次试件的头部同样未产生剪切变形,但在 2 道次后呈现出比尾部应变大的趋势,其主要原因是第 1 道次后,试件头部出现的尖端面会经过一次弯曲塑性变形,在此过程中会积累大量的应变.在挤压过程中,因摩擦力的作用,试件内转角区域会出现不连通高应变区.从整体来看,试件等效应变值与挤压道次成正比.由图 4 还可以看出,前 3 道次试件应变径向分布相对较少,3 道次后试件沿径向分布的等效应变增加.根据影响试件应变均匀性的原因可得,试件在 3 道次后等效应变均匀性开始下降.

### 3 实验验证

验证实验选用尺寸 10 mm × 10 mm × 70 mm 的 2024 铝合金为试件材料.选用内角为 120°,外角为 25°的 ECAP 模具在室温下进行试件材料 A 路径的 ECAP 实验.实验前试件表面涂抹二硫化钼润滑剂,以降低挤压通道与试件表面的摩擦力,确保试件能顺利从通道内挤出. ECAP 实验设备如图 5 所示.实验得到的 1,4,8 道次试件与模拟所得金属外形如图 6 所示.

由图 6 可以发现,实验所得金属外形图与模拟所得有限元网格图的形状基本一致.这证明了有限元数值模拟设计正确,分析结果可信.

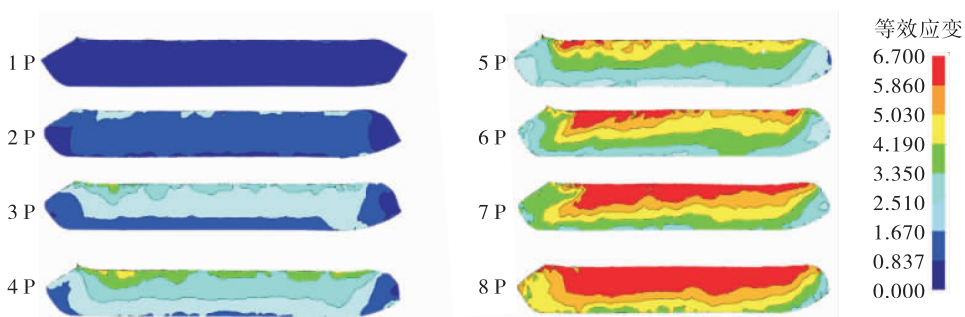


图 4 A 路径 8 道次挤压后试件纵向截面等效应变云图

Fig. 4 Equivalent strain nephogram of longitudinal section of specimen after 8-pass extrusion in route A

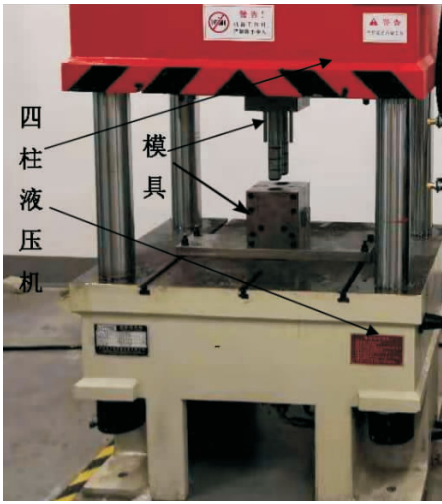


图5 ECAP 实验设备

Fig.5 Experimental equipment of ECAP

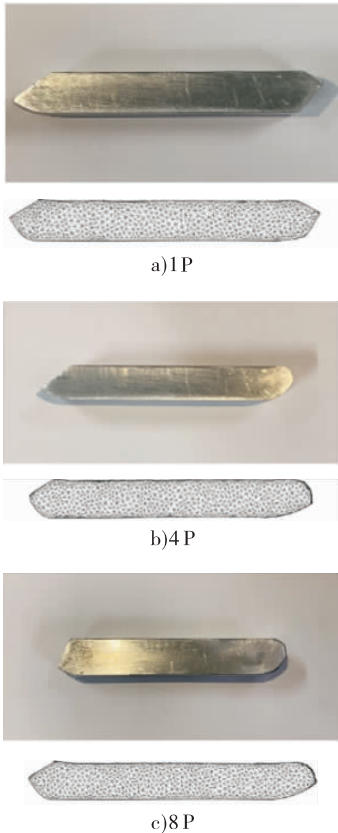


图6 实验中1,4,8道次试件与模拟金属外形

Fig.6 Sharp of specimen and simulated metal of 1,4,8-pass experiments

### 4 结论

采用 Deform-3D 有限元软件对 2024 铝合

金进行数值模拟与 A 路径 8 道次 ECAP 实验研究,分析试件在不同挤压道次下变形过程中的金属流动性、挤压载荷和等效应变的变化情况,得到以下结论.

1) 试件与冲头接触区域在 1 道次后呈现弯曲变形的金属流动特性,中部区域呈现剪切变形金属流动特性,尾部区域因试件内外转角区域金属流动速度不一致而出现翘曲特性.试件的金属流动性会随着挤压道次的增加出现规律性变化,其中头部弯曲变形随道次增强,中部剪切变形沿剪切带更加密集,尾部翘曲角度总体呈现上升趋势.

2) 挤压载荷随着挤压道次出现先上升后下降趋势.3 道次前强度上升,载荷与翘曲角度正相关;3 道次后强度下降,载荷与翘曲角度负相关.说明挤压载荷的变化受试件强度的影响.

3) 试件等效应变值的大小与挤压道次成正比关系,且等效应变值从试件靠近内转角区域出现由大到小的层状分布,3 道次后出现应变分布均匀性下降的趋势.

本研究的结论可为 ECAP 工艺参数优化提供理论依据,但由于力学性能变化是由材料微观组织演变所导致的,因此建立微观组织与宏观力学性能模型,用微观组织演变结合宏观力学性能优化 ECAP 工艺,以获得组织控制参数,将是今后的重点研究方向.

### 参考文献:

[1] 冯美斌. 汽车轻量化技术中新材料的发展及应用[J]. 汽车工程,2006(3):213.

[2] 杨守杰,戴圣龙. 航空铝合金的发展回顾与展望[J]. 材料导报,2005(2):76.

[3] 刘英,李元元,张大童. 金属材料的等通道转角挤压研究进展[J]. 材料科学与工程,2002(4):613.

[4] SEGAL V M. Materials processing by simple shear [J]. Materials Science and Engineering A,

- 1995,197(2):157.
- [5] VALIEV R Z, LANGDON T G. Principles of equal-channel angular pressing as a processing tool for grain refinement [J]. *Progress in Materials Science*, 2006, 51(7):881.
- [6] XU C, FURUKAWA M, HORITA Z, et al. The evolution of homogeneity and grain refinement during equal-channel angular pressing: A model for grain refinement in ECAP [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2005, 398(1/2):66.
- [7] 杨栋, 陈文琳, 吴跃. 等通道转角挤压 7075 铝合金动态再结晶组织晶粒度预报与性能分析 [J]. *机械工程学报*, 2014, 50(6):87.
- [8] 胡丽娟, 彭颖红, 张少睿, 等. 基于位错演化模型纳米晶块体材料晶粒的演变 [J]. *塑性工程学报*, 2008, 15(6):129.
- [9] 刘腾, 张伟, 吴世丁, 等. 双相合金 Mg-8Li-1Al 的等通道转角挤压 I: 挤压过程中的变形方式 [J]. *金属学报*, 2003(8):790.
- [10] KAWASAKI M, HORITA Z, LANGDON T G. Microstructural evolution in high purity aluminum processed by ECAP [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2009, 524(1/2):143.
- [11] 刘英, 陈维平, 张卫文, 等. 等通道转角挤压后 AZ31 镁合金的微观结构与性能 [J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2004(9):50.
- [12] 汪建敏, 许晓静, 石凤健, 等. 等径角挤压获得超细晶铜的研究 [J]. *热加工工艺*, 2004(7):6.
- [13] 汪建敏, 周孔亢, 陆晋, 等. 层错能在剧烈剪切变形时对晶粒细化的影响 [J]. *机械工程学报*, 2008, 44(11):126.
- [14] 郭廷彪, 丁雨田, 胡勇, 等. 大塑性变形过程中单晶和多晶铜的组织演变及变形机理研究 [J]. *铸造技术*, 2009, 30(9):1164.
- [15] IWAHASHI Y, WANG J, HORITA Z. Principle of equal-channel angular peessing for the processing of ultra-fine grained materials [J]. *Scripta Materialia*, 1996, 35(2):143.
- [16] 田佳, 李建平, 白亚平, 等. 等通道挤压对 7075 铝合金组织与力学性能的影响 [J]. *材料热处理学报*, 2016, 37(7):61.
- [17] 李姣, 杨刚. 挤压道次对航空用工业纯铝 ECAP 组织和性能的影响 [J]. *热加工工艺*, 2019, 48(3):176.