

压扭工艺改善钼粉末温压成形的模拟分析

章凯, 李晓, 李萍, 王刚, 张宾宾

(合肥工业大学 材料科学与工程学院, 合肥 230009)

摘要: 运用 MSC. Marc 有限元仿真软件, 采用基于更新拉格朗日方法的热-机耦合分析方法, 模拟了钼粉温压和温压扭成形过程, 获得了 2 种工艺条件下的粉坯相对密度分布规律, 验证了有限元模型的可靠性。结果表明: 压扭工艺可以减小粉坯端面边缘处相对密度分布梯度, 增大侧壁附近粉末变形量, 并显著提高平均相对密度及相对密度分布的均匀性。

关键词: 压扭工艺; 钼粉末; 温压成形; 数值模拟

中图分类号: TG319 **文献标识码:** A

文章编号: 1674-6457(2010)04-0023-04

Simulation Study on Improvement of Molybdenum Powder Warm Compaction Process by HPT

ZHANG Kai, LI Xiao, LI Ping, WANG Gang, ZHANG Bin-bin

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

Abstract: The warm compaction and high-pressure torsion (HPT) process of molybdenum powder was simulated and analysed by MSC. MARC FEM software. The thermal mechanically coupled analysis method based on the updated Lagrangian Method was applied to simulate this process. The distributing rules of relative density in two technology conditions were obtained, and the reliability of FE model was validated. It is shown that HPT technology could decrease the distributing grades of relative density on the end face fringe of powder body, the transformation of powder near the side is increased. It is indicated that the average value and distributing uniformity of relative density are improved remarkably.

Key words: HPT technology; molybdenum powder; warm compaction process; numerical simulation

钼的熔点为 2620 °C, 由于其原子间结合力极强, 故在常温和高温下强度都很高。钼的膨胀系数小, 导电率大, 导热性能好, 在常温下与盐酸、氢氟酸及碱溶液都不反应, 因此钼及其合金在冶金、电气、核工、宇航等重要部门有着广泛的应用, 已成为国民经济中一种重要的原料和不可替代的战略物质^[1]。粉末冶金法是目前公认的最经济的钼加工方法^[2]。金属粉末温压成形技术是 Hoeganaes 公司于 1994 年开发, 并成功制造出高强度铁基粉末冶金零部件

的新型钢模压制技术, 可以有效提高粉坯密度、强度, 降低压制压力和生产成本^[3-4]。

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扭矩, 促使变形体同时产生轴向压缩和切向剪切变形的特殊塑性成形工艺^[5]。文中的研究对温压成形进行了改进, 将高压扭转工艺与其结合, 通过下模的旋转将压制中有害的摩擦变成有益的作用, 改善压坯密度分布, 以提高钼粉压坯烧结性能。

收稿日期: 2010-04-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50875072)

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。

运用计算机数值模拟技术对粉末温压成形过程进行模拟是一种有效的方法,可以大为降低人力、物力消耗,缩短研究分析时间,并为生产实践提供指导性依据^[6]。研究采用 MSC. Marc 软件,模拟了钨粉温压和温压扭成形过程,分析了压扭工艺对粉坯相对密度分布的影响。

1 热-机耦合有限元法

粉末温压成形是涉及温度场和大塑性变形的热弹塑性问题,为了较为精确的分析此类问题,采用基于更新的拉格朗日方法的热-机耦合有限元方法,同时处理热传导和力平衡的 2 类不同场方程。下面给出热-机耦合有限元法增量有限元描述。

对于体积为 V , 边界为 S 的连续介质,可写出能量守恒方程^[7]:

$$\int_V \left\{ \rho \left(Q - \frac{\partial U}{\partial t} \right) + \sigma_{ij} \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \right\} dV = \int_S H dS \quad (1)$$

式中: Q 是给定体积热流; ρ 是介质质量密度; U 是给定内能; v_i 是速度场; H 是表面热流强度。

热弹性描述采用 Mises 屈服准则:

$$F = \frac{1}{2} S_{ij} S_{ij} - \frac{1}{3} \bar{\sigma}^2 (\bar{\epsilon}^p, T) = 0 \quad (2)$$

式中: S_{ij} 为应力偏量; $\bar{\sigma}$, $\bar{\epsilon}$ 分别为等效应力和等效塑性应变。

后继塑性应变流动时应满足 $dF = 0$, 可推出:

$$\frac{\partial F}{\partial \sigma_{ij}} \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial t} - \frac{2}{3} \bar{\sigma} \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \bar{\epsilon}^p} - \frac{2}{3} \bar{\sigma} \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial t} = 0 \quad (3)$$

将总的增量应变分解成弹性、塑性和热应变, 即:

$$d\epsilon_{ij} = d\epsilon_{ij}^e + d\epsilon_{ij}^p + d\epsilon_{ij}^T \quad (4)$$

其中, 各向同性材料的应变率为:

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial t} = D_{ijkl}(T) \frac{\partial \epsilon_{kl}^e}{\partial t} + \frac{\partial D_{ijkl}(T)}{\partial T} \epsilon_{kl}^e \quad (5)$$

分析时, 温度场的求解需处理式(1)。在体积给定的前提下, 式(1)可退化成解耦的形式;

$$\int_V \left(\rho \left(Q - \frac{DU(T)}{Dt} \right) \right) dV = \int_S H dS \quad (6)$$

用加权余量的 Galerkin 法可得式(6)的等效弱形式:

$$\int_V g \rho Q dV - \int_S g H dS = \int_V g \rho \frac{DcT}{Dt} dV + \int_V \frac{\partial g}{\partial X_i} k_{ij} \cdot \frac{\partial T}{\partial X_j} dV \quad (7)$$

$$\frac{DcT}{Dt} = c \frac{\partial T}{\partial t} + cv_i \frac{\partial T}{\partial X_j} \quad (8)$$

式中: c 为材料热容; D 为材料变形率。

2 有限元模型的建立

钨粉坯料有限元模型如图 1 所示, 主要由粉末

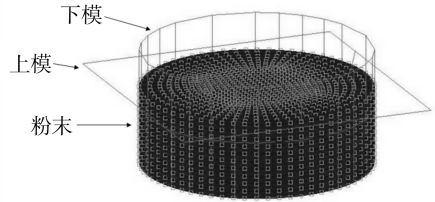


图 1 粉末坯料有限元模型

Fig. 1 FE model of powder body

坯料、上模和下模等 3 部分组成。由于模拟过程中不考虑模具的变形, 只需要对模具表面进行定义, 故将模具简化为圆柱面和平面。模拟采用 7 号六面体实体单元, 模型被划分成 7 680 个单元, 8 811 个节点。粉坯几何参数: 直径 $\Phi = 30$ mm, 高度 $H = 10$ mm。材料参数: 初始粉末体相对密度为 0.5, 热膨胀系数为 $4.9 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$, 热传导率为 $35 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, 比热为 $62 \text{ J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$, 初始屈服应力为 10 MPa, 泊松比和弹性模量都是相对密度的函数, 它们与相对密度的关系分别如图 2 和图 3 所示, 模拟开始时的模具和粉末温度都为 150°C 。

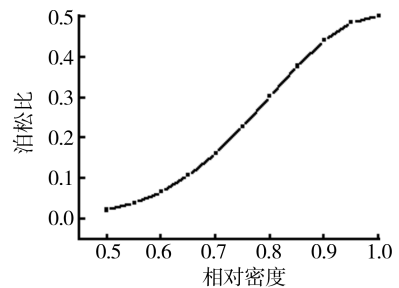


图 2 泊松比随相对密度变化曲线

Fig. 2 Relation between relative density and Poisson ratio

材料模型采用 Shima 模型^[8]:

$$F = \frac{1}{\gamma} \left(\frac{3}{2} \sigma'_{ij} \sigma'_{ij} + \frac{p^2}{\beta^2} \right)^{\frac{1}{2}} - \sigma_y \quad (9)$$

式中: σ_y 为单轴屈服应力; σ'_{ij} 为应力偏张量; p 为静水压力; γ, β 为材料参数且均为相对密度的函数。

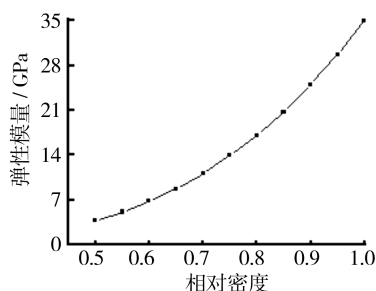


图3 弹性模量随相对密度变化曲线

Fig. 3 Relation between relative density and Young's modulus

模拟中上模运动采用载荷控制方法,加载路径为:前10 s以50 kN/s速度加载到500 kN,然后在500 kN下保压20 s;对于压扭工艺,下模采用速度控制方法,旋转速度为0.03 rad/s。温压过程采用修正的库仑摩擦模型。温压扭成形过程,由于扭矩的作用,采用基于切应力的剪切摩擦模型。另外摩擦对于温压是有害的因素,所以选取温压过程的摩擦系数为0.1;温压扭成形可以充分利用摩擦的作用,故其摩擦系数取0.3。

3 模拟结果分析

当计算完成300增量步后,输出温压和温压扭2种不同工艺条件下,粉坯端面、侧壁及轴截面相对密度分布如图4所示。由图4a可以看出,在以端面心部为中心的某一半径的圆内,相对密度分布非常均匀,几乎是同一数值,而边缘处的相对密度等值面比较密集,密度梯度较大。出现这一反差现象的主要原因,是由于中心某一半径范围内的粉末受摩擦力影响较小,压制力分布比较均匀;相反在模具边缘处的粉末受到了模具内壁摩擦力的影响,产生了应力集中现象,阻碍了粉末的流动。另外相对密度的分布是从边缘向中心逐渐减小的,这与李健^[2]等人的研究结果相一致。由图4b可见,端面中心相对密度分布均匀的面积得到扩大,而边缘处相对密度梯度减小,这是因为压扭工艺将粉末温压中不利的摩擦变成了有益的摩擦,改变了边缘处粉末的受力状态,增大了径向位移,从而促进了粉末体的致密化。

温压粉坯侧壁相对密度分布如图5a所示,可以看出相对密度沿压制方向逐渐减小,这是由于压应

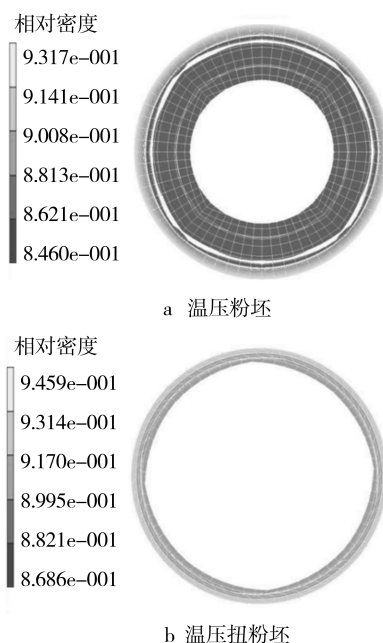


图4 端面相对密度分布等值面

Fig. 4 Contour plane of relative density of end face

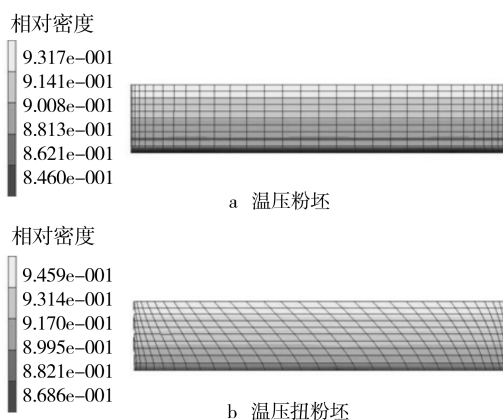


图5 侧壁相对密度分布

Fig. 5 Nephogram of relative density of side face

力沿压制方向的传递受到了模具侧壁摩擦力的制约,所以距离上模越远粉末致密效果就较差。温压扭成形粉坯侧壁相对密度分布规律如图5b所示,与温压粉坯基本相同,但网格发生了明显的扭曲,这是因为粉坯在扭矩的带动下,随着下模的旋转,粉末产生了横向的拉扯,由于剪切力的作用,变形量激增。这就从模拟方面验证了,压扭工艺可以产生较大塑性变形,从而细化晶粒的事实。

温压粉坯轴截面相对密度分布规律如图6a所示,与王德广^[4]、赵伟斌^[6]、汪俊^[9]等人的研究结果

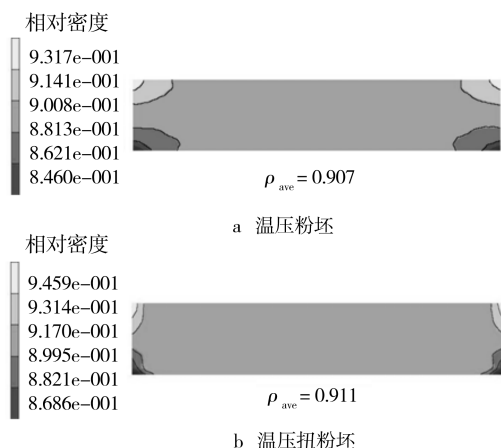


图6 轴截面相对密度分布切片

Fig. 6 Slice of relative density of axis section

接近。上端面边缘处的相对密度最高,而下端面边缘处的相对密度最低,中心部位相对密度基本没有变化,可视为压透。温压扭粉坯轴截面相对密度分布如图6b所示,温压扭粉坯平均相对密度得到提高,上下端面边缘相对密度梯度较大的区域已大为减小,相对密度分布显著改善。

4 结语

1) 压扭工艺可以改变粉末坯料表面受力状态,使端面边缘处相对密度梯度减小,中心相对密度均匀的面积扩大。

2) 温压扭成形过程中,侧壁附近粉末受摩擦传递的剪切力作用明显,变形量较压制工艺有明显增大。

3) 压扭工艺可以提高粉坯平均相对密度,并显著改善相对密度分布。

参考文献:

- [1] 罗振中. 钼的应用及其发展[J]. 中国钼业, 2003, 27(2): 7-10.
- [2] 李健. 钼粉末温压成形过程的有限元数值模拟研究[D]. 陕西: 西北工业大学, 2007.
- [3] 李元元, 肖志瑜, 倪东惠, 等. 温压成形技术的研究进展[J]. 华南理工大学学报, 2002, 30(11): 15-20.
- [4] 王德广, 周瑞庭, 解挺, 等. 粉末温压成形过程中的力学行为[J]. 机械工程材料, 2007, 31(5): 66-68.
- [5] 薛克敏, 张君, 李萍, 等. 高压扭转法的研究现状及展望[J]. 合肥工业大学学报, 2008, 31(10): 1613-1616.
- [6] 赵伟斌. 金属粉末温压成形的力学建模和数值模拟[D]. 广州: 华南理工大学, 2005.
- [7] 陈火红. 新编 Marc 有限元实例教程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- [8] SHIMA S, OYANE M. Plasticity Theory for Porous Metals [J]. Int J Mech Sci, 1976, 18: 285-292.
- [9] 汪俊. 粉末金属成形过程建模及成形工艺计算机仿真[D]. 上海: 上海交通大学, 1999.

(上接第14页)

- [3] 赵志业. 金属塑性变形与轧制理论[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2004: 108-112.
- [4] 于秋林, 连家创. 冷轧薄板轧制变形区长度计算[J]. 东北重型机械学院学报, 1989, 13(4): 48-55.
- [5] 陆济民. 轧制原理[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1993: 175-179.
- [6] WANG J S, JIANG Z Y, TIEU A K. Adaptive Calcula-

tion of Deformation Resistance Model of Online Process Control in Tandem Cold Mill[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 162: 585-590.

- [7] 周富强, 曹建国, 张杰, 等. 冷连轧机轧制力的影响因素[J]. 机械工程学报, 2007, 43(10): 94-97.