

标准椭圆封头对薄壁内压圆筒承载能力的影响

张红卫¹, 陈刚¹, 刘岑², 吴元祥¹, 韩春鸣¹, 刘小宁^{1*}

(1. 武汉软件工程职业学院机械制造工程系, 湖北 武汉 430205;

2. 武汉工程大学机电工程学院, 湖北 武汉 430205)

摘要: 试验研究表明: 与圆筒等厚的标准椭圆封头, 可提高钢制薄壁内压短圆筒的承载能力; 得到确定0Cr13 不锈钢制薄壁内压短圆筒屈服压力和爆破压力的经验公式, 以及区分内压长、短圆筒的临界长度计算公式。采用0Cr18Ni9Ti 不锈钢制薄壁内压圆筒的爆破压力试验数据验证了文中公式的有效性和合理性。

关键词: 标准椭圆封头; 薄壁内压圆筒; 承载能力; 经验公式

中图分类号: TII49; TQ051

文献标识码: A

doi:10.3969/j.issn.1674-2869.2010.03.027

0 引言

屈服压力和爆破压力是钢制薄壁内压容器承载能力的基本特征, 由于制药和食品等行业常用的不锈钢制薄壁内压圆筒容器, 采用的是与圆筒等厚的标准椭圆封头, 因此, 人们十分关心与圆筒等厚的标准椭圆封头, 对不锈钢制薄壁内压圆筒的屈服压力和爆破压力是否有提高作用, 如果有, 圆筒的长径比应满足什么条件, 圆筒的屈服压力和爆破压力怎样计算。为此, 文中研究了标准椭圆封头对0Cr13 不锈钢制薄壁内压圆筒承载能力的影响。

1 分析

1.1 薄壁内压短圆筒的屈服压力和爆破压力

假设确定不锈钢制薄壁内压短圆筒屈服压力或爆破压力经验公式的形式为

$$p_1 = a(k-1)R\left(\frac{L}{D}\right)^b \quad (1)$$

式(1)中, p_1 为短圆筒的屈服压力或爆破压力, MPa; a, b 为经验系数, 由试验数据确定; k 为径比, $k=1+2\delta/D_i$; δ 为壁厚, mm; L 为计算长度, 包括筒体长度和封头直边高度, mm; D_i 为内直径, mm; R 为圆筒材料的机械性能常数, MPa。

当 R 分别取圆筒材料的屈服应力 R_{cl} 与抗拉应力 R_m 时, p_1 分别为短圆筒屈服压力 p_{1s} 与爆破压力 p_{1b} 。经验系数 a, b 和相关度 r 可采用最小二乘法原理回归分析得到。

1.2 薄壁内压长圆筒的屈服压力和爆破压力

薄壁内压长圆筒的屈服压力或爆破压力可用

中径公式确定^[1]

$$p_2 = 2R \frac{k-1}{k+1} \quad (2)$$

式(2)中, p_2 为薄壁内压长圆筒的屈服压力或爆破压力, MPa。

当 R 分别取圆筒材料的屈服应力 R_{cl} 与抗拉应力 R_m 时, p_2 分别为短圆筒屈服压力 p_{2s} 与爆破压力 p_{2b} 。

1.3 区分薄壁内压长、短圆筒的临界长度

当 $p_1 = p_2$ 时, 由式(1)、(2)可得区分薄壁内压长、短圆筒的临界长度计算公式

$$L_{cr} = D_i \left[\frac{2}{a(k+1)} \right]^{\frac{1}{b}} \quad (3)$$

式(2)中, L_{cr} 为区分内压长、短圆筒的临界长度, mm。

$L < L_{cr}$ 为薄壁内压短圆筒, $L = L_{cr}$ 为薄壁内压临界圆筒, $L > L_{cr}$ 为薄壁内压长圆筒。

1.4 试验容器材料的机械性能

试验容器材料的机械性能原则上用材料试验机测定, 由于薄壁内压长圆筒的屈服压力和爆破压力不受容器长径比的影响, 因此, 可通过测量长圆筒的屈服压力 p'_{2s} 和爆破压力 p'_{2b} , 确定材料的屈服应力 R_{cl} 和抗拉应力 R_m 。

由式(2)可得

$$\left. \begin{aligned} R_{cl} &= p'_{2s} \frac{k_i+1}{2(k_i-1)} \\ R_m &= p'_{2b} \frac{k_i+1}{2(k_i-1)} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式(4)中, R_{cli} 、 R_{mi} 分别为第 i 个长圆筒材料的屈服应力和抗拉应力, MPa; p_{2si} 、 p_{2bi} 分别为第 i 个长圆筒的屈服压力和爆破压力, MPa; k_i 为第 i 个长圆筒的径比。

值得注意的是: (1) p_{2si} 、 p_{2bi} 试验数据是否属于长圆筒要通过式(3)来确定; (2) R_{cli} 、 R_{mi} 中的最小值不得小于规定值^[2]。

对于 n 组试验数据, 可得圆筒材料的平均屈服应力 R_{cl} 和平均抗拉应力 R_m 。

$$R_{cl} = \frac{\sum_{i=1}^n R_{cli}}{n}, R_m = \frac{\sum_{i=1}^n R_{mi}}{n} \quad (5)$$

2 经验公式

本研究采用 0Cr13 不锈钢制造的薄壁内压圆

表 1 0Cr13 不锈钢的屈服应力 R_{cl} 和抗拉应力 R_m

Table 1 The yield stress R_{cl} and tensile stress R_m of 0Cr13 stainless steel

序号	D_i/mm	L/mm	δ/mm	k	$\frac{L}{D_i}$	实测屈服压力 p_{2si}/MPa	实测爆破压力 p_{2bi}/MPa	R_{cli}/MPa	R_{mi}/MPa
1	400	1250	2	1.010	3.125	2.14	4.38	215	440
2	400	1250	2	1.010	3.125	2.30	4.60	231	462
3	400	1250	2	1.010	3.125	2.19	4.44	220	446
R_{cl} 和 R_m 的平均值/MPa								222	450

表 2 0Cr13 不锈钢制薄壁短圆筒屈服压力与爆破压力的试验数据

Table 2 The test data of yield pressure and burst pressure for 0Cr13 stainless steel thinness wall short cylinder

序号	D_i/mm	L/mm	δ/mm	k	$\frac{L}{D_i}$	R_{cl}/MPa	R_m/MPa	屈服压力实测值 p_{1st}/MPa	爆破压力实测值 p_{1bt}/MPa
1	400	650	2	1.010	1.625	222	450	2.24	4.56
2	400	550	2	1.010	1.375	222	450	2.40	4.86
3	600	780	3	1.010	1.300	222	450	2.52	5.16
4	600	680	3	1.010	1.133	222	450	2.56	5.19
5	600	580	3	1.010	0.967	222	450	2.69	5.64
6	800	780	4	1.010	0.975	222	450	2.78	5.52
7	800	580	4	1.010	0.725	222	450	2.85	5.94

将表 2 中 7 组爆破和 7 组屈服试验数据, 采用最小二乘法原理回归分析, 得 $a = 1.228$, $b = -0.3524$ 及相关度 $r = -0.9382$ 。由式(1)可得不锈钢制薄壁内压短圆筒屈服压力或爆破压力的经验公式

$$p_1 = 1.228(k-1)R\left(\frac{L}{D_i}\right)^{0.3524} \quad (6)$$

由式(3)得区分薄壁内压长、短圆筒的临界长度计算公式

$$L_{cr} = 0.2505(k+1)^{2.8377} D_i \quad (7)$$

当 $D_i = 400, 600, 800$, 壁厚对应为 $\delta = 2, 3, 4$ 时, $k = 1.010$, 由式(7)得 $L_{cr}/D_i = 1.817$, 因此, 表 1 中的数据为长圆筒屈服压力和爆破压力试验数据, 用其确定试验材料的屈服应力和抗拉应力是可行的; 同时可知, 表 2 中的试验数据也均为短圆筒屈服压力和爆破压力试验数据。

筒容器进行常温水压试验。试验容器由单层圆筒及与其等厚的标准椭圆封头组成, 内直径 $\Phi 400$ 容器, 封头直边高度 $h = 25 \text{ mm}$, 内直径为 $\Phi 600$ 及 $\Phi 800$ 容器, 封头直边高度 $h = 40 \text{ mm}$ 。与文献[3]类似, 试验容器的爆破口出现在筒体中部附近, 呈轴向撕裂, 无碎片, 是典型的延性爆破^[3-4]。

采用 3 个长径比较大的圆筒容器作为内压长圆筒进行试验, 研究测得其屈服压力和爆破压力, 用式(4)、(5)确定 0Cr13 钢的屈服应力与抗拉应力, 如表 1 所示。其中 R_{cli} 均大于规定值 205 MPa, R_{cl} 均大于规定值 440 MPa^[2], 表明结果有效。初步将表 2 中的试验数据作为内压短圆筒的试验数据。

3 验 证

文献[3]基于水压试验, 得到 4 组 0Cr18Ni9Ti 不锈钢制薄壁内压圆筒(标准椭圆形封头)屈服压力和爆破压力试验研究数据, 如表 3 所示。

表 3 0Cr18Ni9Ti 不锈钢制薄壁圆筒爆破压力试验数据
Table 3 The test data of burst pressure for 0Cr18Ni9Ti stainless steel thinness wall short cylinder

序号	D_i/mm	δ/mm	p_{2bi}/MPa	$\frac{L}{D_i}$	$\frac{L_{cr}}{D_i}$ 式(7)
1	500	5.6	15.1	3.00	1.848
2	500	11.9	28.1	3.00	1.915
3	400	6.6	24.6	1.25	1.876
4	400	12.5	42.1	1.25	1.954

由表 3 可知: 1~2 号圆筒是薄壁内压长圆筒, 3~4 号圆筒是内压短圆筒。可用 1~2 号圆筒试验数据和式(5)确定 0Cr18Ni9Ti 钢的抗拉应力, 如表 4 所示。其中 R_{cli} 大于规定值 520 MPa^[2], 表明结果有效。

表4 0Cr18Ni9Ti 不锈钢的抗拉应力 R_m Table 4 The tensile stress R_m of 0Cr18Ni9Ti stainless steel

序号	k	p_{zht}/MPa	R_m/MPa
1	1.022 4	15.1	682
2	1.047 6	28.1	604
R_m 的平均值/MPa			643

表5 0Cr18Ni9Ti 不锈钢制薄壁短圆筒爆破压力的实测值与计算值

Table5 The test data and count data of the burst pressure for 0Cr18Ni9Ti stainless steel thinness wall short cylinder

序号	k	$\frac{L}{D_i}$	R_m/MPa	爆破压力实测值 /MPa	爆破压力计算值/MPa 和相对误差 * /%		数据来源
					式(6)计算值/ 相对误差	式(2)计算值/ 相对误差	
3	1.033 0	1.25	643	24.6	24.1 -2.03	20.9 -15.04	文献[3]
4	1.062 5	1.25	643	42.1	45.6 8.31	39.0 -7.36	文献[3]
平均误差/%					5.17	11.20	

* 相对误差=(计算值-实测值)/实测值 $\times 100\%$ 。

由表5可知,用中径公式(2)计算 0Cr18Ni9Ti 钢制薄壁内压短圆筒爆破压力,计算值偏小,相对误差较大;用经验公式(6)计算 0Cr18Ni9Ti 钢制薄壁内压短圆筒爆破压力,相对误差较小。

4 讨论

4.1 不锈钢制薄壁内压长、短圆筒的最小临界长度

不锈钢制薄壁内压圆筒容器的最小壁厚 $\delta_{\min}=0.002D_i^{111}$,即最小径比 $k=1.004$,如果容器采用的标准椭圆形封头与圆筒等厚,则其最小临界长度由式(7)可得 $L_{cr}=1.801D_i$,故计算长度 $L\leq 1.801D_i$ 的 0Cr13 和 0Cr18Ni9Ti 不锈钢制薄壁内压圆筒是内压短圆筒。

4.2 不锈钢制薄壁内压长、短圆筒承载能力的比较

由式(6)与式(2)得

$$p_1/p_2=0.614(k+1)\left(\frac{L}{D}\right)^{0.3524}$$

因最小径比 $k=1.004$,故有

$$p_1/p_2>1.230\left(\frac{L}{D_i}\right)$$

常用的不锈钢制薄壁内压短圆筒容器的 $L/D_i=1.801\sim 0.5$,有 $p_1/p_2>1.00\sim 1.57$,表明随着长径比的变小,与圆筒等厚的标准椭圆封头,对不锈钢制薄壁内压短圆筒屈服压力或爆破压力的提高作用越来越显著,即短圆筒的承载能力比长圆筒的大。

4.3 不锈钢与低碳钢制薄壁内压短圆筒的比较

文献[4]基于试验研究,证明了与圆筒等厚的标准椭圆封头,可提高低碳钢制薄壁内压短圆筒的承载能力,得到确定其屈服压力或爆破压力 p'_1 和长、短圆筒临界长度 L_{cr} 的经验公式为

表3中3~4号薄壁内压短圆筒的试验数据验证结果如表5所示。

$$p_1=1.198(k-1)R\left(\frac{L}{D}\right)^{-0.3636} \quad (8)$$

$$L'_{cr}=0.2443(k+1)^{2.7503}D_i \quad (9)$$

由式(6)、(8)得

$$p_1/p'_1=1.025(L/D_i)^{0.0112}$$

对常用的 $L/D_i=0.5\sim 1.801$ 不锈钢制薄壁内压短圆筒容器,有 $p_1/p'_1=1.017\sim 1.032$,表明用式(6)计算不锈钢制薄壁内压短圆筒的屈服压力或爆破压力,与用式(8)计算低碳钢制薄壁内压短圆筒的无显著差异。

由式(7)、(9)得

$$L_{cr}/L'_{cr}=1.025(k+1)^{0.0874}$$

由于不锈钢制薄壁内压短圆筒的最小径比 $k=1.004$,故 $L_{cr}>1.089L'_{cr}$,表明不锈钢制薄壁内压短圆筒的承载能力,对受到有足够强度和刚度的封头加强作用比较敏感。

4.4 单层厚壁内压圆筒的临界长径比

当单层厚壁内压圆筒的径比分别为2与2.5时,由式(7)可得其临界长径比分别为5.66与8.76,表明“当单层厚壁内压圆筒的径比为2或2.5,长径比为4时,封头对爆破压力的增强作用才可以忽略”[5]的看法有一定的试验基础。

5 结 语

(1)与圆筒等厚的标准椭圆封头,可提高不锈钢制薄壁内压短圆筒的承载能力。基于试验研究,得到确定 0Cr13 不锈钢制薄壁内压短圆筒屈服压力和爆破压力的经验公式,以及区分薄壁内压长、短圆筒的临界长度计算公式。采用 0Cr18Ni9Ti 不锈钢制薄壁内压圆筒的爆破压力试验数据,验证了文中方法的有效性和合理性。

(2)当 0Cr13 和 0Cr18Ni9Ti 不锈钢制薄壁内压圆筒采用与圆筒等厚的标准椭圆封头时,在长径比不大于 1.801 时是内压短圆筒,随着长径比的变小,标准椭圆封头对不锈钢制薄壁内压短圆筒承载能力的提高作用越来越明显。

(3)与低碳钢制薄壁内压短圆筒相比,0Cr13 和 0Cr18Ni9Ti 不锈钢制薄壁内压短圆筒的屈服压力和爆破压力,对受到与圆筒等厚的标准椭圆封头的加强作用比较敏感。

参考文献:

[1] 丁伯民,黄正林.化工容器[M].北京:化学工业出版社

社,2003:54-57.

[2] 王非,林英.化工容器用钢[M].北京:化学工业出版社,2004:369.

[3] 马利,郑津洋,寿比南,等.奥氏体不锈钢制压力容器强度裕度研究[J].压力容器,2008,25(1):1-5.

[4] 刘小宁,张红卫,刘岑,等.钢制薄壁内压短圆筒静强度的试验研究[J].压力容器,2009,26(7):11-14.

[5] 邵国华,魏兆灿.超高压容器[M].北京:化学工业出版社,2002:21.

Standard elliptical dished head to thin wall internal pressure cylinder bearing capacity influence

ZHANG Hong-wei¹, CHEN Gang¹, LIU Cen², WU Yuan-xiang¹, HAN Chun-ming¹, LIU Xiao-ning¹

(1. Department of Mechanical Manufacture Engineering, Wuhan Polytechnic College of Software and Engineering, Wuhan 430205, China; 2. School of Mechanical Electrical Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, China)

Abstract: The experimental study indicated that, with the cylinder uniform thickness standard elliptical dished head, may enhance the steel thin wall internal pressure short cylinder the bearing capacity; obtains determines the 0Cr13 stainless steel system thin wall internal pressure short cylinder yield and burst pressure the empirical formula, as well as discrimination internal pressure long, short cylinder critical length formula; the 0Cr18Ni9Ti stainless steel thin wall internal pressure cylinder burst pressure testing data has confirmed this article formula validity and the rationality.

Key words: standard elliptical dished head; thin wall internal pressure cylinder; bearing capacity; empirical formula

本文编辑:陈小平