

基于压力波预测的防爆设备力学特性分析

陆佳伟,王刚

(苏州大学 机电工程学院,江苏 苏州 215021)

摘要:基于可燃性气体爆炸理论,采用数值模拟和实验研究两种方法,对防爆设备内部可燃性气体爆炸过程、爆炸冲击波和火焰波传播规律及防爆设备在高温高压气体作用下的动力响应进行探讨。通过 Fluent、Transient structural 和 System coupling 仿真防爆设备内部的爆炸过程,分析其内部高压流场与壁面双向耦合作用下壳体的力学特性,仿真结果与实验结果基本一致,可为防爆设备的设计优化提供技术支持。

关键词: 防爆设备;数值模拟;耦合作用;力学特性

中图分类号: TP391.9 **文献标志码:** B **文章编号:** 1671-5276(2021)02-0058-04

Mechanical Characteristic Analysis of Explosion-proof Equipment Based on Pressure Wave Prediction

LU Jiawei, WANG Gang

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Soochow University, Suzhou 215021, China)

Abstract: Based on the theory of combustible gas explosion, numerical simulation and experimental study were used to discuss the explosion process of flammable gas explosion inside the equipment, the explosion shock wave and flame wave propagation law and the dynamic response of explosion-proof equipment under high temperature and high pressure gas. By Fluent, Transient structural and System coupling, the internal explosion process of the explosion-proof equipment was simulated and the mechanical properties of the shell under the bidirectional coupling of the internal high pressure flow field and the wall were analyzed. The simulation results prove to be consistent with the experimental ones, which provide technical support for the design and optimization of explosion-proof equipment.

Keywords: explosion-proof equipment; numerical simulation; coupling effect; mechanical properties

0 引言

防爆设备主要用于有瓦斯等有爆炸危险的矿井里。近些年来,国内对防爆设备进行了强度设计、结构设计、壳体形状设计等多方面研究。国内工厂设计防爆设备时,基本都是根据现有经验,估算防爆设备壳体的参数,然后通过水压实验检验产品是否符合出厂要求^[1]。设计工程师不能清楚地了解防爆设备的应力应变情况,根本不可能在其薄弱处进行优化设计^[2]。

最近几十年,国内防爆产品朝着高精度、高性能、高效率、低成本方向发展,传统的设计方法已经不能满足现代设计的要求,因此,需要提出新的设计方案来弥补传统设计方案的不足。近些年来,有限元方法迅速发展,它网格划分简单,计算速度快、精确度高、后处理功能非常强大。因此,本文通过 Fluent 和 Transient structural 仿真防爆设备内部可燃气体的爆炸过程,同时分析在爆炸流场和壁面耦合作用下防爆设备壳体的力学特性。

国内外众多学者利用计算流体力学(CFD)理论对可燃性气体的燃烧爆炸过程进行了研究。王凯楠等^[3]利用 Fluent 对天然气在活塞中燃烧进行数值模拟计算。刘磊

等^[4]利用 Fluent 软件建立了氢气容弹预混燃烧模型,对不同形式网格划分机理进行了深入研究,得出不同机理形式下火核的几何形状分布。CLUTTER J K 等^[5]结合爆炸理论和 CFD 软件,建立了可燃气体燃烧爆炸的状态、能量方程,并编制出数值仿真计算软件。

目前,可燃气体爆炸的 CFD 仿真模拟模型大都局限于宽长的巷道或规则的长方体、圆柱体模型,并没有过多地考虑复杂模型,同时没有考虑爆炸流场和壁面之间的双向耦合作用。因此,本文利用 Fluent、Transient structural 和 System coupling 仿真防爆设备内部的爆炸过程及防爆设备壳体的动力响应。

1 Fluent 燃烧流场分析

1.1 控制方程

Fluent 是通过求解描述每种参与反应物质的对流、扩散和反应源的守恒方程来模拟混合和输运的^[6-7]。混合气体预混燃烧的模拟是通过建立物质守恒运输方程的方式实现的,方程如式(1)所示。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} Y_i) = -\nabla \cdot \mathbf{J}_i + R_i + S_i \quad (1)$$

其中: Y_i 是通过第 i 种物质的对流扩散方程预估的每种物质的质量分数; R_i 是化学反应的净产生速率; S_i 是离散项等导致的额外产生速率。

1.2 燃烧模型

Fluent 中化学反应模型,特别是湍流状态下的化学反应模型一直占据着重要的地位。多年以来,Fluent 强大的化学反应模型帮助用户模拟了多种复杂的燃烧过程^[8]。Fluent 中组分模型模块提供了多种化学反应模型:组分输运模型、非预混燃烧模型、预混燃烧模型等。其中,组分输运模型建立在对组分输运方程求解的基础上,采用了用户自己定义的化学反应机理。此模型虽然需要较长的计算时间,但模拟时严格考虑了湍流与化学反应间的相互作用过程,模拟精确度高,所以本文选择组分输运模型对防爆箱内部爆炸过程进行模拟仿真^[9-10]。

$k-\varepsilon$ 两方程模型是在湍动能 k 的基础上引入湍流耗散率 ε 方程。目前, $k-\varepsilon$ 模型的计算精度可以满足用户的要求,成为使用最广泛的湍流黏性模型。本文此次仿真涉及到火焰的湍流,因此选用 $k-\varepsilon$ ^[11] 模型。该模型的主要控制如式(2)、式(3)所示。

k 方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(a_k \mu_{\text{eff}} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (2)$$

ε 方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(a_\varepsilon \mu_{\text{eff}} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R_\varepsilon + S_\varepsilon \quad (3)$$

2 基于 Fluent 瓦斯爆炸数值模拟

2.1 物理模型

本文选择 UG 作为防爆箱建模的工具。本文实验防爆箱外观图如图 1-图 2 所示。

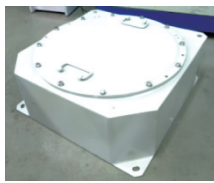


图 1 防爆箱实体图

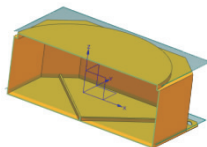


图 2 防爆箱模型

2.2 防爆箱模型的网格划分

Fluent 软件中网格划分功能非常强大, Meshing 平台网格划分可以根据不同的物理场合提供多种不同的网格划分方法。对三维模型, Ansys Mesh 有多种网格划分方法:自动网格划分、四面体网格划分、六面体网格划分等等。其中,六面体网格在变形特性、计算精度及网格的离散误差方面有着明显的优势,所以本次选择六面体网格划分法对防爆箱进行网格划分。

2.3 材料及边界条件设定

初始时刻,防爆箱内充满甲烷、氧气混合气体,甲烷的体积分数是 9.5%,初始压力为 1 个标准大气压,温度为 300 K,点火区域位于防爆箱中心位置,点火形状为直径 1 cm 的球体,点火温度设为 2 000 K。要实现高压气体与壁面的双向耦合作用,需要设置流固交界面为 System coupling 类型,设置 Zone Name 下拉列表框为 solid_fluid_walls,设置 Type 为 System coupling。

2.4 防爆箱内部爆炸过程分析

甲烷、氧气混合气体点燃后,在防爆箱内部剧烈燃烧,产生高温高压气体。图 3 显示了防爆箱内部温度随时间的变化情况。图 4 显示了防爆箱内部压力随时间变化情况。由图 3 可知,点火初期,温度云图分 3 个区域:红色区域(已燃烧区域)、绿色区域(反应区域)、蓝色区域(未燃烧区域)(本刊黑白印刷,如有疑问可咨询作者)。燃烧刚开始阶段,火焰阵面以点火源为中心,呈规则的球形状向外传播。随着燃烧的进行,由于冲击波作用产生的涡旋致使火焰被扰动而发生严重的变形和破碎,以及湍流燃烧的作用,都极大地提高燃烧速率和扩展速率,于是火焰呈褶皱的球形状向外传播。当燃烧进行到 15 ms 时,防爆箱内气体基本完全燃烧,此时压力和温度达到峰值。

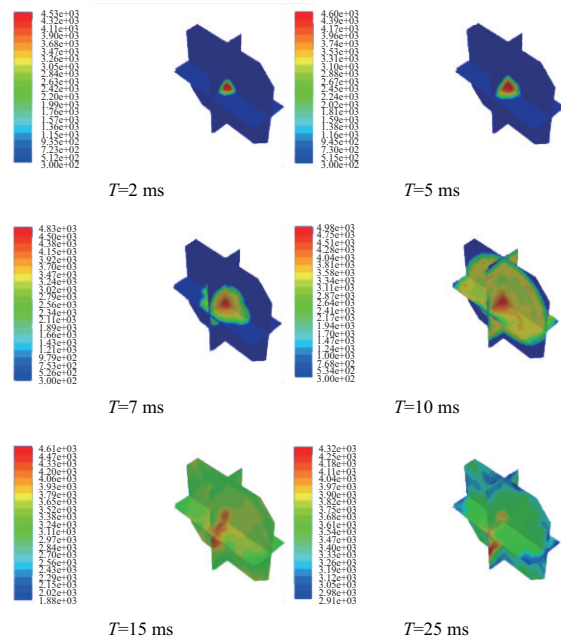


图 3 温度-时间云图

由图3可知,已燃烧区域温度在3500K以上,反应区域温度在300K~3500K之间。

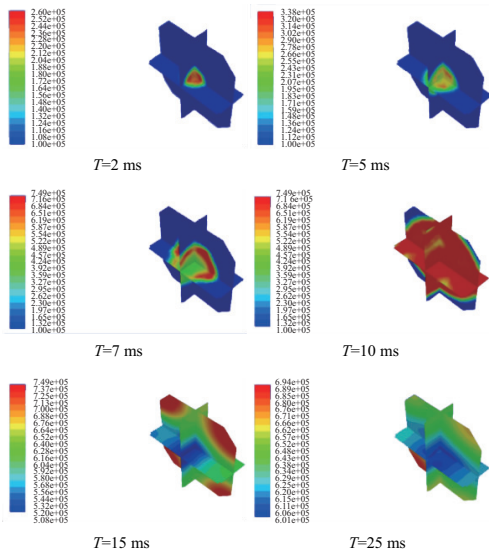


图4 压力-时间云图

由图4可知,压力在15ms时达到峰值,约0.75MPa,到25ms时,趋于稳定,约0.64MPa。

2.5 高温高压气体作用下防爆箱的动力响应分析

利用 System coupling 模块计算在爆炸流场和防爆箱壁面耦合作用下防爆箱的动力响应。图5和图6分别显示了防爆箱在高温高压气体作用下 x,y 两个方向应力随时间变化的云图。在燃烧大约进行了15ms时,爆炸冲击波到达壁面,在冲击波的作用下,防爆箱壁面开始变形。防爆箱上下壁面中心位置最先发生形变,随着爆炸气体的传播与反射,变形区域由上下壁面向左右壁面转移。

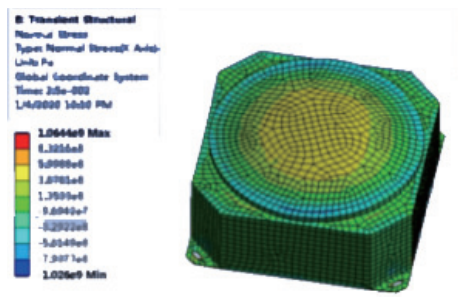


图5 x方向应力云图

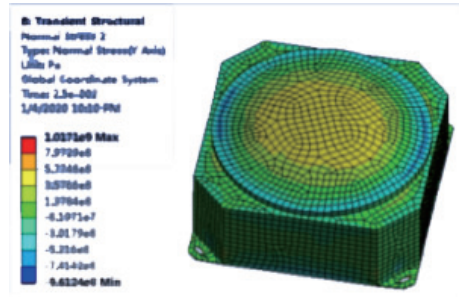


图6 y方向应力云图

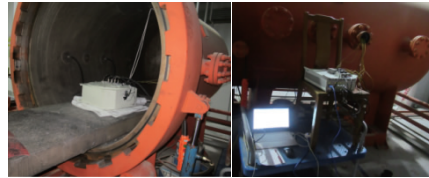


图7 实验装置图

3.2 实验方法及步骤

- 1) 实验之前先校准压力传感器,将压力传感器、进气阀及出气阀与防爆设备连接为一体,保证各个阀门都关闭;
- 2) 用配气系统配置体积浓度为9.5%的甲烷空气混合气体;
- 3) 同时打开防爆设备顶部的进气阀和出气阀,开始向防爆设备中充入甲烷空气预混气体;
- 4) 当充气结束以后,关闭排气阀和进气阀,静置80s,以保证防爆设备内部的甲烷氧气混合均匀;
- 5) 打开数据采集仪,启动点火装置,引燃甲烷空气预混气体;
- 6) 实验结束后,静置2min,打开出气阀,排尽防爆设备内部的气体,准备进行下一次实验。

3.3 实验结果与数值模拟对比

依照设计的实验方案,实验测得爆炸压力、应变等大量数据和曲线。爆炸压力曲线如图8所示,由于压力传感器和测试仪器的原因,只能测到爆炸压力峰值。压力达到峰值以后,压力骤降到大气压以下的数据,无实际参考价值。

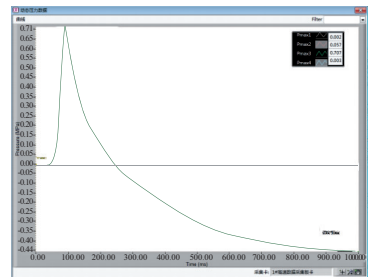


图8 压力-时间曲线图

3 实验系统及实验方法

3.1 实验系统

在苏州电器科学研究院的帮助下,完成了防爆设备内部瓦斯燃烧爆炸的实验。该系统包括6个部分,即配气装置、抽气和压气装置、点火装置、防爆设备、DH5922N动态数据采集分析系统、爆炸压力测试系统。部分实验装置,如图7所示。

将图8与图4对比可知,实验压力峰值(0.79MPa)与仿真压力峰值(0.75MPa)基本相等。

选取实验模型表面两个关键点,测量这两个关键点横向和纵向的应变。将实验数据和数值模拟数据对比,对比

结果如图 9、图 10、图 11、图 12 所示。

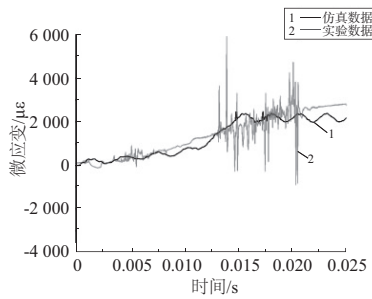


图 9 上表面点横向应变对比图

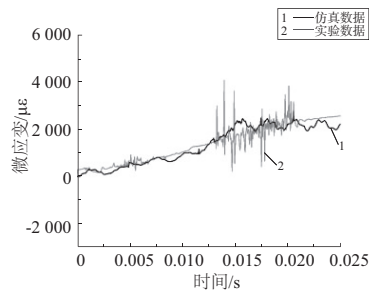


图 10 上表面点纵向应变对比图

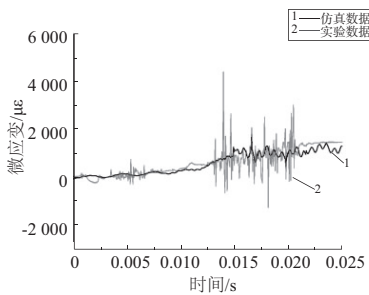


图 11 侧面点横向应变对比图

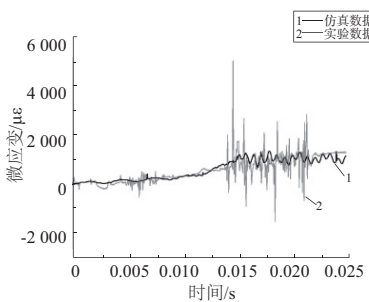


图 12 侧面点纵向应变对比图

由以上对比结果可知:仿真结果与实验结果基本保持一致,仿真数值可作为后期设计优化防爆设备的参考依据。

4 结语

1) 利用 Fluent 软件能够很好地仿真防爆设备内部的爆炸过程,分析冲击波和火焰波阵面的传播与衰减规律,得到防爆箱内部温度和压力随时间的变化云图。

2) 本文给出了防爆箱内部爆炸压力峰值的仿真和实验对比结果,防爆箱表面关键点应变值的仿真和实验对比结果,仿真结果与实验结果基本保持一致,证明了数值模拟结果的可靠性。

3) 利用 Workbench 软件分析了防爆设备在高温高压爆炸流场作用下结构的动力响应,仿真结果为防爆设备的设计优化提供了可靠的依据,达到了缩短生产研发周期的目的。

参考文献:

[1] 陈晓红,冯高阳. 安徽省矿用防爆开关技术现状及发展趋势[J]. 安徽科技,2013(9):47-49.

[2] 柴鹏斌,王然风,张星荣. 矿用隔爆外壳的结构优化[J]. 煤炭技术,2017,36(6):263-265.

[3] 王凯楠,侯献军,闫少杰,等. 基于 Fluent 的天然气的燃烧特性研究[J]. 汽车科技,2011(3):12-14.

[4] 刘磊,孙俊,李格升,等. 基于 Fluent 的定容燃烧弹内预混层流燃烧模拟[J]. 船海工程,2012,41(5):107-111.

[5] CLUTTER J K, MATHIS J T, STAHL M W. Modeling environmental effects in the simulation of explosion events [J]. International Journal of Impact Engineering, 2007, 34(5):973-989.

[6] 张师帅. 计算流体力学及其在 CFD 软件中的应用[M]. 武汉:华中科技大学出版社,2011.

[7] FLUENT Inc. FLUENT 6.3 User's Guide [M]. Lenbanon: NK, 2005.

[8] 胡可,赵阳,王震. 锥顶钢储罐内部可燃气体爆炸冲击荷载的 CFD 模拟[J]. 振动与冲击,2015,34(12):150-156.

[9] 李鹏飞,徐敏义,王飞飞. 精通 CFD 工程仿真与案例实战 [M]. 北京:人民邮电出版社,2011:138453.

[10] 张亚军,徐胜利. 中心内爆引起的圆柱壳流固耦合问题数值模拟[J]. 中国科学技术大学学报,2007,37(1):6-12,76.

[11] LAUNDER B E, SPALDING D B. The numerical computation of turbulent flows [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1974, 3(2):269-289.

收稿日期:2020-01-07