文章编号:1674－2869(2016)03－0299－08

钢制单层球形容器爆破压力的计算

刘 岑[1],袁小会[1],刘 兵[1],张 磊[1],杨 帆[2],刘小宁[1*]
1. 武汉软件工程职业学院机械工程学院,湖北 武汉 430205;
2. 武船重型工程股份有限公司,湖北 武汉 430415

摘 要:运用数理统计的假设检验理论,建立了有关因素对容器爆破压力计算公式精度影响的评价方法.基于52组钢制薄壁单层球形容器爆破压力实测数据,分析了材料屈强比对中径公式与福贝尔(Faupel)公式精度的影响.研究表明:对于材料屈强比为0.336 2~0.618 9且径比为1.109~1.257的单层球形容器,屈强比的变化对中径公式的精度没有显著影响;中径公式的集中度显著高于福贝尔公式.将屈强比范围调整为0.449 8~0.618 9且径比范围调整为1.114~1.257时,福贝尔公式的精度得到显著提高,且集中度显著高于中径公式.

关键词:球形容器;爆破压力;福贝尔公式;中径公式;屈强比;精度
中图分类号:TH49 **文献标识码**:A **doi**:10. 3969/j. issn. 1674-2869. 2016. 03. 019

Burst Pressure Calculation of Spherical Vessel with Single-Layer Steel

LIU Cen[1], *YUAN Xiaohui*[1], *LIU Bing*[1], *ZHANG Lei*[1], *YANG Fan*[2], *LIU Xiaoning*[1*]
1. School of Mechanical Engineering, Wuhan Polytechnic College of Software and Engineering, Wuhan 430205, China;
2. Wuchuan Heavy Engineering Co., Ltd, Wuhan 430415, China

Abstract: To evaluate the relative factors affecting the accuracy of the vessel burst pressure calculation formula, we established an evaluation method by using the theory of statistical hypothesis testing. Based on the burst pressure measured data of 52 sets of spherical vessels with single-layer steel, the influences of materials yield ratio on the precision of Faupel formula and mid-diameter formula were analyzed. The study shows that the change of material yield ratio has no significant effect on the mid-diameter formula's accuracy, and the mid-diameter formula's concentration is higher than that of Faupel formula, for the spherical vessels with the materials yield ratios between 0.336 2 and 0.618 9, and the diameter ratios between 1.109 and 1.257. The Faupel formula's precision is significantly improved, and the Faupel formula's concentration is higher than that of the mid-diameter formula when the materials yield ratios were adjusted from 0.449 8 to 0.618 9, and the diameter ratios from1.114 to 1.257.

Keywords: spherical vessels; burst pressure; Faupel formula; mid-diameter formula; yield ratio; precision

1 引 言

容器径比(容器外直径与内直径之比)不超过1.35的是薄壁容器,径比不低于1.35的是厚壁容器;钢制薄壁单层球形容器是石油、化工、能源与医药等行业常见的承压设备,准确计算其爆破压力,是确保安全生产的前提.中国采用有关标准规范钢制压力容器的强度设计,例如,形式简单且计算方便的中径公式,被标准[1-2]用于钢制薄壁单层球形容器设计;已由试验验证的福贝尔(Faupel)公

收稿日期:2016-04-13
基金项目:湖北省教育厅科研资助项目(B2014209)
作者简介:刘 岑,硕士. E-mail: 104742579@qq.com
*通讯作者:刘小宁,教授,正高职高级工程师. E-mail: lxngjxy@163.com

式，被标准[3]用于超高压厚壁容器设计.

屈强比是容器材料屈服强度与抗拉强度之比，文献[4-8]定性分析认为，当屈强比较小时，容器爆破压力的福贝尔公式计算值往往比实测值小偏于安全，而当屈强比较大时，计算值往往比实测值大偏于危险，另外，目前尚未见到讨论容器材料屈强比对中径公式影响的文献，福贝尔公式是否能用于计算钢制薄壁单层球形容器的爆破压力还有待探讨.

爆破压力计算公式的精度是指其计算值与试验数据（真值）之间的接近程度；定量分析屈强比对中径公式与福贝尔公式精度的影响，在一定的应用范围内，确定计算爆破压力的合适公式，或根据所要求的精度，确定爆破压力计算公式的合适应用范围，是工程界值得研究的内容[9].

为此，文中应用数理统计理论的 F 假设检验与 t 假设检验[10-11]，建立了有关因素对薄壁单层球形容器爆破压力计算公式精度影响的评价方法，基于52组钢制薄壁单层球形容器爆破压力实测数据[12-13]，定量分析了屈强比对中径公式与福贝尔公式精度的影响，为工程界选择与确定合适的薄壁单层球形容器爆破压力计算公式，或确定计算公式的合适应用范围提供依据.

2 精度评价的理论基础

2.1 两个正态分布随机变量分布参数的假设检验

如果 r_1、r_2 是符合正态分布随机变量，当分布参数的均值分别为 μ_1 与 μ_2，标准差分别为 σ_1 与 σ_2，变异系数分别为 λ_1 与 λ_2 时，其变异系数与均值及标准差存在如下关系：

$$\begin{cases}\lambda_1 = \dfrac{\sigma_1}{\mu_1} \\ \lambda_2 = \dfrac{\sigma_2}{\mu_2}\end{cases} \tag{1}$$

当标准差 σ_1 与 σ_2 以及均值 μ_1 与 μ_2 未知时，可通过其无偏估计，在一定的显著度 α 时，用数理统计理论的 F 假设检验比较 σ_1 与 σ_2 的大小关系，用 t 假设检验比较 μ_1 与 μ_2 的大小关系[10-11].

由式(1)可知，当均值 μ_1 与 μ_2 没有显著差异时，变异系数大小由标准差确定；当标准差 σ_1 与 σ_2 没有显著变异系数大小由均值确定. 显然，r_1 与 r_2 可以是两个完全不同但同时符合正态分布随机变量，其应用范围可以相同，也可以不同；在两个不同的应用范围，r_1 与 r_2 也可以表示符合正态分布的同一随机变量.

2.1.1 *两个标准差的 F 假设检验* F 假设检验是比较两个标准差是否有显著差异的有效工具，其检验统计量 F 为

$$F = \left(\frac{\delta_1}{\delta_2}\right)^2 \tag{2}$$

式(2)中，δ_1 和 δ_2 分别为标准差 σ_1 与 σ_2 的无偏估计，分别由 m_1 与 m_2 组试验数据（样本容量）统计得到.

根据样本容量选择显著度 α，由 δ_1 的自由度 v_1 ($v_1=m_1-1$) 和 δ_2 的自由度 v_2 ($v_2= m_2-1$)，以及显著度 α，可查得 F 假设检验的临界值[10-11].

1）假设标准差 σ_1 与 σ_2 无显著差异：$\sigma_1=\sigma_2$.

如果检验统计量 F 满足

$$F_{1-0.5\alpha}(v_1, v_2) \leqslant F \leqslant F_{0.5\alpha}(v_1, v_2) \tag{3}$$

表明有 $(1-\alpha)$ 的把握接受两个标准差没有显著差异的假设，即

$$\sigma_1=\sigma_2$$

其中

$$F_{1-0.5\alpha}(v_1, v_2) = \frac{1}{F_{0.5\alpha}(v_2, v_1)}$$

2）假设标准差 σ_1 与 σ_2 有显著差异，且 $\sigma_1>\sigma_2$.

如果检验统计量 F 满足

$$F > F_\alpha(v_1, v_2) \tag{4}$$

表明有 $(1-\alpha)$ 的把握接受两个标准差有显著差异的假设，且 $\sigma_1>\sigma_2$.

当检验统计量 F 接近"1"时，采用假设检验1)；当检验统计量 F 远离"1"时，采用假设检验2).

文中根据样本容量（试验数据数量）取 $\alpha=$

表1 F 的临界值(α=0.01)

Tab. 1 Critical values of F (α=0.01)

degree of freedom	critical values								
	$F_{0.005}$				$F_{0.995}$				$F_{0.01}$
	2.17	2.20	2.26	2.18	0.455	0.469	0.444	0.461	2.01
v_1	45	51	43	51	45	51	43	51	51
v_2	51	49	45	45	51	49	45	45	45

0.01,所用的F临界值如表1[10-11]所示.

2.1.2　两个均值的t假设检验　t假设检验是比较两个均值是否有显著差异的有效方法,其检验统计量t为

$$t=\sqrt{\frac{m_1m_2\left(m_1+m_2-2\right)}{m_1+m_2}}\cdot\frac{\beta_1-\beta_2}{\sqrt{m_1\delta_1^2+m_2\delta_2^2}} \tag{5}$$

式(5)中,β_1与β_2分别为μ_1与μ_2的无偏估计,分别由m_1与m_2组试验数据(样本容量)统计得到.

1)假设均值μ_1与μ_2无显著差异:$\mu_1=\mu_2$.

如果检验统计量t满足

$$\left|t\right|<t_{0.5\alpha,v} \tag{6}$$

表明有$(1-\alpha)$的把握接受两个均值没有显著差异的假设,即$\mu_1=\mu_2$.

2)假设均值μ_1与μ_2有显著差异,且$\mu_1<\mu_2$.

如果检验统计量t满足

$$t<-t_{\alpha,v} \tag{7}$$

表明有$(1-\alpha)$的把握接受假设,两个均值有显著的差异,且$\mu_1<\mu_2$.

检验统计量t的自由度为$v=v_1+v_2=m_1+m_2-2$,根据显著度α与由自由度v查得t分布的临界值,文中所用的t分布临界值见表2[10-11].

表2　t的临界值(α=0.01)

Tab. 2　Critical value of t (α=0.01)

coefficient	$t_{0.005,96}$	$t_{0.005,100}$	$t_{0.005,88}$	$t_{0.01,96}$
value	2.634	2.631	2.644	2.372

2.2　爆破压力的两种计算公式

根据中国压力容器标准的长期应用实践[1-3],可比较、分析中径公式与福贝尔公式计算钢制薄壁单层球形容器爆破压力的精度.

采用中径公式时,薄壁单层球形容器爆破压力为

$$u_{b1}=4R_m\frac{K-1}{K+1} \tag{8}$$

式(8)中,u_{b1}为用式(8)得到的容器爆破压力计算值,MPa;R_m为容器材料的抗拉强度,MPa;K为容器径比.

计算薄壁单层球形容器爆破压力的福贝尔公式为

$$u_{b2}=\frac{4}{\sqrt{3}}R_m\eta\left(2-\eta\right)\ln K \tag{9}$$

式(9)中,u_{b2}为用式(9)得到的容器爆破压力计算值,MPa;η为容器材料的屈强比,$\eta=R_{eL}/R_m$;R_{eL}为容器材料的屈服强度,MPa.

2.3　两个正态分布随机变量分布参数的无偏估计

定义如下具有统计性质的随机变量

$$\begin{cases}w_1=\dfrac{P_b}{u_{b1}}\\ w_2=\dfrac{P_b}{u_{b2}}\end{cases} \tag{10}$$

式(10)中,P_b为容器爆破压力的实测值,MPa;w_1、w_2分别为与式(8)、式(9)对应的随机变量.

在工程实践中,只能通过有限的试验数据(样本容量)分析随机变量的分布规律,得到分布参数的无偏估计. 研究表明,在公式规定的应用范围内,w_1、w_2基本符合正态分布[14-15].

对m组试验数据(样本容量)中的任意第t组实测数据,根据式(8)~(10),可得到

$$\begin{cases}w_{1,t}=\dfrac{P_{bt}}{u_{b1t}}\\ w_{2,t}=\dfrac{P_{bt}}{u_{b2t}}\end{cases} \tag{11}$$

式(11)中,P_{bt}为第t组容器爆破压力的实测值,MPa;u_{b1t}、u_{b2t}分别为用式(8)、式(9)得到的第t组容器爆破压力计算值,MPa;$w_{1,t}$、$w_{2,t}$分别为用式(8)、式(9)得到的第t组容器的统计量.

对m组试验数据(样本容量)进行统计,可得到w_1与w_2分布参数均值、标准差与变异系数的无偏估计为

$$\overline{w_j}=\frac{1}{m}\sum_{t=1}^{m}w_{j,t} \tag{12}$$

$$S_j=\sqrt{\frac{1}{m-1}\sum_{t=1}^{m}\left(w_{j,t}-\overline{w_j}\right)^2} \tag{13}$$

$$C_j=\frac{S_j}{\overline{w_j}} \tag{14}$$

式(12)~(14)中,当j=1,2时,$\overline{w_j}$、S_j、C_j分别为w_1与w_2的均值、标准差与变异系数无偏估计;m为样本容量.

由于样本容量有限,必须先通过分布参数的无偏估计研究w_1与w_2分布参数的变化规律,然后再分析w_1与w_2的精度,最后从w_1与w_2的精度得到式(8)或式(9)的精度.

2.4　精度的评价指标与评价方法

计算公式的精度可从准确性与集中性两方面评价[16-18];w_1或w_2的均值是公式准确性的度量指标,期望值为"1";w_1或w_2的变异系数是公式集中性的度量指标,期望值为"0",由于各种因素的影响,其实际期望值只能是与"0"接近的某一个正数.

计算公式的精度高是指其准确性好与集中性高,表明w_1或w_2的均值等于或接近"1",并且w_1或w_2的变异系数是与"0"接近的某一个小正数. 由于

w_1或w_2的变异系数小是均值接近"1"的前提，因此变异系数是公式精度评价的最重要指标.

评价爆破压力计算公式的精度高低的方法是：首先通过无偏估计分析w_1或w_2均值、标准差与变异系数的变化规律，然后比较w_1或w_2变异系数或其无偏估计与"0"接近的程度，优先选择变异系数小对应的公式；最后是在变异系数或其无偏估计基本相同时，比较均值或其无偏估计与"1"接近的程度，选择最接近"1"的公式.

3 爆破压力实测值与公式计算数据

文献[12-13]分别提供了48组与4组钢制薄壁单层球形容器爆破压力实测数据，由式(11)可得式(1)与式(2)的计算数据，为比较分析方便，根据材料屈强比从小到大，依次将有关计算数据分别列入表3中.

表3 单层球形容器爆破压力实测值与计算数据

Tab. 3 Measured values and calculated data of burst pressure of single-layer steel spherical vessel

No.	η	K	R_m/MPa	P_{bt}/MPa	equation (8)		equation (9)		reference
					u_{b1}/MPa	$w_{1,t}$	u_{b2}/MPa	$w_{2,t}$	
1~3	0.336 2	1.199	660.0	233.9	238.9	0.979 1	154.3	1.511 7	[12]
4~6	0.336 2	1.109	660.0	112.8	136.4	0.827 0	88.0	1.282 0	[12]
7~9	0.449 8	1.114	574.2	115.0	123.9	0.928 2	100.1	1.148 7	[12]
10~12	0.449 8	1.154	574.2	125.1	164.2	0.761 9	132.4	0.994 5	[12]
13~16	0.449 8	1.139	574.2	112.4	149.3	0.752 8	120.3	0.934 2	[12]
17~22	0.449 8	1.148	574.2	128.7	158.3	0.813 0	127.6	1.008 7	[12]
23~25	0.520 8	1.222	723.5	256.5	289.1	0.887 2	258.1	0.993 9	[12]
26~28	0.520 8	1.257	723.5	220.5	329.5	0.669 2	294.4	0.748 9	[12]
29~31	0.520 8	1.114	723.5	143.3	153.1	0.936 0	138.9	1.031 6	[12]
32~37	0.520 8	1.146	723.5	181.0	196.9	0.919 2	175.4	1.031 9	[12]
38~42	0.520 8	1.159	723.5	180.9	213.1	0.848 9	189.9	0.952 4	[12]
43~48	0.520 8	1.171	723.5	201.3	227.9	0.883 3	203.2	0.990 5	[12]
49	0.591 9	1.128	507.2	124.6	122.0	1.021 3	117.5	1.060 0	[13]
50	0.591 9	1.128	507.2	125.1	122.0	1.025 4	117.5	1.064 2	[13]
51	0.618 1	1.128	519.0	127.5	124.9	1.020 8	123.3	1.0339	[13]
52	0.618 9	1.128	470.9	117.7	113.3	1.038 8	112.0	1.050 8	[13]

4 屈强比对公式精度的影响

4.1 w_1与w_2分布参数的无偏估计

为了研究材料屈强比对公式精度的影响，基于表3中的计算数据，对于径比为1.109~1.257的薄壁单层球形容器，将式(8)与式(9)的应用范围，按材料屈强比的大小分为A、B、C与D四种类型；四种类型的应用范围及w_1与w_2分布参数的无偏估计由式(12)~(14)可得，如表4所示.

4.2 分析思路

按式(2)~(6)分析材料屈强比对式(8)或式(9)精度影响的具体思路是：首先，分析屈强比对w_1或w_2的标准差与均值影响，然后，分析w_1与w_2变异系数的变化规律与比较其变异系数大小，最后，确定屈强比对式(8)或式(9)精度有显著影响的范围.

1）比较w_1或w_2在A范围与B范围的标准差. 如果w_1或w_2在A范围与B范围的标准差没有显著差异，再比较在A范围与B范围的均值，若没有显著差异，表明屈强比小于0.449 8试验数据，对w_1或w_2在A范围时的标准差与均值没有影响，即屈强比不低于0.336 2且小于0.449 8的试验数据，对w_1或w_2在A范围与B范围时的变异系数没有显著影响，即式(8)或式(9)的精度没有显著变化.

2）当w_1或w_2在A范围与B范围的标准差没有显著差异时，比较w_1或w_2在A范围与C范围时的标准差. 如果在A范围与范围时C的标准差没有显著差异，再比较w_1或w_2在A范围与C范围时的均值，若没有显著差异，表明屈强比不超过0.618 9试验数据，对w_1或w_2的标准差与均值没有影响，即屈强比为0.336 2~0.618 9时，w_1或w_2的变异系数没有显著变化，即式(8)或式(9)的精度没有显著变化.

(3)当w_1或w_2在A范围与B范围的标准差有显著差异时，比较w_1或w_2在B范围与D范围的标准差. 如果在B范围与D范围的标准差没有显著差

表4　分布参数在不同范围的无偏估计

Tab. 4　Unbiased estimation of distribution parameters in different ranges

equation application range types	equation application range and instructions	parameters	equation(8)	equation(9)
		m	52	52
	1) η = 0.336 2~0.618 9	v	51	51
A	2) K = 1.109~1.257	$\overline{w_j}$	0.865 8	1.035 9
	3) test data number from 1 to 52 in Tab. 3	S_j	0.089 8	0.157 6
		C_j	0.103 7	0.152 1
		m	46	46
	1) η = 0.449 8~0.618 9	v	45	45
B	2) K = 1.114~1.257	$\overline{w_j}$	0.860 9	0.989 1
	3) test data number from 7 to 30 in Tab. 3	S_j	0.090 7	0.082 9
		C_j	0.105 3	0.083 8
		m	50	50
	1) η = 0.336 2~0.591 9	v	49	49
C	2) K = 1.109~1.257	$\overline{w_j}$	0.859 2	1.035 7
	3) test data number from 1 to 50 in Tab. 3	S_j	0.085 1	0.160 7
		C_j	0.099 1	0.155 2
		m	44	44
	1) η = 0.449 8~0.591 9	v	43	43
D	2) K = 1.114~1.257	$\overline{w_j}$	0.853 2	0.986 7
	3) test data number from 7 to 50 in Tab. 3	S_j	0.085 0	0.083 0
		C_j	0.099 6	0.084 1

异,再比较在B范围与D范围的均值,若没有显著差异,表明屈强比不超过0.449 8试验数据,对w_1或w_2在B时的标准差与均值没有影响,表明屈强比为0.449 8~0.618 9时,w_1或w_2的变异系数没有显著变化,即式(8)或式(9)的精度没有显著变化.

由此确定屈强比对式(8)或式(9)标准差与均值有显著影响的范围,比较式(8)或式(9)在相应范围的精度评价指标,即比较w_1或w_2均值与变异系数的大小,分析公式的准确性与集中性,在相同应用范围的不同计算公式中,确定合适的计算公式;或在相同公式的不同应用范围中,确定合适的应用范围.

4.3　屈强比对中径公式精度的影响

4.3.1　屈强比对w_1分布参数变化规律的影响

1)比较w_1在A范围与B范围的标准差.在显著度为1%时,假设w_1在A范围与B范围的标准差没有显著差异,由式(2)与表4数据,可得w_1的检验统计量F为

$$F=\left(\frac{\delta_1}{\delta_2}\right)^2=\left(\frac{0.090\ 7}{0.089\ 8}\right)^2=1.02$$

其分子与分母的自由度分别为45与51,查表1可得$F_{0.995}$与$F_{0.005}$的临界值分别为0.455与2.17,因为$F_{0.995}<F<F_{0.005}$,根据式(3),有99%的把握接受假设,w_1在A范围或B范围时,其标准差没有显著差异,即屈强比不低于0.336 2且不超过0.449 8的试验数据,对w_1的标准差没有显著影响.

比较w_1在A范围与B范围的均值.在显著度为1%时,假设w_1在A范围与B范围的均值没有显著差异;根据式(5),其检验统计量t为

$$t=\sqrt{\frac{52\cdot 46(52+46-2)}{52+46}}\times\frac{0.865\ 8-0.860\ 9}{\sqrt{52\cdot 0.089\ 8^2+46\cdot 0.090\ 7^2}}=0.266$$

由自由度$v=v_1+v_2=96$,查表2可得t的临界值$t_{0.005,96}$=2.634,由于t的绝对值小于$t_{0.005,96}$,根据式(6),有99%的把握接受假设,即w_1在A范围与B范围的均值无显著差异.

根据式(1),w_1在A范围与B范围时的变异系数没有显著差异.

2)若w_1在A范围与B范围的精密度没有显著差异,比较w_1在A范围与C范围的标准差.在显著度为1%时,假设w_1在A范围与C范围的标准差没有显著差异;由式(2)与表4数据,可得检验统计量F

$$F=\left(\frac{\delta_1}{\delta_2}\right)^2=\left(\frac{0.089\ 8}{0.085\ 1}\right)^2=1.11$$

其分子与分母的自由度分别为51与49,查表

1可得$F_{0.995}$与$F_{0.005}$的临界值分别为0.469与2.20，因为$F_{0.995}<F<F_{0.005}$，根据式(3)，有99%的把握接受假设，在A范围或C范围时，w_1的标准差没有显著差异，即屈强比不小于0.591 9且不超过0.618 9的试验数据，对w_1在A的标准差没有显著影响.

比较w_1在A范围与C范围的均值. 在显著度为1%时，假设w_1在A范围与C范围的均值没有差异；根据式(5)，其检验统计量t为

$$t=\sqrt{\frac{52\cdot 50(52+50-2)}{52+50}}\times\frac{0.865\ 8-0.859\ 2}{\sqrt{52\cdot 0.089\ 8^2+50\cdot 0.085\ 1^2}}=0.377$$

由自由度$v=v_1+v_2=100$，查表2可得t的临界值$t_{0.005,100}=2.631$，由于t的绝对值小于$t_{0.005,100}$，根据式(6)，有99%的把握接受假设，即w_1在A范围与C范围的均值无显著差异.

根据式(1)，w_1在A范围与C范围时的变异系数没有显著差异.

4.3.2 *屈强比对中径公式精度的影响分析* 根据以上分析与表4数据，有99%的把握认为，在应用范围为A，即当材料屈强比变化范围为0.336 2 ~ 0.619 8且容器径比范围为1.109~1.257时，w_1的标准差与均值没有受到材料屈强比变化的显著影响，即w_1的变异系数没有显著差异，表明中径公式在应用范围为A时的精度没有显著变化.

4.4 屈强比对福贝尔公式精度的影响

4.4.1 屈强比对w_2分布参数变化规律的影响

1)比较w_2在A范围与B范围的标准差. 在显著度为1%时，假设w_2在A范围与B范围的标准差有显著差异，且w_2在A范围时的标准差显著大于在B范围时的标准差；由式(2)与表4数据可得检验统计量F

$$F=\left(\frac{\delta_1}{\delta_2}\right)^2=\left(\frac{0.157\ 6}{0.082\ 9}\right)^2=3.61$$

其分子与分母的自由度分别为51与45，由表1可得临界值$F_{0.01}$为2.01，因为$F>F_{0.01}$，根据式(4)，有99%的把握认为，w_2在A范围与B范围时的标准差有显著差异，即屈强比不低于0.336 2且不超过0.449 8的试验数据，对w_2的标准差有显著影响，w_2在A范围时的标准差远远大于在B范围时的标准差.

比较w_2在A范围与B范围的均值. 在显著度为1%时，假设w_2在A范围与B范围的均值没有差异；根据式(5)，其检验统计量t为

$$t=\sqrt{\frac{52\cdot 46(52+46-2)}{52+46}}\times\frac{1.035\ 9-0.989\ 1}{\sqrt{52\cdot 0.157\ 6^2+46\cdot 0.082\ 9^2}}=1.789$$

由自由度$v=v_1+v_2=96$，查表2可得t的临界值$t_{0.005,96}=2.634$，由于t的绝对值小于$t_{0.005,96}$，根据式(7)，有99%的把握接受假设，即w_2在A范围与B范围的均值无显著差异.

根据式(1)，w_2在A范围与B范围时的变异系数有显著差异，且w_2在A范围时的变异系数显著大于在B范围时的变异系数.

2)当w_2在A范围与B范围的标准差有显著差异时，比较w_2在B范围与D范围的标准差. 在显著度为1%时，假设w_2在B范围与D范围的标准差没有显著差异；由式(2)与表4数据，可得检验统计量F为

$$F=\left(\frac{\delta_1}{\delta_2}\right)^2=\left(\frac{0.082\ 9}{0.083\ 0}\right)^2=1.00$$

其分子与分母的自由度分别为43与45，查表1可得$F_{0.995}$与$F_{0.005}$的临界值分别为0.444与2.26，因为$F_{0.995}<F<F_{0.005}$，根据式(3)，有99%的把握接受假设，w_2在B范围或D范围时的标准差没有显著差异，即屈强比不小于0.591 9且不超过0.618 9的试验数据，对w_2在B范围与D范围时的标准差没有显著差异.

比较w_2在B范围与D范围的均值. 在显著度为1%时，假设w_2在B范围与D范围的均值没有显著差异；根据式(5)，其检验统计量t为

$$t=\sqrt{\frac{44\cdot 46(44+46-2)}{44+46}}\times\frac{0.986\ 7-0.989\ 1}{\sqrt{44\cdot 0.083\ 0^2+46\cdot 0.082\ 9^2}}=-0.137$$

由自由度$v=v_1+v_2=88$，查表2可得t的临界值$t_{0.005,88}=2.644$，由于t的绝对值小于$t_{0.005,88}$，根据式(6)，有99%的把握接受假设，即w_2在B范围与D范围的均值无显著差异. 根据以上分析与式(1)可知，w_2在B范围与D范围时的变异系数没有显著差异.

4.4.2 *屈强比对福贝尔公式精度的影响分析* 基于以上分析，有99%的把握认为，当w_2分别在A范围与B范围(或D范围)时，其均值没有显著差异，w_2在B时的标准差显著小于在A范围时的标准差，在B范围与D范围时的标准差没有显著差异. 因此，w_2在B范围与D范围时的变异系数没有显著差异，但明显小于A范围的，即福贝尔公式在B范围

与D范围时的精度没有变化,但集中度比在A范围时的高.

4.5　不同应用范围中径公式与福贝尔公式精度比较

中径公式在应用范围为A时的精度基本没有变化,福贝尔公式在应用范围为B时的精度基本也无明显变化,A范围比B范围广,为给比较、选择与确定合适的公式提供依据,必须研究中径公式在A范围与福贝尔公式在B范围时的精度高低.

4.5.1　*标准差比较*　在显著度为1%时,假设w_1在A与w_2在B的标准差没有显著差异;由式(2)与表4数据,可得检验统计量F为

$$F=\left(\frac{\delta_1}{\delta_2}\right)^2=\left(\frac{0.089\ 8}{0.082\ 9}\right)^2=1.17$$

其分子与分母的自由度分别为51与45,查表1可得$F_{0.995}$与$F_{0.005}$的临界值分别为0.461与2.18,因为$F_{0.995}<F<F_{0.005}$,根据式(3),有99%的把握接受假设,w_1在A范围与w_2在B范围的标准差无太大差异.

4.5.2　*均值比较*　在显著度为1%时,假设w_1在A范围与w_2在B范围的均值有显著差异,并且w_1的均值显著小于w_2的;由式(5)与表4数据可得检验统计量t为

$$t=\sqrt{\frac{52\cdot 46(52+46-2)}{52+46}}\times \frac{0.865\ 1-0.989\ 1}{\sqrt{52\cdot 0.089\ 8^2+45\cdot 0.095\ 7^2}}=-6.530$$

由自由度$v=v_1+v_2=96$,查表2可得t的临界值$t_{0.01,96}=2.372$,由于$t<-t_{0.01,96}$,根据式(6),有99%的把握接受假设w_1在A范围与w_2在B范围的均值有显著差异,并且w_1的在A范围均值显著小于w_2在B范围的均值.

4.5.3　*精度比较*　根据以上分析与式(1)可知,w_1的在A范围变异系数显著大于w_2在B范围的,因此,有99%的把握认为,福贝尔公式在B范围时的集中度显著高于中径公式在A范围时的.

5　计算公式的合适性分析

5.1　合适的计算公式

根据以上分析,在应用范围为A范围时,有99%的把握认为,w_1的标准差与均值,以及w_2的均值,没有受到材料屈强比大小的影响,但屈强比小于0.449 8的试验数据,对w_2标准差的影响显著,使w_2的标准差与变异系数显著变大.

根据表4,在应用范围为A范围时,w_1变异系数的无偏估计小于w_2的,表明中径公式的集中性比福贝尔公式高;根据公式精度的评价方法,应优先采用集中性高的公式,因此,用中径公式计算A范围容器的爆破压力,比福贝尔公式合适.

5.2　计算公式的合适应用范围

基于以上分析,将材料屈强比从0.336 2~0.618 9调整为0.449 8~0.618 9,容器径比相应调整为1.114 ~1.257,有99%的把握认为,此时w_2与w_1标准差没有显著差异,w_2的均值显著大于w_1的均值,即w_2在B范围时的变异系数显著小于w_1在A范围时的,表明贝尔公式在B范围时的集中度显著高于中径公式在A范围时的,因此,表4中的B范围是福贝尔公式的合适应用范围.

在应用范围为A,即对于材料屈强比为0.336 2~0.618 9且径比为1.109~1.257的薄壁单层球形容器,宜采用中径公式计算爆破压力;福贝尔公式的合适应用范围为B,即材料屈强比为0.449 8~0.618 9且容器径比为1.114~1.257的薄壁单层球形容器;虽然中径公式的应用范围A比福贝尔公式的B范围广,但福贝尔公式在其合适应用范围B的集中度比中径公式在A范围的高.

6　结　语

应用数理统计理论中的F假设检验与t假设检验,建立了有关因素对钢制薄壁单层球形容器爆破压力计算公式精度影响的评价方法;基于52组钢制薄壁单层球形容器爆破压力实测数据,在显著度为1%时,定量分析了材料屈强比对中径公式与福贝尔公式精度的影响,得到如下主要结论:

1)对于径比为1.109~1.257的钢制薄壁单层球形容器,当材料屈强比变化范围为0.336 2~0.618 9时,有99%的把握认为:中径公式对应随机变量的均值、标准差与变异系数没有受到显著影响,中径公式的精度基本没有变化,并且集中性比福贝尔公式高,宜采用中径公式计算本范围的钢制薄壁单层球形容器的爆破压力;屈强比的变化对福贝尔公式对应随机变量的均值没有显著影响.

2)屈强比不小于0.336 2且不超过0.449 8的试验数据,显著增大了福贝尔公式对应随机变量的标准差;对于屈强比为0.449 8~0.618 9且径比为1.114~1.257的钢制薄壁单层球形容器,有99%的把握认为:福贝尔公式对应随机变量的标准差与中径公式的没有显著差异,但福贝尔公式对应随机变量的均值显著大于中径公式的,变异系数小于中径公式的,即福贝尔公式的集中度比中径公式高,用福贝尔公式计算此范围容器的爆破压力

比中径公式合适.

3)中径公式与福贝尔公式均可用于钢制薄壁单层球形容器爆破压力的计算,中径公式的应用范围比福贝尔公式的广,福贝尔公式在其合适应用范围的集中度比中径公式高.

参考文献:

[1] 中华人民共和国国家标准. 钢制球形储罐:GB12337-2014[S]. 北京:中国标准出版社,2014: 25-27.

[2] 中华人民共和国国家标准. 压力容器:GB 150-2011[S]. 北京:中国标准出版社,2012:94-95.

[3] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 超高压容器安全技术监察规程:TSG R0002-2005[S]. 北京:中国计量出版社,2005:13-14.

[4] 邵国华,魏龙灿. 超高压容器[M]. 北京:化学工业出版社,2002.

[5] 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 X Z, CHEN G L. Calculation of bursting pressures for high pressure vessels[J]. Petro-chemical equipment technology, 1995, 16(1): 23-26 .

[6] 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 A Q, YANG Z, YANG Y. Amendment of empirical formulas calculating bursting pressure of cylindrical vessels[J]. Journal of mechanical strength, 2013, 35(5): 652-656.

[7] 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 J Y, KUANG J Y, XU P, et al. Research into bursting pressures of the multi-layered super-high pressure vessel [J]. Chemical engineering & machinery, 1994, 21(5): 271-277.

[8] 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 G L, ZHONG H T, WANG Z C. Burst test of super-high pressure polyethylene reaction tube [J]. Pressure vessel technology, 1991, 8(2): 40-43.

[9] 刘小宁,刘岑,吴元祥,等. 超高压圆筒形容器爆破压力计算公式的比较[J]. 机械强度,2015,37(2):373-376.
LIU X N, LIU C, WU Y X, et al. Burst pressure caculation formula compare of super-high pressure cylinder vessel[J]. Journal of mechanical strength, 2015, 37(2): 373-376.

[10] 熊德之,张志军. 概率论与数理统计及其应用[M]. 北京:科学出版社,2007:151-153,261-266.

[11] 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,1983:30-33,372-374.

[12] 柳爱群,尹益辉,刘兴福. 基于实测数据的特种球形压力容器爆破压力计算公式[J]. 应用数学和力学,2014,35(11):1232-1238.
LIU A Q, YIN Y H, LIU X F. Reconstructed formulas calculating bursting pressure of the special spherical pressure vessels based on experimental data [J]. Applied mathematics and mechanics, 2014, 35(11): 1232-1238.

[13] 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 X N, LIU C, ZHANG H W, et al. Research on distribution and parameters of the spherical vessel static strength [J]. Pressure vessel technology, 2012, 29(8):26-30.

[14] 刘小宁,刘岑,张红卫,等. 单层与多层球形容器爆破压力的概率分布[J]. 武汉工程大学学报,2015,37(7):49-54.
LIU X N, LIU C, ZHANG H W, et al. Probability distribution of single-layer and multi-layer spherical vessel burst pressure [J]. Journal of Wuhan institute of technology, 2015, 37(7): 49-54.

[15] 李清,袁小会,刘岑,等. 有效试验数据对钢材机械性能分布规律的影响[J]. 武汉工程大学学报,2015,37(4):69-73.
LI Q, YUAN X H, LIU C, et al. Validity test data effect on steel mechanical properties distribution law [J]. Journal of Wuhan institute of technology, 2015, 37(4): 69- 73.

[16] 刘小宁,刘岑,张红卫,等. 薄壁球形容器爆破压力计算公式精度研究[J]. 压力容器,2016,33(3):32-38.
LIU X N, LIU C, ZHANG H W, et al. Calculation precision of burst pressure formulas for thin-walled spherical vessels [J]. Pressure vessel technology, 2016, 33(3): 32-38.

[17] 刘小宁,刘岑,刘兵,等. 单层厚壁内压圆筒设计公式改进效果的可靠性研究[J]. 机械强度,2016,38(2):276-283.
LIU X N, LIU C, LIU B, et al. Improvement effect reliability research on single layer thick-walled internal pressure cylinder design formulas [J]. Journal of mechanical strength, 2016, 38(2): 276-283.

[18] 刘小宁,刘岑,张红卫,等. 对"基于实测数据的特种球形压力容器爆破压力计算公式"一文的商榷[J]. 应用数学和力学,2016,37(5):552-550.
LIU X N, LIU C, ZHANG H W, et al. Discussion on 'reconstructed formulas calculating bursting pressure of the special spherical pressure vessels based on experimental data' [J]. Applied mathematics and mechanics, 2016, 37(5): 552-550.

本文编辑:陈小平