

圆柱体扭压成形过程热力耦合的温度分析

章争荣 肖小亭 刘易凡 黄诗君

广东工业大学机械工程系,广州,510643

摘要 扭压成形工艺和一般镦粗相比有许多优点。考虑到成形过程中温度与变形之间的热力耦合效应,作者运用刚粘塑性有限元法模拟了高温下圆柱体的扭压成形过程,详细分析温度对整个过程的影响以及变形规律。

关键词 扭压成形;刚粘塑性;有限元方法;热力耦合

中图资料法分类号 TG 301

在金属塑性加工中,镦粗成形是一种最基本的锻造加工工艺,它主要用于材料的改性和工件的预成形。由于摩擦的存在阻碍金属的流动,严重影响了锻件的质量;高温下受到温度影响,将更为严重。扭压成形则能解决这由镦粗工艺本身带来的产品质量缺陷。扭压成形工艺是由前苏联学者提出的一种新型工艺^[1],它是在工件高度方向施加压力时,使模具相对工件产生扭转运动,将被动摩擦转化成为促进金属流动的主动摩擦,通过主动摩擦力给工件施加了扭矩的作用,迫使工件产生了高度方向的压缩变形和横截面上的剪切变形^[2,3]。

在高温下进行塑性变形,温度和变形速度将对整个变形过程产生很大的影响。综合考虑温度、变形及其与整个成形过程的关系,运用热力耦合来分析高温下的塑性变形过程将有着重要的理论意义与实际价值^[4]。本文作者将考虑到温度与变形的关系,运用三维热刚粘塑性有限元法对扭压成形过程进行详细的分析。

1 有限元分析的基本原理

金属塑性成形过程中,当温度和应变速率对材料屈服流动应力产生明显的影响时、或高温下的塑性变形,应力与应变关系必须采用粘塑性本构模型。本文有关的粘塑性本构关系采用Rosserd 模型,同时考虑温度的效果^[5]。该模型假设等效应力,即流动应力,只与等效应变、等效应变速率和依赖于温度的初始屈服应力有关,是一种温度、应变、应变速率的等向强化的模型。可用如下公式表达

$$\sigma_s = Y(T)(\bar{\epsilon})^m(\dot{\bar{\epsilon}})^n, \quad (1)$$

式中 σ_s 是等效应力或流动应力; $Y(T)$ 是与温度有关的初始屈服应力; T 表示温度; $\bar{\epsilon}$ 、 $\dot{\bar{\epsilon}}$ 分别为等效应变,等效应变速率; m 、 n 为材料常数。

运用有限元分析塑性变形过程,对变形体进行有限单元划分,由下列能量泛函式求相对于容许速度场的极值则能得到各节点的真实变形速度,进而可求得变形过程中任意时刻的各力学场变量分布。

$$\pi = \int_v E(\mathbf{s}) dV - \int_s \vec{F} \cdot \vec{v} d\Gamma + \int_s \tau_t |\Delta v| d\Gamma - \int_s \tau_t |v_D| d\Gamma, \quad (2)$$

式中 π 表示能量泛函; $E(\mathbf{s})$ 是塑性功函数, $E(\mathbf{s}) = \int_0^{\mathbf{s}} \sigma_s d\mathbf{s}$; \vec{F} 为已知边界外力; \vec{v} 为已知边界速度; τ_t 是摩擦剪应力; Δv 表示工具与工件之间的相对速度; v_D 表示工具的扭转速度; S 为边界面面积; V 为变形体的体积.

式(2)中, 第1项表示塑性变形消耗的功; 第2项表示轴向压力所做的功; 第3项表示摩擦消耗的功; 第4项表示主动摩擦提供的功, 在一般的镦粗中, 不存在主动摩擦, 摩擦只消耗功率, 不对变形体提供功率, 所以这一项为零.

在热力耦合分析变形过程时, 因塑性变形功、摩擦、工件形状等随时改变, 引起温度场的几何构形、内热源、边界条件也同时变化; 故塑性变形时的温度场非常复杂. 在数值分析中, 温度场的求解可表示为一种求解温度泛函的极值问题^[6]. 温度泛函为

$$\pi(T) = \int_v \left[\nabla^T (K \nabla T) + \Phi C_p \frac{\partial T}{\partial t} \right] dV + \int_{S_1} h \left(\frac{T}{2} - T_0 \right) T d\Gamma + \int_{S_2} q_s T d\Gamma, \quad (3)$$

式中 π 表示温度泛函; ∇ 为梯度算子, $\nabla = \{\partial/\partial x + \partial/\partial y + \partial/\partial z\}^T$; K , C_p , ρ 分别表示材料的导热系数, 比热容, 密度; 对工具与工件可各不相同; T 是物体内 t 时刻的温度分布函数; q_v 为内热源密度; h 换热系数; T_0 已知边界温度; q_s 边界已知热流; V 所分析系统的体积; S_1, S_2 分别表示对流和已知热流的温度边界面面积.

等式右边第1项表示热传导, 第2项为对换热边界条件, 第3项为已知热流边界条件.

式(3)中内热源由塑性变形功转化而来, 一般可用如下公式计算

$$q_v = \beta E(\mathbf{s}_j), \quad (4)$$

式中 β 是变形功与热能之间的转化系数, 一般取值为 $\beta=0.9\sim0.95$.

外界热流由摩擦消耗的功转化, 假定摩擦消耗功全部转化为热量. 即

$$q_s = \int_{S_2} \tau_t |\Delta v| d\Gamma, \quad (5)$$

热量分成两部分分别流入工件和模具.

由已知的初始温度, 通过对温度泛函式(3)求相对于温度的极值解, 可求出任意时刻的温度分布.

2 热力耦合有限元模拟的技术处理

运用塑性有限元分析圆柱体的扭压变形时, 尽管变形体内应力、应变及位移等的数值大小沿切向不发生变化, 但仍然存在着切向的位移和与切向有关的应变 $\epsilon_\theta, \gamma_{r\theta}, \gamma_{z\theta}$, 故是一个三维问题. 对于温度场的求解, 可只取靠近工件的部分区域, 视工件与模具为一整体进行分析. 变形过程中, 工件始终保持轴对称, 且塑性变形功产生的内热源及摩擦产生的热流都与 θ 无关; 所以温度场的计算实际上是一个二维的轴对称问题. 根据对称性, 可只选取工件的一半和上模进行分析.

为了对扭压复合加载及一般镦粗的变形过程进行分析, 作者自编了有效的刚粘塑性热力耦合有限元模拟程序, 程序采用准耦合解法.

3 模拟结果分析

在有限分析中,取工件和模具的热传导系统 $K=30.1 \times 10^{-3} \text{ W}/(\text{mm} \cdot \text{K})$,比热容 $C_p=883 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$,密度 $\rho=7.85 \times 10^{-3} \text{ kg}/\text{mm}^3$,对流换热系数 $h=6.0 \times 10^{-6} \text{ W}/(\text{mm}^2 \cdot \text{K})$,工具与模具间接触换热系数 $h_c=7.5 \times 10^{-3} \text{ W}/(\text{mm}^2 \cdot \text{K})$,Stefan-Boltzmann 常数 $\sigma=5.67 \times 10^{-14} \text{ W}/(\text{mm}^2 \cdot \text{K}^4)$,表面发射率 $\epsilon=0.75$,工件初始温度 $T_b=1498 \text{ K}$,工件的尺寸为 $\varnothing 60 \times 30 \text{ mm}$,上模尺寸为 $\varnothing 160 \times 50 \text{ mm}$,本构关系为 $\sigma_s=4.059 \cdot \exp(4603.9/T)(\dot{\epsilon})^{0.1342}(\dot{\sigma})^{0.1093}$.

图 1 是经扭压变形后,变形体的网格和场变量的分布图. 图 2 是镦粗后变形体的部分场变量分布图. 扭压变形后变形体网格发生了扭曲,原轴截面没有保持平面,轴向和径向的变化都是非线性的. 在相应于镦粗时的小变形区和困难变形区,扭压变形时的等效应变有明显的增大,变形的均匀性有较大的改善. 变形体中心位置的温度较高;这是因为中心部位塑性变形大,产生的热量多,且离模具远,热量传导较少所致. 温度的径向变化梯度中心区域较端部大;说明靠近接触面的外圆部位的塑性变形较大,又受到了摩擦生热的较大影响. 等效应力分布较镦粗时均匀,这是受到温度和剪切变形的共同影响的结果. 因为应变速率比镦粗时高,应变速率敏感系数大,等效应力整体比镦粗时提高.

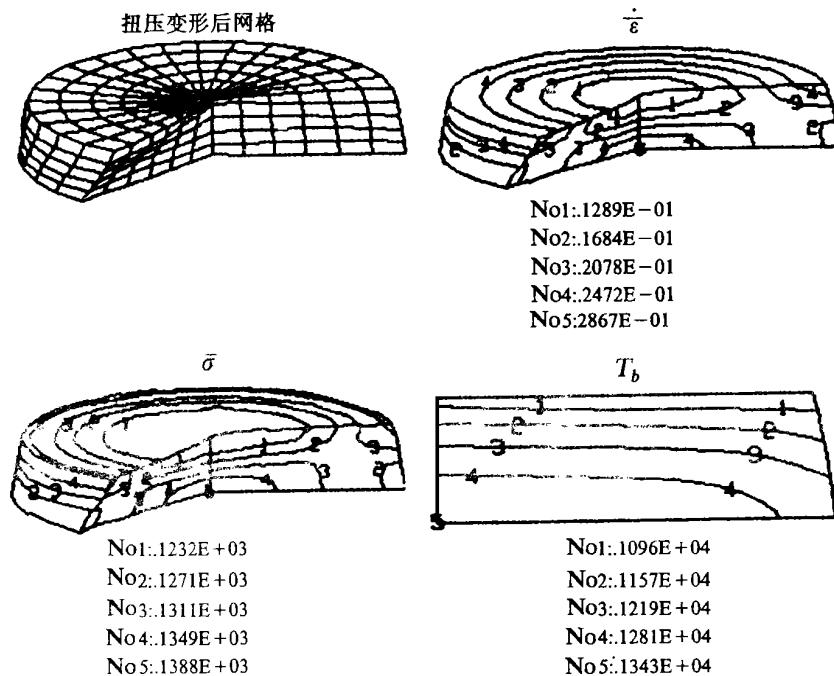


图 1 扭压成形时变形体内部分场变量分布等值线图

$$\mu=0.2, \Delta_h=10 \text{ mm}, \omega=15^\circ, t=8 \text{ s}, T_d=698 \text{ K}$$

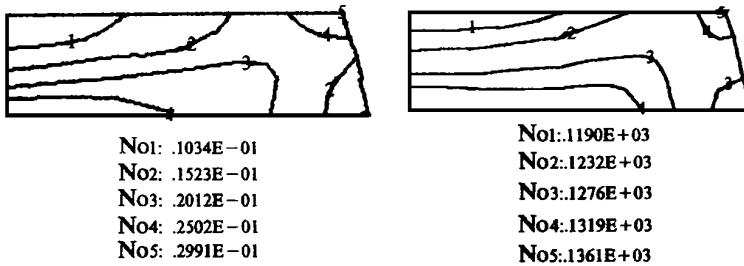


图 2 锻粗时变形体内部分场变量分布的等值线图

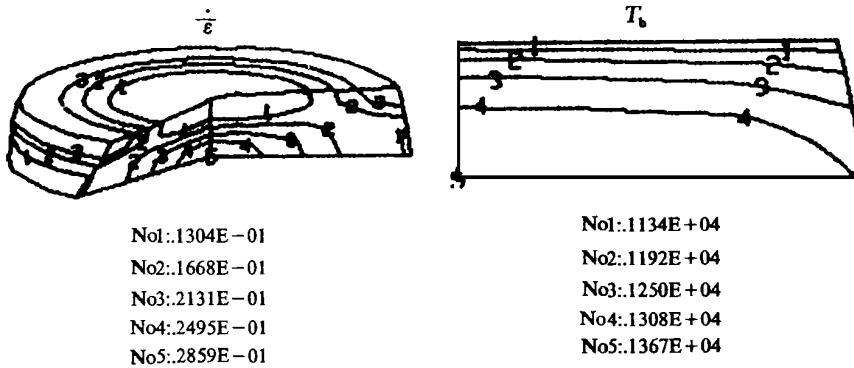
 $\mu=0.2, \Delta_h=10\text{mm}, \omega=15^\circ, t=8\text{s}, T_d=698\text{K}$ 

图 3 扭压成形时变形体内部分场变量分布的等值线图

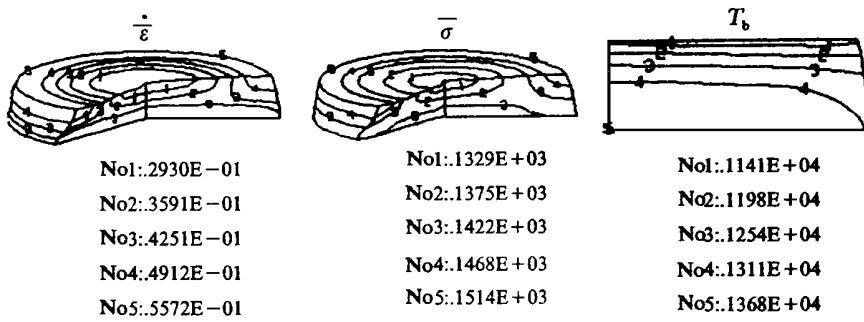
 $\mu=0.2, \Delta_h=5\text{mm}, \omega=7.5^\circ, t=4\text{s}, T_d=698\text{K}$ 

图 4 扭压成形时变形体内部分场变量分布等值线图

 $\mu=0.5, \Delta_h=10\text{mm}, \omega=30^\circ, t=4\text{s}, T_d=698\text{K}$

图 3 是成形过程中间时刻的应变速率和温度分布图,与图 1 相比应变速率分布有一定的差别。说明塑性变形过程是非线性的。随着变形过程的发展,工件高度降低,轴向压力增大,主动摩擦作用加强,剪切变形更加明显,等效应变速率等的分布更均匀。图 3 中温度的轴向变化梯度较大,这是因为时间短,中间区域的热量传输较少,只是接触区域有着较大的变化。

图 4 和图 5 是变形体不同变形条件下的部分场变量的等值线分布图。图 4 中变形速度、扭转角速度和摩擦系数加大,增强了剪切的作用,因此应力与应变更趋均匀。因受到摩擦和塑性变形功增大而产生热量多的影响,温度较图 3 中有所增高,尤以靠近接触面的外圆角区域特别

明显。图 5 中模具温度降低,使工件内热量传递加快,温度轴向变化梯度增大。接触面区域温度较低,该区域的变形减少,中间区域变形增大,温度引起等效应力略有增加,分布也不如图 1 均匀。这体现了模具温度对变形过程的影响。

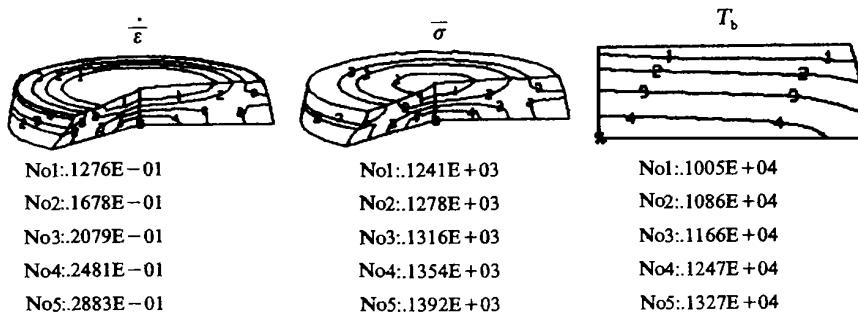


图 5 扭压成形时变形体内部分场变量分布等值线图

$\mu=0.5, \Delta_h=10\text{mm}, \omega=15^\circ, t=8\text{s}, T_d=298\text{K}$

5 结论

模拟的结果表明:扭压成形增加变形量,使变形均匀。变形过程中,温度和应变速率对整个变形都有影响。大的应变速率提高了变形的屈服应力,增大塑性变形功率,从而使变形体的温度升高,又影响变形体的进一步的变形。摩擦生热和变形体与模具及外界环境的热交换也影响着变形体的温度,同时也影响着整个变形过程。故分析塑性变形过程时,综合考虑温度和应变速率的影响,才能更实际地模拟变形过程。所以,运用刚粘塑性有限元方法模拟扭压形成过程,能更合理地反映剪切应力对变形的作用,有助于深入了解扭压变形的本质。

参 考 文 献

- Субич В Н. Пластническое течение материала в тонком спое при комбинированном нагружении кузнечно-штамповочное производство. 1986, 10, 5~9
- Xue, K M Y. Lv, Numerical Simulation and Experimental Research into the Process of Twisting—compress Forming. In: Wang, Z R, He Yuxin. Proc. 4th. ICTP Conf., Beijing: International Academic Publishers, 1993. 1065~1070
- 薛克敏, 吕炎. 扭压复合加载变形过程的理论分析. 机械工程学报, 1996, 32(1): 74~78
- 胡忠. 塑性有限元模拟技术的最新进展. 塑性工程学报, 1994, 1(3): 3~13
- Altan T, Oh S I, Gegel H L. Metal Forming. Fundamentals and Applications, ASM. 1983, 23~29
- 刘高琪. 温度场的数值模拟. 重庆:重庆大学出版社, 1990. 70~105

Coupled Thermo—mechanical FEM Analysis of Twist—compression Deformation Process

Zhang Zhengrong Xiao Xiaoting Liu Yifan Huang Shijun
Dept. of Mechanical Engineering, GDUT, Guangzhou, 510643

Abstract Twist—compression deformation, compared with upsetting, has many advantages. As the coupled thermo—mechanical effects between the temperature and mechanical properties are taken into account, 3D thermo—rigid—viscoplastic FEM of compressible materials is employed to simulate the deformation process during metal twist—compression forming of cylinder at high temperature. The affection of temperture on the whole process and some laws of deformation are analyzed in detail.

Key words twist—compression; thermo—mechanical; rigid—viscoplastic; FEM

专著简介

《新型驱动器及其应用》简介

由我校电气工程及自动化系博士生导师、杨宜民教授编著的《新型驱动器及其应用》一书于1998年2月由机械工业出版社出版。

本书作者近十年来一直从事“新型驱动器和微型机器人”方面的研究。期间曾到日本筑波大学、东京大学从事合作研究，在国内承担并完成国家863高科技计划、国家自然科学基金、广东省“八五”机电一体化重点攻关、广东省自然科学基金等多项科研课题，取得了二坐标微驱动器等项科研成果，这些成果为本书增色不少。1995年第二次回国后，对1992年拟写的本书初稿作了修改和补充，所以本书具有新颖性、实用性，且内容丰富，对读者会有一定的启发和帮助。

本书共分19章，介绍了新型交流电动机、新型直流电动机、直接驱动电动机、直线电动机、专用小功率电动机、步进电动机、磁致伸缩驱动器、压电驱动器、仿生型步进式驱动器、超声波驱动器、MH驱动器、SMA驱动器、超导驱动器、橡胶驱动器、静电驱动器、高分子凝胶驱动器、光驱动器、二自由度驱动器等18种新型驱动器，对它们的结构、工作原理、控制和应用等作了较详细的说明。书末有附录，为读者设计新型驱动器的控制电路提供了方便。

本书可作为高等院校机、电类专业的学生、研究生的教材或参考书，也可供机、电类老师、研究人员、工程技术人员等参考。

(编辑部)