q

理论与试验研究

钼粉烧结锥形件高压扭转成形模拟研究

章凯,李萍,薛克敏,李达

(合肥工业大学 材料科学与工程学院,合肥 230009)

摘要:采用刚粘塑性有限元法,对钼粉烧结锥形件热压扭转成形进行分析研究,获得了变形过程中等效 应变、相对密度的分布规律,初步分析了摩擦因子及扭转角速度对变形的影响。结果表明:锥形件口部先达 到理论相对密度,其内壁等效应变和相对密度分布高于外壁,而摩擦因子和扭转角速度的适当选取是锥形件 高压扭转成形的关键。

Numerical Simulation of High-pressure Torsion for Sintering Molybdenum Cone

ZHANG Kai, LI Ping, XUE Ke-min, LI Da

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

Abstract: In this paper, thermal pressure-torsion process for sintering molybdenum was analyzed by rigid-viscoplastic finite element method, and the distribution of strain-effective and relative density was obtained, the effects of friction value and angular velocity in deforming process were discussed as well. It is shown that the mouth of cones first achieved theory relative density. The strain-effective and relative density for inside are higher than that of outside. It is indicated that appropriate choices of friction value and angular velocity are the key points of high-pressure torsion(HPT) for cones.

Key words: sintering molybdenum; cone; high-pressure torsion; numerical simulation

高压扭转成形是在变形体高度方向施加压力的 同时,通过主动摩擦作用在其横截面上施加一扭矩, 促使变形体产生轴向压缩和切向剪切变形的特殊塑 性成形工艺。它可以使材料产生较大的塑性变形, 改善材料内部组织,获得亚微米级甚至纳米级的块 体材料。高压扭转工艺可以用于生产圆形对称 件^[1-4]。锥形件是破甲弹的关键战斗部件,在爆轰 产物的推动下形成射流,最终对目标进行侵彻,所以 其质量直接决定了爆破战斗部的侵彻和破甲性 能^[5-6]。根据侵彻流体动力学理论,为形成更长且 稳定的射流,要求锥形件材料具备高密度、高声速、 良好的导热性、高动态断裂延伸率等性能^[7]。钼因 具有适中的声速(5.124 km/s)、较高的材料密度 (10.23 g/cm³)和很高的熔点(2 600 ℃),已成为具 有广阔应用前景的新型锥形件材料^[8]。粉末烧结锥 形件也因其工艺简单、成分配比灵活、生产效率高、

收稿日期: 2010-01-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50875072);合肥工业大学 2009 年度大学生创新性实验计划项目(2009CXSY081) 作者简介: 章凯(1986-),男,安徽桐城人,硕士研究生,主要研究方向为特种精密塑性成形。 成形性好、杵堵少等特点,成为各国研究的重点[9]。

近年来,国外研究已表明细化内部晶粒可以有 效提高锥形件的性能,这正是高压扭转成形的最大 优势。为此,文中通过模拟钼粉烧结锥形件高压扭 转变形过程中等效应变、相对密度的分布规律,及摩 擦因子、扭转角速度对成形的影响,为后续实.验研 究做一些指导性的工作。

1 有限元模型的建立

1.1 粉末材料屈服准则

对于密度相对较高的烧结材料,文中采用 Doraivelu 等^[10]提出的非致密体塑性理论,其屈服准则 表示如下:

 $F(J_1, J_2, \bar{\sigma}) = AJ_2 + BJ_1 = \gamma_R^2 = \delta \gamma_0^2$ (1) 式中: A, B, δ 为相对密度 R 的函数($A = 2 + R^2, B = 1 - A/3, \delta = 2R^2 - 1$); $J_1 \pi J_2 \beta$ 分别为应力张量及偏 张量的第 1、第 2 不变量; $\gamma_R \pi \gamma_0 \beta$ 别为非致密体 及基体材料单向拉伸或压缩时的屈服应力。

1.2 刚粘塑性有限元法

文中模拟的是在一定温度下进行的高压扭转成 形,工件与模具、外界环境之间存在着热交换,同时 塑性变形功及摩擦消耗功又转化为热能,这些都引 起变形体内温度的急剧变化。温度、变形速率与金 属流动应力之间有着密切的关系,对整个变形过程 将产生很大的影响。在金属塑性成形过程中,当温 度和应变速率对材料屈服流动应力产生明显的影响 或高温下的塑性变形时,应力与应变关系必须采用 粘塑性本构模型。文中采用的是 Tabular data format 模型:

$$\bar{\sigma} = \bar{\sigma}(\bar{\varepsilon}, \bar{\varepsilon}, T) \tag{2}$$

式中: $\bar{\sigma}$ 为流动应力; $\bar{\epsilon}$ 为等效塑性应变; $\bar{\epsilon}$ 为等效 应变速率。

1.3 几何模型的建立

利用有限元软件 DEFORM 的变形和热传导功能,对钼粉烧结锥形件在不同成形条件下的压扭过 程进行热力耦合模拟。根据某军工项目锥形件尺 寸,建立起坯料有限元分析模型(如图1所示),坯料



图 1 锥形件坯料有限元模型 Fig. 1 FE model of cone

初始相对密度取 0.85,采用软件自带的四面体单元 对模型进行划分,坯料的单元数为 50 000,上下模具 的单元数各为 20 000。此外,由于钼在 520 ℃以上 会发生氧化,模拟温度拟定为 475 ℃。接触摩擦采 用常剪切摩擦模型,摩擦因子设为 0.6。

在数值模拟中,工艺参数的设定应尽量符合实际。针对实验室的高压扭转设备,采用上模垂直轴向运动、下模旋转的运动方式,将模拟分为两部分进行:上模以 0.1 mm/s 的速度下行,下模扭转角速度为 0.1 rad/s,当压力达到 300 kN 时停止;上模保压 300 kN,下模扭转角速度保持不变。模具总装模型 如图 2 所示,为使锥形件口部材料受到强烈的三向



图 2 模具总装模型 Fig. 2 Die assembly model

压应力作用,上模设计成阶梯形结构,从而提高坯料 的致密效果和变形均匀性。

2 有限元模拟结果分析

2.1 等效应变及相对密度的分布规律

在坯料横截面选取了 6 个跟踪点(如图 3 所示),来具体分析锥形件在高压扭转过程中不同部位

的变形程度及相对密度分布情况。



图 3 横截面跟踪点示意

Fig. 3 Schematic of cross section points



跟踪点的等效应变曲线如图 4 所示,可以看出,

图 4 跟踪点等效应变-时间曲线 Fig. 4 Curves of effective strain of track points

在变形的初始阶段,应变速率比较快。这是因为钼 粉烧结锥形件作为非致密体材料,内部存在大量孔 隙,初期变形主要是以孔隙的压缩、拉长、分散及闭 合为主,这就导致了等效应变积累较快。当孔隙基 本闭合后,在较大剪切应力的作用下,基体才开始发 生剧烈的大塑性变形,所以曲线依然保持了上升的 趋势,但幅度趋缓。跟踪点 P₁,P₂,P₃ 的等效应变 是逐步减小的,这主要是由高压扭转工艺的特点决 定的,因为锥形件口部距中心轴远,扭矩大,而扭矩 传递的是剪切力,这样口部材料获得的剪切变形量 就大,等效应变也更大;锥部材料仅受到类似于镦粗 的作用,剪切变形很小甚至没有,因此等效应变也较 小。

跟踪点的相对密度-时间曲线如图 5 所示,很明显内壁跟踪点 P_1 , P_2 , P_3 的相对密度均大于外壁的 P_4 , P_5 和 P_6 ,这是因为内壁与上模接触,根据力的 传递规律,内壁金属先发生变形,所以等效应变的积



图 5 跟踪点相对密度-时间曲线 Fig. 5 Curves of relative density of track points

累更大,致密效果也更好。总体来说,某个点的等效 应变大,相对密度上升得就快,是一种相互对应的关 系,符合多孔材料塑性变形规律,验证了模拟的可 靠。另外,上模的阶梯形结构使 P₁ 点最先达到理 论相对密度,说明了这种设计的必要性。

2.2 摩擦因子对成形的影响

摩擦因子是高压扭转成形非常重要的工艺参数。传统挤压过程中,通常需要涂抹润滑剂来减小 摩擦,以提高工件的成形质量。然而,在高压扭转成 形工艺中,模具可通过与坯料的摩擦来传递扭矩,从 而变被动摩擦为主动摩擦,有利于坯料的成形。

在 4 种不同摩擦因子条件下的坯料平均相对密 度曲线如图 6 所示,随着摩擦的加大,曲线呈先上升



图 6 不同摩擦因子下坯料平均相对密度



后下降的趋势。这是因为当模具与坯料之间的摩擦 较小时,模具在高压扭转过程中会打滑,致使扭矩没 有完全传递给坯料,但是随着摩擦因子的提高,在传 递扭矩的同时阻碍金属流动的不利摩擦也在随之增 大,所以当摩擦增大到一定值后,反而不利于坯料的 致密。

2.3 扭转角速度对成形的影响

4 种不同扭转角速度条件下的平均相对密度曲 线如图 7 所示,可以看出,当ω<0.4 rad/s时,随着



图 7 不同扭转角速度下坯料平均相对密度



扭转角速度的增大, 坯料的平均相对密度也相应的 增大; 当ω>0.4 rad/s时,随着扭转角速度的增大, 平均相对密度反而减小, 而且模拟中坯料相对密度 的分布也越来越不均匀。这主要是由于模具和坯料 间的相对扭转速度差开始增大, 致使坯料运动滞后, 减弱了剪切应力的作用, 增加了变形的不均匀性, 最 终导致锥形件平均相对密度的减小。

3 结语

 1) 经高压扭转成形的钼粉烧结锥形件,口部 最先达到理论相对密度,等效应变及相对密度的 分布从口部到锥部均呈下降的趋势。总体来说, 锥形件内壁等效应变和相对密度分布高于外壁。

2)当摩擦因子较小时,坯料达到理论密度的 部分,随着其提高相应地增大;但当摩擦大到一定 值时,反而不利于坯料的致密。扭转角速度同比 于摩擦因子,且扭转角速度对高压扭转成形提供 的剪切变形量有着显著影响。因此选择适当的摩 擦因子和扭转角速度是锥形件高压扭转成形的重 要环节。

3)可通过控制高压扭转成形的接触摩擦力和 剪切变形强度,来改变锥形件内部的应力应变状态, 产生较大的切应变量,以细化晶粒。

参考文献:

- [1] NIKOLAY A, KRASILNIKOV, SHARAFUTDINIV
 A. High Strength and Ductility of Nanostructured Albased Alloy, Prepared by High-pressure Technique
 [J]. Materials Science and Engineering, 2007, A463: 74-77.
- REVESZ A, HOBOR B, SZABO P J. Deformation Induced Crystallization in an Amorphous Cu60Zr20Ti20 Alloy by High Pressure Torsion[J]. Materials Science and Engineering, 2007, A460-461: 459-463.
- [3] 薛克敏,王真,吕炎. 扭压变形的准三维刚塑性有限元 分析[J]. 塑性工程学报,1997,4(1):9-13.
- [4] 薛克敏,章争荣,吕炎. 扭压变形数值分析中的有限元法[J]. 锻压技术,1997(2):44-46.
- [5] YU Chuan, TONG Yan-jing, YAN Cheng-li. Applied Research of Shaped Charge Technology [J]. International Journal of Impact Engineering, 1999, 23: 981 - 988.
- [6] LIANG Zheng-feng, HU Huan-xing. The Current Situation and Future Development Direction of Explosively Formed Projectile Technology[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2004, 27(4): 21-25.
- [7] 李正.国外破甲药型罩材料科技发展分析[J].国外 兵器动态,2000,15(6):38-41.
- [8] 韩欢庆,张鹏,姜伟,等. 钼在药型罩中的应用[J]. 中 国钼业,2004,28(1):47-49.
- [9] 王毅,姜炜,刘宏英,等. 粉末药型罩材料及其工艺技术的研究进展[J].含能材料,2007,12(5):555-559.
- [10] 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.

12