

#### 4 结 论

利用有限元 / 有限差分混合法对注塑充模流动进行数值分析可以使我们宏观认识充模过程中各种物理场的变化, 估计一些充模特征, 如充填时间、压力 - 流量关系, 而且可以帮助优化产品和型腔设计, 确定合理的浇口和流道设计, 预测所需的注射压力和锁膜力, 发现可能出现的成型缺陷等. 它实际上是一个二维半的数值分析方法, 忽略了熔体前沿的“泉涌”流动对流场的影响和粘弹性效应, 并且只适用于三维薄壁制品. 如果要关注充模过程中的微观行为, 如熔体前沿的流动形态和推进方式、模壁附近的冷凝问题, 分子取向和预置纤维取向等, 需要采用更为复杂的流变学模型, 并且需要利用三维的流动理论和三维的数值分析方法. 另外, 现在的分析大多是“被动式”的, 即已有设计方案, 然后进行分析, 帮助设计者判断其设计是否合理. 如何利用分析结果, 反过来构造有效的反分析算法, 给出明确的改进方向和尺度, 是我们下一步的研究方向.

#### 参 考 文 献

- 1 Hieber C A, Shen S F. A finite-element/finite-difference simulation of injection-molding filling process. *J Non-Newt Fluid Mech*, 1980(7): 1~32

- 2 Tadmor Z, Broyer E, Gutfinger C. Flow analysis network(FAN)—a method for solving flow problems in polymer processing. *Polym Eng Sci*, 1974(14): 660~665

### NUMERICAL ANALYSIS OF INJECTION MOLD FILLING PROCESS

LIU Chuntai CHEN Jingbo WANG Lixia  
SHEN Changyu

(NERC of Mold and Die, Zhengzhou University of Technology, Zhengzhou 450002, China)

**Abstract** Based on the generalized Hele-Shaw flow for a viscous, non-Newtonian fluid under non-isothermal condition, this paper presents a mathematical model for the simulation of the mold-filling in three dimensional thin-wall parts. A hybrid FEM/FDM is used to solve the pressure and energy governing equations, and computer simulation of the mold-filling process is achieved.

**Key words** injection-molding, mold-filling, numerical analysis

## 钛管在复杂应力下的双向强化效应

任家陶 陈积光

(岳阳大学建工系, 岳阳 414000)

苏利文 刘宏桂 李冈陵

(华南理工大学, 广州 510641)

**摘要** 利用塑性势理论, 同时通过各种复合应力试验证明了 TA<sub>2</sub> 钛管具有明显的各向异性和双向强化效应, 并提供了钛管换热器合理设计的可靠依据.

**关键词** 钛管换热器, 各向异性, 复杂应力, 双向强化效应

本文在文献 [1~5] 的基础上, 进一步对换热器钛管在复合荷载下的双向强化效应进行了研究, 提出了一个屈服准则, 为钛管换热器的设计提供了合理的理论依据和试验验证.

#### 1 各向异性屈服理论

轧制的换热器用钛管, 由于其金属晶格的择优取

向和轧制时机械外力的影响, 使它呈现出明显的各向异性, 在承受双向应力时, 会产生强化现象. 在换热器中, 钛管的工作载荷是十分复杂的, 但由于它壁厚很薄, 因而总可以简化为双向应力, 所以这种双向强化始终存在.

目前各向异性理论是以 Hill 的 1948 年理论 [6] 和 1979 年理论 [7] 以及 Hosford 理论 [8] 较为成熟. 但这 3 个理论均是以板状试件为研究对象, 并且集中在各向异性较小的材料上, 因此对一些各向异性程度较大的材料如铝、钛等, 并不能完全适用 [9]. 特别是对钛管, 至今很少研究.

对换热器钛管, 我们可作如下假设:

(1) 钛管是正交各向异性的, 各向异性主轴分别对应着钛管的轴向、环向和径向  $(x, y, z)$ ;

(2) 屈服函数与塑性势函数相等;

(3) 应力主轴与应变主轴重合;

(4) 在屈服函数中考虑应力球张量和 Bauschinger 效应的影响。

设钛管在复合载荷下的屈服条件为

$$2f(\sigma_{ij}) = K_1(\sigma_x - \sigma_y)^2 + K_2(\sigma_y - \sigma_z)^2 + K_3(\sigma_x - \sigma_z)^2 + K_4\sigma_x + K_5\sigma_y + K_6\sigma_z + 2K_7\tau_{xy}^2 + 2K_8\tau_{yz}^2 + 2K_9\tau_{zx}^2 = 1 \quad (1)$$

式中,  $K_1, K_2, \dots, K_9$  为各向异性系数。

以  $X$ 、 $Y$  表示钛管沿轴向和环向的拉伸屈服限, 并以  $S$  表示钛管的剪切限, 则钛管分别沿轴向、环向和剪切屈服时, 由 (1) 得到

$$K_1X^2 + K_3X^2 + K_4X = 1 \quad (2)$$

$$K_1Y^2 + K_2Y^2 + K_5Y = 1 \quad (3)$$

$$2K_7 = 1/S^2 \quad (4)$$

由于钛管壁很薄, 呈平面应力状态, 故

$$\sigma_z = \tau_{yz} = \tau_{zx} = 0 \quad (5)$$

以屈服函数  $f(\sigma_{ij})$  作为塑性势函数, 根据塑性势理论, 各向异性主轴  $x, y, z$  上的塑性应变增量为

$$d\varepsilon_{ij}^p = \frac{\partial f(\sigma_{ij})}{\partial \sigma_{ij}} d\lambda \quad (i, j = x, y, z) \quad (6)$$

略去弹性应变增量, 则上式成为

$$d\varepsilon_{ij} = \frac{\partial f(\sigma_{ij})}{\partial \sigma_{ij}} d\lambda \quad (7)$$

代入 (1) 式得

$$\left. \begin{aligned} d\varepsilon_{xx} &= d\lambda \left[ K_1(\sigma_x - \sigma_y) + K_2(\sigma_y - \sigma_z) + \frac{1}{2}K_4 \right] \\ d\varepsilon_{yy} &= d\lambda \left[ K_1(\sigma_y - \sigma_z) + K_2(\sigma_y - \sigma_z) + \frac{1}{2}K_5 \right] \\ d\varepsilon_{zz} &= d\lambda \left[ K_3(\sigma_y - \sigma_z) + K_2(\sigma_z - \sigma_y) + \frac{1}{2}K_6 \right] \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

根据塑性应变比理论, 沿  $x, y$  方向的塑性应变比为<sup>[3]</sup>

$$\left. \begin{aligned} R &= \frac{d\varepsilon_{yy}}{d\varepsilon_{zz}} \Big|_{\sigma_z=X} \\ P &= \frac{d\varepsilon_{xx}}{d\varepsilon_{zz}} \Big|_{\sigma_y=Y} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

由 (8) 式、(9) 式得

$$2K_1X - 2K_3RX - K_5 + RK_6 = 0 \quad (10)$$

$$2K_1Y - 2K_2PY - K_4 + PK_6 = 0 \quad (11)$$

将式 (10)、式 (11) 代入式 (2)、式 (3) 联解, 并代回 (1) 式得

$$I_1\sigma_x^2 + I_2\sigma_y^2 - I_3\sigma_x\sigma_y + m\sigma_x + n\sigma_y + \frac{\tau_{xy}^2}{s^2} = 1 \quad (12)$$

此即换热器钛管在复杂应力下的屈服公式。式中

$$I_1 = \frac{1-mX}{X^2}$$

$$I_2 = \frac{1-nY}{Y^2}$$

$$I_3 = \frac{2\{PRXY(n-m) + 2PR(Y-X) + (n^2 - mP)XY\}}{\{XY[P(R+1)X - R(P+1)Y]\}}$$

式中,  $m, n$  分别为独立的各向异性参数, 由实验确定,  $m = -\frac{1}{940}$ ,  $n = -\frac{1}{740}$ 。

屈服公式 (12) 与 Hill 理论和 Hosford 理论的区别在于, 它通过两个各向异性参数  $m, n$ , 考虑了球张量和 Bauschinger 效应对各向异性材料屈服强度的影响。显然, 单位体积的变化除了引起法向应力, 而且会产生剪应力。因此, 必然影响到材料的屈服。所以, 屈服公式 (12) 可以说对 Hill(1948) 准则的一个修正。

## 2 双向强化效应

设钛管轴向与环向应力比为  $\alpha$ , 则  $\alpha = \frac{\sigma_x}{\sigma_y}$ , 根据屈服公式 (12) 得钛管在双向应力作用下的屈服应力

$$\alpha_x = \frac{\alpha J_1 - \alpha(m\alpha + n)}{J_2 X} X = B_x X \quad (13)$$

$$\alpha_y = \frac{J_1 - (m\alpha + n)}{J_2 Y} Y = B_y Y \quad (14)$$

式中  $B_x$ 、 $B_y$  为双向强化系数

$$B_x = \frac{\alpha J_1 - \alpha(m\alpha + n)}{J_2 X} \quad (15)$$

$$B_y = \frac{J_1 - (m\alpha + n)}{J_2 Y} \quad (16)$$

且

$$B_y = \frac{X}{Y} \cdot \frac{1}{\alpha} \quad (17)$$

其中

$$J_1 = [(m\alpha + n)^2 + 4(I_1\alpha^2 + I_2 - I_3\alpha)]^{1/2}$$

$$J_2 = 2[I_1\alpha^2 + I_2 - I_3\alpha]$$

令

$$J_3 = J_1 - (m\alpha + n) \tag{18}$$

当  $\alpha \geq 1$  时, 令  $B'_x = 0$ , 从式 (15) 可以得到

$$\alpha_x = \frac{J_3}{J_3 J'_2 - J'_3} \tag{19}$$

由 (15) 式得到最大强化效应为

$$B_{x \max} = \frac{J_3^2}{J_2(J_3 J'_2 - J'_3)X} \tag{20}$$

当  $\alpha \leq 1$  时, 令  $B'_y = 0$ , 从式 (16) 得到

$$\alpha_y = \frac{J_1 J_2 - n J_2 - 1}{m J_2} \tag{21}$$

由 (16) 式得最大强化效应为

$$B_{y \max} = \frac{1}{J_2^2 Y} \tag{22}$$

当  $B_x = B_y = 1$  时, 从式 (15)、式 (16) 可得

$$\alpha_x = \frac{J_2 X}{J_3} \tag{23}$$

$$\alpha_y = \frac{J_1 - n - J_2 Y}{m} \tag{24}$$

### 3 结果分析与讨论

为了模拟换热器中钛管的实际承载情况, 我们进行了各种应力状况和各种应力比下的承载试验. 试件为国产换热器用 TA<sub>2</sub> 钛管.

图 1 根据作者的实验结果做出了钛管轴向和环向的拉伸时的应力应变关系. 从图中可见, 钛管的轴向和环向机械性能存在明显差异. 不论是屈服极限  $\sigma_{0.2}$  还是强度极限  $\sigma_u$  都在环向呈现出较高值. 其中  $\sigma_{0.2}$  相差 23.2%. 这说明轧制的换热器钛管的各向异性程度是比较大的. 在设计时必须充分考虑这一点. 图 1

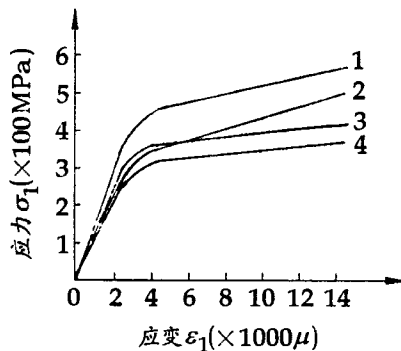


图 1 钛管单向拉伸应力-应变曲线

1 管子环向, 2 管子轴向, 3 板 90° 向, 4 板 0° 向

还做出了 TA<sub>2</sub> 板的实验曲线以做对比. 可以看到, 钛管比钛板有更明显的各向异性性质. 这是由于钛板在轧制过程中曾改变过几次轧制方向, 因此板面内的各向异性程度较小, 而钛管在加工时, 轧制方向始终不变, 故其各向异性程度较大 ( $R$  与  $P$  值相差较大).

图 2 比较了铝管、钢管和钛管三大常用金属管的应力应变关系 (铝管和钢管曲线取自文献 [10]). 由图 2 可见, 铝管的各向异性程度最大, 但它的环向屈服强度低于轴向强度, 与钛管正好相反, 在双向拉伸情况下, 铝管产生弱化现象. 钢管的环向和轴向承载屈服强度和极限强度均没有明显区别, 属于准各向同性材料.

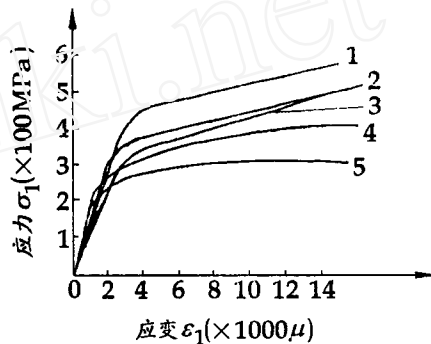


图 2 三种金属管的各向异性比较

1 钛 (环向), 2 钛 (轴向), 3 钢 (环向轴向),  
4 铝 (环向), 5 铝 (轴向)

根据试验结果, 还画出  $\sigma_\theta/\sigma_z - \varepsilon$  关系曲线如图 3 所示. 显然, 随着应变的增大,  $\sigma_\theta/\sigma_z$  趋近于 1, 这说明钛管的各向异性随着塑性变形的发展而逐渐减小. 同样按文献 [10] 画出铝合金的  $\sigma_\theta/\sigma_z - \varepsilon$  的关系曲线, 可见铝与钛恰恰相反, 随着变形的增大, 其  $\sigma_\theta/\sigma_z$  越来越远离于 1, 其各向异性程度越来越大.

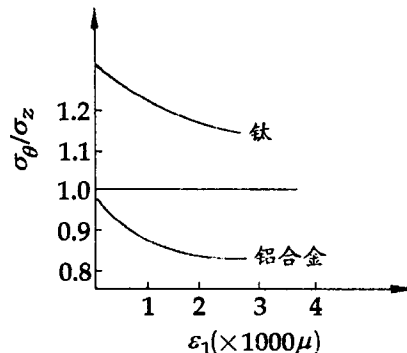


图 3 钛与铝合金的  $\sigma_\theta/\sigma_z - \varepsilon_1$  关系曲线

按试验数据, 画出图 4 所示钛管的  $\sigma_1 - \varepsilon_1$  关系曲线, 可见钛管在承受双向荷载时, 屈服强度明显高于

单向屈服强度, 在  $\sigma_\theta/\sigma_z$  为 1:1 和 1:2 及 2:1 时, 其强化系数分别为 1.267 和 1.289 及 1.295, 平均强化系数是 1.284. 这说明钛管有明显的强化效应.

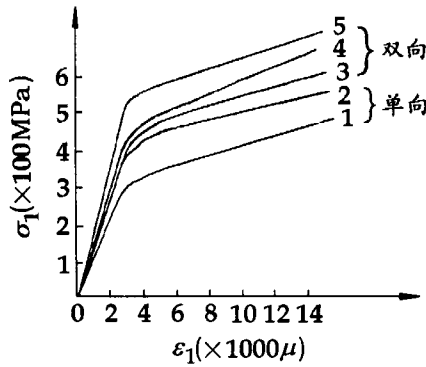


图 4 钛管的单、双向  $\sigma_1$ - $\epsilon_1$  关系曲线

- 1 轴向承载, 2 环向承载, 3  $\sigma_\theta:\sigma_z = 1:2$ ,  
4  $\sigma_\theta:\sigma_z = 1:1$ , 5  $\sigma_\theta:\sigma_z = 2:1$

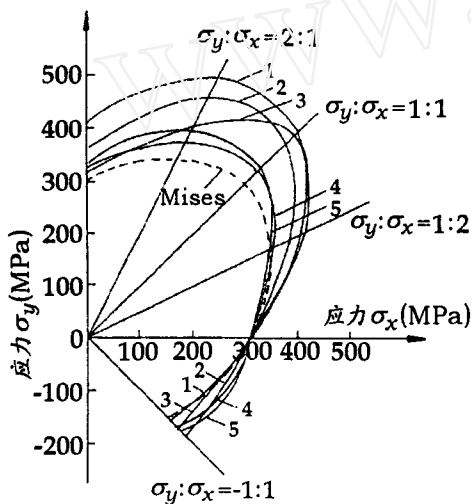


图 5 各屈服准则与试验值的比较

- 1 公式 (12), 2 Hill 48, 3 Hill 79, 4 Hosford  $a = 8$ ,  
5 Hosford  $a = 6$

图 5 根据实验结果做出了钛管的各种应力状态下的屈服轨迹以及 Hill 和 Hosford 理论轨迹和作者的屈服公式轨迹. 从图 5 中可以看出, 钛管在双向应力状态下的屈服极限明显高于单向屈服极限. 在应力状态为  $\sigma_y:\sigma_x = 2:1$  时, 强化效应最大为 29.95%, 当  $\sigma_y:\sigma_x = 1:1$  时, 强化效应为 27.3%, 在应力状态为  $\sigma_y:\sigma_x = 1:2$  时, 强化效应为 28.9%. 由此证明了, 在双向应力状态下, 钛管存在着十分显著的强化效应. 在进行钛管强度设计时, 若能充分考虑这一点, 可以节约近 30% 的材料, 这对于目前使用昂贵的

钛材料有非常重要的意义.

从图 5 中还可以看到, 在几种各向异性屈服判据中, 作者的屈服公式比 Hill(1948) 屈服公式更接近于实验值. 这是由于公式 (12) 充分考虑了应力球张量和 Bauschinger 效应对各向异性程度较大的材料屈服的影响. Hill(1979) 准则在应力比  $\alpha \geq 1$  时也较接近实验点, 但在  $\alpha < 1$  时却产生较大误差, 这是因为该公式是以平面各向同性为前提, 对平面各向异性相当大的钛管自然会产生偏差. 至于 Hosford 准则, 由于它只给出了体心立方晶格金属和面心立方晶格金属的指数  $a$  值 (8 和 6), 而没有给出钛这样密排六方晶格金属的  $a$  值, 因此不能适应钛材.

图 5 中还反映出扭转荷载的存在将削弱钛管的各向异性程度, 使这趋于各向同性. 但在实际钛管换热器中, 扭转荷载是十分微小的.

#### 4. 结 论

(1)  $TA_2$  薄壁钛管具有明显的各向异性性质, 其环向承载能力大大高于轴向, 但随塑性变形增大, 各向异性程度减小. 而铝管正好相反.

(2) 在双向拉伸情况下, 钛管的屈服强度和极限强度比单向应力下有明显的强化效应. 在 3 种应力比状态下的强化效应平均为 28.7%. 在设计钛管换热器时, 应充分考虑这种强化效应, 以达到节省材料, 提高传热效应的目的.

(3) 本文提出的含两个各向异性参数的屈服准则:  $I_1\sigma_x^2 + I_2\sigma_y^2 - I_3\sigma_x\sigma_y + m\sigma_x + n\sigma_y + \tau_{xy}^2/s^2 = 1$  考虑了应力球张量和 Bauschinger 效应对钛管各向异性的影响, 比较符合实际.

#### 参 考 文 献

- 1 曾晓英, 豆志武, 李冈陵. 各向异性钛板双向拉伸及胡克定律屈服条件和强化效应研究. 力学与实践, 1992, 14(3): 25
- 2 Li Gangling, Zeng Xiaoying, Yan Chong. Biaxial strengthening studies on titanium sheets. W-Ti-Re-Sb'88, 1988, 11: 1084~1088
- 3 李冈陵, 曾晓英, 刘东兴. 考虑各向异性的钛制压力容器研究. 化工机械, 1989, 16(3): 4
- 4 李冈陵, 曾晓英, 刘东兴. 各向异性钛制压力容器的强化效应研究. 压力容器, 1989, 6(3): 27
- 5 Li Gangling, Zeng Xiaoying, Yan Chong. Experimental studies on anisotropic titanium pressure vessel materials. Int J Pres Ves and Piping, 1989, 38(4): 321~327
- 6 Hill R. A theory of the yielding and plastic flow of

- anisotropic metals. Proceedings Royal Society, 1948, 193A: 28
- 7 Hill R. Matn. Proc. Camd. Phil. Soc., 1979, 85: 179
- 8 Hosford W F. 7th N. Amer. Metal. Conf., Proc., 1979. 191
- 9 Hill R. Mathematical theory of plasticity, 1950
- 10 皮萨林 T C. 复杂应力下材料的变形与强度. 北京: 科学出版社, 1983. 235

## STUDY ON THE BIAXIAL STRENGTHENING EFFECT OF THE TITANIUM TUBE UNDER THE COMBINATORY STRESSES USING THE PLASTIC POTENTIAL THEORY

REN Jiatao CHEN Jiguang  
(Yueyang University, Hunan Province, Yueyang 414000, China)

SU Liwen LIU Honggui LI Gangling  
(South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

**Abstract** Under the different combinatory loads the thin titanium tube possesses different stress states. In particular, the anisotropy and biaxial strengthening of TA<sub>2</sub> titanium tube directly influences the reasonable design of the titanium tubular exchanger. Using the plastic potential theory and through different combinatory stress experiments, this paper proves the anisotropy and biaxial strengthening effect of TA<sub>2</sub> titanium tube, and presents a reliable basis for the reasonable design of the titanium tubular exchanger.

**Key words** the titanium tubular exchanger, anisotropy, the combinatory stresses, the biaxial strengthening effect

## 炮弹头螺受力分析及联接方式改进

冯 兵 冯勋欣

(军械工程学院, 石家庄 050003)

**摘要** 运用受力分析的方法, 对弹丸头螺在全弹道过程中的受旋力进行分析, 提出头螺与弹体联接方式的改进意见, 并通过试验予以验证, 为某型榴弹的安全生产解决了一个实际问题。

**关键词** 炮弹头螺, 受力分析, 联接方式

某型加榴炮的弹丸, 其头螺与装药弹体之间是用螺纹联接的. 为防止跳弹射击时旋脱, 二者用驻螺固定. 这种联接方式必须在头螺上钻孔, 并加一固定销钉. 由于钻孔是在装药之后进行的, 稍有不慎就会发生意外. 因此, 探讨新的安全可靠联接方式, 从根本上解决该弹在生产中的不安全问题, 是一项很有实际意义的工作。

### 1 头螺受力分析

要寻找头螺与弹体的安全联接方式, 首先要对头螺进行受力分析, 特别是导致其旋脱的受旋力. 为此, 根据弹丸发射过程中所经历的 3 个阶段 (图 1), 分别进行分析。

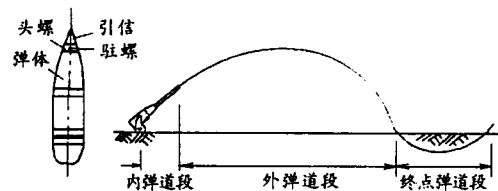


图 1 某型榴弹及弹道示意图

#### 1.1 内弹道段头螺受力分析

某型加榴炮为右旋线膛炮. 在火药气体作用下, 弹丸在膛内一方面沿炮膛作直线运动, 另一方面绕弹轴作旋转运动. 对于头螺来说, 由于与弹体联接, 除自身重力外, 主要受两个力的作用 (图 2): 一个是弹体对头螺的推力  $F$ , 这个力使头螺沿炮膛作直线运动, 它对头螺的联接可靠性不起作用, 对强度影响也不大; 另一个是弹体对头螺的作用力矩  $M$ , 这个力矩使头螺在膛内作旋转运动, 它对头螺的联接可靠性起着决定性的作用. 把带引信的头螺作为研究对象, 根据定轴