

采用等径角挤扭工艺制备块体超细晶铝

王晓溪^{1,2}, 薛克敏³, 李 萍³

- (1. 徐州工程学院 机电工程学院, 徐州 221111;
2. 江苏省大型工程装备检测与控制重点建设实验室, 徐州 221111;
3. 合肥工业大学 材料科学与工程学院, 合肥 230009)

摘 要: 采用数值模拟和实验分析方法, 对 200 °C 条件下纯铝粉末材料 1~4 道次 A 路径等径角挤扭(ECAPT)变形致密行为、晶粒细化机制以及组织和性能演变规律进行研究, 制备出组织和性能优良的块体超细晶铝。结果表明: 随变形道次的增加, 材料内部所累积的应变不断增大, 出现了加工硬化现象, 挤压载荷峰值不断上升。ECAPT 工艺有效提高了变形材料内部的静水压力, 使坯料整体致密程度和变形均匀性得到明显改善。纯铝组织发生了连续动态再结晶, 晶粒在不断被细化的同时, 其取向差进一步增大, 最终在材料内部形成了细小、均匀且被大角度晶界包围的等轴再结晶组织。4 道次 ECAPT 变形后, 组织平均晶粒尺寸约为 600 nm, 抗拉强度达到 123.3 MPa。

关键词: 超细晶材料; 等径角挤扭; 多道次变形; 组织; 性能

中图分类号: TG376

文献标志码: A

Fabrication of bulk ultrafine-grained pure aluminum using multi-pass equal channel angular pressing and torsion

WANG Xiao-xi^{1,2}, XUE Ke-min³, LI Ping³

- (1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Xuzhou Institute of Technology, Xuzhou 221111, China;
2. Jiangsu Key Laboratory of Large Engineering Equipment Detection and Control, Xuzhou 221111, China;
3. School of Materials Science and Technology, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: The deformation and densification behaviors of pure Al powders during 1–4 passes equal channel angular pressing and torsion (ECAPT) under route A at 200 °C were investigated using numerical simulation and experiment investigation. In addition, both grain refinement mechanism and the evolution of microstructure and mechanical properties were deeply discussed. The bulk ultrafine-grained pure aluminum with fine microstructure and enhanced mechanical properties was fabricated. The results show that with the increasing pass number of ECAPT, the imposed strain increases. Due to the work hardening, the peak load also increases. As the hydrostatic pressure increases under multi-pass ECAPT, residual porosities in the powder consolidates are effectively shrunk and closed, which contributes to the improvement of deformation uniformity and density of the compacts. During ECAPT process, continuous dynamic recrystallization occurs. As the number of ECAPT passes increases, grains are further refined and mechanical properties are largely enhanced. After 4 passes of ECAPT, the microstructure consists of homogeneous ultrafine grains of 600 nm in size and equiaxed in shape with high angle grain boundaries. Moreover, the tensile strength reaches 123.3 MPa.

Key words: ultrafine grained material (UFG); equal channel angular pressing and torsion (ECAPT); multi-pass deformation; microstructure; property

基金项目: 江苏省高校自然科学研究面上项目(13KJD430005); 江苏省大型装备检测与控制重点实验室开放性课题(JSKLEDC201309)

收稿日期: 2013-12-10; **修订日期:** 2014-03-12

通信作者: 王晓溪, 讲师, 博士; 电话: 0516-83105376; E-mail: wx19851109@sina.com

超细晶材料(Ultrafine-grained materials, UFG)因其具有较优的力学性能和良好的应用前景,近年来受到了科学界的广泛重视。大塑性变形法(Severe plastic deformation, SPD)是当今制备块体超细晶材料的主要方法,具有快速、经济、有效等特点^[1-3]。它通过向材料内部引入大应变而细化组织,可以在较低温度下获得具有超细晶结构甚至纳米晶结构的块体材料。其中,等径角挤压法(Equal channel angular pressing, ECAP)是大塑性变形法中最基础、最典型、最有效的代表性技术之一^[4-6]。近几年来,根据生产实际的需要,学者们又相继提出并发展了一些新型、复合大塑性变形技术,如挤扭法(Twist extrusion, TE)^[7]、等径角挤压-挤压法(Equal channel angular pressing-forward extrusion, ECAP-FE)^[8]、挤压-等径角挤压法(Forward extrusion-equal channel angular pressing, FE-ECAP)^[9]、背压-等径角挤压法(Back pressure-equal channel angular pressing, BP-ECAP)^[10]、螺旋通道等径角挤压法(Twist channel angular pressing, TCAP)^[11]、等径角挤扭法(Equal channel angular pressing and torsion, ECAPT)^[12]等。

这些复合大塑性变形工艺虽然表现出了不同的变形形式,但都是将 ECAP 技术的纯剪切变形扩展到了简单剪切变形,其实质均是合理组合拉、压和扭、弯等变形工艺过程。其中, ECAPT 工艺是在 ECAP 和 TE 基础上发展起来的一种新型大塑性变形技术。由于螺旋通道的存在,它实现了“一次挤压,两次剪切”的复合变形目的,材料的应变累积效果和变形均匀程度均得到了明显改善^[13]。此外,由于坯料横截面尺寸和形状在每道次变形前后均不发生变化,也为进行多道次 ECAPT 变形提供了可能性。

然而,鉴于 ECAPT 变形过程较为复杂,涉及的工艺参数众多,且实验过程难以控制,目前有关 ECAPT 工艺尤其是材料在多道次 ECAPT 变形过程中变形行为的研究鲜见报道。为此,本文作者采用数值模拟和实验研究相结合的方法,在 200 °C 条件下,通过对纯铝粉末材料进行 A 路径下 1~4 道次的 ECAPT 变形,研究多道次 ECAPT 变形过程中材料的变形致密行为、晶粒细化机制以及组织和性能演变规律,以期制备出组织和性能优良的块体超细晶铝。

1 多道次 ECAPT 变形过程数值模拟

1.1 有限元模型的建立

采用可压缩刚塑性热力耦合有限元技术,基于

DEFORM-3D 软件分析平台,对纯铝粉末材料 1~4 道次的 ECAPT 变形过程进行三维数值模拟。为了提高粉末材料的塑性变形能力,采用等温 ECAPT 工艺,模具和坯料的初始温度为 200 °C。方形坯料尺寸为 10 mm×10 mm×60 mm,初始相对密度设为 0.75。ECAPT 模具内角 $\Phi=90^\circ$,外角 $\psi=37^\circ$,内角圆弧长度 $r=5$ mm,过渡距离 $L_1=15$ mm,螺旋通道长度 $L=30$ mm。不考虑冲头和凹模的变形,将其视为刚体。考虑实际变形中的润滑条件,接触关系选用常剪切摩擦模型,摩擦因数为 0.05。坯料变形路径为 A(相邻道次间试样不发生旋转),挤压速度为 1 mm/s。最终建立的有限元模型示意图如图 1 所示。

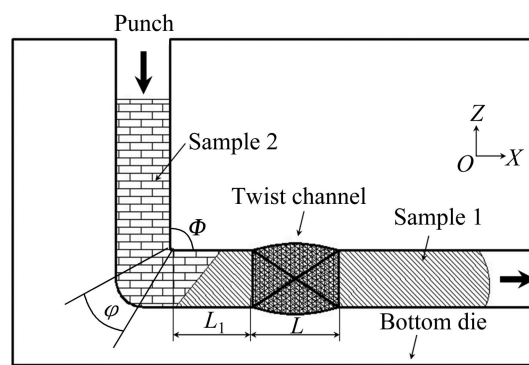


图1 ECAPT 工艺有限元模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of FEM for ECAPT process

1.2 挤压载荷变化

图 2 给出了峰值载荷与 ECAPT 变形道次之间的变化关系。

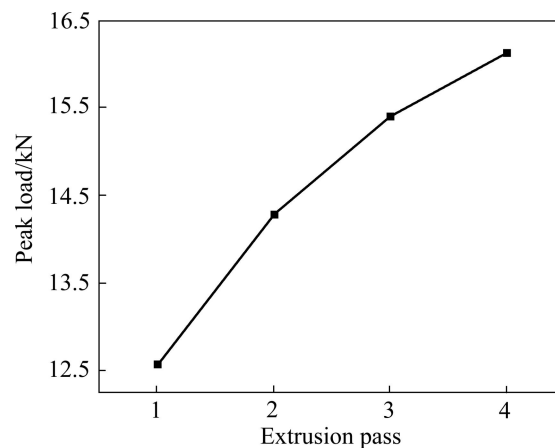


图2 在各道次 ECAPT 变形中坯料峰值载荷的变化

Fig. 2 Peak load of billet under different ECAPT passes

由图 2 可以看出,随着挤压道次的增加,由于坯料内部所累积的应变不断增大,坯料出现了加工硬

化现象,变形越来越困难,因此,挤压载荷逐渐上升。4道次变形后,挤压载荷峰值为16.1 kN,比单道次变形的提高了约28.2%。

1.3 等效应变变化

为了更加清楚地表示变形坯料在各道次 ECAPT 变形后的等效应变分布情况,截取变形试样中心纵截面上的一系列跟踪点进行观察分析,结果如图3所示。

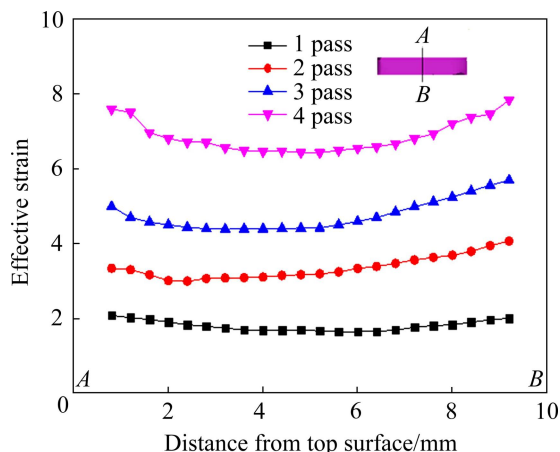


图3 各道次下坯料纵截面的等效应变

Fig. 3 Effective strain of billet on longitudinal plane at different ECAPT passes

观察图3发现,一方面随着变形过程的继续进行,坯料变形程度不断增大,材料内部所累积的等效应变逐渐增加;另一方面,由于坯料头尾端部的小变形区域范围逐渐缩小,等效应变的分布梯度也在不断减小,坯料的整体变形均匀性显著提高。4道次变形结束时,除去靠近试样上下表面的边缘部分,变形坯料内部主要变形区域内的等效应变分布呈现较为均匀的状态。

坯料变形的均匀程度直接决定变形材料内部组织结构的均匀性,进而影响材料的力学性能和热稳定性。因此,为保证所获取的超细晶材料组织稳定、性能优越,并具有工业使用价值,应尽可能地提高试样的变形均匀性。为了定量、准确和直观地表征不同变形道次下坯料整体的变形均匀程度,定义截面的变形均匀性系数如下^[14-15]:

$$\alpha = \frac{\varepsilon_{\max} - \varepsilon_{\min}}{\varepsilon_{\text{ave}}} \quad (1)$$

式中: α 为变形均匀性系数, $\varepsilon_{\max}$ 、 $\varepsilon_{\min}$ 和 ε_{ave} 分别为截面内的最大、最小及平均等效应变。选取变形坯料中心纵截面内的一系列跟踪点,利用式(1)计算各道

次下坯料的变形均匀性系数,连同各道次平均等效应变数值,得到图4所示的结果。

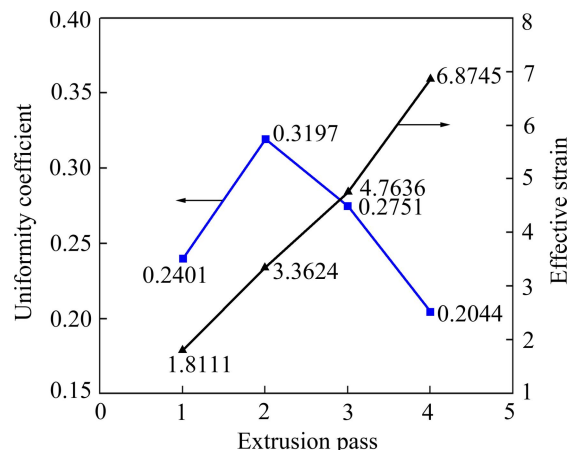


图4 1~4道次变形后坯料内部等效应变和变形均匀性系数

Fig. 4 Effective strains and factors of deformation uniformity of billet after 1-4 ECAPT passes deformation

从图4可以看出,随着挤压道次的增加,坯料的变形均匀性不断发生变化,呈现出“先上升后下降”的变化趋势。2道次 ECAPT 变形后,坯料变形均匀性系数最大,表明此时坯料内部变形均匀性程度最差。此后,坯料的变形均匀性逐渐提高,4道次变形后变形均匀性系数达到最小,表明此时坯料内部变形较为均匀,达到了最佳状态。

这是因为,虽然A路径下各道次之间坯料自身不发生旋转,但由于 ECAPT 工艺螺旋通道的存在,坯料每道次变形后,空间位置都相对于前一道次旋转了90°。因此,4道次 ECAPT 变形后,坯料完成了一个周期360°的旋转,各个平面均同时受到了剪切变形作用,变形均匀程度大大提高。

2 多道次 ECAPT 变形实验

为验证上述模拟结果的可靠性与准确性,在自行设计的 ECAPT 模具上进行A路径下纯铝粉末材料1~4道次 ECAPT 变形实验,变形温度为200℃,挤压速度为1 mm/s。此外,为减小变形过程中变形坯料与模具内壁之间的摩擦,全程采用MoS₂-石墨复合润滑剂进行润滑。

2.1 试样宏观变化

图5所示为1~4道次 ECAPT 变形结束后坯料的宏观照片。可以看出,200℃条件下坯料各道次的变形较为顺利,变形后坯料整体完好,表面质量较好,

均未出现裂纹、断裂、破坏等现象。仔细观察还可以发现, 随着变形的继续进行, 由于模具型腔内工作条件逐渐恶化以及材料变形抗力的不断增大, 坯料变形难度逐渐加大, 头尾两个端面的斜度越来越大, 表面的“挤痕”愈发明显。

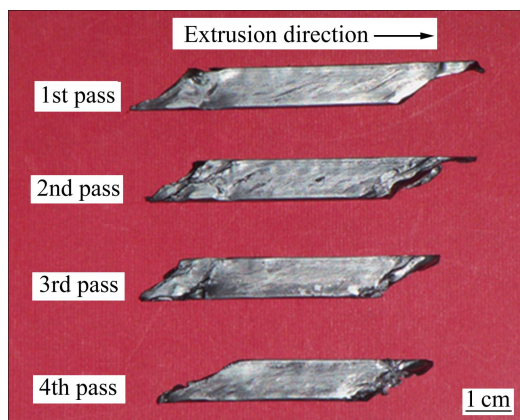


图 5 各道次下 ECAPT 变形坯料的宏观照片

Fig. 5 Macroscopic photos of billet under different ECAPT passes

2.2 致密程度分析

图 6 所示为 1~4 道次 ECAPT 变形后坯料流动面上组织的 SEM 像。

可以看出, ECAPT 工艺对纯铝粉末材料具有极强

的致密效果。在 ECAPT 变形过程中, 材料内部残余孔隙的大小和形状均发生了改变。其中, 材料致密程度的大幅改善在单道次 ECAPT 变形后最为明显。经 1 道次变形后, 坯料主要变形区内的大量微孔隙已基本消失, 组织内部少量残余孔隙呈狭长的条带状分布于晶界结合处。随着变形道次和累积应变量的增加, 坯料致密程度进一步提高, 残余孔隙的数目和大小不断减少。经 3 道次 ECAPT 变形后, 坯料整体接近于完全致密, SEM 选区的视场内已很难观测到残余孔隙的存在。采用排水法测得 4 道次 ECAPT 变形后, 坯料的相对密度为 0.99757。分析认为, 材料整体致密程度的提高主要归因于较大的塑性剪切应变和较高的静水压力。在这两个有利因素的双重作用下, 残余孔隙不断地收缩、减小, 最终实现有效焊合^[16-17]。

2.3 微观组织演变

纯铝粉末在 200 °C 下经 1~4 道次 ECAPT 变形后微观组织的 TEM 像如图 7 所示。

由图 7 可见, 经 1 道次 ECAPT 变形后, ECAPT 变形剧烈的剪切作用使材料内部产生了大量近似平行的剪切带(见图 7(a)), 组织具有明显的方向性。原始晶粒被剪切拉长成细长的条带状, 晶粒内部位错密度很高, 晶界处大量位错相互缠结, 形成了由位错界面构成的亚结构即位错胞。

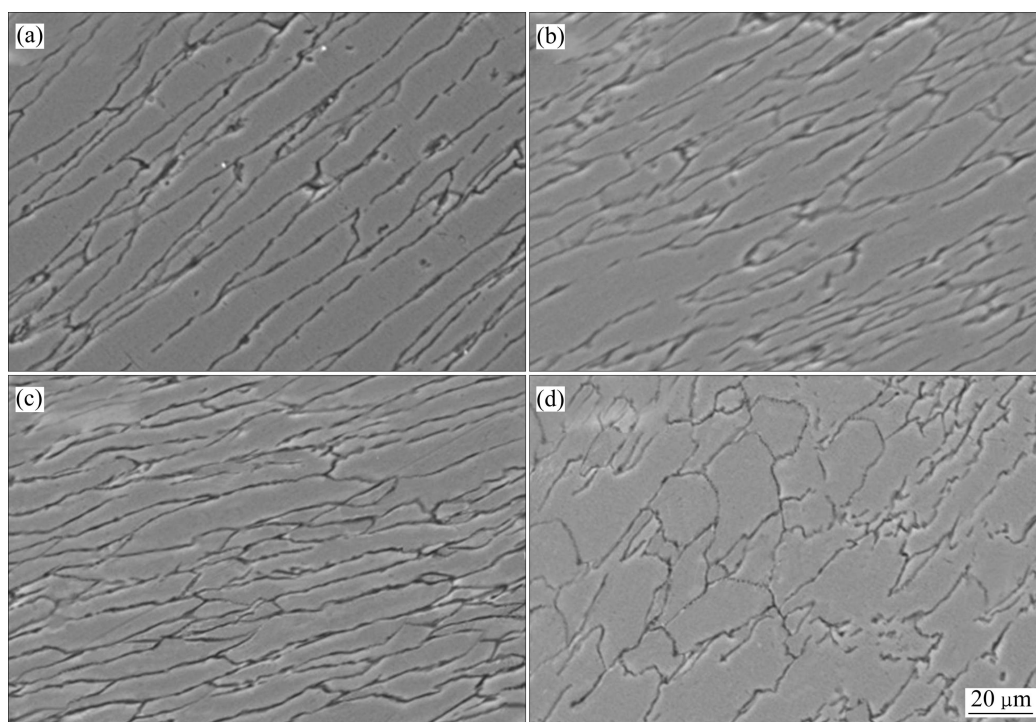


图 6 不同道次 ECAPT 变形后坯料组织的 SEM 像

Fig. 6 SEM images of billet under different ECAPT passes: (a) 1 pass; (b) 2 passes; (c) 3 passes; (d) 4 passes

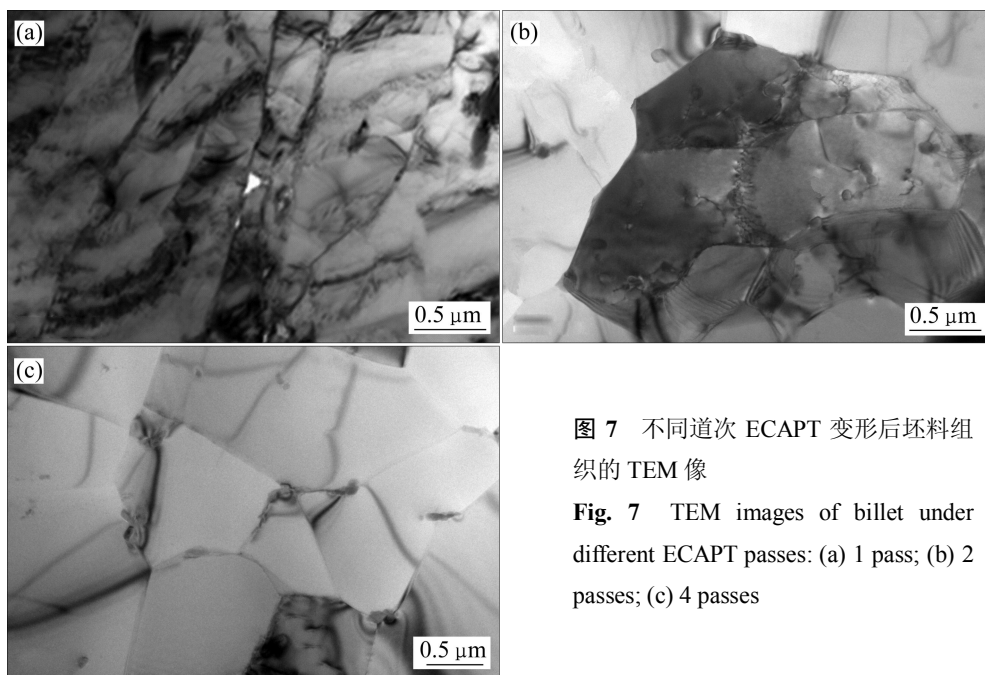


图 7 不同道次 ECAPT 变形后坯料组织的 TEM 像

Fig. 7 TEM images of billet under different ECAPT passes: (a) 1 pass; (b) 2 passes; (c) 4 passes

随着变形道次的增加,不同滑移方向上的变形晶粒交织在一起,在位错的攀移、交滑移等作用下,材料内部产生了许多新的界面结构。拉长的条带状晶粒不断被小角度的亚晶界隔断,长度减小,形状趋于等轴状(见图 7(b))。此外,由于铝为高层错能金属,在 ECAPT 变形过程中容易发生动态回复,组织中的位错密度逐渐降低。仔细观察还可以发现,某些晶粒边界还出现了较宽的等厚条纹,这说明显微组织由超细晶粒组成,具有大角度晶界。

经 4 道次 ECAPT 变形后,变形组织的取向性消失。纯铝晶粒内部变得比较干净,几乎没有位错存在。与此同时,胞壁上的位错缠结也逐渐被平直而清晰的新界面取代(见图 7(c))。此时,小角度晶界逐渐向大角度晶界转化,亚晶粒逐渐转化为晶粒,最终在材料内部形成了大量尺寸细小、分布均匀且具有大角度晶界结构的等轴超细晶组织,平均晶粒尺寸约为 600 nm。

2.4 组织取向分布

研究表明^[18],组织中的大角度晶界往往要通过再结晶过程产生。为了表征本次实验中纯铝组织的晶界取向差,采用 EBSD 方法观察 1、2 和 4 道次的 ECAPT 变形组织,结果如图 8 所示。

从图 8(a)中可以看出,经 1 道次 ECAPT 变形后,变形组织为典型的混晶组织。虽然材料内部含有一定比例的大角度晶界,但亚晶界和小角度晶界所占的比例仍然相对较高。这表明 ECAPT 变形过程中新产生

的晶界首先以亚晶界或取向差很小的小角度晶界出现。

随着挤压道次和变形程度的进一步增加,晶粒的大小和分布逐渐趋于均匀,小角度晶界明显减少,大角度晶界所占比例不断增大(见图 8(c))。经 4 道次 ECAPT 变形后,组织在不断被细化的同时,大角度晶界所占比例超过了 70%,平均晶界取向差高达 28.36°。这表明随着剪切应变量的增加,小角度晶界逐渐向大角度晶界转变,并且最终在一定程度上达到了动态平衡。

HUMPHREYS^[19]和 GOURDET 等^[20]指出,如果组织中的大角度晶界比例超过 60%~70%,由于晶界间的相互制约,组织将抵抗退火过程中晶界的长程迁移,因此会发生连续再结晶。据此可以断定,本实验中制备的超细晶纯铝组织如果发生了再结晶,那么其过程应该以连续的方式进行。

结合图 7 观察到的 TEM 组织晶界特征,如薄而平直的界面、晶粒边界上的等厚条纹,本文作者认为在 200 °C 下,纯铝在 ECAPT 变形过程中发生了动态再结晶。此外,由于组织中生成的大角度晶界是通过小角度亚晶界不断增大位向差演化而来,因此,可以推断出纯铝粉末材料在 ECAPT 过程中的动态再结晶类型为连续动态再结晶。

2.5 力学性能分析

从前面的实验结果可以看出,纯铝粉末材料经多

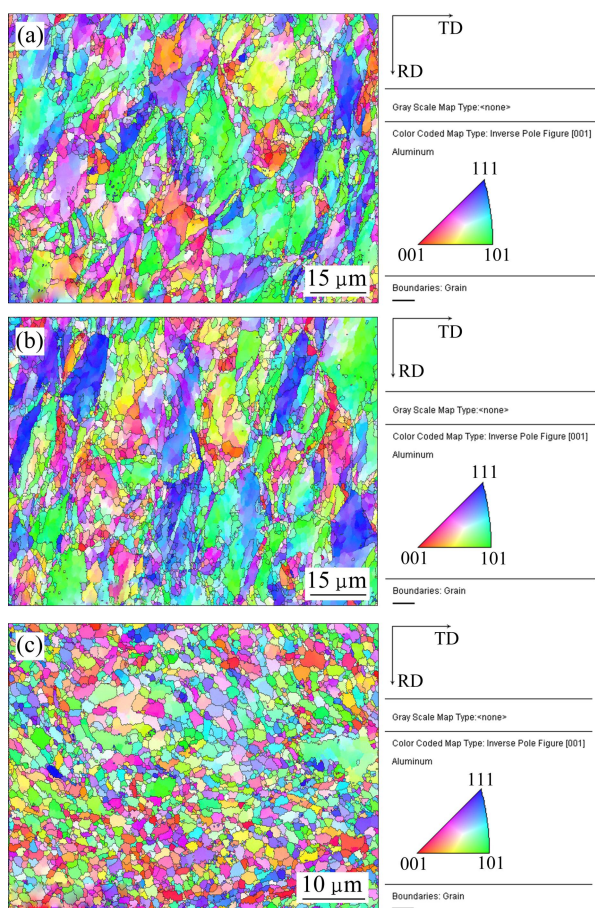


图 8 不同道次下 ECAPT 变形组织的 EBSD 取向成像图

Fig. 8 EBSD orientation maps of billets under different ECAPT passes: (a) 1 pass; (b) 2 passes; (c) 4 passes

道次 ECAPT 变形后, 内部累积了很大的应变, 同时也获得了较为满意的致密和细化效果。由于材料的力学性能与其致密程度和显微组织有着密切的联系, 因此, 所获材料力学性能的优劣便成为了衡量本次实验效果的关键所在。

纯铝粉末材料经过 ECAPT 变形后的室温压缩应力-应变曲线如图 9 所示。从压缩曲线可以看出, 随着变形道次的增加, 由于晶粒细化程度的不断增大, 材料的强度得到了进一步提高。经 4 道次 ECAPT 变形后, 纯铝的抗拉强度高达 123.3 MPa。然而, ECAPT 变形后纯铝的均匀塑性应变相对较小, 几乎都是刚达到屈服点不久后试样便发生失稳而迅速断裂。

对不同变形道次下变形坯料横截面上的显微硬度进行测量, 绘制 ECAPT 变形前后纯铝显微硬度与变形道次之间的关系曲线, 结果如图 10 所示。

可以看出, 变形初期, 纯铝的显微硬度随着 ECAPT 变形累积应变的增加而增加, 1 道次变形后增幅最为明显。随后的两个道次变形后, 显微硬度虽然

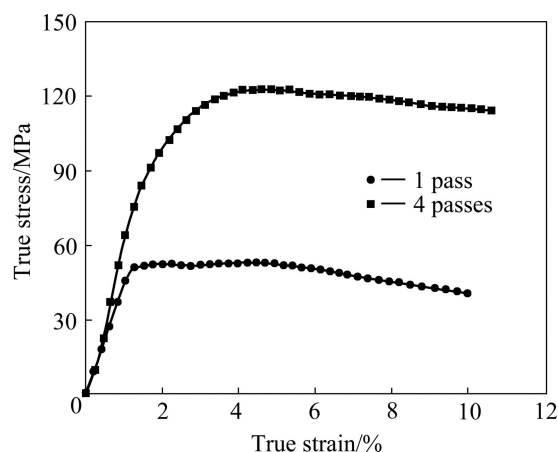


图 9 ECAPT 变形后坯料的真应力-真应变曲线

Fig. 9 True stress-true strain curves of billets after ECAPT deformation

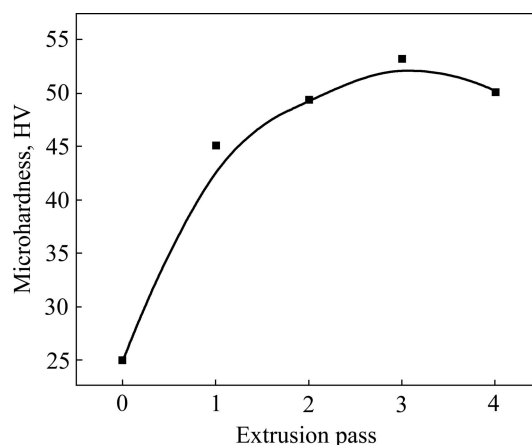


图 10 各道次 ECAPT 变形组织的显微硬度

Fig. 10 Microhardness of billets under different ECAPT passes

继续增加, 但增长的速度已逐渐变缓。当 ECAPT 变形至 4 道次时, 显微硬度略有下降, 约为 48.5HV, 表明随着挤压道次的增加, 试样的硬度已逐渐趋于稳定。由于应力-应变曲线的形状与动态再结晶过程的流变形状十分相似, 因此, 这里考虑材料硬度数值略微下降与变形后期材料出现了动态软化现象(动态回复和动态再结晶)有关。

3 结论

1) 采用可压缩刚粘塑性热力耦合有限元技术, 模拟了 200 °C 纯铝粉末材料在 A 路径下 1~4 道次的 ECAPT 变形过程, 并在自行设计的模具上, 完成了纯

铝粉末材料 1~4 道次的 ECAPT 变形实验, 最终制备出组织和性能良好的块体超细晶铝。

2) 随着变形道次的增加, 材料内部的累积应变量逐渐增大, 变形坯料出现了加工硬化现象, 载荷峰值不断升高。与此同时, 坯料的整体变形均匀性随着变形程度的增大而得到了明显改善。

3) 经 1 道次 ECAPT 变形后, 变形组织的尺寸和分布都不均匀, 沿剪切方向具有明显的择优取向。晶粒内部位错密度较高且组态紊乱, 界面大多以小角度晶界或亚晶界结构为主。随着变形道次的增加, 材料内部的累积应变量逐渐增大, 晶粒不断被新产生的位错界面所分割, 亚晶在尺寸继续减小的同时发生了转动, 取向差进一步增大, 演化形成了清晰平直的大角度晶界。经 4 道次 ECAPT 变形后, 变形组织由细小、均匀且被大角度晶界所包围的等轴再结晶晶粒组成, 平均晶粒尺寸约为 600 nm。TEM 和 EBSD 的分析结果表明, 该过程组织发生了连续动态再结晶。

4) 多道次 ECAPT 变形有效地提高了变形坯料内部的静水压力, 大大促进了粉体材料内部残余孔隙的收缩和闭合, 同时也对改善材料整体变形的均匀性起到了积极的推动作用。经 4 道次 ECAPT 变形后, 变形材料组织完全致密, 力学性能显著提高, 抗拉强度高达 123.3 MPa, 显微硬度约为 48.5HV。

REFERENCES

- [1] LANGDON T G. Processing of ultrafine grained materials using severe plastic deformation: potential for achieving exceptional properties[J]. *Revista de Metalurgia*, 2008, 44(6): 556–564.
- [2] AZUSHIMA A, KOPP R, KORHONEN A, YANG D Y, MICARI F, LAHOTI G D, GROCHE P, YANAGIMOTO J, TSUJI N, ROSOCHOWSKI A, YANAGIDA A. Severe plastic deformation (SPD) processes for metals[J]. *CIRP Annals: Manufacturing Technology*, 2008, 57(2): 716–735.
- [3] 康志新, 彭永辉, 赖晓明, 李元元, 赵海东, 张卫文. 剧塑性变形制备超细晶/纳米晶结构金属材料的研究现状和应用进展[J]. *中国有色金属学报*, 2010, 20(4): 587–596.
KANG Zhi-xin, PENG Yong-hui, LAI Xiao-ming, LI Yuan-yuan, ZHAO Hai-dong, ZHANG Wei-wen. Research status and application prospect of ultrafine grained and/or nano-crystalline metallic materials processed by severe plastic deformation[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2010, 20(4): 587–596.
- [4] 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): 881–981.
- [5] LIU Guo-xin, WEI Wei, WEI Kun-xia. Microstructure and mechanical properties of high purity aluminum processed by equal channel angular processing[J]. *Materials for Mechanical Engineering*, 2008, 32(6): 66–69.
- [6] 李 萍, 薛克敏, 周明智. 铝粉烧结材料等通道转角挤压组织性能演变[J]. *材料研究学报*, 2009, 23(6): 577–581.
LI Ping, XUE Ke-min, ZHOU Ming-zhi. Microstructure and properties evolution and mechanism analysis of sintered aluminum during equal channel angular pressing[J]. *Chinese Journal of Materials Research*, 2009, 23(6): 577–581.
- [7] ORLOVA D, BEYGELZIMER Y, SYNKOVC S, VARYUKHIN V, TSUJI N, HORITA Z. Plastic flow, structure and mechanical properties in pure Al deformed by twist extrusion[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2009, 519(1/2): 105–111.
- [8] PAYDAR M H, REIHANIAN M, BAGHERPOUR E, SHARIFZADEH M, ZARINEJAD M, DEAN T A. Equal channel angular pressing-forward extrusion (ECAP-FE) consolidation of Al particles[J]. *Materials & Design*, 2009, 30(3): 429–432.
- [9] MANI B, PAYDAR M H. Application of forward extrusion-equal channel angular pressing (FE-ECAP) in fabrication of aluminum metal matrix composites[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2010, 492(1/2): 116–121.
- [10] XIA K, WU X, HONMA T, RINGER S P. Ultrafine pure aluminum through back pressure equal channel angular consolidation (BP-ECAC) of particles[J]. *Journal of Materials Science*, 2007, 42(5): 1551–1560.
- [11] KOCICH R, FIALA J, SZURMAN I, MACHÁČKOVÁ A, MIHOLA M. Twist-channel angular pressing: Effect of the strain path on grain refinement and mechanical properties of copper[J]. *Journal of Materials Science*, 2011, 46(24): 7865–7876.
- [12] 王晓溪, 李 萍, 薛克敏, 王 雪, 张 翔. 等径角挤压变形过程中纯铝粉末材料的显微组织与力学性能[J]. *航空材料学报*, 2013, 33(2): 14–18.
WANG Xiao-xi, LI Ping, XUE Ke-min, WANG Xue, ZHANG Xiang. Microstructure characteristics and mechanical properties on consolidation of pure Al particles through equal channel angular pressing and torsion[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2013, 33(2): 14–18.
- [13] 李 萍, 王晓溪, 薛克敏, 张 翔, 王 雪. 纯铝粉末材料单道次等径角挤压(ECAPT)变形的微观组织研究[J]. *中国有色金属学报*, 2013, 23(10): 2779–2784.
LI Ping, WANG Xiao-xi, XUE Ke-min, ZHANG Xiang, WANG Xue. Microstructures of pure Al powder consolidate using equal channel angular pressing and torsion after single pass[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2013, 23(10): 2779–2784.
- [14] 丁雨田, 唐向前, 袁训锋, 胡 勇, 郭廷彪. ECAP 条件下纯铜

- 应变行为的等效应变规律及变形均匀性[J]. 兰州理工大学学报, 2009, 35(2): 1-4.
- DING Yu-tian, TANG Xiang-qian, YUAN Xun-feng, HU Yong, GUO Ting-biao. The equivalent strain pattern and deformation uniformity of strain behavior of pure copper in case of ECAP[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2009, 35(2): 1-4.
- [15] 赵国群, 徐淑波. 等通道弯角多道次挤压工艺累积变形均匀性研究[J]. 机械工程学报, 2005, 41(5): 177-181.
- ZHAO Guo-qun, XU Shu-bo. Study of materials accumulated deformation uniformity of equal channel angular multi-pass pressing process[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(5): 177-181.
- [16] KUBOTA M, WU X, XU W, XIA K. Mechanical properties of bulk aluminium consolidated from mechanically milled particles by back pressure equal channel angular pressing[J]. Materials Science and Engineering A, 2010, 527(24/25): 6533-6536.
- [17] LAPOVOK R, TOMUS D, MUDDLE B C. Low-temperature compaction of Ti-6Al-4V powder using equal channel angular extrusion with back pressure[J]. Materials Science and Engineering A, 2008, 490(1/2): 171-180.
- [18] ZHANG Yue, LIU Jin-qiang, WANG Jing-tao, WU Zhi-bin, LIU Fan. Influence of stacking fault energy on microstructures and mechanical properties of fee pure metals by equal channel angular pressing[C]// Proceedings of TMS 2010 139th Annual Meeting and Exhibition. Warrendale: Wiley, 2010: 803-810.
- [19] HUMPHREYS F J. A unified theory of recovery, recrystallization and grain growth, based on the stability and growth of cellular microstructures (II): The effect of second-phase particles[J]. Acta Mater, 1997, 45(12): 5031.
- [20] GOURDET S, MONTHEILLET F. A model of continuous dynamic recrystallization[J]. Acta Mater, 2003, 51(9): 2685-2699.

(编辑 陈卫萍)