

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2014.05.004

卧式快开门压力容器带压开启数值模拟研究

刘 骁, 李静媛, 花争立, 赵永志

(浙江大学 化工机械研究所, 浙江 杭州 310027)

摘 要:针对卧式快开门压力容器,采用 Eulerian/Lagrangian 混合方法,利用 Fluent 的可压缩、动网格流场分析功能,对快开门容器带压开门过程进行模拟,得到了门盖受力及速度变化情况,以及门盖飞出 500 mm 之后具有的破坏力。结果表明:带压开启初期,门盖所受压力缓慢减小,门盖速度迅速增大;完全开启后,门盖受力迅速减小;最终容器内外压力平衡。快开门盖在飞出 500 mm 处的动能随开启压力的增大而增大。

关 键 词:快开门式压力容器;数值模拟;余压;爆炸

中图分类号:TQ051.3

文献标志码:A

文章编号:1005-2895(2014)05-0012-05

Numerical Analysis of the Explosions Caused by Residual Pressure in Horizontal Quick Actuating Pressure Vessels

LIU Xiao, LI Jingyuan, HUA Zhengli, ZHAO Yongzhi

(Institute of Chemical Machinery and Process Equipment, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: A numerical simulation model was established to simulate the process of explosion of pressure vessel caused by residual pressure. The model was based on the Eulerian/Lagrangian mixed method and fluent compressible, dynamic mesh analysis. In the simulation, obtain lid stress and velocity changes, destructive power of the lids ($S = 500$ mm from the initial state) The results shows that at the beginning of the opening, the pressure on the lid decreases slowly, the velocity of the lid increases rapidly; Then, the pressure on the lid diminishes quickly after the lid fully opened; Finally, pressure inside and outside the vessel gets a balance. The kinetic energy of the lids ($S = 500$ mm from the initial state) increases with initial residual pressure within vessels.

Key words: quick actuating pressure vessels; numerical simulation; residual pressure; explosion

快开门式压力容器,涉及多个行业、数量大,事故却多发,造成了严重的人身伤亡和经济损失。据统计,快开门式压力容器爆炸事故约占国内压力容器事故总数的三分之一,其中,带压开启是快开门式压力容器事故的常见原因^[1-3]。因此,研究快开门式压力容器带压开启过程是非常必要的。

快开门容器因内部余压而产生的物理爆炸过程是一种流固耦合问题,本质是一个由内外两部分气体共同冲击作用于快开门盖,使其脱离原有位置的响应过程。李国新^[4]和罗凡^[5]等人研究了压力容器安全联锁功能,以此进一步提高快开门式压力容器安全使用的可靠度;龚曙光^[6]等人研究了快开门结构的优化设计。但是以上学者都没有从事故后果的角度研究

快开门压力容器。韩树新^[7]和顾荣利^[8]以及 Liu G^[9]分别从试验以及数值模拟角度对立式快开门容器带压开门进行研究,发现容器内压力、容积对快开门^[10]的爆炸能量呈线性影响。

本文对卧式快开门式压力容器带压开启之后,快开门盖的运动状态及具备的能量进行流固耦合数值模拟,精确计算快开门盖飞出后对离快开门盖定点 500 mm 处一刚性物体的撞击力,评估其破坏能力,为提出有效预防快开门压力容器余压开启爆炸事故的对策提供理论依据。

1 数值模拟

1.1 几何模型

图 1 为本文所仿真分析的卧式快开门容器的具体

收稿日期:2014-02-23;修回日期:2014-05-09

作者简介:刘骁(1989),女,安徽池州人,硕士研究生,主要研究方向为化工过程机械。E-mail:xiao9719@126.com

尺寸。对于快开门压力容器的带压开启过程,可以将其简化为快开门盖突然失去各方向上物理约束,被容器中压缩气体冲击飞出的过程。容器的附件,及几何轮廓的细小沟壑中的压缩气体对实际的响应过程的影响很小,却将极大的增大整个仿真过程计算量和收敛难度,因此予以忽略。

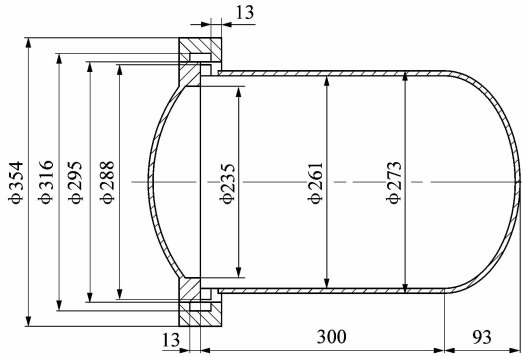


图1 快开门式压力容器结构图

Figure 1 Structure of the quick actuating vessel

图2为简化后的容器几何结构示意图。如图2所示,在筒体与卡箍间留有一定的间隙,以代替实际容器中的卡箍安装齿隙(容器法兰外缘共有5个等夹角的齿隙和对应的5个等大小的齿)。建立模型时,为使齿隙排气面积相等,其径向尺寸取实际尺寸的一半,且快开门盖与卡箍间留有1 mm的空隙作为余隙。

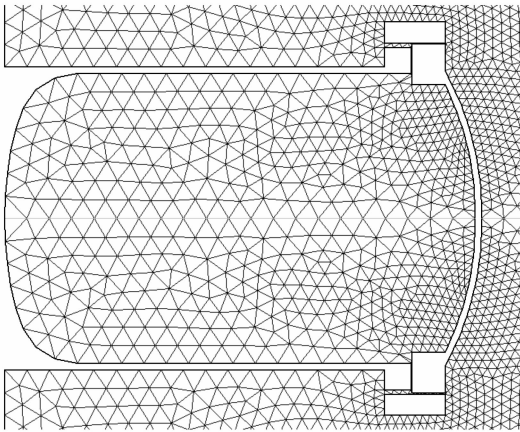


图2 简化后的容器几何结构示意图

Figure 2 Simplified geometric structure of vessel

1.2 基本假设

本文中快开门盖的弹出过程采用二维轴对称分析。因为依据环境与载荷分析,除去忽略的因素后,简化后的物理模型的结构和载荷轴对称,满足了二维轴对称问题的应用条件。物理模型主要假设如下:

1) 认为初始状态时,快开门容器本身温度与内部

气体温度、大气环境温度相同,均设为 300 K;

2) 容器外壁和快开门盖与周围空气形成对流,取对流热传导系数为恒定值;

3) 认为外部大气环境压力稳定,设为 101 kPa;快开门容器内压稳定;

4) 忽略重力;

5) 认为初始状态模型静止;

6) 容器与快开门盖变形微小,均可忽略,认为这两者都为刚体。

1.3 控制方程

本文的物理模型,采用 Eulerian/Lagrangian 混合方法,利用 Fluent 的可压缩、动网格流场分析功能来求解快开门容器流场中气体的速度分布、压力分布、温度变化等物理响应,以下是文中使用的控制方程。

1) 连续性方程

流体力学连续性方程为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0$$

式中: ρ 为流体密度, t 为时间, u 为速度张量,下标 i 代表坐标轴方向, $i = 1, 2, 3$ 分别为 x, y, z 坐标轴方向。

2) 冲量方程

依据基本假设,冲量守恒方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right) \right] + \frac{\partial (-\rho u'_i u'_j)}{\partial x_j}$$

式中: ρ 为流体密度, t 为时间, u 为速度张量, p 为压力,上标'与下标 i 代表雷诺时均分量, $-\rho u'_i u'_j$ 为雷诺应力。下标 i, j, l 代表坐标轴方向,当 i 分别取 1, 2, 3 时, j, l 可以取 1 ~ 3 中任意数值, δ 为边界层厚度。

3) 湍流方程

湍流模型采用 Spalart-Allmaras 模型,该模型是一种单方程湍流模型,用于航空领域,主要是求解墙壁束缚流动(高速可压),已经显示出很好的效果,在透平机械中的应用也很广泛。因此本文应用 Spalart-Allmaras 模型。其方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho v u_i) = G_v + \frac{1}{\sigma_v} \left[\frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ (\mu_t + \rho v) \frac{\partial v}{\partial x_j} \right\} + C_{b2} \rho \left(\frac{\partial v}{\partial x_j} \right)^2 \right] - Y_v$$

式中: ρ 为流体密度, t 为时间, u 为流动速度, μ_t 为湍流黏性, v 为湍流运动黏性系数, σ_v 和 C_{b2} 为 Spalart-Allmaras 模型常数,其值分别为 $\sigma_v = 2/3$,

$C_{b2} = 0.622$ 。 G_v 为湍流黏度生成项, Y_v 为近壁区域的湍流黏性耗散项。

4) 能量方程

气体能量方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \frac{\partial}{\partial x_i}[u_i(\rho E + p)] = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[k_{\text{eff}} \frac{\partial T}{\partial x_j} + u_i(\tau_{ij})_{\text{eff}}\right]$$

式中, $\mu_{\text{eff}} = \mu + \mu_t$, μ 为气体粘度。偏应力张量 $(\tau_{ij})_{\text{eff}}$ 可表示为

$$(\tau_{ij})_{\text{eff}} = \mu_{\text{eff}} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu_{\text{eff}} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij}$$

方程中总能 E 可表示为

$$E = h - \frac{p}{\rho} + \frac{u^2}{2},$$

式中 h 为气体的比焓。

方程中有效热导率 k_{eff} 可表示为

$$k_{\text{eff}} = k_{\text{gas}} + \frac{c_p \mu_t}{Pr_t},$$

式中: k_{gas} 为气体的热导率, Pr_t 为湍流普朗特数, c_p 气体的定压比热容。

5) 气体状态方程

在模型中采用了理想气体状态方程, 表达式如下

$$\rho = \frac{p_{\text{op}} + p}{\frac{R}{M_w} T}$$

式中: p_{op} 为操作压力, p 为表压, M_w 为气体的摩尔质量。

1.4 边界条件

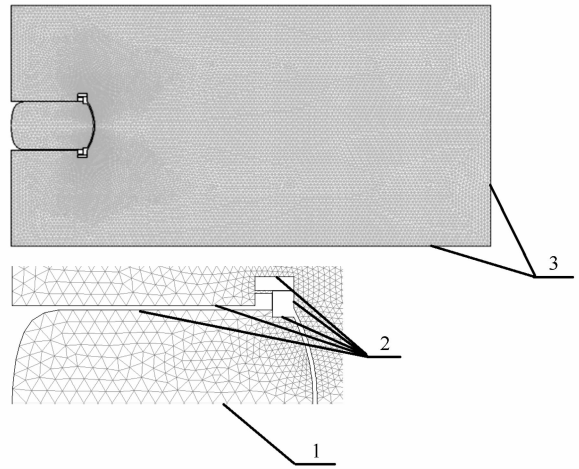
图3为边界条件示意图。壁面边界2, 由于这几处的固体变形可以忽略不计, 故用来限定流体区域, 并认为无滑移; 据载荷分析可知, 本问题具有轴对称几何体的特性, 所以此处定义轴对称的轴边界1; 据环境分析可知, 流场外缘即流动出口, 对于气体膨胀与快开门盖飞出的瞬态过程而言, 可能存在一定的回流, 所以使用压力出口边界3, 压力设置为101 kPa, 这与实际情况相符。另外由于初始压力的区别, 流场内部实际分为容器内外两个区域, 对其分别赋予初始压力。

2 模拟结果与分析

本文对开启压力表压为0.04、0.08、0.12、0.16和0.20 MPa的不同工况进行数值模拟。仿真计算的求解方法采用非稳态一阶隐式, 湍流密度、冲量方程、黏性修正和能量方程均采用一阶迎风离散, 压力速度耦合方式采用SIMPLEC。

2.1 快开门盖所受压力随位移的变化

图4为不同开启压力下, 快开门盖所受压力随位



1—轴边界; 2—壁面边界; 3—压力出口边界

图3 边界条件示意图

Figure 3 Boundary conditions schematic

移的变化曲线。图4显示, 快开门盖开启瞬间, 门盖受力与开启压力相关性较大。此后, 在飞出过程中, 门盖受力的变化情况基本类似。在飞出0.2 m以后, 快开门盖所受压力均基本为零。下面以开启压力为0.12 MPa的卧式快开门式压力容器为例, 分析快开门盖飞行过程中的受力情况。如图4所示, 快开门盖开启瞬间, 容器内气体对失去约束的快开门盖有冲击力。在该冲击力的影响下, 门盖所受压力曲线有波动, 波幅迅速减小。

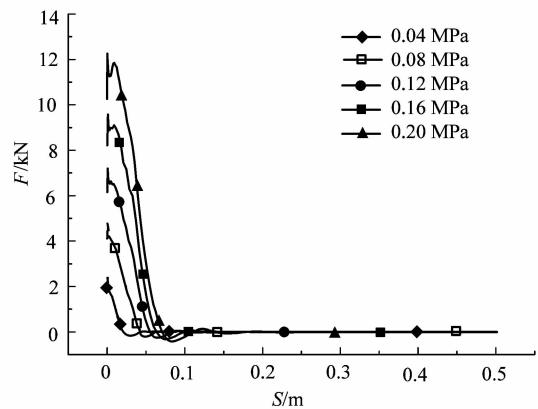


图4 快开门盖所受压力随位移的变化曲线

Figure 4 Pressure on lid vs. displacement curves

图5为开启压力为1.2 MPa的快开门容器, 门盖分别飞出至0.024、0.053及0.264 m时的压力分布情况。门盖运动到0.02 m以前(图5(a)), 尚未完全开启, 虽然气体泄漏造成压力下降, 但由于缝隙较小, 容器内压力降低较慢, 门盖所受压力仅略微减小。由图5(a)可知, 容器的卡箍边缘具有约束气体膨胀的作

用,会影响容器内部气体泄压的快慢,也会影响门盖加速的效果。随着门盖继续开启,高压气体大量逸出容器,容器内部压力急剧减小,门盖所受压力迅速减小。当门盖飞行至0.053 m的位置时(图5(b)),容器内气体已充分膨胀,此时容器内外压力已基本达到平衡,门盖所受压力为零。此后流场与快开门状态的变化,基本是在惯性的作用下继续发展(图5(c))。

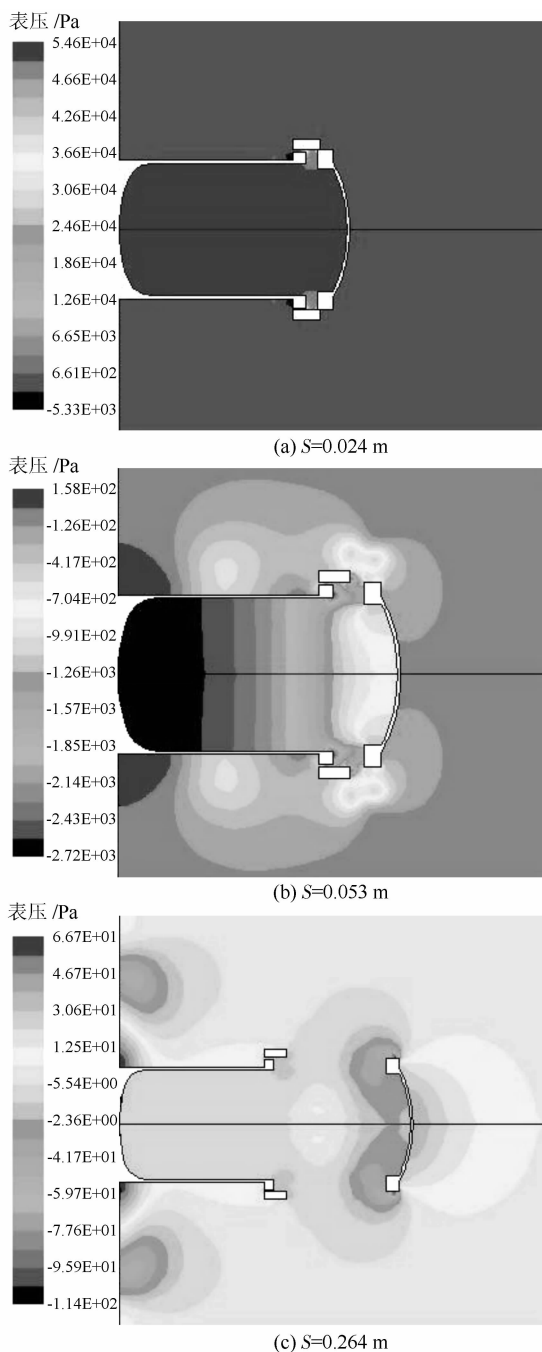


图5 开启压力为1.2 MPa快开门容器压力分布
Figure 5 Pressure distribution with initial residual pressure of 1.2 MPa within vessel

2.2 快开门盖速度随位移的变化

图6为不同开启压力下,快开门盖速度随位移的变化曲线。不同开启压力下快开门盖飞出的速度变化情况基本类似,基本可以分为3个阶段。快开门盖开启之后,先是在很短的位移内达到最大速度,之后在一个短暂距离内,迅速减速,最后门盖以极缓慢的幅度减速。

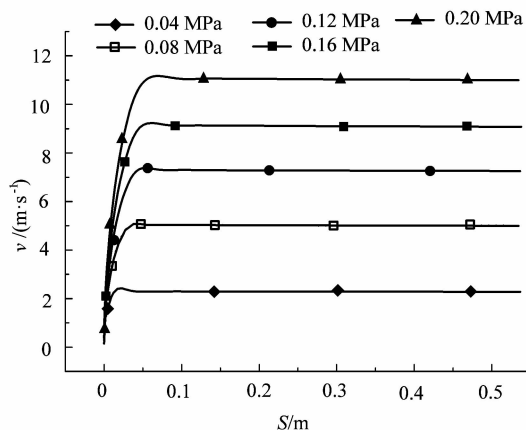


图6 快开门盖速度随位移的变化曲线
Figure 6 Velocity of lid vs. displacement curves

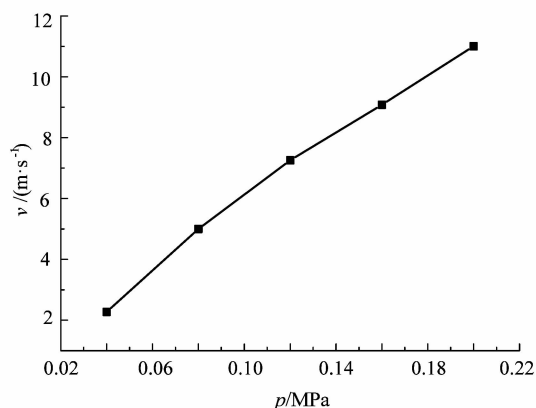
表1显示了不同余压快开门盖达到最高速度时门盖的位移与消耗的时间。门盖达到最高速度所经历的位移,随着开启压力的增加,略有增加。开启压力成倍增加,而容器内外压力达到平衡的时间几乎相同,甚至开启压力较大的工况下,容器内外压力达到平衡的时间较短,主要是因为开启压力较大的情况下门盖飞出速度较快,容器内气体逸出的通道较大。结合受力过程分析可知,容器内外压力平衡,门盖所受压力为零时,门盖飞行速度也达到最大。达到最大速度后,快开门盖附近的流体又形成负压(图5(b)),致使快开门盖又经历一个短暂的迅速减速过程,此后便进入缓慢减速阶段,快开门盖仅受很小的空气阻力,速度基本保持恒定状态。

表1 快开门盖最高速度所用时间

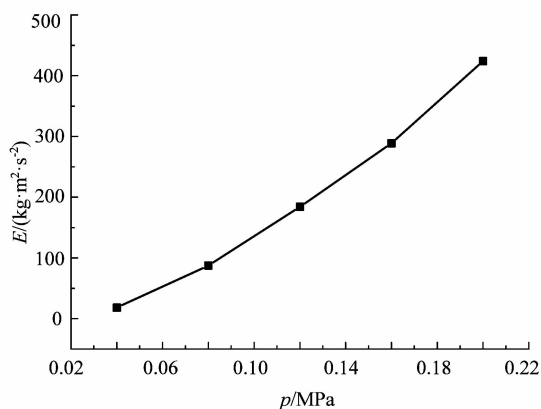
工况序号	开启压力/ MPa	时间/s	位移/m	速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
1	0.04	0.013	0.021	2.43
2	0.08	0.013	0.042	5.09
3	0.12	0.011	0.053	7.38
4	0.16	0.010	0.060	9.23
5	0.20	0.010	0.070	11.17

2.3 快开门盖飞出 500 mm 处的速度及具备的能量和冲量

为了研究快开门式压力容器带压开启之后,飞出的门盖对外界的破坏力,本文选取门盖飞出 500 mm 的位置,研究快开门盖的速度及动能。由图 7 可以看出,快开门盖飞出 500 mm 处的速度及所具备的动能均随开启压力的增大而增大。



(a)速度与开启压力的关系



(b)动能与开启压力的关系

图 7 飞出 500 mm 处快开门盖的速度及动能与开启压力的关系

Figure 7 Velocity and kinetic energy of the lids ($S=500$ mm from the initial state) vs. initial residual pressure within vessels

3 结论

1) 快开门盖飞出 500 mm 处的速度及所具备的能量均随卧式快开门容器开启压力的增大而增大。

2) 快开门压力容器,带压开启瞬间,受到冲击力;未完全开启时,所受压力基本恒定;完全开启后,受力迅速减小;最终依靠惯性继续飞行。

3) 快开门盖附近的流体在很短位移内先快速膨胀后又形成负压,致使快开门盖达到最大速度后又迅速减速,此后快开门盖仅受很小的空气阻力,故缓慢减速,其破坏力随飞出距离增大无明显降低。

4) 快开门盖物理加速过程完成得非常快,不同开启压力,花费时间在 0.10 ~ 0.13 s。快开门盖飞出时加速度的大小随开启压力增大而增大;加速时间随开启压力增大而略微减小;门盖达到最高速度所经历的位移,随着开启压力的增加,略有增加。

参考文献:

- [1] 郑津洋. 快速开关盖式压力容器[J]. 化工装备技术, 1997, 18(1): 30-38.
- [2] 李国新. 快开门式压力容器设计的体会[J]. 轻工机械, 2004(1): 72-73.
- [3] 胡兆吉, 黄克敏, 刘兴林. 在用快开门式压力容器的失效事故分析及其预防对策[J]. 化工装备技术, 2000, 21(6): 15-18.
- [4] 李国新. 安全联锁装置的设计[J]. 轻工机械, 2004(2): 118-119.
- [5] 罗凡, 闵瑞和, 王恒林, 等. 快开门式压力容器安全联锁功能检测设备的研发和应用[J]. 化工自动化及仪表, 2010, 37(12): 99-103.
- [6] 龚曙光, 谢桂兰花, 王亚, 等. 基于有限元分析的快开门装置结构优化设计[J]. 机械设计与研究, 2004, 20(1): 83-85.
- [7] 韩树新, 盛水平, 刘延雷, 等. 快开门式压力容器余压开门爆炸危害研究[J]. 压力容器, 2010, 27(2): 50-54.
- [8] 顾荣利, 韩树新, 盛水平, 等. 快开门式压力容器余压开门爆炸数值仿真研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2012, 8(6): 48-52.
- [9] LIU Gesi, ZHAO Yongzhi, LIU Yanlei, et al. Numerical and experimental study of the explosions caused by residual pressure in quick actuating vessels[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2011, 24(2): 156-165.
- [10] 何慧慧, 董金善, 丁培丽. 基于有限元的齿啮式快开压力容器疲劳分析[J]. 轻工机械, 2013, 31(1): 61-63.