

doi: 10.3969/j.issn.0490-6756.2018.04.009

阻火器壳体结构与爆轰火焰状态关系研究

王晓东¹, 岳建平^{1,2}, 龙伟¹, 黄吉民¹, 罗红波¹

(1. 四川大学制造科学与工程学院, 成都 610065; 2. 中煤科工集团重庆研究院有限公司, 重庆 400093)

摘要: 针对大型煤矿瓦斯运输管道甲烷爆轰过程中火焰压力波和速度与阻火器结构的匹配问题, 对阻火器壳体结构与管道内火焰压力和速度的关系进行了仿真研究, 仿真中对不同尺寸的阻火器壳体结构建立了二维几何模型和网格模型, 采用 RNC k-e 湍流模型和通用有限速率燃烧模型, 运用 FLUENT 软件对煤管内可燃气体爆轰过程进行了模拟, 得到了阻火器壳体内径尺寸、阻火器内有无障碍物与爆轰火焰压力和速度的变化规律, 通过分析阻火器内火焰速度和压力的规律, 为管道爆轰阻火器的设计和选型提供更为准确的参考依据。

关键词: 防爆阻火器; 爆轰压力; 火焰速度; 数值仿真; 大型管道

中图分类号: TP319 **文献标识码:** A **文章编号:** 0490-6756(2018)04-0705-07

The study of the relationship between the structure of the fire arrester shell and the state of the detonation flame

WANG Xiao-Dong¹, YUE Jian-Ping^{1,2}, LONG Wei¹, HUANG Ji-Min¹, LUO Hong-Bo¹

(1. School of Manufacturing Science Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. China Coal Technology Engineering Group Chongqing Research Institute, Chongqing 400093, China)

Abstract: In view of the matching problem of flame pressure wave and velocity with the structure of fire arrester in the process of methane detonation, the authors conducted simulation study to analyses the relationship between the structural change of flame arrester housing and the pressure and speed of flame in the pipeline. During the simulation progress, two-dimensional geometric models and mesh models were built for different sizes of fire arrester shell structure. The RNC k-e turbulence model and the general finite rate combustion model were applied to simulate the detonation process of combustible gas in the coal tube by FLUENT software. We tried to understand the change law of the inner diameter of the flame arrester shell, the porosity of the flame arrester and the pressure and velocity of the detonation flame by analyzing the law of flame velocity and pressure in the flame arrester. The results provide us with an accurate reference for the design and selection of the pipe detonation arrester.

Keywords: Flame arrester; Explosive pressure; Flame speed; Numerical simulation; Large pipe

1 引言

阻火器广泛应用于石油化工、天然气等工程领域,尤其是在煤矿瓦斯管道运输以及石油气体运输

中有大量运用. 易燃气体在管道内运输过程中,由于明火、雷击、静电等意外因素,气体易被引燃,燃烧火焰将迅速在管道内传播甚至产生爆炸,并会对相关设备造成严重的破坏甚至造成大量人员伤亡

收稿日期: 2018-01-31

基金项目: 煤矿区煤层气抽采利用关键技术与装备(2016ZX05045); 四川省科技计划重点研发项目(2017GZ0352)

作者简介: 王晓东(1990-), 男, 河北石家庄人, 硕士, 研究方向为管道阻燃防爆装置. E-mail: 272815736@qq.com

通讯作者: 龙伟. E-mail: scdxlongwei@yeah.net

和经济损失,为了阻断燃烧火焰在管道内的传播,需要在管道内加装阻火器.近些年来,由于阻火器阻火失败而引起的火焰燃烧爆炸事故多有发生,这一问题已经引起了学术界的广泛关注,抑制管道中易燃气体的燃烧和爆炸已经成为安全技术领域的一项重要课题^[1-7].

防爆轰阻火器是与易燃易爆介质传输体高度协同设计的多层多孔系复杂构件,阻火器的设计成型必须与传输体结构以及燃烧场相匹配才能达到火焰淬熄的目的,为此国内外相关学者对其做了大量研究,但内容主要集中在实验和火焰淬熄机理两个方面. Cubbage^[8]采用城市煤气-空气预混气体对波纹板阻火器进行阻火实验,结果表明当波纹板高度足够小、阻火单元厚度足够厚的情况下,火焰可发生淬熄现象,并且阻火器没有产生机械损伤. Wilson 等^[9]指出火焰是否可以通过阻火器取决于阻火单元孔隙尺寸、阻火单元厚度、火焰传播速度以及阻火器内压力和温度等参数. 周凯元等^[10]提出阻火器中除了采用较小的三角形波纹板高(即淬熄直径)和较大的三角形截面狭小通道长度(即淬熄长度)的波纹板阻火单元外,还必须采用其他措施尽可能地衰减火焰进入阻火器波纹板阻火单元的爆轰强度.

虽然国内外相关专家学者对阻火器的研究取得了一定的进展,但总体来说还远远不够,主要表现在以下两个方面:(1)已有的研究主要集中在实验研究,通过数值模拟的仿真研究相对较少,然而现场试验一般花费较高,近些年来随着计算流体力学和阻火器抑爆理论的发展,迫切需要通过数值仿真的方法对试验和理论成果进行补充和完善^[11];(2)对阻火器的研究主要集中在阻火单元部分,而针对阻火器的壳体结构对爆轰火焰速度和压力的影响研究较少,以往阻火器壳体的结构都是依据经验或已有的产品结构尺寸来设计的,并没有科学的理论依据,因此迫切需要研究阻火器壳体结构尺寸对爆轰火焰状态的影响. 因此,本文利用数值模拟的方法,讨论了阻火器壳体结构尺寸对爆轰火焰压力和速度参数的影响规律.

2 建立管道甲烷爆轰仿真模型及阻火器结构模型

2.1 甲烷爆轰仿真模型

基于甲烷爆炸研究分析可知^[12-16]:甲烷爆炸是一种典型的湍流燃烧爆炸,在管道中的燃烧本质

上是一种具有压力波的高湍流度、高反应速率的爆轰燃烧过程,甲烷的爆燃过程不但受到一般湍流燃烧的影响,而且还具有爆炸特有的反应速率快的特点以及火焰波与压力波相互作用的机制,这使得甲烷爆轰过程中热力学理论模型十分复杂. 依据湍流模型应用场合、计算精度和时间复杂度对常用的湍流模型进行比较,如表 1 所示. 本研究中管内燃烧为大雷诺数的湍流燃烧且管道直径、长度较大,计算量大,在兼顾模拟精度和计算量以及应用场合的前提下本文采用 RNC k-e 湍流模型^[17,18].

表 1 常用湍流模型对比

Tab. 1 Common turbulence model comparison

湍流模型	计算精度	计算时间	应用场合
Spalart-Allmaras	计算精度低	计算时间短	应用于低雷诺数湍流流动
标准 k-e 模型	计算精度中等	计算时间中等	应用于高雷诺数湍流流动
RNG k-e 模型	计算精度高	计算时间中等	应用于高、低雷诺数湍流流动
Realizable k-e 模型	计算精度高	计算时间长	应用于高雷诺数湍流流动

实际的燃烧过程是由湍流和化学反应相互作用的结果,燃烧的化学反应速率是强非线性和强刚性的^[19],本文采用通用有限速率模型来模拟甲烷在管道内的湍流燃烧,基本实现思路是:燃烧反应速率主要有层流反应机制和湍流脉动机制控制,本文通过定义单步化学反应机制,采用基于组分质量反应方程的通用有限速率模型,对化学反应进行模拟.

由于可燃气体的爆炸模拟过程为非定常问题,因此,在压力-速度耦合算法中采用 FLUENT 里用于计算非定常问题的 PISO 算法^[20],且该算法格式允许较大的时间步长进行计算可以有效的缩短计算时间.

2.2 管道阻火器结构模型及边界条件

本文以直径为 500 mm,长度为 10 m 的管道作为研究对象,对管道阻火器结构进行抽象化处理,采用二维模型建立管道阻火器模型,其中管道左侧为点火端,右端采用塑料薄膜封闭,阻火器位于管道中间 5 m 处,压力速度检测点位于阻火器中心处. 仿真模型分为两组:仿真一中阻火器内无障碍物即阻火芯孔隙率为 1,仿真二中阻火器内采用均匀分布的同心环形障碍物表示阻火芯部分,环

形障碍物的长度为 200 mm, 厚度为 62.5 mm, 同心环形障碍物的间距为 62.5 mm, 即阻火器内的孔隙率为 0.5, 两组模型中阻火器壳体内径 D 分别

为 500 mm、750 mm、1000 mm、1250 mm、1500 mm, 两组阻火器管道模型示意图如图 1.

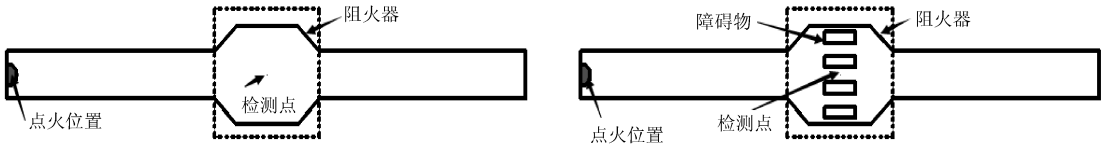


图 1 两组阻火器管道二维模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of two-dimensional model of flame arrester pipeline

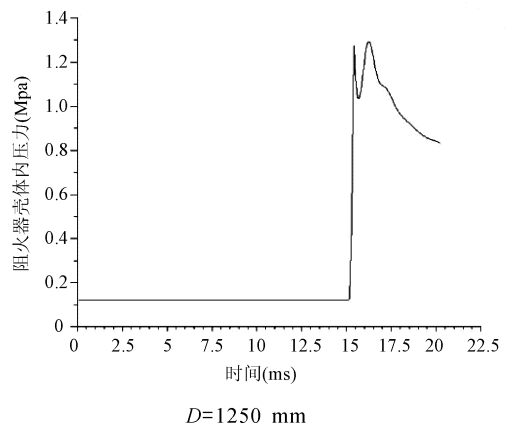
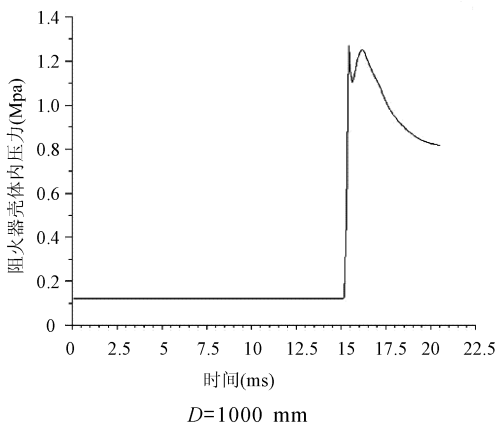
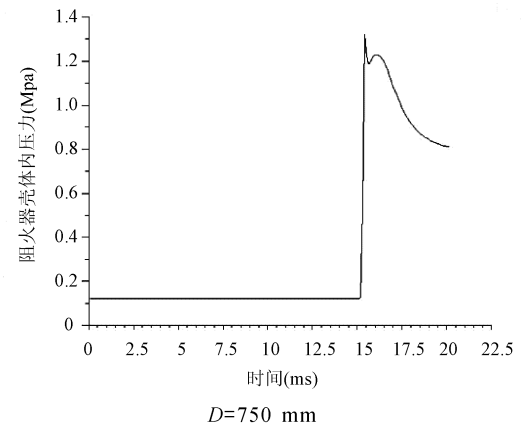
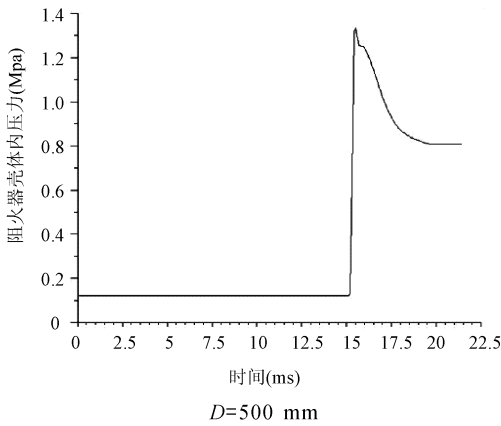
实验中采用电火花点燃, 点火能量为 375 mJ, 管内压力为标准大气压, 初始温度为 300 K, 甲烷的体积分数为 9.8%。边界条件: 对于模型管道壁面采用典型的无滑移、无渗透边界设定, 并采用非平衡壁面函数进行补充; 模型左端为封闭端, 右侧设为压力出口。

检测点压力维持在初始管内压力值, 当火焰到达检测点时检测点处压力急速上升, 随着火焰的通过检测点压力随之回落而逐渐趋于平稳; 对比五组实验, 随着阻火器内径 D 的增加, 检测点压力出现双峰值, 并且第二次峰值逐渐增大并超过第一次峰值, 二次峰值的形成是由于阻火器壳体直径增大, 阻火器右侧壳体部分对压力波的阻碍作用增加, 产生压力反射波, 火焰波与压力反射波叠加形成压力二次峰值. 对比五组检测点压力峰值, 如图 3 所示, 随着阻火器壳体内径 D 的增大, 检测点处压力峰值呈现先减小后增大的趋势.

3 仿真结果及分析

3.1 无障碍物阻火器中壳体内径对管内压力和速度的影响

不同内径尺寸的阻火器壳体内压力随时间的变化如图 2, 从图 2 中可看出, 火焰到达检测点前



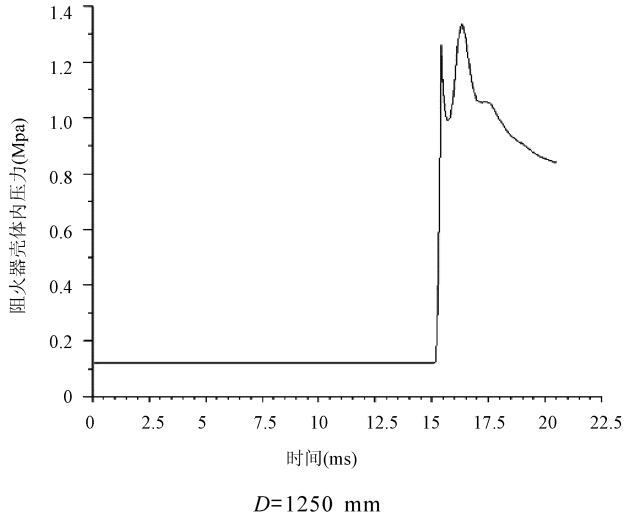


图 2 不同内径尺寸的阻火器壳体内压力随时间的变化曲线

Fig. 2 The variation curve of pressure over time in flame arrester shell with different internal diameters

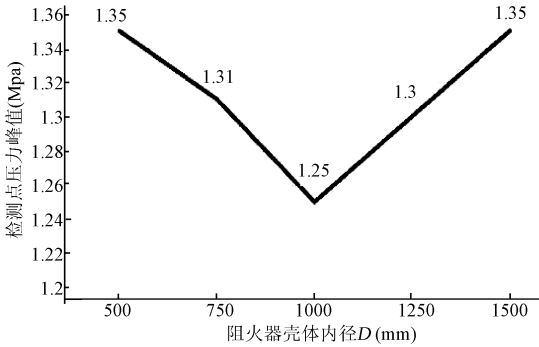


图 3 检测点压力峰值随阻火器壳体内径的变化

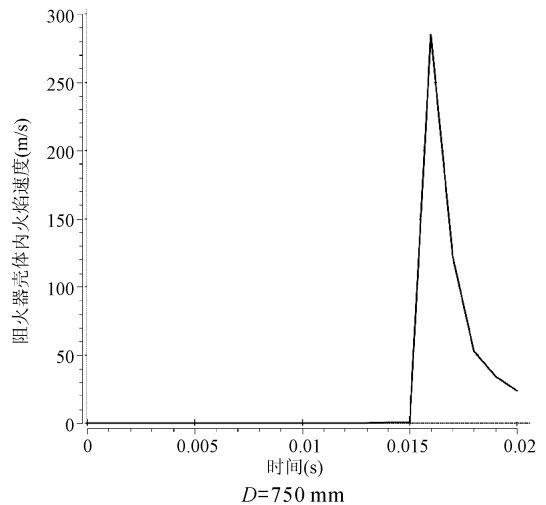
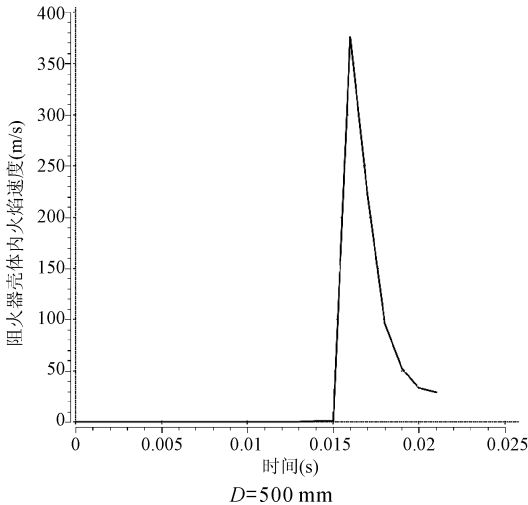
Fig. 3 The pressure peak of the detection point varies with the inner diameter of the flame arrester shell

不同内径尺寸的阻火器壳体内速度随时间的变化如图 4,从图 4 中可看出,当火焰到达检测点前检测点处速度为零,随着火焰的到达检测点火焰

速度迅速上升,火焰通过后检测点速度迅速下降并逐渐趋于零. 取仿真中检测点火焰速度峰值,如图 5 所示,随着阻火器壳体内径 D 的增大,检测点处火焰速度峰值逐渐减小,由 $D=500$ mm 时火焰传播速度大于声速的爆轰燃烧下降到火焰传播速度低于声速的爆燃燃烧.

3.2 有障碍物时阻火器中壳体内径对管内压力和速度的影响

通过仿真二模拟获得不同壳体内径检测点处的压力和速度峰值,如图 6 和图 7 所示. 由图 6 和图 7 可知,检测点处压力峰值随阻火器壳体内径的增大呈现先减小后增大的趋势;检测点处速度峰值随内径 D 的增大而减小. 该趋势与仿真一的趋势相同.



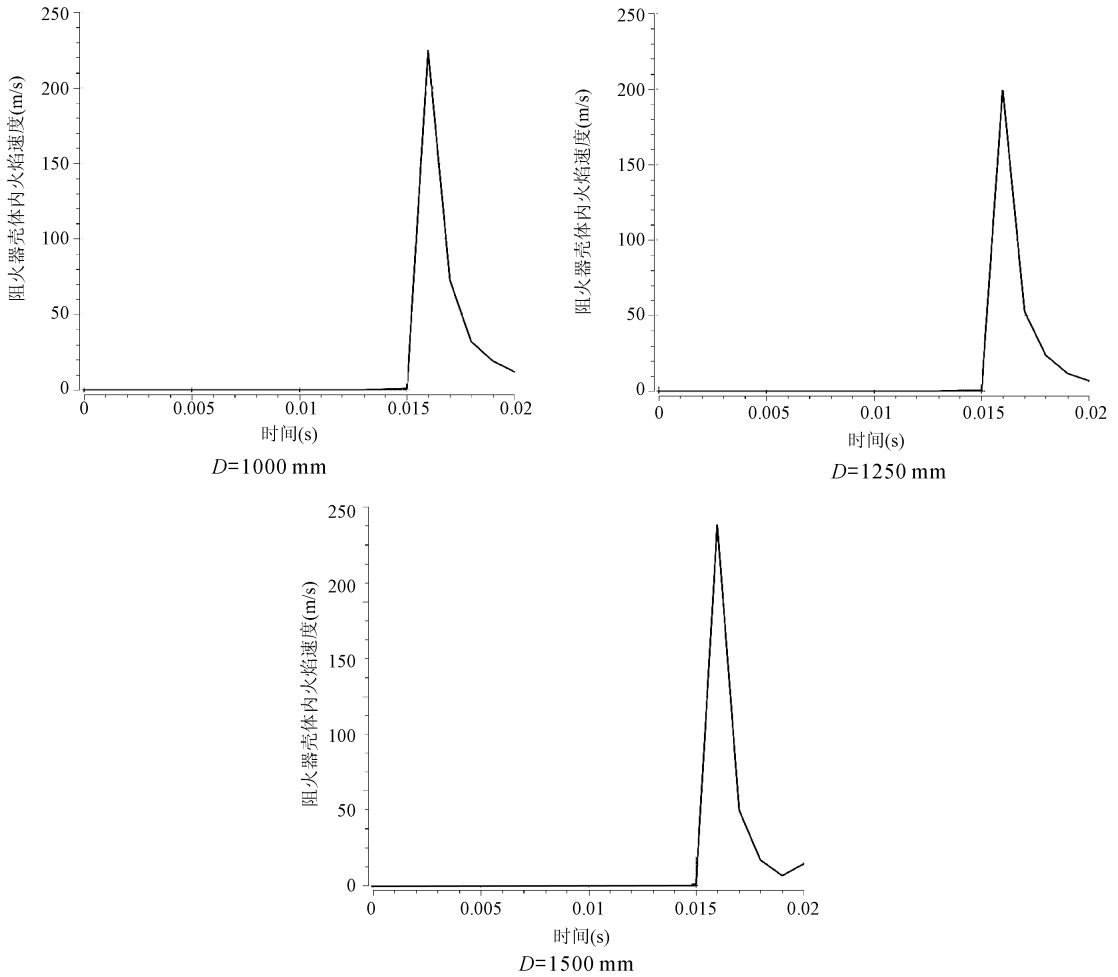


图 4 不同内径尺寸的阻火器壳体内压力随时间的变化曲线

Fig. 4 The variation curve of pressure over time in flame arrester shell with different internal diameters

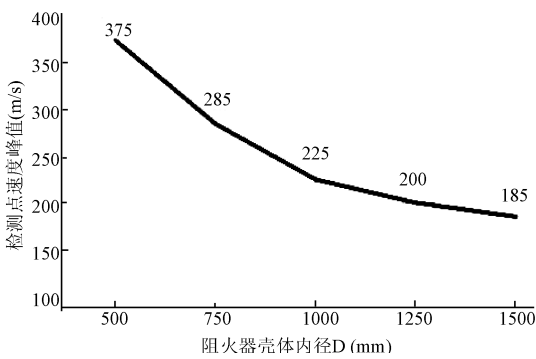


图 5 检测点速度峰值随壳体内径变化曲线

Fig. 5 The velocity peak of the detection point varies with the inner diameter of the shell

3.3 添加障碍物前后检测点处压力与速度数值对比分析

结合图 3 和图 6 的结果进行对比分析,如图 8 所示,除壳体内径 $D=500$ mm 的阻火器外,添加障碍物后检测点处压力峰值相对于无障碍物时略有减小,主要是由于检测点位于障碍物通道内,当火

焰波经过检测点时由于障碍物的阻碍作用使通道内的压力减小. 结合图 5 和图 7 的结果对比分析,如图 9 所示,在阻火器内添加障碍物后,检测点处火焰的速度有明显的增加,主要是由于添加障碍物后阻火器内可流通面积减少,障碍物通道内的流速会大幅度增加.

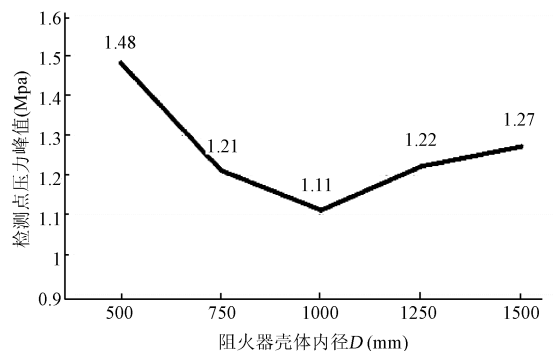


图 6 检测点压力峰值随阻火器壳体内径的变化曲线

Fig. 6 The pressure peak of the detection point varies with the inner diameter of the flame arrester shell

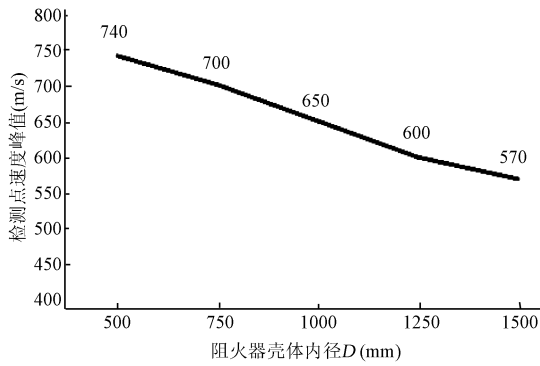


图 7 检测点速度峰值随壳体内径变化曲线

Fig. 7 The velocity peak of the detection point varies with the inner diameter of the shell

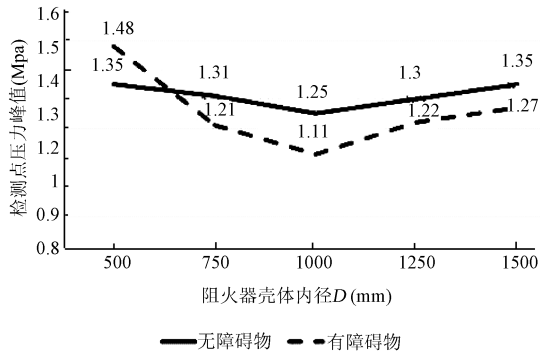


图 8 两组检测点压力峰值随壳体内径变化曲线

Fig. 8 The pressure peak of the two groups of detection points varies with the inner diameter of the shell

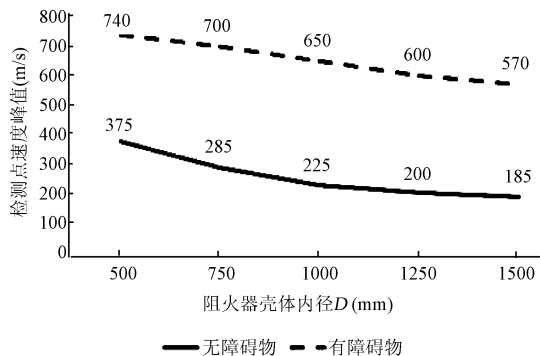


图 9 两组检测点速度峰值随壳体内径变化曲线

Fig. 9 The velocity peak of the two groups of detection points varies with the inner diameter of the shell

4 结 论

本文通过数值模拟分析火焰通过不同内径尺寸阻火器壳体时火焰速度和压力的变化规律,得出以下结论:

(1) 当阻火器壳体内无障碍物时,阻火器中火焰波压力随着阻火器壳体内径的增大呈先减小后

增大的趋势,并且当 $D=1000$ mm 时压力取得最小值 1.2 MPa.

(2) 当阻火器壳体内无障碍物时,阻火器内火焰速度随阻火器壳体内径的增大而减小,并且在 $D=500$ mm 的阻火器中火焰速度会超过声速形成爆轰火焰,而随着 D 的增大火焰由爆轰燃烧转化为爆燃燃烧,速度降到声速以下.

(3) 当阻火器壳体内有障碍物时,随着阻火器壳体内径 D 的增大,阻火器内火焰波压力先减小后增大并且在 $D=1000$ mm 时达到最小值 1.13 MPa,火焰的传播速度随 D 的增大而减小,但远远高于声速.

(4) 对比阻火器壳体添加障碍物前后,阻火器内有障碍物时检测点处压力峰值略有降低,检测点处速度峰值有明显升高.

参考文献:

- [1] Stanley S G. Deflagration and detonation flame arresters [M]. New York: Process Safety and Design Inc, 2002.
- [2] Kakutkina N A, Korzhavin A A, Namyatov I G, *et al.* Flame propagation through the header of an in-line flame arrester [J]. *Combust Explo Shock+*, 2007, 43: 391.
- [3] Asano S, Ikeda S, Youn Y, *et al.* Visualization of behaviors of a propagating flame quenching for hydrogen-air gas mixture [J]. *J Visual*, 2010, 13: 107.
- [4] Britton L G. Using maximum experimental safe gap to select flame arresters [J]. *Process Saf Prog*, 2000, 19: 140.
- [5] Kakutkina N A, Korzhavin A A, Rychkov A D. Burning-through of porous flame arresters with a channel flame-arrester element [J]. *Combust Explo Shock+*, 2009, 45: 266.
- [6] 曲忠伟. 甲烷预混气体爆炸极限及火焰淬熄机理研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2016.
- [7] 孙少辰, 毕明树, 刘刚, 等. 阻火器性能测试方法实验性研究[J]. *化工学报*, 2014, 65: 441.
- [8] Cabbage P A. Flame traps for use with town gas/air mixtures [M]. British: Gas Council, 1959.
- [9] Wilson R P, Flessner M F. Design criteria for flame arresters [C]// American Institute of Chemical Engineers 84th National Meeting. Atlanta: Georgia, 1978.
- [10] 周凯元, 李宗芬, 周自金, 等. 阻爆器扩张腔中心缓冲隔板对气相爆轰波的衰减作用[J]. *爆炸与*

- 冲击, 2001, 21: 179.
- [11] 孙少辰, 毕明树, 丁春辉, 等. 波纹管阻火器内火焰传播的实验与数值模拟研究[J]. 爆炸与冲击, 2017, 37: 353.
- [12] 肖希, 唐敬友, 孟川民. 冲击波诱导甲烷热分解的化学与热力学非平衡流计算[J]. 四川大学学报: 自然科学版, 2003, 40: 891.
- [13] 谢溢月. 湍流对可燃气体(蒸气)爆炸极限及火焰传播过程的影响[D]. 太原: 中北大学, 2017.
- [14] 王海燕, 周心权, 曲志明. 瓦斯爆炸燃烧波与冲击波相互关系及影响研究[J]. 煤矿安全, 2008, 4: 1.
- [15] 王博, 陈思维. 密闭受限空间可燃气体爆炸特性数值模拟研究[J]. 工业安全与环保, 2008, 34: 28.
- [16] 仇锐来, 张延松, 张兰. 点火能量对瓦斯爆炸传播压力的影响实验研究[J]. 煤矿安全, 2011, 42: 5.
- [17] 骆艳, 陈豫眉, 冯民富. 可压缩 Navier-Stokes 方程的稳定化有限元方法[J]. 四川大学学报: 自然科学版, 2007, 44: 949.
- [18] 樊新玉, 李辉, 冯民富. 非定常 Navier-Stokes 方程基于 $H(\text{div})$ 型有限元的涡旋黏性法[J]. 四川大学学报: 自然科学版, 2017, 54: 1159.
- [19] 周均, 胡兵. 燃烧方程非均匀网格有限差分方法研究[J]. 四川大学学报: 自然科学版, 2009, 46: 1605.
- [20] 陈冬林, 吴雪晴, 王安. 典型非圆形入口自激抖动射流燃烧器的研究[J]. 四川大学学报: 自然科学版, 2015, 52: 631.

引用本文格式:

中文: 王晓东, 岳建平, 龙伟, 等. 阻火器壳体结构与爆轰火焰状态关系研究[J]. 四川大学学报: 自然科学版, 2018, 55: 705.

英文: Wang X D, Yue J P, Long W, *et al.* The study of the relationship between the structure of the fire arrester shell and the state of the detonation flame [J]. J Sichuan Univ; Nat Sci Ed, 2018, 55: 705.