

# 限定型高压扭转过程变形研究

上官丰收<sup>1</sup>, 董满生<sup>2</sup>, 洪友士<sup>1</sup>

(1. 中国科学院力学研究所, 北京 100080; 2. 合肥工业大学土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009)

**摘要:**文章制备了一套限定型高压扭转(HPT)设备。采用 HPT 处理纯铜试样,对比处理前后试样几何尺寸,观察试样与砧头之间的相对滑动,结果表明,HPT 处理前后试样厚度变化小于 5%,试样端面和模具不发生相对滑动。用量纲分析和有限元方法分析试样的变形,得到切应变和厚度/直径、压力/材料弹性模量以及模具侧面的摩擦状况相关;直径 8 mm 厚 0.86 mm 纯铜试样上  $r < 3.2$  mm 区域的变形可以用纯扭转来描述。  
**关键词:**限定型高压扭转;应变;量纲分析;有限元

中图分类号: TG115.51; TG146.11 文献标识码: A 文章编号: 1003-5060(2008)08-1292-04

## Analysis of deformation in destined high pressure torsion

SHANGGUAN Feng-shou<sup>1</sup>, DONG Man-sheng<sup>2</sup>, HONG You-shi<sup>1</sup>

(1. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China; 2. School of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**Abstract:** A holding apparatus for destined high pressure torsion (HPT) treatment was designed and manufactured. Geometrical sizes of pure copper samples before and after HPT were compared. The slide between the sample and the apparatus was observed. It is concluded that the thickness change is less than 5% and there is no slide between the sample surface and the apparatus. Dimensional analysis and the finite element method were employed to analyze the shear strain. Dimensional analysis shows that the shear strains of samples are correlated with the ratio of thickness to diameter, the ratio of pressure to elastic modulus, and friction condition of the apparatus side. The FEM results indicate that the ideal torsion formula can describe the shear strain of the pure copper sample with the diameter 8 mm and thickness 0.86 mm in the area  $r < 3.2$  mm.

**Key words:** destined high pressure torsion; strain; dimensional analysis; finite element

高压扭转 (High Pressure Torsion, 简称 HPT) 是一种典型的利用剧烈塑性变形 (Severe Plastic Deformation, 简称 SPD)<sup>[1]</sup> 制备超细晶材料的方法, 大变形是其一个重要特征<sup>[2-4]</sup>。SPD 过程精确的变形描述和以此为基础的微结构细化机制是 SPD 技术研究的难点<sup>[5]</sup>。变形分析对 SPD 技术的发展有着至关重要的作用。

HPT 方法是在几兆帕压力下使盘状试样产生大的扭转变形致使样品晶粒细化。理想的 HPT 过程中的变形可用纯扭转来描述。如, 厚度为  $h$  的试样扭转  $n$  圈, 在半径  $r$  处的切应变  $\gamma_{ideal} =$

$2n r/h$ 。通常, 在 HPT 变形过程中, 试样的厚度发生变化, 摩擦力并不按照预期的方式作用, 变形与理想 HPT 过程有很大偏差。根据变形过程中试样的约束状况, 文献[6]将 HPT 装置分成两类: 限定型和非限定型。在施加压力和扭转时, 非限定型 HPT 装置没有完全限定试样, 试样的厚度持续减小, 甚至减小到原始厚度的一半<sup>[1]</sup>, 并且压力在整个试样上分布不均匀, 变形偏离理想 HPT 变形。文献[7]用有限元分析 HPT 处理  $10 \times 0.7$  mm 纯铜试样 0.1 圈, 厚度减小 43%, 试样上几乎不存在理想 HPT 过程的区域。

收稿日期: 2007-09-05; 修改日期: 2008-04-02

作者简介: 上官丰收(1975-), 男, 陕西大荔人, 博士, 中国科学院高级工程师;  
洪友士(1951-), 男, 福建厦门人, 中国科学院研究员, 博士生导师。

非限定型 HPT 过程的变形难以表征,并且随着加载路径的变化而变化,施加到试样上的静水压力也难以控制,这影响实验结果的可靠性。限定型 HPT 装置严格限定了试样的几何尺寸和试样端面的摩擦,使得试样在变形过程中几何尺寸不发生变化,同时端面和模具不发生相对滑动,端面角位移和扭转的角位移相等。

文献[6]制作了一套限定型 HPT 装置,利用奥氏体不锈钢研究 HPT 变形的均匀性,观察到试样中心区域微结构尺寸粗大,中心旁边的微结构尺寸较试样中心的微结构尺寸细小。限定型 HPT 的变形更加逼近理想 HPT,便于用来进行 SPD 的机理性研究。

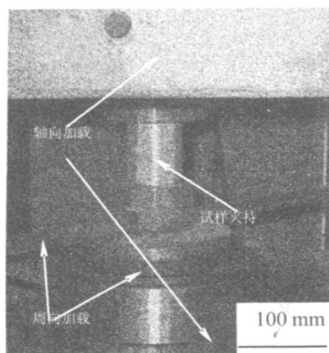


图 1 HPT 装置

本文制备一套限定型 HPT 装置,利用实验、量纲分析和有限元分析相结合的方法研究限定型 HPT 处理纯铜试样的变形,为进一步研究 HPT 致金属晶粒细化机理提供分析基础。

### 1 实 验

本文设计的 HPT 装置如图 1 所示,该装置由轴向加载装置、扭转加载装置和试样夹持组成。试样放置在由 2 个砧头和侧环所组成的空腔内,如图 2 所示。砧头在 MTS 实验机的驱动下对试样施加几兆帕的静水压力。同时,手动转动扭转加载装置使 2 个砧头相对转动,通过试样端面摩擦力驱动试样发生扭转变形。

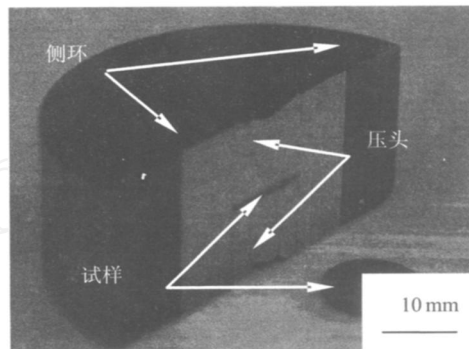


图 2 试样夹持

试样材料为纯铜 T2 ( $w$  99.90%),经机加工成直径 8 mm、厚度 0.85 mm 盘状试样,再经过 650 真空退火 100 min。在静水压力 2 GPa 下分别对 4 个样品进行 HPT 处理,HPT 变形前、后试样的尺寸见表 1 所列。处理后的样品保持盘状形状,几何尺寸与初始态相比较,厚度变化小于 5%,体积变化小于 2%。因此,经过 HPT 处理后的试样几何尺寸变化可以忽略。

砧头的端面经过粗糙化处理,以保证试样和

砧头有足够大的摩擦系数。在摩擦力驱动下,试样上、下表面的变形情况用划线法来研究。HPT 处理前,在试样表面的不同位置刻 2 条从中心到边缘的直线。如果试样和砧头的端面发生相对滑动,试样上的直线刻痕将会变成曲线或者消失。HPT 处理后,试样表面仍观察到 2 条清晰直线,可见上下表面与砧头转动一致,即在 HPT 处理过程中砧头上、下端面分别与试样上、下表面无相对滑动。

表 1 HPT 处理前后的试样几何尺寸

样品	初始态/mm		处理后/mm		$(h - h_0)/h_0$	$(hd^2)/(h_0d_0^2)$
	$h_0$	$d_0$	$h$	$d$		
1	0.851	7.888	0.822	8.031	-0.034	1.000
2	0.851	7.888	0.810	8.033	-0.048	0.987
3	0.854	7.886	0.812	8.025	-0.049	0.985
4	0.852	7.888	0.823	8.021	-0.034	0.999

### 2 量纲分析

HPT 过程中砧头与试样端面无相对滑动,试

样端面的扭转角位移等于施加的扭转角。HPT 处理试样的厚度变化小于 5%,远小于 1,和 HPT 施加的扭转变形相比较,是小量。为了简化分析,

假定变形过程试样的厚度不变。

HPT 过程试样的受力状态,如图 3 所示。试样在 2 GPa 压力下,上、下表面发生相对转动,并承受静水压力。试样为圆盘状的轴对称结构,承受反对称扭转载荷。取试样中轴面的 1/4 进行分析足以描述它的变形。试样的中面是结构的对称面,角位移为零,轴向位移为零。顶面在摩擦力的驱动下角位移与砧头角位移相同。侧面受到侧环的约束,径向位移为零,环向受到摩擦力作用。

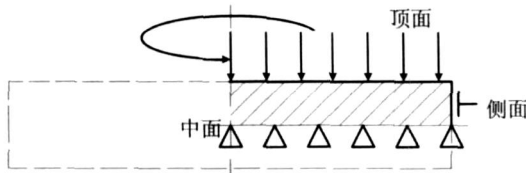


图 3 HPT 试样的变形分析模型

试样上点  $(r, z)$  处的切应变 满足下面关系

$$= f_1(r, z, n, h, d, \mu, E, \sigma_0, m, P) \quad (1)$$

其中,  $(r, z)$  为几何位置;  $\mu$  为模具侧面摩擦系数;  $E$  为弹性模量;  $\nu$  为泊松比;  $\sigma_0$  为屈服强度;  $m$  为硬化指数;  $P$  为静水压力。

(1) 式中, 选取 2 个量纲独立的基本量为弹性模量和直径, 无量纲化, 得

$$f\left(\frac{2r}{d}, \frac{2z}{h}, \frac{h}{d}, \mu, \frac{\sigma_0}{E}, m, \frac{P}{E}\right) \quad (2)$$

函数  $f$  的自变量中没有反应变形大小的量。也就是说,  $f$  和变形大小无关, 描述扭转变形很小的  $f$  和描述扭转变形很大的  $f$  相同。扭转变形较小时, 试样上各个点有可能还处在弹性阶段, 可见  $f$  和材料的塑性无关, 即,  $f$  和自变量  $\sigma_0/E$  与  $m$  无关。因此

$$= (2nr/h) f\left(\frac{2r}{d}, \frac{2z}{h}, \frac{h}{d}, \mu, \frac{P}{E}\right) = \text{ideal} f\left(\frac{2r}{d}, \frac{2z}{h}, \frac{h}{d}, \mu, \frac{P}{E}\right) \quad (3)$$

由(3)式可看出, 试样上关注点  $(2r/d, 2z/h)$  的切应变与无量纲数  $h/d, P/E$  及模具侧面的摩擦状况相关。

### 3 有限元分析

试样的受力简化模型如图 3 所示, 利用有限元软件 ABAQUS 分析试样变形。试验材料的弹性模量为 130 GPa, 泊松比为 0.34。试样名义尺寸: 直径为 8 mm, 厚度为 0.86 mm。采用包含扭

转变形、轴对称、四节点、双线性缩减积分的单元 CGAX4R, 网格划分 400 × 43 个单元, 每个单元尺寸为 0.01 mm × 0.01 mm。

试样中面是承受反对称载荷对称结构的对称面, 它的角位移和轴向位移等于零。试样的顶面, 在施加静水压力后, 施加均匀的角位移。试样的侧面作用有摩擦力。试样的变形是一个材料非线性、有接触问题的大变形, 难以分析。本文将侧边的摩擦边界条件简化成具有角位移 的边界条件

$$= n \left(\frac{2z}{h}\right)^t \quad (4)$$

其中,  $t - 1$  是反应侧边摩擦约束强弱的指数。  $t = 1$ , 摩擦系数为零;  $t$  越大, 侧边摩擦阻力越大。经初算分析表明, 当  $t = 8$  时, 侧向摩擦约束趋于稳定, 摩擦约束强。实际实验中有少量材料从侧壁溢出, 故本文分析中取  $t = 4, n = 0.5$ 。角位移 分析结果如图 4 所示。

从图 4 可看出, 在试样的中心部位, 随  $z$  的增加呈线性增加, 不随  $r$  的变化而变化; 在试样的边缘, 随  $z$  和  $r$  的增大而增大。

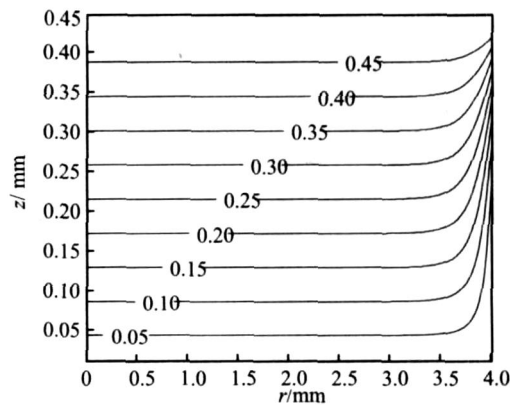


图 4 扭转 0.5 rad 试样上角位移 分布

如果侧边的摩擦为零, 试样按照理想的纯扭转方式变形, 角位移  $\text{ideal} = 2n z/h$ 。定义  $\text{ideal} = (\text{ideal} - \text{ideal}) / \text{ideal}$  描述试样上各点角位移 和理想角位移 的相对偏差, 在样品上的分布如图 5 所示。从图 5 可知, 在  $r < 3.2$  mm 的整个区域内,  $< 0.01$ ; 在  $z < 0.1$  mm,  $3.2$  mm  $< r < 3.65$  mm 的区域, 从 0.01 增加到 0.1; 在  $z > 0.1$  mm 的区域, 从 0.01 增加到 0.1,  $r$  的区间愈来愈小。试样外边缘区域的变形和纯扭转变形偏差较大, 变形描述较困难。

$(\text{ideal} - \text{ideal}) / \text{ideal} = (\text{ideal} - \text{ideal}) / \text{ideal} =$ , 所以图 5 也反映试样上切应变和理想 HPT 过程中的切应变相对偏差。即在  $r < 3.2$  mm 的区域, 切应

变可以用  $\gamma = 2nr/h$  描述,相对误差小于 0.01。在试样边缘用它描述变形,将有很大的误差。

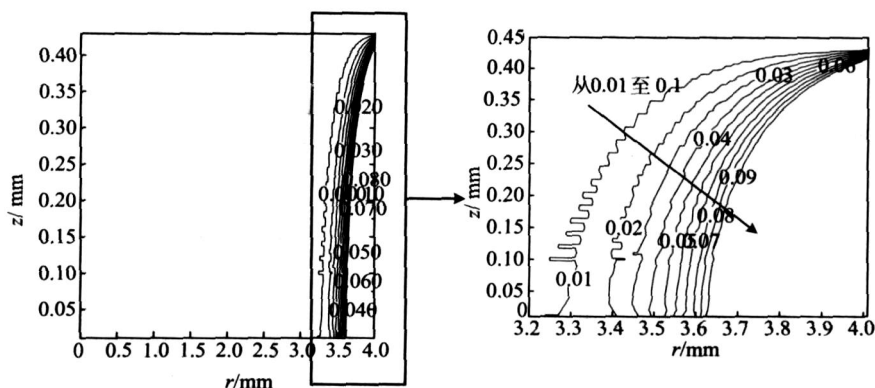


图 5 试样上角位移和理想扭转状态角位移的相对偏差分布

本文在量纲分析和 FEM 分析中忽略了试样厚度的变化。如果考虑试样厚度的变化,在  $r < 3.2$  mm 的区域用纯扭转描述 HPT 变形过程,相对误差应不大于 2 个相对误差之和 6%。

#### 4 结 论

本文采用实验和有限元相结合的方法研究了限定型 HPT 处理纯铜的变形过程。

(1) 本文制备了一套限定型 HPT 装置。在室温和 2.0 GPa 静水压力条件下,HPT 处理直径 8 mm、厚 0.86 mm 纯铜试样。试样厚度变化小于 5%,试样的上、下表面和砧头之间不发生相对滑动。

(2) 试样切应变与无量纲数  $h/d$ 、 $P/E$  及模具侧面的摩擦状况相关。

(3) 对实验试样上  $r < 3.2$  mm 的区域,切应变可以用公式  $\gamma = 2nr/h$  来描述。

#### [参 考 文 献]

[1] Valiev R Z, Islamgaliev R K, Alexandrov I V. Bulk nano-

structured materials from severe plastic deformation [J]. Progress in Materials, 2000, 45(2): 103 - 189.

[2] Valiev R Z, Korznikov A V, Mulyukov R R. Structure and properties of ultrafine-grained materials produced by severe plastic deformation [J]. Materials Science Engineering A, 1993, 168(2): 141 - 148.

[3] Valiev R Z, Ivanisenko Y V, Rauch E F, et al. Structure and deformation behaviour of Armco iron subjected to severe plastic deformation [J]. Acta Materialia, 1996, 44 (12): 4705 - 4712.

[4] Zhu Y T, Jiang H, Huang J, et al. A new route to bulk nanostructured metals [J]. Metallurgical and Materials Transactions, 2001, 32A(6): 1559 - 1562.

[5] Dimitrov O. Nominal and equivalent strains in severe plastic deformation process [J]. Annales de Chimie Science des Matériaux, 2002, 27(3): 15 - 24.

[6] Vorhauer A, Pippan R. On the homogeneity of deformation by high pressure torsion [J]. Scripta Materialia, 2004, 51 (9): 921 - 925.

[7] Kim H S. Finite element analysis of high pressure torsion processing [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2001, 113(1): 617 - 621.

(责任编辑 闫杏丽)