

## 整体壁板扁挤压组合筒的光弹性应力分析

许在文<sup>1</sup>, 王美芹<sup>1</sup>, 王炯华<sup>1</sup>, 刘全坤<sup>2</sup>

(1. 合肥工业大学 土木建筑工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 合肥工业大学 材料科学与工程学院, 安徽 合肥 230009)

**摘要:**采用三维光弹性法对扁挤压组合筒进行了力学分析, 得出了组合筒仅受预紧力作用时装配面上的装配压力、等效应力以及若干截面上的应力分布情况。结果表明, 装配面上的正压力分布并不均匀, 根据装配面上装配压力均匀分布的假设得出的结果必然有较大的误差; 沿轴向分布基本均匀, 可以简化为平面问题来处理。

**关键词:**光弹性; 扁挤压筒; 组合筒; 等效应力

**中图分类号:** O348.1      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1003-5060(2004)08-0891-04

### Stress analysis of the double-layer flat extrusion container with integral wall-plate by the photoelastic method

XU Zai-wen<sup>1</sup>, WANG Mei-qin<sup>1</sup>, WANG Jiong-hua<sup>1</sup>, LIU Quan-kun<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. School of Material Science and Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**Abstract:** The three-dimensional photoelastic method is used to analyze the stress of the double-layer flat container which is merely under the assembling pressure. The stress distribution (SD) along the assembling circumference, the SD along the longitudinal axis and the SD along the sections are all derived. The results indicate that the SD along the assembling circumference is not uniform, so the hypothesis based on the uniform SD will inevitably lead to errors. But the SD along the longitudinal axis is uniform, so it is reasonable to simplify such calculation as a plane problem.

**Key words:** photoelasticity; flat extrusion container; multi-layer container; equivalent stress

扁挤压筒是大型整体壁板型材挤压模具的基本组成部分。与圆挤压筒相比, 扁挤压筒具有更好的挤压性能, 但因扁挤压筒是非圆型腔, 在圆弧部分应力集中现象严重, 从而降低了其使用寿命。为了改善扁挤压筒的受力状况, 从事相关研究的学者对其结构进行了各种优化尝试和研究<sup>[1~3]</sup>。实际中的扁挤压筒多采用组合结构, 由于有预紧力的作用而使工作应力分布明显改善。找出扁挤压筒装配应力分布规律是该结构合理设计的前提。

近十几年来, 随着计算机技术的发展, 对大型扁挤压筒的数值模拟方法已获得充分发展<sup>[4~6]</sup>。大多数的有限元计算是基于下面几个假设的: ① 型腔内的挤压力相当于静水压力。② 组合筒装配面上的正

**收稿日期:** 2003-09-29

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(50075022)

**作者简介:** 许在文(1974-), 男, 安徽肥东人, 合肥工业大学硕士生;

王炯华(1939-), 男, 江苏常熟人, 合肥工业大学教授, 硕士生导师;

刘全坤(1945-), 男, 江苏江阴人, 德国斯图加特大学博士, 合肥工业大学教授, 博士生导师。

压力沿周向均匀分布。③ 装配压力沿轴向均匀分布。这些假设的合理性缺少必要的实验验证。本文采用三维光弹性法对大型扁挤压双层组合筒进行模拟,找出装配压力沿装配结合面周向的分布规律,并分析过盈装配对扁挤压筒工作等效应力的影响。

## 1 组合筒的模型设计与制作

实验分为两个阶段。第一阶段,制作整体扁挤压筒的光弹性模型,并挤压加载,得出了筒体内的应力场及型腔内的挤压力分布<sup>[5]</sup>;第二阶段,制作双层组合筒的光弹性模型,由光弹性条纹得出筒体内的等效应力分布,并在此基础上计算出若干截面上的应力以及装配面上的挤压力分布情况。本文主要涉及第二阶段的工作。

### 1.1 组合筒模型的结构设计

确定组合筒光弹性模型装配基准尺寸和过盈量基于以下两个原则:除了保证符合模型与原型几何相似条件以外,一要保证模型内的应力不超过材料的比例极限;二要使模型中出现足够的等差线条纹以供分析。在结构模型实验中,若忽略体积力,则只要模型与原型几何相似,载荷作用方向、作用位置及约束条件相似,模型中任一点的应力状态与原型的应力状态就保持相似<sup>[7]</sup>。所以,按18:1将实际模具缩小,同时为了便于脱模,在不影响应力分布的前提下适当降低模型高度,由此得到图1所示的模型尺寸。再参考材料力学中厚壁组合圆筒的公式估算过盈量。该公式为

$$q = \frac{E\Delta}{r^3} \frac{(r_1^2 - r_3^2)(r_3^2 - r_2^2)}{2(r_1^2 - r_2^2)} \quad (1)$$

其中, $r_1$ 为外筒外圆半径; $r_2$ 为内筒内圆半径(等效); $r_3$ 为装配面半径; $E$ 为光弹性材料在冻结温度时的弹性模量; $\Delta$ 为半径过盈量; $q$ 为内外筒间的装配压力。

圆筒外径取 $2r_1 = 104$  mm,内孔长轴 $a = 42$  mm,短轴 $b = 20$  mm; $r_2$ 是扁圆形内腔的等效圆半径,取 $2r_2 = 42$  mm,根据内筒长轴与配合面直径之比 $a/2r_3 = 0.67$ 计算得 $2r_3 = 64$  mm。由于内筒有应力集中,在装配力作用下内筒产生的条纹数量比外筒方向的多,故根据外筒来确定装配力 $q$ 。根据 $q$ 值并综合考虑材料的比例极限及装配可行性等,最终确定半径过盈量 $\Delta = 0.19$  mm。制作内模和外套时要留出一定的加工余量,然后经精密机械加工,最后进行过盈装配。

### 1.2 模型制作

模型材料采用配比为:环氧树脂:顺丁烯二酸酐=100:35的混合液,注入模具后经高温(120℃)固化成型。由于扁挤压筒的光弹模型型腔形状较为复杂,机械加工十分困难,采用硅橡胶模既麻烦,破损后又难以修补,故经过分析比较决定采用钢模精密浇铸法制作模型。但此方法脱模困难,开始时采用传统的溶入甲苯的聚苯乙烯溶液作脱模剂,脱模效果很差,耗时长久且表面粗糙。后来改用硅脂作为脱模剂,经反复试验,最终取得了良好的脱模效果,不仅表面光滑而且省时省力。

### 1.3 机械加工及装配

由于环氧树脂经固化做成的光弹性模型性脆,加工易崩裂,且不易散热,为保证模型加工后的表面光洁度,防止产生加工应力,加工工艺及参数选定:切削深度 $t = 0.1$  mm;车床主轴转速 $n = (160 \sim 250)$  r/min;进刀速度 $v = 0.01$  m/min。双层筒装配时,先将内筒降温至0℃,外筒升温至120℃,装配完成后置于干燥箱内恢复到室温,然后再进行应力冻结。

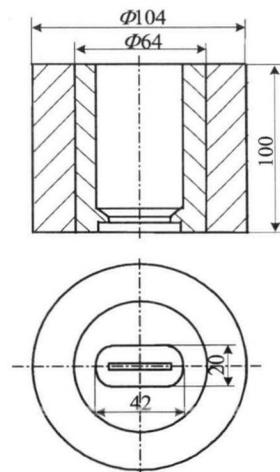


图1 模型结构尺寸

## 2 等效应力与应力分离

### 2.1 模型切片与应力条纹图

应力冻结完成后即可进行切片,切片位置如图2所示,图中1~9为切片编号。取周向切片4进行分析。图3所示是该切片的等差线图。可见,在装配力的作用下内筒长轴方向有明显的应力集中现象。由于筒横截面的双对称性,可取1/4横截面进行分析计算,图4所示是1/4横截面的等差线和等倾线骨架。

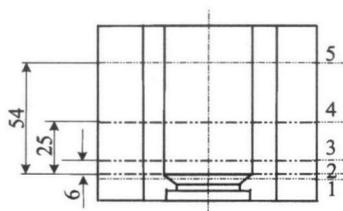


图2 切片位置

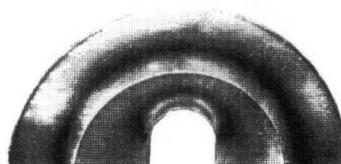


图3 扁挤压筒模型周向切片的等差线图

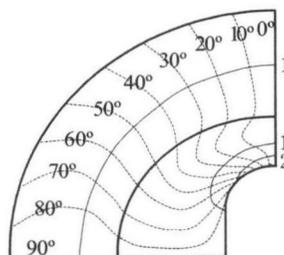


图4 周向切片4的等差线和等倾线骨架

### 2.2 等效应力

根据图4的等差线图,利用公式<sup>[8]</sup>

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{Nf}{h} \quad (2)$$

就得到了装配等效应力分布图,如图5所示。其中, $N$ 为等差线级数; $f$ 为材料条纹值( $f = 12 \times 10^3$  N/m); $h$ 为切片厚度( $h = 4.2 \times 10^{-3}$  m)。

### 2.3 径向应力 $\sigma_r$ 与周向应力 $\sigma_t$

为了分离应力,取与型腔长轴方向分别成 $0^\circ$ 、 $22.5^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $67.5^\circ$ 、 $90^\circ$ 角且通过型腔中心的5个截面 $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_3$ 、 $L_4$ 、 $L_5$ 作为计算截面,用剪应力差法程序分别进行计算,得到各截面上的径向应力 $\sigma_r$ 和周向应力 $\sigma_t$ 分别如图6、图7所示。

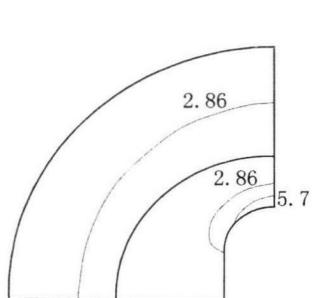


图5 等效应力

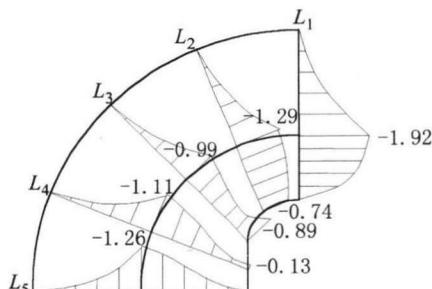


图6 截面上的径向应力 $\sigma_r$

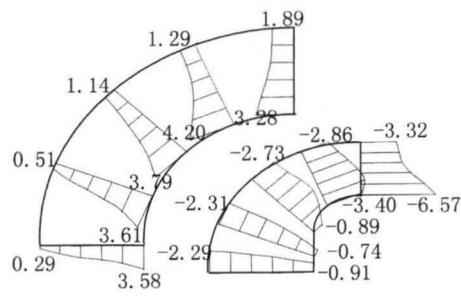


图7 截面上的周向应力 $\sigma_t$

外筒各截面上的径向应力  $\sigma_r$ 、 $\sigma_t$  在装配面上的值最大,向外逐渐降低;内筒由于变形的影响而变得较复杂,但仍有规律可循, $\sigma_r$  在装配面上的值最大, $\sigma_t$  在长轴方向( $L_1$ )内边缘点压应力值最大(6.57 MPa)(而由文献[5],此处的工作拉应力值也最大,二者相抵,降低了最大工作应力),从  $L_1$  到  $L_5$ , $\sigma_t$  的最大值点逐渐外移,到短轴方向( $L_5$ )外边缘点值最大(2.29 MPa)。

## 2.4 装配压力

将图 6 中装配面与各截面的交界处径向应力  $\sigma_r$  值连接起来得到装配压力沿装配面周向的分布规律,如图 8 所示。装配径向压力沿装配面的周向分布并不均匀, $L_1$ (长轴)方向最大,逆时针方向逐渐减小,在内孔圆弧与平面交界处的  $L_3$  方向最小,而后有所升高。造成这一结果的原因是:由于内腔并非中心对称,在装配压力的作用下内筒会产生不均匀变形,使得装配面上的压应力  $\sigma_r$  在  $L_1$  方向增加。此外,这种附加变形还会影响型腔的尺寸精度。

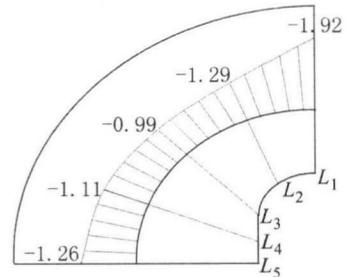


图 8 装配径向压力沿装配面的分布

## 2.5 误差估计

将算得的某个截面上各点的应力值用最小二乘法拟合成 3 次曲线  $y =$

$\sum_{i=0}^3 A_i \cdot x^i$ , 再将此函数沿计算截面积分,得到  $\sigma_t$  的积分值,如表 1 所列。

从表 1 可以看出内外筒同一截面上  $\sigma_t$  的积分值比较接近,相对误差在 5% 以内。

表 1 周向切片 4 内外筒各截面上  $\sigma_t$  的积分值比较

切片层	外筒 / (N · m <sup>-1</sup> )	内筒 / (N · m <sup>-1</sup> )	与较小值相对误差 / (%)
$L_1$	47.382	-48.809 2	3.01
$L_2$	45.306	-45.875 7	1.26
$L_3$	42.66	-44.763 2	4.93
$L_4$	38.330 6	-37.147 1	3.19
$L_5$	37.585 4	-37.244 5	1.87

## 3 结束语

实验结果表明,装配径向压力沿装配面的周向分布并不均匀, $L_1$ (长轴)方向最大,逆时针方向逐渐减小,大约在内孔圆弧与平面交界处的  $L_3$  方向最小,而后有所升高,最大值比最小值高一倍多。若采用均布装配周向压力的假定来计算装配应力,必将产生较大的误差。由于过盈装配在内筒产生的预压应力对改善挤压筒工作等效应力效果明显,特别是长轴与内孔交界处的最大工作应力可显著降低。外筒的最大周向应力不可忽视,在选择装配过盈量时应考虑外筒的抗拉强度。

## [参 考 文 献]

- [1] 赵云路,刘静安,陈卫民.圆挤压筒改装成扁挤压筒的试验研究[J].轻合金加工技术,2001,29(6):29-35.
- [2] 易幼平,钟掘,高云章.扁挤在筒型腔有限元应力分析及成性优化[J].上海有色金属,1996,17(2):51-55.
- [3] 刘全坤,俞葵芳,刘汉武.挤压凹模强度的光弹性与有限元优化综合分析[J].实验力学,1992,7(3):226-229.
- [4] 谢建新,毛倩,李静媛.80MN挤压筒用扁挤压筒的初步设计[J].锻压技术,1999,(3):48-51.
- [5] 王匀,刘全坤,王雷刚.整体壁板扁挤压模应力分析和提高强度的措施[J].力学与实践,2002,24(6):27-29.
- [6] 肖大志,何高法,雷亚,等.扁挤压筒受力的有限元分析及试验[J].金属成形工艺,2001,19(5):31-33.
- [7] 张如一,陆耀植.实验应力分析[M].北京:机械工业出版社,1980.244-249.
- [8] 大连工学院数理力学系光测组.光弹性实验[M].北京:国防工业出版社,1978.327-330.