

[文章编号] 1004- 0609(2001)S1- 0048- 04

连续挤压成形过程的计算机仿真^①

储灿东, 彭颖红, 阮雪榆

(上海交通大学 国家模具 CAD 工程研究中心, 上海 200030)

[摘 要] 在分析连续挤压技术特点的基础上, 采用刚粘塑性有限元模型, 建立了连续挤压的计算机仿真模型, 包括几何模型、材料模型、塑性力学模型、摩擦力学模型和热力耦合模型; 组建了一个有关连续挤压的计算机仿真系统, 对连续挤压的成形过程进行了计算机仿真, 得出了有关连续挤压全过程的应力场、应变场和温度场。

[关键词] 连续挤压; 模拟; 计算机仿真

[中图分类号] TG 371

[文献标识码] A

连续挤压技术^[1]是一种新型的塑性加工工艺, 其工作原理如图 1 所示。利用一个带有轮槽的连续旋转的挤压轮, 通过轮槽与坯料之间的摩擦力, 将坯料连续不断的曳入挤压模腔, 并在模腔内发生塑性变形, 最后从挤压模孔挤出连续的挤压产品。

计算机仿真。

1 仿真模型的建立

1.1 几何模型

将变形的铝合金视为刚粘塑性体, 根据连续挤压原理, 建立如图 2 所示的有限元分析几何模型和网格划分。

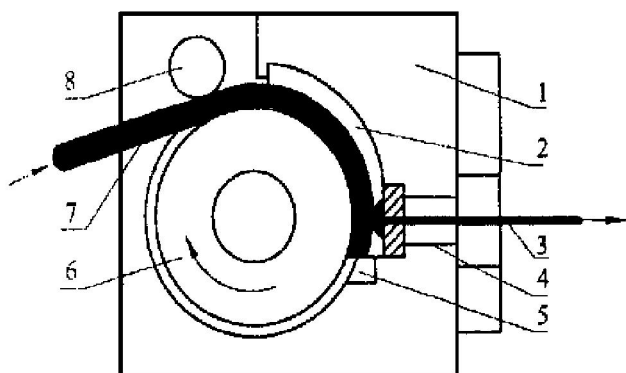


图 1 连续挤压原理图

Fig. 1 Schematic view of ConformTM process

- 1—Shoe; 2—Press block; 3—Product;
4—Die; 5—Abutment; 6—Extrusion wheel;
7—Rod feed; 8—Press wheel

连续挤压过程同传统的挤压过程相比, 有 2 个突出的特点: 坯料和挤压筒之间的摩擦力由阻力变为动力; 坯料无需加热, 利用坯料和挤压筒之间的摩擦热以及变形热, 使坯料的温度从入口处的 20℃上升到出口处的 400~ 500℃, 对于某些合金, 温度高达 600℃以上。由于连续挤压过程变形的特殊性, 其金属的变形行为以及塑性变形力学方面的研究还处在初级阶段。本文建立了连续挤压成形过程的计算机仿真模型并对连续挤压成形过程进行了计

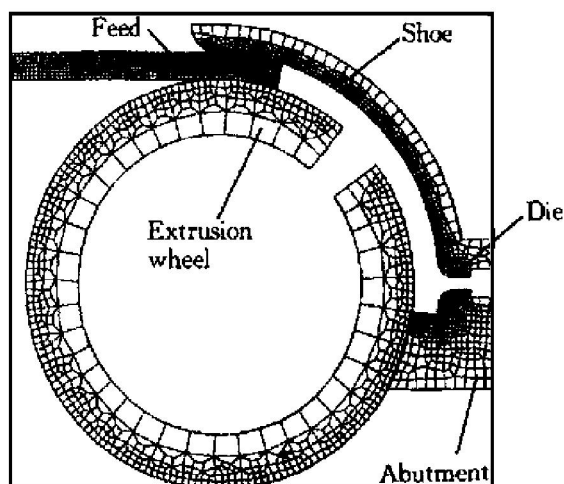


图 2 连续挤压有限元分析几何模型及网格划分

Fig. 2 Geometry and mesh elements of FEM model for ConformTM process

1.2 材料模型

采用常用的 LD2 铝合金作为变形金属, 其材料模型为

$$\bar{\sigma}_{ijk} = \bar{\sigma}(\bar{\epsilon}_i, \dot{\bar{\epsilon}}_j, T_k) \quad (1)$$

① [收稿日期] 2000- 06- 02; [修订日期] 2000- 09- 12

[作者简介] 储灿东(1966-), 男, 工程师, 博士研究生。

式中 $\bar{\sigma}_{ijk}$ 表示流动应力; $\bar{\epsilon}_i$ 为应变; $\dot{\bar{\epsilon}}_j$ 为应变速率; T_k 为温度。

图 3(a) 和 (b) 分别给出了温度为 500 °C 和 700 °C 时的流动应力与应变和应变速率的关系, 利用对数或线性插补可以得出材料的流动应力模型。

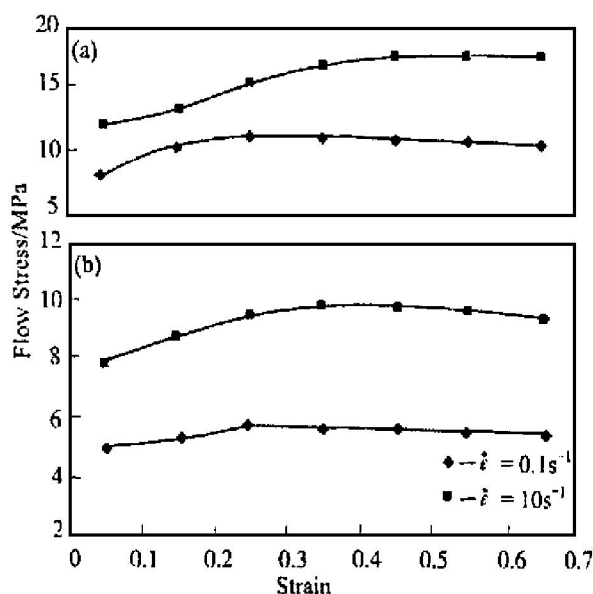


图 3 不同应变速率下流动应力与应变的关系曲线

Fig. 3 Flow stress vs strain for LD2 alloy at strain rates of 0.1 and 10 s⁻¹
(a) -500 °C; (b) -700 °C

1.3 塑性力学模型^[8]

刚粘塑性材料发生塑性变形时, 必须满足下列方程:

应力平衡条件:

$$\sigma_{ij,j} = 0 \quad (2)$$

应变速率方程:

$$\dot{\bar{\epsilon}}_{ij} = \frac{1}{2}(\dot{v}_{i,j} + \dot{v}_{j,i}) \quad (3)$$

本构关系:

$$\dot{\sigma}_{ij} = \frac{2}{3} \frac{\bar{\sigma}}{\dot{\bar{\epsilon}}} \dot{\bar{\epsilon}}_{ij} \quad (4)$$

边界条件:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{ij} n_j &= \bar{F}_i && \text{在边界 } S_F \text{ 上} \\ v_i &= \bar{v}_i && \text{在边界 } S_v \text{ 上} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中 σ_{ij} —应力; $\dot{\bar{\epsilon}}_{ij}$ —应变速率; v_i —速度分量; $\bar{\sigma}$ —流动应力, 是应变、应变速率和温度的函数。

上面给出的场等式可由变分原理求解:

$$\begin{aligned} \delta \phi &= \int_V \bar{\sigma} \delta \bar{\epsilon} dV + \int_V K \epsilon_{kk} \delta \epsilon_{mm} dV + \int_S F_i \delta v_i dS \\ &= 0 \end{aligned} \quad (6)$$

式中 V 和 F 为变形体的体积和表面积; K 为大正数 ($10^5 \sim 10^6$)。

变函可以转换成非线性几何式, 利用 FEM 的离散程序, 由直接迭代或牛顿-拉普拉斯法求解。

1.4 摩擦力学模型

金属塑性成形过程中的摩擦问题十分复杂, 目前还不能对变形体与模具接触面间的摩擦机理给出准确解释, 常常是通过一系列简化来处理摩擦边界条件。常用的方法有库仑摩擦定律 ($f = \mu p$)、常摩擦因子模型 ($f = mk$)、线性粘摩擦定律 ($f = \alpha \Delta u$) 以及反正切摩擦模型 ($f = -2/\pi mk \cdot \arctan(v_s/A)$)。库仑定律在有限元分析中常用于弹塑性模型, 并且易导致刚度矩阵的非对称性; 常摩擦因子模型的使用有很大的局限性, 对于存在变形体与模具接触面相对运动速度中性点时, 摩擦力的方向将发生突变从而导致矩阵方程组成为病态; 线性粘摩擦定律认为摩擦力为相对滑动速度的函数, 相对于常摩擦力模型, 这种粘性摩擦模型情况有所好转, 但摩擦力在分流点仍然呈不连续; 反正切摩擦模型假设摩擦力是相对滑动速度的反正切函数, 该方法能自动处理中性点问题, 对处理任意曲线接触边界的摩擦条件比较方便, 该模型可以实现分流层的自动确定, 又使摩擦力在整个边界上保持连续, 但是反正切摩擦模型没有考虑其他因素对摩擦力的影响。

连续挤压与一般金属塑性成形工艺不同, 其摩擦具有如下特点: 1) 摩擦力是金属变形的驱动力; 2) 变形体和模具间的摩擦是一种塑性摩擦, 主要是分子间的咬合力起作用; 3) 接触面上存在很大的正压力, 远远超过铝及其合金的屈服极限; 4) 摩擦热以及变形热使坯料的温度从入口处的 20 °C 上升到出口处的 400~500 °C。为此, 本文作者根据连续挤压摩擦特点以及摩擦影响因素, 提出了摩擦力驱动模型:

$$\left. \begin{aligned} f &= mk \\ m &= m(T, v_s, \beta, \delta) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式(7)表示摩擦因子 m 是温度 T , 相对滑动速度 v_s , 表面状态系数 β , 变形程度 δ 的函数。函数关系由参考资料和实验确定, 并将其离散化后, 加到仿真系统中。

1.5 热力耦合模型

在成形工艺中温度起着很大的作用, 能影响流动应力, 焊合以及尺寸精度等。由能量平衡式可以求出工件内和模具内的温度分布:

$$kT'_i + \gamma - \rho c T = 0 \quad (8)$$

式中 T —温度; γ —热产生率; ρ —密度; c —比热; “,”—下标逗号表示微分。

由塑性变形产生如热

$$\gamma = \alpha \cdot \bar{\sigma} \cdot \dot{\epsilon} \quad (9)$$

由摩擦产生的热

$$q_n = \alpha_f |f| \cdot |v_s| \quad (10)$$

式中 热产生效率 α 代表机械能转换成热能的大小, α_f 表示摩擦力所产生的机械能转换成热能的大小, f 为摩擦力, v_s 为变形体与模具的相对滑动速度。

能量平衡式(8)可以由加权余数法改写为

$$\int_V k T'_i \delta T'_i dV + \int_V \rho c T \delta T dV - \int_V \alpha \bar{\sigma} \dot{\epsilon} \delta T dV - \int_S q_n \delta T dS = 0 \quad (11)$$

由 FEM 的离散程序, 式(11)可以写成矩阵形式:

$$CT + KT = Q \quad (12)$$

式(12)中的第 1 项变量可以由两点递归方式改写成

$$(C/\Delta t + K\beta) T_{n+1} + (-C/\Delta t + K(1-\beta)) T_n = \bar{Q} \quad (13)$$

式中 q_n —垂直于边界表面的热流, $\bar{Q} = \beta \cdot Q_{n+1} + (1-\beta) Q_n$, β —介于 0~1 之间的常数。

2 仿真结果

根据仿真模型, 作者建立了一个连续挤压的计算机仿真系统, 对连续挤压成形过程进行了数值模拟。

坯料刚刚挤出时的连续挤压型腔内温度场、应变场和应力场如图 4 所示。从图 4(a) 中的温度分布可知, 连续挤压过程中, 摩擦和塑性变形功引起的温度上升明显, 从入口处的 20 °C 上升到出口处的 400~500 °C。模具的温度分布与接触边界分布相吻合。从图 4(a) 中也可得出, 由于挤压轮是主动的, 靴座是被动的, 所以, 挤压轮边界的温度升高较靴座的快。

从图 4(b) 和 (c) 中的应力和应变分布可知, 连续挤压变形过程中, 在不同的阶段, 变形金属的塑性特性不同。

3 结论

连续挤压过程是一种以摩擦力为驱动力的非稳态金属变形过程, 在摩擦热和变形热的作用下, 使变形体的温度升高。本文根据连续挤压变形的特

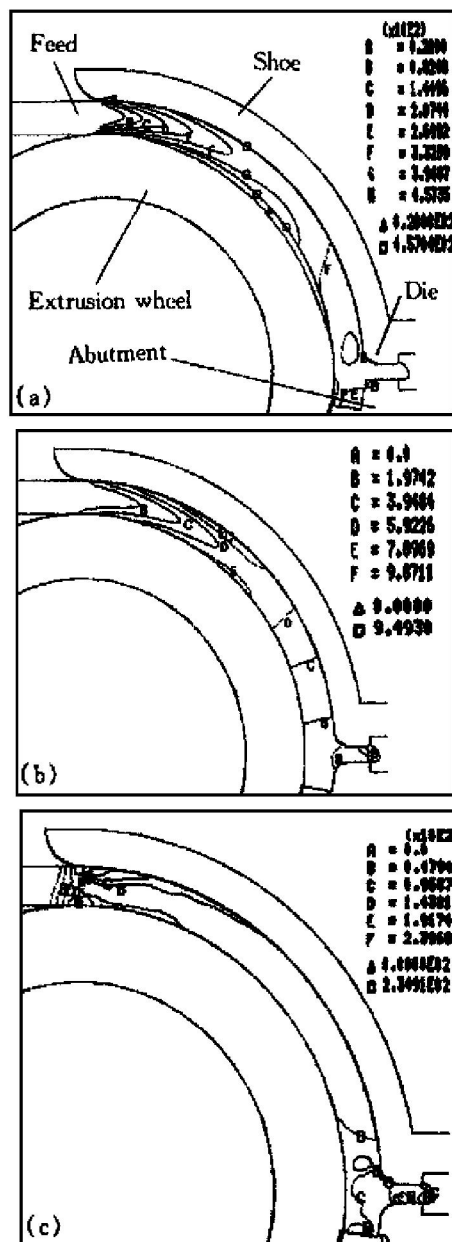


图 4 坯料挤出时的温度场(a)、等效应变场(b)和等效应力场(c)

Fig. 4 Distributions of temperature (a), effective strain (b), and effective stress (c) when feed is extruded just through the die

点, 建立起计算机仿真模型, 对连续挤压的变形过程进行了数值模拟, 得出的有关连续挤压全过程的温度场和等效应变场、等效应力场与实际情况较吻合。

[REFERENCES]

- [1] Etherington C. Conform—a new concept for the continuous extrusion forming of metals [J]. Journal of Engineering for Industry, 1974(8): 893–900.
- [2] YANG Ru-bo(杨如柏), ZHANG Sheng-hua(张胜华),

- trans. Conform 金属成形工艺的理论及实验研究. CONFORM 连续挤压译文集 [M]. Changsha: Central South University of Technology Press, 1989. 69– 82.
- [3] PENG Ying-hong(彭颖红), PENG Da-shu(彭大暑), ZUO Tie-yong(左铁镛), et al. CONFORM 连续挤压变形过程的刚粘塑性有限元模拟[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals (中国有色金属学报), 1993, 3(4): 42– 47.
- [4] PENG Ying-hong(彭颖红), ZUO Tie-yong(左铁镛), RUAN Xue-yu(阮雪榆), et al. CONFORM 连续挤压耦合热变形过程的刚粘塑性有限元分析[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals (中国有色金属学报), 1994, 4(3): 60– 64.
- [5] Peng Y, Ruan X, Zuo T. Defect prediction during conform process by FEM [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1994, (45): 539– 543.
- [6] Kim Y H, Cho J R, Jeong H S, et al. A study on optimal design for CONFORM process [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1998, 80– 81: 671– 675.
- [7] Lu J, Saluja N, Riviere A L, et al. Computer modeling of the continuous forming extrusion process of AA6061 alloy [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1998, 79: 200– 212.
- [8] PENG Ying-hong(彭颖红). 金属塑性成形仿真技术 [M]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press (上海交通大学出版社), 1999.
- [9] WANG Zu-tang(王祖唐), GUAN Ting-dong(关廷栋), XIAO Jing-rong(肖景容), et al. 金属塑性成形理论 [M]. Beijing: Mechanical Industry Press (机械工业出版社), 1989.
- [10] WANG Jia-cai(汪家才). 金属压力加工的现代力学原理 [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press (冶金工业出版社), 1990.

Computer simulation of continuous extrusion forming process

CHU Can-dong, PENG Ying-hong, RUAN Xue-yu

(National Die & Mold CAD Engineering Research Center, Shanghai Jiaotong University,
Shanghai 200030, P. R. China)

[Abstract] The technological feature of the continuous extrusion forming (ConformTM) process was analyzed and the computer simulation models, including geometric, material, plastical, frictional and heat-transferring models, were built. The models were used to predict the deformation behavior of ConformTM process and the temperature, strain and stress fields were gained.

[Key words] continuous extrusion forming; modeling; computer simulation

(编辑 杨 兵)