

叶片精锻过程刚粘塑性有限元模拟

连建民 李训悌 李成功

一、前言

生产叶片通常采用精锻工艺,以便提高质量和降低成本。高的尺寸精度和组织性能的要求,使工艺和模具设计复杂化。了解成形过程中的金属流动、应力应变和载荷分布规律,才便于综合考虑各工艺参数的影响;特别是预锻件的大小和形状以及它在终锻模上的初始位置,对终锻件成形影响很大。人们曾用主应力法、滑移线法和刚塑性有限元法对这个问题进行了研究。本文介绍用刚粘塑性有限元法模拟叶身的成形过程。

二、刚粘塑性有限元法

基本原理

刚粘塑性有限元法是刚塑性有限元法^[1]的推广,它考虑了材料的应变速率敏感性,因而更适用于钛合金的变形行为。

考虑刚粘塑性体 Ω 在变形的任一瞬间,其形状、温度、不均匀状况和材料参数的瞬时值均为已知或为确定值。现给 Ω 的部分表面 Γ_v 上规定速度矢量 V_i ,部分表面 Γ_f 上规定表面力矢量 P_i , Γ_f 为摩擦面,且摩擦力为界面相对速度 V_R 的函数。可以证明下述刚粘塑性体广义变分原理^[2]:在一切动可容速度场中真实速度场使泛函

$$\phi = \int_{\Omega} E(\dot{\epsilon}) d\Omega + \int_{\Omega} \frac{1}{2} K \dot{\epsilon}^2 d\Omega - \int_{\Gamma_f} \left\{ \int_{\Gamma_f}^{V_R} f \cdot dV_R \right\} d\Gamma - \int_{\Gamma_f} P_i V_i d\Gamma \quad (1)$$

取驻值,即变分 $\delta\phi=0$ 。其中 $E(\dot{\epsilon}) = \int_{\Omega} \sigma d\dot{\epsilon}$ 为功函数,不难证明它的存在而且是唯一的, K

为罚常数。

按有限单元法通常的离散化过程,将 Ω 划分为 N 个节点相连成的 M 个单元,并在每个单元上引用插值函数 N_i ,若用8节点四边形单元则为:

$$u = \sum_{i=1}^8 N_i u_i \quad (2)$$

使变形体 Ω 内在任一点的速度 V 由所在单元节点速度 V_i 表示之,泛函(1)可用各单元上的值表示:

$$\phi = \sum_{m=1}^M \varphi^m(V_1, V_2, \dots, V_{N \times P})$$

泛函 ϕ 的变分问题($\delta\phi=0$)转化为求解一非线性方程组问题:

$$\sum_{m=1}^M \frac{\partial \varphi^m}{\partial V_i} = 0 \quad i=1, 2, \dots, N \times P \quad (3)$$

按Newton-Raphson方法,假定一个接近于真解的 $V^{(k)}$,用泰勒公式展开(3):

$$\sum_{m=1}^M \left(\left[\frac{\partial \varphi^m}{\partial V_i} \right]_{V=V^{(k)}} + \left[\frac{\partial^2 \varphi^m}{\partial V_i \partial V_j} \right]_{V=V^{(k)}} \Delta V_j \right) = 0 \quad (4)$$

从而得到一组关于节点速度摄动量 ΔV_i 为未知量的线性方程组,求和号表示由 M 个单元集成。通过迭代,并利用 $V_i^{(k+1)} = V_i^{(k)} + \beta \Delta V_i^{(k+1)}$ 修正速度场 V_i ,最后使 $\Delta V_i \rightarrow 0$ 的速度场作为变形体当前的近似速度场。

三、叶片成形过程有限元

分析的实施

叶片成形过程包含任意的曲边外形、未知的速度中性点和摩擦接触面大等特点。整个过

程变形量大而且不均匀,存在大块刚性区域都给问题的分析带来复杂性。适当的处理方式,对保证求解的收敛性和稳定性以及减少计算量都是极为重要的。取某叶片的C—C截面作为计算的典型截面,叶身截面的成形过程按平面应变问题处理。

采用八节点等参单元,并用三次样条函数拟合型面的离散型值点,为界面质点流动提供约束的依据。在边界摩擦面上,应变的任一瞬间某边界单元与模面的接触情况如图1所示,单

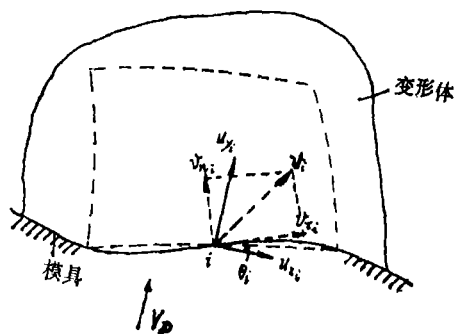


图1 边界接触单元示意图

元的边界和模面不会完全重合,相对运动速度总是沿着模面的切向,法向相对速度为零。与此对应,摩擦力也总是切向的。在边界上引入曲线坐标系 τ - n ,规定逆时针旋转方向为正,任意节点处, X 轴与曲边界切线的正向夹角 θ_i ,沿模面切向速度 $V_{\tau i}$ 和法向速度 V_{ni} ,显然:

$$\begin{Bmatrix} V_{xi} \\ V_{yi} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i \\ \sin\theta_i & \cos\theta_i \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} V_{\tau i} \\ V_{ni} \end{Bmatrix} \quad (5)$$

此变换可以扩充到单元各个边界接触节点,同样适用于所有边界单元。

由于上述变换不改变总刚度矩阵的对称正定性,却使边界条件明显化,即已知边界节点 $\Delta V_{ni} = 0$,采用一维变带宽存储总刚度矩阵,并用改进平方根法求解,总刚度矩阵中对应 ΔV_{ni} 的行和列可以不参加运算,便可以不予存储,因而大大地节省内存和计算时间。

处理边界摩擦条件,引用下式^[3]:

$$f = -mk \frac{V_R}{|V_R|} \approx -\frac{2}{\pi} m k \tan^{-1} \frac{V_R}{a|V_D|} \quad (6)$$

式中 m 为摩擦因子, V_D 为模具运动速度, a 为较 V_D 小几个数量级的正常数,可见在离开速度点处 $|V_R| \gg a|V_D|$, f 近似符合常剪切应力规律,在中性点附近 f 平滑地通过零点,并改变其方向。对于边界上任意质点的相对速度 V_R ,可以通过该单元接触节点相对速度 V_{Ri} 的插值得到:

$$V_R = \sum H_i V_{Ri} = \sum H_i (V \tau_i - V_D \cdot \tau_i) \quad (7)$$

其中 τ_i 为单位切矢量,对于八节点单元 H_i 为二次插值函数。

形成总刚度矩阵过程中,考虑到解的精度和收敛性,对各单元计算(1)中各项采用不同点数的高斯积分:对变形能用 3×3 高斯积分,罚函数项用 2×2 高斯积分,摩擦项用 5 点高斯积分。与此对应计算结果在简化积分点上给出。初始速度场的求解采用材料线粘性假设:

$$\sigma'_{ij} = 2\mu \dot{\epsilon}_{ij}$$

μ 为粘性系数,刚粘塑性材料的解与具有粘性系数 $\mu = \mu(\dot{\epsilon}) \frac{\sigma}{\dot{\epsilon}}$ 的假想线粘性材料的解是一致的。可以通过对粘性系数 $\mu(\dot{\epsilon})$ 进行迭代求得。已经探明这种方法在迭代初期较 Newton-Raphson 法快,且对初始粘性分布 $\mu(\dot{\epsilon})$ 不太敏感,本文先用线粘性假设求解出较好的初速度场,再用 Newton-Raphson 法求得真实解。以后变形步只利用前步迭代结果。但对有些变形过程中局部速度有突变,列如进气边附近有新的接触点产生导致迭代不收敛时,利用这种联合处理方式也是有效的。

刚性区内应力不唯一性和因之不能确定泛函最小值问题都作了数值处理:假设等效应变率有一个转折点 $\dot{\epsilon}$,它比平均应变率小几个数量级,在这个应变速率下,认为材料是线粘性的^[1]。计算变形过程是一步步进行的,选用步长为上下模中心线处瞬时高度的2%,若在此变形步长下有某节点越出模腔外,便适当地减小步长。每一变形步长中材料硬化参数视为准常数。

四、计算实例和结果分析

用与钛合金有类似性质（应变速率敏感）的纯铅作为试验材料，材料的 $\sigma-\dot{\epsilon}$ 关系取自文献〔5〕，中间变形量的取值采用线性插值。无润滑剂时取 $m=0.47$ ，20号机油作润滑剂取 $m=0.17$ ，计算时上模压下速度为20mm/s。计算在UNIVAC1100型计算机上进行，各单元网格变形图通过计算机实时绘出，取 $\|\Delta V\|/\|V\| < 10^{-5}$ 作为收敛判据，计算和作图约占CPU30分钟。

图2给出两种摩擦条件下C—C截面的成

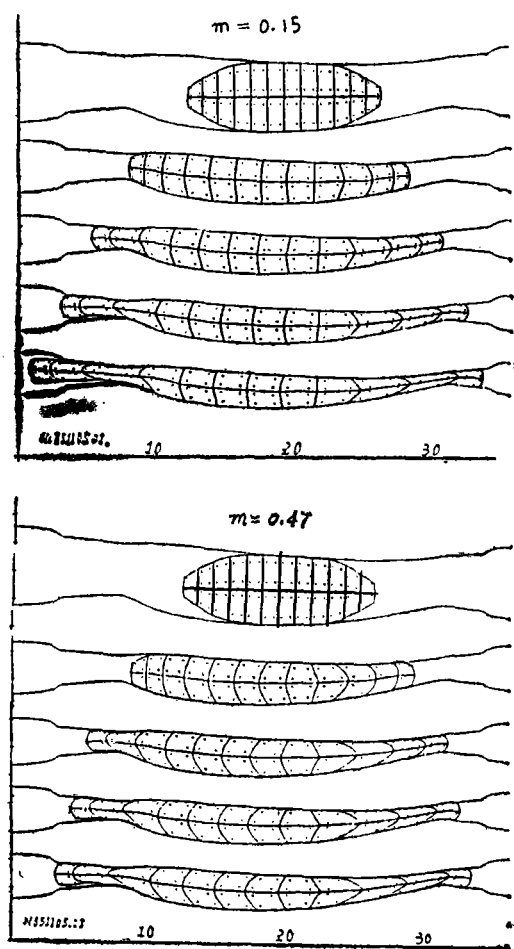


图2 不同摩擦条件下单元网格变形图
形过程计算机绘出的图形。图3示出 $m=0.47$ 时几个位置的速度分布情况和速度中性点（用 ∇ 标记）的位置。在变形后期变形体两端的质

点速度高达240mm/s，为上模压下速度的十几倍，在这样大的速度下，进气边处质点脱离模面，丧失了毛边的阻碍作用，生产实践也证明存在这种问题。修改毛边形状，把下模的 5° 倾角改成水平的，金属便不脱离下模，情况如图4所示，进气边毛边阻力增大了。

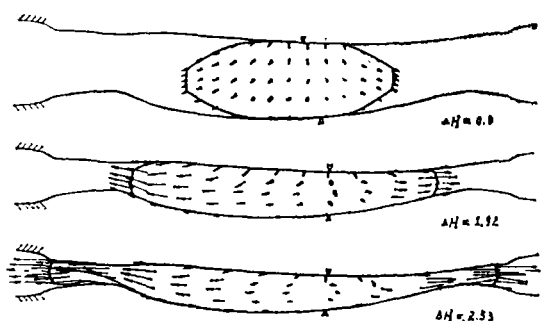


图3 成形过程质点流动速度分布图
($m=0.47$ $V_D=20\text{mm/s}$)

从图5和图6可以看出，摩擦对应变分布影响显著。为了获得变形较为均匀的组织，除设计合适的预坯形状外，改善润滑条件也是相当重要的。从图6可见到变形后期偏向排气边一侧存在等效应变梯度较大区域，形状呈倒Y形，它是剪切变形带，在变形温度等条件不恰当时，它会给组织和性能带来不利影响，钛合

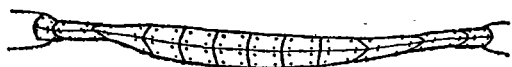


图4 修改毛边形状的网格变形图
($m=0.17$, $\Delta H=2.68$)

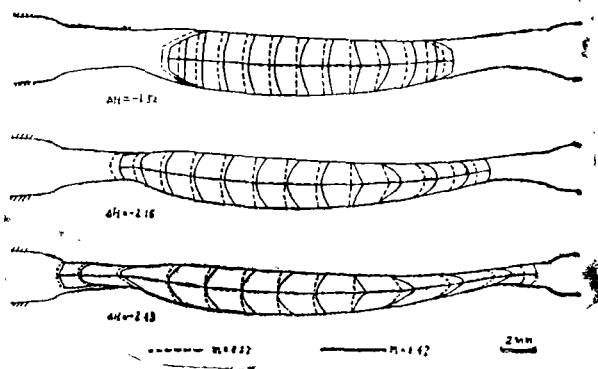


图5 两种摩擦条件下网格畸变情况比较

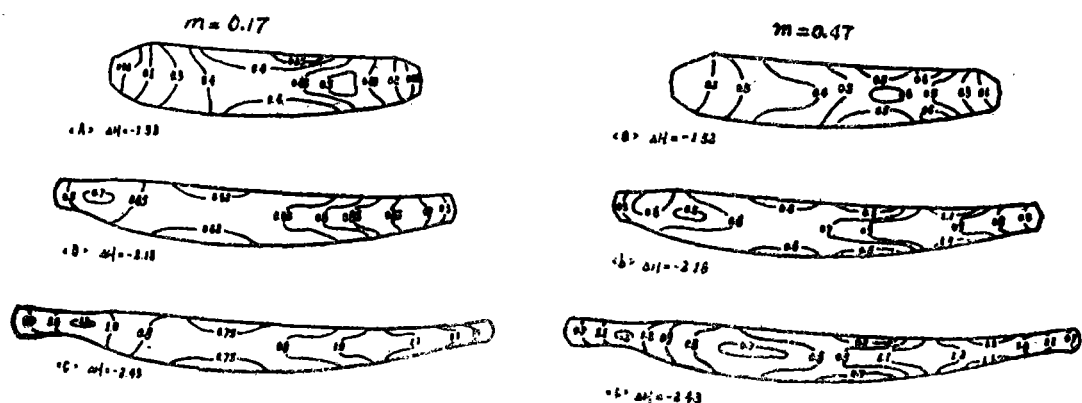


图 6 两种摩擦条件下等效应变分布比较

金对此更为敏感,已成为生产中的一种缺陷类型。为此,可以通过对不同预坯进行模拟,预测缺陷产生的可能性,选出最佳预坯外形进行设计的最优化。

将计算机绘出的网格图与实验的结果作了比较,可见两者基本吻合,由于实验误差或者上下模各部分润滑条件的不一致,两者之间最大偏差约0.5mm。

另外,还可以计算变形过程的力能参数,根据它选择设备和最佳模锻平面;进而分析模具弹性变形对产品尺寸精度的影响,研究模块内的应力分布和低周疲劳破坏的可能性。

上述模拟叶片截面成形过程的刚粘塑性有限元模型,试验证明具有很高的精度。对于大型叶片金属沿模面流动的距离长,相对来说接触时间也长,模具的激冷作用会显著起来,同时由于变形不均匀,变形热效应也不均匀,计算变形体内温度场是必要的,这将是下一步的工作内容。

五、结 论

1. 刚粘塑性有限元模拟叶片成型过程,能够逼真地描述整个变形体的质点流动,充满模腔和形成毛边的全过程,为锻件的预成形设计提供各种有用信息,计算与实验结果基本吻合。

2. 能够获得变形体内的质点分布、应变分

布、网格变形情况和各种工艺参数对变形行为的影响。从而对锻件成形的动态过程有较为直观的了解,便于确定最佳预锻件的形状和尺寸及其在终锻件上的位置。根据应变梯度判断变形不均匀程度,预测缺陷产生的可能性和位置,控制产品质量。

3. 借助刚粘塑性有限元法对叶身成形过程模拟,改进了新产品工艺设计过程,提高工艺设计可靠性,减少试制费用和缩短试制周期,节约原材料,因而具有重要的技术经济价值。

参考文献

- [1] S.I. Oh et al, Metal Forming Plasticity, IUTAM Symposium Tutzing Germany, 1978.
- [2] 连建民, 叶片精锻过程 刚粘塑性有限元模拟, 六二一所硕士学位论文, 1986.
- [3] C.C. Chen, S. Kobayashi, Numerical Methods of Forming Processes, ASME AMD Vol. 28, 1978, 163.
- [4] S.I. Oh, Int. J. Mech. Sci., Vol. 24, 1982.
- [5] S. Kobayashi, 有限元法 应用于 金属成型过程的模拟 (来华讲学稿), 清华大学 锻压教研组, 1982.

