

相似理论在钢管冷拔计算机仿真中的应用

杨海波¹⁾ 胡成威¹⁾ 韩宝云²⁾

1) 北京科技大学机械工程学院, 北京 100083 2) 钢铁研究总院, 北京 100081

摘 要 以中式模短芯棒拔制过程为例, 探讨了相似理论在钢管冷拔计算机仿真中的应用; 利用大型非线性有限元程序MARC/Autoforge, 在计算机上对其进行了大量模拟, 获得了具有实用价值的数学模型。
关键词 相似理论; 计算机仿真; 钢管冷拔
分类号 TP391.9; TG356.5

钢管冷拔, 由于其工艺设计及研究方法上的落后, 导致生产中存在一些普遍问题。近年来, 利用计算机仿真技术取代传统的现场实验研究方法, 获得对金属的变形过程更为全面深入的认识而成为解决上述问题的有效途径。本文以中式模短芯棒拔制过程为例, 探讨了相似理论在钢管冷拔计算机仿真中的应用。

1 量纲为一参量的推导

采用量纲分析法^[1,2], 以中式模短芯棒拔制过程(如图1)为例进行推导。
材料参量: 屈服极限 σ_s , 剪切弹性模量 G , 泊松比 μ , 弹性模量 E , 变形抗力 σ_f , 摩擦因数 f 。
几何参量: 外模半径 R , 外模定径带长度 L_1 , 内模锥角 β , 内模定径带长度 L_2 , 工件入口直径、壁厚 D_0, S_0 , 工件出口直径、壁厚 D_1, S_1 。
工艺方面: 拔制速率 v , 拔制力 F , 延伸系数 λ 或断面收缩率 δ 。
分析(内、外)模壁压力 p , 取基本量纲为 $[F]$

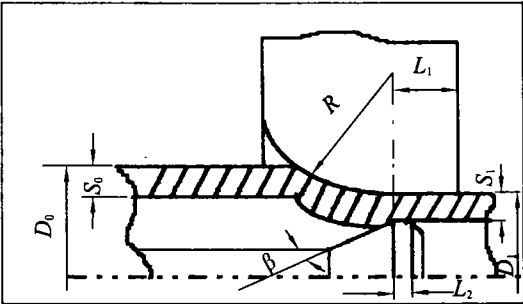


图1 中式模短芯棒拔制示意图

$[L]$, 冷拔过程中影响模壁压力的因素列于表1。

表1 冷拔过程模壁压力的主要影响量

影响因素	符号	量纲
(内、外)模壁压力	p	FL^{-2}
工件材料屈服强度	σ_s	FL^{-2}
工件材料变形抗力	σ_f	FL^{-2}
工件材料剪切弹性模量	G	FL^{-2}
泊松比	μ	1
摩擦因数	f	1
弧形外模半径	R	L
外模定径带长度	L_1	L
内模锥角	β	1
短芯棒定径带长度	L_2	L
工件拔制前外径	D_0	L
工件拔制前壁厚	S_0	L
工件拔制后外径	D_1	L
工件拔制后壁厚	S_1	L

这些量之间存在如下关系:

$f(p, \sigma_s, \sigma_f, G, \mu, f, R, L_1, \beta, L_2, D_0, S_0, D_1, S_1) = 0$ 。

若取 σ_s 和 L_1 为参考量, 其他为剩余量, 并用基本参量表示, 见表2。

表2 材料参量的量纲矩阵
(不包括 μ, f, β 量纲为一的参量)

	参考量			剩余量							
	σ_s	L_1	p	σ_f	G	R	L_2	D_0	S_0	D_1	S_1
$[F]$	1	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0
$[L]$	-2	1	-2	-2	-2	1	1	1	1	1	1
行	1	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0
变	0	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1
换											

则各量纲为一准数为:

$\pi_1 = p/\sigma_s, \quad \pi_2 = \sigma_f/\sigma_s, \quad \pi_3 = G/\sigma_s,$

1998-11-15 收稿 杨海波 男, 37岁, 副教授, 硕士
*国家科技成果重点推广计划项目

$$\pi_4=R/L_1, \pi_5=L_2/L_1, \pi_6=D_0/L_1,$$

$$\pi_7=S_0/L_1, \pi_8=D_1/L_1, \pi_9=S_1/L_1.$$

可化成下列形式：

$$\pi_1=p/\sigma_s, \pi_2=\sigma_t/\sigma_s, \pi_3=G/\sigma_s,$$

$$\pi_4=D_0/S_0, \pi_5=D_1/S_1, \pi_6=D_0/R,$$

$$\pi_7=D_1/R, \pi_8=L_1/L_2, \pi_9=(\Delta S/S_0)/(\Delta D/D_0).$$

由经验知，剪切弹性模量 G 对 p 的影响很小，可忽略。定径带长度 L_1 在实践中通常较大， L_2 则很小（一般 1.5~3 mm），它们对问题的影响也可以忽略，模拟时视为常量。当材料一定时，泊松比 μ 为常数（ $\mu=0.3$ ）， σ_t 为常量。方程可忽略 π_2, π_3, π_8 项。于是有量纲为一方程

$$\varphi(p/\sigma_s, D_0/S_0, D_1/S_1, D_0/R, D_1/R, (\Delta S/S_0)/(\Delta D/D_0), f, \beta)=0$$

经变换，上式可写成

$$p/\sigma_s=f(D_0/S_0, D_1/S_1, D_0/R, D_1/R, (\Delta S/S_0)/(\Delta D/D_0), f, \beta)$$

同理，可考查冷拔时钢管内其他参量的影响因素进而得到其他的量纲为一参量。

2 模拟方案的确立

根据前面推导的结果，同时考虑影响中式模短芯棒拔制过程的相关因素，从受力状态、模具寿命、材料流动、产品性能等方面建立模拟方案。

2.1 几何因素对变形过程的影响

(1) 模具几何参数（外模主要是 R 、内模主要是 β ）的影响。

1) 模具几何参数对受力状态和模壁寿命的影响。模具的寿命主要取决于其在拔制变形时所承受的压力，即模壁压力 p 。由于在带芯棒拔制过程中，较容易产生拔断事故，故为了控制拔断，应考查最大轴向应力 $\sigma_{x,max}$ ；同时为考察拔制力 F 大小，用轴向平均应力 $\bar{\sigma}_x$ 表示对拉拔力 F 的影响。

由实践及理论知，对锥形外模，主要几何参数为模角 α ，在一定范围内，模角增大，拉拔力下降，模壁压力上升，故综合考虑拔断及模壁寿命的要求应存在一最佳模角。对弧形外模短芯棒拔制方式来说，主要几何参数为外模半径 R 和内模锥角 β 。由前面推导的结果，用 $D_0/R, D_1/R$ 表示 R 对上述参量 $p, \sigma_{x,max}, \bar{\sigma}_x$ 的影响。这里模壁压力 p 又分为外模模壁压力 p_w 和内模模壁压力 p_n 2 个参量。上述参量若用量纲为一的量表示分别为： $p_w/\sigma_s, p_n/\sigma_s, \sigma_{x,max}/\sigma_s$ 及 $\bar{\sigma}_x/\sigma_s$ 。

对中式模短芯棒拔制过程，由于其他应力分量的影响（如环向应力 σ_θ 、径向应力 σ_r 等）与上述参量相比处于次要地位，这里不予考虑。

2) 对金属变形分布及流动情况的影响。变形分布主要是通过等效塑性应变速率 $\dot{\epsilon}$ 、等效塑性应变 $\bar{\epsilon}$ 及最大塑性应变 $\epsilon_{p,max}$ 等参量，通过它们可了解工件内应变集中程度和变形不均匀程度，进而分析整个金属的变形情况。这里仅分析对 $\epsilon_{p,max}$ 的影响，这是由于各道次中存在一最大可拔延伸系数，它的存在要求单道次最大塑性应变 $\epsilon_{p,max}$ 应小于某一极限值，同时还应考虑出口平均塑性应变 $\bar{\epsilon}_1$ 的分布情况。流动情况可通过不同几何参数下的网格畸变程度直观得出。

3) 对工件质量、工件性能的影响。冷拔钢管的质量问题主要表现在钢管的壁厚不均、壁厚变化及拔后钢管尺寸精度等方面；钢管性能则表现在管内应力场分布、变形不均匀分布、加工硬化分布及残余应力分布等方面。应力场分布、变形不均匀前面已经考虑。根据实践经验，带芯棒拔制后的钢管其残余应力分布较小，这里不予考虑。同时注意到影响拔后钢管尺寸精度的参量主要为拔后钢管弹复量 ΔS_t 和模具弹变量 ΔS_m 。对中式模短芯棒拔制方式而言，模具弹变量 ΔS_m 和钢管弹复量 ΔS_t 很小，可忽略不计。因此可不必考虑模具参量（外模半径 R 、内模锥角 β ）对工件质量及性能的影响。

但应该指出，考虑加工硬化情况时，可考察管内（横断面上）硬度分布情况；如采用三维有限元法模拟，还可以预测加工过程中壁厚不均的变化情况。

(2) 工件几何参数（ D_0, S_0, D_1, S_1 ）的影响。

工件几何参数的影响用参量 $D_0/S_0, D_1/S_1, (\Delta S/S_0)/(\Delta D/D_0)$ 表示。考虑下面两种情况：1) 不同径厚比 $D_0/S_0, D_1/S_1$ 下的工件对各参量的影响；2) 不同减壁量 ΔS 、减径量 ΔD （或 $\Delta S/\Delta D$ ）下的工件对各参量的影响。

2.2 拔制工艺（主要是延伸系数 λ 和拔制速率 v ）对变形过程的影响

延伸系数 λ 是特别重要的参量，这里用 $\lambda-1$ 表示，这是因为

$$\lambda-1=A_0/A_1-1=\Delta A/A_1,$$

式中： A_0 为钢管入口截面面积， A_1 为钢管出口截面面积， ΔA 为断面收缩值，显然 $\lambda-1$ 比 λ 具有更明确的物理意义。

拔制速率 v 用相对速度 v/v_0 表示, v_0 为参考速度, 取 300 mm/s, 即考虑不同相对拔制速度 $v/300$ 对各参量的影响。

2.3 摩擦条件对变形过程的影响

分析摩擦因数 f 对各参量的影响, f 取 0~0.12。

3 输出参量确定

输出参量有:

(1) 外模模壁压力/屈服强度 (p_w/σ_s), 考虑外模模具寿命;

(2) 内模模壁压力/屈服强度 (p_i/σ_s), 考虑内模模具寿命;

(3) 平均轴向应力/屈服强度 ($\bar{\sigma}_x/\sigma_s$), 考虑拉拔力大小;

(4) 最大轴向应力/屈服强度 ($\sigma_{x,\max}/\sigma_s$), 考虑拔断事故;

(5) 最大塑性应变 $\varepsilon_{p,\max}$, 考虑最大可拔延伸系数的要求;

(6) 出口平均塑性应变 $\bar{\varepsilon}_1$, 考虑连拔的需要;

(7) 其他, 如管内硬度分布情况(沿壁厚方向)、壁厚不均变化情况(用三维有限元法)。

4 中式模短芯棒拔制计算机仿真结果的数学模型

选取目前冷拔生产中较典型的材质 15 钢为研究对象, 根据钢管冷拔过程中各种工艺参数可能的变化范围安排试验(试验共安排 171 次); 在 HP/XU6200, 双 CPU 微机工作站上用大型非线性有限元程序 MARC/Autoforge 对中式模短芯棒拔制过程进行计算机模拟。经逐步回归后提取如下模型:

(1) 取 D_0/S_0 , D_0/R , $(\Delta S/S_0)/(\Delta D/D_0)$, $v/300$, $\lambda-1$, f , β 为自变量, 模型为:

$$\sigma_{x,\max} = \{b_1(\lambda-1)^3 + b_2(D_0/S_0)^2(\lambda-1) + b_3[(\Delta S/S_0)/(\Delta D/D_0)]^2(\lambda-1) + b_4(D_0/S_0)f + b_5[(\Delta S/S_0)/(\Delta D/D_0)] + b_6(D_0/S_0) + b_7(\lambda-1) + b_0\}(\lambda-1) \quad (1)$$

$$\varepsilon_{p,\max} = \{b_1(D_0/S_0)^3 + b_2(\lambda-1)^2[(\Delta S/S_0)/(\Delta D/D_0)] + b_3\beta^2(\lambda-1) + b_4[(\Delta S/S_0)/(\Delta D/D_0)]^2(v/300) + b_5(D_0/R)[(\Delta S/S_0)/(\Delta D/D_0)] + b_6(\lambda-1)\beta + b_7(\lambda-1)(D_0/S_0) + b_8[(\Delta S/S_0)/(\Delta D/D_0)] + b_0\}(\lambda-1) \quad (2)$$

$$\bar{\varepsilon}_1 = \{b_1\beta^2[(\Delta S/S_0)/(\Delta D/D_0)] + b_2\beta^2(D_0/S_0) + b_3(\lambda-1)^2\beta$$

$$b_4(D_0/S_0)\beta + b_5[(\Delta S/S_0)/(\Delta D/D_0)]\beta + b_6(\lambda-1)^2 + b_7(\lambda-1) + b_0\}(\lambda-1) \quad (3)$$

$$p_w = \{b_1[(\Delta S/S_0)/(\Delta D/D_0)]^3 + b_2[(\Delta S/S_0)/(\Delta D/D_0)]^2 \cdot (D_0/S_0) + b_3\beta^2(D_0/R) + b_4(D_0/S_0)^2\beta + b_5(D_0/S_0)^2 + b_6(D_0/S_0) + b_7(\lambda-1) + b_0\}(\lambda-1) \quad (4)$$

$$p_i = \{b_1\beta^2(\lambda-1) + b_2(D_0/S_0)^2(D_0/R) + b_3(\lambda-1)^2(D_0/S_0) + b_4(\lambda-1)^3 + b_5\beta^3 + b_6(\lambda-1)^2 + b_7[(\Delta S/S_0)/(\Delta D/D_0)]f + b_8(D_0/S_0) + b_9(\lambda-1) + b_0\}(\lambda-1) \quad (5)$$

$$\bar{\sigma}_x = \{b_1(D_0/R)^2\beta + b_2[(\Delta S/S_0)/(\Delta D/D_0)]f^2 + b_3(\lambda-1)f^2 + b_4(D_0/S_0)f^2 + b_5(\lambda-1)[(\Delta S/S_0)/(\Delta D/D_0)] + b_6(\lambda-1)^2 + b_7(\lambda-1) + b_8f + b_0\}(\lambda-1) \quad (6)$$

(2) 取 D_1/S_1 , D_1/R , $(\Delta S/S_0)/(\Delta D/D_0)$, $v/300$, $\lambda-1$, f , β 为自变量, 其模型为:

$$\sigma_{x,\max} = \{b_1\beta^2[(\Delta S/S_0)/(\Delta D/D_0)] + b_2\beta^2(D_1/S_1) + b_3(D_1/S_1)^2(D_1/R) + b_4(\lambda-1)^2f + b_5\beta[(\Delta S/S_0)/(\Delta D/D_0)] + b_6f(D_1/S_1) + b_7(\lambda-1)^2 + b_8(D_1/S_1) + b_9(\lambda-1)\}(\lambda-1) \quad (7)$$

$$\varepsilon_{p,\max} = \{b_1(D_1/S_1)^3 + b_2[(\Delta S/S_0)/(\Delta D/D_0)]^3 + b_3\beta^2(\lambda-1) + b_4\beta^2[(\Delta S/S_0)/(\Delta D/D_0)] + b_5(\lambda-1)\beta + b_6(\lambda-1) \cdot (D_1/S_1) + b_7[(\Delta S/S_0)/(\Delta D/D_0)]^2 + b_0\}(\lambda-1) \quad (8)$$

$$\bar{\varepsilon}_1 = \{b_1\beta^2[(\Delta S/S_0)/(\Delta D/D_0)] + b_2\beta^2(D_1/S_1) + b_3(\lambda-1)^2\beta + b_4(D_1/S_1)\beta + b_5[(\Delta S/S_0)/(\Delta D/D_0)]\beta + b_6(\lambda-1)^2 + b_7(\lambda-1) + b_0\}(\lambda-1) \quad (9)$$

$$p_w = \{b_1[(\Delta S/S_0)/(\Delta D/D_0)]^3 + b_2(D_1/S_1)^2(\lambda-1) + b_3(D_1/S_1)^2\beta + b_4\beta^2(D_1/R) + b_5(D_1/S_1)^2 + b_6(D_1/S_1)(\lambda-1) + b_0\}(\lambda-1) \quad (10)$$

$$p_i = \{b_1\beta^2(\lambda-1) + b_2(D_1/S_1)^2(\lambda-1) + b_3(D_1/R)^2(v/300) + b_4(\lambda-1)^3 + b_5\beta^3 + b_6(\lambda-1)^2 + b_7[(\Delta S/S_0)/(\Delta D/D_0)]f^2 + b_8(D_1/S_1) + b_9(\lambda-1) + b_0\}(\lambda-1) \quad (11)$$

$$\bar{\sigma}_x = \{b_1(\lambda-1)^2\beta + b_2(D_1/R)f + b_3(\lambda-1)f^2 + b_4(D_1/S_1)f^2 + b_5(\lambda-1)^3 + b_6(\lambda-1)^2 + b_7(\lambda-1) + b_8f + b_0\}(\lambda-1) \quad (12)$$

式中 $b_0 \sim b_9$ 为回归系数, 回归结果复相关系数 R 均在 0.953~0.998 之间。

5 结论

(1) 引入相似理论使整个仿真方案具备了理论基础, 通过计算机仿真得到的数学模型考虑因素多、获取的信息量大、适用范围广且精度远远高于目前现场生产中使用的经验公式, 特别对建立冷拔 CAD 系统具有重要的实用价值。

(2) 采用非线性有限元技术对整个拔管过程进行计算机仿真模拟, 可以获得各中间过程(即从钢管开始进入到出来之间的各个时间段)中钢管内各部分的应力场、应变场分布情况及模

具的受力情况，这对深入研究钢管内部塑性变形规律以及优化模具及工艺过程具有重要的意义。

参 考 文 献

1 鹿守理. 相似理论在金属塑性加工中的应用. 北京：冶金工业出版社, 1995

2 徐挺. 相似理论与模型实验. 北京：中国农业机械出版社, 1982

Application of Similar Theory to the Computer Simulation of the Tube Drawing

Yang Haibo¹⁾, Hu Chengwei¹⁾, Han Baoyun²⁾

1) Mechanical Engineering School, UST Beijing, Beijing 100083, China

2) Central Iron & Steel Research Institute, Beijing 100081, China

ABSTRACT The application of similar theory is proposed to the computer simulation of the tube drawing on the Chinese module with a short fixed tapered plug. With general non-linear FEM program MARC/Autoforge ,many mathematical models are obtained by a great deal of the computer simulation of the tube drawing on Chinese module.

KEY WORDS similar theory; computer simulation; tube drawing

[*Journal of University of Science and Technology Beijing(English Edition)*, 1999, 6(1): 20]

Pulsation Treatment on the Modification of Crystal with Cold Simulation

Jianzhong Wang, Yong Tang, Daqiang Cang, Jiaquan Zhang

Abstract: Since the separation of crystal of KCl saturated aqueous is similar to the crystallization of liquid metals, the melta nucleation can be simulated by the experiment of the crystal of salt aqueous sloution. In this experiment, pulsation treatment was imposed on KCl saturated aqueous in order to study the effect of pulsation, and the influence of different pulsation treating time, super-heating and time of prescription were investigated. The results show that it is possible to modify the crystallization over saturated solution temperature and the degree of under-cooling for salt crystal separation was reduced by applying pulse tresting on KCl saturated aqueous sloution. In addition, this technology may generate embryos for nucleation even at the temperature over melting point or saturated solubility.

Key words: saturated aqueous solution; pulse modification treatment; nucleation; crystal