

## 扁挤压筒结构强度研究及计算

苏 芳<sup>1,2</sup>, 王晓国<sup>1,2</sup>, 马士强<sup>1,2</sup>

(1. 太原重工股份有限公司 技术中心, 山西 太原 030024; 2. 太重 (天津) 滨海重型机械有限公司 技术中心, 天津 300452)

**摘要:** 为了获得各工况下扁挤压筒结构的应力状态, 校核筒结构是否满足高温高压条件下的工作强度要求, 综合考虑扁挤压筒从装配到加压各工作阶段的载荷特点, 并根据弹性力学理论厚壁圆筒结构强度计算方法, 推导出挤压筒各层结构的应力计算公式, 总结了影响扁挤压筒强度的关键因素为内外径比、工作内压、过盈配合系数、材料杨氏模量和温度, 并分析了各关键因素在数值计算时的处理方式, 采用有限元法对扁挤压筒进行热-结构耦合分析, 模拟了 5 类不同工况下扁挤压筒结构受载后的变形及应力状态, 求出结构各层的安全系数, 直观显示出结构各部分的安全裕度, 为扁挤压筒的制造及优化设计提供了理论支持。

**关键词:** 扁挤压筒; 强度计算; 热-结构耦合分析; 过盈配合; 挤压机

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2024.05.011

中图分类号: TG375.43; TG249.2 文献标志码: A 文章编号: 1000-3940 (2024) 05-0084-08

## Research and calculation on structure strength for flat extrusion cylinder

Su Fang<sup>1,2</sup>, Wang Xiaoguo<sup>1,2</sup>, Ma Shiqiang<sup>1,2</sup>

(1. Technology Center, Taiyuan Heavy Industry Co., Ltd., Taiyuan 030024, China;

2. Technology Center, TZ (Tianjin) Binhai Heavy Machinery Co., Ltd., Tianjin 300452, China)

**Abstract:** In order to obtain the stress states of flat extrusion cylinder structure under various working conditions and verify whether the cylinder structure meets the working strength requirements under high temperature and high pressure conditions, the load characteristics for each work stage of flat extrusion cylinder from assembly to pressurization were considered comprehensively, and according to the strength calculation method of thick-walled cylinder structure based on elastic mechanics theory, the stress calculation formula for each layer structure of extrusion cylinder was derived. Then, the key factors affecting the strength of flat extrusion cylinder were summarized as the ratio of inner to outer diameters, working pressure, interference fit coefficient, Young's modulus of materials and temperature, and the treatment methods of these key factors in numerical calculation were analyzed. Furthermore, the thermal and structural coupling analysis on the flat extrusion cylinder was carried out by finite element method, and the deformation and stress states of the loaded structure of flat extrusion cylinder under five different conditions were simulated to obtain the safety factor of each layer for the structure, which intuitively displayed the safety margin of each part for the structure and provided the theoretical support for manufacturing and optimization design of flat extrusion cylinder.

**Key words:** flat extrusion cylinder; strength calculation; thermal and structural coupling analysis; interference fit; extruder

挤压筒是挤压机装配工具中负荷最重的零件之一, 挤压筒的强度决定了挤压过程中的温度和速度条件, 限制了挤压系数和铸锭长度的许可数值<sup>[1]</sup>。扁挤压筒是为了满足挤压扁宽型材的需求而被设计的, 其挤压产品的组织性能均匀, 成品率更高, 正逐渐代替传统的圆挤压筒成为更适合复杂薄壁型材的挤压装配工具<sup>[2-11]</sup>。由于扁挤压筒的内孔非圆形,

应力分布极不均匀, 其强度计算的解析解难以求得, 为此叶尔曼诺克提出了使用保角映射方法将内孔保角变换为单位圆后再进行计算<sup>[12]</sup>的方法, 但这种强度计算方法需要进行大量的积分求导及函数变换计算, 且一般只求出 4~5 个危险点应力 (危险点的位置由经验确定), 有可能漏掉其他位置的应力高点。本文对扁挤压筒从装配制造到预热再到实际服役工况进行了全过程分析, 根据弹性力学理论厚壁圆筒结构强度计算方法, 推导出挤压筒各层结构微元体的应力计算公式, 总结出扁挤压筒强度计算时的关键参数, 并采用有限元法对扁挤压筒进行热-结构耦合分析, 模拟各工况下扁挤压筒结构受载后的变形及应力状态, 求出结构各层的应力分布规律。

收稿日期: 2023-10-12; 修订日期: 2024-01-19

基金项目: 天津市科技领军 (培育) 企业认定及支持项目 (20YDLZGX00290); 天津市“项目+团队”重点培养专项 (XC202050)

作者简介: 苏 芳 (1985-), 女, 硕士, 高级工程师

E-mail: sufang@tz.com.cn

## 1 扁挤压筒基本结构

扁挤压筒是在高温高压条件下工作, 为保证金属锭坯产生塑性变形, 工作时筒内温度需达到 350~500 ℃, 单位压力可达到 300 MPa 以上。挤压力会使筒内壁产生较高的尖峰应力, 为了降低筒内壁的应力, 使内外壁应力趋于均匀, 扁挤压筒采用了多层过盈装配组合的结构形式。由于层数越多, 挤压筒的装配工作就越复杂, 为了平衡强度和装配工艺要求, 目前 3 层挤压筒最为常见。本文也以 3 层扁挤压筒为例进行强度计算分析。

图 1 为典型的 3 层扁挤压筒示意图, 扁挤压筒由内衬、中衬和外套组成。装配时, 内衬、中衬和外套通过压力成为一体, 装配应力的大小可采用过盈配合系数来控制。通常, 在室温 (约 20 ℃) 条件下进行装配, 首先把内衬推入经过预热的中衬, 冷却并对中衬的外表面进行精加工, 然后再装入经过预热的外套中。

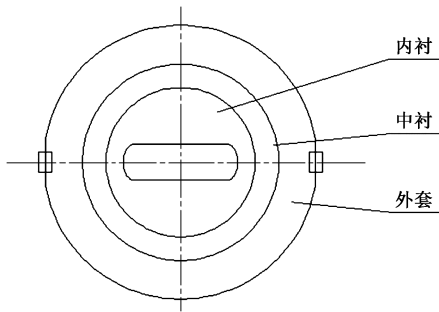


图 1 3 层扁挤压筒示意图

Fig. 1 Schematic diagram of three-layer flat extrusion cylinder

挤压时, 工作筒受到的轴向力被模座和挤压轴所平衡, 并且轴向力相比于径向力产生的结构应力要小得多, 故假定筒结构不受轴向力作用, 只考虑径向力的情况。径向力由工作压力 (筒内壁压力) 和过盈装配产生的径向力组成。扁挤压筒结构的强度计算结果即结构应力也是由工作产生的结构应力和装配产生的结构应力两部分组成。

## 2 影响结构强度的关键因素

### 2.1 工作压力产生的结构应力

将挤压筒各层结构看作一个承受内压力的厚壁圆筒结构进行强度计算, 其中内半径为  $r$ 、外半径为  $R$ 。设所承受的內部压力为  $P$ , 结构各点到轴线的距离为  $\rho$ , 利用拉密公式给出的经典解求出结构

各点 (微元体) 的切向应力  $\sigma_t$  与径向应力  $\sigma_r$ , 如式 (1) 所示:

$$\begin{cases} \sigma_t = P \cdot \frac{r^2}{R^2 - r^2} \cdot \left(1 + \frac{R^2}{\rho^2}\right) \\ \sigma_r = P \cdot \frac{r^2}{R^2 - r^2} \cdot \left(1 - \frac{R^2}{\rho^2}\right) \end{cases} \quad (1)$$

按第三强度理论, 挤压筒结构的等效应力  $\sigma$  为:

$$\sigma = \sigma_t - \sigma_r = P \cdot \frac{2r^2 R^2}{\rho^2 (R^2 - r^2)} \quad (2)$$

由式 (2) 可看出,  $\rho$  越小,  $\sigma$  越大, 即厚壁圆筒结构在只承受内部压力时, 最大等效应力发生在结构内壁上, 因此, 强度计算分析时应重点考虑各层的内壁应力。通过静力平衡关系、几何条件和广义胡克定理, 可以推导出筒结构各层 (内衬、中衬和外套) 各点的应力公式, 并代入内壁坐标数值, 求出各层的内壁应力, 其中内衬的径向应力  $\sigma_{r(d1)}$  和切向应力  $\sigma_{t(d1)}$  如式 (3) 所示:

$$\begin{cases} \sigma_{r(d1)} = -p_{ri} \\ \sigma_{t(d1)} = p_{ri} \cdot \frac{K^2 + 1}{K^2 - 1} - p_{s1} \cdot \frac{2K_1^2}{K^2 - 1} - p_{s2} \cdot \frac{2K_1^2 K_2^2}{K_1^2 K_2^2 - 1} \end{cases} \quad (3)$$

中衬的径向应力  $\sigma_{r(d2)}$  和切向应力  $\sigma_{t(d2)}$  如式 (4) 所示:

$$\begin{cases} \sigma_{r(d2)} = -p_{ri} \cdot \frac{K_3^2 K_2^2 - 1}{K^2 - 1} - p_{s1} - p_{s2} \cdot \frac{K_1^2 K_2^2 - K_2^2}{K_1^2 K_2^2 - 1} \\ \sigma_{t(d2)} = p_{ri} \cdot \frac{K_3^2 K_2^2 + 1}{K^2 - 1} - p_{s1} \cdot \frac{K_3^2 K_2^2 + 1}{K_3^2 K_2^2 - 1} - p_{s2} \cdot \frac{K_1^2 K_2^2 + K_2^2}{K_1^2 K_2^2 - 1} \end{cases} \quad (4)$$

外套的径向应力  $\sigma_{r(d3)}$  和切向应力  $\sigma_{t(d3)}$  如式 (5) 所示:

$$\begin{cases} \sigma_{r(d3)} = -p_{ri} \cdot \frac{K_3^2 - 1}{K^2 - 1} - p_{s1} \cdot \frac{K_3^2 - 1}{K_3^2 K_2^2 - 1} - p_{s2} \\ \sigma_{t(d3)} = p_{ri} \cdot \frac{K_3^2 + 1}{K^2 - 1} + p_{s1} \cdot \frac{K_3^2 + 1}{K_3^2 K_2^2 - 1} + p_{s2} \cdot \frac{K_3^2 + 1}{K_3^2 - 1} \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $p_{ri}$  为挤压筒内压;  $p_{s1}$  为挤压筒内衬与中衬间的装配应力;  $p_{s2}$  为挤压筒中衬与外套间的装配应力;  $K$  为挤压筒外径与内径之比,  $K_1$ 、 $K_2$  和  $K_3$  分别为挤压筒内衬、中衬和外套的外径与内径之比, 且令  $K_1 = \frac{d_{1a}}{d_{1i}}$ 、 $K_2 = \frac{d_{2a}}{d_{2i}}$ 、 $K_3 = \frac{d_{3a}}{d_{3i}}$ 、 $K = \frac{d_{3a}}{d_{1i}}$ ;  $d_{1i}$ 、 $d_{2i}$  和

$d_{3i}$  分别为挤压筒内衬、中衬和外套的内径;  $d_{1a}$ 、 $d_{2a}$  和  $d_{3a}$  分别为挤压筒内衬、中衬和外套的外径。

## 2.2 过盈装配产生的结构应力

挤压筒各层间装配应力的计算仍采用弹性力学厚壁圆筒计算方法, 推导出内衬与中衬的装配应力  $p_{s1}$ 、中衬与外套的装配应力  $p_{s2}$  分别为:

$$\begin{cases} p_{s1} = \frac{E\varepsilon_1}{2} \cdot \frac{(K_3^2 K_2^2 - 1)(K_1^2 - 1)}{K^2 - 1} \\ p_{s2} = \frac{E\varepsilon_2}{2} \cdot \frac{(K_2^2 K_1^2 - 1)(K_3^2 - 1)}{K^2 - 1} \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $E$  为杨氏模量;  $\varepsilon_1$ 、 $\varepsilon_2$  分别为内衬与中衬、中衬与外套间的过盈配合系数。

## 2.3 温度对强度计算的影响

扁挤压筒在制作过程中经历两次装配过程, 装配冷却 (20 ℃) 后, 由于装配应力的存在, 内壁受压, 且应力较高, 此状态需进行强度校核, 以避免制造过程中内壁损坏。扁挤压筒工作前需预热, 从冷态 (20 ℃) 加热至 450 ℃, 此过程中筒内壁无工作压力; 之后正常工作, 结构温度仍处于 450 ℃, 内壁承受工作压力。另外, 还存在一类特殊工况, 即设备故障, 导致长时间闷车, 此时挤压筒结构内壁压力比正常工作时更大, 需计算校核此时的结构应力, 确保即使出现特殊工况, 筒结构也不会被损坏。

由于各工况温差较大, 材料在不同温度下的力学性能 (屈服强度、杨氏模量和热膨胀系数等) 变化明显, 且材料力学性能的改变会对结构强度及变形产生直接影响, 所以计算时需重点考虑温度的影响。

## 3 扁挤压筒结构计算关键参数的设置

由式 (3) ~ 式 (6) 可知, 筒结构强度计算关

键参数为内外径比  $K$ 、挤压筒内压  $p_{ri}$ 、杨氏模量  $E$ 、过盈配合系数  $\varepsilon_1$  和  $\varepsilon_2$  以及结构温度。以下讨论各参数在数值计算时的处理。

### 3.1 各层结构的内外径比 $K$

内外径比为结构本身属性, 建模准确即可; 反之, 如果强度计算结果不理想, 可以调整内外径比  $K$  来进行结构优化。

### 3.2 挤压筒内压 $p_{ri}$

挤压筒内压  $p_{ri}$  为挤压过程中作用于挤压筒内的径向压力。由于锭坯与筒内壁的摩擦力, 此径向压力实际上低于轴向挤压力对锭坯作用所产生的单位压力  $p_0$  ( $p_0 = F/A_T$ ,  $F$  为轴向挤压力,  $A_T$  为挤压筒内孔横截面积)。根据经验, 挤压筒内压  $p_{ri}$  通常取  $(0.6 \sim 0.8)p_0$ 。对于锭坯与挤压筒之间摩擦力较小的合金 (如铜、铁等), 内压取上限值; 对于轻金属及其合金, 内压取下限值。本文研究的扁挤压筒, 其挤压坯料为铝合金, 根据金属成形仿真结果及经验总结, 正常工作时挤压筒内压  $p_{ri}$  取  $0.75p_0$ ; 对于极端的闷车工况, 挤压筒内压  $p_{ri}$  取  $p_0$ 。

### 3.3 杨氏模量 $E$

杨氏模量为材料的固有属性, 根据挤压筒使用材料对杨氏模量进行设置。由于大部分工况下内衬应力最大, 并经受挤压过程时的磨损, 其材料选择比外层结构要求更高, 如本文要计算的 250 MN 挤压筒, 其内衬材料为 H13 钢, 中衬和外套材料选用 5CrNiMo 钢。由于扁挤压筒的工况温度在 20 ~ 450 ℃ 间变化, 则材料的杨氏模量也会随着温度的变化而变化, 如图 2 所示, 根据试验测得数据进行参数设置。

### 3.4 过盈配合的接触算法

模拟内衬-中衬及中衬-外套过盈装配时采用直

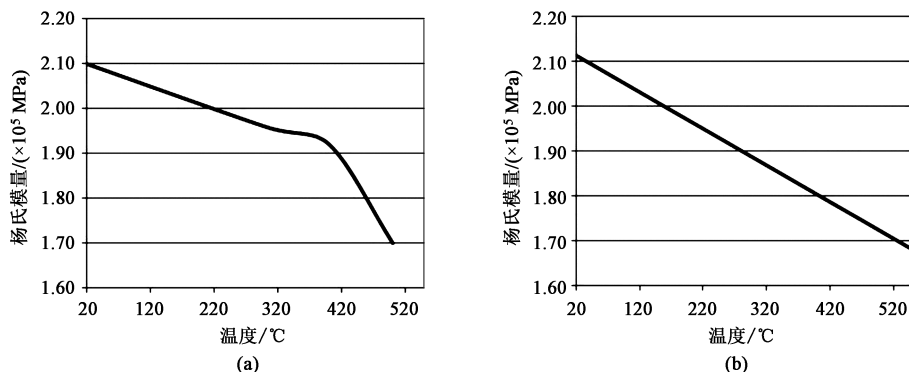


图 2 不同材料的杨氏模量随温度的变化曲线

(a) H13 钢 (b) 5CrNiMo 钢

Fig. 2 Variation curves of Young's modulus for different materials with temperature

(a) H13 steel (b) 5CrNiMo steel

接约束的接触算法。不设置接触单元,直接将参与接触的内衬、中衬及外套结构定义为变形体。追踪参与运算的变形体节点的运动轨迹,一旦探测出接触体的节点被投影到被接触体与之最近的面段上,算法会在接触节点上产生一个距离向量,该向量则按照给定的数值(即装配时过盈量的值)被修改,并用于调整对应接触体的表面,而不需要对节点重新进行定位。在分析过程中,距离向量基于关联节点的位移和转动被持续更新。采用该方法的优点是

各接触体由于偏置带来的应力分布更为均匀,过盈装配的效果能更充分地作用于挤压筒各层的结构微元体。

### 3.5 结构温度

首先,定义结构所用材料在不同温度下的热膨胀系数和屈服强度等,试验测得的数据如图3和图4所示;然后,设置各工况初始温度状态及温度值来等效结构温度对结构强度计算的影响。

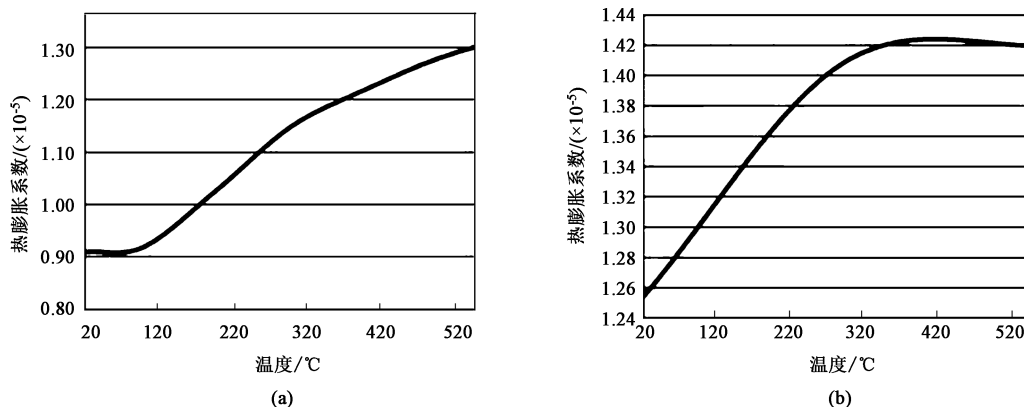


图3 不同材料的热膨胀系数随温度的变化曲线

(a) H13 钢 (b) 5CrNiMo 钢

Fig. 3 Variation curves of thermal expansion coefficient for different materials with temperature

(a) H13 steel (b) 5CrNiMo steel

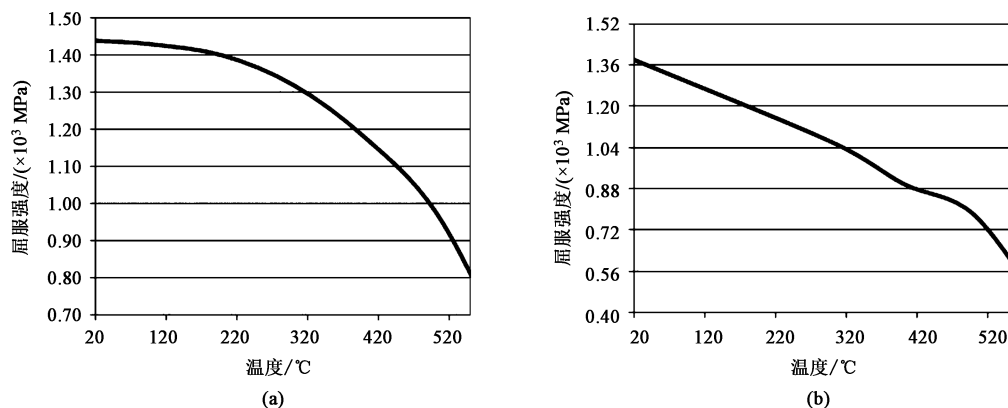


图4 不同材料的屈服强度随温度的变化曲线

(a) H13 钢 (b) 5CrNiMo 钢

Fig. 4 Variation curves of yield strength for different materials with temperature

(a) H13 steel (b) 5CrNiMo steel

## 4 扁挤压筒强度计算有限元仿真

以 250 MN 铝挤压机扁挤压筒为例,使用有限元法对其进行结构强度分析。

### 4.1 有限元计算前处理

模型基本结构的处理包括:(1)挤压筒为对称结构,为节约计算资源,使用 1/4 模型并附加对称面位移约束进行仿真;(2)挤压筒长度为 2.5 m,加压长度为 2.3 m,建模时在内衬内壁分离出相应

长度的面用于工作工况时加压。

扁挤压筒初装配后变形不均匀的处理包括：扁挤压筒在第 1 步内衬-中衬过盈装配后产生变形，其变形量及变化趋势如图5所示，由于内孔非圆形，

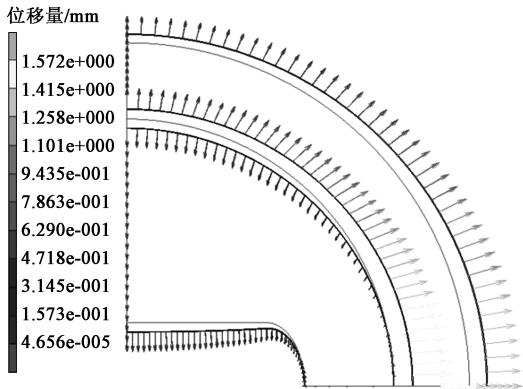


图 5 第 1 步装配后的结构位移  
Fig. 5 Structural displacement after assembling in step 1

过盈装配后中衬外径在圆周方向各点的变形量不同，中衬外径变形后是一个类似椭圆的曲线，根据提取的节点位移结果，内孔短边方向变形值为 1.36 mm、长边方向变形值为 0.625 mm，由于中衬-外套单边过盈量数值在 2~3 mm，两者数量级接近，第 1 步装配产生的变形不能忽略，否则会影响中衬-外套的装配效果，需要在第 2 步装配计算前，将中衬模型外径根据这个变形结果作相应修改（对应于实际装配时对中衬外表面的精加工），保证第 2 步装配时的中衬外径与外套内径过盈量同实际工况一致。

模型网格划分的处理包括：为避免由单元质量产生的计算误差，使用映射（Mapped）网格划分方法生成六面体单元，注意控制各层单元节点的位置，使内衬、中衬及外套在圆周及长度方向有同样的单元数且相邻层面上的节点处于同一位置，如图 6 所示。

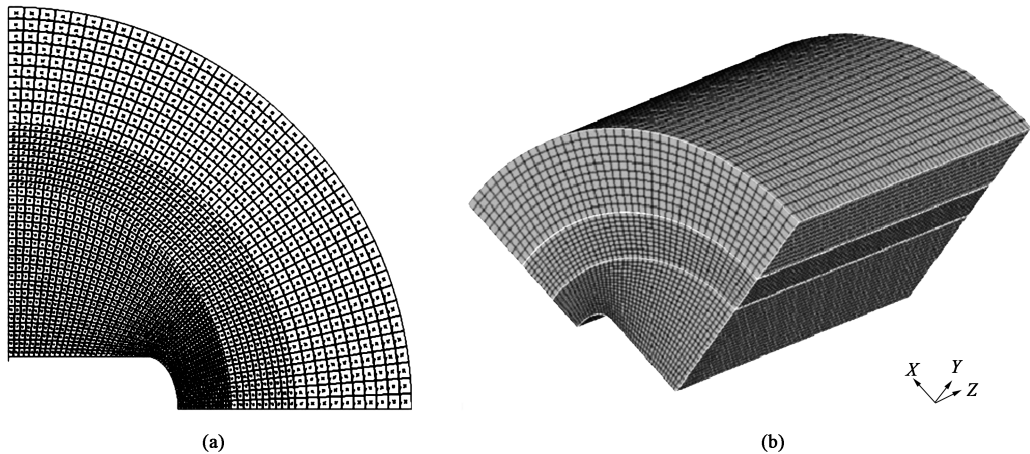


图 6 3 层扁挤压筒的有限元模型  
(a) 正视图 (b) 轴向侧视图  
Fig. 6 FEM of three-layer flat extrusion cylinder  
(a) Front view (b) Axial side view

工况的设置处理包括：根据扁挤压机载荷特点，总结得到 5 类工况，如表 1 所示。

4.2 有限元求解设置及计算结果分析

考虑到扁挤压筒结构受到装配应力、热应力及工作内压产生的应力，有限元计算分析选取热-结构耦合分析，选定初始载荷（对称面约束、端面约束、内壁面压、初始温度值）、设置接触控制（有初始接触、接触特性为库伦双线性、接触方法为节点对面段）、选择需要的分析结果（等效应力及各方向变形值）、检查并提交分析任务。由于接触计算的高度非线性特征，求解计算可能会不收敛，在计算过程中需实时监控接触对（Contact Pair）数

表 1 扁挤压筒的强度计算工况  
Table 1 Strength calculation conditions of flat extrusion cylinder

工况	载荷状态
1	内衬-中衬过盈装配，结构温度为 20 ℃
2	内衬-中衬-外套过盈装配，结构温度为 20 ℃
3	过盈装配后；初始结构温度为 20 ℃，施加的温度值为 450 ℃，筒内孔径向压力为 0 MPa（空载）
4	过盈装配后；初始结构温度为 20 ℃，施加的温度值为 450 ℃，筒内孔径向压力为 342 MPa
5	过盈装配后；初始结构温度为 20 ℃，施加的温度值为 450 ℃，筒内孔径向压力为 456 MPa

值变化是否正常。同时,关注奇异比与收敛比,若数值越来越小并出现接近零的值(形式如  $2.03\text{e}-005$ ),表明计算顺利;若收敛比数值在 2 位数或 3 位数以上震荡,则表明计算前处理或计算方式的选择不合适,需要退回检查并重新设置。计算完成后对表 1 中 5 类工况结果进行后处理。提取扁挤压筒各工况下的应力,并绘制图 7 所示的云图。

由图 7 可知:由于内孔形状为非标准圆形,扁挤压筒各层均存在明显的局部小范围高应力区,且内壁应力高于外壁;结构最高应力值出现在内衬,位于内孔短边弧线附近。工况 4,即正常工作时结构的应力分布状况最好,此工况为扁挤压筒最常使用状态,均匀的应力分布状态表明此扁挤压筒各层材料、分层及过盈量的设置是合理的。

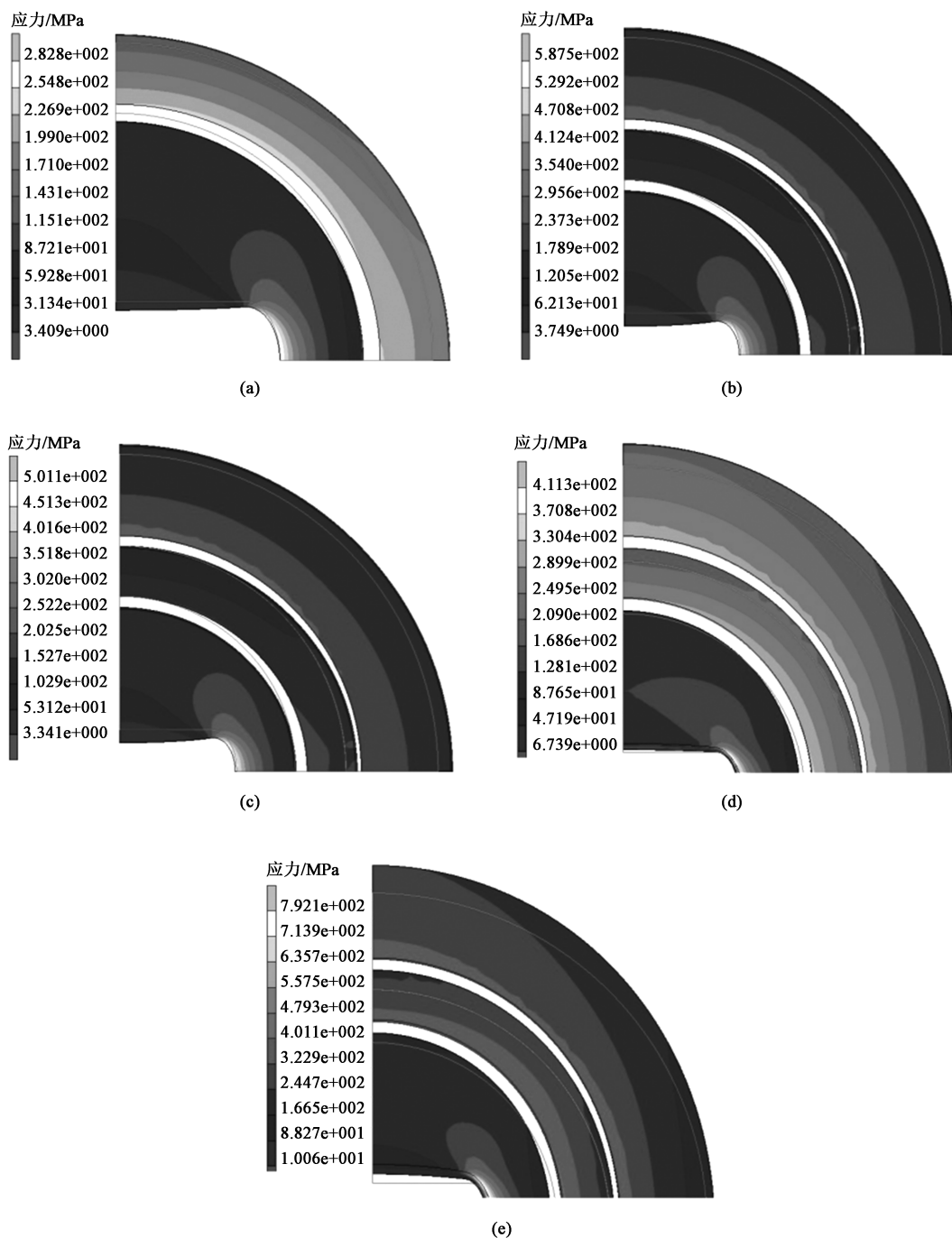


图 7 扁挤压筒各工况下的应力云图

(a) 工况 1 (b) 工况 2 (c) 工况 3 (d) 工况 4 (e) 工况 5

Fig. 7 Stress nephograms of flat extrusion cylinder under different working conditions

(a) Working condition 1 (b) Working condition 2 (c) Working condition 3 (d) Working condition 4 (e) Working condition 5

扁挤压筒内孔各工况下的变形趋势如图 8 所示。内孔长边在装配空载时受压、在工作状态时受拉，与圆形挤压筒的内壁受力一致，是典型的交变循环

荷载；而内孔短边在装配和工作状态时均受压（压力值不同），虽然仍受到周期变化的载荷，但已接近单向循环载荷，破坏性要小于交变循环载荷。

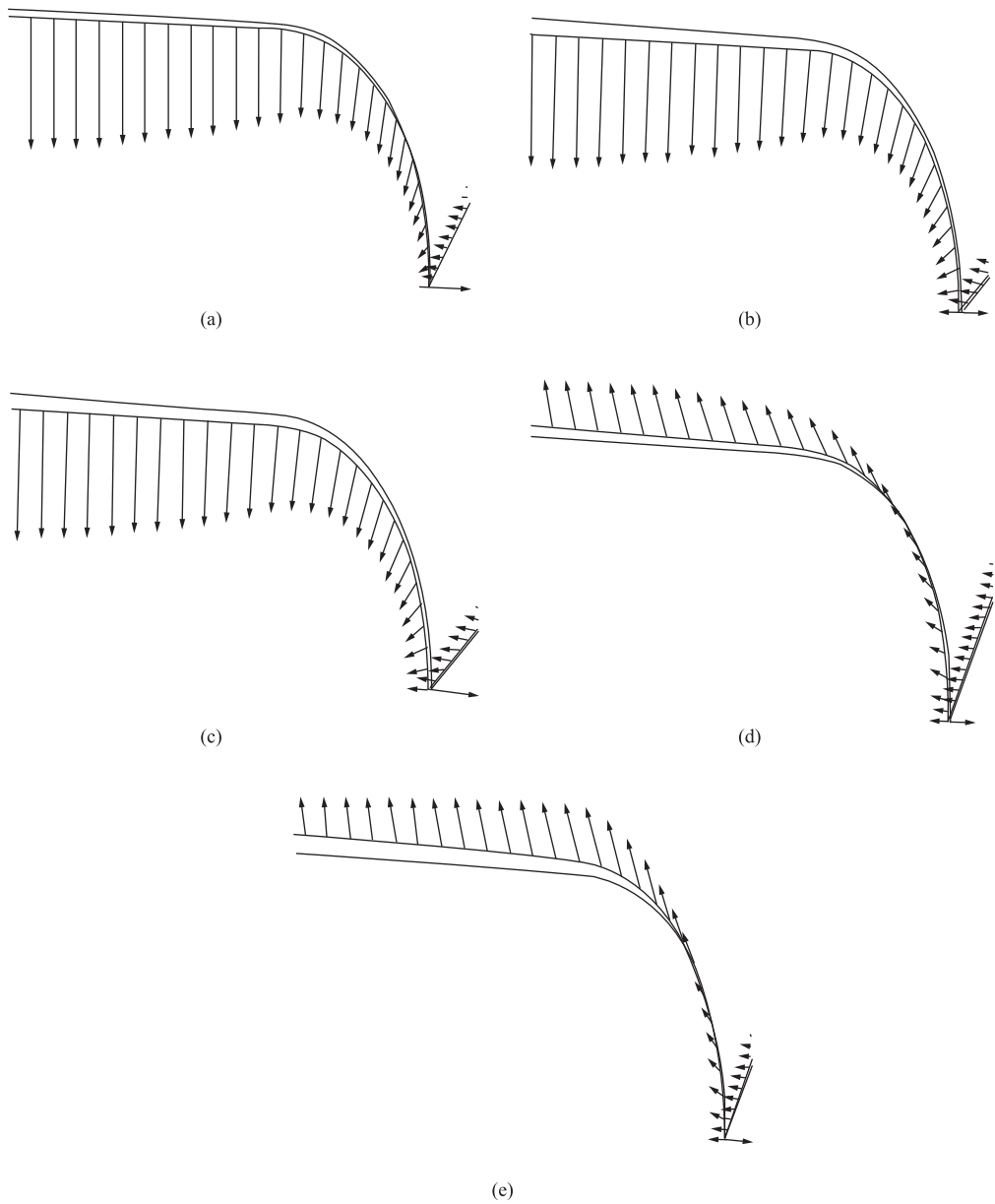


图 8 扁挤压筒内孔各工况下的变形趋势图

(a) 工况 1 (b) 工况 2 (c) 工况 3 (d) 工况 4 (e) 工况 5

Fig. 8 Deformation trend diagrams of inner hole for flat extrusion cylinder under different working conditions

(a) Working condition 1 (b) Working condition 2 (c) Working condition 3 (d) Working condition 4 (e) Working condition 5

扁挤压筒的内衬、中衬及外套在各工况下的最大应力值如表 2 所示。内衬材料 H13 钢在 20 ℃ 时的屈服强度为 1430 MPa，在 450 ℃ 时的屈服强度为 1080 MPa；中衬及外套材料 5CrNiMo 钢在 20 ℃ 时的屈服强度为 1380 MPa，在 450 ℃ 时的屈服强度为 840 MPa。结合各层结构最大应力可得出 5 类工况下

结构的安全系数（安全系数=材料屈服应力值/应力计算值），如表 3 所示。

由表 3 可知：在前 4 种工况下，安全系数均超过 2.00；在最后一特殊工况即工况 5 下，安全系数为 1.36，由于这种情况极少出现，且安全系数大于 1.22，可以认为结构是满足强度要求的。

表 2 扁挤压筒各层结构的应力的计算值 (MPa)  
Table 2 Calculated values of stress for each layer  
structure of flat extrusion cylinder (MPa)

工况	内衬	中衬	外套
1	282.8	256.6	—
2	587.5	214.4	295.4
3	501.1	185.4	247.6
4	411.3	354.1	322.1
5	792.1	430.9	377.2

表 3 扁挤压筒各层结构的安全系数  
Table 3 Safety factor for each layer structure of flat  
extrusion cylinder

工况	内衬	中衬	外套
1	5.06	5.38	—
2	2.43	6.44	4.67
3	2.16	4.53	3.39
4	2.63	2.37	2.61
5	1.36	1.95	2.23

## 5 结语

本文分析了扁挤压筒装配及工作全过程的载荷特点及影响扁挤压筒强度的几类关键参数,以 250 MN 的 3 层扁挤压筒为例,采用有限元法对扁挤压筒进行热-结构耦合分析,得出各类工况下的应力云图及内衬高应力区的位移趋势,总结了扁挤压筒结构的应力场规律,求出各层结构的安全系数,直观地显示了结构各部分的安全裕度,表明此扁挤压筒结构设计满足强度要求,为设计及制造提供技术支持。本研究提供了扁挤压筒全过程强度计算的有限元法,有助于对扁挤压筒进行更深入的疲劳计算及破坏规律研究。

### 参考文献:

[1] 魏军. 金属挤压机 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.  
Wei J. Metal Extrusion Press [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006.

[2] 叶尔曼诺克, 李西铭, 张淦泉. 铝合金壁板挤压 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1988.  
Губкин С И, Li X M, Zhang L Q. Wide Flats Extrusion of Aluminum Alloy [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1988.

[3] 王少华, 刘惠, 陈宗强, 等. 大型带筋薄壁圆管铝型材挤压成形数值模拟 [J]. 锻压技术, 2022, 47 (4): 181-189.  
Wang S H, Liu H, Chen Z Q, et al. Numerical simulation on

extrusion forming for large ribbed thin-walled circular tube aluminum profile [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (4): 181-189.

[4] 岳鹏, 成小乐, 尹君. 5 MN 扁挤压筒优化设计 [J]. 西安工程大学学报, 2017, 33 (5): 657-661.  
Yue P, Cheng X L, Yin J. Optimization design of 5 MN flat container [J]. Journal of Xi'an Polytechnic University, 2017, 33 (5): 657-661.

[5] 邓亮. 汽车用金属板料热成形过程中摩擦行为研究进展 [J]. 锻压技术, 2022, 47 (4): 14-20.  
Deng L. Research progress on friction behavior during thermoforming for automotive sheet metal [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (4): 14-20.

[6] 胡志力, 芦俊杰, 华林. 铝合金热冲压技术研究进展 [J]. 锻压技术, 2022, 47 (2): 1-11.  
Hu Z L, Lu J J, Hua L. Review of hot stamping technology for aluminum alloy [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (2): 1-11.

[7] 尹君, 成小乐, 胥光申, 等. 应力释放扁挤压筒的优化设计 [J]. 西安交通大学学报, 2018, 52 (7): 146-152.  
Yin J, Cheng X L, Xu G S, et al. Optimal structure design of flat container by stress release [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2018, 52 (7): 146-152.

[8] 刘丰. 管材滚压剪切过程的数值模拟及关键设备的研究 [D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2009.  
Liu F. Simulation of the Tube Roll-cutting Process and Key Equipment Design [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2009.

[9] 叶拓, 王冠, 姚再起, 等. 汽车用 6xxx 系铝合金薄壁件的韧性断裂行为 [J]. 中国有色金属学报, 2014, 24 (4): 878-887.  
Ye T, Wang G, Yao Z Q, et al. Ductile fracture behavior of 6xxx aluminum alloy thin-walled components of automobile [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2014, 24 (4): 878-887.

[10] 陈晓伟, 万敏, 王文平. 金属板料预应力成形技术研究进展 [J]. 锻压技术, 2022, 47 (7): 1-8.  
Chen X W, Wan M, Wang W P. Research progress on pre-stress forming technology for sheet metal [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (7): 1-8.

[11] 吕志敏, 江豪. 5052 铝合金薄型封板冲压缺陷仿真分析 [J]. 锻压技术, 2022, 47 (9): 99-104, 181.  
Lyu Z M, Jiang H. Simulation analysis on stamping defects for 5052 aluminum alloy thin sealing plate [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (9): 99-104, 181.

[12] 刘康宁, 郎利辉, 续秋玉. 5A06 铝合金板材热态本构模型及韧性断裂准则 [J]. 西南交通大学学报, 2018, 53 (1): 214-218.  
Liu K N, Lang L H, Xu Q Y. Modified constitutive model and ductile fracture criterion for 5A06 Al-alloy sheets at elevated temperatures [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2018, 53 (1): 214-218.