

# 纯铝扭挤新型大塑性变形数值模拟

吴战立,薛克敏,李 萍,蔡琳玲  
(合肥工业大学 材料科学与工程学院,合肥 230009)

**摘 要:** 扭挤(Twist Extrusion, TE)是大塑性变形工艺中研究较少的一种,利用有限元分析软件 Deform-3D 对纯铝 1100 在室温下的扭挤变形进行模拟分析,得出了材料在扭挤通道中的变形特点,应力应变及载荷的大小与分布,以及摩擦条件的影响。模拟结果显示:TE 过程中,变形主要发生在棱角处,边缘处应力应变远远大于中心处;在制件进入和被挤出螺旋通道时载荷急剧增大,最后略有降低;摩擦的增大导致应变分布不均匀性加剧,且使载荷显著增加。  
**关键词:** 大塑性变形;扭挤;数值模拟  
**中图分类号:** TG376      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1671-8798(2009)03-0239-04

## Simulation research on pure Aluminum(1100) through new SPD method of twist extrusion

WU Zhan-li, XUE Ke-min, LI Ping, CAI Lin-ling  
(School of Materials Science and Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**Abstract:** Twist extrusion is one of SPD methods, which is seldom researched. Pure aluminum (1100) was used to investigate the deformation of TE process at room temperature via finite element modeling(Deform-3D). The characteristics of deformation, the amount and distribution of effective stain, stress and load through the process of TE were obtained. The results show that the main deformation zone during the process of TE is distributed in the outer zone of the sample; the amount of effective strain and stress at the outer zone is larger than that at the center zone; the load significantly increases when the sample passes through the entrance and exit of TE channel and slightly decreases; with the increasing of friction factor, the distribution of effective strain is more asymmetric and the load enhances obviously.  
**Key words:** severe plastic deformation; twist extrusion; simulation research

近年来,用大塑性变形法(Severe Plastic Deformation, SPD)制备块状超细晶材料成为材料科学研究的热点<sup>[1-3]</sup>,它通过大的静水压力使制件获得很大的塑性变形,使材料内部形成较为均匀的亚微米级甚至是纳米级的晶粒。传统的大塑性变形法包括等径角挤压(Equal Channnel Angular Pressing,

收稿日期: 2009-06-11  
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50875072)  
作者简介: 吴战立(1984— ),男,安徽萧县人,硕士研究生,研究方向为精密塑性成形新技术。  
通讯作者: 薛克敏,教授,博士生导师,主要从事精密塑性成形工艺与仿真研究。

ECAP)、高压扭转 (High Pressure Torsion, HPT)、多向锻造 (Multi-Directional Forging, MDF)、叠轧合技术 (Accumulative Rolling Bonding, ARB)、反复折皱-压直法 (Repetitive Corrugation and Straightening, RCS)。而扭挤法<sup>[4]</sup> (Twist Extrusion, TE) 是大塑性变形法起步较晚的一种工艺方法, 国外主要是乌克兰科学家 Yan Beygelzime 的研究团队一直在从事挤扭的各项基础研究工作, 国内还没有相关的研究报告。本研究采用有限元软件 Deform-3D 对方形截面的纯铝 1100 制件进行扭挤, 得出了其变形特征与载荷分布。

1 扭挤 (TE) 基本原理

挤扭工艺是由乌克兰科学家 Yan Beygelzime 教授及其研究团队于 1999 年最初提出<sup>[4]</sup>, 其基本原理如图 1 所示。制件通过一个中间带有旋转截面的矩形通道来实现大的塑性变形, 扭挤后制件的尺寸与形状不发生变化, 因而可以重复进行多道次挤扭, 累积大的塑性应变, 以细化组织、改善性能。

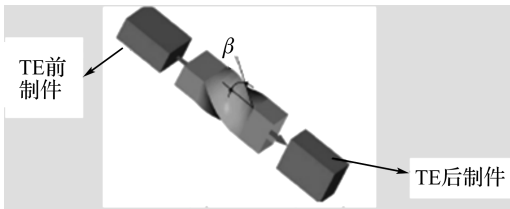


图 1 挤扭工艺基本原理  
Fig. 1 Basic principle of twist extrusion process

2 扭挤模拟的有限元建模

利用有限元模拟软件 Deform-3D 对制件常温下的 TE 变形过程进行数值模拟, 制件为截面 10 mm × 10 mm、长 800 mm 的纯铝 1100 方形坯料; 采用刚塑性模型, 不考虑模具的变形, 模具设为刚体, 制件设为塑性体; TE 通道为螺旋转角  $\gamma = 90^\circ$ , 螺旋距离  $L = 30$  mm; 模具和制件摩擦接触处理采用常剪切模型, 摩擦因子为 0.1; 环境的温度为 20 °C; 凸模的下压速度为 1 mm/s; 采用四节点四面体等参单元对制件进行离散, 模具和制件的有限元模型如图 2 所示。

3 TE 模拟结果分析与讨论

3.1 变形特征

图 3 为制件在 TE 通道中的变形情况, 图 3(a)、(b)、(c)、(d) 为制件进入螺旋通道不同阶段的等效应变云图。由图 3 可知, 开始进入 TE 通道时, 制

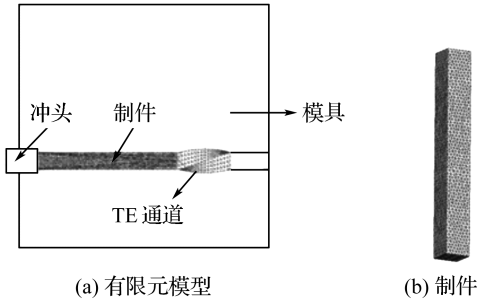
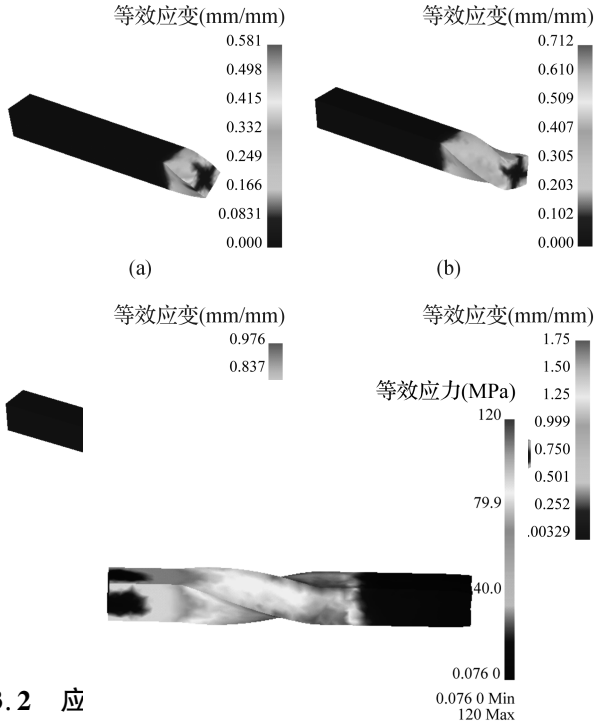


图 2 TE 的有限元模型及制件

Fig. 2 Finite element mode of twist extrusion and the sample  
件四周首先发生变形且在不断旋转前进, 中心部分基本不发生变形, 随着四周材料一起沿着挤压轴线流动。通过螺旋通道后, 制件在水平通道内朝着反方向旋转, 恢复在挤压前的形状尺寸, 由图 3 (d) 可见, 制件头部基本保持平面。



3.2 应力分布  
布, 截取图, 如图 3 所示。由图 3 可知, 开始进入 TE 通道时, 制件四周首先发生变形且在不断旋转前进, 中心部分基本不发生变形, 随着四周材料一起沿着挤压轴线流动。通过螺旋通道后, 制件在水平通道内朝着反方向旋转, 恢复在挤压前的形状尺寸, 由图 3 (d) 可见, 制件头部基本保持平面。

(a) 应力总体分布  
(b) 纵截面等效应力分布

小与分  
布, 截  
图, 如  
变最小  
件纵横  
距离的  
相一致,  
的截面

心处应  
E 后制  
中心点  
的结论  
玉轴线  
轴线条  
远, 应变越大。

图 5 制件 TE 过程中制件上等效应力场分布图  
Fig. 5 Stress distribution of pure Al sample during TE channel

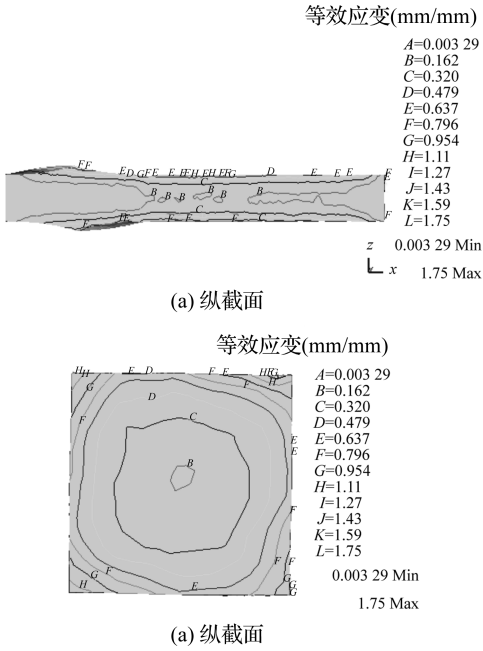


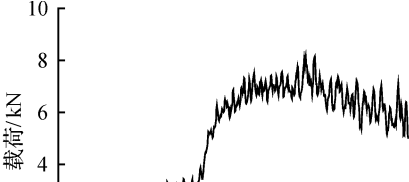
图4 制件TE后纵、横截面等效应变场分布图

Fig.4 Effective strain distribution along the longitudinal plane and the transversal plane

图5(a)和(b)分别为纯铝制件经过TE通道时的等效应力分布云图和纵剖面上等效应变分布等值线图。由于TE通道内变形剧烈,等效应力主要分布在螺旋通道内的制件部分,且主要分布在边缘棱角处,最大达到了120 MPa,中心处仅为29.8 MPa。因此在模具设计时,螺旋通道棱角处设计为小圆弧过渡,有利于降低对模具的损害。

3.4 载荷分布

图6为TE过程中载荷的变化图,随着冲头的运行,制件开始经历了进入螺旋通道、挤出螺旋通道、刚性平移几个阶段。由图6可知,制件开始进入螺旋通道入口,由于模具形状制约,在横截面上发生剧烈的旋转变形,载荷明显增大;制件头部进入螺旋通道,载荷继续增大,但增幅减小;直至头部被挤出螺旋通道,制件被迫进入水平通道,变形剧烈程度再次增加,载荷明显增大,至最大值7.3 kN;随着制件头部在水平通道的刚性平移及未变形部分的减少,载荷发生了轻微的下降。



3.5 摩擦因素的影响

分析不同摩擦条件对挤压过程的影响,对掌握变形分布规律,提高模具寿命等都具有重要的指导意义。图7给出了不同摩擦条件下制件主要变形区横截面上的中心点1和边缘点3的等效应变分布情况。由图7可以看出,在不同的摩擦条件下,除了中心部分的应变值在摩擦为0.2时略微增大外,其余基本保持不变;边缘点处的应变值,在摩擦较小时基本一致,当摩擦增大时,增加显著。即摩擦的增大对中心部位应变累积作用不明显,而对边缘处的影响显著,且随着摩擦的增大,制件横截面上的应变分布不均匀性加剧。

挤压过程中制件所需的载荷与摩擦条件的关系如图8所示。从图8看出,随着摩擦的增大,载荷显著增大;当摩擦系数由0增至0.2时,最大载荷由3.6 kN急剧增至15.5 kN,这对模具来说是极为不利的。产生该现象的主要原因是,由于摩擦系数的

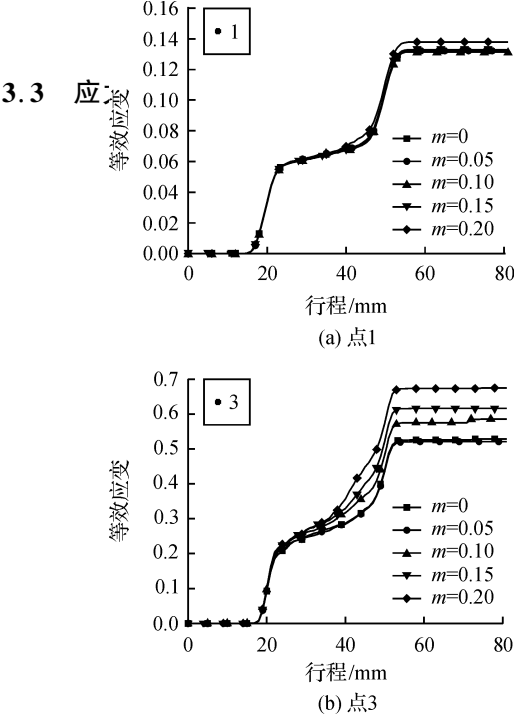


图7 不同摩擦条件对两点等效应变分布的影响

Fig.7 Effect of friction condition on effective strain distribution of two points

增大导致挤压时金属流动阻力增大,在模具型腔中

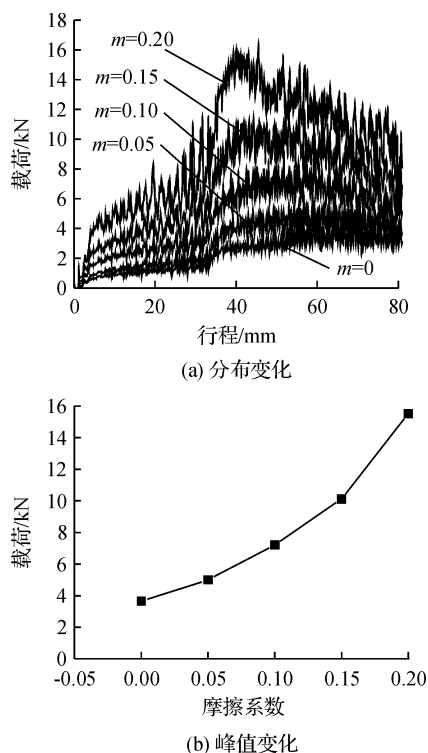


图8 不同摩擦条件对载荷的影响

Fig. 8 Effect of different friction condition on load of TE

形成较大的静水压力所致。因此,从获得均匀的内部组织和延长模具的寿命方面来说,应尽可能采用良好的润滑条件,以有效地减少摩擦因素的不利影响。

## 4 结 语

1) 制件在经过 TE 通道时的变形特征及应力应变分布规律为:TE 过程中四周材料变形较大,中心部分基本不变形,TE 后制件头部基本保持平面;制件纵横截面上的变形不均匀,应力应变主要发生在棱角处,截面中心的等效应力和应变约为 29.8 MPa 和 0.162,而边缘处最大达 120 MPa 和 1.75。

2) TE 过程中载荷变化表现为:在制件进入和被挤出螺旋通道时载荷急剧增大,最大达 7.3 kN;随着制件挤出螺旋通道,载荷略有降低。

3) 摩擦对 TE 过程的影响主要是:一定的摩擦状况能增大制件边缘处的应变累积效应,但过大的摩擦会导致应变分布不均匀性加剧,且使模具的受力状况急剧恶化,因此,实际操作过程中应尽可能降低摩擦的影响。

## 参考文献:

[1] VALIEV R Z, ESTRIN Y, HORITA Z, et al. Producing

Bulk Ultrafine-Grained Materials by Severe Plastic Deformation[J]. JOM, 2006, 58(4): 33-39.

[2] SEGAL V M. Severe plastic deformation: simple shear versus pure shear[J]. Materials Science and Engineering, 2002, A338: 331-344.

[3] 周明智, 薛克敏, 李萍. 粉末多孔材料等径角挤压过程热力耦合有限元数值分析[J]. 中国有色金属学报, 2006, 16(9): 1510-1516.

[4] BEYGELZIMER Y, VARYUKHIN V N, SYNKOV S G, et al. New schemes of large plastic deformations accumulating with using of hydroextrusion[J]. Phys & Tech of High Pressure, 1999(3): 109-111.

[6] BEYGELZIMER Y, RESHETOV A, SYNKOV S, et al. Kinematics of metal flow during twist extrusion investigated with a new experimental method[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209(7): 3650-3656.