

压力容器泄漏孔大小的压力变化率预估方法

沈远胜, 刘宗明, 赵蔚琳, 段广彬

(济南大学 材料科学与工程学院, 山东 济南 250022)

摘 要: 为预估压力容器泄漏孔大小, 分析了泄漏孔内气体流动规律和压力容器内气体参数状态特性, 提出了该过程的 3 个假设, 建立了反映泄漏孔当量半径的数学模型。以此为基础, 提出了预测泄漏孔当量半径的压力变化率预估方法。对容积为 0.008 48 m³、有 3 个半径为 0.4 mm 泄漏孔的压力容器的压力情况进行了实验研究, 并根据所建立的数学模型计算泄露孔的半径。结果表明, 压力容器泄漏孔半径计算数值与实际压力容器泄漏孔半径吻合很好。这为进一步研究不同容积压力容器的泄漏孔情况、泄漏规律提供了重要参考。

关 键 词: 流体力学; 压力容器; 泄漏孔; 当量半径; 压力变化率

中图分类号: TH49 文献标识码: A

符号说明

- A— 泄漏孔横截面积 /m²;
- T— 压力容器内部气体温度变化率 /K·s⁻¹;
- C_v— 定容比热 /J·(kg·K)⁻¹;
- U— 内能 /J·kg⁻¹;
- g— 重力加速度 /m·s⁻²;
- V— 压力容器内部容积 /m³;
- H— 压力容器几何中心距泄漏孔高度 /m;
- v— 泄漏孔出口速度 /m·s⁻¹;
- m— 从泄漏孔泄漏出去的气体质量 /kg;
- ρ— 气体密度 /kg·m⁻³;
- ṁ— 从泄漏孔泄漏出去的气体质量流率 /kg·s⁻¹;
- κ— 绝热系数;
- P— 压力容器内部压力 /Pa;
- τ— 时间 /s;
- Ṗ— 压力容器内部压力变化率 /MPa·s⁻¹;
- r— 泄漏孔当量半径 /m;
- O— 容器内部参数;
- R— 气体常数 /J·(kg·K)⁻¹;
- C— 泄漏孔出口参数;
- T— 压力容器内部气体温度 /K;
- i— 计算泄漏量的次数。

一是正问题, 二是反问题。正问题研究主要是由已知研究对象的几何参数、初始条件和边界条件开始研究其中流体的气动特性; 而反问题的研究则是根据流体的气动特性研究对象的某些几何特性。

对于压力容器来说, 研究其泄漏特性, 以及由此引出如何治理气体泄漏的问题就是正问题的一个主要的研究方向。该方面已经取得了很多的研究成果, 如对检测压力容器密封性能与泄漏治理技术的研究、定量描述长输管线气体泄漏率的数学模型、建立描述不同情况下压力容器气体泄漏模型等^[1-6]。而反问题研究即根据流体的气动特性来计算研究对象的某些几何特性的却不多。

本研究是针对压力容器密封性能的反问题展开的, 即根据压力容器内、外气流特点来预测泄漏孔大小。

1 数学模型的建立

图 1 为带有裂缝的高压密闭容器示意简图。O—O 为控制体在容器内部的投影截面, 以下标 O 代表容器内部有关物理量参数; C—C 为控制体在容器壁上泄漏孔外侧的截面, 以下标 C 代表泄漏孔外出口处有关物理量参数。

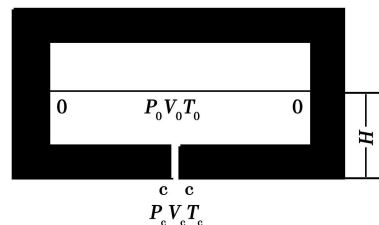


图 1 带泄漏孔的高压容器简图

为建立描述泄漏孔半径和压力容器内部其它参数关系的数学模型, 作以下假设:

- (1) 高压容器内部的空气处于准平衡状态;

引 言

关于压力容器性能的研究可以分为两个方面,

收稿日期: 2010-02-27 修订日期: 2010-06-12

作者简介: 沈远胜 (1964-), 男, 山东淄博人, 济南大学副教授、博士。

(2) 容器的内部体积不变, 内部温度随着空气泄漏过程而变化, 内部空气质量随着内部空气压力的变化而变化, 但是外部压力为定值;

(3) 高压容器的泄漏孔口个数为一个, 泄漏孔通道内部与外部截面为圆形, 中间可以为其它形状, 其具体形状取决于裂缝的几何特性, 用当量半径代替半径。相对于容器壁厚, 当量半径是一个很小的数值。

对于高压空气来说, 小孔口流动可以看作非稳态的绝热流动过程^[7]。但是某个时刻的流动可以当作稳态流动, 流动损失仅为局部损失。内部截面 0-0 和泄漏孔外部截面 c-c 被当作控制体的两个截面, 两个截面之间能量方程的最终形式为:

$$H_0 = g + \frac{\kappa}{\kappa-1} \frac{p_0}{\rho_0} + \frac{v_0^2}{2} = \frac{\kappa}{\kappa-1} \frac{p_c}{\rho_c} + \frac{v_c^2}{2} \quad (1)$$

绝热流动使流动损失能量完全转变为内能, 该方程中的 $\frac{1}{\kappa-1} \frac{p}{\rho}$ 就是绝热流动过程中的内能, 因此该方程中没有出现内能 $U = c_p T$ 项和损失项。

由于通过高压容器壁上泄漏孔的空气流动被认为是一个绝热流动, 因此, 空气流动过程中截面 0-0 和截面 c-c 之间的空气密度为:

$$\rho_c = \rho_0 \left(\frac{p_c}{p_0}\right)^{\frac{1}{\kappa}} \quad (2)$$

实际上, 由截面 0-0 到截面 c-c 的高度差很小, 令 $H \approx 0$, $v_0 \ll v_c$, 利用式 (2) 将式 (1) 改写为:

$$\frac{\kappa}{\kappa-1} R T_0 \left[1 - \left(\frac{p_c}{p_0}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right] = \frac{v_c^2}{2} \quad (3)$$

由式 (3) 得泄漏孔外部空气流速:

$$v_c = \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa-1} R T_0 \left[1 - \left(\frac{p_c}{p_0}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right]} \quad (4)$$

根据假设 (1), 则: $\frac{p_0}{\rho_0} = R T_0$, 因此, 从高压容器流出的空气质量流率为:

$$m_{leakage} = A \frac{p_0^{\frac{1}{\kappa}}}{R T_0} \sqrt{\frac{2}{\kappa-1} \kappa R T_0 \left[1 - \left(\frac{p_c}{p_0}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right]} \quad (5)$$

式中: $m_{leakage}$ —从泄漏孔泄漏出的空气流率, kg/s

式 (5) 中难于测量的物理参数被其它易于测量的物理参数代替整理后, 泄漏孔出口的空气质量流率为:

$$m_{leakage} = A \cdot \frac{1}{R} \cdot \frac{p_0^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}}{R T_0} \sqrt{\alpha T_0 \left(1 - \beta \frac{p_c}{p_0} \right)} \quad (6)$$

其中, $\alpha = \frac{2}{\kappa-1} \kappa R$, $\beta = \frac{p_c}{p_0}$, 物理参数 κ , R , p_c 被认为是恒定数值。

基于假设 (1) 的容器内空气状态方程为:

$$p_0 V_0 = m R T_0 \quad (7)$$

由假设 (2) 可知, 高压容器内部的空气压力、空气温度和空气质量随时间变化, 对式 (7) 求导, 得:

$$p_0 V_0 = m R T_0 + m R \dot{T}_0 \quad (8)$$

参考式 (7) 和式 (8) 改写为:

$$m = \frac{V_0 p_0}{R T_0} \left(\frac{p_0}{p_0} - \frac{\dot{T}_0}{T_0} \right) \quad (9)$$

根据质量守恒定律, 式 (9) 中的质量流率等于从泄漏孔中泄漏出去的空气质量的变化率。合并式 (6) 和式 (9), 则结合泄漏过程相关参数的新方程为:

$$A \cdot \frac{1}{R} \cdot \frac{p_0^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}}{R T_0} \sqrt{\alpha T_0 \left(1 - \beta \frac{p_c}{p_0} \right)} = V_0 p_0 \times \left(\frac{p_0}{p_0} - \frac{\dot{T}_0}{T_0} \right) \quad (10)$$

根据假设 (3), 令压力容器泄漏孔通道截面的当量半径为 r , 若有 n 个等当量半径的泄漏孔, 则通道的横截面积为 $A = \pi n r^2$ 。根据式 (10) 可以得出泄漏孔通道截面的泄漏孔当量半径为:

$$r = \sqrt{\frac{V_0}{\pi \cdot n} \frac{1}{\sqrt{\alpha T_0 \left(1 - \beta \frac{p_c}{p_0} \right)}} \left(\frac{p_0}{R}\right)^{\frac{1}{\kappa}} \left(\frac{p_0}{p_0} - \frac{\dot{T}_0}{T_0}\right)} \quad (11)$$

2 泄漏孔大小近似估计方法

对实际压力容器进行力学参数测量, 借助于式 (11), 可以预测压力容器泄漏孔大小。由于实际泄漏孔几何形状不同, 因此该方法只能近似估计泄漏孔的当量半径大小。

压力容器内部压力的变化率是一个比较容易测量的参数。在一定温度下, 可以将测量得到的压力容器内部的压力变化规律绘制成图, 与根据模型计算出的压力变化曲线进行对比, 依照图的接近程度预测泄漏孔大小。

为简化研究, 定量给出压力容器内部压力变化规律, 假设式 (11) 中压力容器内部的温度随时间变化率近似为零 (它符合绝大多数实际情况, 且不改变容器内部压力变化规律), 则以压力容器内部压力变化率为函数的方程为:

$$p_0 = \frac{1}{R} \sqrt{\alpha T_0 \left[1 - \left(\frac{p_c}{p_0}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right]} \cdot \frac{r \cdot p_0}{V} \cdot \left(\frac{p_c}{p_0}\right)^{\frac{1}{\kappa}} \quad (12)$$

压力容器内部气体质量是变化的, 因此内部压力也是变化的, 不同时刻压力容器内部压力大小是不同的, 可以按式 (13) 修正不同时刻压力容器内部压力数值:

$$p_0 = \frac{m_1 R T_0}{V} \quad (13)$$

式中: m_1 — 时刻容器内部的气体质量, 它由上次该容器内部气体质量减去上一个时刻到 时刻从泄漏孔泄漏出去的气体质量, 即 $m_1 = m_{t-1} - m_{t-1} |_{leakage}$, $m_{t-1} |_{leakage}$ 为相邻时刻由泄漏孔泄漏出去的气体质量。

由式 (6) 近似计算, 时间取 τ 个单位, 根据上面的假设, $m_{t-1} |_{leakage}$ 的计算式为:

$$m_{t-1} |_{leakage} = A \frac{p_0^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}}{R T_0} \sqrt{\frac{2 \kappa}{\kappa-1} R T_0 \left[1 - \left(\frac{p_c}{p_0} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right]} \quad (14)$$

3 算例与分析

为验证理论的合理性, 选择容积为 0.008 48 m^3 , 泄漏孔半径为 0.4 mm 的 3 个泄漏孔进行了实验。以式 (11) 为基础, 参考实验数据及当量半径的水力学定义^[7], 计算出泄漏孔当量半径; 以反映压力容器内部压力变化率的式 (14) 为基础, 计算对象内部压力变化率。实验及计算数据如表 1 所示。

验证所采取的方法是: (1) 用实验测定的压力变化率数值计算泄漏孔大小; (2) 将实验记录压力变化率与理论计算出的压力变化率数值进行比较。

泄漏过程进行的很快, 选择 3 s 作为一个记录时间间隔。

由表 1 中的实验数据可以看出, 随着时间变化, 容器内部的压力逐渐减小, 压力变化率也逐渐减小, 根据式 (11) 计算的泄漏孔当量半径也逐渐减小。总的趋势是: 当容器内部压力较大时, 泄漏孔当量半径的计算值偏离实际值较大; 而随着容器内部压力的降低, 泄漏孔当量半径的计算值将逐渐接近实际值; 随着容器内部压力的进一步降低, 泄漏孔当量半径的计算值小于实际值, 且随容器内部压力降低, 计算值与实际值的偏离程度逐渐增大。

比较表 1 中实验获得的压力变化率与理论计算获得的压力变化率, 可以看出, 两者在变化趋势上是一致的, 但是在具体数值上有差别。压力较大时, 两者差别较大, 而随着过程进行, 这种差别在逐渐减小, 直到出现一个交叉点, 之后两者之间的差异又逐

渐增大。

经过检查发现, 实验设备存在微小的泄漏问题。当压力容器内部高压时, 从泄漏孔泄漏出来的气体就多, 它直接反映到压力变化率的数值上, 即压力变化率偏高, 最终导致泄漏孔大小计算量偏高于实际数值。而当容器内部压力降低到较小时, 从泄漏孔泄漏出来的气体量相对较小, 因此计算数值接近实际泄漏孔大小, 实验压力变化率接近理论计算压力变化率数值。通过分析可以知道, 压力容器密封情况严重影响本实验的实验结果, 进而影响用预估方法计算出的泄漏孔当量半径大小。

表 1 $r = 0.4$ mm 时的实验数据和计算数据

时间 / s	压力 / MPa	压力变化率 / MPa·s ⁻¹	计算压力变化率 / MPa·s ⁻¹	计算的泄漏孔半径 / mm
0	0.381	—	—	—
3	0.343	0.012 67	0.007 640	0.479 5
6	0.312	0.010 33	0.007 287	0.446 4
9	0.282	0.010 03	0.006 936	0.455 3
12	0.260	0.007 33	0.006 665	0.400 9
15	0.240	0.006 67	0.006 408	0.394 4
18	0.221	0.006 33	0.006 153	0.397 6
21	0.204	0.005 67	0.005 915	0.390 0
24	0.188	0.005 33	0.005 682	0.387 4

此外, 测量容器内部压力大小的弹簧压力仪表也影响测量结果的精度, 主要在于低压时它的灵敏度相对低些。这些因素造成低压时计算的泄漏孔大小偏离实际泄漏孔半径数值。

4 结 论

- (1) 建立了计算泄漏孔当量半径的数学式;
- (2) 提出了通过压力变化率预测泄漏孔大小的方法;
- (3) 运用实验数据计算出的泄漏孔大小与实际泄漏孔大小接近, 可以通过测量容器内部压力变化率来预估泄漏孔大小。

经过实验验证和算例的分析证明, 本研究提出的泄漏孔当量半径的压力变化率预估方法的正确性和准确性是值得肯定的。

参考文献:

[1] 冯 琦, 张明智, 龚彦辉. 油气管道风险管理技术现状及对策 [J]. 油气储运, 2004(7): 63-65

- [2] 张连文. 管道泄漏检测技术及评价 [J]. 油气地面工程, 2003 (4): 1—2
- [3] 霍春勇, 董玉华, 余大涛, 等. 长输管道气体泄漏率的计算方法研究 [J]. 石油学报, 2004 25(1): 101—105.
- [4] 黄小美, 彭世尼, 徐海东, 等. 燃气管道泄漏流量的计算 [J]. 煤气与热力, 2008(3): 11—16.
- [5] 肖建兰, 吕保和, 王明贤, 等. 气体管道泄漏模型的研究进展 [J]. 煤气与热力, 2006 26(2): 7—9
- [6] 彭世尼, 周廷鹤. 燃气泄漏与扩散模型的探讨 [J]. 煤气与热力, 2008 28(11): 9—12
- [7] 蔡增基, 龙天渝. 流体力学泵风机 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.

新技术、新产品

ГТЭ -45发电用燃气轮机装置

据《Теплоэнергетика》2009年4月号报道, 俄罗斯燃气轮机制造工程中心正在研制 ГТЭ -45发电用燃气轮机装置, 将把它用于热电站和蒸燃联合循环电站。

在额定工况下, ГТЭ -45装置的技术特性:

发电机端子上的功率, kW	45400
电效率, %	35
涡轮前燃气温度, K(°C)	1481(1208)
涡轮出口燃气温度, K(°C)	765(492)
循环内压比	17
涡轮出口燃气流量, kg/s	164.5
燃气轮机装置转子的转速, r/min	6000
NO _x mg/kg	50
热功率, GJ/h	245.3

单轴燃气轮机由 15级轴流压气机、具有 12 个火焰筒的管环式燃烧室、三级涡轮和排气扩压器组成。

在燃气轮机压气机内具有三列可转导叶, 布置在压气机前面部分, 其中一列是进口导叶。改变这三列导叶的安装角并结合打开防喘阀, 可以保证燃气轮机装置平稳的启动, 借助改变压气机的空气流量和进入燃烧室的燃料流量来调节燃气轮机装置的功率。

在寒冷季节, 为了在涡轮出口燃气温度不变的情况下保证热功率在设计额定值, 必须改变进口导叶和前二级压气机可转导叶的安装角和燃料流量。

(吉桂明 摘译)

mentioned relationship was decomposed into fault data in various components and expressed by using an interlinking of graphic symbols. Moreover, logic formulae were obtained on the basis of the fault tree and thereby their reliabilities were quantitatively analyzed. The foregoing can provide a method for evaluating a system based on its overall reliability. **Key words:** fault tree; furnace safety monitoring and control system; safety instrumentation system; reliability.

多孔介质燃烧—换热器内燃烧和传热的数值模拟 = Numerical Simulation of Porous Medium Combustion, Combustion and Heat Transfer Inside a Heat Exchanger [刊, 汉] / XU Youning, SHI Junrui, XUE Zhijia (Shenyang City Key Laboratory on Circulating Fluidized Bed Combustion Technology, Shenyang Engineering College, Shenyang, China, Post Code: 110136), XIE Maozhao (College of Energy Source and Power, Dalian University of Science and Technology, Dalian, China, Post Code: 116024) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2010, 25(6). — 648 ~ 652

By establishing a two-dimensional numerical model, studied were the porous medium combustion, combustion and heat transfer inside a heat exchanger and the influence of the system configuration on the thermal efficiency and the pressure drop of a combustion heat exchanger. The research results show that the longitudinal distance of the heat exchange tubes has a remarkable influence on the temperature distribution, heat transfer speed and pressure loss inside the heat exchanger. To decrease the longitudinal distance of the heat exchange tubes can increase the thermal efficiency and pressure loss. The horizontal distance of the heat exchange tubes, however, has a very little influence on the thermal efficiency and pressure loss. In addition, to increase the diameters of small balls may result in an increase of the thermal efficiency and a sharp decrease of the pressure loss. The effectiveness of the numerical model can be verified through tests. **Key words:** numerical study; porous medium; combustion; heat exchanger.

压力容器泄漏孔大小的压力变化率预估方法 = A Method for Pre-estimating the Size of Leakage Holes of a Pressure Vessel Based on Its Pressure Variation Rate [刊, 汉] / SHEN Yuansheng, LU Zongming, ZHAO Weili et al (College of Material Science and Engineering, Jinan University, Jinan, China, Post Code: 250022) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2010, 25(6). — 653 ~ 656

To pre-estimate the size of leakage holes of a pressure vessel, analyzed were the gas flow regularity inside the leakage holes and the gas parameter status characteristics inside the vessel. In this connection, three assumptions for the process were put forward and a mathematical model reflecting the equivalent radius of the leakage holes established. On this basis, a method was proposed for pre-estimating the equivalent radius of the leakage holes based on the pressure variation rate. An experimental study has been performed of the pressure conditions in the vessel which has a volume of 0.008 48 m³ and three leakage holes with a radius of 0.4 mm. Furthermore, the radius of the leakage holes was calculated by using the mathematical model being established. The research results show that the calculated value of the radius of the vessel is in very good agreement with the actual one. This can provide important reference for further studying the leakage hole conditions and leakage regularities of various pressure vessels. **Key words:** fluid dynamics; pressure vessel; leakage hole; equivalent radius; pressure variation rate.