文章编号:1674－2869(2014)02－0049－07

单层厚壁圆筒爆破压力的分布规律与参数

袁小会[1],刘 岑[2],吴元祥[1],刘 兵[1],刘小宁[1,2*]
(1.武汉软件工程职业学院机械工程学院,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:基于 30 组单层厚壁圆筒爆破压力的试验数据,应用似然分析理论与方法,对计算单层厚壁圆筒爆破压力的 4 个公式进行分析.对于材料屈服强度与抗拉强度之比在 0.402 7 与 0.885 2 之间及外半径与内半径之比在 1.33 和 4.71 之间的单层厚壁圆筒,在显著度为 0.05 时,容器爆破压力实测值与 4 个公式理论值之比,分别是基本符合正态分布的随机变量;在双侧置信度为 98%时,分别得到该随机变量分布参数的取值区间.材料屈服强度与抗拉强度之比调整为不小于 0.499 7 时,分别提高了 4 个公式的计算精度.在应用范围相同时,4 个公式的精度指标各有优劣.

关键词:单层厚壁圆筒;爆破压力;计算公式;随机变量;正态分布;参数区间;精度指标
中图分类号:TH49　O213.2　**文献标识码**:A　**doi**:10.3969/j.issn.1674-2869.2014.02.010

0　引　言

单层厚壁圆筒是超高压容器的主要类型,也是人造水晶、粉末冶金、低密度聚乙烯生产中的关键设备.目前,工程上把单层厚壁圆筒的爆破压力视为确定量,采用福贝尔(Faupel)公式计算并确定圆筒的壁厚[1-2].

文献[2]指出福贝尔公式的计算误差为±15%左右;文献[3]对提高公式精度进行了有益探索,按组合与置换现有公式的方法,建立了 6 个新公式.

圆筒制造材料的屈服与抗拉应力、圆筒的几何尺寸等因素存在随机不确定性[4],考虑这些因素的随机不确定性,探索得到精度高的公式,是建立压力容器可靠性设计方法必须研究的课题,分析厚壁圆筒爆破压力分布规律与分布参数是其中的一项基础工作[5-9].

文中以福贝尔公式与有代表性的 3 个新公式[3]为研究对象,基于单层厚壁圆筒爆破压力的 30 组试验数据,应用似然分析理论与方法[5,10],对厚壁圆筒爆破压力的分布规律与参数分布区间进行研究,解决了建立厚壁圆筒可靠性设计方法的一个基础问题.

1　基础理论

1.1　爆破压力计算公式

计算厚壁圆筒爆破压力的福贝尔公式为

$$u_{b1}=\frac{2}{\sqrt{3}}\sigma_b\gamma(2-\gamma)\ln K \tag{1}$$

式(1)中,K 为径比(圆筒外直径与内直径之比);γ 为圆筒材料屈强比,$\gamma=\sigma_s/\sigma_b$;σ_s、σ_b 分别为圆筒材料的屈服与抗拉强度,MPa.

三个计算厚壁圆筒爆破压力的新公式为[3]

$$u_{b2}=\frac{2\sigma_b}{\sqrt{3}}\gamma[1+(1-\gamma)(2-\gamma)]\ln K \tag{2}$$

$$u_{b3}=\frac{\sigma_b}{\sqrt{3}}[2-(1-\gamma)^2]\ln K \tag{3}$$

$$u_{b4}=\frac{\sigma_b}{\sqrt{3}}\left[1+\frac{\sqrt{3}-(1-\gamma)^2}{2}\right]\ln K \tag{4}$$

1.2　爆破压力的分布规律与分布参数

为分析爆破压力的分布规律与参数,以及研究公式的精度,定义如下具有统计性质的随机变量.

$$r_i=\frac{P_b}{u_{bi}}\qquad(i=1,2,3,4) \tag{5}$$

式(5)中,r_i 为式中 i 的随机变量;P_b 为爆破压力的实测值,MPa;u_{bi} 为爆破压力式中 i 的理论值,MPa.

对于每个试验数据,根据式(1)～(4),可得到:

$$r_{i,j}=\frac{P_{bj}}{u_{bi,j}}\qquad(j=1,2,\cdots,m) \tag{6}$$

式(6)中,P_{bj} 为第 j 个圆筒爆破压力的实测值,MPa;$u_{bi,j}$ 为式(i)计算第 j 个圆筒爆破压力的理论

收稿日期:2014-02-11
基金项目:湖北省教育厅科研项目(B20128801);获武汉市创新人才开发资金重大创新专项资助
作者简介:袁小会(1980-),女,湖北钟祥人,讲师,工程师,硕士.研究方向:机械结构优化设计.*通信联系人

值,MPa;$r_{i,j}$ 为式中 i 对第 j 个数据的统计值;m 为试验数据个数.

对 m 个试验数据进行统计,可得到 r_i 的准确度、精密度及变异系数

$$\overline{r_i}=\frac{1}{m}\sum_{j=1}^{m}r_{i,j} \tag{7}$$

$$S_{ri}=\sqrt{\frac{1}{m-1}\sum_{j=1}^{m}(r_{i,j}-\overline{r_i})^2} \tag{8}$$

$$C_{ri}=\frac{S_{ri}}{\overline{r_i}} \tag{9}$$

式(7)~(9)中,$\overline{r_i}$、S_{ri}、C_{ri} 分别为 r_i 的准确度、精密度与变异系数.

如果把爆破压力的理论值 u_{bi} 作为确定量,根据式(5)可知,爆破压力 P_b 与 r_i 分布规律相同,但是两者的分布参数不同.

1.2.1 分布规律的假设检验 对随机变量 r_i 分布规律进行假设检验的具体方法是[5,10]:

①假设 r_i 基本符合正态分布.

②由数据个数 m,把 $r_{i,1}$、$r_{i,2}$、…、$r_{i,m}$ 分为 M 个区间,$M=1+3.3\lg m$,并取整数;对于 M 个区间的统计数据,其自由度为 $f=M-1-2$,若取显著度为 δ,则皮尔逊统计量的允许值 $\chi^2_{f,\delta}$ 由自由度与显著度查得[10].

③对于符合正态分布的随机变量 r_i,其统计量 $r_{i,j}$ 落在分组区间$[a_{i,t},a_{i,t+1}]$内的理论概率为:

$$p_{i,t}=\phi\left(\frac{a_{i,t+1}-\overline{r_i}}{S_{ri}}\right)-\phi\left(\frac{a_{i,t}-\overline{r_i}}{S_{ri}}\right) \tag{10}$$

式(10)中,$a_{i,1}=(r_{i,j})_{\min}$,$a_{i,M+1}=(r_{i,j})_{\max}$,其中$(r_{i,j})_{\min}$、$(r_{i,j})_{\max}$分别为 $r_{i,j}$ 中的最小与最大值.

④计算每个分组区间实际频数($N_{i,t}$)与理论频数($m\cdot p_{i,t}$)差异的皮尔逊统计量之和,即计算:

$$\chi^2_{i,\sigma}=\sum_{t=1}^{M}\frac{(N_{i,t}-m\cdot p_{i,t})^2}{m\cdot p_{i,t}} \tag{11}$$

⑤检验.若 $\chi^2_{i,\sigma}\leqslant\chi^2_{f,\delta}$,则在显著度为 δ 时,假设成立,否则假设不成立.

1.2.2 分布参数的取值区间 如果 r_i 基本符合正态分布,在双侧置信度为$(1-\alpha)$时,r_i 的均值、标准差与变异系数的分布区间为[10]

$$\mu_{ri}\in[\mu^l_{ri},\mu^u_{ri}]=\left[\overline{r_i}-t_{m-1,1-0.5\alpha}\frac{S_{ri}}{\sqrt{m-1}},\bar{r}+t_{m-1,1-0.5\alpha}\frac{S_{ri}}{\sqrt{m-1}}\right] \tag{12}$$

$$\sigma_{ri}\in[\sigma^l_{ri},\sigma^u_{ri}]=\left[S_{ri}\sqrt{\frac{m}{\chi^2_{m-1,0.5\alpha}}},S_{ri}\sqrt{\frac{m}{\chi^2_{m-1,1-0.5\alpha}}}\right] \tag{13}$$

$$C_{ri}\in[C^l_{ri},C^u_{ri}]=\left[\frac{S_{ri}\sqrt{\frac{m}{\chi^2_{m-1,0.5\alpha}}}}{\overline{r_i}+t_{m-1,1-0.5\alpha}\frac{S_{ri}}{\sqrt{m-1}}},\frac{S_{ri}\sqrt{\frac{m}{\chi^2_{m-1,1-0.5\alpha}}}}{\overline{r_i}+t_{m-1,1-0.5\alpha}\frac{S_{ri}}{\sqrt{m-1}}}\right] \tag{14}$$

式(12)~(14)中,μ_{ri}、σ_{ri} 与 C_{ri} 分别为 r_i 的均值、标准差与变异系数;$t_{m-1,1-0.5\alpha}$ 为单侧置信度为$(1-0.5\alpha)$时的 t 分布系数;$\chi^2_{m-1,1-0.5\alpha}$,$\chi^2_{m-1,0.5\alpha}$ 分别是单侧置信度为$(1-0.5\alpha)$与 0.5α 时的分布系数.

上标 l 与 u 分别表示分布参数在一定置信度下的较小值与较大值.

工程上一般取 $\delta=0.05$ 与 $\alpha=0.02$,文中所用的 t 分布系数与 χ^2 系数如表 1 所示[10].

表 1 t 与 χ^2 系数

Table 1 Coefficient of t and χ^2

	系数						
	$\chi^2_{3,0.05}$	$t_{29,0.99}$	$\chi^2_{29,0.99}$	$\chi^2_{29,0.01}$	$t_{27,0.99}$	$\chi^2_{27,0.99}$	$\chi^2_{27,0.01}$
取值	7.815	2.462	14.256	49.588	2.473	12.879	46.963

由于 P_b 与 r_i 分布规律相同,根据式(5)与式(12)~(14)可知,在双侧置信度为$(1-\alpha)$时,P_b 的均值 μ_{Pb}、标准差与变异系数的分布区间为

$$\mu_{Pb}\in[\mu^l_{Pb},\mu^u_{Pb}]=[\mu^l_{ri}u_{bi},\mu^u_{ri}u_{bi}] \tag{15}$$

$$\sigma_{Pb}\in[\sigma^l_{Pb},\sigma^u_{Pb}]=[\sigma^l_{ri}u_{bi},\sigma^u_{ri}u_{bi}] \tag{16}$$

$$C_{Pb}\in[C^l_{ri},C^u_{ri}] \tag{17}$$

式(15)~(17)中,μ_{Pb}、σ_{Pb}、C_{Pb} 分别为 P_b 的均值、标准差与变异系数.

2 爆破压力的分布规律与分布参数

2.1 爆破压力的分布规律

如果不考虑端部效应对厚壁圆筒爆破压力的加强作用,文献[2,11-13]提供了径比范围为 1.33~4.71,圆筒材料屈强比范围为 0.402 7~0.885 2的 30 个爆破压力试验数据;圆筒材料抗拉应力、屈强比与数据来源如表 2 所示.对式(1)~(4)精度的计算结果如表 3 所示.

根据分布规律的上述假设检验方法,假设 r_i($i=1,2,3,4$)基本符合正态分布,根据 30 个试验数据,把 $r_{i,1}$、$r_{i,2}$、…、$r_{i,30}$ 分为 6 个区间(因为 $1+3.3\lg30=5.87$),其自由度为 $f=6-1-2=3$,取显著度 $\delta=0.05$,由表 1 可知,皮尔逊统计量的允许值 $\chi^2_{3,0.05}=7.815$.每个分组区间实际频数(N_j)与理论频数($m\cdot p_j$)差异的皮尔逊统计量之和如表 4 所示.

表 2　试验容器数据

Table 2　Data of test vessel

序号	抗拉强度 σ_b/MPa	屈强比 γ	数据来源	序号	抗拉强度 σ_b/MPa	屈强比 γ	数据来源
1～3	1037.55	0.885 2	文献[11]	11	630.85	0.680 8	文献[2]
4	859.80	0.879 3	文献[12]	12～13	483.20	0.588 7	文献[13]
5	949.79	0.875 0	文献[2]	14	470.93	0.521 0	文献[2]
6	726.89	0.789 4	文献[2]	15	516.06	0.510 2	文献[2]
7	735.16	0.757 0	文献[2]	16～28	455.05	0.499 7	文献[2]
8	727.93	0.722 2	文献[2]	29	551.89	0.426 4	文献[2]
9	721.04	0.704 8	文献[2]	30	618.03	0.402 7	文献[2]
10	623.41	0.682 4	文献[2]				

表 3　四个公式的统计计算

Table 3　Statistical calculation of four formulas

序号	径比 K	实测爆破压力 P_{bj}/MPa	爆破压力理论值 $u_{bi,j}$ 与 $r_{i,j}$							
			公式(1)		公式(2)		公式(3)		公式(4)	
			$u_{b1,j}$/MPa	$r_{1,j}$	$u_{b2,j}$/MPa	$r_{2,j}$	$u_{b3,j}$/MPa	$r_{3,j}$	$u_{b4,j}$/MPa	$r_{4,j}$
1	2.28	935.00	981.80	0.952 3	985.92	0.948 4	980.90	0.953 2	918.01	1.018 5
2	2.28	942.00	981.80	0.959 5	985.92	0.955 5	980.90	0.960 3	918.01	1.026 1
3	2.05	774.00	851.00	0.909 5	858.71	0.901 3	850.35	0.906 0	799.57	0.968 0
4	1.75	503.00	547.50	0.918 1	554.62	0.906 9	551.55	0.912 0	516.35	0.974 1
5	2.75	985.27	1 092.1	0.902 2	1 107.28	0.889 8	1 100.78	0.895 1	1 030.79	0.955 8
6	3.69	1 157.5	1 047.3	1.105 2	1 085.63	1.066 2	1 071.56	1.080 2	1 010.30	1.145 7
7	4.71	1 326.3	1 237.8	1.071 5	1 296.64	1.022 9	1 276.67	1.038 9	1 207.97	1.098 0
8	1.75	406.51	434.07	0.936 5	460.30	0.883 1	452.23	0.898 9	429.80	0.887 5
9	2.74	678.67	766.86	0.885 0	817.62	0.830 1	802.65	0.845 5	764.71	0.887 5
10	2.49	544.31	590.47	0.921 8	635.67	0.856 3	623.59	0.872 9	596.16	0.913 0
11	2.44	571.87	583.58	0.979 9	628.64	0.909 7	616.67	0.839 8	589.69	0.969 8
12	1.422	167.26	163.48	1.023 1	182.77	0.915 1	179.82	0.930 2	174.97	0.955 9
13	2.80	456.90	478.11	0.955 6	534.51	0.854 8	525.89	0.868 8	511 70	0.892 9
14	2.43	392.73	372.06	1.055 6	429.76	0.913 8	427.43	0.918 8	422.78	0.928 9
15	2.75	465.08	458.19	1.015 0	531.97	0.874 3	530.50	0.876 7	526.27	0.883 7
16	1.57	213.74	177.88	1.201 6	207.34	1.030 9	207.35	1.030 8	206.31	1.036 0
17	1.33	128.52	112.38	1.143 6	131.08	0.980 5	131.09	0.980 4	130.43	0.985 3
18	1.99	307.51	271.65	1.132 0	316.30	0.972 2	316.33	0.972 1	314.73	0.977 1
19	2.29	372.32	326.81	1.139 3	380.84	0.977 6	380.87	0.977 5	378.59	0.982 5
20	2.66	414.38	414.38	1.000 0	449.69	0.921 5	449.70	0.921 4	447.46	0.926 1
21	1.78	264.76	225.46	1.174 3	265.04	0.998 9	265.06	0.998 9	263.72	1.003 9
22	2.90	450.23	417.82	1.077 6	489.39	0.920 0	489.43	0.919 9	486.97	0.924 6
23	1.88	277.77	248.21	1.119 1	290.16	0.957 3	290.19	0.957 2	288.72	0.962 1
24	2.48	395.76	358.53	1.103 8	417.48	0.948 0	417.51	0.947 9	415.41	0.952 7
25	3.18	482.63	455.74	1.059 0	531.76	0.907 6	531.80	0.907 5	529.12	0.912 1
26	2.13	329.57	297.85	1.106 5	347.55	0.948 3	347.58	0.948 2	345.83	0.953 0
27	3.60	524.00	503.32	1.041 1	588.78	0.890 0	588.83	0.889 9	585.86	0.894 4
28	3.72	544.09	515.73	1.055 0	603.85	0.901 0	603.90	0.901 0	600.86	0.905 5
29	2.76	378.95	434.07	0.873 0	524.87	0.722 0	540.54	0.701 1	550.42	0.688 5
30	2.75	434.07	464.39	0.934 7	568.08	0.764 1	593.14	0.731 8	609.17	0.712 6
基于序号 1～30 的 30 个试验数据，γ=0.402 7～0.885 2 与 K = 1.33～4.71		r_i 的波动范围	0.873 0～1.201 6		0.722 0～1.066 2		0.701 1～1.080 2		0.688 5～1.145 7	
		r_i 的极差	0.328 6		0.344 2		0.379 1		0.457 2	
		准确度 $\bar{r}_i$	1.025 0		0.918 94		0.919 43		0.946 0	
		精密度 S_{ri}	0.093 72		0.072 29		0.078 46		0.089 23	
		变异系数 C_{ri}	0.091 43		0.078 67		0.085 34		0.094 32	
基于序号 1～28 的 28 个试验数据，γ=0.499 7～0.885 2 与 K= 1.33～4.71		r_i 的波动范围	0.885 0～1.201 6		0.830 1～1.066 2		0.839 8～1.080 2		0.8837～1.145 7	
		r_i 的极差	0.316 6		0.236 1		0.240 4		0.262 0	
		准确度 $\bar{r}_i$	1.033 7		0.931 50		0.933 93		0.961 45	
		精密度 S_{ri}	0.090 54		0.055 91		0.057 66		0.062 92	
		变异系数 C_{ri}	0.087 59		0.060 02		0.061 74		0.065 44	

表 4　爆破压力分布规律的统计数据(基于 30 个试验数据)

Table 4　Statistics of burst pressure distribution law(based on 30 test data)

序号	分组区间$[a_{i,t},a_{i,t+1}]$	实际频数 $N_{i,t}$	理论概率 $p_{i,t}$	理论频数 $m\times p_{i,t}$	$\frac{(N_{i,t}-m\cdot p_{i,t})^2}{m\cdot p_{i,t}}$	$\chi^2_{i,\sigma}$	备注
1	[0.873 0,0.927 8]	5	0.096 58	2.897	1.526		
2	[0.927 8,0.982 5]	7	0.177 2	5.316	0.534		
3	[0.982 5,1.037 3]	3	0.225 3	6.759	2.091	6.094	公式(1)
4	[1.0373,1.092 1]	6	0.212 5	6.375	0.022		
5	[1.092 1,1.146 8]	7	0.139	4.170	1.921		
6	[1.146 8,1.201 6]	2	0.066 75	2.003	3.121×10^{-6}		
1	[0.722 0,0.779 4]	2	0.023 5	0.705	2.379		
2	[0.779 4,0.836 7]	1	0.100 3	3.009	1.341		
3	[0.836 7,0.894 1]	6	0.20 9	6.294	0.014	5.730	公式(2)
4	[0.894 1,0.951 4]	13	0.306 7	9.201	1.567		
5	[0.951 4,1.008 8]	5	0.218 9	6.656	0.369		
6	[1.008 8,1.066 2]	3	0.086 8	2.605	0.060		
1	[0.701 1,0.764 3]	2	0.021 1	0.634	2.943		
2	[0.764 3,0.827 5]	0	0.097 25	2.915	2.915		
3	[0.827 5,0.890 7]	6	0.234 7	7.041	0.154	6.784	公式(3)
4	[0.890 7,0.953 8]	12	0.314 3	9.429	0.701		
5	[0.953 8,1.017 0]	7	0.222 5	6.675	0.016		
6	[1.017 0,1.080 2]	3	0.087 32	2.620	0.055		
1	[0.688 5,0.764 7]	2	0.019 1	0.572	3.566		
2	[0.764 7,0.840 9]	0	0.097 8	0.293	0.293		
3	[0.840 9,0.917 1]	7	0.255 5	7.665	0.058	7.565	公式(4)
4	[0.917 1,0.993 3]	15	0.327 6	9.828	2.722		
5	[0.993 3,1.069 5]	4	0.214 3	6.429	0.918		
6	[1.069 5,1.145 7]	2	0.070 9	2.130	7.971×10^{-3}		

由表 4 可知:当用式(1)～(4)计算厚壁圆筒容器爆破压力时,其 $\chi^2_{1,\sigma}=6.094$,$\chi^2_{2,\sigma}=5.730$,$\chi^2_{3,\sigma}=6.784$,$\chi^2_{4,\sigma}=7.565$,均小于临界值 7.815,表明 r_1,r_2,r_3 与 r_4 基本符合正态分布;由式(5)可知,在显著度为 0.05 时,厚壁圆筒容器爆破压力 P_b 也基本符合正态分布.

2.2 爆破压力分布参数的取值区间

由于超高压厚壁圆筒制造材料屈强比较大[2],因此,可把表 2 中序号为 1～28 的 28 个试验数据进行统计分析,其数据一并列入表 3;此时容器材料屈强比范围为 0.499 7 ～ 0.885 2,径比范围为 1.33～4.71.

在双侧置信度为 98% 时,把表 1、表 3 中的数据代入式(12)～(14),得到 r_1～r_4 的均值、标准差与变异系数范围,如表 5 所示.

当用式(1)～(4)计算厚壁圆筒爆破压力时,P_b 基本符合正态分布,把表 5 数据代入式(15)～(17),在双侧置信度为 98% 时,可得到厚壁圆筒爆破压力 P_b 分布参数的取值区间,如表 6 所示.

表 5　r_1,r_2,r_3 与 r_4 分布参数的取值区间(双侧置信度为 98%)

Table 5　Distribution parameter intervals value of r_1,r_2,r_3 and r_4(bilateral confidence of 98%)

公式适用范围	参数	公式(1)	公式(2)	公式(3)	公式(4)
$\gamma=0.4027\sim0.8852$ 与 $K=1.33\sim4.71$	均值 $\mu^l_{ri}\sim\mu^u_{ri}$	0.982 15～1.067 85	0.885 89～0.951 99	0.883 56～0.955 30	0.905 21～0.986 79
	标准差 $\sigma^l_{ri}\sim\sigma^u_{ri}$	0.072 90～0.135 95	0.056 23～0.104 87	0.061 03～0.113 82	0.069 40～0.129 44
	变异系数 $C^l_{ri}\sim C^u_{ri}$	0.068 27～0.138 43	0.059 07～0.118 38	0.063 89～0.128 82	0.070 33～0.142 99
$\gamma=0.4997\sim0.8852$ 与 $K=1.33\sim4.71$	均值 $\mu^l_{ri}\sim\mu^u_{ri}$	0.990 61～1.076 79	0.904 89～0.958 11	0.906 49～0.961 37	0.931 50～0.991 40
	标准差 $\sigma^l_{ri}\sim\sigma^u_{ri}$	0.069 91～0.133 50	0.043 17～0.082 44	0.044 52～0.085 02	0.048 58～0.092 77
	变异系数 $C^l_{ri}\sim C^u_{ri}$	0.064 92～0.134 77	0.045 06～0.091 10	0.046 31～0.093 79	0.049 00～0.099 60

表 6　爆破压力分布参数的取值区间(双侧置信度为 98%)

Table 6　Distribution parameter intervals value of burst pressure(bilateral confidence of 98%)

公式适用范围	参数	公式(1)	公式(2)	公式(3)	公式(4)
γ=0.402 7～0.885 2 与 K=1.33～4.71	μ_{Pb}	$(0.982\,15\sim1.067\,85)u_{b1}$	$(0.885\,89\sim0.951\,99)u_{b2}$	$(0.883\,56\sim0.955\,30)u_{b3}$	$(0.905\,21\sim0.986\,79)u_{b4}$
	σ_{Pb}	$(0.072\,90\sim0.135\,95)u_{b1}$	$(0.056\,23\sim0.104\,87)u_{b2}$	$(0.061\,03\sim0.113\,82)u_{b3}$	$(0.069\,40\sim0.129\,44)u_{b4}$
	C_{Pb}	0.068 27～0.138 43	0.059 07～0.118 38	0.063 89～0.128 82	0.070 33～0.142 99
γ=0.499 7～0.885 2 与 K=1.33～4.71	μ_{Pb}	$(0.990\,61\sim1.076\,79)u_{b1}$	$(0.904\,89\sim0.958\,11)u_{b2}$	$(0.906\,49\sim0.961\,37)u_{b3}$	$(0.931\,50\sim0.991\,40)u_{b4}$
	σ_{Pb}	$(0.069\,91\sim0.133\,50)u_{b1}$	$(0.043\,17\sim0.082\,44)u_{b2}$	$(0.044\,52\sim0.085\,02)u_{b3}$	$(0.048\,58\sim0.092\,77)u_{b4}$
	C_{Pb}	0.064 92～0.134 77	0.045 06～0.091 10	0.046 31～0.093 79	0.049 00～0.099 60

3　爆破压力计算公式的精度比较

3.1　精度指标

设计公式的精度是指公式的计算值与试验数据(真值)之间的接近程度,可采用差值法或者比值法研究公式精度,均值与变异系数是分析设计公式精度的重要指标[14].

①爆破压力 P_b 的均值. P_b 均值的范围为 $(\mu_{ri}^{l}\sim\mu_{ri}^{u})u_{bi}$,均值与 u_{bi} 越接近,表明公式的准确度越高. 由于 $(\mu_{ri}^{l}\sim\mu_{ri}^{u})u_{bi}-u_{bi}=[(\mu_{ri}^{l}-1)\sim(\mu_{ri}^{u}-1)]u_{bi}$,因此,当 μ_{ri}^{l} 和 μ_{ri}^{u} 与“1”越接近,表明公式的精度越高.

②爆破压力 P_b 的变异系数. P_b 的变异系数 C_{ri} 是反映 P_b 稳定性最重要的参数,此值越小,表明 P_b 变异程度小,公式的精度越高.

3.2　公式精度比较

①由表 6 及以上分析可知,当 $K=1.33\sim4.71$时,如果把式(1)～(4)的应用范围从 γ=0.402 7～0.885 2 改变为 γ= 0.499 7～ 0.885 2,公式(1)～(4)的精度分别有所提高. 因此,适度改变应用范围,可提高公式精度.

②由表 5、表 6 及以上分析可知,当式(1)～(4)的应用范围为 γ=0.402 7～0.885 2 与 K=1.33～4.71 时,均值的精度依次由式(1)(4)(2)(3)从高到低,变异系数的精度依次由式(2)(3)(1)(4)从高到低;当式(1)～(4)的应用范围缩小为 γ= 0.499 7～0.885 2 与 K= 1.33～4.71 时,均值的精度依次由式(1)(4)(3)(2)从高到低,变异系数的精度依次由式(2)(3)(4)(1)从高到低. 因此,在应用范围相同时,公式(1)～(4)的精度指标互有优劣,似存在精度比福贝尔公式(1)高的公式.

4　结　语

1)考虑容器制造材料的屈服与抗拉应力、容器的几何尺寸等因素存在的随机不确定性,基于30 个单层厚壁圆筒的试验数据,采用似然分析理论与方法,对四个计算单层厚壁圆筒爆破压力的公式进行比较分析,为厚壁圆筒爆破压力的可靠性分析提供了基础数据.

2)对于 K=1.33～4.71 与 γ=0.402 7～0.885 2的单层厚壁圆筒,在显著度为 0.05 时,其实测爆破压力与福贝尔公式(1)及式(2)～(4)的理论值之比,是基本符合正态分布的随机变量;在双侧置信度为 98%时,得到该随机变量的均值、标准差与变异系数的取值区间.

3)如果公式(1)～(4)的应用范围为 γ=0.402 7～0.885 2 与 K=1.33～4.71 的单层厚壁圆筒,均值的精度依次由式(1)、(4)、(3)、(2)从高到低,变异系数的精度依次由式(2)、(3)、(1)、(4)从高到低.

4)如果适度改变公式的应用范围,对于 γ=0.499 7～0.885 2 与 K=1.33～4.71 的单层厚壁圆筒,公式(1)～(4)的精度会相应提高;在此应用范围内,均值的精度依次由式(1)、(4)、(3)、(2)从高到低,变异系数的精度依次由式(2)、(3)、(4)、(1)从高到低.

5)适度改变应用范围,可提高设计公式精度;在应用范围相同时,公式(1)～(4)的精度指标互有优劣,似存在精度比福贝尔公式高的公式.

致　谢

感谢湖北省教育厅科学技术研究项目组,武汉市创新人才开发资金重大创新专项团队对本研究的支持与帮助.

参考文献:

[1]　TSG R0002-2005 超高压容器安全技术监察规程[S].
TSG R0002-2005 Super-high pressure vessel safety and technical supervision regulation[S]. (in Chinese)

[2]　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 Guo-hua, WEI Long-can. Super-high pressure vessel [M]. Beijing: Chemical Industry Publishing House, 2002: 20-36. (in Chinese)

[3] 柳爱群, 杨中, 杨烨. 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 Ai-quan, 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)

[4] 徐灏. 机械强度的可靠性设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 1984.
XU Hao. Mechanical strength reliability design[M]. Beijing: Mechanical Industry Publishing House, 1984. (in Chinese)

[5] 刘小宁, 刘岑, 张红卫, 等. 球形容器静强度的分布规律与参数[J]. 压力容器, 2012, 29(8): 26-30.
LIU Xiao-ning, LIU Cen, ZHANG Hong-wei, et al. Distribution law and parameters of spherical vessels static strength [J]. Pressure Vessel Technology, 2012, 29(8): 26-30. (in Chinese)

[6] 刘小宁, 张红卫, 刘岑, 等. 钢制薄壁内压容器静强度分布规律与参数分析[J]. 机械设计与研究, 2012, 28(5): 66- 69.
LIU Xiao-ning, ZHANG Hong-wei, LIU Cen, et al. Research on static strength distribution law and parameters of steel thin-walled internal pressure vessels [J]. Machine Design and Research, 2012, 28(5): 66-69. (in Chinese)

[7] 刘小宁, 刘岑, 张红卫, 等. 钢制薄壁长圆筒屈服强度分布规律与参数[J]. 机械设计, 2013, 30(1): 45-48, 54.
LIU Xiao-ning, LIU Cen, ZHANG Hong-wei, et al. Distri- bution and parameters of steel thin-walled internal pressure long cylinder yield strength[J]. Journal of Machine Design, 2013, 30(1): 45-48, 54. (in Chinese)

[8] 刘小宁, 张红卫, 刘岑, 等. 钢制内压容器可靠性安全系数的研究[J]. 武汉工程大学学报, 2011, 33(5): 106-110.
LIU Xiao-ning, ZHANG Hong-wei, LIU Cen, et al. Research on reliability safety factor of steel internal pressure vessel [J]. Journal of Wuhan Institute of Technology, 2011, 33(5): 106-110. (in Chinese)

[9] 刘兵, 袁小会, 刘岑, 等. 超高压容器用钢 AISI4340 的包辛格系数[J]. 武汉工程大学学报, 2010, 32(11): 98-100.
LIU Bing, YUAN Xiao-hui, LIU Cen, et al. Bauschinger coefficient of AISI4340 steel for Super-high pressure vessel [J]. Journal of Wuhan Institute of Technology, 2010, 32(11): 98-100. (in Chinese)

[10] 化学工程手册编辑委员会. 化工应用数学[M]. 北京: 化学工业出版社, 1983: 23-28, 369-375.
Editorial Board of Chemical Engineering Handbook. Mathematics of chemical application[M]. Beijing: Chemical Industry Publishing House, 1983: 23-28, 369-375. (in Chinese)

[11] 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 Guo-li, ZHONG Han-tong, WANG Zuo-chi. Burst test of super-high pressure polyethylene reaction tube [J]. Pressure Vessel Technology, 1991, 8(2): 40-43. (in Chinese)

[12] 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 Ji-yang, KUANG Ji-yong, 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)

[13] 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 Ge-xia, LIU Hong-zhao, QIAN Xue-mei, 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)

[14] 刘智敏. 误差与数据处理[M]. 北京: 原子能出版社, 1981.
LIU Zhi-min. Errors and data processing [M]. Beijing: Atomic Energy Publishing House, 1981. (in Chinese)

Distribution law and parameters of monolayer thick-walled cylinder burst pressure

YUAN Xiao-hui [1] ***,LIU Cen*** [2] ***,WU Yuan-xiang*** [1] ***,LIU Bing*** [1] ***,LIU Xiao-ning*** [1,2]

(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)

Abstract:Four calculation formulas of monolayer thick-walled cylinder burst pressure were analyzed by likelihood analysis theory and method based on 30 groups burst pressure test data of monolayer thick-walled cylinder. For monolayer thick-walled cylinder with the ratio of material yield strength to tensile strength between 0. 402 7 and 0. 885 2 and the ratio of cylinder outer radius to inner radius between 1. 33 and 4. 71,when the marked was 0. 05,the ratio of the burst pressure measured value and the theoretical value,calculated by the four formulas,is random variables with normal distribution. The distributed parameter range is obtained respectively with bilateral confidence of 98%. The precision of four formulas is improved by adjusting the ratio of material yield strength to tensile strength which is not less than 0. 499 7. In the same range of application,each precision index of the four formulas has its own advantages and disadvantages.

Key words:monolayer thick-walled cylinder; burst pressure; calculation formula; random variable; normal distribution; parameter range; precision index

本文编辑:陈小平