

AZ31 镁合金等通道转角挤压应变累积均匀性分析及组织性能研究

Homogeneous Deformation Analysis and
Microstructure Properties Study of AZ31
Magnesium Alloy in Multi-pass Equal
Channel Angular Pressing

任国成^{1,2}, 赵国群¹

(1 山东大学 模具工程技术研究中心, 济南 250061;

2 山东建筑大学 材料科学与工程学院, 济南 250101)

REN Guo-cheng^{1,2}, ZHAO Guo-qun¹

(1 Engineering Research Center for Mould and Die Technology, Shandong University, Jinan 250061, China; 2 School of Materials Science and Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China)

摘要: 等通道转角挤压工艺(Equal Channel Angular Pressing, ECAP)是通过剧烈塑性变形改变微观组织结构生产超细晶粒材料的材料加工方法,工件变形的均匀性一直是 ECAP 工艺过程中影响材料性能的主要原因之一。采用空间转换法实现了 AZ31 镁合金多道次 ECAP 挤压过程中有限元分析相关场量的准确传递,完成了四种不同挤压路径 ECAP 多道次挤压工艺的有限元模拟,获得了相应挤压件累积等效应变的分布规律。研究确定了经过四道次 ECAP 挤压以后等效应变累积最为均匀的挤压路径。通过微观组织观察和室温拉伸力学性能实验探讨了不同路径多道次 ECAP 挤压 AZ31 镁合金的组织性能变化规律。分析结果表明通过合适的变形路径可以获得细小而均匀的微观组织,当材料的应变累积均匀时,其力学性能也较好。

关键词: 等通道转角挤压;有限元模拟;变形均匀性分析;AZ31 镁合金

doi: 10.3969/j.issn.1001-4381.2013.10.002

中图分类号: TG379 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2013)10-0013-07

Abstract: Equal channel angular pressing (ECAP) is an interesting method for changing microstructure and producing ultra fine grained (UFG) materials through super-plastic deformation. The homogeneous deformation is the main factor that influences the material performance during ECAP. Four processing routes are analyzed in detail by using finite element method with spatial switching method through rotating three-dimensional model in multi-pass pressing. The accumulated effective strain distribution of the work-piece processed by ECAP for four pressing routes are obtained respectively through finite element simulation. The processing route that can generate more homogeneous effective's main distribution in sample after four routes processing is defined. The mechanical property of AZ31 magnesium alloy processed by multi ECAP passes in different routes was analyzed through microstructure observation and mechanical tensile test at room temperature. The experimental results show that the fine and uniform microstructure can be acquired by appropriate deformation route, the mechanical property of AZ31 magnesium alloy is greatly improved when strain accumulation uniform after ECAP processing.

Key words: equal channel angular pressing; finite element simulation; homogeneous deformation analysis; AZ31 magnesium alloy

镁及镁合金是迄今在工程应用中最轻的金属结构材料,在航空航天、交通运输以及 3C 产品制造领域有

着广阔的应用前景。但密排六方的晶格结构决定了其塑性变形能力差,制约了镁合金的应用,因此提高镁合

金塑性变形能力已经成为镁合金研究的热点^[1-3]。Gleiter^[4]指出,当材料的微观结构达到纳米量级时,便有可能使该材料的强度和塑性同时增加。等通道转角挤压(Equal Channel Angular Pressing, ECAP)是一种有效制备超细晶乃至纳米晶结构材料的方法,已广泛应用于各种金属材料的制备,不仅改善了其超细晶材料制备方法存在的问题,同时拓宽了传统塑性加工技术的应用领域,使传统材料的性能获得大幅度提高与改善;Figueiredo 等^[5]和 Matsubara 等^[6]研究发现,经 ECAP 加工后的镁合金具有相当高的低温伸长率,甚至具有高应变速率超塑性或者低温超塑性,这说明 ECAP 可以显著地细化组织,提高镁合金的力学性能,在提高镁合金塑性变形能力方面具有很大的研究价值和现实意义。

镁合金 ECAP 加工工艺的基本原理如图 1 所示,工件在凹模弯曲通道的拐角处发生近似理想的纯剪切变形从而实现晶粒细化及改变力学性能。为获得足够的应变累积量,在镁合金 ECAP 工艺过程中,一般需要进行多道次重复挤压变形,不同的挤压路径具有不同的剪切应变特征,因此对挤压件微观组织及力学性能也存在较大影响^[7]。虽然有关 ECAP 工艺的研究已持续多年,但 ECAP 工艺累积的应变对镁合金组织性能的影响规律仍缺乏完整的认识,尤其在多道次变形过程中,对不同路径 ECAP 工艺处理的应变累积均匀性仍需要进一步深入的分析^[8,9]。以连续塑性变形为理论基础的有限元模拟方法是研究金属变形的一种重要手段,本研究利用三维有限元模拟软件 DEFORM-3D,分析不同挤压路径应变累积均匀性的变化特点,并通过对不同路径 ECAP 加工 AZ31 镁合金的

室温拉伸实验及断口形貌分析,探讨不同变形路径对 AZ31 镁合金力学性能的影响规律。

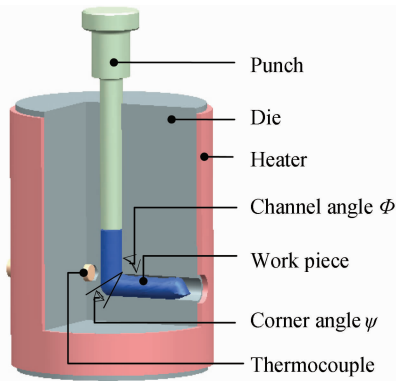


图 1 AZ31 镁合金 ECAP 工艺示意图

Fig. 1 Schematic diagram of an ECAP die for AZ31 magnesium alloy

1 镁合金多道次模拟的相关场量传递

根据试样在相邻道次间绕试样长轴旋转方向和角度的不同,镁合金 ECAP 工艺过程中一般可以把变形分为四种变形方式,具体如图 2 所示。这 4 种路径的差别在于试样在重复挤压过程中不同的方位改变。对于路径 A,每道次挤压后试样不旋转直接进入下一道次挤压;对于路径 Ba,每道次挤压后试样按 90°交替旋转进入下一道次挤压;对于路径 Bc,每道次挤压后试样按同一方向旋转 90°进入下一道次挤压;对于路径 C,每道次挤压后试样旋转 180°进入下一道次。不同的挤压路径具有不同的剪切应变特征,多道次挤压后材料内部具有不同的应变累积,因此对微观组织及力学性能也存在着较大影响^[10]。

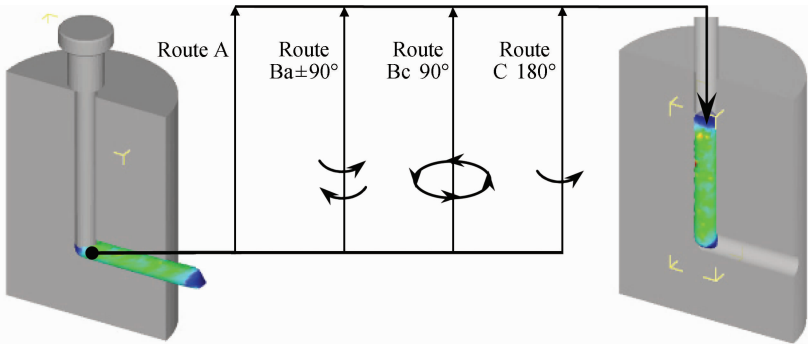


图 2 ECAP 工艺的挤压路径及空间转换法

Fig. 2 Schematic illustration of the press route and the spatial switching method used in the multi-pass ECAP simulations

ECAP 多道次有限元模拟中的关键技术是将前一道次挤压获得的相关场量尽可能准确全面地传递到下一道次挤压过程。Cerri 等^[11]通过改变模具型腔为 S 型实现了 ECAP 的多道次有限元模拟分析,但模具拐

角为 90°时,S 型工艺难以获得挤压件,且该工艺变形机理与 ECAP 的多道次挤压并不完全相同。而 Xu 等^[12]则采用节点映射法实现了 ECAP 多道次挤压过程中应变场量的准确传递,在该方法中忽略了变形

道次间的质点位移问题,这同样也会引起最终结果存在一定偏差。采用空间转换法可以准确实现对 ECAP 多道次变形的应变分布分析,空间转换法的原理如图 2 所示。图 2(a)所示为在前一次挤压终了时挤压件变形状态,以该时刻的各物理场量为基础进行下一道次的有限元建模,然后按照 ECAP 多道次模拟中各变形路径中挤压件的方位变化,通过空间几何变换,调整挤压件与模具的相对位置,建立下一模拟过程的有限元运算模型,图 2(b)所示即为下一次挤压过程初始时挤压件的相对位置及等效应变场量分布状态。由图 2 可见,空间转换法不仅继承了前一变形过程中的各应变场量,而且对挤压过程中变形质点的几何分布也实现了准确继承,因此利用空间转换法能够更有效地完成对镁合金多道次 ECAP 挤压过程中变形均匀性的有限元分析。

2 AZ31 镁合金 ECAP 挤压件的应变累积分析

2.1 工件纵截面等效应变累积分布

在多道次挤压过程中,由于采用的变形路径不同,试样的空间位置发生变化,导致每道次变形的剪切面发生变化,从而会对其内部所获的应变分布状况产生影响。挤压件变形区的最终变形均匀性是影响镁合金等通道转角多道次挤压件微观组织和力学性能的重要因素,对于不同路径 4 道次挤压,本文分别用 A4, Ba4, Bc4, C4 来分别表示。图 3 为模具拐角 Φ 为 90° , 模具外角 ϕ 为 20° 时,按路线 A, Ba, Bc, C 逐次挤压 4 次后对应挤压件纵截面的等效应变等值线分布图。

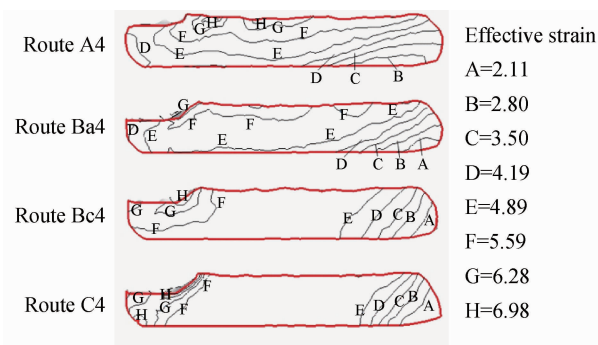


图 3 不同 ECAP 变形路径下 4 道次挤压件纵截面的等效应变分布

Fig. 3 Effective strain distribution in the work-piece after ECAP pressed through 4 passes by different routes

由图 3 可以看出,路线 A 经过四道次 ECAP 挤压后获得的最终挤压件等效应变分布继承了第 1 次挤压时的特点,在主变形区呈明显的梯度分布,从最大值

5.90 逐渐下降到最小值 3.93。由路线 Ba 经过四道次 ECAP 挤压后挤压件的等效应变分布可以看出,沿纵截面的应变分布梯度明显减小,等效应变值由最大 5.33 逐渐减弱为 4.30,挤压件变形均匀程度得到改善。挤压件沿 Bc 和 C 路径经过 4 道次挤压后,由其等效应变分布图可以看出,在挤压件的头部和尾部存在着比较密集的等效应变等值线,但在中间将近 $1/2$ 的主变形区并没有等值线分布,这表明沿路径 Bc 和路径 C 经四道次挤压后,其头部和尾部存在着较大的应变梯度,而在其主变形区,经四道次 ECAP 挤压后,其等效应变获得了良好的应变累积,几乎不存在应变梯度,变形均匀性大为改善。

圆形通道的 ECAP 挤压变形左右对称,且由图 3 可以看出挤压件主变形区的变形梯度分布在长度方向基本一致,因此通过截取挤压件主要变形部分横截面进行详细分析,即可获得挤压件挤压过程的横向变形分布规律。可在主变形区选取图 4 所示沿 L_1, L_2, L_3, L_4, L_5 分析变形路径对工件横截面等效应变分布的影响。

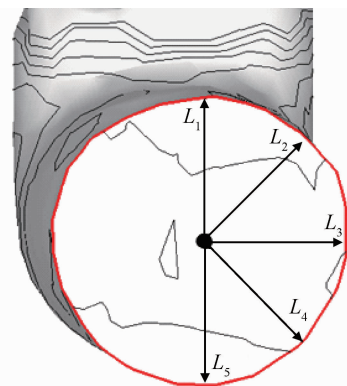


图 4 横截面等效应变分析路径示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the line that effective strain analysis along in the cross section

2.2 工件横截面等效应变分布分析

图 5 是不同 ECAP 变形路径 4 道次挤压后挤压件主变形区横截面沿 $L_1 \sim L_5$ 进行分析所获得的等效应变分布曲线。

由图 5(a)可见,等效应变沿 L_5 显著下降,而沿 L_1 呈明显增长的趋势,表明当沿路径 A 经四道次挤压后,工件的等效应变自上而下逐渐减小,工件的上半部分为主要变形部分。而当沿路径 Ba 四道次挤压后,等效应变沿 L_3, L_4, L_5 的分布基本重合,这表明工件的下半部分的等效应变分布趋势基本一致,都是沿径向由中心向外缘逐渐减小。由图 5(c), (d) 可见,沿 L_1 到 L_5 的等效应变分布基本重合,这表明当沿路径 Bc,

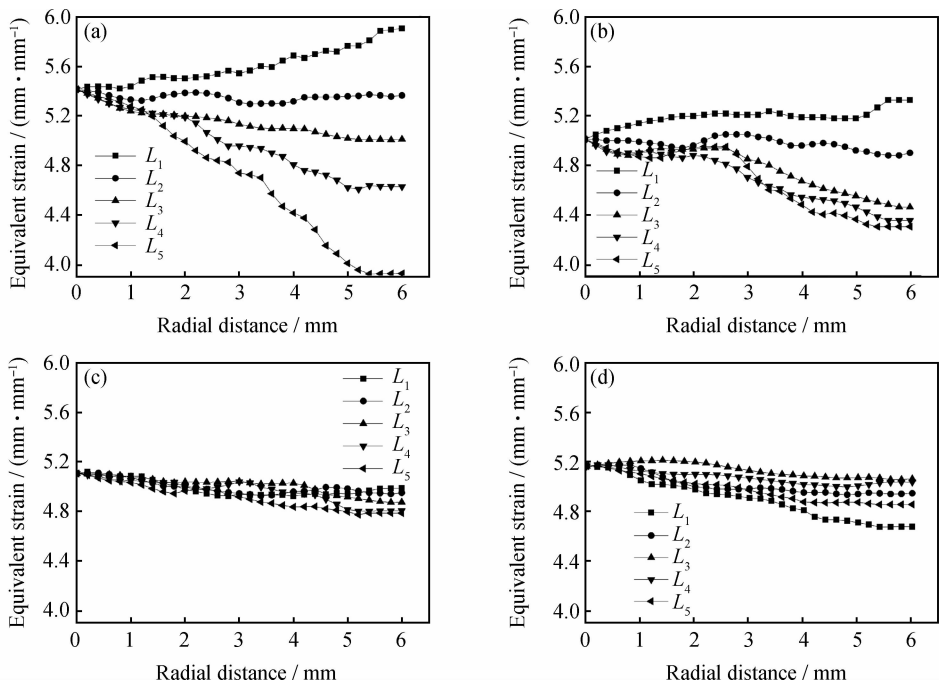


图 5 不同 ECAP 变形路径 AZ31 镁合金挤压件主变形区横截面等效应变分布
(a) A4; (b) Ba4; (c) Bc4; (d) C4

Fig. 5 Effective strain distribution in the main deformation zone cross-section of the AZ31 magnesium alloy samples processed by ECAP by different routes (a) A4; (b) Ba4; (c) Bc4; (d) C4

C 经四道次挤压后,四道次 ECAP 变形后,等效应变累积在整个横截面上变化不大,等效应变分布均匀。但图 5(d)的曲线分布要比图 5(c)发散,这也说明当沿着不同变形路径挤压时,经四道次挤压后路径 Bc 可以使挤压件获得最为理想的等效应变分布。

2.3 等效应变分布均匀性分析

为了更加直观地分析挤压件横截面上的等效应变分布均匀程度,可以计算代表等效应变不均匀程度的参数 $C^{[13]}$:

$$C = \frac{\bar{\epsilon}_{p, \max} - \bar{\epsilon}_{p, \min}}{\bar{\epsilon}_{p, \text{avg}}} \tag{1}$$

式中: $\bar{\epsilon}_{p, \max}$, $\bar{\epsilon}_{p, \min}$, $\bar{\epsilon}_{p, \text{avg}}$ 分别表示沿 A-A 截面上等效应变的最大值、最小值和平均值,等效应变平均值可由下式求得:

$$\bar{\epsilon}_{p, \text{avg}} = \frac{\sum_{i=1}^n \bar{\epsilon}_{p,i}}{n} \tag{2}$$

四道次挤压后等效应变不均匀程度的参数 C 计算结果列于表 1 中。

由表 1 可知,当沿路径 A 挤压时,主变形区截面上的平均等效应变为 5.15,而当沿路径 Ba 挤压时,平均等效应变则降为 4.86,因此对于相同的模具结构,由于变形路径的不同,平均等效应变在相同变形道次的应变累积不同,应变累积效果顺序为 $A > C > Bc > Ba$ 。但就等效应变不均匀程度 C 而言,当沿路径 A 挤

表 1 四道次挤压后主变形区截面等效应变不均匀程度指数

Table 1 The equivalent strain inhomogeneity index across the section at steady-state zone of workpiece processed by ECAP four passes

ECAP route	$\bar{\epsilon}_{p, \max}$	$\bar{\epsilon}_{p, \min}$	$\bar{\epsilon}_{p, \text{avg}}$	C
A4	5.90	3.93	5.15	0.384
Ba4	5.33	4.30	4.86	0.212
Bc4	5.12	4.78	4.98	0.069
C4	5.21	4.67	5.02	0.107

压时 C 值高达 0.384,虽然获得了高的等效应变,但变形均匀程度却是最差的。比较沿变形路径挤压时的主变形区横截面不均匀变形系数可以发现,经过四道次的 ECAP 挤压变形周期,四种变形路径都可取得较大的等效应变累积,平均等效应变值相差不大,集中在 4.8~5.2 之间。当沿路径 Bc 挤压时,既可获得比较大的平均等效应变,又可获得良好的等效应变分布。

3 AZ31 镁合金 ECAP 挤压件微观组织及力学性能分析

通过对不同路线的等通道转角挤压过程的有限元分析可知,变形路线直接影响材料变形的等效应变均匀性分布,从而影响到挤压后材料的微观组织和力学

性能,为验证不同变形路径对 AZ31 镁合金组织性能的影响,选用 $\phi 12\text{mm} \times 70\text{mm}$ 的工业 AZ31B 型镁合金以不同变形路径进行 ECAP 挤压实验,试样表面涂抹 MoS_2 润滑剂,实验前将试样和模具预热,随后由 YL-32 型液压机加载将试样从出口通道挤出。通过 ECAP 挤压前后 AZ31 镁合金的微观组织观察和室温拉伸力学实验对比,分析不同变形方式对 AZ31 镁合金组织性能的影响。

3.1 微观组织分析

从 ECAP 挤压件的稳定变形区切取试样,采用 Epiphot300 型尼康卧式金相显微镜观察 ECAP 过程

中不同变形方式的微观组织变化。图 6 为退火后 AZ31B 镁合金原始态和一道次 ECAP 挤压件稳定变形区横截面中心位置的光学微观金相组织,为便于描述不同状态试样的晶粒尺寸变化,计算视场内所有晶粒尺寸的平均值作为考察晶粒细化程度的标准。由图 6(a)可见,初始材料的晶粒比较粗大,视场内所有晶粒尺寸均值为 $9.87\mu\text{m}$,晶粒晶界明显呈等轴分布。由图 6(b)可知经过 ECAP 工艺一道次挤压后晶粒明显细化,晶粒尺寸均值降为 $4.65\mu\text{m}$,但试样整体组织分布不均匀,局部可见较粗大的晶粒,由于 ECAP 强烈的剪切作用,这些晶粒被明显拉长。

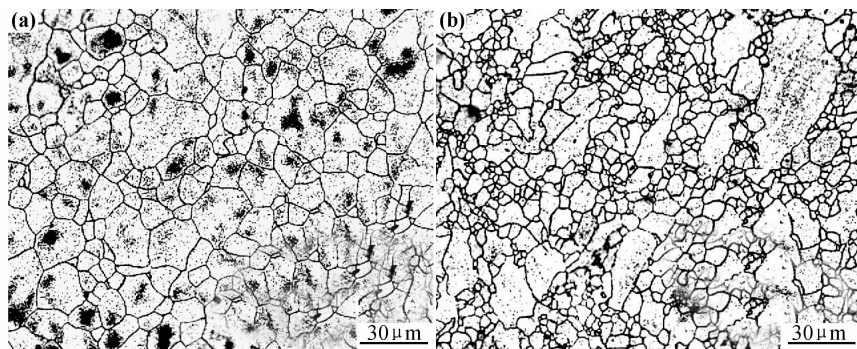


图 6 AZ31 镁合金原试样及 ECAP 一道次加工后试样横截面光学显微组织

(a)原试样;(b)一道次加工试样

Fig. 6 The optical microstructure in the cross-section of the AZ31 magnesium alloy samples unprocessed and processed by one pass ECAP

(a)as-annealed unprocessed sample;(b)single-pass pressed sample by ECAP

图 7 为不同变形路径挤压四道次后 ECAP 挤压件稳定变形区轴截面中心位置的金相组织及所对应的平均晶粒尺寸分布直方图。由图 7 可知,与原始试样

及一道次挤压件相比,经过 ECAP 工艺不同路径四道次挤压后晶粒都发生了明显的细化,变形区内的狭长金属完全消失,整个视场内的晶粒呈现等轴晶状态。对

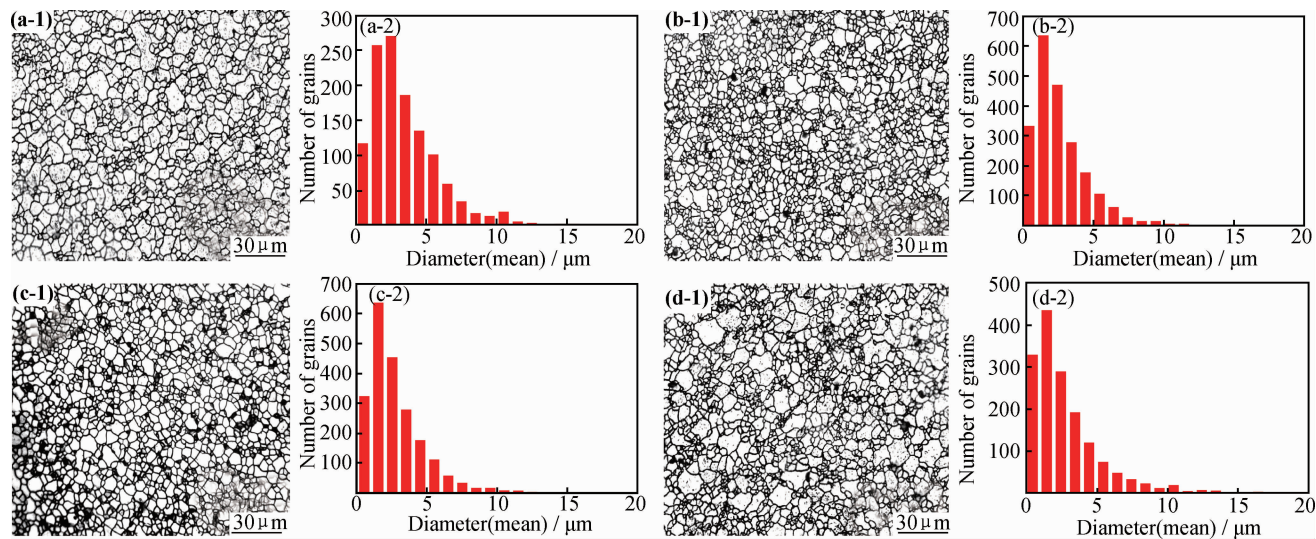


图 7 AZ31 镁合金 ECAP 不同路径四道次加工后试样横截面光学显微组织(1)及晶粒尺寸分布(2) (a)A4;(b)Ba4;(c)Bc4;(d)C4

Fig. 7 The optical microstructure and average grain size distribution in the cross-section of the AZ31 magnesium alloy samples processed by four passes ECAP pressed with different routes (a)A4;(b)Ba4;(c)Bc4;(d)C4

比不同路径四道次 ECAP 挤压后的微观组织可以发现,对于不同的变形路径,其晶粒细化效果并不相同。当制件分别沿 A, Ba, Bc, C 路径进行四道次挤压后,其稳定区横截面上的晶粒平均尺寸分别细化至 3.44, 2.64, 2.66, 2.86 μm , 这说明当制件沿 Ba 和 Bc 路径挤压时取得了较为良好的细化效果,而 A 路径和 C 路径的晶粒细化能力相对较弱,这是由于当工件沿 A 路径和 C 路径挤压时,相邻道次间的剪切面相互平行,这在一定程度上弱化了晶粒细化的效果。而 Ba 和 Bc 路径相邻道次间的剪切面相互垂直,这更有利于变形过程中狭长大晶粒的破碎,因此其晶粒细化效果明显。

由不同路径金相组织所对应的晶粒尺寸直方图可以看出,通过 Ba 和 Bc 路径加工的工件绝大部分晶粒

都细化的 10 μm 以下,而对于 A 和 C 路径,四道次加工后仍存在相当数量尺寸在 10 μm 以上的大晶粒。晶粒尺寸的标准方差可以反映试样内部晶粒分布的均匀程度,通过计算可得沿 A, Ba, Bc, C 路径处理试样的晶粒尺寸标准方差分别为 2.38, 1.85, 1.87, 2.51, 这也表明通过 Ba 和 Bc 路径加工的微观组织均匀化程度要优于 A 路径和 C 路径。

3.2 室温拉伸力学性能分析

对原始试样,一道次 ECAP 挤压件以及不同路径 4 道次 ECAP 挤压件车削加工制成直径为 8mm、标距长度为 20mm 的拉伸试样,然后利用 CMT5205 型电子万能试验机测试其拉伸力学性能,拉伸速率为 1mm/min, 所得不同状态下 AZ31 镁合金的室温拉伸应力应变曲线及各试样的抗拉强度和伸长率如图 8 所示。

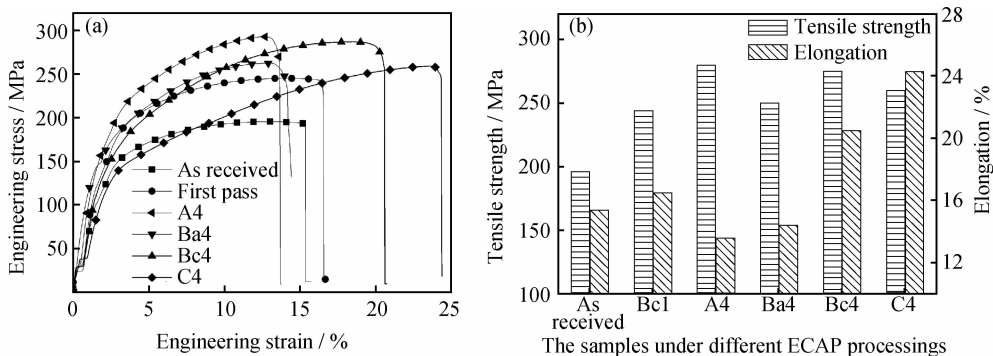


图 8 AZ31 镁合金在 ECAP 前后的室温力学性能

(a) 室温拉伸曲线; (b) 抗拉强度及伸长率

Fig. 8 Mechanical properties of AZ31 alloy at room temperature before and after ECAP through one pass and 4 passes in different routes

(a) tensile curves at room temperature; (b) tensile strength and elongation

由图 8 可见, ECAP 对 AZ31 镁合金的力学性能有明显的改善: 经过 1 道次 ECAP 之后, 抗拉强度由 196MPa 提高到 244MPa, 伸长率则由 15.4% 上升到 16.5%。经过四道次 ECAP 挤压后, 材料的抗拉强度进一步上升, 但是不同变形路径对力学性能的影响不尽相同。Bc 路径和 C 路径挤压后试样的伸长率较高, 分别为 20.5% 和 24.3%, 而 Ba 和 A 路径后的试样伸长率较差, 分别为 14.4% 和 13.6%。而对于抗拉强度, 则是 A 路径较高, 为 280MPa, Ba 路径最低, 约为 250MPa, 四种路径区别不大。由此可见, ECAP 路径对试样抗拉强度的影响较小, 但对伸长率和屈服强度的影响比较大。根据 ECAP 挤压过程的剪切变形特征可知, 经过不同挤压路径的多道次变形累计后, 材料在变形过程中形成的等效应变分布存在较大差异, 这种应变分布差异使变形体内部的微观组织分布不均匀, 并最终导致挤压后材料的力学性能存在差异。W. J. Kim 等^[14]研究了 AZ61 镁合金在 175℃

温度下沿 Bc 路径和 A 路径经过不同道次挤压后力学性能的演变, 研究表明经过 8 个道次的 ECAP 工艺挤压后, 沿 Bc 路径挤压的 AZ61 镁合金的抗拉强度较沿 A 路径的低, 但伸长率却比沿 A 路径挤压的高。Yan 等^[15]在研究转模等通道转角挤压路径对 AZ31 镁合金组织和力学性能的影响时也得出类似的结论。

4 结论

(1) 通过对 AZ31 镁合金等通道转角多道次挤压过程的数值模拟研究, 揭示了挤压路径对 AZ31 镁合金 ECAP 挤压过程累积应变的影响规律。在采用不同变形路径 ECAP 挤压过程中, 工件的平均等效应变累积差别不大。但变形路径的不同直接影响工件的不均匀变形程度。在经过四道次 ECAP 工艺处理后, 当采用 A 路径和 Ba 路径挤压时, 工件主变形区内存在

较为明显的梯度分布,而采用 Bc 路径和 C 路径挤压时,可以获得良好的等效应变分布,从工件主变形区横截面上不均匀变形系数来看,采用 Bc 路径挤压所获得的应变累积最为均匀。

(2)微观组织观察表明 AZ31 镁合金经过 ECAP 加工后晶粒明显细化,经过四道次挤压后,其晶粒由原始的 $9.87\mu\text{m}$ 细化至 $3\mu\text{m}$ 左右。对比不同路径的 ECAP 挤压件微观组织可以发现,当采用 Ba 或 Bc 路径挤压时,其晶粒的细化效果要优于 A 和 C 路径。标准方差分析显示采用 Ba 或 Bc 路径挤压时可以获得较好的晶粒均匀化分布。

(3)工件在经过不同路径四道次 ECAP 工艺处理后,室温抗拉强度、伸长率较原工件均有明显的提高,力学性能有所改善,但不同变形路径对力学性能的影响不尽相同,采用 A 路径和 Ba 路径挤压时,可以获得较高的抗拉强度,而采用 Bc 路径和 C 路径时工件的伸长率较高,综合挤压后工件的微观组织和力学性能两方面因素考虑,可以发现 Bc 路径为比较理想的 ECAP 变形方式。

参考文献

- [1] HOU L F, WEI Y H, LIU B S, et al. High energy impact techniques application for surface grain refinement in AZ91D magnesium alloy[J]. Journal of Materials Science, 2008, 43(13): 4658—4665.
- [2] LUO A A, MISHRA R K, POWELL B R, et al. Magnesium alloy development for automotive applications[J]. Materials Science Forum, 2012, 706(1): 69—82.
- [3] 张丁非,戴庆伟,胡耀波,等. 镁合金板材轧制成型的研究进展[J]. 材料工程, 2009, (10): 85—90.
ZHANG D F, DAI Q W, HU Y B, et al. Progress in the research on rolling formation of magnesium alloy sheet [J]. Journal of Materials Engineering, 2009, (10): 85—90.
- [4] GLEITER H. Nanostructured materials: basic concepts and microstructure[J]. Acta Materialia, 2000, 48(1): 1—29.
- [5] FIGUEIREDO R B, LANGDON T G. Strategies for achieving high strain rate superplasticity in magnesium alloys processed by equal-channel angular pressing [J]. Scripta Materialia, 2009, 61(1): 84—87.
- [6] MATSUBARA K, MIYAHARA Y, HORITA Z, et al. Developing superplasticity in a magnesium alloy through a combination of extrusion and ECAP[J]. Acta Materialia, 2003, 51(11): 3073—3084.
- [7] 何运斌,潘清林,刘晓艳,等. ECAP 法制备细晶 ZK60 镁合金的微观组织与力学性能[J]. 材料工程, 2011, (6): 32—38.
HE Y B, PAN Q L, LIU X Y, et al. Microstructure and me-

chanical properties of ZK60 magnesium alloy produced by equal channel angular pressing [J]. Journal of Materials Engineering, 2011, (6): 32—38.

- [8] BEYERLEIN I J, TOTTH L S. Texture evolution in equal-channel angular extrusion[J]. Progress in Materials Science, 2009, 54(4): 427—510.
- [9] 靳丽,林栋梁,毛大立. 两步等通道角挤压 AZ31 镁合金的微观组织和力学性能[J]. 上海交通大学学报, 2005, 39(11): 1175—1179.
JIN L, LIN D L, MAO D L, et al. The microstructure and mechanical properties of AZ31 Mg alloy processed by two-step equal channel angular extrusion[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2005, 39(11): 1175—1179.
- [10] THAM Y W, FU M W, HNG H H, et al. Study of deformation homogeneity in the multi-pass equal channel angular extrusion process[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 192: 121—127.
- [11] CERRI E, DE MARCO P P, LEO P. FEM and metallurgical analysis of modified 6082 aluminium alloys processed by multipass ECAP: influence of material properties and different process settings on induced plastic strain[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209(3): 1550—1564.
- [12] XU S, ZHAO G, LUAN Y, et al. Numerical studies on processing routes and deformation mechanism of multi-pass equal channel angular pressing processes[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2006, 176(1): 251—259.
- [13] BASAVARAJ V P, CHAKKINGAL U, KUMAR T S P. Study of channel angle influence on material flow and strain inhomogeneity in equal channel angular pressing using 3D finite element simulation [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209(1): 89—95.
- [14] KIM W J, HONG S I, KIM Y S, et al. Texture development and its effect on mechanical properties of an AZ61 Mg alloy fabricated by equal channel angular pressing[J]. Acta Materialia, 2003, 51(11): 3293—3307.
- [15] YAN K, SUN Y S, BAI J, et al. Effects of rotary-die ecap routes on microstructure and mechanical property of AZ31 magnesium alloy[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2010, 46(1): 27—33.

基金项目:教育部“长江学者和创新团队发展计划”创新团队资助项目(IRT0931);山东省自然科学基金(ZR2012EMM014)

收稿日期:2012-09-24;修订日期:2013-05-02

作者简介:任国成(1977—),男,博士研究生,讲师,现从事塑性成形技术及数值模拟研究工作,联系地址:山东济南经十路 17923 号山东大学材料学院模具技术中心(250061),E-mail:;renguocheng@sdjzu.edu.cn
通讯作者:赵国群(1962—),教授,博士生导师,现从事塑性成形技术及数值模拟研究工作,联系地址:山东济南经十路 17923 号山东大学材料学院模具技术研究所(250061),E-mail:zhaogq@sdu.edu.cn