

文章编号: 1004-0609(2003)02-0294-06

纯铝等径角挤技术(II) ——变形行为模拟^①

刘 咏, 唐志宏, 周科朝, 李志友
(中南大学 粉末冶金国家重点实验室, 长沙 410083)

摘 要: 通过有限元模拟和坐标网格, 对纯铝等径角挤过程的变形行为进行了模拟和试验。结果表明, 纯铝在单道次等径角挤压过程中所需的载荷随着样品位移的增加大致可分为快速增加、缓慢增加、快速增加、载荷值趋于稳定、载荷下降 5 个阶段。由于样品外部在主要变形区的流动速率比样品内部的快, 因而样品在等径角挤压过程中会出现不均匀变形, 样品底部沿宽度方向的塑性变形量明显少于样品顶部和中部的, 坐标网格法实验结果也证明了这一点。在等径角挤压过程中, 样品不同部位的应力状态不一致, 样品内部存在压应力 $\rightarrow$ 拉应力的转变, 样品外部存在压应力 $\rightarrow$ 拉应力 $\rightarrow$ 压应力的转变。摩擦消除后, 有效应变有所增加, 但不能降低样品变形的不均匀性; 采用尖角模具既能产生更大的剪切应变, 又能提高变形的均匀性。

关键词: 等径角挤; 数值模拟; 变形行为

中图分类号: TG 146.2; TG 371

文献标识码: A

等径角挤(ECAP)作为一种细化晶粒的有效手段, 已得到广泛的研究。利用数值模拟可以直观深入地研究 ECAP 变形行为。LIU 等^[1]分析了 ECAP 过程中的载荷问题; Delo 等^[2, 3]研究了难变形金属热加工变形中非等温行为、金属的可加工性^[4]、局部不均匀剪切^[5, 6]和材料特征参数对 ECAP 过程中变形和断裂的影响^[6]; LIU 等^[7]开发了一种新型的 S 形模具, 根据有限元分析, 这种模具可降低拉伸应力, 增加变形的均匀性; Srinivasan 等^[8]分析了采用不同模角模具时样品的变形行为。尽管 ECAP 过程的数值模拟已取得了一定的效果, 但对 ECAP 过程中的变形行为仍缺乏全面的认识, 而且由于通过实验研究不同参数对变形行为影响的工作量较大, 因此仍有必要采用有限元模拟的方法进行进一步的研究。

DEFORM-2D(Design Environment for Forming) 通用有限元分析软件是目前世界上公认应用最广、功能最强的金属塑性成形工艺模拟软件。近年来, DEFORM-2D 已广泛应用于金属锻造、拉拔、挤压、轧制等塑性加工工艺的数值模拟之中。

本研究中作者借助大型商业化 DEFORM-2D 有限元分析软件, 对纯铝在 ECAP 过程中的变形行为进行数值模拟; 同时通过坐标网格法实验对变形行

为进行研究, 并将有限元模拟的结果与坐标网格法测定的结果进行比较。

1 实验

1.1 ECAP 工艺

ECAP 在特别设计的模具(如图 1 所示)中进行。模具材料采用合金钢。在此模具中, 两通道相交的内角 Φ 为 120° , 外角 Ψ 为 55° 。为了减少试样与模具之间的摩擦, 在 ECAP 过程中采用硬脂酸锌作为润滑剂。实验过程参见文献[9]。

1.2 坐标网格法实验

坐标网格法是研究金属塑性变形时广泛使用的一种方法。把铝毛坯做成两块对分试样, 其中一块刻有正方形的坐标网, 方格尺寸为 $2\text{ mm} \times 2\text{ mm}$ 。为了便于分开, 拼合面上涂有硬脂酸锌润滑剂。坐标网格法不仅能定性地反映塑性变形物体的应力应变状态, 而且能定量地计算整个变形物体的应力及应变分布。

1.3 有限元模拟

在宽度为 W , 长度为 l 的长方体样品中, 由于

① 基金项目: 高等学校博士点基金资助项目(99053309)

收稿日期: 2002-07-18; 修订日期: 2002-11-11

作者简介: 刘 咏(1973-), 男, 副教授, 博士

通讯联系人: 刘 咏, +86-731-8876630, Yonliu@mail.csu.edu.cn

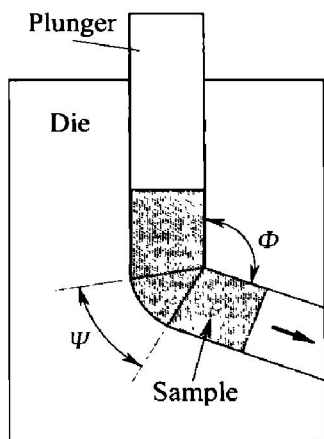


图 1 等径角挤压模具示意图
Fig. 1 Schematic of ECAP mould

沿厚度方向的应变为零, 因此等径角挤压过程可看作二维平面应变过程。

模拟挤压过程的有限元模型几何描述如图 2 所示。模型网格划分采用四节点等参单元, 网格划分的疏密程度根据各部位变形情况和模具形状而定, 由 DEFORM-2D 软件自动生成, 随数值模拟的进行, 网格进行自适应重划分。试样结点总数为 2 012, 单元总数为 2 013, 计算步长(即时间步长)为 0.01 s。

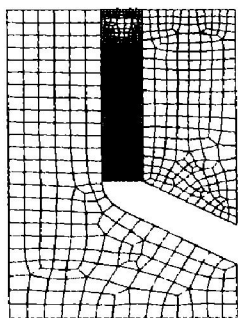


图 2 等径角挤压过程模拟的初始有限元网格
Fig. 2 Initial finite element net for ECAP simulation

1.4 数值模拟参数的选取

1.4.1 模具参数的选取

模拟样品尺寸为 $10\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 40\text{ mm}$, 首先设定模具的内角 $\Phi = 120^\circ$, 外角 $\Psi = 55^\circ$ (与实验中模具的参数相同), 随后改变模具参数, 采用内角 $\Phi = 120^\circ$, 外角 $\Psi = 0^\circ$ 的模具来研究模具外角对变形行为的影响。依据试验和理论分析^[10], 当挤压速度较低($0.001 \sim 0.01\text{ m/s}$) 时, 由于样品与模具之间的摩擦而导致挤压过程中变形温度的升高可忽略不计, 因此变形过程可看作等温过程, 在模拟结果中

将不考虑温度场的分布状态。

1.4.2 流变应力模型及应力—应变曲线

DEFORM-2D 有限元软件读取流变应力的方法有两种: 一是将给定的变形状态参数($\epsilon, \dot{\epsilon}, T$) 下的流变应力以数据点的形式输入计算程序, 有限元软件根据所输入的数据自动插值计算; 另一种则是将流变应力以经验或半经验公式的形式输入计算程序。本研究中采用第 1 种方法。图 3 所示是 1100 铝合金在不同应变速率下的流变应力曲线。

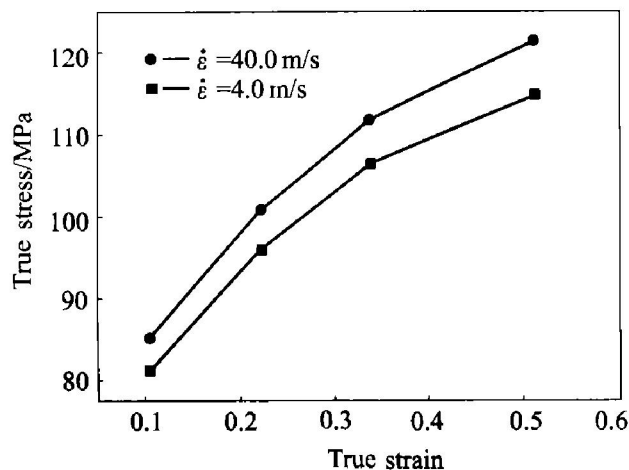


图 3 1100 铝合金在室温下的应力—应变曲线

Fig. 3 Stress—strain curves of 1100 Al alloy at room temperature

2 结果与讨论

2.1 ECAP 过程中的变形行为

材料在 ECAP 过程中的剪切变形主要集中在变形区(见图 1)。图 4 所示是实验测定的纯铝在单道次 ECAP 过程中的载荷—位移曲线, 从图中可以看出, 材料等径角挤压所需的载荷随着样品位移的增加大致可分为 5 个阶段: 快速增加、缓慢增加、快速增加、载荷值趋于稳定和载荷下降阶段。

借助于有限元数值模拟分析, 从有效应力随位移变化的角度, 对上述 5 个阶段的特征进行了分析。图 5 所示是单道次挤压的有效应力演化图, 模拟的条件为 $\Phi = 120^\circ$, 外角 $\Psi = 55^\circ$, 摩擦因数为 0.5, 与实验条件相当。从图 5 中可以发现: 1) 第 1 阶段 试样前部经过主要变形区, 如图 5(a) 所示, 此时, 试样中发生剪切变形的部分随着变形的进行而逐渐增加, 同时样品的内应力和挤压所需的载荷也增加。2) 第 2 阶段 试样前部已经经过了剪切变形, 样品向退出通道的顶部方向弯曲(如图 5(b) 所示)。由于样品前部通过变形区发生弯曲, 在

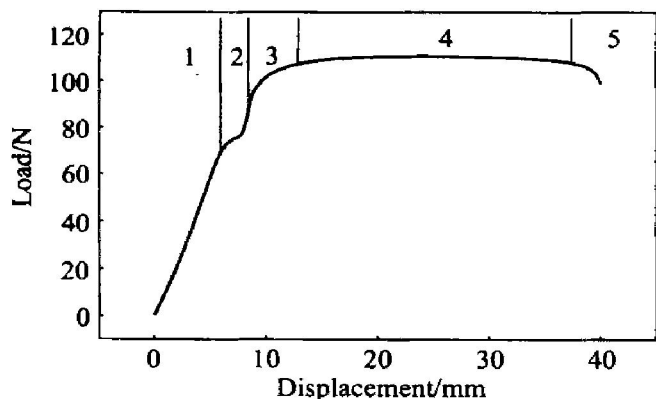


图4 实验测定的载荷—位移曲线

Fig. 4 Experimental load—displacement curve

与退出通道的顶部接触之前并没有受到模具太多的限制,因此在此阶段载荷增加缓慢。Valiev 等^[1]在纯铜的 ECAP 过程中也观察到了这种载荷的缓慢增加现象。3) 第3阶段 由于样品与退出通道的顶部相接触(如图 5(c)所示),模具对样品变形有阻碍作用,因此载荷增加很快。值得注意的是,模拟中发

现,此阶段样品并没有完全充满退出通道,而是与通道的顶部形成一条狭长的缝隙。在纯铝 ECAP 实验中也观察到了此缝隙的存在。4) 第4阶段 随着挤压的进行,载荷基本上保持不变。样品与退出通道顶部的缝隙仍存在(如图 5(d)所示),这与样品在经过主要变形区所产生的弯曲变形有关。5) 第5阶段 样品的尾部退出主要变形区,载荷下降(如图 5(e)所示)。

2.2 有效应变分布

图 6 所示是样品不同部位在变形过程中有效应变与时间的关系曲线,它表明了样品中不同部位的有效应变都随着挤压时间的增加而逐渐增加,最后达到稳定,这一稳定值就是该部位在经过主要变形区后所产生的有效应变,有效应变从零增加到稳定值的时间代表了此部位经过有效变形区的时间。从图中可以看出,样品头部(点8)和样品的尾部(点1)所经受的变形明

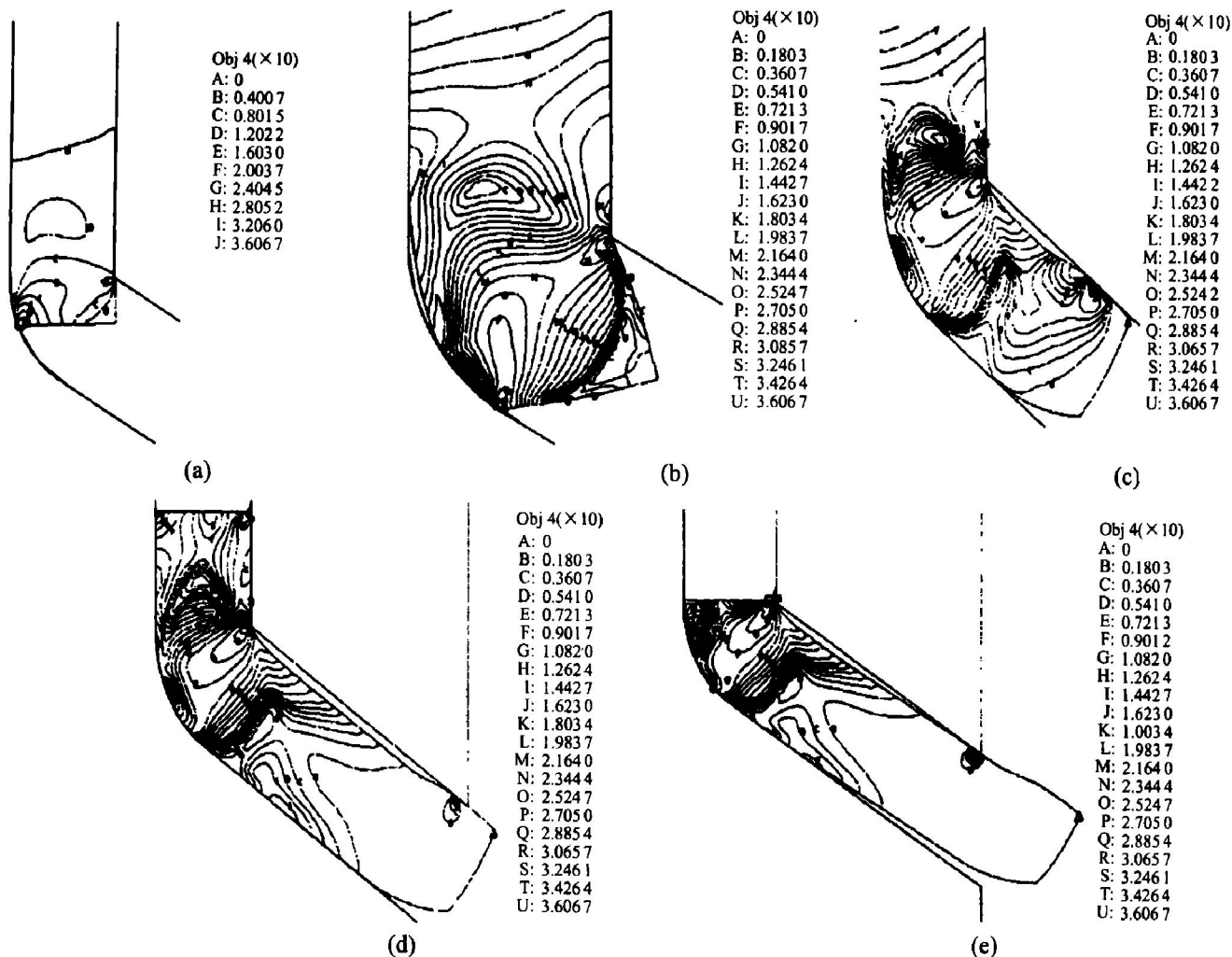


图5 等径角挤压过程中的等效应力与样品位移的关系

Fig. 5 Relation between equivalent stress(MPa) and displacement in ECAP process

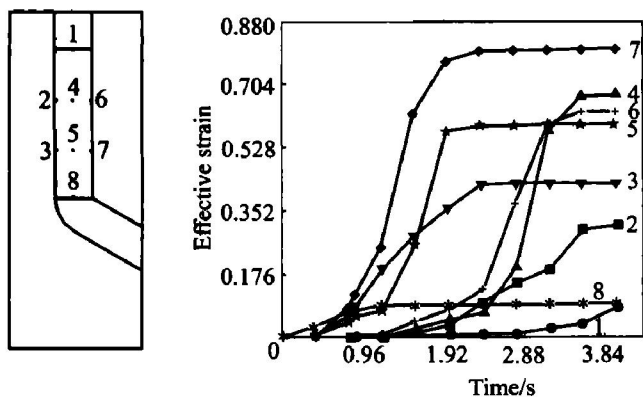


图6 样品不同部位的有效应变与时间的关系

Fig. 6 Relation between effective strain and time at different sites of sample

显小于样品中部(点2, 3, 4, 5, 6和7)的。而在样品的中部, 沿宽度方向有效应变值也有差异。底部(点2和3)的有效应变要比中部(点4和5)和顶部(点6和7)的小得多。而且, 样品底部(点2和3)的有效应变达到稳定值所需的时间明显要比中部(点4和5)和顶部(点6和7)的长。

样品的前部和尾部由于所受应力的复杂性, 其剪切应变的分布与最初的充模情况有关, 并与样品中部的变形情况明显不同, 称为末端效应, 它的产生在 ECAP 过程中不可避免。对 ECAP 过程中变形行为的理论分析大多是从稳定变形区推断得出, 并不适用于样品两端的情形。如果样品太短, 前部和尾部相交在一起, 由于不均匀变形而导致样品断裂的可能性将增加, 因此就相对宽度而言, 样品应该足够长, 以便能产生一个稳定变形区。

为了证实有限元数值模拟的结果, 进行了单次挤压的坐标网格法实验。图7所示是坐标网格法实验的结果。变形前在样品纵剖面上的网格为正方形, 经过剪切变形后, 正方网格发生扭曲, 网格扭曲越严重, 则剪切变形程度越大。由图7中可以看出, 正方网格在变形后变成了平行四边形, 这个平行四边形与原来的正方形的垂直边成一夹角 θ , 即为剪切角, 因此剪切应变 γ 为

$$\gamma = \tan \theta \quad (1)$$

由于 ECAP 过程可看作近似理想的纯剪切过程, 因此, 由 $\Delta \epsilon = \gamma / \sqrt{3}$ 可计算出挤压所产生的有效应变值。图7(b)中由于样品头部和尾部的变形比较复杂, 可以不予考虑。在样品的中部和顶部, 可以明显看到比较直的剪切线, 而样品的底部已经经过了剪切变形区, 但剪切线在样品的底部并不是一条直线, 而是发生了弯曲, 也就是说, 沿宽度方

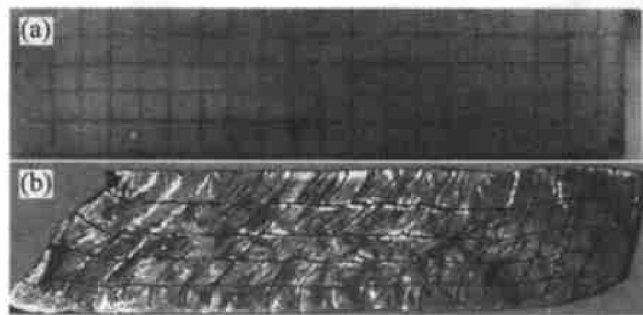


图7 坐标网格法实验结果

Fig. 7 Experimental results of grid line method
(a) —Before deformation; (b) —After one extrusion

向, γ 的大小并不相同, 靠近顶部的 γ 值不仅基本相同, 而且 γ 值较大, 约为 45° ; 而靠近底部的部位, 随着与底部距离的减小, γ 值逐渐减小。这种样品底部 γ 值的梯度分布表明在此区域发生的变形是不均匀的, 这与有限元模拟中的 ECAP 样品有效应变分布的结果完全一致。通过测定, 非均匀变形发生在靠近样品底部的 15% 的区域。

由图7(b), 根据公式(1)可粗略计算出样品沿宽度方向的有效应变分布(如图8所示)。同时也依据有限元模拟的结果得出样品稳定变形区的有效应变值与距底部距离的关系。从图中可以看出, 网格法实验结果和有限元模拟的结果相一致。

图8中的水平直线($\epsilon = 0.6061$)表示在 $\Phi = 120^\circ$ 和 $\Psi = 55^\circ$ 时依据理论计算所得到的有效应变值。在平面应变条件下可从有限元模拟结果中根据公式(2)计算出体积平均有效应变:

$$\epsilon_a = \frac{\sum \epsilon V_i}{\sum V_i} = \frac{\sum \epsilon L_i}{\sum L_i} \quad (2)$$

式中 V 和 L 分别代表体积单元和长度单元, 下标 i 代表样品第 i 个体积元素或长度元素。依据公式

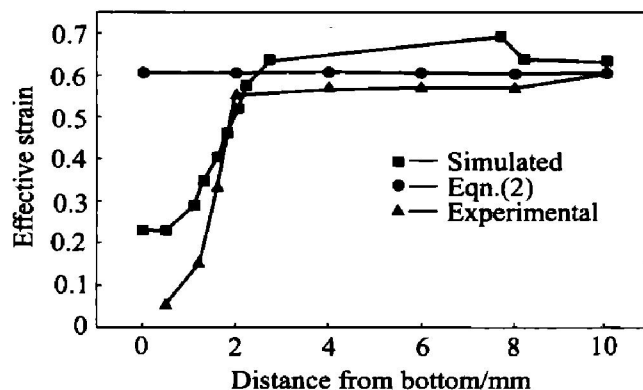


图8 等径角挤压过程沿宽度方向有效应变的分布

Fig. 8 Distribution of effective strain along width direction in ECAP process

(2) 计算出的平均有效应变值为 0.568 6, 略低于理论计算值, 这与样品底部的小塑性变形区的形成有关。

2.3 平均应力的分布

由实验和模拟中样品变形后不同部位的几何形状可知, 样品不同部位的变形过程并不相同, 这归因于应力状态的不对称性。为了研究样品在 ECAP 过程中的应力状态, 分析了稳定载荷阶段(第 4 阶段)平均应力的分布, 如图 9 所示。可以看出, 沿宽度方向样品外部的平均应力明显与样品内部的不同, 不仅数值上有差异, 而且应力状态也有明显差异。样品内部在剪切变形前由于挤入的影响受压应力作用, 内角点的压应力最大(曲线 C), 经过剪切变形进入退出通道后, 压应力转变为拉应力。而样品外部在进入剪切变形区时, 由于沿压力方向被拉长, 最初的压应力转变成拉应力, 但当样品退出主要变形区时则受压应力作用, 因此样品外部在经过剪切变形时, 其应力状态发生了压应力 $\rightarrow$ 拉应力 $\rightarrow$ 压应力的转变。样品前部和尾部的应力状态和变形行为比较复杂, 与样品中部的不一致, 从而造成应变分布的不同。

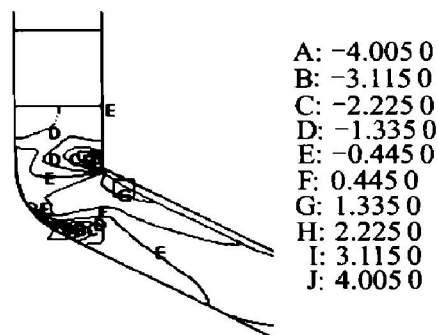


图 9 等径角挤压过程的平均应力分布

Fig. 9 Distribution of average stress (MPa) in ECAP process

2.4 摩擦对 ECAP 过程样品变形行为的影响

比较了采用不同摩擦因数(剪切因子)时挤压坯的变形行为, 发现剪切因数为零时, 仍然存在不均匀变形区, 因此消除摩擦并不能使剪切变形更均匀。同时采用公式(2)计算得到的有效应变为 0.62, 比有摩擦条件下的稍高。

2.5 模角对 ECAP 过程样品变形行为的影响

图 10 所示是采用尖角模($\Psi=0^\circ$)时的有效应变分布图。从图中可以发现, 当不考虑样品头部和尾部的有效应变时, 沿样品的宽度方向, 有效应变

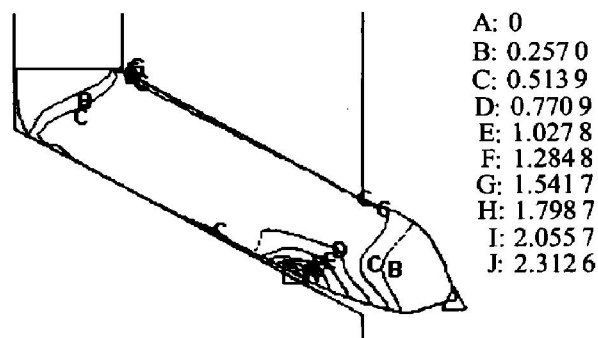


图 10 采用尖角模时的有效应变分布图

Fig. 10 Distribution of effective strain with closed mould

的分布是十分均匀的, 底部的小塑性变形区已经基本消失; 同时也发现, 在变形过程中, 样品并不是完全充满模具, 而是在模具两通道的交叉处与模具形成一定的空隙, 这在一般的成形工艺, 如轧制中, 常被称做“死区”。

图 11 所示是采用尖角模的平均应力分布图。从图中可以看出, 与采用圆弧模具时平均应力的分布不同, 在主要变形区, 虽然样品内部在经过主要变形区后, 应力由最初压应力转变为拉应力, 但样品外部并没有发生压应力 $\rightarrow$ 拉应力 $\rightarrow$ 压应力的转变, 而是一直处于压应力状态。

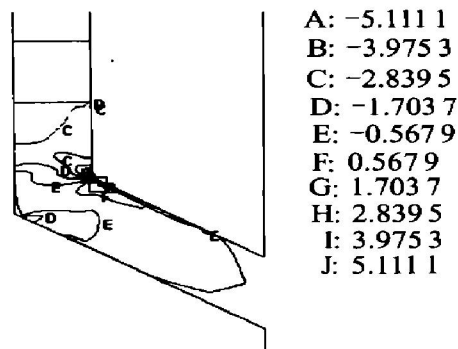


图 11 采用尖角模的平均应力分布图

Fig. 11 Distribution of average stress (MPa) with closed mould

实验发现, 采用尖角模具时主要变形区内样品内部和外部的速率变化不大, 样品各个部位的有效应变从 0 增加到稳定值所需的时间基本相同, 沿样品宽度方向的有效应变也基本均匀。采用公式(2)计算出采用尖角模所产生的有效应变值为 0.670 0, 大于采用圆弧模具所产生的有效应变(0.610 3)。因此, 采用尖角模进行等径角挤压, 其变形比较均匀。

REFERENCES

- [1] LIU Zhi-yan, WANG Zhong-jin. Finite element analysis of the load of equal cross section lateral extrusion[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1999, 94(2): 193 - 196.
- [2] Delo D P, Semiatin S L. Finite element modeling of non-isothermal equal channel angular extrusion[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 1999, 30(5): 1391 - 1402.
- [3] Delo D P, Semiatin S L. Hot working of Ti-6Al-4V via equal channel angular extrusion[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 1999, 30A(9): 2473 - 2481.
- [4] Semiatin S L, Segal V M, Goforth R E, et al. Workability of commercial-purity titanium and 4340 steel during equal channel angular extrusion at cold-working temperatures[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 1999, 30A(5): 1425 - 1436.
- [5] Semiatin S L, Delo D P. Equal channel angular extrusion of difficult-to-work alloys[J]. Materials and Design, 2000, 21(4): 311 - 322.
- [6] Semiatin S L, Delo D P, Shell E B. Effect of material properties and tooling design on deformation and fracture during equal channel angular extrusion[J]. Acta Materialia, 2000, 48(8): 1841 - 1851.
- [7] LIU Zhi-yan, LIU Gang, WANG Z R. Finite element simulation of a new deformation type occurring in changing-channel extrusion[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2000, 12(1): 30 - 32.
- [8] Raghavan S. Computer simulation of the equal channel angular extrusion (ECAE) process[J]. Scripta Materialia, 2001, 44(1): 91 - 96.
- [9] 唐志宏. 等径角挤过程变形行为研究[D]. 长沙: 中南大学, 2002.
- TANG Zhi-hong. Plastic deformation behavior in equal channel angular extrusion[D]. Changsha: Central South University, 2002.
- [10] 乔 端, 钱仁根. 非线性有限元及其在塑性加工中的应用[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1990.
- QIAO Duan, QIAN Ren-ge. Application of Nonlinear Finite Element in Plastic Working[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1990.
- [11] Valiev R Z, Kozlov E V, Ivanov Yu F, et al. Deformation behaviour of ultra-fine-grained copper[J]. Acta Metallurgica, 1994, 42(7): 2467 - 2475.

Equal channel angular pressing process of pure aluminum(II)

——Simulation of deformation behavior

LIU Yong, TANG Zhi-hong, ZHOU Ke-chao, LI Zhi-you

(State Key Laboratory for Powder Metallurgy, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: The computer simulation and experiments for the deformation behavior of pure Al in equal channel angular pressing (ECAP) process were conducted by finite element method (FEM) and coordinate network. The results show that the load required to drive the deformation varies with increasing the displacement, according to the following five steps: rapid increase, slowly increase, another rapid increase, stabilizing and decrease. Inhomogeneous deformation exists in the width direction of the sample, and the plastic deformation in the end of the sample is smaller than that in the top and that in the center. The coordinate network experiment verifies this phenomenon. This inhomogeneity is attributed to the fact that the strain rate in the outer side of the sample is faster than that in the inner side. During ECAP process, the stress state in different positions of the sample is different. In the inner side of the sample, there is a stress transition from compressive to tensile state; while in the outer side there is a transition from compressive to tensile and finally to compressive state. The simulation also indicates that elimination of abrasion can not ameliorate the deformation inhomogeneity, but can increase the effective strain; with closed mould, larger and more homogeneous shear deformation can be obtained.

Key words: equal channel angular pressing; computer simulation; deformation behavior

(编辑 杨 兵)