

研究报告

# 确定厚壁圆筒初始屈服压力的一种实验方法

张于贤<sup>1,2</sup>, 廖振方<sup>1</sup>, 王红<sup>2</sup>, 裴江红<sup>1</sup>

(1. 重庆大学机械工程学院, 重庆 400044; 2. 桂林电子工业学院管理系, 广西桂林 541004)

**[摘要]** 基于厚壁圆筒的弹性失效准则所确定的圆筒的初始屈服压力与材料的屈服极限的关系, 设计了一种测定厚壁圆筒初始屈服压力的实验方法, 并测得了一组实验数据。通过对该实验数据的分析得到了圆筒的初始屈服压力。该实验值与理论值误差较小, 表明了该实验方法具有较好的可靠性。

**[关键词]** 厚壁圆筒; 失效; 初始屈服压力

**[中图分类号]** TB125; TB302 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2005)11-0072-04

## 1 引言

在石油化工、天然气、高压液压系统等领域, 厚壁圆筒形高压容器被普遍采用。由于厚壁圆筒形高压容器筒体在工作时应力应变分布比较复杂, 难于确定一个能各方面兼顾的设计准则, 由此产生了基于不同侧重点的设计准则。但是, 不管采用何种设计准则, 都常常要考虑到初始屈服的问题, 如何确定初始屈服压力在实际中就显得十分必要<sup>[1]</sup>。笔者介绍在江西浙臣水射流研究所期间设计的一种新的测定厚壁圆筒初始屈服压力的实验方法。

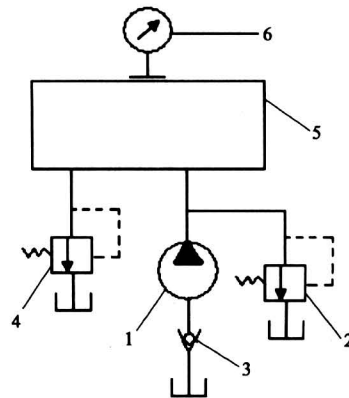
## 2 实验原理

2004年6月至9月, 笔者在江西浙臣水射流研究所进行高压自增强厚壁圆筒容器方面的研究, 其间设计了一种测定材料屈服极限的实验方法, 该方法的原理如图1所示。

油泵1产生的压力油进入高压厚壁圆筒容器5, 压力油的压力可由溢流阀2调定。4为手动卸荷阀, 其卸荷压力不能低于溢流阀2的调定压力。

当溢流阀2的调定压力一定后, 通过固定在容器外表面的百分表6可测出在该压力下容器直径的

变化值, 即直径的增大值, 然后由手动卸荷阀4对容器内的高压油卸压, 重新调节溢流阀2至较大的调定压力, 按上述同样的方法即可测出在新的调定压力下容器直径的增大值。



1—油泵; 2—溢流阀; 3—单向阀  
4—卸荷阀; 5—高压容器; 6—百分表

图1 实验原理图

Fig.1 Experimental principle

根据高压容器在一定工作压力下的应力应变分布规律, 当工作压力较小时, 整个容器从内壁到外表面都处于弹性状态, 百分表6所测出的容器直径

[收稿日期] 2005-01-20; 修回日期 2005-03-24

[基金项目] 国家自然科学基金资助项目(59874033)

[作者简介] 张于贤(1968-), 男, 重庆长寿县人, 桂林电子工业学院副教授, 重庆大学博士生

的增大值即是容器所发生的弹性变形；当压力卸去后，此变形随之消失。当工作压力较大时，容器从内壁到外表面分成塑性层和弹性层两部分，百分表 6 所测出的容器直径的增大值包含了弹性变形和塑性变形两部分。当压力卸去后，弹性变形随之消失，而塑性变形得以保留<sup>[2~4]</sup>。根据这个规律，只要测出恰好产生塑性变形时的工作压力  $P_i$ ，该压力就是初始屈服压力。

### 3 实验过程

#### 3.1 实验条件

该实验所用的试件是一个高压缸，材料为 2Cr13，外径  $D = 80 \text{ mm}$ ，内径  $d = 23 \text{ mm}$ 。加压设备为数控万能水切割机。试件的安装方法及实验现场如图 2 和图 3 所示。

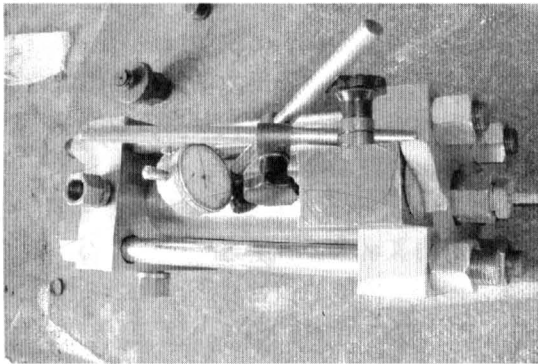


图 2 试件的安装方式

Fig.2 The fixing way of the testing part

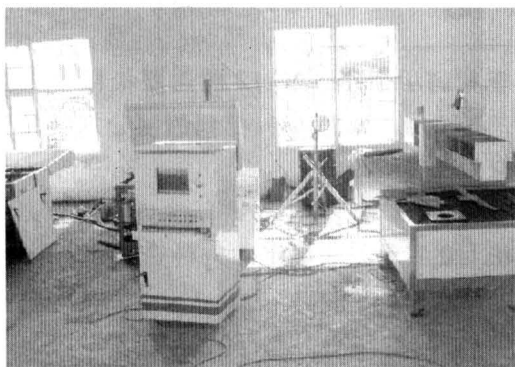


图 3 实验现场

Fig.3 The laboratorial locale

#### 3.2 实验过程

首先将溢流阀调节到较低的调定压力 160 MPa，油泵加压至此压力待稳定后保压 10 min，在保压过程中记录下百分表的读数（此读数反映了容

器直径的总变形）。然后缓慢卸压，完全卸压后等待 10 min，再记录下百分表的读数（此读数反映了容器直径的塑性变形）。然后将溢流阀 2 的调定压力按一定步长增大（为了保证在实验过程中既能节省时间又能使结果具有较高的可靠性，在低压时的步长为 10 MPa，高压时的步长为 5 MPa），在各个不同的调定压力下重复上述步骤，注意记录在保压和卸压时容器直径的增大值。需要注意的是，卸压后至少要等待 10 min，以尽量消除前次的实验值对后面实验值的影响。

#### 3.3 实验数据

根据前述实验过程和要求，实验数据记录如表 1 所示。

表 1 容器在不同压力下保压及卸压时直径的增大值

Table 1 The incremental value of vessel's diameter in different pressure under keeping and unloading

压力/MPa	保压时直径的增大值/ $\mu\text{m}$	卸压后直径的增大值/ $\mu\text{m}$
160	350.0	60.0
170	370.0	62.0
180	380.0	66.0
190	391.0	66.0
200	400.0	66.0
205	403.0	68.0
210	406.0	68.0
215	408.0	69.0
220	410.0	69.0
225	411.0	69.0
230	413.0	69.0
235	414.0	69.0
240	426.0	69.0
245	429.0	69.0
250	432.0	82.0
255	435.0	83.0

#### 3.4 实验数据整理

表 1 中，在低压下容器只产生弹性变形，卸压后该变形理应消失，但百分表所显示的读数并非完全如此，这主要是由两方面的原因所造成的：**a.** 开始实验时，百分表的指针头与容器外表面接触不够紧密；**b.** 初次加压时，随着容器直径的增大，由于容器表面的粗糙度的存在，百分表的指针

头将在容器表面产生微小移动, 即从微小凹凸不平的凸起位置移至下凹位置, 使得指针在初始调整位置上产生明显的位移。按照误差理论的有关概念, 第一个原因产生的误差接近于系统误差, 第二个原因产生的误差接近于粗大误差。为此, 笔者给了一个系统粗大误差的概念。显然, 在该实验中系统粗大误差约为  $60 \mu\text{m}$ 。减去系统粗大误差后, 将表 1 整理为表 2。

表 2 除去系统粗大误差后容器在不同压力下保压及卸压时直径的增大值

Table 2 The incremental value of vessel's diameter in different pressure under keeping and unloading after the bulky error of system was removed

压力/MPa	保压时直径的增大值/ $\mu\text{m}$	卸压后直径的增大值/ $\mu\text{m}$
160	290.0	0.0
170	310.0	2.0
180	320.0	6.0
190	331.0	6.0
200	340.0	6.0
205	343.0	8.0
210	346.0	8.0
215	348.0	9.0
220	350.0	9.0
225	351.0	9.0
230	353.0	9.0
235	354.0	9.0
240	366.0	9.0
245	369.0	9.0
250	372.0	22.0
255	375.0	23.0

### 3.5 实验数据分析

由表 2 可知, 压力自 160 MPa 至 245 MPa, 尽管卸压后有较小的残余变形, 但这种变形是由于压力油的温度升高而产生的热膨胀效应带来的, 并不是工作压力使容器产生了塑性变形。根据热弹性力学理论, 厚壁圆筒温度场的分布规律为<sup>[5]</sup>

$$T(r) = T_i + (T_e - T_i) \frac{\ln(r/r_i)}{\ln(r_o/r_i)} \quad (1)$$

式中  $T_i$ ,  $T_e$  分别为圆筒内壁温度和外壁温度 (K);  $r_i$ ,  $r_o$  分别为圆筒内半径和外半径 (mm); 圆筒的径向位移为方程为<sup>[5]</sup>

$$u = \frac{1+\mu}{1-\mu} \alpha \left[ (1-2\mu) \frac{r}{r_o^2} \int_0^{r_o} T(r) r dr + \frac{1}{r} \int_0^r T(r) r dr \right] \quad (2)$$

式中  $\mu$  为圆筒材料的泊松比;  $\alpha$  为圆筒材料的线膨胀系数。

在本试验中,  $T_i \approx 353 \text{ K}$ ,  $T_e \approx 305 \text{ K}$ ,  $r_i = 11.5 \text{ mm}$ ,  $r_o = 40 \text{ mm}$ , 代入式 (1) 即可求得厚壁圆筒温度场的分布规律。在式 (2) 中, 令  $r = r_o$ , 经整理后可得圆筒外壁的径向位移为

$$u = 2(1+\mu) \alpha \frac{1}{r_o} \int_0^{r_o} T(r) r dr \quad (3)$$

将材料常数  $\mu$ ,  $\alpha$  代入式 (3) 即可求得圆筒外壁的径向位移, 该位移也就是圆筒外壁直径增大值的一半, 经计算其数值仅为  $5 \mu\text{m}$ 。随着试验过程的进行, 压力油温度将逐渐升高, 由式 (3) 算得的值也将逐渐增大。表 2 中卸压后直径的增大值即反映了这个规律。由于压力油温度的影响较压力油压力的影响要小得多, 故在对实验数据进行处理时没有考虑压力油温度的影响。

在表 2 中, 当压力为 250 MPa 时, 高压容器的塑性变形明显增大, 表明容器因压力而产生了初始屈服, 即圆筒内壁的初始屈服压力  $245 \text{ MPa} < P_i < 250 \text{ MPa}$ , 取  $P_i = 245 \text{ MPa}$ 。

## 4 结果分析

根据第四强度理论, 由弹性失效准则可知, 当高压容器内壁产生初始屈服时, 有以下关系<sup>[1]</sup>:

$$P_i = 0.577 \sigma_s \quad (4)$$

查材料手册得, 2Cr13 的屈服极限  $\sigma_s = 450 \text{ MPa}$ <sup>[6]</sup>, 所以, 按式 (4) 得到的初始屈服压力的理论值为

$$P_i = 0.577 \sigma_s = 0.577 \times 450 = 259.7 \text{ (MPa)}$$

用上述实验方法确定的材料的屈服极限  $\sigma_s$  的相对误差为

$$\epsilon = \frac{259.7 - 245}{259.7} = 5.7\%$$

$\epsilon = 5.7\% < 6\%$  表明, 由该实验方法测得的初始屈服压力具有较高的准确性, 能够满足工程实际的要求。

## 5 结语

该实验方法操作简便, 结果可靠, 具有一定的工程实用价值, 尤其适用于合金钢类高强度钢材

料；对于研究热套型高压容器、自增强高压容器、超高压液压缸等，都有一定的借鉴作用。为了提高本实验结果的准确度，主要采取 3 项措施：**a.** 卸压后的间隔时间应足够长，使弹性变形消失，以消除前一次加压产生的变形对后一次加压产生变形的影响；如果时间间隔不够，这种尚未消失的弹性变形的累积效应将导致实验结果出现较大的误差；**b.** 可以考虑在容器外表面安装 2 个或 3 个百分表，取其读数的平均值作为结果值（包括中间结果和最终结果）；**c.** 考虑压力油热膨胀因素后，从理论上对热膨胀变形予以剔除。

## 参考文献

- [1] 邵国华. 超高压容器设计 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1984
- [2] 张于贤, 王 红, 陈德淑. 关于计算最佳弹塑性界面半径的探讨 [J]. 重庆大学学报, 2004, (6): 30~40
- [3] 张于贤, 王 红. 关于厚壁圆筒自增强容器的理论研究 [J]. 机械, 2004, (8): 13~14
- [4] 战人瑞, 陶春达, 吕瑞典. 自增强容器最佳超应变数值分析 [J]. 石油化工设备, 2003, (11): 23~26
- [5] 徐秉业, 黄 炎, 刘信声, 等. 弹塑性力学及其应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1984
- [6] 仇 铎, 许振铎, 于志忠. 金属材料使用手册 [M]. 沈阳: 辽宁人民出版社, 1983

## A Laboratorial Method for Determining Incipient Yield Pressure of Thick Wall Cylinder

Zhang Yuxian<sup>1,2</sup>, Liao Zhenfang<sup>1</sup>, Wang Hong<sup>2</sup>, Pei Jianghong<sup>1</sup>

(1. College of Mechanical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2. Guilin University of Electronic Technology, Guilin, Guangxi 541004, China)

**[Abstract]** Based on the relation between the incipient yield pressure and the limit of yielding in cylinder according to the elastic disabled rule, a laboratorial method of determining the incipient yield pressure is designed and a set of experimental data were gained. The incipient yield pressure of the cylinder is gained by analyzing the experimental data. The laboratorial method has a good reliability as the experimental value has a little error to the theory value.

**[Key words]** thick wall cylinder; disabled; incipient yield pressure

## 更 正

本刊 2005 年第 8 期第 10 页在左栏表 3 由左至右的镁 钛 钢 铝 系 钢 铝 镁 钛 之 误，特此更正，并诚向作者、读者致歉。