

文章编号: 1000-4750(2011)05-0207-05

# 预应力钢丝缠绕剖分-组合大型挤压筒的热应力分析

刘长勇<sup>1,2</sup>, \*张人佶<sup>1,2</sup>, 颜永年<sup>1,2</sup>, 林 峰<sup>1,2</sup>, 张 磊<sup>1,2</sup>

(1. 清华大学机械工程系, 北京 100084; 2. 清华大学先进材料成形制造教育部重点实验室, 北京 100084)

**摘 要:** 预应力钢丝缠绕剖分-组合挤压筒与传统挤压筒相比具有重量轻、疲劳性能好、制造难度与成本低等优势。传统的预应力钢丝缠绕筒体理论计算方法忽略了温度的影响, 不适宜于热挤压筒的设计计算。该文采用线性热弹性理论、预应力钢丝缠绕理论以及弹性力学理论对挤压筒在预紧状态、预热状态和工作状态下的应力分布分别进行了分析, 得出应力分布的解析公式。理论分析和计算证明, 预紧系数、挤压筒内表面温度对稳态温度场下挤压筒的热应力分布起决定作用, 通过调整挤压筒的内表面温度和预紧系数可使热应力控制在许用范围内, 从理论上证实了在一维稳态温度场假设下预应力钢丝缠绕剖分-组合挤压筒的可行性, 目前该类型的挤压筒已应用于我国已建成的 360MN/150MN 垂直挤压机组中。

**关键词:** 稳态温度场; 预应力钢丝缠绕; 剖分-组合; 热应力; 挤压筒

**中图分类号:** TG375<sup>+</sup>.43 **文献标识码:** A

## THERMAL STRESS ANALYSIS ON WIRE WINDED SUBDIVIDED-COMBINED LARGE EXTRUSION CONTAINER

LIU Chang-yong<sup>1,2</sup>, \*ZHANG Ren-ji<sup>1,2</sup>, YAN Yong-nian<sup>1,2</sup>, LIN Feng<sup>1,2</sup>, ZHANG Lei<sup>1,2</sup>

(1. Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Key Laboratory for Advanced Materials Processing Technology, Ministry of Education, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** Wire wound subdivided-combined extrusion containers has a wide range of advantages over traditional extrusion containers such as lower weight, improved fatigue performance, easier to manufacture and lower cost. Classic analytical solutions are derived without considering the influence of temperature which apparently cannot be applied to design a hot extrusion container. The theoretical derivation of stress distribution based on the consumption of a one-dimensional steady state temperature field was conducted. The analytical solution was obtained using linear thermoelasticity, wire winding theory and elasticity. The theoretical analysis and calculations indicate that the pre-stress factor and inner surface temperature of the container have important influence on the thermal stress distribution of the container. Thermal stress can be reduced to a value which is lower than the allowed stress by adjusting the inner surface temperature and pre-stress factor. Extrusion containers designed by this method have been applied to the 360MN/150MN vertical extrusion equipments.

**Key words:** steady state temperature field; pre-stressed wire winding; subdivided-combined; thermal stress; extrusion container

挤压筒是挤压工艺中极为重要的挤压工具, 其工作环境恶劣, 尤其是在热挤压状态下, 挤压筒承

受高温、高压、高摩擦。目前, 绝大多数的挤压筒采用多层组合过盈热装的结构, 这种结构通过多层

收稿日期: 2009-10-26; 修改日期: 2010-03-04

作者简介: 刘长勇(1984—), 男, 山东泰安人, 博士生, 从事重型装备设计与优化领域的研究(E-mail: liu-cy06@mails.tsinghua.edu.cn);

\*张人佶(1944—), 男, 北京人, 教授, 博士, 从事快速成型与快速制造领域的研究(E-mail: zhangrj@mail.tsinghua.edu.cn);

颜永年(1938—), 男, 北京人, 教授, 学士, 长期从事重型装备设计、制造与优化领域的研究(E-mail: dmeyyn@tsinghua.edu.cn);

林 峰(1966—), 男, 北京人, 副教授, 博士, 长期从事重型装备设计与制造领域的研究(E-mail: linf@tsinghua.edu.cn);

张 磊(1976—), 男, 北京人, 讲师, 博士, 从事重型装备设计与制造领域的研究(E-mail: stoneszhang@tsinghua.edu.cn).

筒体之间的过盈配合来施加预紧力,能够改善挤压筒的受力条件,使挤压筒中的应力分布均匀,增加承载能力,提高挤压筒的寿命<sup>[1-3]</sup>。其中,以三层的组合挤压筒最为常见,缪勒提出,挤压筒外套外径应为内衬内径的4倍-5倍,并在工程应用普遍使用<sup>[4]</sup>。这种挤压筒的尺寸以及重量庞大,以应用于大口径无缝钢管挤压的重型挤压筒为例,内径最大可至1700mm-1800mm,高度可达2000mm,若采用多层组合筒体结构,其重量可至400t-500t,采用热作模具钢锻制而成,造价极其高昂。由于挤压筒的外径尺寸大,大大增加了对设备空间尺寸的要求,直接造成设备投资增加,装配施工也具有一定难度。此外,多层组合装配的挤压筒外套承受较大的切向正应力,通常采用整体锻制而成。预应力钢丝缠绕结构具有承载能力大,疲劳强度高特点而被应用于重型承载机架、冷热等静压筒体等关键承载部件中。但目前应用的该类结构均是在室温下承载,传统的预应力钢丝缠绕筒体的计算方法也忽略了温度的影响,不适用于热挤压筒的设计计算。预应力钢丝缠绕热挤压筒曾有前苏联学者提出过<sup>[4]</sup>,但未见应用报道。这种挤压筒可使各层芯筒都可以得到有效预紧保护,从而使各层在工作状态下均处于压应力,大大提高了疲劳强度。在满足挤压筒强度的前提下可尽量降低 $K$ 值(即挤压筒的半径比),从而节省挤压筒和设备本体的投资,具有很好的经济效益。但在预应力钢丝缠绕筒体中,钢丝由于应力松弛和蠕变问题,使用温度限制在 $80^{\circ}\text{C}$ 以下,而内表面在挤压之前需预热至 $250^{\circ}\text{C}-350^{\circ}\text{C}$ ,筒体内温度分布不均匀,因此热应力是不可忽略的。因此,在传统预应力钢丝缠绕筒体的理论计算方法的基础上考虑热应力对应力场分布的影响具有重要意义,是预应力钢丝缠绕结构应用在热挤压筒上的基础,也是对传统设计计算方法的补充。

挤压筒在工作前需进行预热,预热时将高温坯料置于挤压筒内,内表面温度最高,向外温度逐渐降低,挤压筒在连续工作下,内部的温度场将逐渐达到稳态,本文将挤压筒的实际温度场简化为一维稳态问题,针对这种温度场下对热应力问题进行理论推导和计算,理论分析证明通过调整挤压筒的预紧系数和内表面的最高温度可使热应力控制在许用范围以内,从而为其实际应用提供依据。目前这种挤压筒已在我国正在制造的360MN/150MN垂直挤压机组上获得应用,重量仅为150t

左右。

## 1 预应力钢丝缠绕剖分-组合挤压筒

预应力钢丝缠绕挤压筒分为内层芯筒、中层芯筒、外层芯筒和钢丝层四部分,其中内层芯筒与中层芯筒均为整体筒,而外套部分剖分为四个子件,均由锻钢改为铸钢,从而降低成本,在外层芯筒上有钢丝槽,用于钢丝缠绕。各层筒体之间均为过渡配合,装配简单,通过钢丝缠绕成为一个整体,可精确控制预应力的施加,见图1。挤压筒的应力状态可以分为如下3个状态:

1) 预紧状态。在常温下对筒体进行缠绕预紧后筒体内的应力状态。

2) 预热状态。在挤压过程进行之前,对挤压筒预热,内表面温度最高为 $T_i$ ,钢丝缠绕界面与钢丝层上的温度均为 $T_j$ , $T_j \leq 80^{\circ}\text{C}$ 。

3) 工作状态。在热挤压过程中,挤压筒承受高达150MPa-200MPa的内压。

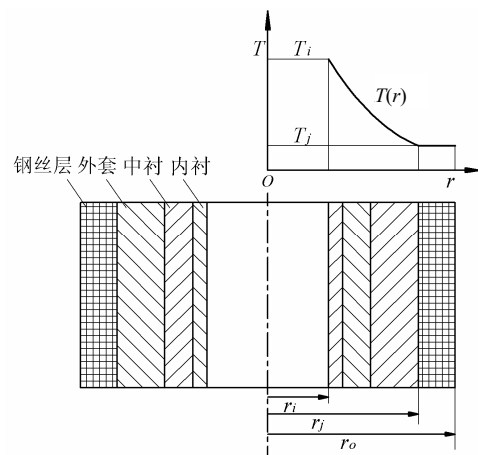


图1 预应力钢丝缠绕剖分-组合挤压筒结构与温度场  
Fig.1 Structure and temperature field of pre-stressed wire-wound subdivided-combined extrusion container

将挤压筒内部的温度场假设为一维稳态,忽略挤压筒端部以及钢丝槽的影响,简化为轴对称模型,则有柱坐标系下的导热微分方程为:

$$\frac{d^2 T}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dT}{dr} = 0 \quad (1)$$

边界条件为:

$$r=r_i \text{ 时, } T=T_i; \quad r=r_j \text{ 时, } T=T_j$$

则筒体内部的温度场为:

$$T = T_i + \frac{T_j - T_i}{\ln(r_j / r_i)} \ln(r / r_i) \quad (2)$$

而在钢丝层内温度假设为 $T=T_j$ 。

## 2 三种状态下的应力场分析

### 2.1 预紧状态

挤压筒的预紧是根据预紧系数  $\eta$  设计缠绕工艺, 芯筒可看作一个承受  $\sigma_{grj}$  外压的空心筒体, 是由钢丝层对筒体产生  $\sigma_{grj}$  的径向面压。根据等剪力缠绕方程, 在合成状态下<sup>[5]</sup>:

$$\sigma_{rj} = [\sigma]' \ln(r_j / r_o) \quad (3)$$

在预紧状态下:

$$\sigma_{grj} = [\sigma]' \ln(r_j / r_o) - [\sigma_r]_{r=r_j}^{p=p_i} \quad (4)$$

其中,  $[\sigma]'$  为钢丝许用应力,  $[\sigma_r]_{r=r_j}^{p=p_i}$  为由工作内压  $p_i$  在挤压筒(包括缠绕层)在  $r_j$  处的径向应力, 可根据拉美公式求解。由此, 即可求出预紧状态下各层筒体内的应力分布。

### 2.2 预热状态<sup>[6-8]</sup>

在预热状态下, 由于温度场发生变化, 沿筒体径向温度分布不均匀, 从而产生热应力。同时, 筒体会发生热膨胀, 钢丝层作用在筒体上的径向面压  $\sigma_{grj}$  会增加, 此时:

$$\sigma_{grj} = [\sigma_{grj}]_{prepress} + [\sigma_{grj}]_{heated} \quad (5)$$

其中:  $[\sigma_{grj}]_{prepress}$  为预紧状态下产生的缠绕界面面压, 用式(4)计算;  $[\sigma_{grj}]_{heated}$  为预热状态下由于温度膨胀而导致的缠绕界面面压增加, 传统的预应力钢丝缠绕筒体中不考虑此项。因此, 求解预热状态下的应力分布的关键即为  $[\sigma_{grj}]_{heated}$  的求解以及芯筒内温度分布不均匀而导致的热应力。预热状态下的应力场可分解为内外表面均为自由的空心筒体的热应力与预热状态下  $\sigma_{grj}$  引起的应力分布的线性叠加。

#### 2.2.1 内外表面自由空心筒体的热应力

在一维稳态温度场下, 内外表面无约束筒体的热应力为:

$$\begin{cases} \sigma_r = \frac{\alpha E(T_i - T_j)}{2(1-\mu)\ln(r_j/r_i)} \left[ -\ln \frac{r_j}{r} - \frac{r_i^2}{r_j^2 - r_i^2} \left( 1 - \frac{r_j^2}{r^2} \right) \ln \frac{r_j}{r_i} \right] \\ \sigma_\theta = \frac{\alpha E(T_i - T_j)}{2(1-\mu)\ln(r_j/r_i)} \left[ 1 - \ln \frac{r_j}{r} - \frac{r_i^2}{r_j^2 - r_i^2} \left( 1 + \frac{r_j^2}{r^2} \right) \ln \frac{r_j}{r_i} \right] \\ \sigma_z = \frac{\alpha E(T_i - T_j)}{2(1-\mu)\ln(r_j/r_i)} \left[ 1 - 2\ln \frac{r_j}{r} - \frac{2r_i^2}{r_j^2 - r_i^2} \ln \frac{r_j}{r_i} \right] \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $\sigma_r$ 、 $\sigma_\theta$ 、 $\sigma_z$  分别为径向、切向和轴向的热应力;  $E$  为弹性模量;  $\alpha$  为热膨胀系数;  $\mu$  为泊松比。

#### 2.2.2 $[\sigma_{grj}]_{heated}$ 的计算方法

由于筒体各层之间为过渡配合, 仅存在极小的过盈或间隙, 且材质均为性能相近的热作模具钢, 在计算时, 可将挤压筒内衬、中衬和外套看为一个筒体, 钢丝层也看成为一个筒体进行计算。 $[\sigma_{grj}]_{heated}$  等效为过盈量为 0 时由温度场变化而导致的钢丝层与筒体之间的接触面压。

对芯筒而言, 在柱坐标系下的热应力为:

$$\begin{cases} \sigma_r = -\frac{E}{1-\mu} \frac{\alpha}{r^2} \int_{r_i}^r t r dr + \frac{E}{(1+\mu)(1-2\mu)} C_1 - \frac{E}{1+\mu} \frac{C_2}{r^2} + \frac{E\mu}{(1+\mu)(1-2\mu)} k \\ \sigma_\theta = \frac{E}{1-\mu} \frac{\alpha}{r^2} \int_{r_i}^r t r dr + \frac{E}{(1+\mu)(1-2\mu)} C_1 + \frac{E}{1+\mu} \frac{C_2}{r^2} - \frac{E\alpha t}{1-\mu} + \frac{E\mu}{(1+\mu)(1-2\mu)} k \\ \sigma_z = \frac{2E\mu C_1}{(1+\mu)(1-2\mu)} - \frac{E\alpha t}{1-\mu} + \frac{E(1-\mu)}{(1+\mu)(1-2\mu)} k \end{cases} \quad (7)$$

其中:  $t$  为温度场变化与半径之间的函数关系, 式中的积分常数可以根据内外表面的边界条件求出, 对于筒体而言, 在预热状态下内表面径向压力为 0, 而外表面的径向压力为, 当  $r=r_i$  时,  $\sigma_r=0$ ;  $r=r_j$  时,  $\sigma_r=[\sigma_{grj}]_{heated}$ 。

又由于筒体两端开口, 不受作用力, 故轴向应力  $\sigma_z$  产生的轴向力为零, 即:

$$\int_{r_i}^{r_j} \sigma_z (2\pi r) dr = 0,$$

便可求出  $C_1$ 、 $C_2$  和  $k$ 。

对于钢丝层而言, 其可看作是一个承受内压  $[\sigma_{grj}]_{heated}$  的筒体。筒体与钢丝层在接触面上应保持变形协调, 因此  $[u_{rj}]_{cylinder}=[u_{rj}]_{wire}$ 。

对于筒体而言,

$$[u_{rj}]_{cylinder} = \frac{1+\mu}{1-\mu} \frac{\alpha}{r_j} \int_{r_i}^{r_j} t r dr + C_1 r_j + \frac{C_2}{r_j} \quad (8)$$

对钢丝层而言,

$$[u_{rj}]_{wire} = -\frac{1-\mu}{E_w} \frac{[\sigma_{grj}]_{heated}}{K^2-1} r_j - \frac{1+\mu}{E_w} \frac{[\sigma_{grj}]_{heated}}{K^2-1} \frac{r_o^2}{r_j} \quad (9)$$

其中:  $K=r_o/r_j$ ;  $E_w$  为钢丝层弹性模量, 由变形协调条件, 即可求解  $[\sigma_{grj}]_{heated}$ 。

### 2.3 工作状态

在工作状态下, 芯筒内的应力分布看作是由缠

绕界面面压引起的应力，工作内压引起的应力和内外表面自由的空心筒体的热应力的叠加。此时，缠绕界面上的面压为：

$$\sigma_{grj} = [\sigma_{grj}]_{prepress} + [\sigma_{grj}]_{heated} + [\sigma_r]_{r=r_j}^{p=p_i} \quad (10)$$

其中，工作内压引起的筒体内的应力分布可由拉美公式求解。

### 3 计算结果与分析

预应力钢丝缠绕剖分-组合挤压筒采用等剪力缠绕，根据等剪力缠绕方程、挤压筒各层的强度条件以及芯筒各层不失稳条件，可获得挤压筒的结构设计参数。图 2 为预紧系数  $\eta=1$  下挤压筒的结构参数。从前面的理论分析中可以看出，预紧系数  $\eta$  和芯筒内的温度分布决定了芯筒内热应力的分布。在预紧状态，由钢丝的预紧作用而在挤压筒内表面产生一定的预紧力；在预热状态由于内表面温度高，在芯筒内部温度分布不均匀，外层对内层形成压应力，挤压筒内表面会形成较大的切向压应力；在工作状态下，该切向压应力由于工作内压的作用而减小。因此，挤压筒内表面在预热状态下的切向压应力是预应力钢丝缠绕剖分-组合挤压筒最为关心的应力值，该值必须小于材料的屈服强度。

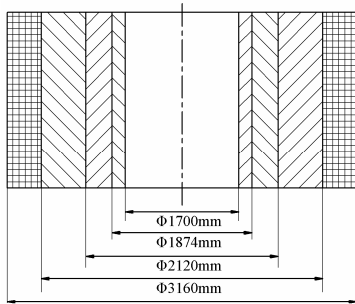


图 2 预紧系数为  $\eta=1$  下挤压筒的结构参数  
Fig.2 Dimensions of the container when  $\eta=1$

在挤压开始之前，要对挤压筒进行预热，挤压筒内表面预热温度通常为  $250^{\circ}\text{C} - 350^{\circ}\text{C}$ ，取 3 个不同的内表面预热温度： $250^{\circ}\text{C}$ 、 $300^{\circ}\text{C}$ 、 $350^{\circ}\text{C}$  以及不同的预紧系数  $\eta=0.5$ 、 $\eta=1$  和  $\eta=1.5$ ，分别计算了芯筒在无钢丝层作用下不同温度分布的挤压筒芯筒内的切向压应力， $\eta=1$  时芯筒在不同温度分布下的切向压应力和内表面温度为  $250^{\circ}\text{C}$  时不同预紧系数下的切向压应力，芯筒内的切向压应力沿半径方向变化的曲线分别见图 3—图 5，内表面切向压应力值列于表 1。

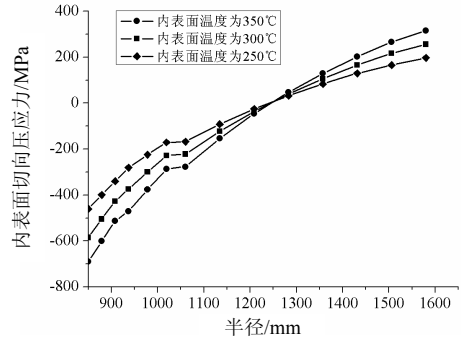


图 3 无钢丝层芯筒在不同内表面温度下的热应力  
Fig.3 Thermal stress at different  $T_i$  without steel wire

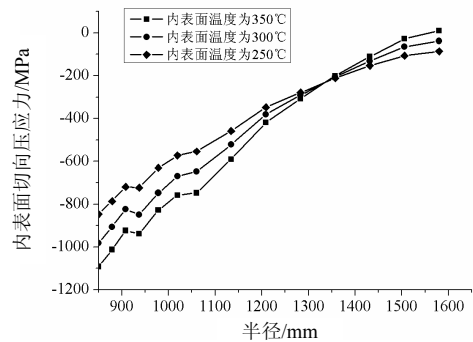


图 4  $\eta=1$  时芯筒在不同内表面温度下的热应力  
Fig.4 Thermal stress at different  $T_i$  when  $\eta=1$

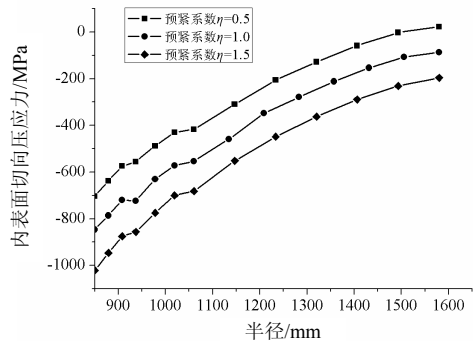


图 5  $T_i=250^{\circ}\text{C}$  时芯筒在不同预紧系数下的热应力  
Fig.5 Thermal stress at different  $\eta$  when  $T_i=250^{\circ}\text{C}$

表 1 不同条件下内表面应力值

项目	无钢丝层作用			预紧系数为 1			内表面温度为 $250^{\circ}\text{C}$		
	250°C	300°C	350°C	250°C	300°C	350°C	$\eta=0.5$	$\eta=1$	$\eta=1.5$
内表面切向压应力/MPa	-460.3	-584.7	-689.5	-846.6	-982.5	-1091.7	-702.8	-846.6	-1021.2
Tresca 应力/MPa	460.3	584.7	689.5	846.6	982.5	1091.7	702.8	846.6	1021.2
等效应力/MPa	424.9	537.6	633.3	823.4	950.9	1045.7	680.2	823.4	978.5

从图 3—图 5 以及表 1 中可以看出，芯筒内的应力随着内表面温度的升高和预紧系数的增大而增加，而且随着温度的升高热应力的分布更为不均，预紧系数的增加可使芯筒热应力增大，但并不

改变热应力分布的均匀程度。作为承载最危险的位置,挤压筒内衬通常采用热作模具钢,如 H13 等制造,其不同温度下的许用应力如表 2 所示,取其许用应力 $[\sigma]=850\text{MPa}$ ,此时安全系数 $n_s=\sigma_s/[\sigma]=1.65$ 。从表 1 中不难看出,在内表面温度为 $250^\circ\text{C}$ 和预紧系数为 1 时内表面的 Tresca 应力 $\sigma_1-\sigma_3=846.6\text{MPa}<[\sigma]$ 。因此,对预应力钢丝缠绕挤压筒而言,不宜采用较高的预热温度,过高的预热温度会导致过大的内表面切向压应力,同时考虑到在钢的热挤压中,通常有一定厚度的玻璃润滑剂层在钢锭与挤压筒内表面之间进行隔热,隔热效果良好,因此在使用中采用较低的预热温度也是可行的<sup>[9-11]</sup>。此外,预紧系数 $\eta$ 不宜大于 1,过大的预紧系数也会导致挤压筒内表面压应力过高。

表 2 不同温度下 H13 的屈服强度

Table 2 Yield strength of H13 at different temperatures

温度/ $^\circ\text{C}$	200	300	400	500
屈服强度/ $\text{MPa}$	1450	1380	1250	1180

## 4 结论

本文针对预应力钢丝缠绕剖分-组合挤压筒的热应力问题,将芯筒内的温度场简化为一维稳态,进行了热应力的理论分析与计算。计算结果表明挤压筒内表面在预热状态下的切向正压应力较高是设计中最为关心的问题,通过调整挤压筒的预紧系数和挤压筒内表面的预热温度可使该值控制在许用应力范围以内。对预应力钢丝缠绕剖分-组合挤压筒,针对钢的热挤压工艺特点,使预热温度低于 $250^\circ\text{C}$ ,预紧系数小于 1,稳态热应力的计算从理论上证实在该种条件下预应力钢丝缠绕剖分-组合挤压筒是可行的,目前采用该设计的挤压筒已在我国 360MN/150MN 垂直挤压机组中获得应用。本文仅讨论了稳态温度场下的热应力,工程上的应用仍需考虑挤压筒在预热过程中瞬态温度场下的热应力。

### 参考文献:

[1] 赵云路,刘静安. 挤压筒的优化设计(1)[J]. 轻合金加工技术, 1996, 24(6): 34-41.

- Zhao Yunlu, Liu Jing'an. Optimal design of extrusion die (1) [J]. Light Alloy Fabrication Technology, 1996, 24(6): 34-41. (in Chinese)
- [2] 洪深泽,李世芳. 挤压工艺及模具设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 1995.
- Hong Shenze, Li Shifang. Extrusion technology and die design [M]. Beijing: China Machine Press, 1995. (in Chinese)
- [3] 樊纲. 热挤压模具设计及制造基础[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2001.
- Fan Gang. Hot extrusion die design and manufacturing basics [M]. Chongqing: Chongqing University Press, 2001. (in Chinese)
- [4] 魏军. 金属挤压机[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- Wei Jun. Metals extrusion presses [M]. Beijing: Chemical Industrial Press, 2006. (in Chinese)
- [5] 颜永年,俞新陆. 机械设计中的预应力结构[M]. 北京: 机械工业出版社, 1989.
- Yan Yongnian, Yu Xinlu. Pre-stressed structures in mechanical design [M]. Beijing: China Machine Press, 1989. (in Chinese)
- [6] 李维特,黄保海. 热应力理论分析及应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- Li Weite, Huang Baohai. Theoretical analysis and application of thermal stress [M]. Beijing: China Power Press, 2004. (in Chinese)
- [7] 顾泽同. 工程热应力[M]. 北京: 国防工业出版社, 1987.
- Gu Zetong. Engineering thermal stress [M]. Beijing: National Defense Industrial Press, 1987. (in Chinese)
- [8] 温崇哲. 热工及热应力基础[M]. 北京: 机械工业出版社, 1982.
- Wen Chongzhe. Thermal stress basics [M]. Beijing: China Machine Press, 1982. (in Chinese)
- [9] Jens Groenbaek, Erik Blem Nielsen. Stripwound containers for combined radial and axial prestressing [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1997, 71: 30-35.
- [10] Ajiboye J S, Adeyemi M B. Effects of extrusion variables on temperature distribution in axisymmetric extrusion process [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2008, 50: 522-537.
- [11] Thomas érts Pedersen. Numerical studies of low cycle fatigue in forward extrusion dies [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2000, 105: 359-370.