

ECAPT 过程中 TE 工艺对 ECAP 变形规律的影响

董飞, 华睿, 钱陈豪, 李萍

(合肥工业大学 材料科学与工程学院, 合肥 230009)

摘要: 通过对纯铝等径角挤压 (ECAP) 和等径角挤扭 (ECAPT) 变形行为的数值模拟, 获得了材料在不同工艺下的应变和损伤情况。结果表明, 在 ECAPT 工艺中试样通过 ECAP 通道后能获得比单独的 ECAP 更高的应变累积, 应变累积量随 TE 通道螺旋角 β 的增大而增大, 同时试样内部的应变分布也得到改善, 试样在受到 TE 工艺的背压后材料表面受到剪切破坏的可能性也明显降低。

关键词: 等径角挤扭 (ECAPT); 数值模拟; 应变累积

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2013.05.003

中图分类号: TG376

文献标识码: A

文章编号: 1674-6457(2013)05-0009-04

Effects of Subsequent TE Process on the Material Deformed by ECAP during ECAPT Process

DONG Fei, HUA Rui, QIAN Chen-hao, LI Ping

(School of Materials Science and Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: The distributions of the strain and damage of blank were obtained by the numerical simulation of equal channel angular pressing (ECAP) and equal channel angular pressing & torsion (ECAPT) with aluminum 1100. Results indicate that the blank through the ECAP channel in ECAPT accumulates more strains than those of the simple ECAP, and the value of the effective strain will increase with the helical angle β of TE channel increasing. What's more, the distribution of the strain of the part is more homogenous, and the possibility of the damage decreases obviously when the part is forced by the back pressure of TE.

Key words: equal channel angular pressing and torsion; numerical simulation; accumulation of strain

近年来,通过大塑性变形工艺获得超细晶材料,从而改善材料物理性能和综合力学性能的研究受到广泛关注。其中 ECAP^[1-2] 和 TE^[3-4] 工艺具有在挤压变形后不改变试样的横截面积,并能够重复挤压获得大的累积应变的优势,而将 ECAP 和 TE 结合起来的 ECAPT^[5] 工艺不仅继承了两者的优势,在 1 次挤压中完成 2 次变形,同时弥补了 ECAP 细晶能力不强,TE 变形不均匀的不足。

ECAPT 工艺是在 ECAP 的基础上,在 ECAP 模具的挤出端型腔内加工出螺旋状的型槽,从而实现

完整连续的 ECAP 和 TE 工序。大塑性变形工艺获得超细晶的过程主要通过应变累积实现,ECAPT 工艺累积的应变不是 ECAP 和 TE 两者简单的线性叠加,试样在通过 TE 通道时受到的巨大应力相当于对经过 ECAP 通道部分的材料施加了背压^[6-7],从而使通过 ECAP 通道部分的材料应变增大。文中通过数值模拟研究了 ECAPT 过程中,试样在经过 ECAP 后应变累积与材料损伤的情况,并与单纯的 ECAP 变形工艺比较,探讨了 TE 工艺对 ECAP 变形后的影响。

收稿日期: 2013-04-24

作者简介: 董飞(1990-),男,湖北荆州人,主要研究方向为先进塑性成形。

1 有限元模型的建立

ECAPT 工艺的通道示意如图 1 所示,试样在经过直角通道和螺旋通道时发生近似纯剪切变形,从而实现剧烈的应变累积。

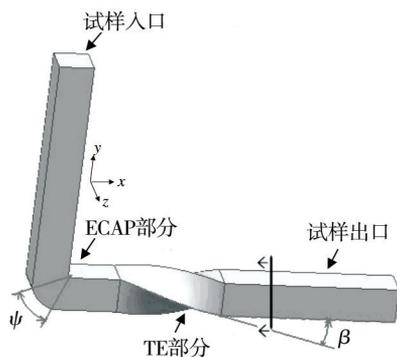


图 1 ECAPT 通道模型

Fig. 1 The model of ECAPT

利用 Deform-3D 有限元模拟软件对 2 种工艺变形过程进行模拟仿真。模具温度为 150 °C,坯料温度为 200 °C。坯料采用纯铝 (Al1100),试样尺寸为 10 mm×10 mm×60 mm,纯铝在低温条件下具有一定的黏性,对应变速率具有敏感性,因此毛坯材料采用刚黏塑性模型。模具设置为刚体,选用外角 $\psi = 37^\circ$,内角 $\varphi = 90^\circ$,内角弧度 $R=0.5$ mm 的 ECAPT 模型。由于坯料在通过 TE 通道过程中受到应力的主要与螺旋角 β 有关,因此,根据常用的 TE 过程中 β 角度值范围,选取了 $20^\circ, 25^\circ, 30^\circ, 35^\circ$ 等 4 个角度。模具和试样摩擦接触采用常剪切模型,摩擦因子取 0.12,凸模下压速度为 5 mm/s,采用四节点四面体等参单元划分 50 000 个网格单元。ECAPT 模型通道如图 1 所示,图 2 为图 1 中水平通道相应位置的剖面图。

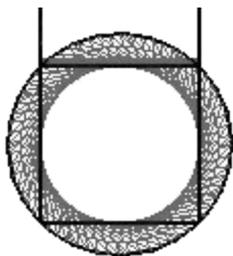


图 2 剖面

Fig. 2 The image of cross-section

2 模拟结果分析与讨论

2.1 坯料全局等效应变分布

ECAP 和 ECAPT 工艺中试样剖面上的等效应变分布分别如图 3 和图 4 所示。在 ECAP 变形过程中,受通道摩擦的影响,上下表面材料相对滞后于中心部分的材料流动^[8],同时中心流变区的等效应变呈层状分布。这是由于越靠近内角部分的材料剪切变形越剧烈,经过转角区之后材料刚性平移出水平通道,表现为沿挤压垂直方向的等效应变从上而下逐次减少。

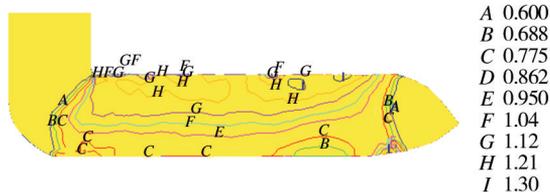


图 3 ECAP 剖面的等效应变分布

Fig. 3 The distribution of equivalent strain of ECAP

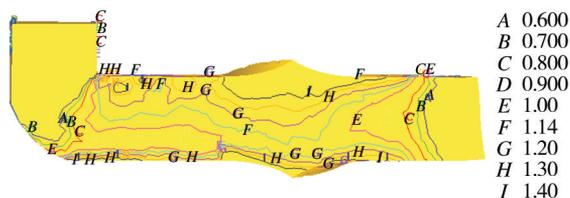


图 4 ECAPT($\beta=35^\circ$)剖面的等效应变分布

Fig. 4 The distribution of equivalent strain of ECAPT($\beta=35^\circ$)

在 ECAPT 变形过程中,由于受到 TE 变形区挤压的作用,材料在经过 ECAP 直角通道后平移受阻,尤其是试样的周向部分受到 TE 通道外围剧烈的螺旋变形产生的背压,其剧烈变形区如图 2 所示,使得周向材料内部的应力应变都相应增大。中心部分材料基本没有受到来自 TE 部分的背压作用,仍然为刚性平移,表现为材料的应变由心部向周向逐渐增大,从而使材料在周向的应变更加均匀。

2.2 跟踪点位置等效应变

如图5所示,在ECAP以及 β 为 $20^\circ, 25^\circ, 30^\circ, 35^\circ$ 的ECAPT模拟结果中分别选取相同截面上的点。由于此截面在ECAPT工艺中已经完成了ECAP的变形过程,还没开始TE的变形过程,因此此截面的变形情况可以很好地表现ECAPT整体变形过程中TE部分对ECAP后试样的影响。

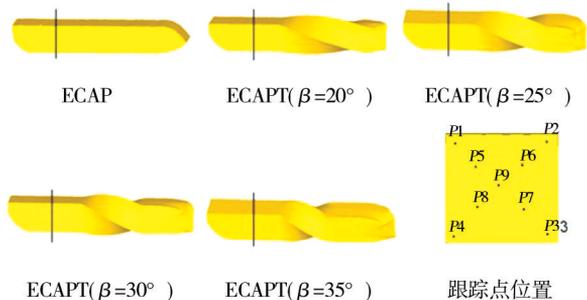


图5 不同工艺下跟踪点位置

Fig. 5 The position of trace points at different states

不同工艺下各跟踪点的应变曲线如图6所示。可以看出,ECAPT中试样周向的材料相对于单纯的ECAP试样的周向部分在经过转角后的等效应变显著增大,并且随着 β 的增大,TE通道对周向材料的背压增大,应变值也逐渐变大。当 $\beta=35^\circ$ 时,周向各点的应变值平均增加50%以上,但中心部分的材料仍然处于刚性平移的状态,应变值没有太大变化,反而随着 β 的增加,有减小的趋势。

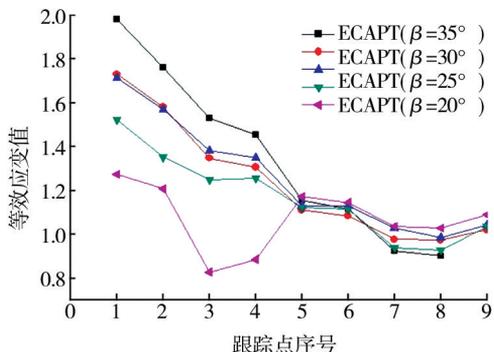


图6 不同工艺下跟踪点应变曲线

Fig. 6 The strain curves of trace points at different states

2.3 试样损伤分布

试样在通过ECAP转角后,经过剧烈剪切变形,

在试样表面容易产生破坏。Cockcroft-Lathan 准则描述了不同变形条件对材料内部产生破坏的影响:

$$\int \frac{\sigma_{\max}}{\bar{\sigma}} \dot{\epsilon} dt \geq C \quad (1)$$

式中: σ_{\max} 为最大主应力; $\bar{\sigma}$ 为等效应力; $\dot{\epsilon}$ 为等效塑性应变速率; C 为与材料有关的常数,可通过实验测得。

当不等式左边的数值大于常数 C 时,材料将产生破坏。2种工艺下材料内部的损伤程度如图7和图8所示。在ECAP工艺中试样内部和表面都存在不同程度的损伤,尤其是试样的上表面受到尖锐内角处剧烈的剪切作用,材料在转角处有被撕裂的趋势^[9-10]。在ECAPT工艺中,由于试样通过转角后受到TE部分的静水压力,使材料上表面剪切破裂受阻,保持了材料的完整性,并且在一定程度上使转角处材料在三向压应力状态下完成纯剪切变形,有利于材料内部组织晶粒的细化。

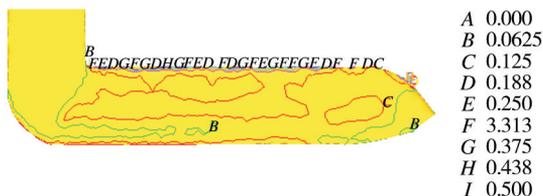


图7 ECAP剖面的损伤分布

Fig. 7 The distribution of damage of ECAP

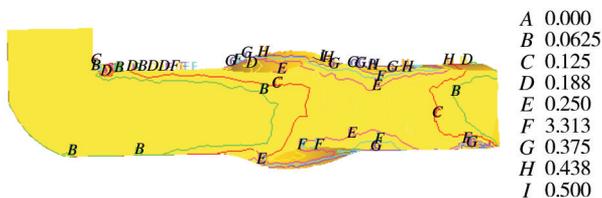


图8 ECAPT($\beta=35^\circ$)剖面的损伤分布

Fig. 8 The distribution of damage of ECAPT($\beta=35^\circ$)

纯铝经过ECAP和ECAPT后外表面的损伤情况分别如图9和图10所示。可以看出,经过ECAP后纯铝试样上表面出现分段的条状裂纹,裂纹扩展方向与上表面成一定角度,与ECAP通道转角处的纯剪切面方向基本一致。这表明材料在转角处受到内角的剧烈剪切被破坏,裂纹的出现不仅破坏了材

料的完整性,同时减弱了材料内部的应变累积,影响了大塑性变形工艺对材料组织的细化。试样在经过 ECAPT 通道的拐角处后,表面完好,无破裂现象,这表明 TE 通道对材料流动产生的背压有效地预防了试样受到剪切破坏,保证了材料的完整性。



图9 纯铝 ECAP 试样

Fig.9 The sample of pure Al after ECAP



图10 纯铝 ECAPT 试样

Fig.10 The sample of pure Al after ECAPT

3 结语

1) 在 ECAPT 工艺中试样通过 ECAP 通道后试样的轴向部分能获得比单独通过 ECAP 通道更高的应变累积,应变累积量随 TE 通道螺旋角 β 的增大而增大。试样中心部分应变基本保持不变。

2) 受到 TE 通道背压的作用,材料内部的等效应变分布转变为由中心部分向周向逐渐增大,使得应变分布更加均匀。

3) TE 通道背压的作用能够有效地防止材料表面受到 ECAP 拐角处的剪切破坏,保证了材料的完整性。

参考文献:

[1] 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.

[2] IWAHASHI Y, WANG J, HORITA Z, et al. Principle of Equal Channel Angular Pressing for the Processing of Ultra Fine Grained Materials [J]. Scripta Materialia, 1996,

35(2): 143-146.

- [3] BEYGELZIMER Y, VARYUKHIN V, SYNKOV S, et al. Useful Properties of Twist Extrusion [J]. Materials Science and Engineering, 2009, 503: 14-17.
- [4] AKBARIMOUSAVI S A A, SHAHAB A R. Influence of Strain Accumulation on Microstructure of Aluminum 100 in the Twist Extrusion [J]. International Journal of Modern Physics B, 2008, 22(18): 2858-2865.
- [5] 王雪, 吴战立, 徐迎强, 等. 等径角挤扭工艺的研究 [J]. 精密成形工程, 2010, 2(4): 7-11.
- WANG Xue, WU Zhan-li, XU Ying-qiang, et al. Study of Equal Channel Angular Pressing and Twist [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2010, 2(4): 7-11.
- [6] 刘咏, 唐志宏, 周科朝, 等. 纯铝等径角挤技术(II)——变形行为模拟 [J]. 中国有色金属学报, 2003, 13(2): 294-299.
- LIU Yong, TANG Zhi-hong, ZHOU Ke-chao, et al. Equal Channel Angular Pressing Process of Pure Aluminum (II) - Simulation of Deformation Behavior [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2003, 13(2): 294-299.
- [7] 李萍, 张翔, 薛克敏, 等. 纯铝等径角挤扭新工艺变形 [J]. 塑性工程学报, 2010, 17(5): 47-52.
- LI Ping, ZHANG Xiang, XUE Ke-min, et al. Research on the New Process of Equal Channel Angular Pressing and Torsion of Pure Aluminum [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2010, 17(5): 47-52.
- [8] 周明智, 薛克敏, 李萍. 温度和背压方式对等通道转角挤压过程的影响 [J]. 中国机械工程, 2007, 18(18): 2163-2168.
- ZHOU Ming-zhi, XUE Ke-min, LI Ping. Effects of Temperature and Back Pressure Type on Equal Channel Angular Extrusion Process [J]. China Mechanical Engineering, 2007, 18(18): 2163-2168.
- [9] 郭廷彪, 丁雨田, 胡勇, 等. 等径角挤压过程中材料的流变行为研究 [J]. 材料导报, 2009, 23(9): 93-96.
- GUO Ting-biao, DING Yu-tian, HU Yong, et al. Study on the Materials Flowing and Deformation Behavior by Equal Channel Angular Pressing (ECAP) [J]. Materials Review, 2009, 23(9): 93-96.
- [10] 郭早勤, 白朴存, 张秀云, 等. 模具外角和内角对等通道角挤压的影响的有限元分析 [J]. 热加工工艺, 2008, 37(5): 18-22.
- WU Zao-qin, BAI Pu-cun, ZHANG Xiu-yun, et al. Finite Element Analysis of Influence of Outer Corner Angle and Channel Angle on Equal Channel Angular Extrusion [J]. Hot Working Technology, 2008, 37(5): 18-22.