



新型等通道球形转角 膨胀挤压过程模拟与实验验证

王晓溪¹, 张翔^{2,3}, 金旭晨¹, 黄传辉¹, 何敏¹

(1. 徐州工程学院 机电工程学院, 徐州 221018;

2. 中国矿业大学 机电工程学院, 徐州 221116;

3. 高端工程机械智能制造国家重点实验室, 徐州 221004)

摘要: 将“球形分流”和“膨胀挤压”概念引入传统 ECAP 技术, 提出一种新型等通道球形转角膨胀挤压 (ECAEE-SC) 工艺。采用有限元模拟和实验验证的方法研究 ECAEE-SC 过程中工业纯铝的塑性变形行为。结果表明: ECAEE-SC 工艺具有复合剧烈塑性变形的效果, 球形转角和膨胀通道为两个主要变形区域; 挤压过程中材料处于理想的压应力状态, 坯料单道次 ECAEE-SC 变形累积等效应变量约为 3.5, 整体变形均匀性良好, 挤压效率大幅提高。挤压实验与有限元模拟结果相一致, 挤出坯料外形完整且宏观无裂纹, 坯料显微硬度平均值从初始 36.6 HV 增加至 70.2 HV, 力学性能得到显著改善。

关键词: 球形分流; 等通道球形转角膨胀挤压; 复合剧烈塑性变形; 变形行为; 显微硬度

文章编号: 1004-0609(2018)-11-2281-07

中图分类号: TG376

文献标志码: A

细化晶粒是提高材料综合性能的一种有效手段。近年来, 大塑性变形法^[1-2](Severe plastic deformation, SPD)因其具有强烈的晶粒细化能力和对金属结构材料强韧化的巨大改性作用, 受到了人们的广泛关注和深入研究。其中, 等径角挤压^[3-6](Equal channel angular pressing, ECAP)被公认为是当今制备超细晶材料 (Ultrafine-grained materials, UFG) 最具代表性且最有前途的主要技术之一, 具有设备和工艺简单、材料适用范围广等优点, 工业应用前景十分广阔。然而, 随着 ECAP 技术发展的日趋成熟和研究的不断深入, 传统 ECAP 工艺逐渐表现出了一些技术不足^[7-9], 如单道次累积应变小、坯料变形不均匀、模具使用寿命不高、挤压生产效率低、可加工材料有效尺寸受限等, 难以实现大规模工业应用。

为克服上述 ECAP 工艺缺点和提高块体 UFG 材料的制备效率和综合性能, 近年来国内外研究学者相继开发设计出了多种不同变形形式的复合 SPD 技术, 如双向双通道变通径挤压^[10](Dual-directional extrusion, DDE)、不等通道转角挤压^[11](Unequal channel angular pressing, UCAP)、椭圆截面螺旋等通道挤压^[12](Elliptical cross-section spiral equal-channel

extrusion, ECSEE)、等径角挤压^[13-14](Equal channel angular pressing and torsion, ECAPT)、多通道等径角挤压^[15](Incremental equal channel angular pressing, I-ECAP)、半通道转角挤压^[16](Half channel angular extrusion, HCAE)等。本文作者依据 ECAP 剧烈塑性剪切和等截面重复变形的特点, 将“球形分流”和“膨胀挤压”的概念引入传统 ECAP 技术, 提出了一种制备块体 UFG 材料的新型复合 SPD 工艺—等通道球形转角膨胀挤压 (Equal channel angular expansion extrusion with spherical cavity, ECAEE-SC)。采用有限元模拟研究了 ECAEE-SC 变形过程中工业纯铝的塑性变形行为, 分析了挤压载荷、等效应变、平均应力等场量的分布情况及变化规律, 并对其进行了 ECAEE-SC 工艺实验验证, 以期充分发掘材料性能潜力, 为新型复合 SPD 技术的开发与应用提供理论指导。

1 ECAEE-SC 工艺原理

ECAEE-SC 工艺原理如图 1 所示。具体来说, 该工艺对传统 ECAP 模具结构进行了改进, 通过在型腔

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51401177); 江苏省高校自然科学基金项目(17KJB430031); 徐州市科技计划项目(KC16SG279)

收稿日期: 2017-08-24; **修订日期:** 2018-11-15

通信作者: 王晓溪, 副教授, 博士; 电话: 0516-83105376; E-mail: wxx19851109@sina.com

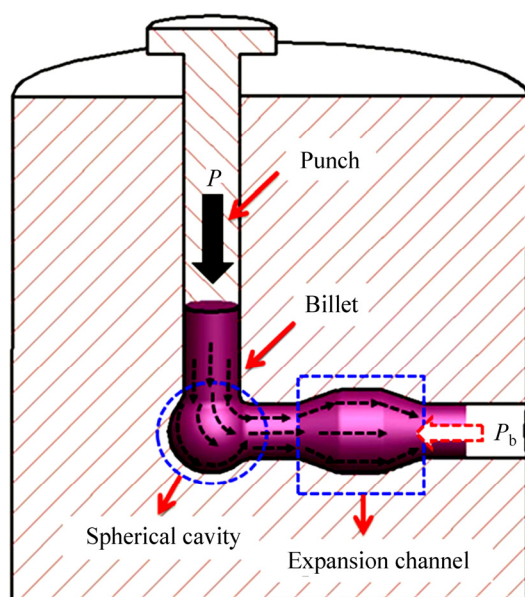


图1 ECAEE-SC 工艺原理示意图

Fig. 1 Schematic illustration of ECAEE-SC process

内部增设一处球形转角和一段水平膨胀通道,有效改善了通道底部金属坯料的流动性,增加了坯料内部的静水压力,提高了坯料单道次变形的累积应变量,进而实现“一次挤压,多种工艺,连续变形”的复合变形效果。

首次 ECAEE-SC 挤压时,为保证变形过程中第一根坯料能够完全充满膨胀通道,需在模具出口通道处放置一匹配堵头。在冲头挤压力 P 的作用下,坯料从竖直通道放入,依次经过模具球形转角和膨胀通道,发生剪切、膨胀、挤压等多种不同形式的变形,最终从水平通道被挤出,而挤压前后其截面形状和尺寸并不发生任何变化。当第一根坯料逐渐完成全部变形,头部被挤入出口水平通道后,堵头即可去除。此时,残留在模具内的坯料对后续挤压的下一根坯料起到了反向背压 P_b 作用。挤压过程如此反复进行,在材料可加工性能允许的前提下,坯料便可以“料顶料”的连续出料方式实现 ECAEE-SC 多道次重复变形。

2 ECAEE-SC 工艺有限元模拟

2.1 有限元模型的建立

采用商业有限元分析软件 DEFORM-3D 对室温 ECAEE-SC 变形过程进行有限元模拟。将坯料视为刚塑性体,忽略冲头和凹模的变形,将它们设定为刚体。挤压材料选用程序自带的工业纯铝(Al 1100),初始坯

料尺寸为 $d15\text{ mm} \times 110\text{ mm}$ 。挤压凹模通道基本参数如表 1 所列。

表 1 ECAEE-SC 凹模通道几何参数

Table 1 Geometrical parameters of ECAEE-SC bottom die

Channel diameter/mm	Die angle/(°)	Diameter of spherical cavity/mm	Length of transition channel/mm	Diameter of expansion channel/mm
15	90	23	30	20

采用四面体单元对变形坯料进行离散,初始网格单元数为 40000。模拟过程中,软件自动对剧烈塑性变形后畸变的网格进行自适应重划分。坯料与模具间的接触选用常剪切模型^[17],摩擦因数设为 0.12,冲头挤压速度为 1 mm/s。

2.2 变形过程分析

图 2 和 3 所示分别为坯料单道次 ECAEE-SC 挤压变形过程及挤压载荷-行程曲线。分析两图可以发现, ECAEE-SC 工艺下坯料的变形主要集中在球形转角和膨胀通道两个区域,挤压载荷呈现上升-稳定-再上升-下降的变化趋势。根据坯料的变形特征和载荷的变化趋势,可将 ECAEE-SC 变形过程大致分为 4 个阶段,即

1) 球形转角充填阶段 I: 变形初期,在挤压力和模具型腔约束的共同作用下,坯料开始发生类似墩粗变形,头部金属充填球形转角,首先发生塑性变形。由于球形空腔的直径大于挤压通道尺寸,金属经过转角区将同时发生剪切、膨胀、挤压等多种形式的复合变形,材料塑性累积应变量大大增加,挤压载荷呈现上升趋势。此外,由于模具外角处球状圆弧的平滑过渡,金属流动阻力减小,促使坯料底部向侧向出口通道流动,有效改善了底部金属的流动性^[18]。因此,材料变形连续且充填完整,球形转角处无间隙,未出现传统 ECAP 工艺外角处常存在的变形“死区”(见图 2(b))。

2) 过渡变形阶段 II: 随后坯料头部被挤出球形转角,率先进入水平过渡通道,变形稳步进行,挤压载荷逐渐趋于稳定。此时头部金属与通道上下壁间发生分离,形成中心对称的两个夹角,坯料头部出现“尖端效应”(见图 2(c))。

3) 复合变形阶段 III: 该阶段一方面坯料头部不断向前移动,被挤入膨胀挤压通道;另一方面坯料尾部开始进入并逐渐充填球形转角,坯料在两个主要变形

区内同时变形, 实现了“一次挤压, 多种变形”的复合效果, 塑性变形更加剧烈, 挤压载荷急剧上升并达到极值, 约为 94.5 kN。此时, 由于坯料的变形处于一个封闭的模腔内, 出口通道处“减径”所产生的反向背压有效增大了材料内部的静水压力, 使得坯料与模具通道内壁发生紧密接触(如图 2(d)所示), 头部尖端外形得到了一定程度的改善, 挤压效果更好。

4) 挤出变形阶段Ⅳ: 随着坯料头部完成全部变形被挤至出口通道, 挤压过程接近尾声。继续挤压直至冲头底部与水平通道顶部平齐为止。随后放入第二根坯料, 通过“料顶料”的方式使坯料尾部离开球形转角, 经过水平过渡通道并在膨胀通道内发生变形, 最终将第一根坯料完全挤出(见图 2(e))。

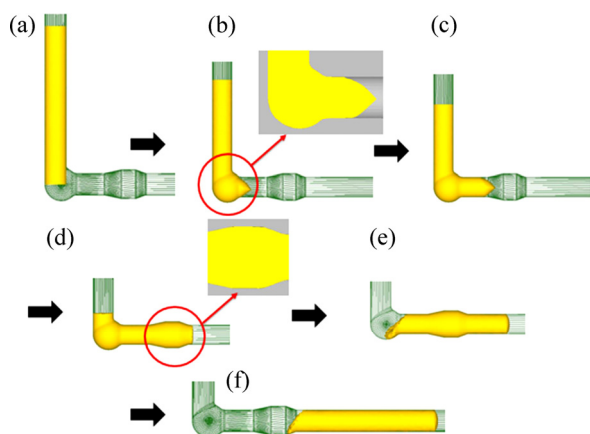


图 2 ECAEE-SC 挤压变形过程

Fig. 2 Sequences of typical ECAEE-SC process: (a) Initial; (b) Stage I; (c) Stage II; (d) Stage III; (e) Stage IV; (f) Total deformation

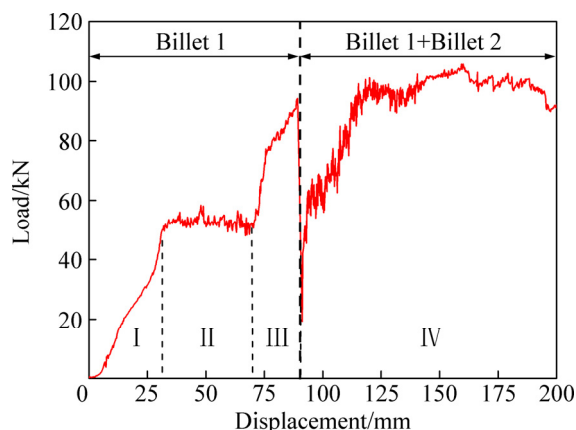


图 3 单道次 ECAEE-SC 挤压载荷-行程曲线

Fig. 3 Load-displacement curve of ECAEE-SC process in a single pass

2.3 等效应变分析

图 4 所示为 1 道次 ECAEE-SC 变形后, 坯料中心纵截面上的等效应变分布云图。

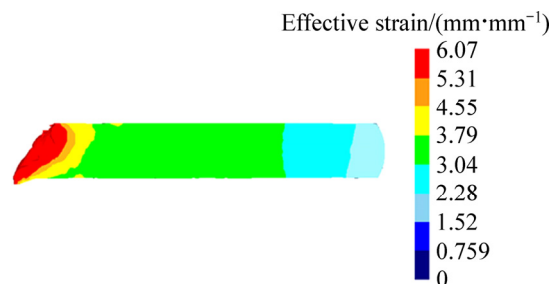


图 4 ECAEE-SC 变形后坯料中心纵截面等效应变分布云图

Fig. 4 Counter plot of effective strain on central longitudinal plane after ECAEE-SC process

由图 4 可以看出, 挤压坯料整体变形均匀性较好, 内部存在一个较大且相对均匀的变形区, 等效应变值处于 3.46~3.65 之间。由此可见, ECAEE-SC 工艺应变累积效果十分明显。坯料头部由于球形受转角剪切作用较小, 且挤出后出现了一定程度的尖端, 等效应变值较低。而坯料尾部与随后放入的下一根坯料直接接触, 接触部位存在较大摩擦, 剧烈的挤压变形使得坯料网格产生严重畸变, 因此, 模拟结果显示该处等效应变值最大。

为进一步定量研究工业纯铝坯料在 ECAEE-SC 过程中变形行为, 某一变形时刻在坯料不同部位沿横截面均匀选取 5 个跟踪点(见图 5(a)), 绘制出各节点的等效应变变化曲线(见图 5(b))。分析图 5 可知, ECAEE-SC 工艺具有良好的复合变形效果, 随着挤压过程的继续, 金属依次经过球形转角、水平过渡通道和膨胀通道, 同时在两个主要变形区内发生复合变形, 最终从水平出口通道被挤出, 坯料内部累积等效应变不断增大。观察图 5(b)还可以发现, 1 道次 ECAEE-SC 变形后, 坯料内部中心与边缘的等效应变差值在逐渐减小, 整体变形均匀性越来越好。

图 6 所示为 1 道次变形结束后坯料中心纵截面沿高度方向的等效应变分布情况。可以发现, 坯料经 ECAEE-SC 变形后, 除靠近模壁的上下表面外, 整体等效应变值变化平稳, 等效应变变化梯度较小, 平均等效应变变量高达 3.5 左右, 约为传统 1 道次 ECAP 变形累积应变量的 3 倍^[19]。这表明只经 1 道次 ECAEE-SC 变形, 坯料即可获得较好的应变累积效果和最佳的均匀变形状态, 挤压效率得到大幅提高。

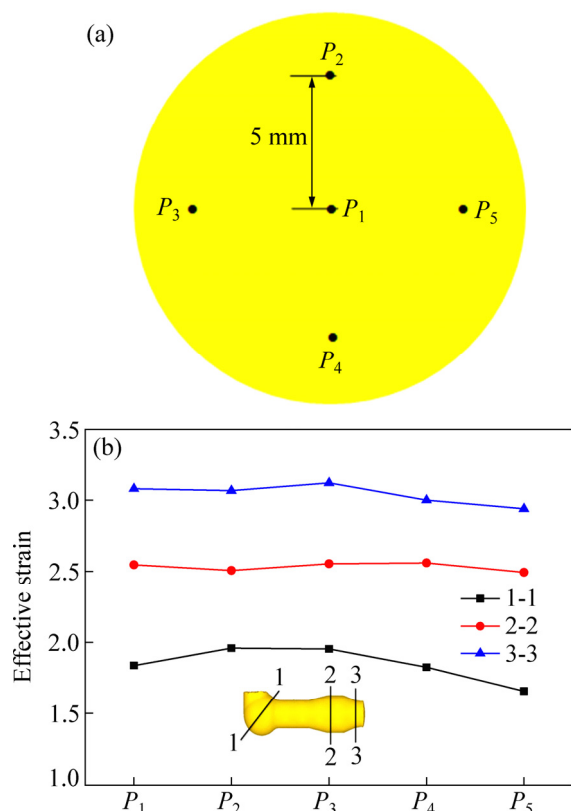


图5 ECAEE-SC 不同变形区域坯料横截面上的等效应变

Fig. 5 Effective strain distribution on cross section of billet at different deformation stages: (a) Schematic of point tracking; (b) Variation curves of effective strain

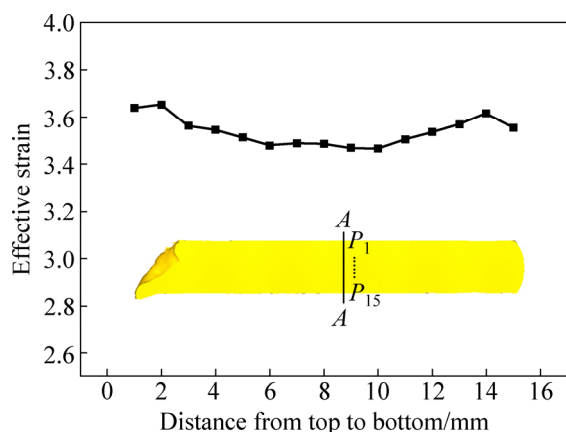


图6 坯料沿高度方向的等效应变分布

Fig. 6 Effective strain distribution of billet along height direction

2.4 平均应力分析

图7所示为某一ECAEE-SC变形时刻下工业纯铝坯料内部中心纵截面的平均应力分布云图。从图7中可以看出,得益于ECAEE-SC模具膨胀通道出口处所

提供的反向背压作用,变形过程中材料内部处于理想的压应力状态。变形初始阶段,在冲头挤压力 P 的作用下,坯料在竖直通道内发生压缩变形,此时内部压应力最大。随着挤压过程的继续,当头部金属充满球形转角被挤入模具水平通道发生复合变形后,材料内部压应力逐渐减小,拉应力逐渐增加。最终坯料自由端部处于拉应力状态,导致实际挤压时坯料在该处易出现裂纹^[20]。

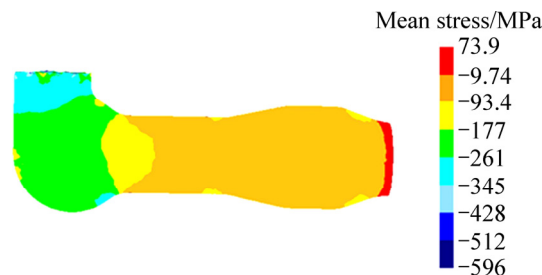


图7 ECAEE-SC 变形坯料内部平均应力分布

Fig. 7 Mean stress distribution of billet during ECAEE-SC process

3 ECAEE-SC 工艺实验验证

为验证新型ECAEE-SC工艺的复合变形效果,基于上述有限元模拟结果,在自行设计的模具上进行工业纯铝室温1道次ECAEE-SC挤压实验。实验材料为退火态的工业纯铝,坯料尺寸为 $d15\text{ mm} \times 80\text{ mm}$,模具尺寸和挤压参数与模拟中的相应设置完全相同。图8所示为ECAEE-SC挤压坯料实物图。从图8中可以发现,实际挤压过程与图2给出的模拟结果完全吻合,金属在两个主要变形区内填充良好,挤出坯料宏观无裂纹,外形完整且表面质量较好。其中,坯料1和坯料2已结束全部变形被完全挤出,坯料3在膨胀通道内即将完成变形,坯料4仍处于变形初期金属充填球形转角阶段。

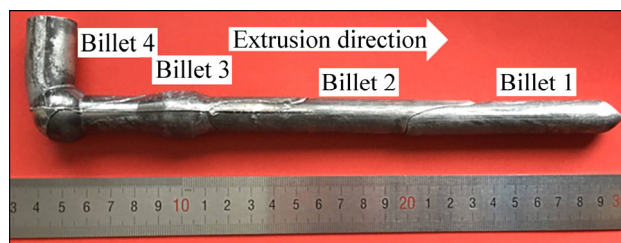


图8 ECAEE-SC 变形挤压坯料实物图

Fig. 8 Billets extruded by ECAEE-SC process

图 9 所示为不同 ECAEE-SC 变形阶段下, 工业纯铝坯料横截面上显微硬度平均值的变化情况。由图 9 可见, 在 ECAEE-SC 工艺复合剧烈塑性变形的作用下, 材料力学性能得到显著提高。随着挤压过程不断进行, 坯料变形程度逐渐增加, 显微硬度呈现递增趋势; 在模具球形转角区域, 坯料变形最为剧烈, 硬度值增幅最大, 从初始的 36.6 HV 增加至 54.9 HV; 随后的膨胀挤压变形有效改善了材料的塑性变形能力, 坯料显微硬度进一步提高, 最终达到 70.2 HV, 比初始状态增加了近 1 倍。对比图 5(b)可以看出, 坯料显微硬度值的变化规律与其等效应变累积效果具有很好的一致性, 从而验证了上述有限元模拟的可靠性。

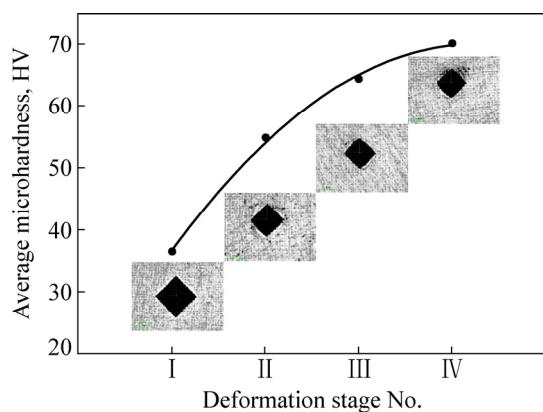


图 9 坯料在不同 ECAEE-SC 变形阶段下的显微硬度平均值

Fig. 9 Average microhardness values of billet at different ECAEE-SC deformation stages

4 结论

1) ECAEE-SC 变形主要集中在球形转角和膨胀通道两个区域, 坯料的挤压过程包括球形转角充填、过渡变形、复合变形和挤出变形等 4 个不同的变形阶段。挤压载荷呈现上升-平稳-再上升-下降的变化趋势, 工业纯铝坯料在复合变形阶段挤压载荷达到极值, 约为 94.5 kN。

2) ECAEE-SC 工艺具有复合剧烈塑性变形的效果, 挤压过程中材料处于理想的压应力状态。1 道次变形后, 坯料内部等效应变累积量约为 3.5, 且应变分布变形均匀性逐渐增加, 挤压效率大幅提高。

3) ECAEE-SC 实验结果与有限元模拟具有较好的一致性。工业纯铝坯料经 1 道次挤压后, 宏观无裂纹, 外形完整且表面质量较好; 坯料显微硬度平均值比初

始退火态状态增加近 1 倍, 达到 70.2HV, 力学性能得到显著改善。

REFERENCES

- [1] RAHIMI F, EIVANI A R. A new severe plastic deformation technique based on pure shear[J]. Materials Science & Engineering A, 2015, 626: 423-431.
- [2] ORLOV D, TODAKA Y, UMEMOTO M, TSUJI N. Role of strain reversal in grain refinement by severe plastic deformation[J]. Materials Science and Engineering A, 2009, 499(1/2): 427-433.
- [3] 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.
- [4] KIM K J, YANG D Y, YOON J W. Microstructural evolution and its effect on mechanical properties of commercially pure aluminum deformed by ECAE (Equal Channel Angular Extrusion) via routes A and C[J]. Materials Science and Engineering A, 2010, 527(29/30): 7927-7930.
- [5] 丁雨田, 刘 博, 郭廷彪, 胡 勇, 李海龙, 赵珺媛. 等通道转角挤压过程中纯铜位错密度变化和力学性能[J]. 中国有色金属学报, 2014, 24(8): 2057-2064.
DING Yu-tian, LIU Bo, GUO Ting-biao, HU Yong, LI Hai-long, ZHAO Jun-yuan. Dislocation density variation and mechanical properties of pure copper via equal channel angular pressing[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2014, 24(8): 2057-2064.
- [6] TOLAMINEJAD B, HOSEINI-ATHAR M M. An investigation of microstructure and mechanical properties during ECAE of commercially pure aluminum[J]. Materials Science & Engineering A, 2016, 670: 146-152.
- [7] 刘兆华, 王晓琪, 陈亮伟, 赵华荣, 史庆南. 复合 SPD 制备超细晶 6061 铝合金的组织及性能[J]. 材料工程, 2014(11): 62-66.
LIU Zhao-hua, WANG Xiao-qi, CHEN Liang-wei, QI Hua-rong, SHI Qing-nan. Microstructure and mechanical properties of ultra-fine grained Al alloy processed by combined SPD technology[J]. Journal of Materials Engineering, 2014(11): 62-66.
- [8] WRONSKI S, TARASIUK J, BACROIX B, WIERZBANOWSKI K, PAUL H. Microstructure heterogeneity after the ECAP process and its influence on recrystallization in aluminium[J]. Materials Characterization, 2013, 78: 60-68.
- [9] SURENDARNATH S, SUBBIAH Ram, SANKARANARAYANASAMY K, RAVISANKAR B. Finite element simulation of pure aluminum processed by ECAP using new die design[J]. Materials Today: Proceedings, 2017, 4: 2544-2553.

- [10] 刘天模, 刘建忠, 卢立伟, 袁晗琦, 时秀玲, 潘复生. 双向双通道变通径挤压 AZ31 镁合金的显微组织及变形行为[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(9): 1657–1664.
- LIU Tian-mo, LIU Jian-zhong, LU Li-wei, YUAN Han-qi, SHI Xiu-ling, PAN Fu-sheng. Microstructure and deformation behavior of dual-directional extruded AZ31 magnesium alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20(9): 1657–1664.
- [11] LUO Xiao-ping, ZHANG Min-gang, ZHOU Jun-qi. Effect of unequal channel angular pressing on microstructure and mechanical properties of as cast Mg-5.8Zn-1.2Y-0.7Zr alloy[J]. Materials Science and Technology, 2013, 29(3): 273–277.
- [12] WANG Cheng-peng, LI Fu-guo, LI Qing-hua, WANG Lei. Numerical and experimental studies of pure copper processed by a new severe plastic deformation method[J]. Materials Science and Engineering A, 2012, 548: 19–26.
- [13] WANG Xiao-xi, HE Min, ZHU Zhen, LI Ping, XUE Ke-min. Influence of twist extrusion process on consolidation of pure aluminum powder in tubes by equal channel angular pressing and torsion[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2015, 25(7): 2122–2129.
- [14] 王晓溪, 何敏, 陆兴华, 薛克敏, 李萍. ECAPT 工艺下纯铝-粉末包套变形行为的数值模拟与实验[J]. 中国有色金属学报, 2015, 25(2): 384–391.
- WANG Xiao-xi, HE Min, LU Xing-hua, XUE Ke-min, LI Ping. Numerical simulation and experiment of deformation behavior of pure aluminum powder in tubes by equal channel angular pressing and torsion[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2015, 25(2): 384–391.
- [15] QARNI M J, SIVASWAMY G, ROSOCHOWSKI A, BOCZKAL S. Effect of incremental equal channel angular pressing (I-ECAP) on the microstructural characteristics and mechanical behaviour of commercially pure titanium[J]. Materials & Design, 2017, 122: 385–402.
- [16] KIM K, YOON J. Evolution of the microstructure and mechanical properties of AZ61 alloy processed by half channel angular extrusion (HCAE), a novel severe plastic deformation process[J]. Materials Science and Engineering A, 2013, 578: 160–166.
- [17] HU H J. Simulations of isothermal ECAP for magnesium alloy using FEM software and experimental validations[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2012, 14(3): 181–187.
- [18] SEPAHI-BOROUJENI S, FERESHTEH-SANIEE F. The influences of the expansion equal channel angular extrusion operation on the strength and ductility of AZ80 magnesium alloy[J]. Materials Science and Engineering A, 2015, 636: 249–253.
- [19] LANGDON T G. Twenty-five years of ultrafine-grained materials: Achieving exceptional properties through grain refinement[J]. Acta Materialia, 2013, 61(19): 7035–7059.
- [20] 起华荣, 史庆南, 陶新姚, 刘兆华, 王效琪, 成佳. 6061 铝合金双向等通道挤压金属流动规律研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2016, 45(9): 2317–2321.
- QI Hua-rong, SHI Qing-nan, TAO Xin-yao, LIU Zhao-hua, WANG Xiao-qi, CHENG Jia. Metal flow of 6061 aluminum alloy processed by dual equal channel extrusion[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2016, 45(9): 2317–2321.

Simulation and experimental validations of novel process entitled equal channel angular expansion extrusion with spherical cavity

WANG Xiao-xi¹, ZHANG Xiang^{2,3}, JIN Xu-chen¹, HUANG Chuan-hui¹, HE Min¹

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Xuzhou University of Technology, Xuzhou 221018, China;

2. School of Mechatronic Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China;

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

Abstract: The concepts of “spherical split flow” and “expansion extrusion” were introduced to conventional ECAP and a novel process entitled equal channel angular expansion extrusion with spherical cavity (ECAEE-SC) was proposed. The plastic deformation behavior of commercially pure aluminum during ECAEE-SC process was investigated using finite element simulation and experimental validations. The results show that ECAEE-SC process is capable of combining some efficient severe plastic deformation (SPD) methods, the spherical die corner and expansion channel are the two main deformation zones. In ECAEE-SC process, the material is in an ideal compressive state. After a single pass of extrusion, the accumulated effective strain in the billet is about 3.5 with good deformation uniformity, demonstrating a considerable increase in the extrusion efficiency. Moreover, the extrusion experiment is consistent with the finite element simulation results. The extruded billet is free of macro crack with intact shape, and the microhardness increases from 36.6 HV to 70.2 HV. Therefore, the mechanical properties of the billet are greatly improved.

Key words: spherical split flow; equal channel angular expansion extrusion with spherical cavity; severe plastic deformation; deformation behaviors; microhardness

Foundation item: Project(51401177) supported by the National Natural Science Foundation of China; Project (17KJB430031) supported by the Natural Science Foundation of the Jiangsu Higher Education Institutions of China; Project(KC16SG279) supported by the Science and Technology Program of Xuzhou City, China

Received date: 2017-08-24; **Accepted date:** 2018-11-15

Corresponding author: WANG Xiao-xi; Tel: +86-516-83105376; E-mail: wxx19851109@sina.com

(编辑 王 超)