

●研究简报●

超高压圆筒形容器爆破压力计算公式的比较*

BURST PRESSURE CALCULATION FORMULA COMPARE OF SUPER-HIGH PRESSURE CYLINDER VESSEL

刘小宁^{**1,2} 刘 岑² 吴元祥¹ 刘 兵¹ 袁小会¹

(1. 武汉软件工程职业学院 机械工程学院 武汉 430205)

(2. 武汉工程大学 机电工程学院 武汉 430205)

LIU XiaoNing^{1,2} LIU Cen² WU YuanXiang¹ LIU Bing¹ YUAN XiaoHui¹

(1. School of Mechanical Engineering, Wuhan Polytechnic College of Software and Engineering, Wuhan 430205, China)

(2. School of Mechanical and Electrical Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, China)

摘要 基于容器径比范围为1.33~4.71与容器材料屈服比范围为0.402 7~0.885 2的30组试验数据,对计算超高压圆筒形容器爆破压力的有关公式进行了分析比较,得到如下结论:(1)超高压圆筒形容器爆破压力实测值与福贝尔(Faupel)公式计算值之比的准确度为1.025 0,变异系数为0.091 43;(2)与有关公式相比,福贝尔公式具有准确度高、变异系数小和适用性广的特点。(3)采用组合与置换的方法适当改进具有普适性的传统经典公式,可提高特定容器的设计精度。

关键词 超高压 圆筒形容器 爆破压力 福贝尔公式 准确度 变异系数

中图分类号 TH 49

Abstract Based on 30 group test data, which ratio range of vessel outer to inner radius for 1.33~4.71, and ratio range of vessel material yield to tensile strength for 0.402 7~0.885 2, some calculation formulas of super-high pressure cylinder vessel blasting pressure were analyzed and comparison. The results shows that: (1) For super-high pressure cylinder vessel bursting pressure, the ratio accuracy of measured to Faupel formula calculation value is equal to 1.025 0, and the coefficient of variation is equal to 0.091 43. (2) Compared with relate to calculation formulas, Faupel formula is possess characteristic of high accuracy and small coefficient of variation, and adaptability is wide. (3) The suitable improvements of general application tradition classical formulas were used the combination and substitution method, the design precision should be enhancement for the specially vessels.

Key words Super-high pressure; Cylinder vessel; Burst pressure; Faupel formula; Accuracy; Coefficient of variation

Corresponding author: LIU XiaoNing, E-mail: lxngxy@163.com, Fax: +86-27-87996777

The project supported by the Foundation of Hubei Province, China (No. B2014209).

Manuscript received 20131228, in revised form 20140120.

引言

超高压圆筒形容器是低密度聚乙烯、人造水晶、粉末冶金生产中的关键设备,其操作压力大于100 MPa,因此,准确计算超高压圆筒形容器爆破压力对规范其设计、制造与管理很有必要^{[1]652-656[2]40-43[3]271-277[4]31-34[5]20-36[6]23-26}。

如果不考虑端部效应对爆破压力的加强^{[5]20-36},福

贝尔(Faupel)认为,超高压圆筒形容器的实际爆破压力,使容器器壁材料的应力介于全部屈服与抗拉强度之间,将容器材料的屈服与抗拉强度之比(屈服比)作为加权系数,分析得到计算容器爆破压力的福贝尔公式^{[5]20-36},并被有关标准采用^{[7]13-14};但是文献^{[6]23-26}指出福贝尔公式存在两点不足,一是计算误差为 $\pm 15\%$ 左右,二是当容器材料的屈服比较小时,福贝尔公式计算结果偏于安全,而当屈服比较大时,其结果偏于危

* 20131228 收到初稿,20140120 收到修改稿。湖北省教育厅科研项目(B2014209)。

**刘小宁,男,1963年6月生,湖北武汉人,汉族。二级教授,正高职高级工程师。机械工程学院副院长。武汉市有突出贡献中青年专家,享受市政府专项津贴,第二届武汉职业教育名师。已发表190篇学术论文,主审和参编规划教材8部,主持和参加18项省、市级科研项目的设计施工,获武汉市高校教学成果奖。主要研究方向为机械结构与压力容器可靠性等。

险;为提高公式精度,文献[1]⁶⁵²⁻⁶⁵⁶提出了新的思路,即对现有公式进行组合与置换,构建6个新的公式。

值得注意的是,有关文献^{[1]652-656[2]40-43[3]271-277[4]31-34[5]20-36[6]23-26}并没有考虑公式的适用性,因此,文中基于超高压圆筒形容器爆破压力的30组试验数据,比较福贝尔公式及两个新公式^{[1]652-656}的精度与适用性,并尝试为建立压力容器可靠性设计方法^[8-12]提供基础数据。

1 建立模型

为了比较分析公式的精度,定义如下变量

$$r = \frac{P_b}{u_b} \quad (1)$$

式中, r 为具有统计性质的随机变量; P_b 为爆破压力的实测值,MPa; u_b 为爆破压力的理论值,MPa。

采用具有普适性的福贝尔经典公式时

$$u_b = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_b \gamma (2 - \gamma) \ln K \quad (2)$$

式中, K 为径比(容器外直径与内直径之比); γ 为容器材料屈强比, $\gamma = \sigma_s / \sigma_b$; σ_s 、 σ_b 分别为容器材料的屈服与抗拉强度,MPa。

文献^{[1]652-656}建立6个新公式,其中两个有代表性的新公式为

$$u_b = \frac{\sigma_b}{\sqrt{3}} \left[\frac{3}{2} (1 + \gamma^2) - \gamma^3 \right] \ln K \quad (3)$$

$$u_b = \frac{\sigma_b}{32} \left[5 \frac{K^2 - 1}{K^2 + 1} + 40 \frac{K - 1}{K + 1} + 2 \left(\frac{5}{\sqrt{3}} + 1 \right) \ln K \right] \quad (4)$$

对于每组试验数据,根据式(1)~式(4),可得到

$$r_i = \frac{P_{bi}}{u_{bi}} \quad (5)$$

式中, P_{bi} 、 u_{bi} 分别为第*i*个容器爆破压力的实测值与理论值,MPa; r_i 为第*i*个容器的统计变量。

对试验数据进行统计,可得到 r 的准确度、精密度和变异系数

$$\bar{r} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m r_i \quad (6)$$

$$S_r = \sqrt{\frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m (r_i - \bar{r})^2} \quad (7)$$

$$C_r = \frac{S_r}{\bar{r}} \quad (8)$$

式中, $\bar{r}$ 、 S_r 、 C_r 分别为 r 的准确度、精密度和变异系数; m 为试验数据组数。

式(2)~式(4)的精度比较可考虑如下因素。

准确度 准确度的理想值是“1”,因此,统计量 r_i

的准确度 $\bar{r}$ 与1越接近,表明公式的准确度越高。

统计量 r_i 的变化范围 r_i 的变化范围为 $(r_i)_{\min} \sim (r_i)_{\max}$,其中 $(r_i)_{\min}$ 、 $(r_i)_{\max}$ 分别为 r_i 中的最小与最大值。为保证准确度 $\bar{r}$ 与1接近, $(r_i)_{\min}$ 与 $(r_i)_{\max}$ 应分布在1两侧,且与1越接近越好。

极差 统计量 r_i 的极差为 $(r_i)_{\max} - (r_i)_{\min}$,此值越小,表明统计量 r_i 集中,波动区域小,公式的精度越高。

变异系数 统计量 r_i 的变异系数 C_r 是反映 r_i 变异程度的参数,此值越小,表明统计量 r_i 变异程度小,公式的精度越高。

式(2)~式(4)的适用性可从容器径比与材料屈强比两个基本因素比较,一方面,如果容器径比与容器材料屈强比的变化范围相同,当某个公式的精度比较高时,表明该公式更利于设计使用;另一方面,当公式的精度相同时,如果某个公式的适用性广,表明该公式的应用范围大,即容器径比与容器材料屈强比的变化范围大。

2 三个公式的精度与适用性比较

根据不同参考文献^{[2]40-43[3]271-277[4]31-34[5]20-36}提供的超高压圆筒形容器爆破压力30组试验数据,容器材料抗拉应力、屈强比与数据来源见表1,对式(2)~式(4)精度的计算结果见表2。

由表1、表2可知,30组试验数据来源于4个试验机构,容器径比变化范围为1.33~4.71,试验容器材料15种,材料屈强比范围为0.4027~0.8852。

由表2可知,式(2)统计量 r_i 的准确度、变化范围、极差与变异系数均优于式(3)和式(4),表明在上述范围内,福贝尔公式具有准确度高、变异系数小和适用性广的特点。

基于这一特点,我国有关规范^{[7]13-14}把福贝尔公式作为超高压圆筒形容器强度设计公式之一;当然,如果能够探索得到精度更高与适用性更广的公式,对改进设计方法和促进设计技术的进步也是很有必要的。

文献^{[1]652-656}对提高设计公式的精度进行了有益的探索,基于现有公式的组合与置换,提出6个新公式,式(3)和(4)是其中的代表,并采用Crossland和Bones的13组试验数据(文中表1、表2的序号18-30)进行验证。由表2可知,对于30组试验数据,尽管式(2)的精度比式(3)与(4)的高一些,但是式(3)与(4)对于特定容器的精度还是比较高的。例如,式(3)对于特定容器(序号为1,2,4,16-21,23-30)的17组数据的精度比较高,式(4)对于特定容器(序号为3,4,6-8,13,14,18-21,23-30)的19组数据的精度也比较高,表

表 1 试验容器材料数据
Tab.1 Material data of test vessels

序号 Number	抗拉强度 Tensile strength σ_b /MPa	屈服比 Ratio of yield to tensile strength γ	数据来源 Source of data
1-3	1 037.55	0.885 2	参考文献[2] ⁴⁰⁻⁴³ References [2] ⁴⁰⁻⁴³
4	859.80	0.879 3	参考文献[3] ²⁷¹⁻²⁷⁷ References [3] ²⁷¹⁻²⁷⁷
5-6	483.20	0.588 7	参考文献[4] ³¹⁻³⁴ References [4] ³¹⁻³⁴
7	623.41	0.682 4	参考文献[5] ²⁷ References [5] ²⁷
8	470.93	0.521 0	参考文献[5] ²⁷ References [5] ²⁷
9	630.85	0.680 8	参考文献[5] ²⁷ References [5] ²⁷
10	618.03	0.402 7	参考文献[5] ²⁷ References [5] ²⁷
11	551.89	0.426 4	参考文献[5] ²⁷ References [5] ²⁷
12	516.06	0.510 2	参考文献[5] ²⁷ References [5] ²⁷
13	721.04	0.704 8	参考文献[5] ²⁷ References [5] ²⁷
14	727.93	0.722 2	参考文献[5] ²⁷ References [5] ²⁷
15	949.79	0.875 0	参考文献[5] ²⁷ References [5] ²⁷
16	726.89	0.789 4	参考文献[5] ²⁷ References [5] ²⁷
17	735.16	0.757 0	参考文献[5] ²⁷ References [5] ²⁷
18-30	455.05	0.499 7	参考文献[5] ²⁷ References [5] ²⁷

表 2 三个公式的精度计算
Tab.2 Precision calculation of 3 formulas

序号 Number	径比 Ratio of outer to inner radius K	实测爆破压力 Burst pressure measured values P_{bi} /MPa	爆破压力理论值与 Burst pressure theoretical values and r_i					
			公式 Formula (2)		公式 Formula (3)		公式 Formula (4)	
			u_{bi} /MPa	r_i	u_{bi} /MPa	r_i	u_{bi} /MPa	r_i
1	2.28	935.00	981.80	0.952 3	978.40	0.955 6	729.33	1.282 0
2	2.28	942.00	981.80	0.959 5	978.40	0.962 8	729.33	1.291 6
3	2.05	774.00	851.00	0.909 5	852.17	0.908 3	727.21	1.064 3
4	1.75	503.00	547.50	0.918 1	483.61	1.040 1	478.20	1.051 9
5	1.422	167.26	163.48	1.023 1	178.35	0.937 8	172.10	0.971 9
6	2.80	456.90	478.11	0.955 6	521.68	0.875 8	465.38	0.981 8
7	2.49	544.31	590.47	0.921 8	617.55	0.881 4	541.20	0.929 4
8	2.43	392.73	372.06	1.055 6	426.27	0.921 3	399.26	0.983 6
9	2.44	571.87	583.58	0.979 9	610.68	0.936 4	530.01	1.064 9
10	2.75	434.07	464.39	0.934 7	605.67	0.717 6	586.40	0.740 2
11	2.76	378.95	434.07	0.873 0	549.45	0.691 0	525.24	0.721 5
12	2.75	465.08	458.19	1.015 0	529.76	0.877 9	489.65	0.949 8
13	2.74	678.67	766.86	0.885 0	795.16	0.853 5	595.88	1.139 3
14	1.75	406.51	434.07	0.936 5	448.27	0.906 8	404.86	1.004 1
15	2.75	985.27	1 092.1	0.902 2	1 097.53	0.897 7	901.18	1.093 3
16	3.69	1 157.5	1 047.3	1.105 2	1 064.53	1.087 3	849.72	1.362 2
17	4.71	1 326.3	1 237.8	1.071 5	1 266.69	1.047 1	978.79	1.355 0
18	1.57	213.74	177.88	1.201 6	203.88	1.048 4	206.50	1.035 1
19	1.33	128.52	112.38	1.143 6	130.17	0.987 3	132.10	0.972 9
20	1.99	307.51	271.65	1.132 0	304.33	1.010 4	307.51	1.000 0
21	2.29	372.32	326.81	1.139 3	360.39	1.033 1	363.77	1.023 5
22	2.66	414.38	414.38	1.000 0	416.93	0.993 9	420.58	0.985 3
23	1.78	264.76	225.46	1.174 3	257.93	1.026 5	260.90	1.014 8
24	2.90	450.23	417.82	1.077 6	447.81	1.005 4	451.81	0.996 5
25	1.88	277.77	248.21	1.119 1	280.89	0.988 9	283.93	0.978 3
26	2.48	395.76	358.53	1.103 8	390.93	1.012 4	394.38	1.003 5
27	3.18	482.63	455.74	1.059 0	479.39	1.006 8	483.94	0.997 3
28	2.13	329.57	297.85	1.106 5	331.84	0.993 2	335.09	0.983 5
29	3.60	524.00	503.32	1.041 1	519.52	1.008 6	525.24	0.997 6
30	3.72	544.09	515.73	1.055 0	529.72	1.027 1	535.79	1.015 5
r_i 的变化范围 Variation range of r_i			0.873 0 ~ 1.201 6		0.691 0 ~ 1.087 3		0.721 5 ~ 1.362 2	
r_i 的极差 Range of r_i			0.328 6		0.396 3		0.640 7	
准确度 Accuracy			1.025 0		0.954 7		1.033 0	
精密度 S_r Precision S_r			0.093 72		0.091 27		0.142 2	
变异系数 C_r Coefficient of variation C_r			0.091 43		0.095 61		0.137 7	

明采用组合与置换的方法适当改进具有普适性的传统经典公式,可提高特定容器的设计精度。

从表1、表2中的数据还可知,当容器材料屈强比较小(例如,序号为10与11)时,用福贝尔公式计算超高压圆筒形容器的爆破压力,也会出现 $r_i < 1$ 的偏于危险的计算结果,因此,认为屈强比较小时福贝尔公式计算结果偏于安全的结论似不正确。

3 结语

文中基于30组试验数据,对计算超高压圆筒容器爆破压力的三个公式进行了分析比较,主要得到如下结论:

1)如果不考虑端部效应对容器爆破压力的加强作用,当超高压圆筒容器径比变化范围为1.33~4.71,容器材料屈强比变化范围为0.402 7~0.885 2时,用福贝尔公式计算超高压圆筒形容器的爆破压力,具有准确度高、变异系数小和适用性广的特点。我国规范目前采用福贝尔公式进行超高压圆筒容器爆破强度设计是合适的。

2)在超高压圆筒容器径比和材料屈强比的上述变化范围内,基于30组爆破压力试验数据,得到容器实测爆破压力与福贝尔公式理论值之比的准确度1.025 0,精密度0.093 72,变异系数0.091 43。

3)当容器材料屈强比较小时,用福贝尔公式计算超高压圆筒形容器的爆破压力,也会出现偏于危险的计算结果。

4)对于具有普适性的传统经典公式,采用组合与置换的方法适当改进,也可提高特定容器的设计精度。因此,探索高精度与适用性广的公式,对改进设计方法和促进设计技术的进步很有必要。

参考文献(References)

- [1] 柳爱群, 杨中, 杨焯. 圆筒形压力容器爆破压力经验公式的改进[J]. 机械强度, 2013, 35(5): 652-656.
LIU AiQuan, YANG Zhong, YANG Ye. Amendment of empirical formulas calculating bursting pressure of cylindrical vessels[J]. Journal of Mechanical Strength, 2013, 35(5): 652-656 (In Chinese).
- [2] 陈国理, 钟汉通, 王作池. 超高压聚乙烯反应管爆破试验[J]. 压力容器, 1991, 8(2): 40-43.
CHEN GuoLi, ZHONG HanTong, WANG ZuoChi. Burst test of super high pressure polyethylene reaction tube[J]. Pressure Vessel Technology, 1991, 8(2): 40-43 (In Chinese).
- [3] 郑津洋, 匡继勇, 徐平, 等. 多层超高压容器爆破压力研究[J]. 化工机械, 1994, 21(5): 271-277.
ZHENG JiYang, KUANG JiYong, XU Ping, et al. Research intobursting pressures of the multi-layered super-high pressure vessel [J]. Chemical Engineering & Machinery, 1994, 21(5): 271-277

(In Chinese).

- [4] 袁格侠, 刘宏昭, 钱学梅, 等. 求解超高压筒形容器爆破压力的神经网络方法[J]. 兵器材料科学与工程, 2010, 33(2): 31-34.
YUAN GeXia, LIU HongZhao, QIAN XueMei, et al. ANN-based prediction of bursting pressure under ultra-high pressure for cylindrical vessel[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2010, 33(2): 31-34 (In Chinese).
- [5] 邵国华, 魏龙灿. 超高压容器[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002: 20-36.
SHAO GuoHua, WEI LongCan. Super high pressure vessels[M]. Beijing: Chemical Industry Publishing House, 2002: 20-36 (In Chinese).
- [6] 朱学政, 陈国理. 高压容器爆破压力的计算[J]. 石油化工设备技术, 1995, 16(1): 23-26.
ZHU XueZheng, CHEN GuoLi. Calculation of bursting pressures for high pressure vessels[J]. Petro-Chemical Equipment Technology, 1995, 16(1): 23-26 (In Chinese).
- [7] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. TSG R0002-2005 超高压容器安全技术监察规程[S]. 北京: 中国计量出版社, 2005: 13-14.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. TSG R0002-2005 Super-high pressure vessel safety and technical supervision regulation [S]. Beijing: China Metrology Publishing House, 2005: 13-14 (In Chinese).
- [8] 刘小宁. 钢制薄壁内压力容器模糊静强度的可靠度[J]. 机械强度, 2009, 31(5): 771-775.
LIU XiaoNing. Fuzzy static strength reliability of thinness steel wall internal pressure vessels based on information entropy theory[J]. Journal of Mechanical Strength, 2009, 31(5): 771-775 (In Chinese).
- [9] 刘小宁, 张红卫, 韩春鸣. 基于信息熵的钢制薄壁内压力容器试验压力[J]. 机械强度, 2010, 32(2): 260-264.
LIU XiaoNing, ZHANG HongWei, HAN ChunMing. Testing pressure coefficient of thinness steel wall internal pressure vessels based on information entropy[J]. Journal of Mechanical Strength, 2010, 32(2): 260-264 (In Chinese).
- [10] 刘小宁, 张红卫, 韩春鸣, 等. 钢制薄壁内压力容器的压力试验超压限制系数[J]. 机械强度, 2010, 32(4): 596-599.
LIU XiaoNing, ZHANG HongWei, HAN ChunMing, et al. Overpressure confining coefficient of steel thinness wall internal pressure vessels under pressure test [J]. Journal of Mechanical Strength, 2010, 32(4): 596-599 (In Chinese).
- [11] 刘小宁, 张红卫, 韩春鸣. 基于模糊可靠度的薄壁外压力容器稳定性设计[J]. 机械强度, 2011, 33(2): 217-224.
LIU XiaoNing, ZHANG HongWei, HAN ChunMing. Stability design of steel thin wall external pressure vessels based on fuzzy reliability [J]. Journal of Mechanical Strength, 2011, 33(2): 217-224 (In Chinese).
- [12] 袁小会, 刘岑, 吴元祥, 等. 单层厚壁圆筒爆破压力的分布规律与参数[J]. 武汉工程大学学报, 2014, 36(2): 49-55.
YUAN XiaoHui, LIU Cen, WU YuanXiang, et al. Distribution law and parameters of monolayer thick-walled cylinder burst pressure [J]. Journal of Wuhan Institute of Technology, 2014, 36(2): 49-55 (In Chinese).