

镦-剪-挤耦合作用下工业纯铝变形行为及组织性能

王晓溪¹, 张翔^{2,3}, 袁峻池¹, 董兴兵¹, 井新宇¹, 张磊¹

(1. 徐州工程学院 机电工程学院, 江苏 徐州 221018)

(2. 江苏徐工工程机械研究院有限公司, 江苏 徐州 221004)

(3. 高端工程机械智能制造国家重点实验室, 江苏 徐州 221004)

摘要: 提出一种集镦粗、剪切和挤压变形于一体的膨胀不等通道转角挤压法 (expansion non-equal channel angular extrusion, Exp-NECAE), 基于理论分析, 采用数值模拟与实验验证相结合的方法, 研究多效应耦合作用下工业纯铝剧烈塑性变形行为, 探讨分析变形材料对微观组织和力学性能的演变规律。结果表明, Exp-NECAE 工艺具有高效率复合成形特点, 坯料的变形过程连续、稳定、协调, 可分为转角区变形、过渡区变形和完全挤出变形 3 个不同阶段; 变形时材料内部处于理想的三向压应力状态, 变形均匀性良好, 单道次累积应变变量高达 2.56, 接近理论计算值。1 道次 Exp-NECAE 变形后, 在镦-剪-挤耦合简单剪切应变诱导下, 工业纯铝晶粒破碎和细化十分明显, 材料内部形成了以细小等轴晶为主的混晶组织, 平均晶粒尺寸约为 2.73 μm 。同时, 材料力学性能提升显著, 平均显微硬度 (HV) 为 558 MPa, 抗拉强度为 161.2 MPa, 伸长率为 13.9%。断口形貌中存在大量小而深的韧窝, 且分布较为均匀, 表现出了良好的韧性断裂的特征。

关键词: 膨胀不等通道转角挤压; 数值模拟; 应变累积; 晶粒细化; 力学性能

中图分类号: TG376; TG146.21

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2021)09-3176-08

近年来, 基于微观组织控制的剧烈塑性变形法^[1] (severe plastic deformation, SPD) 因其强大的晶粒细化能力和对金属材料的巨大改性作用, 备受人们关注和研究, 成为国内外学者的研究热点。其中, 等通道转角挤压 (equal channel angular extrusion, ECAE) 被公认为是当今最具代表性的 SPD 技术之一, 它适合于制备多种块体超细晶金属材料, 具有模具结构简单、工艺适应性强等优点, 应用前景广阔^[2]。但是, ECAE 变形存在晶粒细化和强化极限^[3], 为获得理想的晶粒细化效果, 通常变形道次较多, 工序十分复杂, 生产效率较低, 不利于工业生产^[4]。因此, 迫切需要对其加工方式进行改进。

为满足不同服役环境对超细晶材料性能的苛刻要求, 人们将 ECAE 变形与传统塑性加工技术 (如: 轧制、拉拔、挤压、锻造等) 相结合, 开发出多种具有不同组合方式的复合变形技术, 并在此基础上开展了广泛研究。如: Stolyarov 等^[5]在 400~450 °C 下对工业纯钛进行 8 道次 ECAE+冷轧变形 (压下量为 35%), 获得了含有大量位错胞和亚晶结构的超细晶组织; Asgari 等^[6]利用非等通道横向共挤压法 (non-equal

channel lateral extrusion, NECLE) 实现了镁铝双金属复合棒材低温复合成形。Ensafi 等^[7]将循环挤压与 ECAE 结合, 提出一种新型循环挤压-转角通道挤压法 (cyclic extrusion channel angular pressing, CECAP), 通过 1 道次挤压即获得了晶粒显著细化的 AZ91 镁合金, 并实现了材料强度、硬度和韧性的同步提高。Sepahi-Boroujeni 等^[8]开发设计了一种膨胀等通道转角挤压法 (expansion equal channel angular pressing, Exp-ECAE), 对 AZ80 镁合金进行多道次变形, 研究了变形温度、挤压速度和变形道次等工艺参数对材料强度及塑韧性的影响规律。刘兆华等^[9]采用反复镦压与 ECAE 相结合的复合 SPD 技术, 获得了等轴的超细晶结构铝合金, 研究了复合挤压过程中铝合金微观组织的演变规律。研究表明^[10], 与传统 ECAE 变形相比, 复合变形技术具有高效率、易加工的突出优点, 它们在提高材料累积应变、晶粒细化、强韧化改性以及改善变形均匀性、预防材料塑性损伤等方面发挥了积极作用, 应用和发展潜力巨大。

本研究基于简单剪切变形最优机制, 以多效应耦合剧烈塑性变形为目标, 提出一种集剪切应变和正应

收稿日期: 2020-09-10

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(51905462); 江苏省自然科学基金面上项目(BK20201150); 江苏省“六大人才高峰”高层次人才选拔培养资助项目(GDZB-127); 江苏省高等学校自然科学研究重大项目(19KJA140002)

作者简介: 王晓溪, 女, 1985 年生, 博士, 副教授, 徐州工程学院机电工程学院, 江苏 徐州 221018, 电话: 0516-83105376, E-mail: wx1985109@sina.com

变于一体的膨胀不等通道转角挤压法 (expansion non-equal channel angular extrusion, Exp-NECAE)。以塑性较好的工业纯铝为研究对象, 基于理论分析, 采用有限元模拟与实验验证相结合的方法, 研究了镦-剪-挤耦合作用对工业纯铝塑性变形行为的影响, 在此基础上探讨分析了材料微观组织与力学性能的演变规律, 以期为高性能超细晶材料的工程制备和工业应用提供技术参考。

1 Exp-NECAE 工艺

1.1 工艺原理

研究表明^[11], 传统 ECAE 变形过程中, 模具通道上表面附近材料受拉是导致坯料过早发生塑性损伤, 出现裂纹甚至发生断裂的根本原因。为增大剧烈塑性变形过程中材料内部的静水压力, 减小坯料表面变形开裂倾向, 本研究在对传统 ECAE 模具通道结构(内角为 Φ , 外角为 ψ)进行优化设计的基础上, 提出了一种新型 Exp-NECAE 复合工艺, 其变形原理如图 1 所示。

具体来说, Exp-NECAE 工艺的变形优势主要体现在以下 2 方面: (1) 通过在两等径通道 (直径为 D_0) 交角处增设一大尺寸球形膨胀空腔 (直径为 D_1), 不仅实现了坯料镦、剪、挤复合变形, 而且提高了底部金属的流动性, 有利于减小甚至消除 ECAE 变形“死

区”^[12]; (2) 将水平通道起始段对称设计成梯度渐变挤压变形区 (长度为 L , 倾斜角为 α), 利用模具出口通道“减径”挤压产生的反向背压, 可改善变形过程中材料的受力状态, 增大材料内部的静水压力, 进而提高材料的塑性变形能力, 改善其变形均匀性^[13]。

1.2 累积应变

如前所述, Exp-NECAE 工艺集镦粗、剪切和挤压 3 种变形于一体, 利用球形膨胀空腔与对称梯度渐变挤压结构设计, 通过耦合剪切应变与正应变, 使得坯料在一次挤压过程中, 实现了连续、复合、高效的变形目标, 不仅能够有效预防挤压过程中变形损伤等缺陷过早产生, 而且有利于提高塑性应变累积量。

传统镦粗、挤压变形过程中, 材料内部累积应变一般通过下式进行估算^[14]:

$$\varepsilon = \ln\left(\frac{D_1^2}{D_0^2}\right) = 2\ln\left(\frac{D_1}{D_0}\right) \quad (1)$$

式中, D_1 和 D_0 分别为模具通道大、小截面直径。

ECAE 变形过程中, 在不考虑摩擦影响的条件下, 坯料在模具转角处发生近似纯剪切变形, 其累积塑性应变可采用 Iwahashi 等^[15]提出的理论公式进行估算:

$$\varepsilon_N = \frac{N}{\sqrt{3}} \left[2\cot\left(\frac{\Phi}{2} + \frac{\psi}{2}\right) + \psi \operatorname{cosec}\left(\frac{\Phi}{2} + \frac{\psi}{2}\right) \right] \quad (2)$$

式中, ε_N 为累积应变; Φ 为模具内角; ψ 为模具外切圆角; N 为挤压道次。

Exp-NECAE 变形时, 坯料在外力作用下首先被镦粗, 此时金属不断填充球形空腔, 在转角处同时受到镦粗和剪切 2 种变形作用, 随后被挤至梯度过渡通道, 发生减径挤压, 最终以“料顶料”的方式从水平出口通道被挤出。因此, 整个变形过程中, 坯料的累积塑性应变由镦粗 (ε_1)、ECAE 剪切 (ε_2) 和挤压 (ε_3) 3 种变形叠加而成, 即:

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = N \left\{ 4\ln\left(\frac{D_1}{D_0}\right) + \frac{[2\cot(\frac{\Phi}{2} + \frac{\psi}{2}) + \psi \operatorname{cosec}(\frac{\Phi}{2} + \frac{\psi}{2})]}{\sqrt{3}} \right\} \quad (3)$$

本研究条件下, 模拟和实验采用相同的模具结构, 主要几何参数如表 1 所示。按式 (3) 进行理论估算, 一道次 Exp-NECAE 变形后, 坯料累积应变变量约为 2.68。

表 1 Exp-NECAE 模具几何参数

Table 1 Geometrical parameters of Exp-NECAE die

| $\Phi/(^\circ)$ | $\psi/(^\circ)$ | D_0/mm | D_1/mm | L/mm | $\alpha/(^\circ)$ |
|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|---------------|-------------------|
| 90 | 43 | 15 | 23 | 18 | 24 |

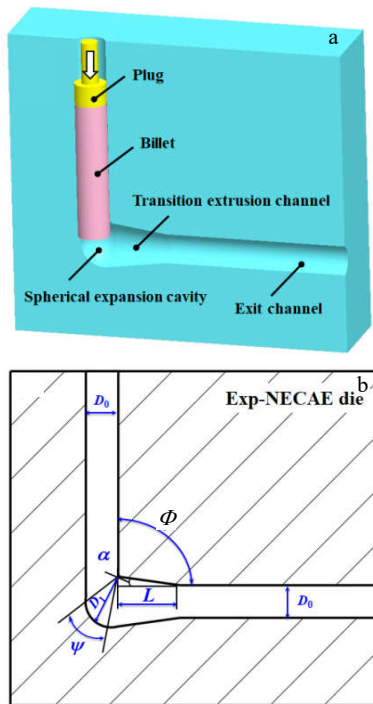


图 1 Exp-NECAE 工艺原理图

Fig.1 Schematic presentation of Exp-NECAE process: (a) three-dimensional structure and (b) die parameters

2 有限元模拟

2.1 有限元模型

利用 DEFORM-3D™ V10.2 三维有限元软件对工业纯铝一道次 Exp-NECAE 变形过程进行数值模拟。坯料定义为塑性体，尺寸为 $\phi 15 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$ ，材料选用程序自带的工业纯铝 (Al-1100)；模具定义为刚体，材料为 H13 钢。采用四节点四面体单元对坯料进行离散，划分网格数为 40 000。模拟过程中，采用网格自适应技术以减小剧烈塑性变形所产生的网格畸变。坯料与模具之间接触为常剪切模型，摩擦系数设为 0.12。Exp-NECAE 变形在室温 (20 °C) 下进行，挤压速度设为 1 mm/s。

2.2 变形过程

图 2 给出了工业纯铝一道次 Exp-NECAE 变形过程中挤压载荷的变化规律。根据载荷-行程曲线变化趋势，可将 Exp-NECAE 变形可分为 3 个不同的阶段：

(1) 转角区变形 I：在冲头外力作用下，坯料头部首先被挤入球形空腔，挤压载荷呈增大趋势。由于球状圆弧过渡平滑，模具内部不存在尖角区，提高了模具外角附近材料的流动性，金属在充填转角区域的同时发生镦粗与剪切复合变形，材料内部塑性应变累积效率较高。

(2) 过渡区变形 II：该阶段坯料从球形空腔出口被挤入梯度过渡通道，发生“减径”挤压变形。此时，在镦-剪-挤 3 种变形耦合作用下，坯料内部处于三向受压，变形程度最大。剧烈的塑性变形使得材料内部变形抗力增大，载荷继续升高，但增幅变缓直至坯料被挤入挤压模口附近，载荷达到峰值，最大值约为 56.5 kN。

(3) 完全挤出变形 III：该阶段坯料依次通过挤压模口，进入水平出口通道，完成全部变形。此时，由于出口通道截面恢复至原始尺寸，已变形材料为正在变形的材料提供了类似于反向背压的作用，有助于材料塑性的发挥，对焊合材料内部裂纹具有积极作用。随着坯料不断被挤出，载荷逐渐趋于稳定，数值基本保持不变。

图 3 为 Exp-NECAE 变形过程中坯料宏观外形的模拟与实物对比图。从图 3 可以看出，坯料的 Exp-NECAE 变形过程连续、协调、稳定，模拟与实验结果吻合度较高。实验挤出坯料外形完整，表面未产生裂纹，2 个特殊区域内 (转角区 I 和过渡区 II) 金属充填效果优良，表明变形过程中材料处于理想的应力状态，具有良好的可加工性。

2.3 等效应变

塑性应变是坯料内部变形程度的直接反映，将最

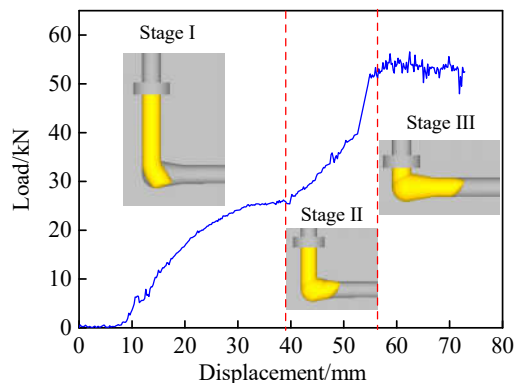


图 2 工业纯铝一道次 Exp-NECAE 变形过程载荷-行程曲线
Fig.2 Load-stroke curves of pure aluminum during a single pass of Exp-NECAE process

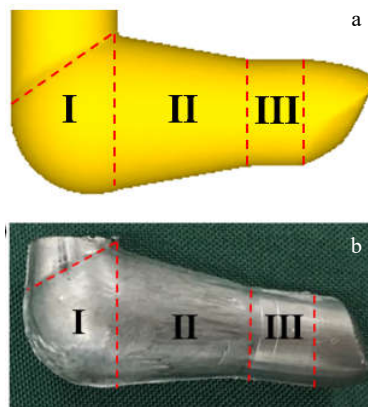


图 3 Exp-NECAE 工艺下变形坯料模拟与实物对比
Fig.3 Comparison between views of the FEM model (a) and the experimental billet (b) during Exp-NECAE process

终决定着材料的晶粒细化水平与变形均匀性^[16]。图 4a 为 Exp-NECAE 变形过程中 (billet 2) 及变形结束后 (billet 1) 坯料中心纵剖面上的等效应变分布云图。可以看出，1 道次变形后，除前后两根坯料头尾相接处 (the joint) 因存在网格畸变出现应变极值外，坯料整体变形均匀性良好，内部形成了一个近似平行四边形的稳定高应变区。

为深入研究多效应耦合作用下材料内部应变累积效果，在变形坯料的不同位置分别截取 3 个横截面 (1-1、2-2、3-3)，并以其中心为原点，等距离 (间隔为 3 mm) 对称选取 9 个跟踪点，得到不同 Exp-NECAE 变形阶段下坯料横截面上的应变分布规律，如图 4b 所示。

由上图可知，随着挤压过程不断进行，坯料依次经过转角膨胀区、梯形过渡挤压区和完全挤出区，材

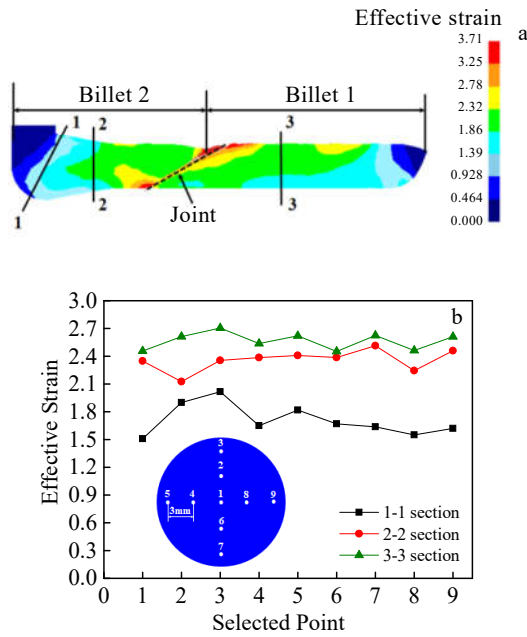


图4 Exp-NECAE 变形坯料内部等效应变分布

Fig.4 Effective strain distribution of Exp-NECAE processed billets on the central longitudinal plane (a) and different transverse planes (b)

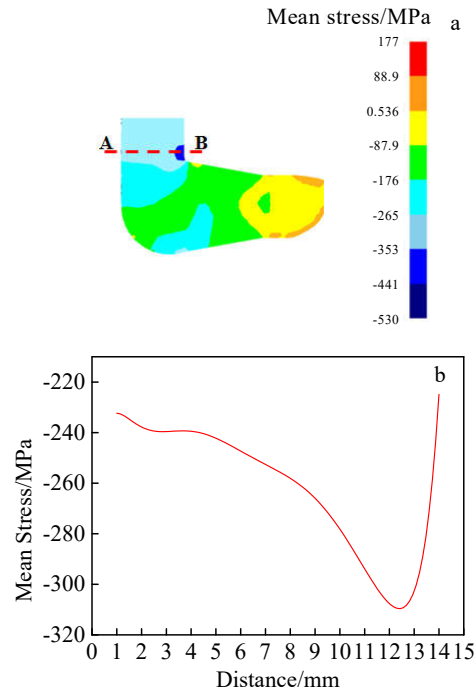


图5 Exp-NECAE 变形坯料内部平均应力分布

Fig.5 Mean stress distribution during Exp-NECAE processes on the central longitudinal plane (a) and along A-B path (b)

料内部累积应变不断增大，变形均匀性也得到了改善。这是由于 Exp-NECAE 工艺突破了传统 ECAE 变形全程通道等截面的思路，最大限度发挥了简单剪切最优变形机制。变形过程中，坯料截面尺寸经历了“扩径-缩径-复原”的连续过渡变化，通过耦合剪切应变与正应变，实现了膨胀、剪切与挤压变形的有效组合，迫使材料在模具通道内产生剧烈的塑性流动。因此，材料仅需较少的挤压道次，便可实现较大的塑性应变累积，有望突破传统 ECAE 晶粒细化极限，进而提高材料的变形均匀性。从图 4b 可以看出，1 道次变形后，材料内部平均累积应变量为 2.56，与式 (3) 理论计算值 ($\epsilon \approx 2.68$) 较为接近，从而证明了本研究模拟结果的可靠性。

2.4 应力状态

图 5 给出了 Exp-NECAE 变形过程中变形坯料内部平均应力分布规律。从图 5 可以看出，在多效应耦合作用下，变形过程中材料内部始终处于理想的三向压应力状态，内部静水压力很高。尤其是靠近模具内角附近的材料，所处应力状态由传统 ECAE 变形的“拉”转变成“压”(见图 5b)，这对于抑制剧烈塑性变形过程中材料的损伤，焊合材料内部变形缺陷，进而提高材料的塑韧性十分有利^[17]。这一点从图 3b 中变形坯料表面完好无损的实验现象中也可以得到证实。

3 实验验证

3.1 实验材料与方法

为进一步验证 Exp-NECAE 工艺细晶强化效果，在 YD32G-100 型四柱液压机上开展工业纯铝室温单道次挤压试验。采用 1060 纯铝铸锭作为实验材料，经线切割加工成 $\Phi 15 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$ 的棒料，然后在 $200 \text{ }^\circ\text{C}$ 下保温 2 h 进行均匀化退火。工业纯铝原始组织粗大，呈近似等轴状，尺寸不均匀，平均晶粒尺寸约为 $200 \text{ }\mu\text{m}$ ，如图 6 所示。实验用 Exp-NECAE 模具为对开式结构，模具型腔结构主要参数见表 1，其半模实物如图 7 所示。为减小摩擦对剧烈塑性变形带来的不利影响，变形前采用 MoS_2 -石墨-机油复合润滑剂对坯料表面和模具内壁进行充分润滑，挤压速度约为 1 mm/s 。

试验结束后，在变形坯料不同部位(转角区 1-1、过渡区 2-2 和挤出区 3-3，见图 7)沿横截面切取样品，进行 EBSD 组织观察和显微硬度测试。EBSD 样品经机械抛光和离子刻蚀制备后，在 TESCAN MAIA3 场发射扫描电镜上进行测试，扫描电镜配有 Oxford NordlysNano EBSD 探头，操作电压为 20 kV ，分析软件为 HKL Channel 5。采用 KB30S 全自动维氏硬度试验机进行硬度测试，施加载荷为 100 g ，保压时间为 15 s ，在所测横截面上等距离选取 9 个测试点(见图

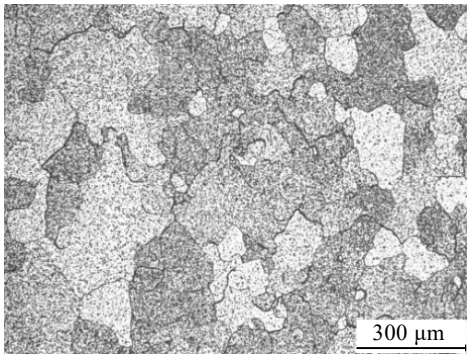


图 6 工业纯铝原始显微组织

Fig.6 Microstructure of as-received commercially pure aluminum

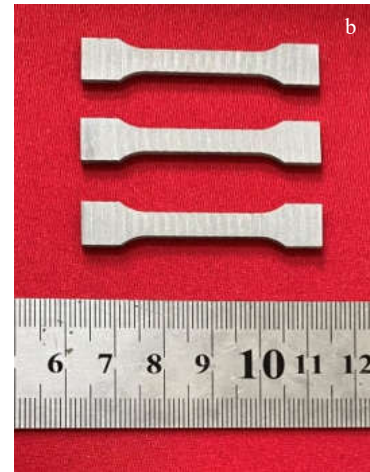
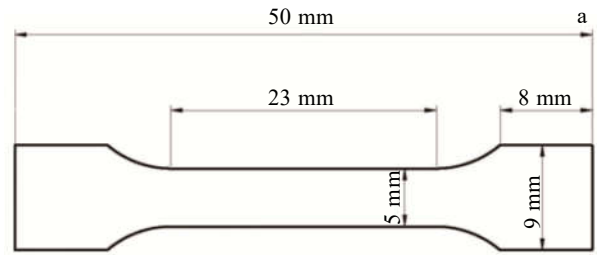


图 8 拉伸试样形状尺寸及实物图

Fig.8 Dimensions (a) and macrophoto (b) of tensile specimens

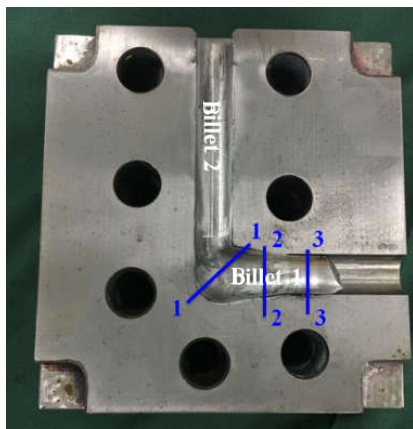


图 7 Exp-NECAE 模具内部变形坯料实物图

Fig.7 Billet processed by Exp-NECAE process before detaching from the die

4b), 取其平均值作为该条件下的显微硬度测试结果。同时, 沿 1 道次变形后坯料的长度方向切取非标准拉伸试样, 试样形状尺寸及实物如图 8 所示。采用 WANCE ETM104C 电子万能试验机进行室温拉伸试

验, 拉伸速率为 2 mm/min。利用 Inspect S50 扫描电镜对拉伸断口进行 SEM 形貌观察。

3.2 微观组织

图 9 为 1 道次 Exp-NECAE 变形过程中, 工业纯铝变形组织的 EBSD 晶粒图。从图 9a 可知, 在转角区镦粗与剪切 2 种变形的耦合作用下, 材料实际受到了简单剪切变形^[18]。因此, 晶粒变形十分明显, 大量晶粒被拉长呈条带状, 发生破碎和细化, 材料内部出现大量平行的板条组织。在梯度过渡区内, 坯料发生减径挤压, 材料塑性变形程度进一步增大。此时, 剧烈的塑性变形使得大量剪切带不断增殖、交叉, 板状组

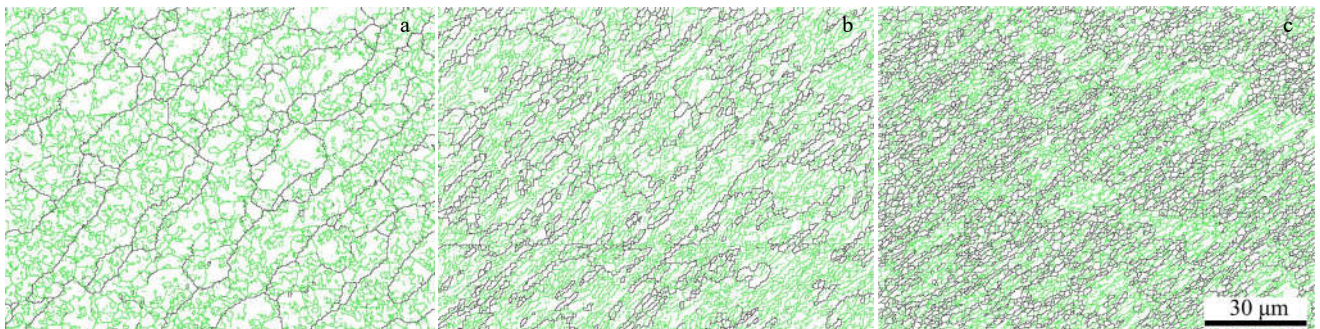


图 9 Exp-NECAE 变形过程中工业纯铝的 EBSD 晶粒图

Fig.9 EBSD images of commercially pure aluminum during Exp-NECAE process: (a) corner area, (b) transition area, and (c) extruded area

织被分割碎化，晶粒变得更加狭长，在条带状晶粒内部与晶界处均产生了一定数目的细小晶粒（见图 9b）。随着挤压的进行，组织中细晶粒所占的比例明显升高，晶界开始变得模糊，亚晶界组织更加明显，但仍存在少部分被拉长的条带状晶粒。这主要是由于 Exp-NECAE 工艺下坯料连续协调变形，变形时间较短，而工业纯铝的堆垛层错能较高，发生动态再结晶需要较大的能量。快速的剧烈塑性变形虽然使得材料内部应变不断累积，造成位错运动，但由此产生的晶格畸变能尚不足以使其充分发生连续动态再结晶^[19]。因此，1 道次结束后，材料内部最终形成了以细小等轴晶为主的混晶组织（图 9c），平均晶粒尺寸约为 2.73 μm。

3.3 显微硬度

图 10 给出了 1 道次 Exp-NECAE 变形过程中，工业纯铝的显微硬度分布。可以看出，Exp-NECAE 变形初期，坯料在球形转角区镦-剪耦合剧烈塑性变形作用下，内部应变迅速累积，材料硬度值急剧升高，从初始退火态的 285 MPa 增加至 468 MPa。随后，梯度过渡通道的挤压变形进一步提高了材料的塑性应变累积效果，硬度值继续增大，但增幅逐渐变缓，变形均匀性得到改善。这是由于坯料此时受到来自出口通道的反向背压作用，材料处于理想的三向压应力状态，塑性保持较好，有利于提高变形均匀性。1 道次 Exp-NECAE 变形后，工业纯铝硬度提升显著，平均显微硬度约为 558 MPa，与初始态相比，增幅高达 95.8%。考虑变形材料的这一强化行为主要与位错变形和细晶强化有关，其变化趋势与前述微观组织和等效应变的分布规律具有较好的一致性。

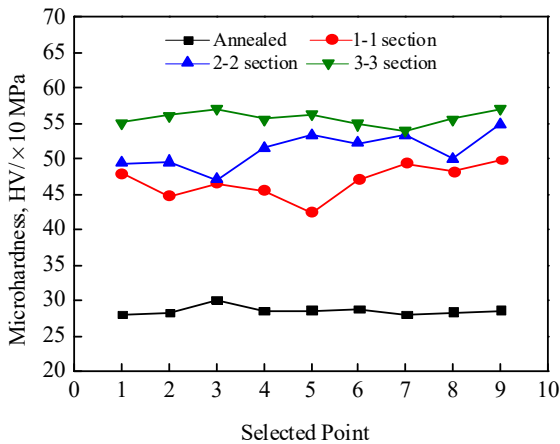


图 10 Exp-NECAE 变形过程中工业纯铝显微硬度分布
Fig.10 Microhardness distribution of commercially pure aluminum during Exp-NECAE process

3.4 拉伸性能

图 11 和图 12 分别为 Exp-NECAE 变形后工业纯铝的室温拉伸曲线和断口形貌。可以看出，工业纯铝经 1 道次变形后，由于材料晶粒显著细化，组织内部晶界数目增多，对位错滑移的阻碍作用增大，材料强度提升明显，抗拉强度由初始 93.8 MPa 提高到 161.2 MPa，增幅高达 71.8%。但塑性延伸率有所下降，约为 13.9%。与传统室温 8 道次 ECAP 工艺下制备的超细晶纯铝相比^[20]，材料抗拉强度和延伸率均得到显著提高。进一步观察图 12 可以发现，变形后工业纯铝拉伸断口内存在许多小且深的韧窝，分布较为均匀。同时，在韧窝周围存在着大量的撕裂棱，表明材料具有良好的韧性断裂特征。

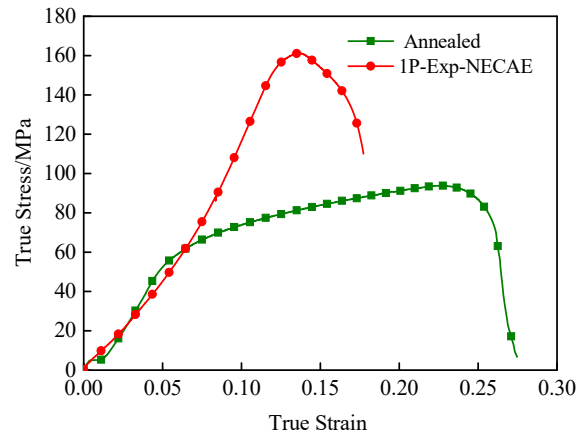


图 11 Exp-NECAE 变形后工业纯铝真应力-真应变曲线
Fig.11 True stress-true strain curves of commercially pure aluminum after Exp-NECAE process

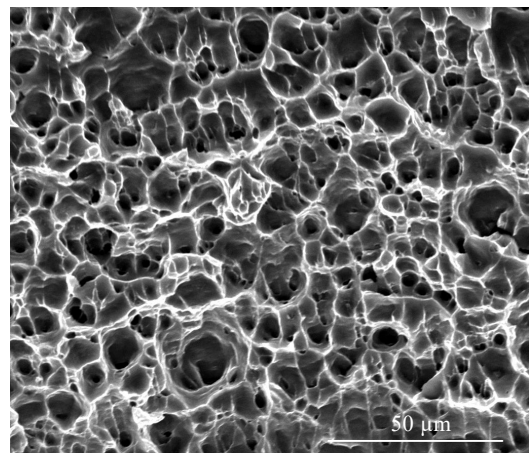


图 12 Exp-NECAE 变形后工业纯铝拉伸断口形貌
Fig.12 Fracture morphology of commercially pure aluminum after Exp-NECAE process

以上研究表明, 本研究提出的新型 Exp-NECAE 工艺简单、有效、可行, 不仅具有复合变形高效率累积塑性应变的突出优点, 而且在协调变形均匀性、调控材料微观组织和改善力学性能等方面优势明显, 具有良好的工业应用前景和广阔的发展潜力。

4 结 论

1) Exp-NECAE 工艺集镦、剪、挤 3 种变形于一体, 通过耦合剪切应变与正应变, 具有高效率复合成形特点。工业纯铝的 Exp-NECAE 变形连续、协调、稳定, 其变形过程可分为转角区变形、过渡区变形与完全挤出变形 3 个不同阶段, 挤压载荷峰值约为 56.5 kN。

2) Exp-NECAE 变形过程中, 坯料在模具通道内发生了剧烈的塑性流动, 内部处于理想的三向压应力状态, 静水压力较高, 变形均匀性良好。1 道次变形后, 材料内部形成了一个近似平行四边形的稳定大应变区, 累积等效应变约为 2.56, 与理论计算值 2.68 较为接近。

3) Exp-NECAE 工艺具有良好的晶粒细化和材料强化效果。在镦-剪-挤耦合剧烈塑性变形作用下, 材料内部以简单剪切变形为主, 晶粒发生显著破碎和细化, 最终形成了以细小等轴晶为主的混晶组织, 力学性能明显提升。1 道次变形后, 工业纯铝平均晶粒尺寸约为 2.73 μm , 平均显微硬度为 558 MPa, 抗拉强度达到 161.2 MPa, 伸长率为 13.9%, 表现出良好的韧性断裂特征。

参考文献 References

- [1] Wang Peng, Xiang Yuhai, Wang Xiaogui *et al.* *International Journal of Plasticity*[J], 2019, 123: 22
- [2] Sadasivan N, Balasubramanian M, Rameshbapu B R. *Journal of Manufacturing Processes*[J], 2020, 59: 698
- [3] Liu Xiaoyan(刘晓燕), Zhang Qi(张琪), Gao Feilong(高飞龙) *et al.* *Materials Review(材料导报)*[J], 2020, 34(19): 19 111
- [4] Huang He, Liu Huan, Wang Ce *et al.* *Journal of Magnesium and Alloys*[J], 2019, 7(4): 617
- [5] Stolyarov V V, Zhu Y T, Alexandrov I V *et al.* *Materials Science & Engineering A*[J], 2003, 343(1-2): 43
- [6] Asgari M, Fereshteh-saniee F. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2016, 26(5): 1276
- [7] Ensafi M, Faraji G, Abdolvand H. *Materials Letters*[J], 2017, 197: 12
- [8] Sepahi-Boroujeni S, Fereshteh-Saniee F. *Journal of Materials Science*[J], 2015, 50(11): 3908
- [9] Liu Zhaohua(刘兆华), Wang Xiaoqi(王晓琪), Chen Liangwei(陈亮伟) *et al.* *Journal of Materials Engineering(材料工程)*[J], 2014, 11: 62
- [10] Torabi H, Samadpour F, Faraji G *et al.* *Journal of Materials Engineering and Performance*[J], 2019, 28(9): 5586
- [11] Wang S, Liang W, Wang Y *et al.* *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2009, 209(7): 3182
- [12] Wang Xiaoxi(王晓溪), Zhang Xiang(张翔), Zhuang Yi(庄翌) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)*[J], 2020, 49(6): 1963
- [13] Li Ping(李萍), Wei Li(魏李), Duan Zihao(段自豪) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)*[J], 2019, 48(8): 2550
- [14] Richert M, Mcqueen H J, Richert J. *Canadian Metallurgical Quarterly*[J], 1998, 37(5): 449
- [15] Iwahashi Y, Wang J, Horita Z *et al.* *Scripta Materialia*[J], 1996, 35(2):143
- [16] Segal V M. *Philosophical Magazine Letters*[J], 2019, 98(11): 511
- [17] Ahmadi S, Alimirzaloo V, Faraji G *et al.* *Transactions of the Indian Institute of Metals*[J]. 2020, 73: 2447
- [18] Wang C P, Li F G, Li Q H *et al.* *Materials & Design*[J], 2013, 43: 492
- [19] Xiang Yao(项瑶), Lu Liwei(卢立伟), Wu Muyi(吴木义) *et al.* *Journal of Materials Engineering(材料工程)*[J], 2020, 48(12): 111
- [20] Fu Caitao(符彩涛), Liu Fang(刘芳), Xu Guangli(许光丽) *et al.* *Materials Science and Technology(材料科学与工艺)*[J], 2018, 26(1): 47

Deformation Behavior, Microstructure and Properties of Commercially Pure Aluminum Under the Coupling Effects of Upsetting-shear-extrusion Process

Wang Xiaoxi¹, Zhang Xiang^{2,3}, Yuan Junchi¹, Dong Xingbing¹, Jing Xinyu¹, Zhang Lei¹

(1. School of Mechanical & Electrical Engineering, Xuzhou University of Technology, Xuzhou 221018, China)

(2. Jiangsu XCMG Construction Machinery Research Institute Co., Ltd, Xuzhou 221004, China)

(3. State Key Laboratory of Intelligent Manufacturing of Advanced Construction Machinery, Xuzhou 221004, China)

Abstract: A novel process named expansion non-equal channel angular extrusion (Exp-NECAE) is proposed, which integrates various deformations including upsetting, shearing and extrusion in a single pass. Based on the theoretical analysis, severe plastic deformation behavior of commercially pure aluminum under multi-deformation coupling effects was investigated by numerical simulation and experimental verification, and the evolution of microstructure and mechanical properties of the processed materials was discussed. The results show that Exp-NECAE process has the advantage of high efficiency compound forming, the billet is extruded continuously, stably and compatibly, and the deformation process can be classified into three different stages: corner area deformation, transition area deformation and extruded area deformation. During the process, the processed material is in an ideal three-dimensional compressive stress state with homogeneous deformation distribution. The accumulative strain is as high as 2.56 after a single pass of extrusion, which is close to the theoretical calculation. After one pass of Exp-NECAE, under the simple shear strain induced by the coupling effects of upsetting, shear and extrusion, the grain size of commercially pure aluminum is significantly refined, forming a mixed microstructure dominated by ultrafine equiaxed grains with an average grain size of around 2.73 μm . Moreover, the mechanical properties of the processed material are significantly improved. The average microhardness (HV) is 558 MPa, and the tensile strength and the elongation can reach up to 161.2 MPa and 13.9%, respectively. A large number of small and deep dimples are observed in the fracture morphology, and the distribution is relatively uniform, showing a good ductile fracture characteristics.

Key words: expansion non-equal channel angular extrusion (Exp-NECAE); finite element simulation; strain accumulation; grain refinement; mechanical properties

Corresponding author: Wang Xiaoxi, Ph. D., Associate Professor, School of Mechanical & Electrical Engineering, Xuzhou University of Technology, Xuzhou 221018, P. R. China, Tel: 0086-516-83105376, E-mail: wxx19851109@sina.com