

CONFORM 连续挤压耦合热变形过程的 刚粘塑性有限元分析^①

彭颖红 阮雪榆

(上海交通大学材料模具研究所, 上海 200030)

左铁镛 彭大暑

(中南工业大学材料科学与工程系, 长沙 410083)

摘 要

基于刚粘塑性有限元法理论和传热学理论, 建立了一套塑性变形过程与传热过程的耦合数值分析方法及其技术处理方法。并且对 CONFORM 连续挤压变形过程进行了热力耦合数值模拟, 从而揭示了 CONFORM 热变形过程中金属的变形行为。

关键词: 连续挤压 耦合热变形 刚粘塑性 数值模拟

金属材料的诸多物理性质是温度的函数, 或者在一定的温度范围内是对温度敏感的。在金属塑性成形过程中, 金属内部产生的应力和变形与温度有着密切的关系。变形体温度的变化将引起材料内部微观组织结构的变化甚至诱发相变的发生。同时这种组织结构的变化又会导致变形体内部应力场及其它机械性能的变化。

因此, 塑性成形过程的完整描述应包括: 变形过程中的变形力学过程、机械能向热能的转化过程以及热传导过程。在高温下成形的过程, 温度的变化主要取决于传热过程。包括: 变形体与模具间的传导热量、变形体向环境的热辐射和对流耗热过程。在冷态下成形的过程, 尤其象 CONFORM 连续挤压这类靠摩擦轮驱动的变形过程, 温度的变化主要取决于机械能向热能的转化过程。包括: 塑性变形功向热能的转化及摩擦功向热能的转化。

计算成形过程中温度场的重要性长期以来一直为人们所关注。但至今仍未得到圆满的解决。主要难点有两个方面: (1) 对于各种材料在不同温度下的本构关系还没有完全弄清;

(2) 还缺乏一种较为理想的耦合分析方法。为此, 国内外学者分别针对简单的成形问题进行了非耦合、耦合的有限元数值分析^[1-6]。并取得了一些十分有价值的结论。耦合热变形的分析对于 CONFORM 连续挤压过程的模拟是十分关键的课题。因为, 在连续挤压过程中进料口与出料口有较大的温差(350℃~400℃)。

1 塑性成形过程中的有限元基本理论及传热学理论

1.1 有限元基本方程

对于一刚粘塑性体, 在发生塑性变形时应满足下列基本方程:

$$\text{平衡方程: } \sigma_{ij,j} = 0 \quad (1)$$

$$\text{几何方程: } \varepsilon_{ij} = (1/2)(v_{i,j} + v_{j,i}) \quad (2)$$

$$\text{本构方程: } \sigma^{ij} = (2/3)(\bar{\sigma}/\bar{\varepsilon})\dot{\varepsilon}_{ij} \quad (3)$$

边界条件:

$$\begin{cases} \sigma_{ij}n_j = \bar{F}_i & \text{在力面 } S_F \text{ 上} \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} v_i = \bar{v}_i & \text{在速度面 } S_v \text{ 上} \end{cases} \quad (5)$$

那么, 在满足上述方程的情况下刚粘塑性体大变形场问题的解便可由下面泛函的变分原

① 收稿日期: 1993年11月17日

理表达式获得:

$$\delta\varphi = \int_V \bar{\sigma} \delta\bar{\varepsilon} dV + \int_V K \dot{\varepsilon}_{\text{eq}} \delta\dot{\varepsilon}_{\text{eq}} dV - \int_S F_i \delta v_i dS = 0 \quad (5)$$

式中 K 是惩罚因子

(5) 式的泛函变分方程通过有限元离散化过程便可转化为一组非线性方程组。这样的非线性方程组的解可由直接迭代法和 Newton-Raphson 迭代法获得。

1.2 传热学基本方程

由热力学第一定律及傅里叶定律, 对于二维的正交各向同性体, 其热平衡方程为:

$$k\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}\right) + \dot{q} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (6)$$

式中 k 是热传导系数; ρ 是体密度; c 是比热容; $\dot{q}$ 是单位体积单位时间内热源生成热量

对于塑性变形问题:

$$\dot{q} = \eta \sigma_{ij} \dot{\varepsilon}_{ij} \quad (7)$$

式中 η 是热生成率, 表示机械能转化成热能的比例。取 $\eta = 0.9$, 而 $(1 - \eta)$ 部分的塑性变形功将引起位错密度的变化、晶界的迁移以及相变的发生。

对于非稳态塑性成形问题, (6) 式中的 $\partial T / \partial t \neq 0$, 这样传热学控制方程(6)为抛物线型。关于抛物线型方程的泛函变分问题目前尚未很好地解决^[2]。本文采用伽辽金方法对方程(6)求解。那么, 对于单元 e 有:

$$\int_{V^e} \left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} - \dot{q} + \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \right) N_i dV = 0 \quad (8)$$

式中 N_i 是权函数

经离散化处理, (8) 式可写成下面的矩阵方程形式:

$$[c] \dot{T} + [k] T = \{Q\} \quad (9)$$

对于瞬态温度场问题, 采用有限差分网格离散化时间域。差分方程如下:

$$T_{i+\Delta t} = T_i + \Delta t [(1 - \beta) \dot{T}_i + \beta \dot{T}_{i+\Delta t}] \quad (10)$$

这样, (9) 式可写成:

$$([c]/\Delta t + [K]\beta) T_{i+\Delta t} + (-[c]/\Delta t + [K](1 - \beta)) T_i = [\tilde{Q}] \quad (11)$$

式中 $[\tilde{Q}] = \beta[Q]_{i+\Delta t} + (1 - \beta)[Q]_i$,

$$0 \leq \beta \leq 1$$

2 边、初值条件的提法及耦合分析的技术处理

2.1 边、初值条件的提法

本研究问题中, 初值条件满足:

$$T(x, y)|_{t=0} = T_0 \quad (12)$$

边界条件有三类:

$$\text{第一类: } T(x, y)|_{\Gamma_1} = T_w \quad (13)$$

$$\text{第二类: } -k \frac{\partial T}{\partial n}|_{\Gamma_2} = q_w \quad (14)$$

$$\text{第三类: } -k \frac{\partial T}{\partial n}|_{\Gamma_3} = h(T - T_f) \quad (15)$$

如果物体与环境之间有辐射耗热存在, 则有辐射边界条件:

$$-k \frac{\partial T}{\partial n}|_{\Gamma_4} = \delta \varepsilon T^4 - \alpha q_r \quad (16)$$

对于 CONFORM 连续挤压, 其整个变形过程温度不是很高 ($< 500^\circ\text{C}$), 且基本上是在模腔中完成变形的。故本文在耦合热变形分析中忽略辐射散热项。

于是(9)式中的“载荷”阵 $\{Q\}$ 可表示成

$$\begin{aligned} \{Q\} = & \int_{V^e} \eta \sigma_{ij} \dot{\varepsilon}_{ij} [N]^T dV - \int_{\Gamma_1} (\vec{q} \cdot \vec{n}) [N]^T d\Gamma \\ & + \int_{\Gamma_2} q_w [N]^T d\Gamma + \int_{\Gamma_3} h T_f [N]^T d\Gamma \\ & + \int_{\Gamma_4} q_r [N]^T d\Gamma \end{aligned} \quad (17)$$

式中 T_f 是环境温度

$$q_r = f_s \cdot |v_s| \quad (18)$$

式中 f_s 是摩擦应力; v_s 是工件与模具的相对滑动速度

2.2 热力耦合技术处理方法

在刚粘塑性有限元分析中, 金属的塑性成形过程是以速度场为基础进行描述的, 而传热学问题的描述则是基于温度场的研究。因此, 热力耦合刚粘塑性有限元分析方法的实质就是: 在同一套有限元网格系统中, 分别求解考虑速度场影响的热传导方程和考虑温度效应的塑性流动方程直至获得相应的收敛解。它包括有限元耦合方程和耦合分析的技术处理两方面的内容。

塑性成形应力应变对温度场的影响, 分别以内热源和摩擦生热的形式加入载荷阵 $\{Q\}$ 中。考虑温度效应对塑性变形的影响时, 有限元基本方程仍然满足, 只是需要对流动应力模式进行修正。本文采用 Rebelo^[6]等提出的模型:

$$\bar{\sigma} = Y(\bar{\epsilon}, T_0) \frac{\exp(Q/KT)}{\exp(Q/KT_0)} \left[1 + \frac{(\dot{\bar{\epsilon}})^n}{\gamma^n(\bar{\epsilon})} \right] \quad (19)$$

式中 $Y = Y(\bar{\epsilon}, T_0)$ 为初始静态屈服应力; Q 是材料常数; T_0 是参考温度; γ 是粘性系数

在本文建立的热力耦合有限元分析系统中, 采用模块化子系统的形式来处理耦合问题。

一方面, 将速度场计算和温度场计算视为两个独立系统进行求解。这样处理使速度场计算中的线性方程组系数矩阵和温度场计算的系数矩阵均为对称阵, 可利用标准解法求解。从而方便了程序设计和降低了计算工作量。

另一方面, 将模具和变形金属分别视为两个系统来处理。对于模具, 我们在计算过程中将其视为刚性体而不计算其变形。因此, 是一个无内热源的单一传热问题。但是由于变形金属与模具的接触界面存在热交换, 故为保证计算精度应使模具的有限元网格在与变形体相接触的边界上与变形体边界网格节点相吻合。具体处理方法是: 在每次刷新变形体网格坐标后, 以变形体与模具接触边界节点 (x_i, y_j) 作为模具网格的一已知边界对模具网格进行重新划分和进行相应的信息传递。

考虑到解的稳定性本文用向后差分格式离散时间域, 设初始态 $t = 0$, 那么, $T_{t+\Delta t}$ 可由(10)式求解:

$$\begin{aligned} T_{\Delta t} &= T_0 + \Delta t[(1-\beta)\dot{T}_0 + \beta\dot{T}_{\Delta t}] \\ \therefore \dot{T}_{\Delta t} &= (T_{\Delta t}/\Delta t\beta) - (T_0/\Delta t\beta) \\ &\quad - [(1-\beta)/\beta]\dot{T}_0 \\ &= (T_{\Delta t}/\Delta t\beta) + \tilde{T} \end{aligned} \quad (20)$$

式中 $\tilde{T} = -(T_0/\Delta t\beta) - [(1-\beta)/\beta]\dot{T}_0$

将(20)式代入方程(9)得:

$$\left(\frac{[c]}{\Delta t\beta} + [K] \right) T_{\Delta t} = \{Q\}_{\Delta t} - [c]\tilde{T} \quad (21)$$

所以, 耦合计算步骤如下:

(a) 假设 $t = 0$ 时刻的初始温度场 T_0 ;

(b) 计算在初始温度场 T_0 下的速度场 $\vec{v}$;

(c) 利用步骤(a)、(b)中的结果由(21)式求初始温度率 $\dot{T}_0$ 和 $\tilde{T}_0$;

(d) 刷新节点坐标、单元的等效应变并重新划分模具网格;

(e) 用前一步的速度场按下式计算第一级近似温度场;

$$\left(\frac{[c]}{\beta\Delta t} + [K] \right) T_{\Delta t}^{(1)} = \{Q\}_{\Delta t}^{(1)} - [c]\tilde{T}$$

(f) 利用步骤(e)所得的解计算新的速度场;

(g) 利用新的速度场按下式计算第二级近似温度场;

$$\left(\frac{[c]}{\beta\Delta t} + [K] \right) T_{\Delta t}^{(2)} = \{Q\}_{\Delta t}^{(2)} - [c]\tilde{T}$$

(h) 重复步骤(f)~(g)直至获得收敛的解;

(i) 计算新的温度率 $\dot{T}_{\Delta t}$;

(j) 重复步骤(d)~(i)直至达到所要求的变形状态。

图1即为上述耦合计算过程的示意框图。

3 CONFORM 耦合热变形过程的数值模拟

本文计算 CONFORM 挤压夹持区段的对称剖面, 于是问题简化为平面应变问题。计算模

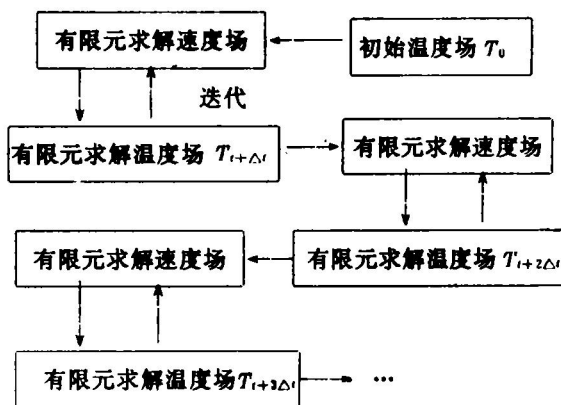


图1 耦合计算过程

型及边界条件的提法分别如图2和表1所示。在边界条件确定中,忽略了热辐射另外考虑到CONFORM过程的连续性,设AB边界为温度给定边界。

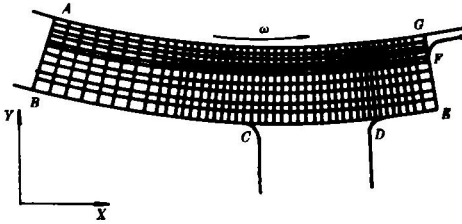


图2 计算模型

表1 边界条件

边界	热边界条件
AB	$T(x, y) _{\Gamma_1} = T_w$
BC	$-k \frac{\partial T}{\partial n} _{\Gamma_2} = h'(T - T_f)$
CD	$-k \frac{\partial T}{\partial n} _{\Gamma_3} = h(T - T_f)$
DE	$-k \frac{\partial T}{\partial n} _{\Gamma_3} = h'(T - T_f)$
EF	$-k \frac{\partial T}{\partial n} _{\Gamma_3} = h'(T - T_f)$
FG	$-k \frac{\partial T}{\partial n} _{\Gamma_3} = h(T - T_f)$
GA	$-k \frac{\partial T}{\partial n} _{\Gamma_3} = h'(T - T_f)$

图3所示为模具与变形体在变形某一瞬时的温度分布。从图3的温度分布可知, CONFORM 连挤过程中塑性变形功引起的温度上升明显。出现较高温度的区域均是塑性变形较剧烈的区域。模具的温度分布是与接触边界情况

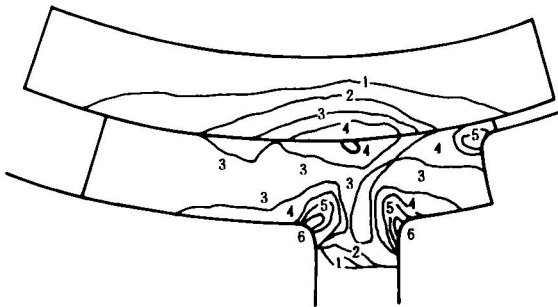


图3 工件及模具的温度分布

模具温度(K): $T_{dmax} = 644$; $T_{dmin} = 300$; $T_{d1} = 379$;

$T_{d2} = 468$; $T_{d3} = 527$; $T_{d4} = 582$;

工件温度(K): $T_{wmax} = 834$; $T_{wmin} = 330$; $T_{w1} = 402$;

$T_{w2} = 474$; $T_{w3} = 546$; $T_{w4} = 617$; $T_{w5} = 689$; $T_{w6} = 762$

相吻合的。

从图4的应力应变分布可知, CONFORM 连挤热变形过程中, 变形金属的塑性变形集中在挤压模口与泄漏口附近的区域内。塑性变形的不均匀性较严重, 但与常规侧向挤压相比 CONFORM 过程的塑性变形区有所扩大且变形的不均匀性得到了缓解。此外, 从 τ_{xy} 的分布图可知在挤压模口到泄漏口之间的狭窄带区内剪切应力出现峰值。证实了文献[7]提出的剧烈内部剪切带(Intense Internal Shear Band)—IISB 的存在。

与图4(a)、(b)、(c)、(d)、(e)、(f)对应的等效应力及等效应变值如下:

(a): $\bar{\sigma}_{max} = 5.746$; $\bar{\sigma}_{min} = 4.103$; $\bar{\sigma}_1 = 4.338$; $\bar{\sigma}_2 = 4.573$; $\bar{\sigma}_3 = 4.807$; $\bar{\sigma}_4 = 5.042$; $\bar{\sigma}_5 = 5.277$; $\bar{\sigma}_6 = 5.511$ 。

(b): $\bar{\epsilon}_{max} = 2.207$; $\bar{\epsilon}_{min} = 0.002$; $\bar{\epsilon}_1 = 0.317$; $\bar{\epsilon}_2 = 0.632$; $\bar{\epsilon}_3 = 0.947$; $\bar{\epsilon}_4 = 1.262$; $\bar{\epsilon}_5 = 1.577$; $\bar{\epsilon}_6 = 1.892$ 。

(c): $\sigma_{xmax} = 1.800$; $\sigma_{xmin} = -16.710$; $\sigma_{x1} = -14.066$; $\sigma_{x2} = -11.422$; $\sigma_{x3} = -8.777$; $\sigma_{x4} = -6.133$; $\sigma_{x5} = -3.489$; $\sigma_{x6} = -0.845$ 。

(d): $\sigma_{ymax} = 1.296$; $\sigma_{ymin} = -13.600$; $\sigma_{y1} = -11.472$; $\sigma_{y2} = -9.344$; $\sigma_{y3} = -7.216$; $\sigma_{y4} = -5.088$; $\sigma_{y5} = -2.960$; $\sigma_{y6} = -0.832$ 。

(e): $\sigma_{zmax} = 0.701$; $\sigma_{zmin} = -14.792$; $\sigma_{z1} = -12.579$; $\sigma_{z2} = -10.365$; $\sigma_{z3} = -8.152$; $\sigma_{z4} = -5.039$; $\sigma_{z5} = -3.725$; $\sigma_{z6} = -1.512$ 。

(f): $\tau_{xymax} = 3.108$; $\tau_{xymmin} = 2.825$; $\tau_{xy1} = -1.978$; $\tau_{xy2} = -1.130$; $\tau_{xy3} = -0.282$; $\tau_{xy4} = 0.565$; $\tau_{xy5} = 1.413$; $\tau_{xy6} = 2.260$ 。

4 结 论

(1) 本文建立的热力耦合模拟系能同时反应塑性变形过程中的温度效应及塑性变形过程对热传导过程的影响。

(2) 本文建立耦合分析技术处理方法是耦合计算的关键, 这套技术处理方法经实际模拟证实是合理的、方便的。

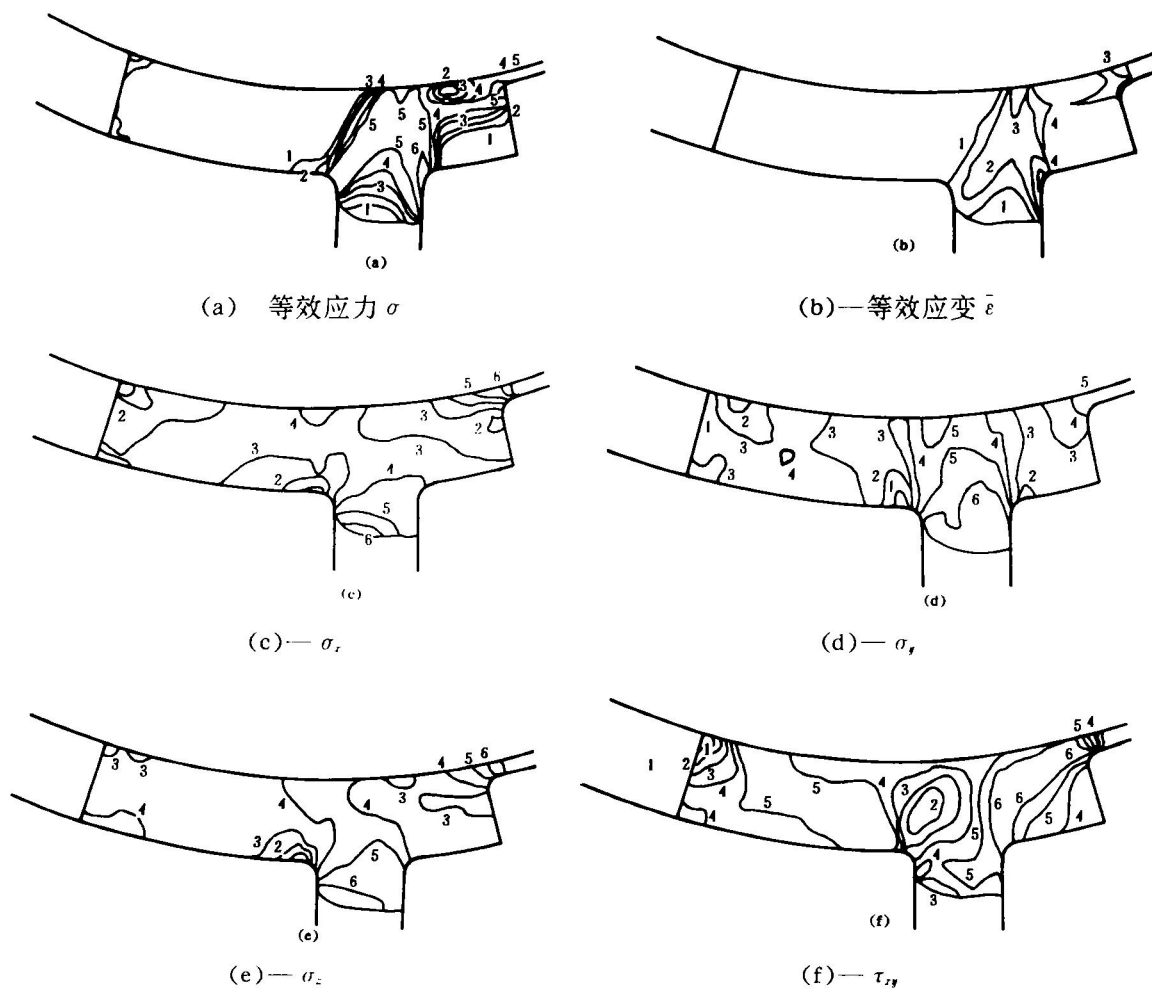


图4 耦合热变形过程应力应变分布

(a)—等效应力 $\bar{\sigma}$ (Pa); (b)—等效应变 $\bar{\epsilon}$; (c)— σ_x (Pa);
(d)— σ_y (Pa); (e)— σ_z (Pa); (f)— τ_{xy} (Pa)

(3) 耦合模拟显示: 热变形过程中变形体的温度分布与应力应变分布是相吻合的, 说明 CONFORM 这类在冷态下开始变形的加工过程其温度的变化主要取决于塑性变形功及摩擦功向热能的转化。

参考文献

- 1 乔端, 钱仁根. 见: 非线性有限元法及其在压力加工中的应用. 北京: 冶金工业出版社, 1990, 6.
- 2 甘舜仙. 见: 有限元技术与程序. 北京: 北京理工大学出版社, 1988, 12.
- 3 Oden J T, Bhandari D R, Yagawa O, Chang T T. Nuclear Engr Des, 1973, 24: 420.
- 4 Zienkiewicz O C, Jain P C, Heinrich J C. Application of Numerical Methods to Forming Processes, ASME, AMD, 1978, 28, 107.
- 5 Rebelo N, Kobayashi S. Int J Mech Sci, 1980, 22: 699.
- 6 Rebelo N, Kobayashi S. Int J Mech Sci, 1980, 22: 707.
- 7 彭大暑, 姚必全, 左铁镛. 中南矿冶学院学报, 1990, 21: 492—498.