

超塑性压缩变形的理论计算及比较

姚祖斌 高增法

(精密机械工程系)

摘 要

本文论述了超塑性压缩变形的粘塑性有限元计算方法,对硬铝压缩变形进行模拟计算,得到变形过程中的速度分布、应变率分布、应变分布、应力分布等一系列变形流动信息;与计算圆柱体超塑性压缩流动应力的上限法、滑移线法和变分法进行比较。计算表明,有限元法和变分法的结果比较接近实验数据。

关键词 超塑性, 压缩变形, 理论计算

一、前 言

压力加工设备通过模具施加在工件上使其变形的力称为变形力,它是由模具与金属的接触表面传递给变形金属的。只需知道变形区与模具接触表面上的应力分布和大小,就可以确定变形力。为了合理地制定工艺规程、选用工艺装备和安装设备,以获得较好的经济效益,必须了解压力加工过程中所需的变形力。但是许多成形问题是难以用应力平衡微分方程与塑性条件联解的精确数学解析法求其精确数值解的,有时甚至完全不可能进行精确求解,所以应该设法用近似的办法加以解决。主应力法、功的平衡法、上限法、下限法、滑移线法、变分法和有限元法是求解成形问题的几种常用的近似解法。

二、有 限 元 法

1974年O.C.Zienkiewicz首先提出了考虑金属塑性变形速度对变形影响(即材料的应变速度敏感性效应)的粘塑性有限元法。超塑性变形对应变速度是敏感的,所以应用粘塑性有限元法进行计算。

铝合金圆柱体的超塑性压缩变形,采用了所得方程组和计算程序都比较简单的位移法,它是轴对称问题,属于粘塑性有限元范围。由于其本构关系是非线性的,所以用变分法加以推导。

本文1989年3月9日收到。

1. 基本假设

金属在超塑性状态下的变形, 可以作如下几点基本假设。

- 1) 金属材料是均匀、连续、各向同性的。
- 2) 材料不发生加工硬化效应; 弹性变形很小, 可以忽略; 塑性变形遵循 Mises 屈服准则。
- 3) 超塑性变形时金属材料是不可压缩的, 即体积保持不变。
- 4) 超塑性状态下材料满足简单本构关系 $\sigma = K\dot{\epsilon}^m$ (σ 为等效应力, $\dot{\epsilon}$ 为等效应变速度, K 为材料常数, m 为材料的应变速度敏感性指数)。
- 5) 应变速度与所加的静水压力无关。

2. 超塑性压缩变形的有限元求解公式

1) 变形体离散化:

超塑性压缩变形时, 体积力-重力的影响很小, 可以忽略。将变形体 V 划分成具有 N 个节点的 L 个单元, 则第 l 个单元的泛函为

$$\Pi^{(l)} = \frac{K}{m+1} \left(\frac{2}{3} \right)^{\frac{m+1}{2}} \int_{v^{(l)}} (\dot{\epsilon}_{ij} \dot{\epsilon}_{ij})^{\frac{m+1}{2}} dv - \int_{s_r^{(l)}} T_i V_i ds + \frac{\xi}{2} \int_{v^{(l)}} (\delta_{ij} \dot{\epsilon}_{ij})^2 dv, \quad (1)$$

这里 T_i 是面力, V_i 是位移速度, ξ 是很大的正常数, δ_{ij} 为 Kronecker delta 张量。

2) 求单元特性方程:

单元内引入插值函数, 将其上各点的速度分量、应变速度分量、体积应变速度代入式 (1), 并对节点速度分量 U_ξ 求偏导, 取驻值, 再用 Newton-Raphson 法对其进行线性化, 得未知量为 $K \cdot \theta$ (K 为维数, θ 为一个单元的节点数) 个的线性方程组:

$$\frac{\partial}{\partial U_j} (\pi_{1\xi}^{(l)} + \pi_{2\xi}^{(l)} + \pi_{3\xi}^{(l)})_{(n-1)} \Delta U_j^{(n)} = - (\pi_{1\xi}^{(l)} + \pi_{2\xi}^{(l)} - \pi_{3\xi}^{(l)})_{(n-1)}, \quad (2)$$

用矩阵形式把式 (2) 表示为

$$[P]_{(n-1)} + [M] \{\Delta U\}_{(n)} = \{F\} - \{H\}_{(n-1)} - \{M\} \{U\}_{(n-1)}. \quad (3)$$

3) 单元特性方程集成成系统方程:

把 L 个单元的单元特性方程式 (2) 组集成系统方程, 并写成如下求解 $\{\Delta V\}_{(n)}$ 的简单形式的线性方程组:

$$[S]_{(n-1)} \{\Delta U\}_{(n)} = \{R\}_{(n-1)}, \quad (4)$$

其中 $[S]$ 是系统刚度矩阵, 由马克斯威尔位移互等定理知它是一个对称矩阵; $\{R\}$ 为等效节点力矩阵。

3. 单元分析、初始速度场形成及边界条件处理

1) 轴对称问题的四节点四边形单元分析:

四节点四边形等参单元 (图 1), 由于内部计算精度较高, 边界逼近也较好, 能很好地模拟金属的成形过程, 并且网格生成及数据输入都较容易, 所以成了金属成形有限元计算中经常采用的单元。

整体坐标系中的任意四边形单元在局部坐标系中可转化为正方形单元。

将轴对称问题的 Kronecker delta 张量矩阵 $\{C_i\}$ 及形函数矩阵 $[N]$ 、几何矩阵 $[B]$ 代

入式(3)即可求出每个单元的 $[P]_{(n-1)}$ 、 $[M]$ 、 $[H]_{(n-1)}$ 、 $[F]$ ，再把单元方程集成轴对称四节点四边形单元的有限元系统方程，求解出整个问题。

2) 初始速度场的形成:

采用经验算法, 根据体积不变原则 $dv = 0$, 推算出初始速度场, 以后的变形增量步子可用前一步收敛的结果, 作为其初始速度场。

3) 边界条件的处理:

在金属超塑性变形过程中, 变形金属的表面可分为自由表面和接触表面, 自由表面上没有力和速度的约束, 属于 S_T 上面力为零的边界条件; 接触表面是工件与模具的接触面, 面上有速度和摩擦力的约束, 属于 S_T 和 S_U 的混合边界条件。有限元离散化后工模具的接触面是通过节点相互作用, 由节点和单元折线组成接触面来代替真实接触表面, 其误差属于离散误差。单元网格数越多, 即单元划分得越细, 其误差就越小。轴对称问题的有限元边界条件如图2所示。图中 V 是模具速度, $n_{(i)}$ 是节点 i 处接触面的法线方向, $t_{(i)}$ 是节点 i 处接触面的切线方向, $P_{(i)}$ 是接触节点 i 处的正压力, $\tau_{k(i)}$ 是接触节点 i 处的摩擦力。下面介绍速度、面力两种边界条件的处理。

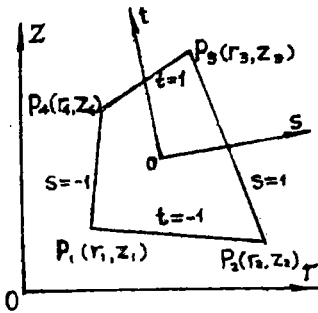


图1 单元坐标的关系

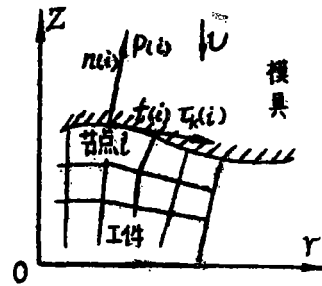


图2 边界条件

(1) 速度边界条件为

$$\{u(i)\} \cdot \{n(i)\} = \{v\} \cdot \{n(i)\} \quad (5)$$

即在接触点的法线方向上工件的速度分量必须等于模具的速度分量, 式中的 $\{n(i)\}$ 是节点 i 处接触面的法向矢量。

(2) 面力边界条件: 在工模具接触面的接触点上, 存在着法线方向的正压力和切线方向的摩擦面力, 由于正压力作用在法线方向, 属于速度约束边界, 不作考虑, 仅讨论摩擦面力, 它以与模具相对运动相同的方向作用在工件上。现采用反正切函数模型

$$\{\tau_k\} = -\frac{2}{\pi} f k \arctan \left(\frac{|V_r|}{a} \right) \{t\} \quad (6)$$

来计算摩擦面力。 f 为摩擦系数, k 为材料主剪切强度, V_r 是工件相对于模具的相对速度, a 是非常小的正数。

4. 刚度矩阵存贮及线性方程组求解

1) 刚度矩阵的存贮:

对于有限元问题, 只要节点的编号合理, 就可使大型对称稀疏的刚度矩阵 $[S]$ 中非零元素分布在以主对角线为中心的斜带形区域内, 形成带状矩阵。采用等带宽存贮(矩形存

贮)法,把刚度矩阵上半带宽内的元素存贮在一个二维数组内,可以大大节省内存空间。

2) 线性方程组的求解:

解线性方程组最常用的方法是高斯消去法,对方程式逐次消元,使每次修改后的矩阵元素相应减少,直到最后的方程组被简化为一个方程式中只含一个变量为止。刚度矩阵以等带宽存贮法存贮,其求解方法与满矩阵时相同,只是公式有所区别。

5. 收敛准则和编程计算

1) 收敛准则:

选用速度模数化准则:当变分后求出的各点速度增量的模与各点速度的模的比值小于某一个非常小的正数时,认为速度场已收敛,此时的速度场即为真实解。

2) 编程计算:

用有限元法进行超塑性压缩变形的计算,必须完成下列步骤:(1)输入材料性能、摩擦条件、控制变量等初始数据。(2)由程序自动划分单元生成有限元网格。(3)输入初始速度,形成初始速度场作为迭代起点。(4)计算各单元的刚度矩阵及力阵。(5)组集单元刚度矩阵成整体刚度矩阵。(6)对摩擦边界和速度边界进行处理。(7)对整体方程组消元求解,通过消元三角化及回代求出速度场。(8)计算表面摩擦力,表面压力分布及总载荷。(9)计算应力、应变、应变率的分布,计算变形后的节点坐标。(10)输出计算结果。

超塑性压缩变形有限元计算的程序框图如图 3 所示。

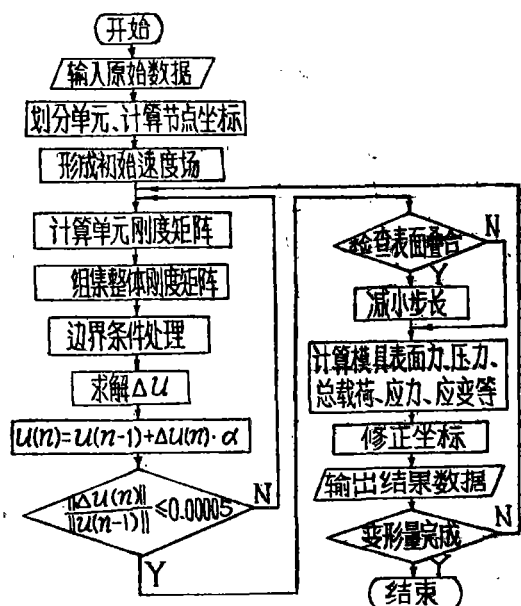


图 3 超塑性有限元计算程序框图

对于圆柱体超塑性压缩,由于结构和受力约束对称于中间横截面,其受力和变形对称也于中间横截面,因此利用对称性,只要取出圆柱体的下半部进行计算,取出部分的上表面速度为上模下压速度之半,是速度约束边界。

6. 试件压缩的模拟计算

在 450℃ 下以速度 $v = 0.0707 \text{ mm/s}$ 压缩的 $\phi 14.8 \times 16$ 的硬铝 (LY12R) 试件,取出纵截面的四分之一进行分析,单元网格划分如图 4 所示,上表面(试件的中间横截面)的节点轴向位移速度为 0.03535 mm/s ,属于速度边界条件,下表面的节点轴向速度为零,且受摩擦作用,属于混合边界条件;中心轴上节点径向速度为零,属于速度边界条件,侧表面不受任何约束,是自由边界。

取材料常数 $K = 17$, 硬化系数 $b = 9$, 硬化指数 $a = 1$, 应变速度敏感性指数 $m = 0.23$, 摩擦系数为 $f = 0.2$, 与压缩速度、单元网格、边界条件等有关的参数一起输入计算机,就可对此试件的压缩变形进行模拟计算。根据计算结果的数据,绘制压缩变形量为 $\epsilon = 0.693$ 时的纵截面网格、速度分布、应变率分布、应变分布、应力分布如图 5—10 所示,计算得到的压

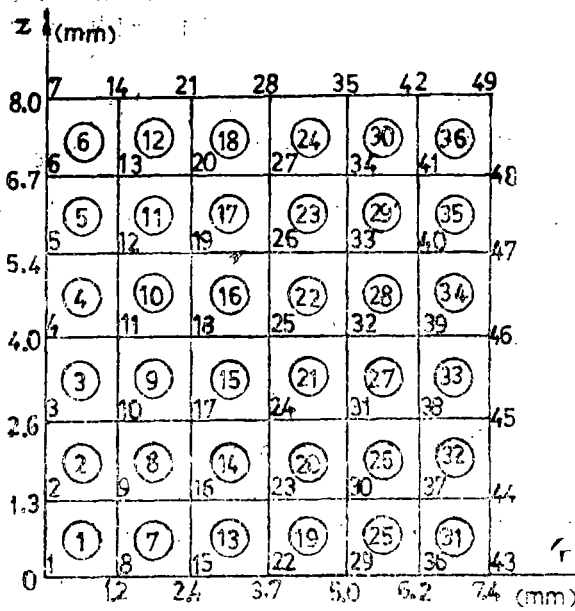


图4 硬铅试件的单元网格

缩量为 12mm ($\epsilon=1.386$) 时试件轮廓与实验结果比较如图11, 由图看出有限元计算结果比实验结果小, 但二者相差不大, 最大相对误差为5.86%。计算轮廓偏小是由坐标修正公式 $R(i) = R(i-1) + UR(i)t$ 中的 UR 小于实验值而造成的。

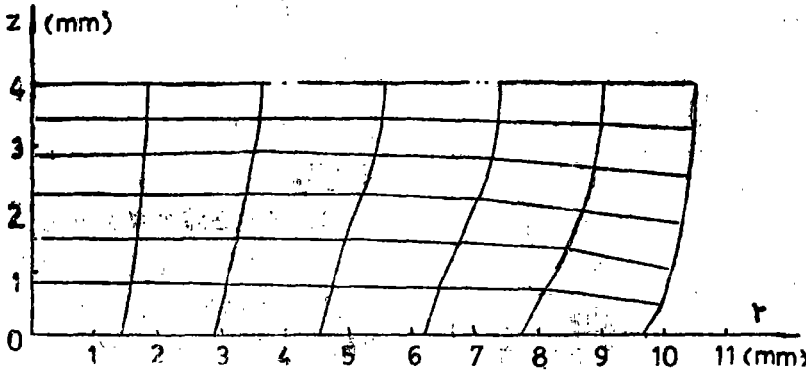


图5 硬铅试件的纵截面网格 (450°C, 0.0707mm/s, $\epsilon=0.693$)

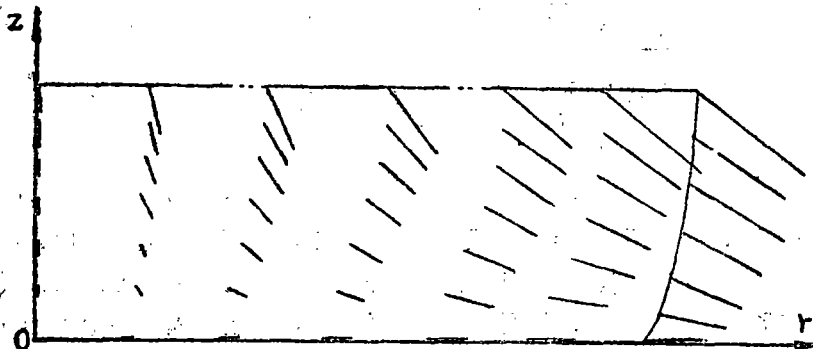


图6 硬铅试件的速度分布 (450°C, 0.0707mm/s, $\epsilon=0.693$)

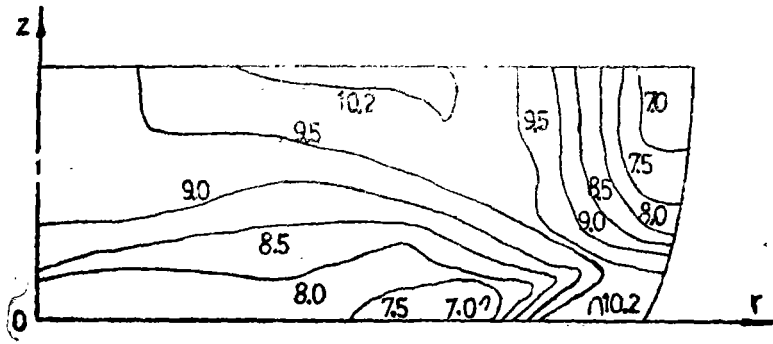
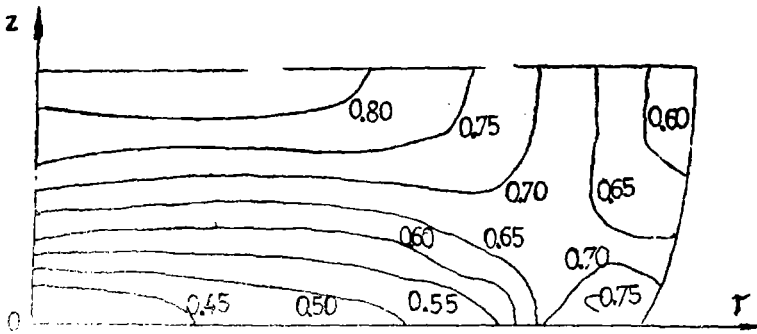
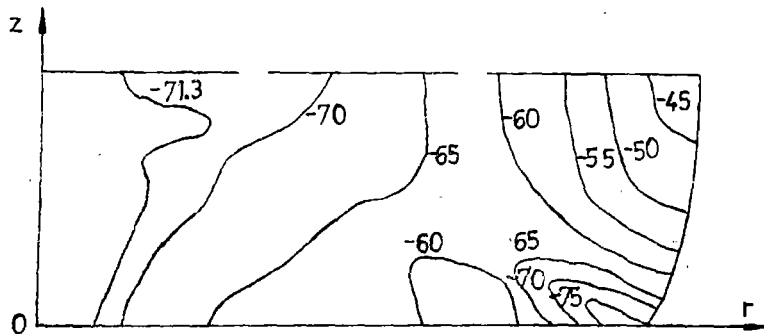
图 7 硬铝试件的等效应变率 $\dot{\epsilon}_e$ 分布 ($\times 10^{-3} \text{s}^{-1}$)图 8 硬铝试件的等效应变分布 (450°C , 0.0707mm/s , $\epsilon=0.693$)

图 9 硬铝试件的轴向应力分布 (MPa)

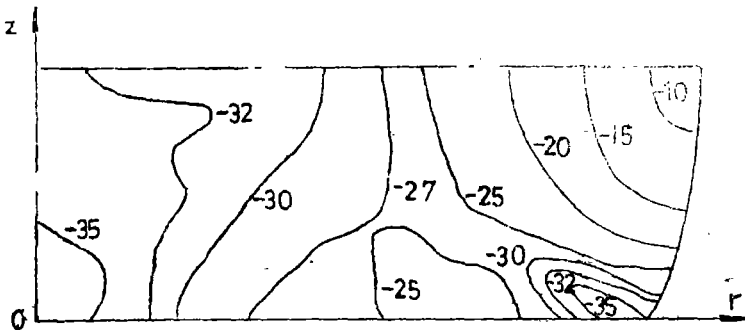


图 10 硬铝试件的平均应力分布 (MPa)

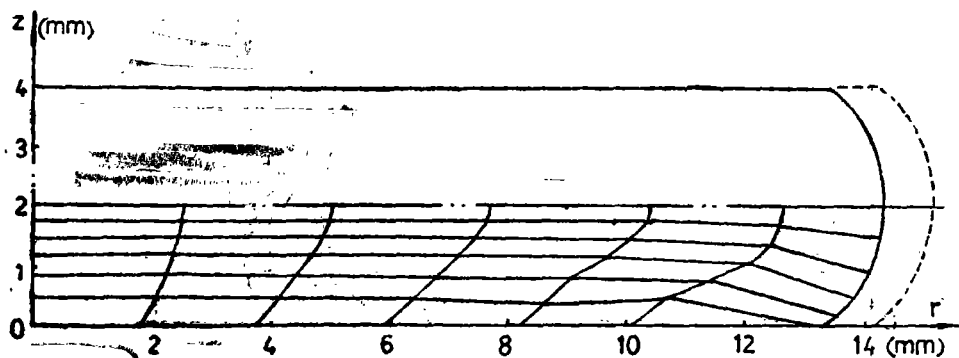


图11 压缩变形后的试件轮廓

二、上 限 法

1. 流动假设

在金属超塑性变形基本假设的基础上, 为了简化模型, 便于计算, 对在平板间压缩圆柱体坯料时, 金属的超塑性流动作如下几点假设。

1) 金属在上下刚性平板之间压缩时, 是轴对称地均匀流动, 变形后仍保持为圆柱体, 不产生鼓形。

2) 圆柱体坯料与平板接触的摩擦剪切应力 τ_k 为常数, $\tau_k = fk$ 。

3) 在沿金属流动方向的中性面高度上, 应力是均匀分布的, 且为主应力。

2. 求运动学许可的速度场

如图12, 刚性上模板以 V 速度压缩圆柱体坯料, 圆柱体的高度为 H , 半径为 R , 基本流动假设, 可把垂直向下的速度确定为由上表面的 V 逐渐减小到下表面的零, 即 $V_z = -(V/H)Z$, 且 $\gamma_{rz} = \gamma_{r\theta} = \gamma_{z\theta} = 0$ 。

由 $\dot{\epsilon}_z = \partial V_z / \partial Z = -V/H$, $\dot{\epsilon}_r = \partial V_r / \partial r$, $\dot{\epsilon}_\theta = V_r / r$ 代入体积不变条件 $\dot{\epsilon}_v = \dot{\epsilon}_z + \dot{\epsilon}_r + \dot{\epsilon}_\theta = 0$ 得 $drV_r = (V/H)rdr$ 。因为中心轴处径向速度为零, 即 $r=0$ 时, $V_r = 0$, $rV_r = 0$, 所以

$$\int_0^r rV_r dr = \int_0^r \frac{rV}{H} r dr, \text{ 解出}$$

$$V_r = (V/2H)r, \quad (7)$$

则

$$\dot{\epsilon}_r = \dot{\epsilon}_\theta = V/2H,$$

$$\dot{\epsilon} \sqrt{(2/3)\dot{\epsilon}_i \dot{\epsilon}_i} = \sqrt{(2/3)(\dot{\epsilon}_z^2 + \dot{\epsilon}_r^2 + \dot{\epsilon}_\theta^2)} = V/H. \quad (8)$$

$$\sigma = K\dot{\epsilon}^m = K(V/H)^m. \quad (9)$$

3. 求塑性变形功率

由于 σ 和 $\dot{\epsilon}$ 都是与坐标无关的量, 所以塑性变形功率 $\dot{W}_i = \iiint_V \sigma \dot{\epsilon} dV = \sigma \dot{\epsilon} V$, 将式(8)、

(9)及圆柱体体积 $V = \pi R^2 H$ 代入上式得

$$\dot{W}_i = \pi R^2 K (V/H)^m \cdot V.$$

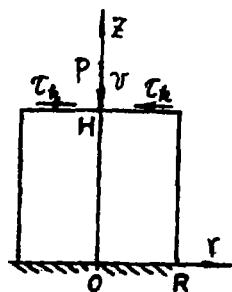


图12 圆柱体压缩

4. 求接触摩擦消耗的功率

由于 $\tau_k = fk = f(\sigma/\sqrt{3}) = fk(V/H)^m/\sqrt{3}$, 材料相对于模具的流动速度 $V_z = V_r = (V/2H)r$, 所以接触摩擦消耗的功率为

$$\dot{W}_\tau = 2 \iint_S \tau_k V_\tau ds = 2 \int_0^R \int_0^{2\pi} fk(V/H)^m/\sqrt{3} \cdot (V/2H)r \cdot r dr d\theta = (2\pi/3\sqrt{3})fR^3K(V/H)^{m+1}.$$

5. 求总变形力 (变形总压力)

根据上限定理得圆柱体超塑性压缩变形所需要的总功率为

$$\begin{aligned}\dot{W}_p &= \dot{W}_i + \dot{W}_\tau = \pi R^2 K(V/H)^m V + 2\pi/3\sqrt{3} f R^3 K(V/H)^{m+1} \\ &= \pi R^2 K(V/H)^m V [1 + (2/3\sqrt{3})f(R/H)].\end{aligned}$$

由于 $\dot{W}_p = PV$, P 为变形总压力, 所以

$$P = \pi R^2 K(V/H)^m [1 + (2/3\sqrt{3})f(R/H)], \quad (10)$$

平均压力

$$P_{ave} = P/\pi R^2 = K(V/H)^m [1 + (2/3\sqrt{3})f(R/H)]. \quad (11)$$

通过推导可知: 用主应力法和功的平衡法计算圆柱体超塑性压缩变形的变形力, 得到的计算公式与用上限法计算的式 (10) 相同。

三、滑移线法

圆柱体超塑性压缩变形属于轴对称变形, 其变形场可近似地用相应的平面变形场来描述, 其变形力可利用滑移线法近似求解, 这里先作些与上限法相同的基本假设及流动假设, 再按平面问题建立滑移线场进行计算。

由于结构和受力的对称性, 取圆柱体截面 $1/4$ 进行分析, 如图13所示。根据受力情况建立滑移线场。利用转轴公式

$$\left. \begin{aligned}\sigma_r &= \sigma - k \sin 2\theta, \\ \sigma_z &= \sigma + k \sin 2\theta, \\ \tau_{rz} &= k \cos 2\theta,\end{aligned} \right\} \quad (12)$$

其中, σ 是平均应力, θ 是沿 α 滑移线切线方向与 r 轴的夹角。

由于边界点 B 处 $\tau_{rzB} = -\tau_k = -fk$, 边界点 A 处 $\tau_{rzA} = 0$, 故 $k \cos 2\theta_B = -fk$, $k \cos 2\theta_A = 0$, $2\theta_B = -\pi + \arccos f$, $2\theta_A = -\pi/2$ 。

因边界点 A 处 $\sigma_{rA} = 0$, 所以 $\sigma_A - k \sin 2\theta_A = 0$, $\sigma_A = k \sin 2\theta_A = -k$ 。根据汉基积分公式

$$\sigma - 2k\theta = C_\alpha (\text{沿}\alpha\text{线}), \quad (13)$$

所以

$$\sigma_B - 2k\theta_B = \sigma_A - 2k\theta_A,$$

则

$$\sigma_B = \sigma_A - k(2\theta_A - 2\theta_B) = -k(\pi/2 + 1 - \arccos f),$$

因为

$$\begin{aligned}\sigma_{zB} &= \sigma_B + k \sin 2\theta_B = -k(\pi/2 + 1 - \arccos f + \sin \arccos f) \\ &= -k(\pi/2 + 1 - \arccos f + \sqrt{1-f^2}),\end{aligned}$$

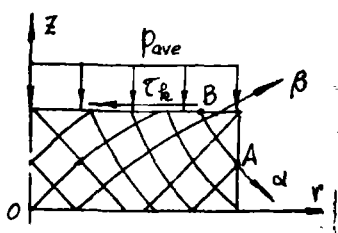


图13 压缩滑移线场

$$k = (1/\sqrt{3})K\dot{\epsilon}^m = (1/\sqrt{3})K(V/H)^m,$$

所以平均压力为

$$P_{ave} = -\sigma_{zB} = (1/\sqrt{3})K(V/H)^m [(\pi/2) + 1 + \sqrt{1-f^2} - \arccos f] . \quad (14)$$

总压力为

$$P = \pi R^2 p_{ave} = \pi R^2 K / \sqrt{3} (V/H)^m [(\pi/2) + 1 + \sqrt{1-f^2} - \arccos f] . \quad (15)$$

四、变 分 法

对于平板间的圆柱体超塑性压缩变形, 在接触表面上不存在接触摩擦时, 试件将呈现单向压缩应力状态, 产生均匀的压缩变形, 变形后仍保持圆柱体形状, 而当接触摩擦存在时, 试件呈现不均匀的三向应力状态, 产生不均匀的变形, 试件变成鼓形。

考虑到变形的不均匀性, 用下式来确定平均的切向接触摩擦力

$$\tau_k = \Psi k, \quad (16)$$

式中系数 Ψ 为考虑表面状态和变形区形状系数, 按塔尔诺夫斯基推荐的公式计算

$$\Psi = f + (R/8h)(1-f)\sqrt{f}, \quad (17)$$

其中, h 为试件高度 H 的一半, Ψ 不得大于1, 按上式确定的 Ψ 值在大于1时取为1。

基于变形前试件内的水平横截面和垂直圆柱截面变形后在子午面上具有抛物线形状的变形假设, 选取位移函数, 通过变分原理及能量守恒原理, 推导化简得平均变形压力

$$\begin{aligned} P_{ave} &= \sigma_s \left[1 + \frac{1}{3}B + \frac{\Psi}{\sqrt{3}} \frac{R}{h} \left(\frac{1}{3} - \frac{a_1}{\epsilon} - 0.3 \frac{a_2}{\epsilon} \right) \right] \\ &= K \left(\frac{V}{H} \right)^m \left[1 + \frac{1}{3}B + \frac{\Psi}{\sqrt{3}} \frac{R}{h} \left(\frac{1}{3} - \frac{a_1}{\epsilon} - 0.3 \frac{a_2}{\epsilon} \right) \right], \end{aligned} \quad (18)$$

式中

$$\begin{aligned} B &= (1.92 + 1.8 \frac{R^2}{h^2}) \left(\frac{a_1}{\epsilon} \right)^2 + (0.909 + 0.225 \frac{R^2}{h^2} + 0.111 \frac{h^2}{R^2}) \left(\frac{a_2}{\epsilon} \right)^2 \\ &\quad + (2.56 + 1.2 \frac{R^2}{h^2}) \left(\frac{a_1 a_2}{\epsilon} \right), \end{aligned} \quad (19)$$

$$\frac{a_1}{\epsilon} = \frac{1.732\Psi R/h - (2.56 + 1.2 R^2/h^2)a_2/\epsilon}{3.84 + 3.6 R^2/h^2}, \quad (20)$$

$$\frac{a_2}{\epsilon} = -\Psi \frac{R}{h} \frac{2.44 + 0.208 R^2/h^2}{1.23 + 2.12 R^2/h^2 + 0.18 R^4/h^4 + 0.853 h^2/R^2}. \quad (21)$$

当比值 $R/h < 12$ 时, 平均变形压力用简单关系式计算为

$$P_{ave} = \sigma_s (1 + 0.09 R/h \sqrt{fR/h}) = K(V/H)^m (1 + 0.09 R/h \sqrt{fR/h}), \quad (22)$$

总的变形压力为

$$P = \pi R^2 P_{ave}. \quad (23)$$

五、各种计算方法的计算结果与比较

对于在450℃下以0.0707mm/s速度压缩的 $\phi 14.8 \times 16$ 的硬铝试件, 取材料常数 $K = 17$, 硬化系数 $b = 9$, 硬化指数 $a = 1$, 应变速度敏感性指数 $m = 0.23$, 摩擦系数 $f = 0.2$, 代入各种

计算方法进行计算，得流动应力随变形量的变化如表 1，绘制成应力 - 变形程度关系曲线如图 14 所示。由图上看 出变分法和有限元法的计算结果与实验结果很接近，上限法次之，滑移线法计算结果与实验结果偏差最大。

表 1 $T=450^{\circ}\text{C}$, $V=0.0707\text{mm/s}$ 下硬铝试件在变形过程中的流动应力 σ (MPa)

变形量 ϵ	有限元法	上限法	滑移线法	变分法	实验结果	变形量 ϵ	有限元法	上限法	滑移线法	变分法	实验结果
0	51	50.6	61.5	50.6	0	0.575	61.5	78.9	91.6	63.0	59.9
0.065	51.9	53.3	64.6	51.6	26.7	0.693	64.3	86.2	98.6	67.1	63.9
0.134	53.0	56.3	67.9	52.8	59.7	0.827	68.2	95.4	107.0	72.7	71.3
0.208	54.2	59.6	71.6	54.2	57.5	0.981	74.7	107.4	117.1	81.1	82.3
0.288	55.6	63.4	75.7	55.8	56.2	1.163	89.0	124.2	129.9	95.1	97.4
0.375	57.3	67.8	80.4	57.7	55.7	1.386	144.8	149.7	146.7	121.6	118.4
0.470	59.2	72.9	85.6	60.0	57.3						

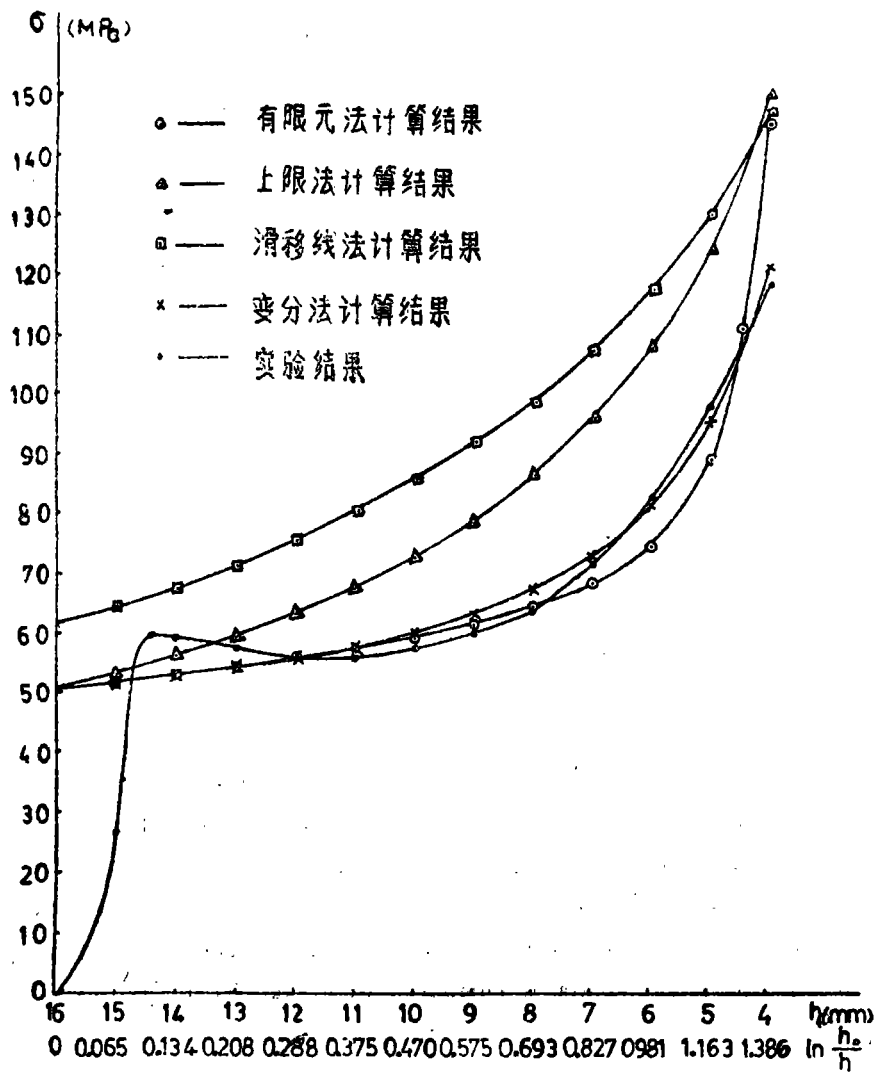


图 14 各种算法得到的应力-变形程度关系曲线与实验结果的比较

六、结 论

1. 超塑性压缩变形的有限元算法, 能很好地模拟超塑性压缩变形过程, 从图形上直观地描述了金属流动趋势, 清楚地指明了压缩过程中试件上各点的速度分布、应变率分布、应变分布、应力分布等有关的变形力学方面的信息, 为其它压缩类零件的超塑性变形模拟计算提供了参考依据。

2. 在进行圆柱体超塑性压缩变形流动应力计算的各种方法中, 变分法和有限元法的计算结果很接近于实验数据, 上限法偏差较大, 滑移线法偏差最大。

在用有限元法分析和计算中, 得到李国基教授的大力协助, 特此致谢。

参 考 文 献

- 〔1〕 Cheung, Y.K. and Yeo, M.F., Pitman Publishing Limited, (1979).
- 〔2〕 肖景容等, 刚塑性广义变分原理的新形式及应用, 华中工学院学报, 6 (1984).
- 〔3〕 黄岩等, 用粘塑性变分原理计算铝合金超塑性等温模锻力, 东北工学院学报, 2 (1987).
- 〔4〕 黄钢成等, 圆环压缩的刚塑性有限元分析与应用, 南京航空学院学报, 1 (1986).
- 〔5〕 张程勇, 超塑性状态下压缩金属圆柱体坯料变形力的计算, 热加工工艺, 3 (1985).
- 〔6〕 林治平, 锻压变形力的工程计算, 机械工业出版社, (1986).
- 〔7〕 斯德洛日夫, M.B.等, 金属压力加工原理, 机械工业出版社, (1980).
- 〔8〕 曹鸿德主编, 塑性变形力学基础与轧制原理, 机械工业出版社, (1981).

Theoretical Calculation of Superplastic Compression Deformation and Comparison of Various Methods

Yao Zubin Gao Zengfa

Abstract

This paper discusses in detail the viscoplastic finite element method for calculating superplastic compression deformation and gives a simulative calculation on aluminium alloy. A series of information in relation to deformation flowage, including the distribution in velocity, strain rate, strain, and stress, are obtained. Various methods for calculating flow stress of superplastic compression of a cylinder are compared. The results from finite element method and variational method are much more close to experimental data as compared with that from upper bound method and slip-line field method.

Key words superplastic, compressive deformation, theoretical calculation