

# 冷挤压有限元分析

杨务滋 杨国庆 周立强

(中南大学 机电学院液压所 湖南 长沙 410083)

**摘要** :详细阐述了杯形反挤压成形的冷挤压过程。通过经典理论算法和 ANSYS 有限元算法 ,计算出了挤压力的大小 ,分析比较可以发现 :有限元法能获得更高的计算精度。通过 ANSYS 的求解后处理 ,分析得出了挤压件的应力应变的分布情况 ,和挤压阶段凸模的压力行程曲线。在此基础上 ,改用不同特性的材料、凸模的形式、润滑条件以及通过 APDL 参数化设计语言改变挤压件的尺寸大小进行反复求解 ,从而获得了这些因素对挤压力的影响规律。

**关键词** :杯形反挤压成形 ;经典理论算法 ;ANSYS 有限元 ;应力应变的分布

**中图分类号** :O241.82 ;TG376.3

**文献标识码** :A

## 1 前言

冷挤压是金属压力加工方法的一种 ,它利用装在压力机上的模具 ,在相当大的压力及一定的挤压速度下挤压金属 ,使金属产生塑性变形 ,从而使毛坯变成所需的形状与尺寸的零件。用冷挤压加工可以降低原材料消耗 ,材料利用率高达 70%~80% ,与此同时 ,采用冷挤压加工可以大大地减少工时 ,提高生产效率 ;在冷挤压的过程中 ,毛坯金属处于三向压力状态 ,有利于提高金属材料的塑性 ,且经挤压后金属材料的晶粒组织更加细小而密实 ;金属流线不被切断并且产生加工硬化 ,使得冷挤压件的强度大为提高 ;并获得较高的尺寸精度和表面光洁度。考虑到压力的限制 ,以及模具的使用寿命 ,冷挤压一般适用于塑性比较好的材料的成型 ,如铝及其合金、铜及其合金等 ,对于球墨铸铁、碳高及其合金等的挤压 ,必须预先经过退火处理 ,以降低其硬度 ,增加其塑性 ,提高金属的流动性 ;为了减少模具与加工件的摩擦 ,改善两者之

间的润滑 ,还有必要进行磷皂化处理<sup>[1]</sup>。

以前研究金属的流动及其应力分布的方法主要有 :坐标法、用塑料体模拟挤压试验法、硬度实验法、光塑性法<sup>[2]</sup>。随着电脑软件和有限元技术的发展 ,利用有限元软件进行模拟和仿真显得越来越流行。本文采用如今较为流行的大众化分析软件 ANSYS 对冷挤压过程进行模拟分析 ,从而得出了冷挤压加工的某些规律。

## 2 冷挤压力的计算

本文所考虑的模型为一杯件的反挤压变形 ,该模型如图 1 所示 ,使用的材料为

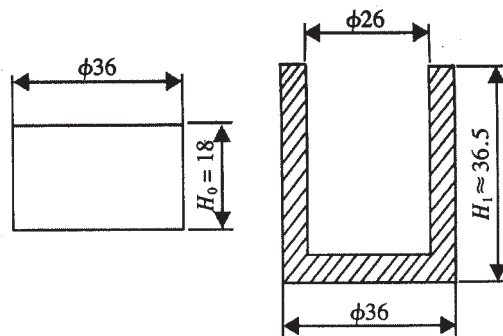


图 1 反挤压毛坯

10 钢 ,毛坯尺寸为  $\phi 36\text{ mm}$  ,高  $18\text{ mm}$  ,经等温球化退火<sup>[2]</sup>(等温球化退火规范如图 2 所示) ,磷皂化处理后(最好再加一定的  $\text{MoS}_2$ <sup>[1,3]</sup>进行润滑) ,在图 3 所示的模具上一次挤压成杯形  $\phi 36\text{ mm}$  ,高  $36.5\text{ mm}$  ,厚  $5\text{ mm}$  ,其断面减缩率达  $52\%$ 。

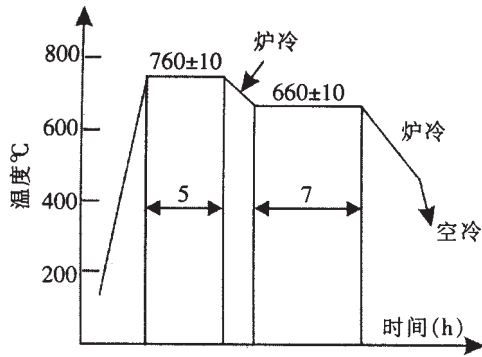


图 2 10 钢球化等温退火规范

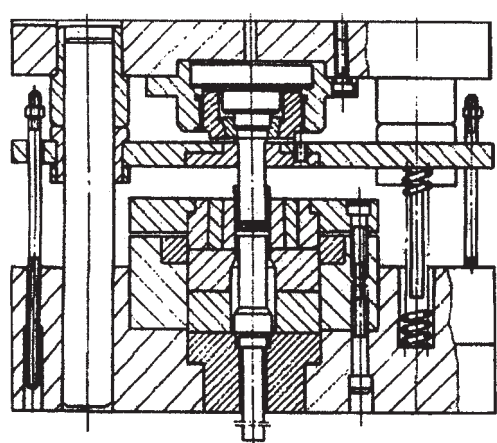


图 3 杯形反挤压模具结构图  
挤压力是拟定挤压变形工序、设计模

具、选择挤压设备的重要依据。挤压力或所选挤压设备吨位可参考下式计算：

$$P = CpA \tag{1}$$

式中  $P$  ——挤压力  
 $C$  ——安全系数  
 $p$  ——单位挤压力( MPa )  
 $A$  ——凸模工作部分的投影面积 (  $\text{mm}^2$  )

由式( 1 )可知 ,挤压力的计算中关键在于如何确定单位挤压力 ,下面采用两种较为简单的经典理论的计算公式对其进行计算。

( 1 )主应力法：

$$p = p_k \left[ \frac{D^2}{d^2} \ln \frac{D^2}{D^2-d^2} + (1+\mu) \chi \left( 1 + \ln \frac{D^2}{D^2-d^2} \right) \right] \tag{2}$$

式中  $\mu$  ——接触面上的摩擦系数  
 $p_k$  ——金属材料的流动应力

( 2 )变形功法：

$$p = 2\tau_k \left[ 1.5 + \frac{D^2}{D^2-d^2} \ln \frac{D}{d} + \frac{2}{\sqrt{3} \frac{d}{D} \left( 1 - \frac{d^2}{D^2} \right)} \right] \tag{3}$$

式中  $\tau_k$  ——金属材料的抗剪屈服应力  
 分别把式( 2 )、式( 3 )代入式( 1 )计算出挤压力 ,与仿真值、实测值对比如表 1。

### 3 冷挤压加工有限元模拟分析

#### 3.1 挤压时金属的流动以及应力应变的分布情况

表 1 挤压力的各种计算方法的结果与实测值的误差

	主应力法	变形功法	ANSYS 有限元法	实际值
挤压力( ton )	144.75	105.43	123.63	127.12
误差	13.9%	-17.1%	-2.7%	—

对于同一金属或合金 ,在适温下进行冷挤压时 ,影响变形抗力的主要因素是变

形程度 ,变形抗力可由式( 4 )表示：

$$\sigma_s = \sigma_0 + A \varepsilon^n \tag{4}$$

凿岩机械气动工具 ,2003( 4 )

式中  $\sigma_0$  ——材料在退火后的屈服强度

$A, n$  ——与材料性质有关的常数

$\varepsilon$  ——变形程度

在挤压过程中, 挤压件发生了较大的塑性流动, 挤压件和模具的接触以及摩擦的影响增加了该问题的非线性性, 降低了求解的收敛性。该问题的模拟中, 在不影响求解精度的条件下, 尽可能简化, 以提高求解速度。由于结构的轴对称性, 本文采用 QUAD 4NODE 182 在 ANSYS6.1 的环境下通过 APDL 参数化设计语言<sup>[5]</sup> 进行分析模拟, 摩擦系数  $\mu$  取 0.1~0.2, 定义好约束, 给平底凸模施加刚性位移, 进行求解。从而可以获得其应力分布图(图 4)、流动图、变形图(图 5)。通过后处理可以获得挤压过程

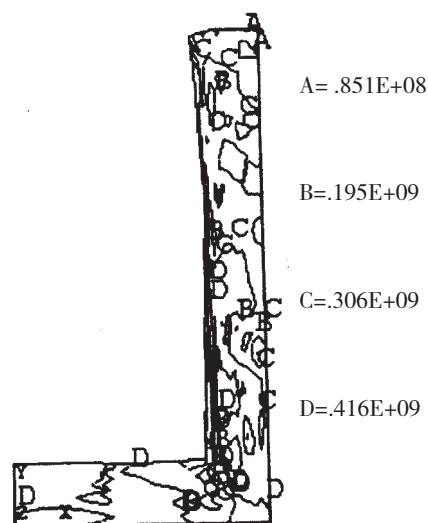


图 4 挤压最终成型时的应力分布

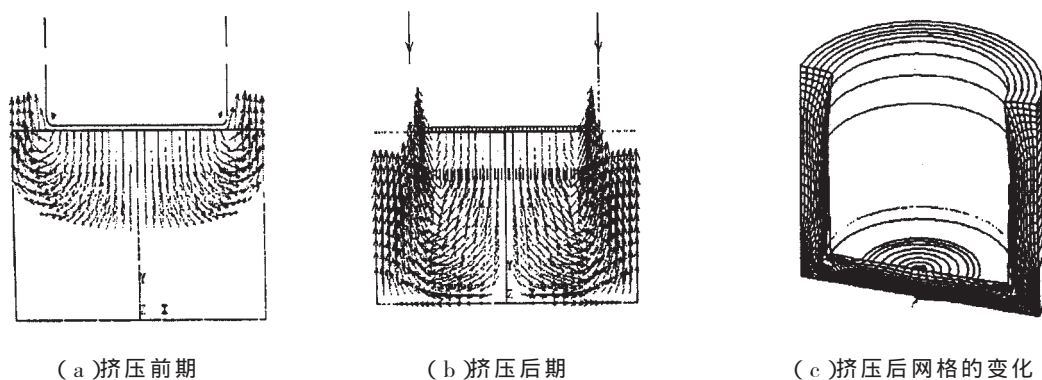


图 5 金属流动情况

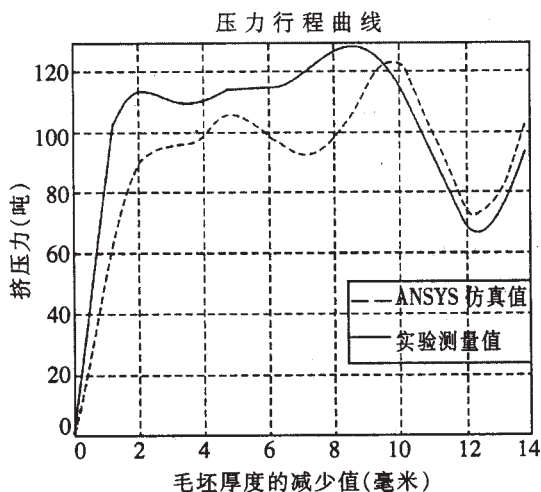


图 6 压力行程的仿真曲线

凿岩机械气动工具 2003(4)

中的压力行程曲线(图 6)。

从图 6 可以看出, 在挤压过程中, 开始挤压时, 凸模挤压毛坯使之充满凸模和凹模间的空间, 挤压力急剧增高; 当凸模继续向下运动, 迫使金属在凸模与凹模间的环状空隙内向上流动, 挤压力变化较小, 但由于材料的硬化, 略有增加; 随着变形区域的缩短, 以及热效应的影响, 挤压力有所下降, 在挤压的后阶段, 这时紧贴在凸模端部原来基本上不动的粘滞区内的金属也被挤压出, 摩擦不断加大, 使挤压力很快升高。

### 3.2 影响冷挤压力的主要因素

在上文的基础上,通过改变材料的特性、改变模具的形式、润滑条件、挤压速度、以及通过 APDL 参数化设计语言改变尺寸参数的大小进行模拟仿真,可以得出它们对挤压力影响的规律。

(1) 金属的化学成分及力学性能: 钢中碳、铬含量的多少和冷挤压金属的力学性能对挤压力的影响较大,是决定单位挤压力的基本因素。碳、铬含量大,抗拉强度  $\sigma_b$  和屈服点  $\sigma_s$  或屈服强度  $\sigma_{0.2}$  高的材料,其单位挤压力较大。金属经热处理后,其抗拉强度和屈服强度、硬度均显著下降,从而可以使变形力降低。此外,材料的加工硬化敏感性越大,冷挤压时所需变形力也越大。

(2) 变形程度和挤压速度对挤压力的影响

在该反挤压过程中,挤压力先随着断面缩减率的增加而减少,在断面缩减率为 40%~60% 时达到最小,然后则随之增大。当断面缩减率较小时,挤压速度增大对热效应的影响较小,材料的加工硬化占优势,挤压力略有增加;当断面缩减率大于 40% 后,热效应影响增大,毛坯温度升高,硬度下降,随着挤压速度增大,单位挤压力反而减小。

(3) 模具的几何形状对挤压力的影响

反挤压时,在图 7 的凸模形式中,平底凸模所受单位挤压力最大,一般当零件要求内孔为平底时采用,锥形凸模所受的单位挤压力最小,但容易造成壁厚不均,因而一般采用带平底的锥形凸模,通过 ANSYS 的模拟可以确定最佳锥顶角。

(4) 毛坯的高径比对挤压力的影响

假设  $d_0$  不变,当  $h_0/d_0 < 1$  时,影响较大,单位挤压力随着其比值的增大明显增大;当  $h_0/d_0 > 1$  时,单位挤压力随着其比值的增大而增大的幅度下降。

(5) 润滑条件对挤压力的影响

良好的润滑状态可以使真实接触面积

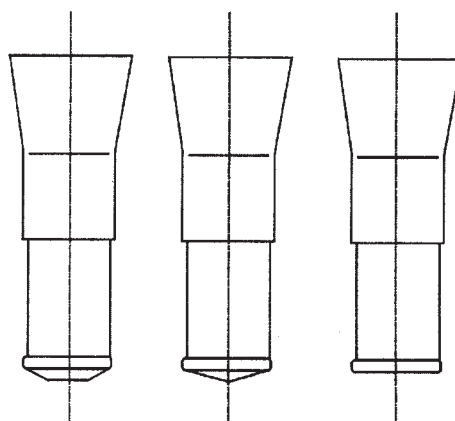


图 7 常用的几种反挤压凸模

率大大减小,从而减小摩擦力,因此挤压力较低。在模拟过程中只要稍微增大摩擦系数,挤压力就明显增大。

## 4 结论

(1) 利用 ANSYS 有限元的方法能更为精确地计算出挤压力的大小,并能模拟出整个挤压过程金属的流动情况、挤压件的应力应变的分布、以及接触应力的分布。

(2) 材料的物理、机械性能是决定单位挤压力的最基本因素,其次,毛坯及零件的尺寸形状、变形程度和变形速度、凸模的形状与表面状态以及润滑条件也不同程度的影响着挤压力的大小。

### 参考文献:

- [1] 姚若浩主编. 金属压力加工中的摩擦与润滑[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1990. 256~260.
- [2] 阮雪榆, 萧文斌等著. 冷挤压技术[M]. 上海: 科学技术出版社, 1963. 36~38.
- [3] 中国机械工程学会锻压学会编. 锻压手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002. 104~105.
- [4] 吕炎等编著. 锻压成形理论与工艺[M]. 北京: 机械工业出版社, 1991. 51~54.
- [5] 王国强主编. 实用工程数值模拟技术及其在 ANSYS 上的实践[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1999. 255~259.

(收稿日期: 2003-07-09)

凿岩机械气动工具, 2003(4)