

基于有限元模拟的钼粉末温压成形分析

李 健, 张文超

(西北工业大学, 陕西 西安 710072)

摘 要: 为了研究钼粉末温压成形过程, 用有限元分析软件建立了钼粉末温压成形的有限元模型, 对三维圆柱等截面粉柱温压成形过程进行了有限元数值模拟, 从模拟结果得到了最终坯体内部密度和应力等参量的分布情况以及钼粉末颗粒轴向和径向流动规律。实验验证了所建立有限元模型的可靠性, 并分析了部分工艺和材料性能参数对钼粉末成形的影响。结果表明: 在钼粉末的温压成形过程中, 压坯顶部半端面、轴截面和侧壁的相对密度分布等值线和其应力分布等值线非常接近。

关键词: 钼粉; 有限元分析法; 温压; 规律

中图法分类号: TF124.31

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2009)04-0659-04

由于钼和钼合金熔点高, 高温强度和高温硬度都很大, 采用传统的成形和加工方法很难满足产品的性能和质量要求, 如力学性能、精度尺寸和电导率等。再加上钼价格昂贵, 生产成本居高不下, 也限制了钼的应用。在航空、宇宙火箭和核能技术工业中, 钼被用来制造高温高压火箭装置和飞机零件。钼和钼合金由于在碱金属液体和蒸气、硫酸、盐酸和磷酸介质中的抗腐蚀性能和高比强度的结合被广泛用于化工、石油和玻璃工业中。采用粉末冶金成形的方法是目前公认的最经济的加工方法^[1~7]。

本工作是与宝鸡有色金属加工厂科技处合作共同开展的钼圆片的粉末压制成形研究。通过对钼粉末温压成形的理论计算和计算机数值模拟, 研究了钼粉末压制成形规律和致密机制, 寻求能够提高粉末压坯性能和质量(密度、电导率、精度)的方法和途径, 以优化模具设计和粉末压制成形工艺参数。

1 有限元模型建立

本研究主要模拟等高圆柱体钼粉的温压成形过程, 几何模型如图 1。模型主要由 4 部分组成: 粉体压坯、上下模冲和阴模。模具相对粉末来说刚度远远大于粉体, 同时在模拟过程中不考虑模具的变形, 只对模具表面进行定义, 因此在模拟过程中将模具表面简化为圆柱面和直线。

本研究模拟采用 134 号四面体四节点等参单元。整个圆柱体压坯被划分成 18 460 个单元和 4207 个节点。采用传热刚体模拟模具恒温加热条件。压制方式

为浮动阴模双向压制。由于材料参数存在高度非线性, 采用三维六面体或者四面体和六面体混合单元划分几何模型, 使计算很难收敛, 而且往往不能只用六面体单元填满几何实体, 几何体内部常出现一些四面体单元, 这些四面体单元往往是计算不能收敛的地方。因此为了便于计算, 本研究采用四面体单元划分几何模型。本研究中, 圆柱体使用的参数如表 1 所示。

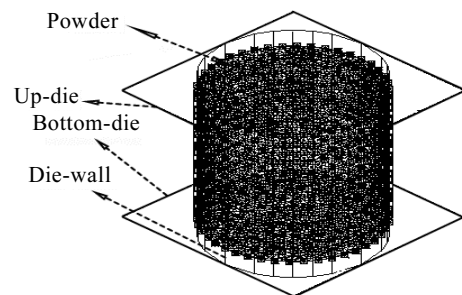


图 1 粉末压制几何模型

Fig.1 Geometric model of powder metallurgy compaction

2 相对密度分布规律

图 2 分别是温压终了压坯顶部半端面、轴截面和侧壁的相对密度分布等值线图。在端面上, 坯体的相对密度等值线基本上是一系列同心圆, 而且相对密度由端面中心向边缘逐渐增大, 数值由 0.8907 增大到了 0.9161。另外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, 几乎是一个数值, 比如图中

收到初稿日期: 2008-03-23; 收到修改稿日期: 2009-01-05

作者简介: 李 健, 男, 1961 年生, 副教授, 西北工业大学材料学院, 陕西 西安 710072, 电话: 029-88488008, E-mail: ljnpu@126.com

表 1 圆柱体材料使用的参数

Table 1 Material parameters for cylindrical pressed compaction

Parameter type	Parameter value
Geometric size	Stock diameter: 40 mm Height: 40 mm
Material parameters	Young's modulus $E=32\ 000\ \text{MPa}$, Poisson ratio $\mu=0.25$, Initial relative density 0.5, Initial yield stress 160 MPa, Expansion coefficient 4.9×10^{-6}
Thermal parameters	Mo powder temperature $200\ ^\circ\text{C}$, Inner heat conductivity $149\ \text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, Contact coefficient of heat transmission $120\ \text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, Die temperature $150\ ^\circ\text{C}$

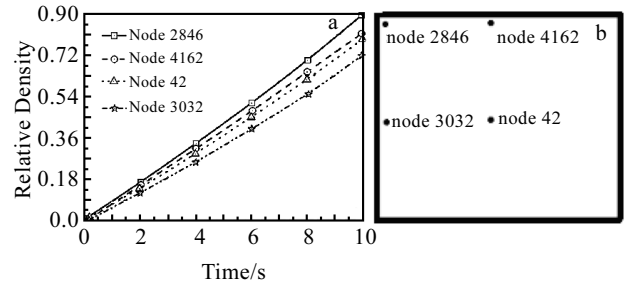


图 3 典型节点位置致密过程

Fig.3 Process of densification of typical nodes: (a) curves of nodes' density and (b) sites of nodes' mold

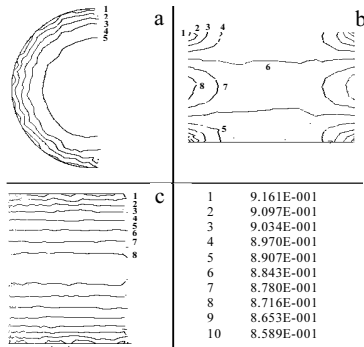


图 2 相对密度分布等值线

Fig.2 Contour of relative density: (a) top view, (b) axis section, and (c) side view

等值线 5 的内部。相反，边缘处的相对密度等值线比较密集，密度梯度较大，密度变化剧烈，出现这一反差现象的主要原因是中心一定范围内的载荷分布受摩擦力影响较小，压制力分布比较均匀；相反在模具边缘处的粉末颗粒受到了模具内壁摩擦力的影响，产生了应力集中现象，附近的颗粒流动受到扰动。

图 3 是压坯上典型位置（采用节点代替）相对密度在压制过程中的变化曲线。图 3a 显示了各节点的致密化过程，图 3b 显示了各节点对在压坯上的位置。由图可见，在不同的位置致密化过程是不同的，其规律与前述相吻合。

3 应力分布规律

图 4 为压制结束时压坯端面、侧壁和中心轴截面上的应力分布等值线。曲线整体分布趋势和密度分布非常接近。Von Mises 应力范围大致在 1000 MPa 左右，这与吴成义等人实验结果^[2]接近。在端面边缘应力达到最大（图中曲线 1），数值达到了 1156 MPa，中部边缘部位应力最小，大约为 971.6 MPa。一般认为这是由于模具与粉末体之间的摩擦阻碍了有效压制力

（净压力）的自由传递，导致有效压制力数值沿压制方向逐渐减小。

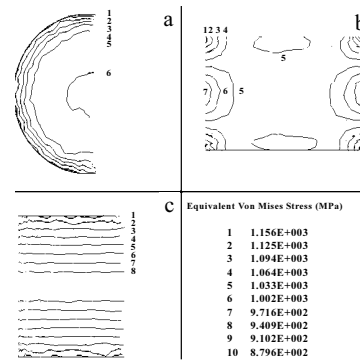


图 4 应力分布等值线

Fig.4 Contour of stress: (a) top view, (b) axis section, and (c) side view

本研究采用的加压方式为双向压制，因此密度最小位置出现在中间层的边缘环行部位，若采用单向加压方式，最小密度将会出现在最低部边缘位置。相当于双向加压方式的上半部分或者下半部分坯体。这也说明了粉末颗粒所处的应力状态是影响压坯致密化的重要因素，因此出现了等静压（IP）和热等静压（HIP）等能够更好地改善粉末颗粒压制过程中应力状态的成形方式。由于模具内壁对粉末颗粒的摩擦沿径向的强烈程度不同——从内壁到轴心逐渐减弱，因此中心部位密度降低没有边缘位置幅度大。Von Mises 应力大小除了与粉末本身属性（粉末粒度、颗粒形状、加工硬化程度和是否氧化等）有关外，还与外界因素有关，如压下量、压制速度和温度等。

图 5 是典型节点 node 2184、2315 和 3859 处的 Equivalent Von Mises Stress 分布曲线。从图 5 可以看出，位于端面边角位置的节点 2184 受应力集中影响显著，应力比较大。相反，在中心部位置的节点 2315 基

本没有应力集中倾向, 所以 Von Mises Stress 比较小。曲线上的数值代表压缩行程的百分比。

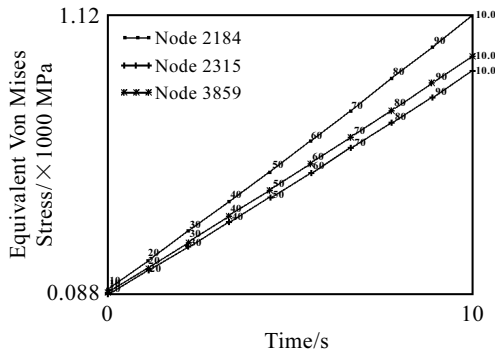


图 5 典型节点 Von Mises 应力变化曲线

Fig.5 Curve of Von Mises stress of typical nodes

从中心到模具壁的颗粒位移呈非线性连续变化。若采用单向加压方式则同层的颗粒位移量差别将更加显著, 同层不同半径处的颗粒位移等值线相应的弯曲程度也将更大。这对粉末致密是非常不利的。

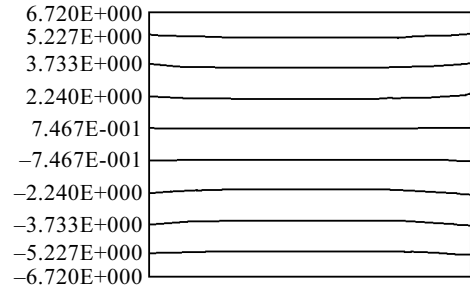


图 7 颗粒轴向位移等值线

Fig.7 Contour of axial displacement of particles

4 粉末颗粒的流动规律

在等高制品的压制过程中颗粒运动特征如图 6。就粉末的受力情况来看, 造成粉末运动的不平衡力只有沿压制方向, 并垂直于冲头表面的力 F 起作用, 侧压力的方向因与粉末运动方向垂直且相互平衡, 故对粉末的运动没有影响。摩擦力与粉末运动方向相反, 所以阻碍粉末运动。

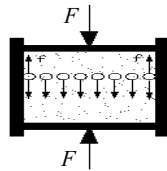


图 6 压制过程颗粒运动示意图

Fig.6 Schematic of movement of particles during the compaction

图 8 是位于上端面的节点 node 3859 和中间位置的节点 node 2315 的轴向位移曲线在压制过程中的变化情况。从图上也可以看出与前述相同的变化规律: 坯体中间部位的粉末颗粒轴向位移远小于端面处颗粒的轴向位移。曲线上的数值代表压缩行程的百分比。

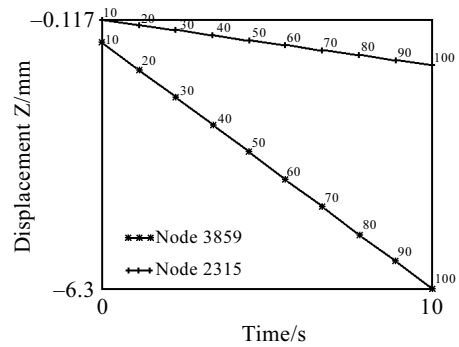


图 8 不同节点的位移变化曲线

Fig.8 Curves of displacement of typical nodes

5 轴向流动的规律

图 7 是压制速度为 6.5 mm/s, 摩擦系数为 0.2 的双向压制条件下, 压制终了时压坯的轴截面粉末颗粒轴向流动的位移等值线图。由于受摩擦力的影响, 粉末颗粒在各层之间的压缩量以及同一层的粉末在不同的半径处的位移量是不同的, 除与冲头表面接触的最上层和最低层的粉末颗粒有相同的位移 (± 6.720 mm) 外, 其他的各层位移量均不相等, 而且在同一层内不同半径处颗粒的位移量也不同。由于模拟压制方式采用了双向压制, 所以粉末上下部分的位移量呈对称分布, 而且每一部分又是以压坯轴线为对称轴的球冠面。中心受外壁的摩擦力阻碍影响小, 此处的颗粒在同一层内位移最大 (6.720 mm), 紧贴模壁处的颗粒受摩擦阻碍作用显著, 位移最小 (0.7467 mm),

6 径向流动的规律

图 9 是上下端面上的粉末颗粒在笛卡儿坐标系下的径向 (X 方向) 流动位移等值线图。从总体上来看, 曲线分布基本呈对称分布。如果在极坐标下绘制, 则等值线是许多同心圆。由图可知, 端面中心处的颗粒径向流动很小, 数值大约为 0.014 29 mm。靠近模具内壁处的颗粒径向流动稍大, 其值约为 0.032 93 mm 左右。其次从等值线分布密度上来看, 模壁处分布较密, 而中心处分布较疏, 可见中心处颗粒流动差别不大, 而模具壁处汇聚了大量的等值线, 粉末颗粒流动差别较大。

图 10 为轴截面上粉末颗粒位移等值线图。由图 10 可以看出, 曲线呈局部交替分布。各部分分布情况几乎相同, 在上下端面处是被各自水平轴线平分的形状,

这主要是该处的颗粒受到上下模冲的强制作用产生的。完整、典型的局部分布出现在中间层，几乎呈同心分布。该处的粉末颗粒流动位移范围在 0.013 4 mm 到 0.031 27 mm 之间。很明显，粉末颗粒的径向流动与轴向流动相比微乎其微，后者大约是前者的近 500 倍。

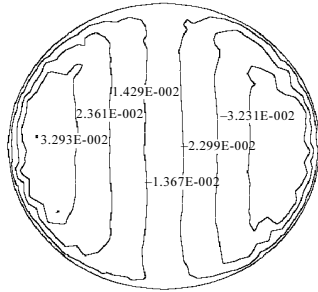


图 9 两端面上粉末颗粒流动规律

Fig.9 Movement law of particles at the upper and bottom surfaces

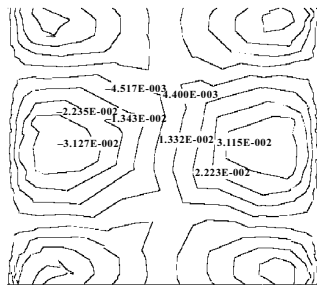


图 10 轴截面粉末颗粒流动规律

Fig.10 Movement law of particles at axial section

7 结 论

- 1) 建立了三维粉末压制模型。
- 2) 端面上坯体的相对密度等值线基本上是一系列同心圆，而且相对密度由端面中心向边缘逐渐增大。
- 3) 压制结束时，压坯端面、侧壁和中心轴截面上的应力分布等值线的曲线整体分布趋势和密度分布非常接近。

参考文献 References

- [1] Jaroslav M. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2003, 133: 378
- [2] Wu Chengyi(吴成义) et al. *Mechanical Theory of Powder Processing (粉末成形力学原理)*[M]. Beijing: Metallurgy Industry Press, 2003
- [3] Ransing R S et al. *Materials and Design*[J], 2000, 21: 263
- [4] Huang Peiyun(黄培云). *The Theory of Powder Metallurgy(粉末冶金原理)*[M]. Beijing: Metallurgy Industry Press, 1982
- [5] Skrinjar O et al. *Computational Materials Science*[J], 2004, 31: 131
- [6] Chen Cheng(陈程) et al. *Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)*[J], 2007, 36(7): 1237
- [7] Cao Shunhua(曹顺华) et al. *Materials for Mechanical Engineering(机械工程材料)*[J], 2002, 26(6): 9

Warm Compaction Technology of Molybdenum Powder Based on Finite Element Method

Li Jian, Zhang Wenchao

(Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: In order to study on the influence of parameters on process of warm compaction of molybdenum powder, a finite element method (FEM) model for molybdenum powder has been established using the elasto-plasticity FEM software. Warm compaction process of three-dimensional (3-D) cylinder was simulated on by FEM. The distributions of the density and the stress inside the compacts, the longitudinal and horizontal flowing of molybdenum particles were investigated by means of the simulation results. The reliability of FEM model was proved by the experiment, and the effects of the technology and material parameters on the molybdenum powder compaction were analyzed. The results show that the distributions of the relative density and the stress are very close at the top, the longitudinal section and the lateral wall of the compacts during the warm compaction

Key words: molybdenum powder; FEM; warm compaction technology; law

Biography: Li Jian, Associate Professor, School of Materials Science, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, P. R. China, Tel: 0086-29-88488008, E-mail: ljnpu@126.com