

限定型高压扭转变形分析*

(中国科学院力学研究所 非线性力学国家重点实验室, 北京 100080) 上官丰收 钱桂安 洪友士

摘要: 利用量纲分析研究限定型高压扭转(HPT)变形的相关因素, 在此基础上用有限元分析不同侧边摩擦条件和不同径厚比和不同侧面摩擦约束大小对纯铜试样角位移场的特点, 讨论理想高压扭转公式适用的范围。量纲分析揭示, 试样上变形与几何位置、径厚比、施加压力、材料弹性参数以及模具侧面的摩擦状况相关。有限元分析结果表明, 可用幂函数形式的角位移约束来简化侧面摩擦, 当幂指数不小于 8 时, 试样上非 HPT 变形区域大小趋于稳定; 当径厚比不小于 5 时, 试样中心存在一个可用纯扭转变形描述的区域, 非理想 HPT 区域大小不超过试样厚度尺寸; 当径厚比不大于 2 时, 试样上不存在理想 HPT 区域。

关键词: 限定型高压扭转; 铜; 变形分析; 有限元方法

中图分类号: TG11.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2012 (2009) 01-0134-04

Deformation analysis of copper samples subjected to destined high pressure torsion

SHAN GUAN Feng-shou QIAN Gui-an HONG You-shi

(State Key Laboratory of Nonlinear Mechanics (LNM), Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080 China)

Abstract: Dimensional analysis was employed to analyze the factors related to the deformation characteristic due to destined high pressure torsion (HPT). And finite element method was applied to calculate angular displacements of copper specimens with different states of side surface friction and different values of diameter-thickness ratio. Then the validity range of the expression for ideal HPT was discussed. Dimensional analysis shows that the shear deformation is correlated with its position, diameter-thickness ratio applied pressure, elastic modulus, Poisson's ratio, and side friction condition with apparatus. FEM results reveal that angular displacement by power function can be used to describe friction constraint on side faces, and zone of no ideal HPT tend to stable when exponent is not less than 8. When diameter-thickness ratio is not less than 5, an ideal HPT region on center of copper specimens exists, and no ideal HPT region size is less than its thickness on samples margin. While diameter-thickness ratio is not greater than 2, no ideal HPT deformation region exists.

Key words: destined high pressure torsion; copper; deformation analysis; finite element method

引言

高压扭转(High Pressure Torsion, HPT)是一种典型的剧烈塑性变形(Severe Plastic Deformation, SPD)^[1]制备超细晶材料的方法, 大变形是 HPT 方法的一个重要特征^[2-5]。理想的 HPT 过程可用纯扭

转变形来描述。然而, 实际 HPT 变形与理想过程具有一定偏差。根据变形过程中试样约束状况, Vorhauer 等^[6]将 HPT 装置分成两类, 限定型和非限定型。非限定型 HPT 装置没有完全限定试样, 加载时, 试样的厚度持续减小(甚至减小到原始厚度的 1/2^[1]), 并且压力在整个试样上分布不均匀, 变形偏离理想 HPT 过程。Kim^[7]用有限元分析限定型 HPT 处理 10mm × 0.7mm 纯铜样品, 发现试样厚度减小 43%, 试样上几乎不存在理想 HPT 变形的区域。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 and 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, 8]观察了

*国家自然科学基金资助项目(10472117)。

上官丰收 E-mail: sgfs@lnm.imech.ac.cn

作者简介: 上官丰收, 男, 1975 年生, 博士, 工程师, 主要从事材料的微观结构与力学性能相关的研究

收稿日期: 2008-02-29; 修订日期: 2008-03-18

限定型 HPT 处理试样的微结构特征，试样中心粗大的晶粒尺寸和 HPT 处理试样中心部位的变形为零一致。Hafoka 等^[9]对比了限定型 HPT 处理前后 8mm × 0.8mm 镍试样截面上聚焦粒子束刻蚀的网格，实验观察到了理想 HPT 过程的简单剪切变形。然而，Saika 等^[10]发现限定型 HPT 处理 10mm × 8.6mm 样品的微结构，无论在试样中心还是边缘沿着试样厚度方向都不均匀，没有任何理想 HPT 的迹象。这对限定型 HPT 过程能否反映理想 HPT 提出疑问。这样，在什么条件下存在理想 HPT 成为一个亟待解决的问题。本文采用量纲分析和有限元分析相结合的方法研究了限定型 HPT 的过程，探讨了样品上可以用纯扭转描述变形的条件，为进一步 HPT 细晶化机理研究提供参考。

1 变形分析

图 1a 是一种限定型 HPT 装置示意图^[8]。扭转时，上、下压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，试样的厚度不发生变化。HPT 过程试样的受力状态如图 1b 所示。试样为轴对称结构，承受反对称扭转载荷。取试样中轴面的 1/4 进行分析。

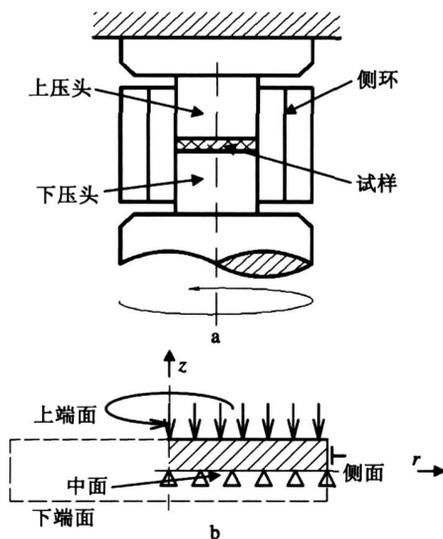


图 1 一种限定型 HPT 装置图 a) 和变形分析模型 b)
Fig. 1 Sketch of a destined HPT a) and model for strain analysis b)

1.1 量纲分析^[11]

相关因素：模具侧面摩擦系数 μ ；试样几何参数是厚度 h 和直径 d ；材料物理参数为弹性模量 E 、泊松比 ν 、屈服强度 σ_0 和硬化指数 m ；载荷参数为

静水压力 P ；变形参数为扭转圈数 n ；几何位置 (r, z) 。这样，试样上点 (r, z) 处的切应变 $\gamma = f_1(r, z, n, h, d, \mu, E, \nu, \sigma_0, m, P)$ 。无量纲化，得

$$\gamma / (2nr/h) = \gamma_{ideal} = f_2 \left(\frac{2r}{d}, \frac{2z}{h}, \frac{h}{d}, \mu, \frac{\sigma_0}{E}, m, \frac{P}{E} \right)$$

函数 f_2 的自变量中没有描述变形大小的量， f_2 和变形大小无关。 f_2 变形很小时和变形很大时相同。扭转变形较小时，试样上各个点有可能还处在弹性阶段，这时 f_2 和材料的塑性无关，即 f_2 和自变量 $\frac{\sigma_0}{E}$ 和 m 无关， $\gamma_{ideal} = f_3 \left(\frac{2r}{d}, \frac{2z}{h}, \frac{h}{d}, \mu, \frac{P}{E} \right)$ 。 f_3 反映剪切变形的分布。从而，剪应变的大小和 γ_{ideal} 成正比，分布仅与无量纲数径厚比 d/h 、 P/E 、磨具侧面摩擦系数 μ 和泊松比 ν 相关。函数 f_3 决定了限定性 HPT 的试样上可用纯扭转公式描述变形区域，与变形量大小无关。

1.2 有限元分析

采用有限元软件 ABAQUS 和 CGAX4R 单元分析了不同径厚比 ($d/h = 4\text{mm}/2\text{mm}$, $10\text{mm}/2\text{mm}$ 和 $20\text{mm}/2\text{mm}$) 和不同侧面摩擦约束 ($t = 2, 4, 8, 16$) 时限定型 HPT 处理铜试样的变形。铜弹性模量为 30 GPa，泊松比 0.34。单元网格尺寸 $0.01\text{mm} \times 0.01\text{mm}$ 。试样顶面施加角位移 1。侧面的摩擦边界是包含大变形的接触问题，与 P/E 和 μ 相关。为简化分析，本文试探性将侧面摩擦边界处理成角位移 $(2z/h)^t$ 约束，其中 $t \geq 1$ ，反映摩擦约束强弱的指数。

2 讨论

角位移 θ 和剪切应变 γ 成正比， $\gamma = z/r$ ，可以描述 HPT 处理试样的变形。理想 HPT 过程和 r 无关，和 $2z/h$ 成正比， $\gamma = 2nz/h$ 。图 2a 显示， $t = 8$, $d/h = 5$ 时，在试样的中心区域，角位移和 r 无关，并沿厚度方向线性分布，角位移分布和理想 HPT 相同；试样边缘区域，角位移分布受边界约束影响，偏离理想 HPT，其等值线密度不均匀，在试样顶面处高，在中面处低。 $t = 8$, $d/h = 2$ 时(见图 2a)：试样上角位移分布几乎完全受边界约束的影响。Saika 等^[10]的实验结果显示，厚度和高度相当(直径 10mm, 厚度 8.6mm)的样品上不会出现理想 HPT 变形。在理想 HPT 过程，剪切应变沿着试样厚度方向相等。相等的变形应该获得相同的细化的微结构，但在图 3 的微结构沿着试样厚度方向，

无论在试样中心还是边缘都不均匀，没有沿厚度方向均匀一致的微结构特征。变形量越大，微结构细化越显著^[8]。图 3 中试样侧面部位的微结构尺寸在顶面部分细小并在在中面部位粗大。这和本文的假设(试样侧面边界是幂函数形式的角位移约束)一致。这说明本文的这种假设是合理的，可以反映这种接触摩擦边界约束，并且降低了分析的难度。

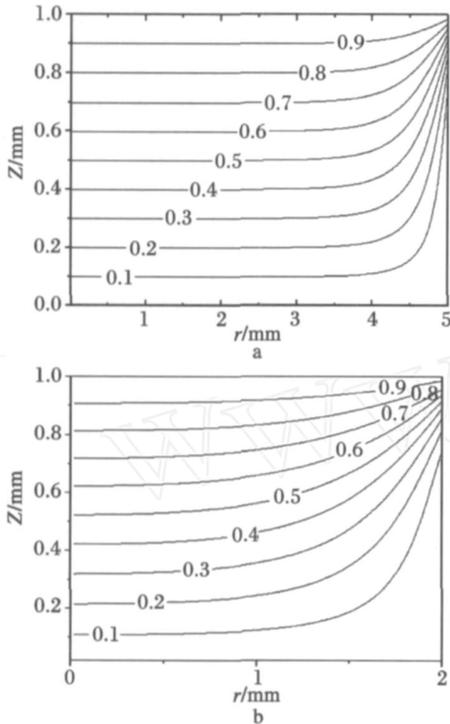


图 2 角位移等值线图

a) $t=8, d/h=5$; b) $t=8, d/h=2$

Fig. 2 Angular displacement contour under

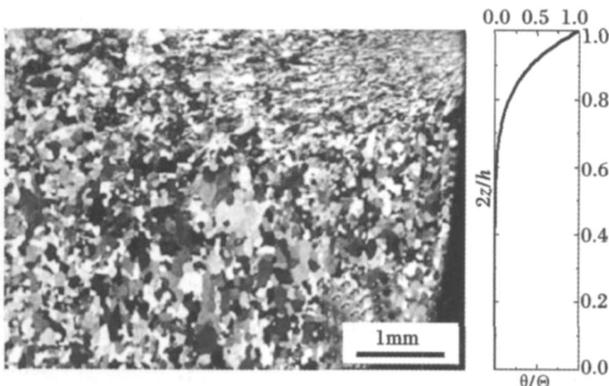


图 3 HPT 处理试样横截面 1/4 的蒙太奇^[10]和侧面角位移约束

Fig. 3 Quarter of montage on the longitudinal plane after HPT $n=0.25\text{turn}^{[10]}$ and constraint condition of angular displacement on side face

用 $(\theta - \theta_{ideal}) / \theta_{ideal}$ 描述试样上各点角位移和理想 HPT 角位移的相对偏差, 又 $(\theta - \theta_{ideal}) / \theta_{ideal} = (\theta - \theta_{ideal}) / \theta_{ideal}$, 即 $f_3 = 1 + (\theta - \theta_{ideal}) / \theta_{ideal}$ 。从而, $(\theta - \theta_{ideal}) / \theta_{ideal}$ 也描述了剪应变的相对偏差。图 4 显示两种条件的 $(\theta - \theta_{ideal}) / \theta_{ideal}$ 百分数的等值线。规定 $(\theta - \theta_{ideal}) / \theta_{ideal} = 1\%$ 时, 试样上的变形为理想 HPT 区域。 $t=8, d/h=5$ 时(如图 4a), 试样上大部分区域的变形可用纯扭转变形公式描述。 $t=8, d/h=2$ 时(如图 4b), 试样上几乎不存在理想 HPT 区域。

用 r_1 表示中面上 1% 偏差点到试样侧边的距离(如图 4a), 描述侧面受摩擦约束影响而不能用纯扭转变形公式描述变形区域的大小。用试样厚度正则化 r_1/h 。图 5a 显示了不同几何形状对试样上非理想 HPT 区域大小的影响。随着 d/h 的减小, 非理想 HPT 区域趋于增大; 当 $d/h > 5$ 时, 非理想 HPT 区的大小不超过试样的厚度, 试样中心区域变形可用纯扭转变形描述; HPT 区域, 并当 $d/h < 2$ 时, 理想 HPT 区域不存在。Hafok 等^[9]的实验结果显示: 当 $d/h=10$ 时, 在试样 $r/z=5$ 处横截面上, 观察到理想 HPT 变形的特征。试验证明^[9], 当 $d/h > 5$ 时, 在距离侧面超过厚度尺寸的区域存在理想 HPT 区域, 这支持了本文的分析结果。

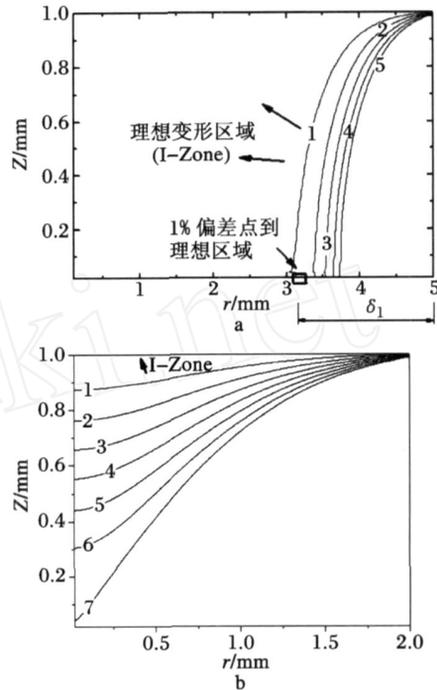


图 4 $(\theta - \theta_{ideal}) / \theta_{ideal} \times 100$ 等值线图

a) $t=8, d/h=5$; b) $t=8, d/h=2$

Fig. 4 Contour of $(\theta - \theta_{ideal}) / \theta_{ideal} \times 100$ under

图 5b 显示了不同侧面约束条件对试样上非理想 HPT 区域大小的影响。 t 反映约束的大小, $t=1$ 约束为零, t 越大约束越强。试样边缘非理想 HPT 区

图 5b 显示了不同侧面约束条件对试样上非理想 HPT 区域大小的影响。 t 反映约束的大小, $t=1$ 约束为零, t 越大约束越强。试样边缘非理想 HPT 区

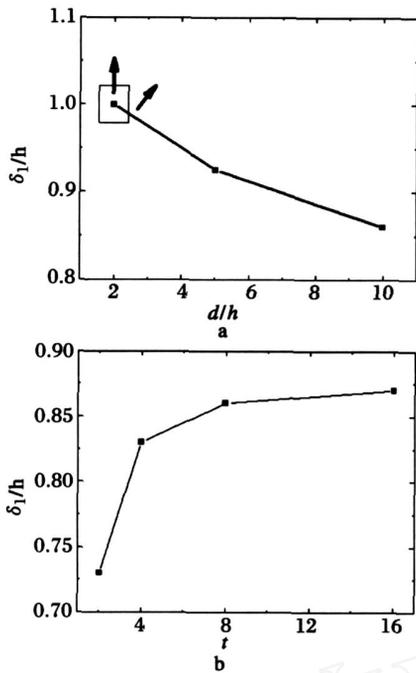


图 5 侧面摩擦和径厚比对 HPT 变形影响

Fig. 5 Normalization factor of 1% offset distance δ_1 from ideal HPT to samples height verse d/h under $t=8$ a) and verse t under $d/h=10$ b).

Those indicate effect of geometry shape a) and side face friction b) on HPT processing

域随着 t 的增大而增大，并当 $t=8$ 时，该区域的 HPT 区域趋于稳定。

3 结论

通过对限定型 HPT 进行量纲分析和有限元分析，可得出以下结论：

1) 限定型 HPT 处理试样上各点剪应变的大小和 δ_{ideal} 成正比；分布与无量纲数：径厚比 d/h 、施加压力和试样材料的弹性性质以及模具侧面的摩擦状况相关。

2) 可用幂函数角位移约束简化试样侧面的摩擦边界，并当指数 $t=8$ 时，试样上非理想 HPT 变形区域趋于稳定。

3) $d/h=5$ 时，纯铜试样边缘的非理想 HPT 区域大小不超过试样厚度，中心区域的变形可用理想 HPT 描述； $d/h=2$ 时，几乎不存在理想 HPT 变形区。

参考文献

- [1] R Z Valiev, R K Islamgaliev, I V Alexandrov. Bulk nanostructured materials from severe plastic deformation[J]. Progress in Materials, 2000. 45(2) :103-189
- [2] R Z Valiev, A V Korznikov, R R Mulyukov. Structure and properties of ultrafine-grained materials produced by severe plastic deformation[J]. Materials Science Engineering A, 1993. 168(2) :141-148
- [3] R Z Valiev, Yu V Ivanisenko, E F Rauch, B Baudelet. Structure and deformation behaviour of Armco iron subjected to severe plastic deformation[J]. Acta Materialia, 1996. 44(12) :4705-4712
- [4] Y T Zhu, H Jiang, J Huang, T C Lowe. A new route to bulk nanostructured metals[J]. Metallurgical and Materials Transactions, 2001. 32A(6) :1559-1562
- [5] O Dimitrov. Nominal and equivalent strains in severe plastic deformation process[J]. Annales de Chimie Science des Matériaux, 2002. 27(3) :15-24
- [6] A Vorhauer, R Pippan. On the homogeneity of deformation by high pressure torsion[J]. Scripta Materialia, 2004. 51(9) :921-925
- [7] H S Kim. Finite element analysis of high pressure torsion processing [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2001. 113(1) :617-621
- [8] 上官丰收, 谢季佳, 洪友士. 高压扭转致纯铜晶粒细化及与应变的关系[J]. 材料研究学报, 2007. 21(1) :72-76
- [9] M Hafoka, R Pippan. Post-shear deformation of high pressure torsion-deformed nickel under hydrostatic pressure[J]. Scripta Materialia, 2007. 56(8) :757-760
- [10] G Sakai, K Nakamura, Z Horita, T G Langdon. Developing high-pressure torsion for use with bulk samples [J]. Materials Science and Engineering A, 2005. 406: 268-273
- [11] 谈庆明. 量纲分析[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2005