

基于可靠度的铜制圆筒静强度设计

杨帆 陈刚 陈帆 刘兵 张红卫 刘小宁
(武汉软件工程职业学院 机械工程学院, 武汉 430205)

摘要:【目的】针对铜制内压薄壁圆筒静强度设计缺乏系统化可靠度设计方法的问题,建立铜制单层薄壁内压长圆筒静强度可靠性设计方法,量化不同工况下关键设计参数的取值边界。【方法】首先,应用概率论方法,构建静强度与载荷均服从正态分布、强度分布参数为区间值时,圆筒可靠度系数与试验应力限制系数、载荷系数、安全系数的通用关联式,为可靠度量化分析提供计算基础;其次,对标钢制圆筒与球罐可靠度基准,按最低使用要求,确定不同工况下铜制圆筒屈服、爆破强度的允许可靠度系数;然后,基于允许可靠度系数,确定不同工况下试验应力限制系数、屈服与爆破安全系数、载荷系数的取值范围;最后,校验国家标准中相关设计参数的合理性。【结果】研究结果明确了铜制圆筒屈服安全系数可取1.45、爆破安全系数可取2.00,量化了不同工况下试验应力限制系数、载荷系数的取值范围,解析结果与国家标准参数基本一致,丰富了铜制圆筒静强度可靠度设计内容,为铜制承压圆筒结构设计提供参考。

关键词: 铜制圆筒; 静强度; 可靠度系数; 试验应力限制系数; 安全系数; 载荷系数

中图分类号: TQ051.3; TH49 **DOI:** 10.16579/j.issn.1001.9669.2026.04.017

0 引言

铜制单层内压薄壁圆筒是生产与生活中不可或缺的承压结构。为确保其安全可靠,中国制定了相关标准和规程,如JB/T 4755—2006^{[1]-16}、GB 150.1~150.4—2011^{[2]-15}等,以规范其设计、制造、检验、耐压试验和正常使用。

铜制圆筒的屈服强度与爆破强度统称为静强度。圆筒的工况包括耐压试验和正常操作。根据试验介质,耐压试验分为液压试验、气压试验和气-液组合试验;根据试验时圆筒最大薄膜应力的控制水平,又可分为最大薄膜应力达到限制水平的最苛刻试验和未达到限制水平的一般试验。国家标准^{[1]-16}^{[2]-15}的设计思路是将圆筒静强度与不同工况载荷视为常量,依据经验确定安全系数、试验应力限制系数和载荷系数,采用中径公式确定圆筒尺寸,并校核最大薄膜应力。然而,长径比较大的圆筒^[3]^[1160-1166]^[4]^[11-14]的静强度的实测值^[5]^[5-9]^[6]^[365-373]和不同工况的载荷^[7]^[11-14]均为基本符合正态分布的随机变量,且静强度分布参数为区间值^[5]^[5-9]^[6]^[365-373]^[7]^[11-14]。将静强度大于载荷的概率定义为可靠度时,如何基于国家标准可接受的最苛刻试验中钢制圆筒和球罐的静强度可靠度系数^[8]^[20-24],确定不同

工况下铜制圆筒静强度的允许可靠度系数,并定量分析允许可靠度系数、试验应力限制系数、屈服安全系数、爆破安全系数及载荷系数之间的关系,是基于可靠度的铜制圆筒静强度设计的核心内容,也是建立其静强度可靠性设计标准^[9]的基础,值得深入研究。

为此,本文以符合国家标准^{[1]-16}的铜制单层薄壁长圆筒^[3]^[1160-1166]^[4]^[11-14]为研究对象,应用概率论知识^[10]^[11]^[1-130]^[12],构建圆筒静强度可靠度系数、试验应力限制系数、屈服安全系数、爆破安全系数及载荷系数之间的关联式。与最苛刻试验的钢制圆筒和球罐静强度可靠度系数相比,按合乎使用的最低要求,讨论铜制圆筒静强度在不同工况下的允许可靠度系数,并根据允许可靠度系数分析和确定试验应力限制系数、屈服安全系数、爆破安全系数及载荷系数,丰富基于可靠度的铜制圆筒静强度设计内容。

1 构建关联式

1.1 强度-载荷干涉模型

假设 P_r 为铜制单层内压薄壁圆筒静强度的实测值, P_l 为圆筒在不同工况下的载荷,确定圆筒静强度在不同工况下可靠度的功能函数为 $y = P_r - P_l$ 。其中,下标“ r ”表示静强度类型,当 r 分别为p、m时,表明参

收稿日期: 2024-07-08 修回日期: 2024-08-20

基金项目: 武汉市知识创新专项曙光计划项目(2022010801020439)

作者简介: 杨帆,男,1989年生,湖北武汉人,硕士,讲师,工程师; 主要研究方向为机械智能建造; E-mail: 15172540623@qq.com。
刘小宁(通信作者),男,1963年生,湖北武汉人,教授,正高级工程师; 主要研究方向为承压设备强度的可靠性; E-mail: lxngjxy@163.com。

引用格式: 杨帆,陈刚,陈帆,等. 基于可靠度的铜制圆筒静强度设计[J]. 机械强度, 2026, 48(4): 148-158.

YANG Fan, CHEN Gang, CHEN Fan, et al. Static strength design of copper cylinder based on reliability [J]. Journal of Mechanical Strength, 2026, 48(4): 148-158.



免费获取

数分别对应屈服强度(屈服应力)、爆破强度(抗拉应力)。

圆筒静强度的可靠度是指 $y \geq 0$ 的概率,当 P_r 与 P_l 分别符合正态分布,且其分布参数分别为确定值时,强度-载荷干涉模型^{[11]1-130}描述可靠度系数与静强度和载荷分布参数的关系为

$$\beta_r = \frac{\mu_{pr} - \mu_l}{\sqrt{\sigma_{pr}^2 + \sigma_l^2}} = \frac{\mu_{pr} - \mu_l}{\sqrt{C_r^2 \mu_{pr}^2 + C_l^2 \mu_l^2}} \quad (1)$$

式中, β_r 为不同工况下圆筒静强度的可靠度系数; μ_{pr} 、 σ_{pr} 与 C_r 分别为 P_r 的均值、标准差与变异系数; μ_l 、 σ_l 与 C_l 分别为 P_l 的均值、标准差与变异系数。根据 β_r 的值,查正态分布表,可得静强度的可靠度。

1.2 静强度的分布规律与分布参数

铜制圆筒静强度实测值 P_r 基本服从正态分布,其分布参数可用区间值^{[5-9]6]365-373}表示为

$$\mu_{pr}: \mu_{pr}^l \sim \mu_{pr}^u, \text{ 其中, } \mu_{pr}^l = \mu_r^l u_r; \mu_{pr}^u = \mu_r^u u_r \quad (2)$$

$$\sigma_{pr}: \sigma_{pr}^l \sim \sigma_{pr}^u, \text{ 其中, } \sigma_{pr}^l = \sigma_r^l u_r; \sigma_{pr}^u = \sigma_r^u u_r \quad (3)$$

$$C_r: C_r^l \sim C_r^u, \text{ 其中, } C_r^l = \frac{\sigma_r^l}{\mu_r^l}; C_r^u = \frac{\sigma_r^u}{\mu_r^u} \quad (4)$$

式中, μ_{pr}^l 与 μ_{pr}^u 分别为均值 μ_{pr} 的下限与上限; μ_r^l 与 μ_r^u 分别为均值 μ_r 统计量的下限与上限; σ_{pr}^l 与 σ_{pr}^u 分别为标准差 σ_{pr} 的下限与上限; σ_r^l 与 σ_r^u 分别为标准差 σ_r 统计量的下限与上限; C_r^l 与 C_r^u 分别为变异系数 C_r 的下限与上限; u_r 为圆筒静强度的中径公式计算值。

圆筒静强度的中径公式^{[11]1-16}计算值 u_r 的计算式为

$$u_r = 2 \frac{k-1}{k+1} R_r \quad (5)$$

式中, k 为圆筒外直径与内直径之比的名义值; R_r 为圆筒材料的屈服应力或抗拉应力的名义值。当 R_r 分别取圆筒材料的屈服应力与抗拉应力的名义值 R_p 与 R_m 时, u_r 分别为圆筒屈服与爆破强度的计算值 u_p 与 u_m 。

1.3 不同工况载荷的分布规律与分布参数

圆筒工况包括耐压试验和正常操作。对于铜制圆筒,耐压试验分为最苛刻试验和一般试验。按国家标准^{[11]1-16]2]1-15},在液压试验、气压试验或气-液组合试验中,若圆筒的最大总体薄膜应力分别达到圆筒材料屈服应力 R_p 的 90%、80%,称为最苛刻试验;未达到限制水平的称为一般试验。不同工况下载荷基本服从正态分布^{[7]11-14},但其分布参数并不相同,需要分别讨论。

1.3.1 最苛刻试验的载荷与试验应力限制系数

定义最苛刻试验中圆筒允许最大总体薄膜应力 $(\sigma_{Ti})_{\max}$ 与材料屈服应力或抗拉应力名义值 R_r 之比为试验应力限制系数 λ_{ri} ,其计算式为

$$\lambda_{ri} = \frac{(\sigma_{Ti})_{\max}}{R_r} \quad (6)$$

式中,下标“ i ”表示最苛刻试验的试验介质,当 i 为 1 时,表示参数对应最苛刻液压试验,当 i 为 2 时,表示参数对应最苛刻气压试验或最苛刻气-液组合试验。例如, $(\sigma_{T1})_{\max}$ 表示液压试验中圆筒的允许最大薄膜应力,而 λ_{r2} 表示气压试验或气-液组合试验中圆筒基于材料抗拉应力的试验应力限制系数。

由式(6)可得试验圆筒最大薄膜应力的限制条件,表示为

$$(\sigma_{Ti})_{\max} = \lambda_{ri} R_r \quad (7)$$

将式(7)变形,可得

$$2 \frac{k-1}{k+1} (\sigma_{Ti})_{\max} = \lambda_{ri} \cdot 2 \frac{k-1}{k+1} R_r \quad (8)$$

比较式(8)与式(5),可得最苛刻试验的圆筒载荷的均值 μ_i ,即

$$\mu_i = \lambda_{ri} u_r \quad (9)$$

根据文献^{[7]11-14},可得最苛刻试验的圆筒载荷的标准差 σ_i 与变异系数 C_i ,即

$$\sigma_i = \lambda_{ri} u_r C_i, C_i = 0.045 \quad (10)$$

1.3.2 正常操作和一般试验的载荷与载荷系数

一般试验与正常操作的圆筒的载荷基本服从正态分布^{[7]11-14},可将基于静强度允许可靠度系数的载荷系数 δ_{vj} 定义为圆筒载荷 P_l 的均值 μ_l 与圆筒的设计压力 p 之比,即

$$\delta_{vj} = \frac{\mu_l}{p} \quad (11)$$

式中,下标“ j ”表示一般试验的试验介质或圆筒工作状态,当 j 分别为 1、2、3 时, δ_{vj} 分别为圆筒在一般液压试验、一般气压试验或一般气-液组合试验、正常操作的载荷系数。

一般试验与正常操作下,圆筒载荷的分布参数^{[7]11-14}为

$$\mu_l = \delta_{vj} p, \sigma_l = \delta_{vj} p C_l, C_l = \sigma_l / \mu_l \quad (12)$$

研究表明^{[7]11-14},一般试验的载荷变异系数 C_l 的值为 0.045,正常操作的载荷变异系数 C_l 的值为 0.091。

1.4 通用关联式

当圆筒静强度与载荷均服从正态分布,且静强度分布参数为区间值时,由式(1)可得不同工况下圆筒静强度可靠度系数的下限 β_r^l 与上限 β_r^u ,即

$$\beta_r^l = \frac{\mu_{pr}^l - \mu_l}{\sqrt{(\sigma_{pr}^l)^2 + \sigma_l^2}} \quad (13)$$

$$\beta_r^u = \frac{\mu_{pr}^u - \mu_l}{\sqrt{(\sigma_{pr}^u)^2 + \sigma_l^2}} \quad (14)$$

式(13)与式(14)是强度-载荷干涉模型[式(1)]的拓展,将式(2)~式(4)、式(10)和式(12)代入式(13)、式(14)中,可构建静强度可靠度系数-试验应力限制系数-安全系数-载荷系数的通用关联式。显然,式(13)、式(14)与静强度计算公式的精度等因素相关^{[13]856-867[14]1104-1118}。

1.5 最苛刻试验的圆筒静强度可靠度系数

将式(2)~式(4)、式(10)代入式(13)、式(14)中,可得最苛刻试验的圆筒静强度可靠度系数的下限 β_{rt}^1 与上限 β_{rt}^u 的计算值,即

$$\beta_{rt}^1 = \frac{\mu_r^1 - \lambda_{ri}}{\sqrt{(\mu_r^1 C_r^u)^2 + (\lambda_{ri} C_1)^2}} \quad (15)$$

$$\beta_{rt}^u = \frac{\mu_r^u - \lambda_{ri}}{\sqrt{(\mu_r^u C_r^1)^2 + (\lambda_{ri} C_1)^2}} \quad (16)$$

式中,下标“r”表示参数对应最苛刻试验; β_{rt}^1 与 β_{rt}^u 分别表示最苛刻液压试验的圆筒屈服强度可靠度系数的下限与上限的计算值。

由于式(15)和式(16)中的参数 μ_r^1 、 μ_r^u 、 C_r^1 、 C_r^u 与 C_1 已通过实测和分析得到^{[5]5-9[7]11-14},标准规定了 λ_{r1} 与 λ_{r2} 分别取0.90与0.80^{[11]-16[2]11-15},因此,对于符合国家标准的圆筒,根据式(15)和式(16),可得其静强度在最苛刻试验中的可靠度系数的下限 β_{rt}^1 与上限 β_{rt}^u ,这也是与其他承压结构相比,按照合乎使用的最低要求,确定最苛刻试验的圆筒静强度允许可靠度系数的下限 $[\beta_{rt}^1]$ 与上限 $[\beta_{rt}^u]$ 的基础。

1.6 允许可靠度系数与试验应力限制系数

分析得到最苛刻试验的圆筒静强度允许可靠度系数的下限 $[\beta_{rt}^1]$ 与上限 $[\beta_{rt}^u]$ 后,由式(15)、式(16)可得分别与 $[\beta_{rt}^1]$ 、 $[\beta_{rt}^u]$ 对应的最苛刻试验的应力限制系数的计算值 λ_{ri}^1 、 λ_{ri}^u ,即

$$\lambda_{ri}^1 = \mu_r^1 \cdot \frac{1 - [\beta_{rt}^1]}{1 - [\beta_{rt}^1]^2 (C_r^u)^2} \sqrt{(C_r^u)^2 + C_1^2 - [\beta_{rt}^1]^2 (C_r^u)^2 C_1^2} \quad (17)$$

$$\lambda_{ri}^u = \mu_r^u \cdot \frac{1 - [\beta_{rt}^u]}{1 - [\beta_{rt}^u]^2 (C_r^1)^2} \sqrt{(C_r^1)^2 + C_1^2 - [\beta_{rt}^u]^2 (C_r^1)^2 C_1^2} \quad (18)$$

最苛刻试验的圆筒同一静强度的试验应力限制系数可取值 λ_{ri} 应不超过 λ_{ri}^1 与 λ_{ri}^u 中的较小值,即

$$\lambda_{ri} \leq \min\{\lambda_{ri}^1, \lambda_{ri}^u\} \quad (19)$$

值得注意的是, $[\beta_{rt}^1]$ 和 $[\beta_{rt}^u]$ 的大小与圆筒静强度类型和工况有关,即在不同工况下,相同静强度的 $[\beta_{rt}^1]$ 和 $[\beta_{rt}^u]$ 是不一样的;或在相同工况下,不同静强度对应的 $[\beta_{rt}^1]$ 和 $[\beta_{rt}^u]$ 也可能不一样。

1.7 允许可靠度系数与安全系数和载荷系数

基于圆筒静强度允许可靠度的安全系数 n_r 可定

义为圆筒静强度中径公式计算值 u_r 与设计压力 p 之比,即

$$n_r = \frac{u_r}{p} \quad (20)$$

基于最苛刻试验圆筒静强度的允许可靠度系数下限 $[\beta_{rt}^1]$ 和上限 $[\beta_{rt}^u]$,按照合乎使用的最低要求,在一般液压试验、一般气压试验和气-液组合试验、正常操作下,可分别确定圆筒静强度允许可靠度系数的下限和上限,即 $[\beta_{rc1}^1]$ 和 $[\beta_{rc1}^u]$ 、 $[\beta_{rc2}^1]$ 和 $[\beta_{rc2}^u]$ 、 $[\beta_{rc3}^1]$ 和 $[\beta_{rc3}^u]$ 。其中,下标“c”表示参数对应一般试验和正常操作。

将式(2)~式(4)、式(11)、式(12)、式(20)代入式(13)、式(14)中,可分别得到一般试验和正常操作的圆筒静强度允许可靠度系数与安全系数、载荷系数的关系,即

$$\frac{n_{rj}^1}{\delta_{rj}^1} = \frac{1}{\mu_r^1} \cdot \frac{1 + [\beta_{rcj}^1]}{\sqrt{(C_r^u)^2 + C_1^2 - [\beta_{rcj}^1]^2 (C_r^u)^2 C_1^2}} \quad (21)$$

$$\frac{n_{rj}^u}{\delta_{rj}^u} = \frac{1}{\mu_r^u} \cdot \frac{1 + [\beta_{rcj}^u]}{\sqrt{(C_r^1)^2 + C_1^2 - [\beta_{rcj}^u]^2 (C_r^1)^2 C_1^2}} \quad (22)$$

式中, n_{rj}^1 和 δ_{rj}^1 分别为与 $[\beta_{rcj}^1]$ 对应的安全系数和载荷系数; n_{rj}^u 和 δ_{rj}^u 分别为与 $[\beta_{rcj}^u]$ 对应的安全系数和载荷系数; $[\beta_{rcj}^1]$ 与 $[\beta_{rcj}^u]$ 分别是一般试验和正常操作圆筒静强度允许可靠度系数的下限与上限。

式(21)与式(22)即为圆筒静强度允许可靠度系数与安全系数和载荷系数的关联式。显然, n_{rj}^1 和 n_{rj}^u 、 δ_{rj}^1 和 δ_{rj}^u 不但与静强度类型有关,而且与圆筒的工况有关。

1.7.1 静强度安全系数

在一般试验与正常操作中,国家标准^{[11]-16[2]11-15}规定了载荷系数的取值:在液压试验中取1.25;在气压试验或气-液组合试验中取1.15^{[11]-16}或1.10^{[2]11-15};在正常操作时取1.00。如果分析得到 $[\beta_{rcj}^1]$ 、 $[\beta_{rcj}^u]$,由式(21)和式(22)可知,圆筒静强度安全系数的下限 n_{rj}^1 、上限 n_{rj}^u 分别为

$$n_{rj}^1 = \frac{\delta_{rj}^1}{\mu_r^1} \cdot \frac{1 + [\beta_{rcj}^1]}{\sqrt{(C_r^u)^2 + C_1^2 - [\beta_{rcj}^1]^2 (C_r^u)^2 C_1^2}} \quad (23)$$

$$n_{rj}^u = \frac{\delta_{rj}^u}{\mu_r^u} \cdot \frac{1 + [\beta_{rcj}^u]}{\sqrt{(C_r^1)^2 + C_1^2 - [\beta_{rcj}^u]^2 (C_r^1)^2 C_1^2}} \quad (24)$$

在相同工况下,同一静强度的安全系数 n_{rj} 应不小于 n_{rj}^1 与 n_{rj}^u 中的较大者,即

$$n_{rj} \geq \max\{n_{rj}^1, n_{rj}^u\} \quad (25)$$

在同一静强度的不同工况下,应将 n_{rj} 中的较大者确定为安全系数,因此,基于不同工况同一静强度允

许可靠度要求的安全系数 n_r 必须满足:

$$n_r \geq \max \{ n_{r1}, n_{r2}, n_{r3} \} \quad (26)$$

式中, n_{r1} 、 n_{r2} 、 n_{r3} 分别为满足一般液压试验、一般气压试验或气-液组合试验、正常操作时圆筒静强度可靠度要求的安全系数上限中的较大者。

1.7.2 载荷系数

耐压试验主要目的是检验圆筒宏观强度。载荷系数过大可能引起不必要损伤,过小则可能无法有效验证宏观静强度。正常操作下载荷应不超过设计压力,即载荷系数不大于 1。

1) 载荷系数的上限。根据分析得到 $[\beta_{rej}^l]$ 与 $[\beta_{rej}^u]$, 采用式(23)~式(26)得到圆筒静强度安全系数 n_r , 由式(21)与式(22)可知,在同一静强度的相同工况下,载荷系数的计算值 δ_{ij}^l 与 δ_{ij}^u 分别为

$$\delta_{ij}^l = \mu_r^l n_r \cdot \frac{1 - [\beta_{rej}^l]^2 (C_r^u)^2}{1 + [\beta_{rej}^l] \sqrt{(C_r^u)^2 + C_1^2 - [\beta_{rej}^l]^2 (C_r^u)^2 C_1^2}} \quad (27)$$

$$\delta_{ij}^u = \mu_r^u n_r \cdot \frac{1 - [\beta_{rej}^u]^2 (C_r^l)^2}{1 + [\beta_{rej}^u] \sqrt{(C_r^l)^2 + C_1^2 - [\beta_{rej}^u]^2 (C_r^l)^2 C_1^2}} \quad (28)$$

一般试验与正常操作时,同一静强度载荷系数计算值 δ_{ij} 应满足:

$$\delta_{ij} \leq \min \{ [\beta_{rej}^l], [\beta_{rej}^u] \} \quad (29)$$

确定静强度的载荷系数,应先分别按式(29)计算同一工况下相同静强度中 $[\beta_{rej}^l]$ 与 $[\beta_{rej}^u]$ 的较小者,再取相同工况下不同静强度系数计算值中的最小值作为载荷系数上限的基础。

2) 耐压试验的载荷系数的下限。在 95% 可靠度下,耐压试验压力的下限为 $\delta_{ij} p (1 - 1.645 C_1)$, 为确保试验压力能够达到检验球罐宏观强度的效果,其下限必

须满足 $\delta_{ij} p (1 - 1.645 C_1) \geq p$ 。因此,载荷系数应满足

$$\delta_{ij} \geq \frac{1}{1 - 1.645 C_1} \quad (30)$$

由式(30)可知,耐压试验载荷系数下限与圆筒屈服强度或爆破强度无关。

2 圆筒静强度与载荷的概率分布

2.1 铜制圆筒静强度的概率分布

铜制圆筒实测屈服强度和实测爆破强度均为基本服从正态分布的随机变量,分布参数的区间值如表 1^{[5]-9} 所示。

表 1 铜制圆筒静强度分布参数

Tab. 1 Static strength distribution parameters of the copper cylinder

参数	屈服强度	爆破强度
$(\mu_r^l \sim \mu_r^u) u_r$	(0.966 6~0.997 0) u_p	(0.966 6~0.997 0) u_m
$(\sigma_r^l \sim \sigma_r^u) u_r$	(0.114 6~0.130 5) u_p	(0.077 90~0.097 90) u_m
$C_r^l \sim C_r^u$	0.114 9~0.135 0	0.078 13~0.101 3

2.2 国家标准中不同工况与载荷概率的分布

按国家标准^{[1]-16}^{[2]-15},圆筒静强度计算的设计压力不低于正常操作工作压力,一般试验压力由设计压力确定并与试验介质相关。液压试验中,铜制圆筒载荷系数 $\delta_{p1} = \delta_{m1} = 1.25$;在气压试验或气-液组合试验中,铜制圆筒载荷系数 $\delta_{p2} = \delta_{m2} = 1.15$ ^{[1]-16},钢制圆筒与球罐载荷系数 $\delta'_{p2} = \delta'_{m2} = 1.10$ ^{[2]-15};在耐压试验中,载荷的变异系数 C_1 的值为 0.045;正常操作时,铜制圆筒的载荷系数 $\delta_{p3} = \delta_{m3} = 1.15$,载荷的变异系数 C_1 的值为 0.091。

不同工况下,圆筒的载荷基本服从正态分布,按国家标准确定的分布参数如表 2^{[7]-14} 所示。

表 2 国家标准中铜制圆筒载荷分布参数

Tab. 2 Load distribution parameters of copper cylinder in national standard

参数	最苛刻试验		一般试验		正常操作
	液压试验	气压试验或气-液组合试验	液压试验	气压试验或气-液组合试验	
$\delta_{ij} = \delta_{mj}$	—	—	1.25	1.15	1.00
μ_1	0.90 u_p	0.80 u_p	1.25 p	1.15 p	1.00 p
σ_1	0.040 5 u_p	0.036 0 u_p	0.056 25 p	0.051 75 p	0.091 p
C_1	0.045	0.045	0.045	0.045	0.091

3 圆筒静强度的允许可靠度系数

3.1 最苛刻试验圆筒的可靠度系数

3.1.1 屈服强度的可靠度系数

若已知基于屈服应力的试验应力限制系数 λ_{pi} , 则屈服强度可靠度系数的下限 β_{pfi}^l 与上限 β_{pfi}^u 的计算式分别为

$$\beta_{pfi}^l = \frac{\mu_p^l - \lambda_{pi}}{\sqrt{(\mu_p^l C_p^u)^2 + (\lambda_{pi} C_1)^2}} \quad (31)$$

$$\beta_{pfi}^u = \frac{\mu_p^u - \lambda_{pi}}{\sqrt{(\mu_p^u C_p^l)^2 + (\lambda_{pi} C_1)^2}} \quad (32)$$

3.1.2 爆破强度的可靠度系数

若已知基于抗拉应力的试验应力限制系数 λ_{mi} , 可

靠度系数的下限 β_{mfi}^l 与上限 β_{mfi}^u 的计算式分别为

$$\beta_{mfi}^l = \frac{\mu_m^l - \lambda_{mi}}{\sqrt{(\mu_m^l C_m)^2 + (\lambda_{mi} C_1)^2}} \quad (33)$$

$$\beta_{mfi}^u = \frac{\mu_m^u - \lambda_{mi}}{\sqrt{(\mu_m^u C_m)^2 + (\lambda_{mi} C_1)^2}} \quad (34)$$

圆筒材料屈强比 γ 为屈服应力名义值 R_{pi} 与抗拉应力名义值 R_{mi} 之比,即 $\gamma = R_{pi}/R_{mi}$ 。 λ_{mi} 与 λ_{pi} 之间的关系为 $\lambda_{mi} = \gamma\lambda_{pi}$ 。

按国家标准^{[1]1-16[2]1-15},最苛刻液压试验、最苛刻气压试验和气-液组合试验中, λ_{p1} 与 λ_{p2} 的值分别为0.90、0.80;以 γ 为0.486的常用铜材为例,相应的 λ_{m1} 与 λ_{m2} 分别为0.437与0.389。将 λ_{p1} 、 λ_{p2} 、 λ_{m1} 、 λ_{m2} 及表1、表2有关数据代入式(31)~式(34),可得最苛刻试验的铜制圆筒静强度的可靠度系数,如表3所示。为方便比较,将最苛刻试验的钢制圆筒与球罐的静强度的可靠度系数^{[8]20-24}一并列入表3。

表3 最苛刻试验下圆筒与球罐静强度可靠度系数

Tab. 3 Static strength reliability coefficients of cylinder and spherical tank under the most demanding test

结构	材料	最苛刻液压试验		最苛刻气压试验或气-液组合试验	
		屈服强度 $\beta_{pfi}^l \sim \beta_{pfi}^u$	爆破强度 $\beta_{mfi}^l \sim \beta_{mfi}^u$	屈服强度 $\beta_{pfi}^l \sim \beta_{pfi}^u$	爆破强度 $\beta_{mfi}^l \sim \beta_{mfi}^u$
圆筒	铜	0.487~0.798	5.299~6.965	1.231~1.640	5.809~7.618
	钢	0.571~0.965	2.211~3.059	1.448~1.995	3.037~4.094
球罐	钢	0.835~1.182	2.767~3.473	1.809~2.270	3.727~4.594

由表3可知,对于符合国家标准的最苛刻试验的圆筒,其材料不同时,静强度的可靠度也不相同。

3.2 最苛刻试验圆筒的允许可靠度系数

根据表3,与钢制圆筒和球罐相比,按合乎使用最低要求确定最苛刻试验铜制圆筒静强度允许可靠度系数下限与上限的原则为:

1)最苛刻液压试验、最苛刻气压试验或气-液组合试验中,铜制圆筒屈服强度允许可靠度系数的下限与上限应分别满足 $\min(\beta_{pfi}^l) \leq [\beta_{pfi}^l] < [\beta_{pfi}^u]$ 、 $\min(\beta_{pfi}^u) \leq [\beta_{pfi}^u] < [\beta_{pfi}^l]$ 。其中, $\min(\beta_{pfi}^l)$ 与 $\min(\beta_{pfi}^u)$ 分别为不同材料圆筒和球罐基于屈服强度的可靠度系数,在最苛刻液压试验、最苛刻气压试验或气-液组合试验中所有下限中的最小值与所有上限中的最小值。

2)最苛刻液压试验、最苛刻气压试验或气-液组合试验中,铜制圆筒爆破强度允许可靠度系数的下限与上限应分别满足 $\min(\beta_{mfi}^l) \leq [\beta_{mfi}^l] < [\beta_{mfi}^u]$ 、 $\min(\beta_{mfi}^u) \leq [\beta_{mfi}^u] < [\beta_{mfi}^l]$ 。其中, $\min(\beta_{mfi}^l)$ 与 $\min(\beta_{mfi}^u)$ 分别为不同材料圆筒和球罐基于爆破强度的可靠度系数,在最苛刻液压试验、最苛刻气压试验或气-液组合试验中所有下限中的最小值与所有上限中的最小值。

3)最苛刻液压试验、最苛刻气压试验或气-液组合试验中,铜制圆筒屈服强度的允许可靠度系数的下限与上限,应分别小于爆破强度的允许可靠度系数的下限与上限,即 $[\beta_{pfi}^l] < [\beta_{mfi}^l]$ 、 $[\beta_{pfi}^u] < [\beta_{mfi}^u]$ 。

按照以上原则,确定了最苛刻试验的铜制圆筒静强度的允许可靠度系数,如表4所示。

表4 最苛刻试验下铜制圆筒静强度允许可靠度系数

Tab. 4 Allowable static strength reliability coefficients of copper cylinder under the most demanding test

参数	最苛刻液压试验		最苛刻气压试验或气-液组合试验	
	屈服强度 $[\beta_{pfi}^l] \sim [\beta_{pfi}^u]$	爆破强度 $[\beta_{mfi}^l] \sim [\beta_{mfi}^u]$	屈服强度 $[\beta_{pfi}^l] \sim [\beta_{pfi}^u]$	爆破强度 $[\beta_{mfi}^l] \sim [\beta_{mfi}^u]$
值	0.487~0.798	2.211~3.059	1.231~1.640	3.037~4.094

3.3 一般试验与正常操作的圆筒的允许可靠度系数

按合乎使用最低要求,根据最苛刻试验铜制圆筒静强度允许可靠度系数,确定一般液压试验、一般气压或气-液组合试验、正常操作下静强度允许可靠度系数下限 $[\beta_{rej}^l]$ 与上限 $[\beta_{rej}^u]$ 的原则为:

1)静强度相同而工况不同时,以表4中最苛刻试验的铜制圆筒静强度的允许可靠度系数的上限与下限为基础,允许可靠度系数的下限与上限按照“一般液压试验、一般气压试验或气-液组合试验、正常操作”

的次序依次增加,即 $[\beta_{pfi}^l] < [\beta_{pe1}^l] < [\beta_{pe2}^l] \leq [\beta_{pe3}^l]$ 、 $[\beta_{pfi}^u] < [\beta_{pe1}^u] < [\beta_{pe2}^u] \leq [\beta_{pe3}^u]$ 、 $[\beta_{mfi}^l] < [\beta_{me1}^l] < [\beta_{me2}^l] \leq [\beta_{me3}^l]$ 、 $[\beta_{mfi}^u] < [\beta_{me1}^u] < [\beta_{me2}^u] \leq [\beta_{me3}^u]$ 。

2)工况相同而静强度不同时,爆破强度允许可靠度系数的下限与上限分别大于屈服强度的允许可靠度系数的下限与上限,即 $[\beta_{mfi}^l] > [\beta_{pfi}^l]$ 、 $[\beta_{mfi}^u] > [\beta_{pfi}^u]$ 。

按上述原则确定一般试验与正常操作铜制圆筒静强度允许可靠度系数,如表5所示。

表 5 一般试验与正常操作下铜制圆筒静强度允许可靠度系数

Tab. 5 Allowable static strength reliability coefficients of the copper cylinder under general test and normal operation

参数	一般液压试验($\delta=1.25$)		一般气压试验或气-液组合试验($\delta=1.15$)		正常操作($\delta=1.00$)	
	屈服强度	爆破强度	屈服强度	爆破强度	屈服强度	爆破强度
下标 r	p	m	p	m	p	m
下标 j	1	1	2	2	3	3
$[\beta_{rj}^l] \sim [\beta_{rj}^u]$	0.723~1.065	3.304~4.430	1.241~1.652	3.821~5.084	1.877~2.312	4.280~5.456

4 最苛刻试验的试验应力限制系数

4.1 基于屈服应力的试验应力限制系数

基于材料屈服应力 $[\beta_{pi}^l]$ 和 $[\beta_{pi}^u]$ 的试验应力限制系数 λ_{pi}^l 与 λ_{pi}^u 的计算式分别为

$$\lambda_{pi}^l = \mu_p^l \cdot \frac{1 - [\beta_{pi}^l] \sqrt{(C_p^u)^2 + C_1^2 - [\beta_{pi}^l]^2 (C_p^u)^2 C_1^2}}{1 - [\beta_{pi}^l]^2 (C_1)^2} \quad (35)$$

$$\lambda_{pi}^u = \mu_p^u \cdot \frac{1 - [\beta_{pi}^u] \sqrt{(C_p^u)^2 + C_1^2 - [\beta_{pi}^u]^2 (C_p^u)^2 C_1^2}}{1 - [\beta_{pi}^u]^2 (C_1)^2} \quad (36)$$

式中, λ_{pi}^l 与 λ_{pi}^u 分别为 $[\beta_{pi}^l]$ 与 $[\beta_{pi}^u]$ 相对应的值。

最苛刻试验的圆筒基于屈服应力的试验应力限制系数可取值 λ_{pi} ,应不超过 λ_{pi}^l 与 λ_{pi}^u 中的较小值,即

$$\lambda_{pi} \leq \min\{\lambda_{pi}^l, \lambda_{pi}^u\} \quad (37)$$

4.2 基于抗拉应力的试验应力限制系数

基于材料抗拉应力 $[\beta_{mj}^l]$ 和 $[\beta_{mj}^u]$ 的试验应力限制系数 λ_{mi}^l 与 λ_{mi}^u 的计算式分别为

$$\lambda_{mi}^l = \mu_m^l \cdot \frac{1 - [\beta_{mj}^l] \sqrt{(C_m^u)^2 + C_1^2 - [\beta_{mj}^l]^2 (C_m^u)^2 C_1^2}}{1 - [\beta_{mj}^l]^2 (C_1)^2} \quad (38)$$

表 6 基于最苛刻试验允许可靠度系数的试验应力限制系数

Tab. 6 Test stress limit coefficients based on allowable reliability coefficients under the most demanding test

参数	基于屈服应力		参数	基于抗拉应力	
	液压试验	气压试验或气-液组合试验		液压试验	气压试验或气-液组合试验
下标 i	1	2	下标 i	1	2
$[\beta_{pi}^l] \sim [\beta_{pi}^u]$	0.487~0.798	1.231~1.640	$[\beta_{mi}^l] \sim [\beta_{mi}^u]$	2.211~3.059	3.037~4.094
$\lambda_{pi}^l \sim \lambda_{pi}^u$	0.900 04~0.900 06	0.800 00~0.800 07	$\lambda_{mi}^l \sim \lambda_{mi}^u$	0.738 797~0.738 799	0.656 188~0.656 597
λ_{pi}	0.90	0.80	λ_{mi}	0.73	0.65

5 一般试验与正常操作的安全系数

5.1 屈服安全系数

如果分析得到相同工况下圆筒屈服强度允许可靠度系数的下限 $[\beta_{pj}^l]$ 与上限 $[\beta_{pj}^u]$,由式(23)、式(24)可知,与 $[\beta_{pj}^l]$ 对应的屈服安全系数 n_{pj}^l 、与 $[\beta_{pj}^u]$ 对应的屈服安全系数 n_{pj}^u 分别为

$$n_{pj}^l = \frac{\delta_{pj}^l}{\mu_p^l} \cdot \frac{1 + [\beta_{pj}^l] \sqrt{(C_p^u)^2 + C_1^2 - [\beta_{pj}^l]^2 (C_p^u)^2 C_1^2}}{1 - [\beta_{pj}^l]^2 (C_p^u)^2} \quad (41)$$

$$\lambda_{mi}^u = \mu_m^u \cdot \frac{1 - [\beta_{mj}^u] \sqrt{(C_m^l)^2 + C_1^2 - [\beta_{mj}^u]^2 (C_m^l)^2 C_1^2}}{1 - [\beta_{mj}^u]^2 (C_1)^2} \quad (39)$$

最苛刻试验的圆筒基于抗拉应力的试验应力限制系数可取值 λ_{mi} ,应不超过 λ_{mi}^l 和 λ_{mi}^u 中的较小值,即

$$\lambda_{mi} \leq \min\{\lambda_{mi}^l, \lambda_{mi}^u\} \quad (40)$$

将表 4 中最苛刻试验铜制圆筒允许可靠度系数及相关数据代入式(35)~式(40),得最苛刻试验圆筒基于屈服应力和抗拉应力的试验应力限制系数,如表 6 所示。

由表 6 可知,如果满足最苛刻试验的圆筒静强度允许可靠度系数,基于屈服应力的试验应力限制系数在液压试验、气压试验或气-液组合试验中分别不超过 0.90 与 0.80;基于抗拉应力的试验应力限制系数在液压试验、气压试验或气-液组合试验中分别不超过 0.73 与 0.65。国家标准中的 λ_{p1} 与 λ_{p2} 分别取 0.90 与 0.80,与表 6 中的数据一致,而表 6 中基于抗拉应力的试验应力限制系数是对国家标准有关内容的补充。

$$n_{pj}^u = \frac{\delta_{pj}^u}{\mu_p^u} \cdot \frac{1 + [\beta_{pj}^u] \sqrt{(C_p^l)^2 + C_1^2 - [\beta_{pj}^u]^2 (C_p^l)^2 C_1^2}}{1 - [\beta_{pj}^u]^2 (C_p^l)^2} \quad (42)$$

相同工况下圆筒屈服安全系数计算值 n_{pj} 应不低于 n_{pj}^l 与 n_{pj}^u 中的较大者,即

$$n_{pj} \geq \max\{n_{pj}^l, n_{pj}^u\} \quad (43)$$

将所有相同工况下 n_{pj}^l 与 n_{pj}^u 的较大值 n_{pj} 中的最大值作为不同工况下圆筒的屈服安全系数取值 n_p ,即

$$n_p \geq \max\{n_{p1}, n_{p2}, n_{p3}\} \quad (44)$$

在一般试验与正常操作中,将表 1、表 2、表 5 中的

有关数据代入式(41)、式(42),可得基于圆筒屈服强度允许可靠度系数的屈服安全系数计算值,如表7所示。此外,根据式(43)、式(44)确定屈服安全系数可

取值,一并列入表7。由表7可知,一般试验与正常操作时,基于圆筒屈服强度允许可靠度系数的屈服安全系数可取1.45。

表7 基于一般试验与正常操作允许可靠度系数的屈服安全系数

Tab. 7 Yield safety factors based on allowable reliability coefficients under general test and normal operation

参数	一般液压试验(δ=1.25)	一般气压试验或气-液组合试验(δ=1.15)	正常操作(δ=1.00)
下标 <i>j</i>	1	2	3
$[\beta_{pcj}^l] \sim [\beta_{pcj}^u]$	0.723~1.065	1.241~1.652	1.877~2.312
$n_{pj}^l \sim n_{pj}^u$	1.439 90~1.439 92	1.439 64~1.439 96	1.439 84~1.439 97
n_{pj}	1.440	1.440	1.440
n_p	—	1.45	—

5.2 爆破安全系数

如果分析得到相同工况下圆筒爆破强度允许可靠度系数的下限 $[\beta_{mcj}^l]$ 与上限 $[\beta_{mcj}^u]$,由式(23)、式(24)可知,与 $[\beta_{mcj}^l]$ 对应的爆破安全系数 n_{mj}^l 、与 $[\beta_{mcj}^u]$ 对应的爆破安全系数 n_{mj}^u 分别为

$$n_{mj}^l = \frac{\delta_{mj}^l}{\mu_m^l} \cdot \frac{1 + [\beta_{mcj}^l] \sqrt{(C_m^u)^2 + C_1^2 - [\beta_{mcj}^l]^2 (C_m^u)^2 C_1^2}}{1 - [\beta_{mcj}^l]^2 (C_m^u)^2} \quad (45)$$

$$n_{mj}^u = \frac{\delta_{mj}^u}{\mu_m^u} \cdot \frac{1 + [\beta_{mcj}^u] \sqrt{(C_m^l)^2 + C_1^2 - [\beta_{mcj}^u]^2 (C_m^l)^2 C_1^2}}{1 - [\beta_{mcj}^u]^2 (C_m^l)^2} \quad (46)$$

相同工况下圆筒爆破安全系数计算值 n_{mj} 应不低

于计算值 n_{mj}^l 与 n_{mj}^u 中的较大者,即

$$n_{mj} \geq \max \{ n_{mj}^l, n_{mj}^u \} \quad (47)$$

将所有相同工况下 n_{mj} 中的最大值作为不同工况下圆筒爆破安全系数可取值 n_m ,即

$$n_m \geq \max [n_{m1}, n_{m2}, n_{m3}] \quad (48)$$

在一般试验与正常操作中,将表1、表2与表5中有关数据代入式(45)与式(46),可得基于圆筒爆破强度允许可靠度系数的爆破安全系数计算值,如表8所示。此外,根据式(47)与式(48)确定爆破安全系数可取值,一并列入表8。由表8可知,一般试验与正常操作时,基于铜制圆筒静强度允许可靠度的爆破安全系数可取2.00。

表8 基于一般试验与正常操作允许可靠度系数的爆破安全系数

Tab. 8 Burst safety factors based on allowable reliability coefficients under general test and normal operation

参数	一般液压试验(δ=1.25)	一般气压试验或气-液组合试验(δ=1.15)	正常操作(δ=1.00)
下标 <i>j</i>	1	2	3
$[\beta_{mcj}^l] \sim [\beta_{mcj}^u]$	3.304~4.430	3.821~5.084	4.280~5.456
$n_{mj}^l \sim n_{mj}^u$	1.984 74~1.984 78	1.984 73~1.984 86	1.984 73~1.984 74
n_{mj}	1.985	1.985	1.985
n_m	—	2.00	—

6 一般试验与正常操作的载荷系数

6.1 载荷系数的上限

6.1.1 基于屈服强度的载荷系数上限

在一般试验与正常操作中,如果分析得到相同工况下圆筒屈服强度的允许可靠度系数的下限 $[\beta_{pcj}^l]$ 与上限 $[\beta_{pcj}^u]$,由式(41)~式(44)可得圆筒屈服安全系数 n_p ,由式(27)、式(28)可得相同工况下基于屈服强度的载荷系数 δ_{pj}^l 与 δ_{pj}^u ,即

$$\delta_{pj}^l = \mu_p^l n_p \cdot \frac{1 - [\beta_{pcj}^l]^2 (C_p^u)^2}{1 + [\beta_{pcj}^l] \sqrt{(C_p^u)^2 + C_1^2 - [\beta_{pcj}^l]^2 (C_p^u)^2 C_1^2}} \quad (49)$$

$$\delta_{pj}^u = \mu_p^u n_p \cdot \frac{1 - [\beta_{pcj}^u]^2 (C_p^l)^2}{1 + [\beta_{pcj}^u] \sqrt{(C_p^l)^2 + C_1^2 - [\beta_{pcj}^u]^2 (C_p^l)^2 C_1^2}} \quad (50)$$

相同工况下基于屈服强度的载荷系数计算值的上限 δ_{pj} 应不超过计算值 δ_{pj}^l 与 δ_{pj}^u 中的较小值,即

$$\delta_{pj} \leq \min \{ \delta_{pj}^l, \delta_{pj}^u \} \quad (51)$$

6.1.2 基于爆破强度的载荷系数上限

在一般试验与正常操作中,如果分析得到相同工况下圆筒爆破强度允许可靠度系数的下限 $[\beta_{mcj}^l]$ 与上限 $[\beta_{mcj}^u]$,由式(45)~式(48)可得圆筒爆破安全系数 n_m ,由式(27)与式(28)可知,相同工况下基于爆破强度的载荷系数 δ_{mj}^l 与 δ_{mj}^u 分别为

$$\delta_{mj}^l = \mu_m^l n_m \cdot \frac{1 - [\beta_{mcj}^l]^2 (C_m^u)^2}{1 + [\beta_{mcj}^l] \sqrt{(C_m^u)^2 + C_1^2 - [\beta_{mcj}^l]^2 (C_m^u)^2 C_1^2}} \quad (52)$$

$$\delta_{mj}^u = \mu_m^u n_m \cdot \frac{1 - [\beta_{mcj}^u]^2 (C_m^l)^2}{1 + [\beta_{mcj}^u] \sqrt{(C_m^l)^2 + C_1^2 - [\beta_{mcj}^u]^2 (C_m^l)^2 C_1^2}} \quad (53)$$

相同工况下基于爆破强度的载荷系数计算值 δ_{mj} 应不超过计算值 δ_{mj}^l 与 δ_{mj}^u 中的较小值,即

$$\delta_{mj} \leq \min \{ \delta_{mj}^l, \delta_{mj}^u \} \quad (54)$$

6.1.3 载荷系数上限的确定

一般液压试验、一般气压或气-液组合试验、正常操作中,圆筒载荷系数相同,需考虑屈服强度与爆破强度对载荷系数上限的影响。相同工况下基于不同静强度的载荷系数可取值 δ_j 应不超过 δ_{pj} 与 δ_{mj} 中的较小值,即

$$\delta_j \leq \min \{ \delta_{pj}, \delta_{mj} \} \quad (55)$$

6.1.4 载荷系数下限的确定

由式(30)可知,与圆筒屈服强度和爆破强度无关的载荷系数可取值 δ_j 应满足

$$\delta_j \geq \frac{1}{1 - 1.645 \times 0.045} = 1.08 \quad (56)$$

6.2 载荷系数、允许可靠度系数和文中的安全系数

基于长期应用实践,国家标准^{[1]-16}规定了不同工况下的载荷系数,如表 2 所示。由式(27)、式(28)可知,载荷系数不仅与安全系数的大小有关,还与静强度类型及相应的允许可靠度有关。将文中分析得到的屈服安全系数 1.45、爆破安全系数 2.00 及表 1、表 2 和表 5 中的有关数据代入式(49)~式(54),可得不同工况下基于屈服强度和爆破强度的载荷系数计算值 δ_j^l 与 δ_j^u ,再按式(55)、式(56)分别得到载荷系数可取值 δ_j 的上限与下限,最后确定载荷系数的可取值 δ_j ,相关结果如表 9 所示。

表 9 基于一般试验与正常操作允许可靠度系数及文中安全系数的载荷系数

Tab. 9 Load coefficients based on allowable reliability coefficients under general test and normal operation and safety factors in this study

参数	一般液压试验($\delta=1.25$)		一般气压试验或气-液组合试验($\delta=1.15$)		正常操作($\delta=1.00$)	
	屈服强度	爆破强度	屈服强度	爆破强度	屈服强度	爆破强度
下标 r	p	m	p	m	p	m
下标 j	1	1	2	2	3	3
$[\beta_{rj}^l] \sim [\beta_{rj}^u]$	0.723~1.065	3.304~4.430	1.241~1.652	3.821~5.084	1.877~2.312	4.280~5.456
n_r	1.45	2.00	1.45	2.00	1.45	2.00
$\delta_j^l \sim \delta_j^u$	1.258 75~1.258 77	1.258 06~1.259 61	1.158 02~1.158 06	1.158 77~1.158 85	1.006 96~1.007 07	1.007 69~1.007 70
δ_j	1.259	1.259	1.158	1.159	1.006	1.007
δ_j	1.28		1.15		1.00	

根据文中分析得到的铜制圆筒静强度允许可靠度系数与安全系数,由表 9 和式(56)可知,在一般液压试验中,载荷系数的取值应不小于 1.08、不大于 1.25;在一般气压试验或气-液组合试验中,载荷系数的取值应不小于 1.08、不大于 1.15;正常操作时,载荷系数的取值应不大于 1.00。国家标准^{[1]-16}^{[2]-15}中,相应工况下的载荷系数分别为 1.25(钢制圆筒和球罐、铜制圆筒)、1.10(钢制圆筒和球罐)或 1.15(铜制圆筒)、1.00(钢制圆筒和球罐、铜制圆筒),与表 9 中的载荷系数基本一致,这表明标准选用的不同工况下的载荷系数是合适的。

6.3 载荷系数、允许可靠度系数和国家标准安全系数

若要使不同工况下铜制圆筒静强度允许可靠度系数满足表 5 的要求(安全系数采用国家标准^{[1]-16}中的屈服安全系数 1.50 与爆破安全系数 3.00),应先将

有关数据代入式(49)~式(54),可得不同工况下由屈服强度和爆破强度得到的载荷系数计算值 δ_j^l 与 δ_j^u ;再按式(55)、式(56)分别得到载荷系数 δ_j 的上限与下限;最后确定载荷系数的值 δ_j ,相关结果如表 10 所示。

若要使不同工况下铜制圆筒静强度允许可靠度系数满足表 2 的要求(安全系数采用国家标准^{[1]-16}中的屈服安全系数 1.50 与爆破安全系数 3.00),由表 10 可知,在一般试验与正常操作中,圆筒屈服安全系数对应的载荷系数比较小,表明国家标准中的载荷系数由圆筒屈服强度允许可靠度系数与屈服安全系数确定。

比较表 9 与表 10 可知,不同工况下圆筒静强度分别满足表 2 要求的允许可靠度系数时,增大圆筒静强度的屈服安全系数与爆破安全系数,载荷系数的上限随之提高。

表 10 基于一般试验与正常操作允许可靠度系数及国家标准安全系数的载荷系数

Tab. 10 Load coefficients based on allowable reliability coefficients under general test and normal operation and safety factors in national standard

参数	一般液压试验($\delta=1.25$)		一般气压试验或气-液组合试验($\delta=1.15$)		正常操作($\delta=1.00$)	
	屈服强度	爆破强度	屈服强度	爆破强度	屈服强度	爆破强度
下标 r	p	m	p	m	p	m
下标 j	1	1	2	2	3	3
$[\beta_{rj}^l, \beta_{rj}^u]$	0.723~1.065	3.304~4.430	1.241~1.652	3.821~5.084	1.877~2.312	4.280~5.456
n_r	1.50	3.00	1.50	3.00	1.50	3.00
$\delta_j^l \sim \delta_j^u$	1.302 16~1.302 28	1.889 37~1.889 42	1.197 95~1.197 99	1.738 16~1.738 28	1.041 68~1.041 80	1.511 54~1.511 55
δ_j	1.302	1.889	1.197	1.738	1.041	1.511
δ_j	1.30		1.19		1.04	

7 最苛刻试验的安全系数讨论

前文分析了一般试验与正常操作中铜制圆筒静强度安全系数,未讨论最苛刻试验安全系数。广义上,最苛刻试验可视为一试验中圆筒最大薄膜应力达到控制水平的特殊情况。本节中下标 $j=i$ 且 $i=1, 2$ 。当基于静强度可靠度分析的载荷系数 δ_j 与试验应力限制系数 λ_j 确定后,由式(9)与式(12)可知,最苛刻试验与一般试验的载荷均值存在如下关系,即

$$\lambda_j u_r = \delta_j p \quad (57)$$

将式(20)代入式(57)中,可得最苛刻试验圆筒静强度的安全系数 N_{rj} ,即

$$N_{rj} = \frac{u_r}{p} = \frac{\delta_j}{\lambda_j} \quad (58)$$

λ_j 与 δ_j 由铜制圆筒静强度可靠度分析确定,故 N_{rj} 为最苛刻试验铜制圆筒基于可靠度分析的安全系数。

在最苛刻液压试验时,根据表 9,取载荷系数 δ_1 为 1.25,根据表 6,取基于屈服应力的试验应力限制系数 λ_{p1} 为 0.90,取基于抗拉应力的试验应力限制系数 λ_{m1} 为 0.73;由式(58)可得屈服安全系数 $N_{p1}=1.25/0.90=1.388$,爆破安全系数 $N_{m1}=1.25/0.73=1.712$ 。

在最苛刻气压试验或气-液组合试验中,根据表 9,取载荷系数 δ_2 为 1.15,根据表 6,取基于屈服应力的试验应力限制系数 λ_{p2} 为 0.80,取基于抗拉应力的试验应力限制系数 λ_{m2} 为 0.65;由式(58)可得屈服安全系数 $N_{p2}=1.15/0.80=1.444$,爆破安全系数 $N_{m2}=1.15/0.65=1.769$ 。

由表 7 中基于一般试验与正常操作的屈服安全系数 $n_p=1.45$ 、表 8 中基于一般试验与正常操作的爆破安全系数 $n_m=2.00$ 可知,最苛刻试验铜制圆筒屈服安全系数与爆破安全系数均小于相应一般试验与正常操作的安全系数。

8 结论

应用概率论知识,构建了铜制圆筒静强度在不同工况下允许可靠度系数、试验应力限制系数、屈服安全系数、爆破安全系数、载荷系数之间的关联表达式;按照合乎使用的最低要求,分析并确定了铜制圆筒静强度在最苛刻试验、一般试验和正常操作中的允许可靠度系数,定量讨论了允许可靠度系数、试验应力限制系数、屈服安全系数、爆破安全系数及载荷系数的关系,丰富了基于可靠度的铜制圆筒静强度设计内容,得出如下主要结论:

1) 最苛刻液压试验的铜制圆筒屈服强度的允许可靠度系数取位为 0.487~0.798,基于屈服应力的试验应力限制系数可取值应不超过 0.90;最苛刻气压试验和气-液组合试验的铜制圆筒屈服强度的允许可靠度系数取位为 1.231~1.640,基于屈服应力的试验应力限制系数的取值应不大于 0.80。

2) 最苛刻液压试验的铜制圆筒爆破强度的允许可靠度系数取位为 2.211~3.059,基于抗拉应力的试验应力限制系数可取值应不超过 0.73;最苛刻气压试验或气-液组合试验的铜制圆筒爆破强度的允许可靠度系数取位为 3.037~4.094,基于抗拉应力的试验应力限制系数的取值应不大于 0.65。

3) 对于铜制圆筒屈服强度允许可靠度系数,其值在一般液压试验中取位为 0.723~1.065;在一般气压试验或气-液组合试验中取位为 1.241~1.652;在正常操作时取位为 1.877~2.312。基于中径公式的屈服安全系数可取 1.45。

4) 对于铜制圆筒爆破强度允许可靠度系数,其值在一般液压试验中取位为 3.304~4.430;在一般气压试验或气-液组合试验中可取在 3.821~5.084;在正常操作时取位为 4.280~5.456。基于中径公式的爆破安

全系数可取2.00。

5)在允许可靠度系数与安全系数分别满足上述取值时,载荷系数在液压试验中的取值应不小于1.08、不大于1.25;在气压试验或气-液组合压力试验中的取值应不小于1.08、不大于1.15;在正常操作时的取值应不大于1.00。国家标准中选用的不同工况下的载荷系数是合适的。

6)在允许可靠度系数、载荷系数与试验应力限制系数分别满足上述取值时,最苛刻试验的铜制圆筒静强度的安全系数,均小于相应一般试验与正常操作的铜制圆筒静强度的安全系数。

7)当允许可靠度系数满足上述取值,而按国家标准中屈服安全系数取1.50、爆破安全系数取3.00时,载荷系数在液压试验中的取值应不小于1.08、不大于1.30;在气压试验和气-液组合试验中的取值应不小于1.08、不大于1.19;在正常操作时的取值应不大于1.04。

由本文的分析可知,不同材料、不同承压结构及承压结构静强度的不同计算公式对承压结构静强度可靠度的影响,是一项值得进一步探索的课题。

参考文献(References)

- [1] 全国锅炉压力容器标准化技术委员会. 铜制压力容器: JB/T 4755—2006[S]. 北京: 机械工业出版社, 2006: 1-16.
China Standardization Committee on Boilers and Pressure Vessels. Copper pressure vessels: JB/T 4755—2006 [S]. Beijing: China Machine Press, 2006: 1-16. (In Chinese)
- [2] 全国锅炉压力容器标准化技术委员会. 压力容器: GB 150. 1~150. 4—2011[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011: 1-15.
China Standardization Committee on Boilers and Pressure Vessels. Pressure vessels: GB 150. 1~150. 4—2011[S]. Beijing: Standards Press of China, 2011: 1-15. (In Chinese)
- [3] 杨帆, 刘岑, 张红卫, 等. 长径比对TP2铜管爆破压力影响的试验研究[J]. 应用力学学报, 2019, 36(5): 1160-1166.
YANG Fan, LIU Cen, ZHANG Hongwei, et al. Test study of the influence of slenderness ratio on the burst pressure of TP2 copper tube [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2019, 36(5): 1160-1166. (In Chinese)
- [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.
LIU Xiaoning, ZHANG Hongwei, LIU Cen, et al. Test research on static strength of steel thin wall short cylinder at internal pressure [J]. Pressure Vessel Technology, 2009, 26(7): 11-14. (In Chinese)
- [5] 杨帆, 华滨, 陈帆, 等. 单层圆筒形铜制承压设备静强度概率分布[J]. 化工装备技术, 2023, 44(5): 5-9.
YANG Fan, HUA Bin, CHEN Fan, et al. Probability distribution of static strength of single-layer cylindrical copper pressure equipment [J]. Chemical Equipment Technology, 2023, 44(5): 5-9. (In Chinese)
- [6] 刘岑, 杨帆, 刘兵, 等. 单层圆筒容器爆破压力的概率分布[J]. 机械强度, 2020, 42(2): 365-373.
LIU Cen, YANG Fan, LIU Bing, et al. Probability distribution of single-layer cylindrical vessel burst pressure [J]. Journal of Mechanical Strength, 2020, 42(2): 365-373. (In Chinese)
- [7] 刘小宁. 压力容器设计压力的合理确定[J]. 锅炉压力容器安全技术, 2003, 25(6): 11-14.
LIU Xiaoning. Rational determination of design pressure for pressure vessels [J]. Boiler and Pressure Vessel Safety Technology, 2003, 25(6): 11-14. (In Chinese)
- [8] 刘岑, 付林, 吴森林, 等. 薄壁承压圆筒耐压试验时静强度可靠度系数[J]. 武汉工程职业技术学院学报, 2023, 35(2): 20-24.
LIU Cen, FU Lin, WU Senglin, et al. Static strength reliability coefficient of thin-walled pressure cylinder under pressure test [J]. Journal of Wuhan Engineering Institute, 2023, 35(2): 20-24. (In Chinese)
- [9] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 工程结构可靠性设计统一标准: GB 50153—2008[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008: 1-150.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Unified standard for reliability design of engineering structures: GB 50153—2008 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008: 1-150. (In Chinese)
- [10] 熊德之, 张志军, 罗进. 概率论与数理统计及其应用[M]. 2版. 北京: 科学出版社, 2009: 151-153.
XIONG Dezhi, ZHANG Zhijun, LUO Jin. Probability theory and mathematical statistics and its applications [M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2009: 151-153. (In Chinese)
- [11] 徐灏. 机械强度的可靠性设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 1984: 1-130.
XU Hao. Reliability design of mechanical strength [M]. Beijing: China Machine Press, 1984: 1-130. (In Chinese)
- [12] 冯文成. 化工应用数学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2012: 1-263.
FENG Wencheng. Applied mathematics in chemical engineering [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2012: 1-263. (In Chinese)
- [13] 刘岑, 吴森林, 杨帆, 等. 承压设备强度设计公式的适应性与可靠性研究[J]. 机械强度, 2021, 43(4): 856-867.
LIU Cen, WU Senglin, YANG Fan, et al. Research on adaptability and reliability of design formulas in pressure equipment pressure [J]. Journal of Mechanical Strength, 2021, 43(4): 856-867. (In Chinese)
- [14] 刘岑, 杨帆, 吴森林, 等. 承压圆筒爆破强度预测公式的精度和稳定性[J]. 机械强度, 2021, 43(5): 1104-1118.
LIU Cen, YANG Fan, WU Senglin, et al. Precision and stability of the prediction formula for burst strength of pressure-bearing cylinder [J]. Journal of Mechanical Strength, 2021, 43(5): 1104-1118. (In Chinese)

Static strength design of copper cylinder based on reliability

YANG Fan CHEN Gang CHEN Fan LIU Bing ZHANG Hongwei LIU Xiaoning

(School of Mechanical Engineering, Wuhan Vocational College of Software and Engineering, Wuhan 430205, China)

Abstract: [Objective] Aiming at the lack of systematic reliability design method for static strength of copper thin-walled cylinders under internal pressure, a reliability design method for static strength of copper single-layer thin-walled long cylinders under internal pressure was established, and the value boundaries of key design parameters under different working conditions were quantified. [Methods] Firstly, a general correlation formula between cylinder reliability coefficient, test stress limit coefficient, load coefficient and safety factor was established by probability theory when both static strength and load obey normal distribution and the static strength distribution parameters are interval values, which provided a calculation basis for quantitative reliability analysis; secondly, benchmarking against the reliability standard of steel cylinders and spherical tanks, the allowable reliability coefficients of yield strength and burst strength of copper cylinders under different working conditions were determined according to the minimum service requirements; then, based on the allowable reliability coefficients, the value ranges of test stress limit coefficient, yield and burst safety factors, and load coefficient under different working conditions were determined; finally, the rationality of relevant design parameters in the national standard was verified. [Results] The recommended yield safety factor and burst safety factor of copper cylinder are 1.45 and 2.00 respectively, and the value ranges of test stress limit coefficient and load coefficient under different working conditions are quantified. The analytical results are basically consistent with the parameters in the national standard, which enriches the content of reliability-based static strength design of copper cylinders and provides a reference for the structural design of copper pressure-bearing cylinders.

Key words: Copper cylinder; Static strength; Reliability coefficient; Test stress limit coefficient; Safety factor; Load coefficient

Corresponding author: LIU Xiaoning, E-mail: lxngjxy@163.com

Fund: Wuhan Knowledge Innovation Special Dawn Plan Project (2022010801020439)

Received: 2024-07-08 Revised: 2024-08-20

(编辑:刘星泽)