

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2014.06.010

基于 ANSYS CFX 的安全阀 开启过程的数值模拟

闵加丰, 朱海清

(江南大学 机械工程学院, 江苏 无锡 214122)

摘 要:以 A42Y 型弹簧式安全阀为研究对象,利用 ANSYS CFX 软件对安全阀开启过程进行数值模拟,得到了安全阀从开始开启到稳定排放阶段介质对阀瓣作用力随时间的变化曲线,以及特定时刻的压力场分布。并且根据安全阀稳定排放时的介质作用力计算得到流道等效半径,对安全阀开启过程动态特性研究以及安全阀在线校验中流道有效面积计算提供了一定的指导和依据。

关 键 词:压力容器;安全阀;数值模拟;ANSYS CFX 软件;介质作用力;压力场

中图分类号:TH161 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2895(2014)06-0040-04

Numerical Simulation of Safety Valve Opening Process Based on ANSYS CFX

MIN Jiafeng, ZHU Haiqing

(School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China)

Abstract: In this paper, took A42Y type spring safety valve as the research object. Made a numerical simulation of safety valve opening process with ANSYS CFX. Obtained the change relationship of medium force as well as pressure field distribution from open to stable emission. Calculated the port equivalent radius with medium force when the safety valve discharged stability. It provides the theoretic support to research the dynamic characteristics in the process of safety valve opening and calculates the port equivalent radius in the safety valve online checkout.

Key words: pressure vessels; safety valve; numerical simulation; ANSYS CFX; medium force; pressure field

安全阀是一种自动阀门,它不借助任何外力而利用介质本身的力来排出一额定数量的流体,以防止压力超过预定的安全值;当压力恢复正常后,阀门再行关闭并阻止介质继续流出^[1-2]。对于锅炉、压力容器、压力管道等承压类特种设备,安全阀既是一种最基本的机械性保护装置,同时也是必不可少安全附件,其动作可靠性和性能好坏直接关系到设备和人身安全。

安全阀在工作过程中,由于受到操作压力、温度、介质侵蚀等物理和化学因素的影响,其整定压力和密封性能会发生改变导致安全阀不能在规定压力下开启或发生泄漏,从而影响生产。为了确保工业生产的安全,国家标准明确规定了安全阀的定期校验时间:“一般每年至少校验一次”^[3]。因此,对安全阀开启过程

的研究尤为重要,国内外学者也对安全阀开启过程基于计算流体动力学的数值模拟进行了大量研究。20世纪80年代 Maryland 大学的 Sallet 教授与 EPRI 合作,通过大量的流场数值模拟和试验发现:流量系数与介质的状态有很大关系,不可压缩介质的流量系数比可压缩的介质的流量系数大得多,并且流量系数随背压的增大而减小^[4]; M. R. Mokhtarzadeh-Dehghan 通过对不同阀口角度下泄压阀的仿真模拟发现,泄压阀内部流场的变化导致泄压阀开启时出现回流现象,并且对阀瓣处压力场分布产生较大影响^[5];国内的骆辉通过建立安全阀数值模拟的三维 CFD 模型,得到安全阀内部压力场和速度场的三维数值分布,定性分析了安全阀的各参数对升力系数的影响^[6];刘殿坤通过建立

收稿日期:2014-04-05;修回日期:2014-04-17

作者简介:闵加丰(1988),男,安徽安庆人,硕士研究生,主要研究方向为 CAD/CAM。E-mail:minjiafengok@126.com

安全阀三维可压缩流场计算模型,结合 CFD 软件研究开启高度对安全阀排放能力的影响即排量系数随开启高度的变化依次呈现出线性增加、非线性且斜率逐渐减小的增加和保持不变的规律^[7]。本文在近年来研究的基础上,结合 ANSYS CFX 动网格技术,对安全阀开启过程中各参数随时间的变化关系以及特定时刻内部压力场的分布特性进行了探讨。

1 数值模拟过程

1.1 模型创建与网格划分

数值模拟的安全阀模型选用 A42Y 型弹簧全启封闭式安全阀,公称直径为 50 mm,流道直径为 32 mm。在数值模拟过程中模型简化处理是否得当不仅影响计算机求解时间的长短,更直接影响数值模拟结果的准确性。根据安全阀的结构特点,影响安全阀开启过程中内部流场分布的主要部件有阀座、调节圈、阀瓣、反冲盘、阀体,最终简化的几何模型由流道、阀体和管道 3 部分组成。

ANSYS ICEM CFD 可以生成的网格种类有四面体网格、六面体网格、三棱柱网格等。在安全阀开启过程中,局部网格的变形是十分剧烈的,考虑到网格动态变化过程中动网格的计算,选用六面体网格^[8-9]。网格划分情况如图 1 所示,流道部分有 8 250 个单元,阀体部分有 69 040 个单元,管道部分有 11 980 个单元。同时考虑到安全阀开启时反冲盘和下调节圈之间以及阀口处网格变形十分剧烈,为了满足动网格的计算要求必须对网格进行局部加密处理。

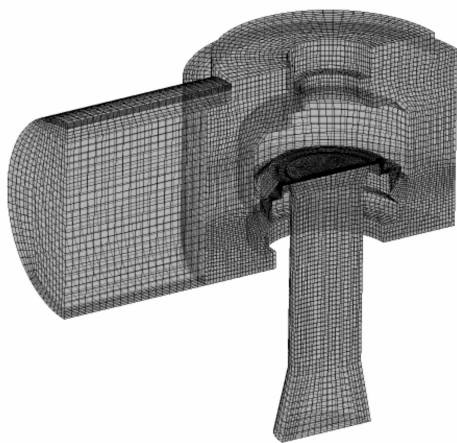


图 1 数值模拟分析几何模型

Figure 1 Numerical simulation analysis of geometric model

1.2 物理参数及边界条件设置

由于本文研究的安全阀主要针对电站、锅炉等需

要进行在线校验的安全阀,因此根据某锅炉正常工作状态时容器内的介质参数确定 CFX 模拟时的材料参数。选择介质为 350 ℃ 的饱和水蒸气,定压比热容为 $1.624 2 \times 10^4 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$,动力粘度为 $2.655 8 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$,密度为 $1.136 \times 10^2 \text{ kg}/\text{m}^3$,摩尔质量为 $18 \text{ g}/\text{mol}$ ^[10-11]。

CFX 中提供的边界类型主要有入口(Inlets)、出口(Outlets)、开放式边界(Opening)、壁面(Walls)、对称面(Symmetry)和交界面 6 种。根据安全阀的开启特性将流道入口和管道出口均设置为开放式边界,流道入口处相对压力为 1.0 MPa,管道出口处相对压力为 0 MPa;将流道圆柱壁面、刚性整体的外壁面、阀杆壁面、阀体外壁面和管道圆柱壁面设置为壁面边界类型;将流道与阀体之间的交界面、阀体与管道之间的交界面的网格连接类型设置为 GGI^[12]。

2 仿真结果分析

2.1 介质作用力曲线

在安全阀开启过程中,介质作用力是导致阀瓣开启的直接因素,介质作用力的大小直接影响到阀瓣位移的变化,从而影响安全阀的排放能力。在 CFX 求解器控制中设置监控这一变量的变化情况,图 2 为介质对阀瓣作用力随时间的变化情况。

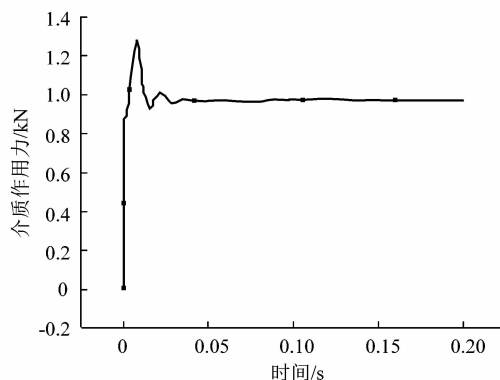


图 2 作用力变化曲线

Figure 2 Force change curves

由图可知,介质作用力一开始在不到 0.01 s 的时间内急速攀升到 1 285 N,远大于介质压力与流道面积的乘积 $1.0 \times 10^6 \times \pi \times (0.016)^2 = 803.8 \text{ N}$,然后减小至波谷 934 N,发生强度逐渐衰减的振动,在 0.1 s 后稳定在 972 N,仍大于 803.8 N,此时安全阀处于稳定排放阶段。此种现象可以根据安全阀的关闭件结构得到合理的解释,在阀瓣离开密封面瞬间,介质作用面积瞬间增大导致介质作用力急速攀升到远大于根据流道面积计算得到的作用力大小,同时当介质排出时压力随之

减小,在作用面积不变的情况下介质作用力减小,从而产生振动。当达到稳定排放阶段时由于介质作用面积仍比流道面积大,因此介质作用力仍比 803.8 N 大。

从以上对介质作用力的分析可以得出,在安全阀开启过程中计算介质对阀瓣作用力时不能简单的用流道面积与介质压力相乘,应考虑到开启过程中介质与阀瓣接触面积的变化情况。根据 $972 = 1.0 \times 10^6 \times \pi \times (R)^2$ 得到稳定排放时的阀瓣等效半径 $R = 17.59 \text{ mm}$ 。

2.2 压力场分析

安全阀的开启过程主要分为 4 个重要阶段,开始开启阶段、最大开启高度阶段、稳定排放阶段和回座阶段,本文利用 ANSYS CFX 模拟安全阀从开始开启到稳定排放的全过程。由于安全阀整个开启过程的时间均在毫秒级,因此模拟总时间设置为 200 ms,利用 ANSYS CFX 后处理软件^[13]得到安全阀开启过程中不同阶段内部压力场变化云图,如图 3 所示。

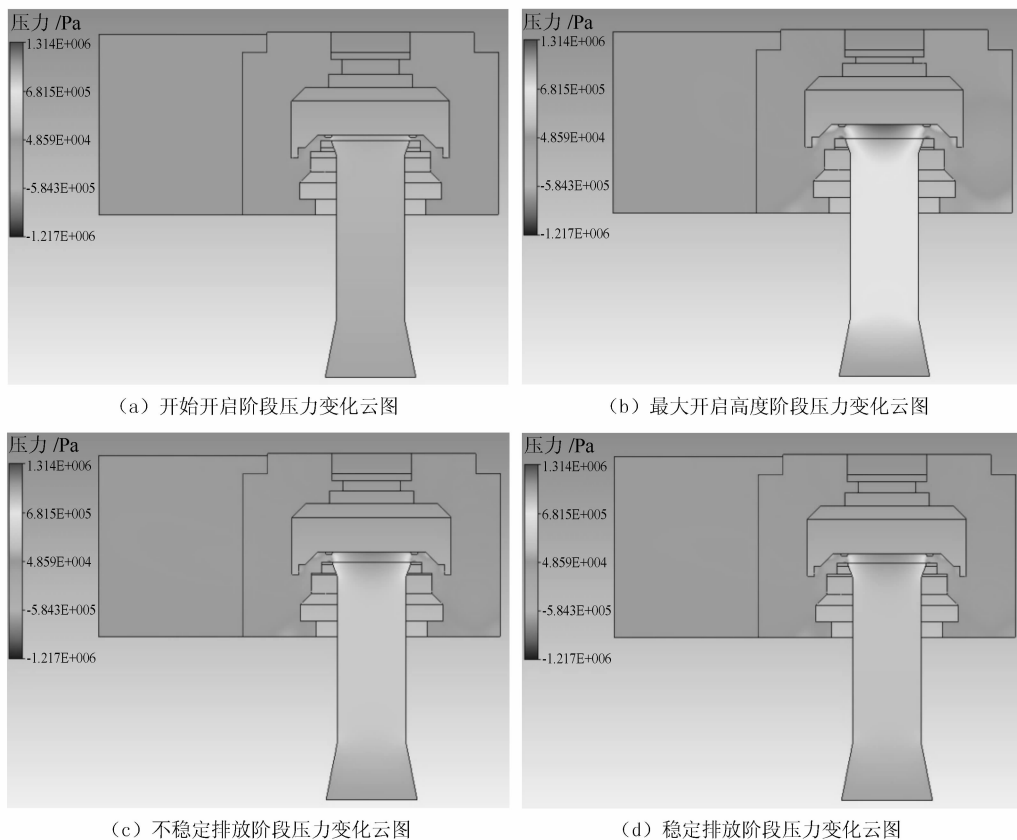


图 3 安全阀开启过程中不同阶段压力云图

Figure 3 Pressure field of different stage in safety valve opening process

从图 3(a)可知,在安全阀开始开启阶段流道内的压力分布均匀,此时设备内介质对阀瓣的作用力与附加外力之和等于弹簧预紧力,从严格意义上来说阀瓣与阀座并未分离仍然处于相互贴合的状态,只是相互之间作用力为零,由于系统内部介质并未从阀口排出,因此流道内介质状态并没有受到影响,压力分布均匀。

随着安全阀的开启泄压,阀瓣向上运动达到最大开启高度,此时系统内介质通过阀口排出。由于阀瓣独特的盘状结构,从图 3(b)可以看出压力在阀瓣下方中心区域发生积聚,为了更好的分析阀瓣处于最大开启处时流道内和开口处压力分布特性,导出沿如图 4 所示的 A,B,C,D 4 条直线路径的压力变化曲线,如图 5 所示。

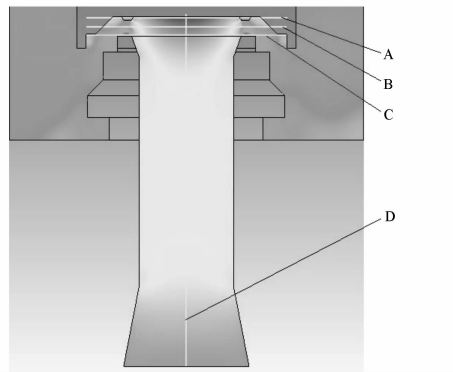


图 4 压力曲线导出路径

Figure 4 Pressure curve export path

图 3(c) 不稳定排放阶段压力分布趋势与最大开启高度的情形大体一致,处于新旧平衡的过度阶段,此时由于高速喷射气流的冲击阀瓣开启高度呈现上下波动,开启高度较前者有所降低,并且流道内压力变化减缓,阀瓣下方中心区域压力积聚减弱。

图 3(d) 稳定排放阶段流道内压力变化进一步减缓,阀瓣下方中心区域压力积聚进一步减弱,安全阀内部压力分布趋于稳定达到一个新的平衡阶段。从图 3 整体可以看出安全阀开启泄压的全过程,流道和阀口密封面以外的阀腔以及出口区域的压力分布几乎未受到影响,处于相对稳定的状态,主要原因是阀腔和出口区域直接与大气相通,安全阀排出的介质数量相对于

大气来说微不足道。

根据图 5(a) 所示的沿直线路径 D 的压力变化曲线可知,在流道底部压力略大于设置的入口处压力 1.0 MPa,主要是由于安全阀的开启泄压并不是一个瞬态的动作,而是一个连续排放的过程,压力得不到瞬态的释放而在流道内部产生积聚。总体来看压力呈梯度变化,先减小,然后保持不变,最后增加。压力减小的主要原因是流道截面的变化,符合变截面管道高速气流的流动特性。在靠近开口处压力增加主要是由于阀瓣独特的盘状结构,导致压力在此发生积聚,从图 5(b) 可以看出越靠近阀瓣中心压力越大并且呈现层状变化。

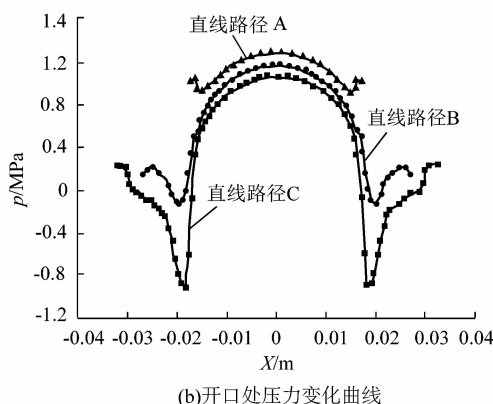
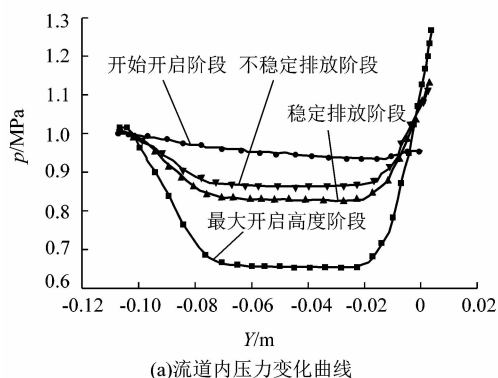


图 5 压力变化曲线

Figure 5 Curve of pressure change

3 结语

本文以 A42Y 型弹簧式安全阀为研究对象,利用 Pro/E 建立三维仿真模型,通过 ANSYS ICEM CFD 划分网格,最后导入 ANSYS CFX 中进行数值模拟,得到了安全阀从开始开启阶段到稳定排放阶段介质对阀瓣作用力随时间的变化关系以及特定时刻压力场分布特性。发现介质作用力在达到最大值之前会出现一个拐点,达到最大值后发生类似于带阻尼弹簧振子的震荡,随着介质地排放最终达到稳定状态。根据安全阀稳定排放阶段时介质作用力计算得到阀瓣有效半径,为安全阀开启过程动态特性研究以及安全阀在线校验中流道有效面积计算提供了一定的指导依据。通过对安全阀从开始开启到稳定排放 4 个关键时刻压力场的分析,发现在安全阀开启过程中在阀瓣下方中心区域会出现压力积聚,当阀瓣处于最大开启高度时最为明显。

参考文献:

- [1] 中国机械工业联合会. GB/T 12241-2005 安全阀一般要求[S]. 北京:中国标准出版社,2005.
- [2] 中国机械工业联合会. GB/T 12243-2005 弹簧直接载荷式安全阀

- [S]. 北京:中国标准出版社,2005.
- [3] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. TSG ZF001-2009 安全阀安全技术监察规程[S]. 北京:中国标准出版社,2009.
- [4] SALLET D W, COLLEGE P. Critical mass flow rates through pressure relief valves[J]. Warme and Stoffübertragung, 1991(26):315-321.
- [5] MOKHTARZADEH-DEHGHAN M R, LADOMMATOS N, BRENNAN T J. Finite element analysis of flow in a hydraulic pressure valve[J]. Applied Math Modelling, 1997, 21(7):437-445.
- [6] 骆辉, 于新海, 王正东. 安全阀升力系数试验研究和数值模拟[D]. 上海:中国科技论文在线, 2008, 3(8):587-591.
- [7] 陈殿京, 刘殿坤, 董海波, 等. 安全阀流场数值模拟研究[J]. 流体机械, 2008, 36(10):24-28.
- [8] 纪兵兵, 陈金梅. ANSYS ICEM CFD 网格划分技术实例详解[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2012.
- [9] 马庆芳. 实用热物理性质手册[M]. 北京:中国农业机械出版社, 1986.
- [10] 张家荣, 赵廷元. 工程常用物质的热物理性质手册[M]. 北京:新时代出版社, 1987.
- [11] 浦广益. ANSYS Workbench 基础教程与实例详解[M]. 2 版. 北京:中国水利水电出版社, 2013.
- [12] 谢龙汉, 赵新宇, 张炯明. ANSYS CFX 流体分析及仿真[M]. 北京:电子工业出版社, 2012.
- [13] 宋学官, 蔡林, 张华. ANSYS 流固耦合分析与工程实例[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2012.