

文章编号:1003-7837(2006)03-0202-04

等径角挤压法工艺路线 影响材料显微组织演化的研究概况

农 登, 黄少军, 李 林, 郑开宏, 王海燕

(广州有色金属研究院耐磨材料机械研究所, 广东 广州 510651)

摘 要:简要介绍了等径角挤压法的工艺特点和基本原理,概述了等径角挤压法的不同工艺路线影响材料显微组织演化的研究情况。

关键词:等径角挤压(ECAP); 工艺路线; 显微组织演化

中图分类号:TG376

文献标识码:A

等径角挤压法(equal channel angular pressing, 简称 ECAP)是在 20 世纪末, Segal 等人^[1]在研究钢的变形组织和微观结构时,为获得纯剪切变形而开发出来的。ECAP 法具有如下优点:它避免了高能球磨法研磨中可能带入的杂质以及超细微粉冷压合成法制备的超细晶材料中存在的大量微空隙、致密性差等问题^[2];采用 ECAP 可以在不改变材料的横截面积和截面形状的条件下,经反复挤压得到所要求的应变量,并获得均匀、显著细化的晶粒组织。

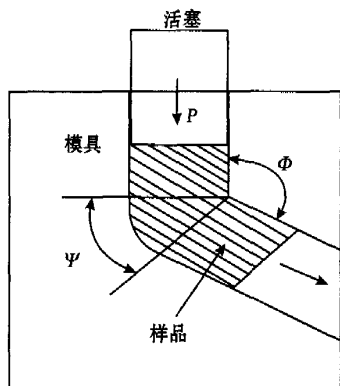


图 1 等径角挤压(ECAP)基本原理的示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the basic principle of ECAP

1 等径角挤压法的原理

ECAP 挤压模具内出口通道与进口通道的横截面形状及面积相同,两通道轴线以一定角度相交,两通道的内交角为 Φ ,外接弧角为 Ψ 。挤压过程中,在冲头压力 P 的作用下试样被向下挤压,在通道转角处产生局部大剪切变形,得到很大的应变量,此时位错重新排列,亚晶分割原始晶粒,晶界不断高角化,从而获得超细晶粒结构。ECAP 的基本原理如图 1 所示。

在试样与模壁完全润滑的条件下,等径角挤压产生的总应变量取决于挤压次数 N 、两通道的内角 Φ 和外接弧角 Ψ 的大小。Segal 等人^[1]最早提出了在不考虑摩擦条件下的总应变量 ϵ_N :

$$\epsilon_N = \frac{2N}{\sqrt{3}} \cot \varphi, \quad (1)$$

式(1)中 N 为挤压道次,此时 $\Psi=0^\circ$, $\Phi=2\varphi$ 。

后来, Iwahashi^[3]等学者考虑了外接弧角 Ψ 的影响,提出了修正后的总应变量公式:

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

收稿日期:2006-08-07

作者简介:农登(1981-),男,广西田东人,硕士。

当 $\Psi=0^\circ$, $\Phi=2\varphi$ 时,式(2)等价于式(1),式(2)较为常用.

2 ECAP 工艺路线的种类

根据相邻挤压道次间试样相对于模具的轴向旋转方向和角度的区别,可以把 ECAP 的工艺路线分

为以下四种.(1)A:每道次挤压后,试样不旋转,直接进行下一道次挤压;(2) B_A :每道次挤压后,试样交替方向旋转 90° 进行挤压;(3) B_C :每道次挤压后,试样按同一方向旋转 90° 进入下一道次;(4)C:每道次挤压后,试样旋转 180° 进行下一道次挤压.四种工艺路线如图 2 所示^[2].

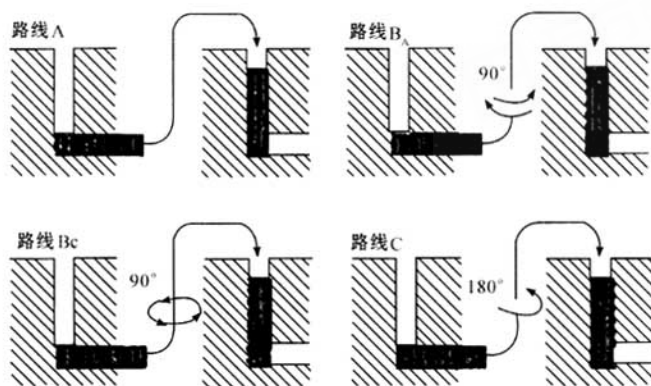


图2 等径角挤压工艺路线的示意图

Fig.2 Schematic diagram of the process routes in ECAP

3 ECAP 工艺路线影响材料显微组织演化的研究概况

采用 ECAP 不同的加工路线,可以改变试样内的剪切平面和剪切方向,对试样微观组织演化和晶粒细化产生影响.一些学者对此进行了研究,却得出了不同的看似矛盾的实验结果.

在 $\Phi=90^\circ$ 时,Iwahash 等人^[4]的研究结果表明,各加工路线对晶粒细化的效果为 $B_C > C > A$ 或 B_A . Furukawa 等人^[5]对此的解释为:路线 B_C 和 C 比路线 A 和 B_A 更有效,是因为采用路线 B_C 挤压 $4n$ (n 为整数)道次,或采用路线 C 挤压 $2n$ 道次时,单元立方体都可恢复原状;而以路线 A 和 B_A 挤压时,单元立方体则不断加剧畸变.而路线 B_C 的挤压效果优于路线 C 的原因是:在采用路线 C 挤压的过程中,立方体的 Z 面没有剪切变形;而在采用路线 B_C 挤压的过程中,每 4 次挤压后,变形的菱柱体回复成立方体,但在这 4 次变形中,立方体的 X, Y, Z 三个平面上的晶粒都发生了剪切,而且由于剪切方向的两重性,在受到多次挤压后显微组织沿两组独立的且

又相互交叉的平面发展,这有利于晶粒的细化和形成等轴晶.

但是,当 $\Phi=120^\circ$ 时,Prangnell 等人^[6]研究了 Al-3Mg-0.2Zr-0.2Fe 合金经过 4 次挤压后各工艺路线对晶粒细化效果的影响,得出的结果是:采用路线 A ,晶粒细化效果最好,其次是路线 B_C 和 B_A ,路线 C 最差.对此的解释是^[8]:路线 A 的细化效果最好,是因为它没有产生多余的应变;路线 C 细化效果最差是由于每次挤压试样总是在相同的剪切面上发生剪切,只是每相邻道次之间的剪切方向相反,前一挤压道次产生的剪切应变被紧接着的下一道次抵消,产生了多余的应变,前面形成的显微组织和织构亦被消除;在路线 B_C 中,相隔的道次产生的应变相互抵消,如第一道次产生的应变被第三道次产生的应变抵消,而第二道次产生的应变则被第四道次产生的应变所抵消.这很好地解释了面心立方的铝合金在 $\Phi=120^\circ$ 时各工艺路线对晶粒细化效果的影响,但是无法解释没有产生多余应变的路线 B_A 为何比路线 B_C 的细化效果差.

目前,Zhu 等人^[7]较好地解释了在不同的 Φ 角下 ECAP 各工艺路线的细化效果.他们认为在研究

各工艺路线的细化效果时,除了考虑剪切应变量外,还要考虑剪切面、晶体结构和变形织构等因素的作用.如图3和表1所示^[7],相邻挤压道次间剪切面的夹角随 Φ 和工艺路线的不同而变化.在 $\Phi=90^\circ$ 时路线Bc相邻挤压道次间剪切面的夹角 θ 为 60° .而当 $\Phi=120^\circ$ 时,路线A相邻道次的剪切面夹角 θ 也为 60° .有人研究发现^[8],使用 $\Phi=90^\circ$ 和 $\Phi=120^\circ$ 的组合模具对纯铝及其合金进行挤压,细化晶粒效果更为明显.这在一定程度上说明, $\Phi=60^\circ$ 是细化面心立方金属Al晶粒最有效的角度.然而这并不能解释为何在 $\Phi=90^\circ$ 时路线B_A(相邻挤压道次间剪切面的夹角也为 60° ,无多余应变)比路线Bc的细化效果差.这说明除了剪切面间夹角外,还有别的因素(如晶体结构和变形织构等)对工艺路线的细化效果有影响.

晶体结构不同的多晶材料即使受相同的剪切应变,其结果也不同.如铝及铝合金属于面心立方结构,层错能较高,因此塑性变形的机制为滑移变形.其主要的滑移系为 $\{111\}\langle 110\rangle$,共12个滑移系,4个 $\{111\}$ 滑移面形成一个四面 β 体,4个滑移面之间的夹角均为 70.5° ,因此前一次变形的结构面与下一次变形的剪切面的夹角越接近 70.5° ,越有利于激活 $\{111\}$ 面上的位错滑移.当采用 $\Phi=90^\circ$ 的模具时,路径A、Bc、C相邻滑移面之间的夹角分别为 90° 、 60° 和 0° ,其中路线Bc的夹角最接近 70.5° .在等径角挤压时,前一个 $\{111\}$ 面很容易启动下一个 $\{111\}$ 面发生剪切变形.所以,此时路线Bc的细化效果优于路线A和C.

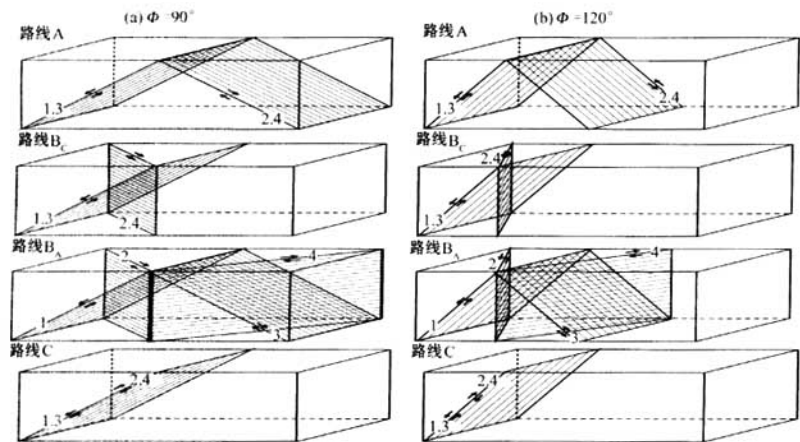


图3 不同工艺路线的剪切面
(a) $\Phi=90^\circ$; (b) $\Phi=120^\circ$

Fig.3 Schematic diagram of shear strain planes for various ECAP routes for dies with (a) $\Phi=90^\circ$ and (b) $\Phi=120^\circ$

表1 ECAP不同工艺路线中相邻挤压道次间剪切面的夹角
Table 1 The angle (θ) between two adjacent ECAP shear strain planes for various ECAP routes

$\Phi/(^\circ)$	$\theta/(^\circ)$			
	路线 A	路线 Bc	路线 B _A	路线 C
90	90	60	60	0
120	60	41.4	41.4	0

在塑性变形中,多晶体的晶粒会逐渐转到比较一致的晶粒取向,从而形成织构,并影响晶粒的细

化.采用 $\Phi=90^\circ$ 的模具时,晶粒拉长方向与挤压轴(x 轴)的夹角 β 在不同加工路线中和不同挤压次数后的 β 值列于表2^[7].对于面心立方金属铝和铝合金,由表2可知,当模具内角 $\Phi=90^\circ$ 时,采用加工路线Bc挤压奇数次后,晶粒拉长方向与 x 轴的夹角 $\beta=26.6^\circ$. $\{111\}$ 织构平面与下一次剪切平面的夹角从 71.6° 变至 60° ,与 70.5° ($\{111\}$ 四面体两个面的夹角)很接近,即 $\{111\}$ 平面之一转向并接近平行于下次剪切平面的位置,使下一次剪切变形的 $\{111\}$ 平面上的滑移系更容易启动.因此,从变形织构来考虑,当模具内角 $\Phi=90^\circ$ 时,路线Bc是细化晶粒最有

效的方式,其次是路线 C,路线 A 最差.虽然路线 B_A 中相邻挤压道次间剪切面的夹角和路线 B_C 的相同,且无多余应变,但是经第一次挤压后,其晶粒拉长方向与挤压轴(*x* 轴)方向的夹角 β 从 26.6° 开始不断减小,即晶粒拉长平面与下一道次剪切平面的夹角不能继续与细化晶粒最有效的角度(70.5°)保持相近,所以路线 B_A 也比路线 B_C 的细化效果差.

表 2 晶粒拉长方向与挤压轴(*x* 轴)方向的夹角
Table 2 Calculated angles (β) between grain elongation direction and the extrusion (*x*) axis

挤压次数	$\beta/(^{\circ})$			
	路线 A	路线 B _C	路线 B _A	路线 C
1	26.6	26.6	26.6	26.6
2	14.0	19.5	19.5	等轴
3	9.5	26.6	12.6	26.6
4	7.1	等轴	10.0	等轴

4 结 论

(1)ECAP 模具的内角 Φ 不同,其工艺路线的细化效果亦不同.研究工艺路线的细化效果时,要综合考虑剪切应变量、剪切面、晶体结构和变形织构等因素的相互作用.

(2)对晶体结构不同的金属进行变形时,可以根据其主要滑移面间的夹角,选择不同内角 Φ 的模具(或组合模具)和最有效的工艺路线.

参考文献:

[1] SEGAL V M . Materials processing by simple shear[J]. Materials Science and engineering A,1995,197:157-164.

[2] FURUKAWA M,HORITA Z,NEMOTO M, et al. Re-view processing of metals by equal channel angular pressing[J]. Journal of Materials Science,2001,36:2835-2843.

[3] IWAHASHI Y, WANG J,HORITA Z, et al. Principle of equal channel angular pressing for the processing of ultrafine grained materials [J]. Scriptamater, 1996, 35:143.

[4] IWAHASHI Y, HORITA Z, NEMOTO M,et al. The process of grain refinement in equal-channel angular pressing[J]. Acta Materialia,1998,46:3317.

[5] FURUKAWA M, IWAHASHI Y, HORITA Z, et al. The shearing characteristics associated with equal-channel angular pressing[J]. Materials Science and engineering A,1998,257:328.

[6] PRANGNELL P B,GHOLINIA A, MARKUSHEV V M,et al. Investigations and Applications of Severe Plastic Deformation[J]. Dordrecht,2000,99:65-71.

[7] ZHU Y T, LOWC T C. Observations and issues on mechanisms of grain refinement during ECAP process [J]. Materials Science and engineering A, 2000, 291: 46-53.

[8] 李永霞,张永刚,陈昌麒.等截面通道角形挤压对高纯铝微观组织及力学性能的影响[J]. 航空材料学报,2001, 21(3):33-38.

Research situation of the effect of different process routes on the microstructural evolution of materials in ECAP

NONG Deng, HUANG Shao-jun, LI Lin, ZHENG Kai-hong, WANG Hai-yan
(Research Department of Wear-Resistant materials & Machinery,Guangzhou Research Institute of Non-ferrous Metals,Guangzhou 510651, China)

Abstract: This paper introduces the present state of equal channel angular pressing (ECAP) in the technical characteristic and basic principle. The research situation of the effect of different process routes on the microstructural evolution of materials in ECAP is summarized.

Key words: ECAP; process route; microstructural evolution