



基于CESE方法的煤矿风井泄爆全过程模拟与消波增效研究

宋维宾 孙玉宁 王永龙 王志明

引用本文:

宋维宾, 孙玉宁, 王永龙, 等. 基于CESE方法的煤矿风井泄爆全过程模拟与消波增效研究[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(5): 127–138.

SONG Weibin, SUN Yuning, WANG Yonglong. Numerical simulation on explosion venting processes and venting enhancement methods of the coal mine air shaft based on CESE method[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(5): 127–138.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2023-0707>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

瓦斯抑爆材料及机理研究进展与发展趋势

Research progress and development trend of gas explosion suppression materials and mechanism

煤炭科学技术. 2021, 49(8): 114–124 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/e4f04382-d119-49cf-b755-58c3dd1315d4>

惰性气体对KHCO₃冷气溶胶甲烷抑爆性能的影响研究

Research on synergistic effect of inert gas on methane explosion suppression performance of KHCO₃ cold aerosol

煤炭科学技术. 2021, 49(2): 145–152 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021.02.018>

矿用防爆锂离子电池电源安全设计影响因素研究

Study on influencing factors of mine explosion-proof lithium-ion battery power supply safety design

煤炭科学技术. 2020, 48(11): 153–165 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/681d33bc-3a93-4818-b329-19423dc97055>

矿用锂离子电池电源防爆保护技术及标准分析

Analysis on explosion-proof techniques and standards for lithium-ion battery power supply used in underground coal mine

煤炭科学技术. 2020, 48(9): 203–208 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/71df0fff-5123-4da8-9ca7-6bcca39eca9a>

基于声谱图和SVM的煤矿瓦斯和煤尘爆炸识别方法

Recognition method of coal mine gas and coal dust explosion based on sound spectrogram and SVM

煤炭科学技术. 2023, 51(2): 366–376 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-2050>

防爆柴油机废气再循环冷却系统研究

Research on exhaust gas recirculation cooling system for explosion-proof diesel engine

煤炭科学技术. 2020, 48(5) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/4359b695-3822-4bd7-95ea-ef4118008ba6>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息



移动扫码阅读

宋维宾, 孙玉宁, 王永龙, 等. 基于 CESE 方法的煤矿风井泄爆全过程模拟与消波增效研究[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(5): 127–138.

SONG Weibin, SUN Yuning, WANG Yonglong, *et al.* Numerical simulation on explosion venting processes and venting enhancement methods of the coal mine air shaft based on CESE method[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(5): 127–138.

基于 CESE 方法的煤矿风井泄爆全过程模拟与消波增效研究

宋维宾^{1,2}, 孙玉宁^{1,2}, 王永龙^{1,2}, 王志明^{1,2}

(1. 河南理工大学 能源科学与工程学院, 河南 焦作 454003; 2. 煤炭安全生产与清洁高效利用省部共建协同创新中心, 河南 焦作 454003)

摘要:为揭示煤矿风井泄爆过程、探寻增强泄爆效果方法, 针对现行泄爆方法和多种改进泄爆方法, 建立了系列全尺寸三维仿真模型, 利用 LS-DYNA 软件的 CESE 求解器, 进行了全过程流固耦合模拟分析。结果表明: 现行防爆门在泄爆过程中会引发较强烈的反射冲击波且不能快速有效地予以削弱, 致使风硐中先后出现可对风机造成二次冲击的 2 道冲击波; 去除防爆门立壁结构对提升泄爆效果作用不明显, 但可使防爆门受到的冲击明显减弱; 在一定范围内, 减轻防爆门质量对提高泄爆效果的作用较为有限, 且会使防爆门吸收的爆炸能量明显增加; 在增量不大的情况下, 增大防爆门到风井和风硐交岔点的距离即能有效改善泄爆效果; 侧向和正向先行泄爆方法均能明显增强泄爆效果, 并对防爆门有显著的减冲和保护作用, 在算例条件下, 最优可使反射波超压峰值下降 49.4% 和 28.3%; 防爆门开启时间、泄爆面积和防爆门到风井/风硐交岔点的距离是影响泄爆效果的重要因素; 风井达到良好泄爆效果所需要的开启时间比现行防爆门要短得多; 仅在井口设置防爆门存在不能消减风硐中第 1 道冲击波超压峰值的局限性。基于对风井泄爆过程、机理和方法的新认识, 提出了以“两区域多通道”泄爆为特征的主辅防爆门协同泄爆方法, 以系统提升风井泄爆效果和防爆水平。

关键词: 风井; 煤矿风井泄爆; 先行泄爆; 协同泄爆; 防爆门; 流固耦合

中图分类号: TD713

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2024)05-0127-12

Numerical simulation on explosion venting processes and venting enhancement methods of the coal mine air shaft based on CESE method

SONG Weibin^{1,2}, SUN Yuning^{1,2}, WANG Yonglong^{1,2}, WANG Zhiming^{1,2}

(1. School of Energy Science Engineer, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China; 2. State Collaborative Innovation Center of Coal Work Safety and Clean-efficiency Utilization, Jiaozuo 454003, China)

Abstract: In order to disclose the explosion venting processes of the air shaft and explore the venting enhancement methods in coal mines, a series of full-size 3D simulation models had been established for the current and several improved explosion venting methods, and the whole process of fluid- solid coupling simulations analysis was carried out using the CESE solver of LS-DYNA software. The results shown that, the current explosion-proof door will cause strong reflected shock wave and cannot be quickly and effectively attenuated during the explosion venting process, resulting in the emergence of two shock waves in the air tunnel that can cause secondary impacts on the air turbine. Removing the explosion-proof door wall structure to enhance the effect of explosion venting was not obvious, but can make the explosion-proof door to the impact of a significant decrease. Within a feasible range, reducing the mass of the explosion-proof door to improve the effect of explosion venting was more limited, and will make the explosion-proof door absorbed by the explosion energy increased significantly. In small increments, increasing the distance from the explosion-proof door to the intersection of the air shaft and air tunnel can improve the effectiveness of explosion venting. Both lateral and forward advance explosion venting methods can significantly

收稿日期: 2023-05-15

责任编辑: 宫在芹

DOI: 10.12438/cst.2023-0707

基金项目: 中原学者资助项目 (234000510003); 河南省科技攻关计划资助项目 (222102320285)

作者简介: 宋维宾(1976—), 男, 河南洛阳人, 高级实验师, 博士。Tel: 0391-3987920, E-mail: swb@hpu.edu.cn

通讯作者: 孙玉宁(1963—), 男, 河南洛阳人, 教授, 博士生导师, 博士。E-mail: sunyn369@126.com

enhance the venting effect, and there was a significant shock absorption and protection for explosion-proof door. Optimized to reduce reflected wave overpressure peak by 49.4% and 28.3% under arithmetic conditions. The opening time of the explosion-proof door, the area of explosion venting and the distance from the explosion-proof door to the intersection of the air shaft and air tunnel were key factors in the effectiveness of explosion venting. The opening time required to achieve a favorable explosion venting effect in the air shaft was much shorter than that of the current explosion-proof door. The limitations of setting explosion-proof door only at the shaft entrance cannot reduce the overpressure peak of the first shockwave in the air tunnel. Based on the new understanding of the explosion venting process, mechanism and method of air shaft, a coordinated explosion venting method of main and auxiliary explosion-proof doors characterized by "two-area multi-channel" was proposed to systematically improve the venting effect and the explosion-proof level of air shaft.

Key words: air shafts; explosion venting of coal mine air shafts; advance explosion venting; cooperative explosion venting; explosion-proof door; fluid-solid coupling

0 引 言

风井是矿井预设的爆炸灾变能量泄放通道和出口。风井防爆门是保护风机的重要泄爆设施,发挥着安全泄压阀的功能和作用。21 世纪以来,在新疆神龙煤矿、山西屯兰煤矿等多起特大爆炸事故中,频繁出现因防爆门自身损毁而引发的灾害扩大情形,引起人们对现行 MFBL 型防爆门(简称“现行防爆门”)安全泄爆问题的关注。目前,国内围绕风井防爆门快速开启、可靠复位等方面开展了较多研究,提出了众多新型防爆门^[1-2],并对泄爆过程中防爆门的响应、爆炸波的传播和演变等问题进行了一定的研究。煤炭科学研究总院在国内较早开展了防爆门爆炸试验研究,通过管道试验和巷道原型试验,研究了多种类型防爆门的抗冲击特性,研发了 KFM 型防爆门。游浩^[3]采用 1:4 模型进行了不同 TNT 当量的爆炸试验,发现了对开型防爆门受冲击状态下应力峰值出现部位及对应开启角度。刘志超等^[4]采用短矩形管道进行了瓦斯爆燃泄爆试验,表明防爆门惯性对管内压力峰值和防爆门开启速度有显著影响。宋维宾^[5]采用管道试验装置,分析了 2 种新型防爆门模型在泄爆过程中的响应过程,揭示了防爆门开启后其加速度衰减幅度变大等特征。PAN 等^[6]、ZHANG 等^[7]采用带支管的实验管道,研究了瓦斯爆炸压力在风井段的衰减特点和规律。高建良等^[8]、张学博等^[9]、刘佳佳等^[10]采用 Flunet 软件,针对防爆门开启失败情形,分析了不同瓦斯爆炸当量和爆源距离条件下风机和防爆门所受爆炸载荷的关系。邱天等^[11-12]通过编写 Fluent 自定义函数,实现了防爆门在爆炸波作用下的开启过程,分析了防爆门的泄爆过程及井筒、风硐中的压力场分布情况。冯丽等^[13]使用 Fluent 软件模拟对比了上下移动型和对开型 2 类防爆门的泄爆效果,但结果不完全一致。王雁鸣等^[14]使用 Autodyn 软件,研究了爆炸作用下防爆门开启、

复位全过程的动力学响应和行为。

上述研究在推动我国风井防爆门结构创新、抗爆性和可靠性提升等方面发挥了作用。然而,对爆炸波在风井井口段的传播、演变和泄放等泄爆过程研究尚不充分,对风井泄爆的效果和作用也缺少关注。这势必影响风井防爆科学理念与方法的形成,甚至造成方向性偏差。基于此,笔者以现行防爆门为研究对象和起点,采用流固耦合数值分析方法,建立全尺寸全过程三维仿真模型,分析爆炸波在井口段的传播、演变和泄放过程,并针对现行防爆门的缺陷和不足,利用多种改进模型探寻增强泄爆效果的方法,提出以“两区域多通道”泄爆为特征的主辅防爆门协同泄爆方法,为系统提升风井防爆水平提供支持。

1 数值方法与建模

1.1 数值方法

风井泄爆属于典型的流固耦合问题,涉及空气动力学、结构动力学等领域。鉴于结构动力学的有限元方法已非常成熟,这里主要论述流体及流固耦合方面。考虑到风井通常远离爆炸中心,爆炸波多为空气冲击波,故不涉及燃烧问题。忽略摩擦和热传导,按无黏流动分析,则满足质量、动量和能量守恒的控制方程即为欧拉方程组,以列向量方程形式表示为

$$\begin{cases} \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{G}}{\partial y} + \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial z} = 0 \\ \mathbf{U} = [\rho, \rho u, \rho v, \rho w, E]^T \\ \mathbf{F} = [\rho u, \rho u^2 + p, \rho uv, \rho wu, (E+p)u]^T \\ \mathbf{G} = [\rho v, \rho uv, \rho v^2 + p, \rho vw, (E+p)v]^T \\ \mathbf{H} = [\rho w, \rho uw, \rho vw, \rho w^2 + p, (E+p)w]^T \end{cases} \quad (1)$$

式中: \mathbf{U} 、 \mathbf{F} 、 \mathbf{G} 、 \mathbf{H} 各代表 1 个列向量, \mathbf{F} 、 \mathbf{G} 、 \mathbf{H} 为通量向量, \mathbf{U} 为解向量; u 、 v 、 w 分别为 x 、 y 、 z 坐标方向的速度分量; ρ 、 p 、 E 分别为密度、压力、单位体积总

能量。

对于三维非定常可压缩流动问题,求解基于控制方程组(1)建立的数值模型,需要借助商业软件完成。本文选用 LS-DYNA 软件平台进行分析。时空守恒元和解元(Space-time Conservation Element and Solution Element, CESE)方法是由 S. C. Chang 最早提出的一种显式计算守恒方程的数值方法^[15]。该方法基本原理是:将时间和空间坐标等同处理,由基于时空域的积分型守恒方程出发,使用交错网格对时空求解域进行离散化,并定义守恒元和解元(图 1);图 1 中, x, t 坐标表示二维 $x-t$ 平面, x 为一个空间维度, t 为时间维度。 n 为第 n 个时间步, j 为第 j 个空间网格节点。 $1/2$ 为半个时间步或相邻节点的中点。在守恒元上建立守恒的积分关系式,利用相关解元内的函数逼近进行积分,导出离散方程。守恒元是指满足守恒律的区域,可视为控制体,在空间上互相搭接而不重叠,充满求解域;解元是以某网格点为中心的多个相邻网格边界的集合,构成守恒元的边界。解元内的流动变量假定足够光滑,可用解元中心的泰勒展开式来逼近^[15-16]。在分类上,CESE 方法同有限体积法相近。同比传统数值方法,CESE 方法具有对时间和空间维度的统一处理、本质上的物理守恒等特点,数值耗散低,计算精度高,尤其适合求解波的传播(如冲击波、爆轰波等)等复杂问题。鉴于 CESE 方法的特点和优势, LSTC 公司 2013 年在 LS-DYNA R7 软件包中推出了 CESE 求解器,并耦合原有的结构求解器,将 CESE 方法拓展应用到分析流固耦合问题。

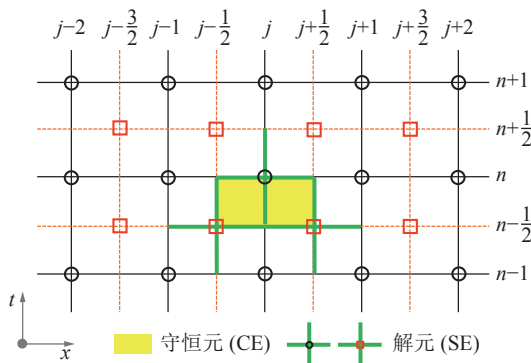


图 1 守恒元和解元

Fig.1 Conservation elements and solution elements

当求解复杂流固耦合问题时,CESE 求解器采用流固分区处理的松散耦合方法,即浸入式边界法^[17]。基本思想为:流体和固体结构分别使用独立的网格和求解器,流体使用固定的欧拉网格和 CESE 求解器,结构使用移动的拉格朗日网格和 LS-

DANA 结构求解器;交界面由 CESE 求解器跟踪和识别;在流体网格中,交界面作为无滑移壁面条件,交界面处的流体压力则作为结构的载荷;两求解器使用相同时间步,实现计算和数据交换同步推进;每推进一个时间步,在交界面上完成一次数据交换,流体求解器向结构求解器传递压力,而结构求解器则反馈其位移和速度^[18]。

1.2 模型构建

参照我国煤矿立风井井口段常见布置形式,建立全尺寸模型,如图 2 所示。模型包括井筒、风硐、井基、防爆门和外部自由空间。井筒直径 4 m,风硐断面为矩形,尺寸为 2.8 m×2.8 m。风硐斜巷段同井筒中心线成 45°夹角。风井和风硐交岔点(以下简称“交岔点”)至地面的距离为 5.0 m,风硐总长度 22 m,两尺寸之差符合不低于 10 m 的相关规定。井基高 0.7 m,设有深 0.6 m 的油槽。防爆门按照现行防爆门进行简化设计,质量 1 371 kg。井口上部设柱状自由空间,用于模拟井外泄爆流场。

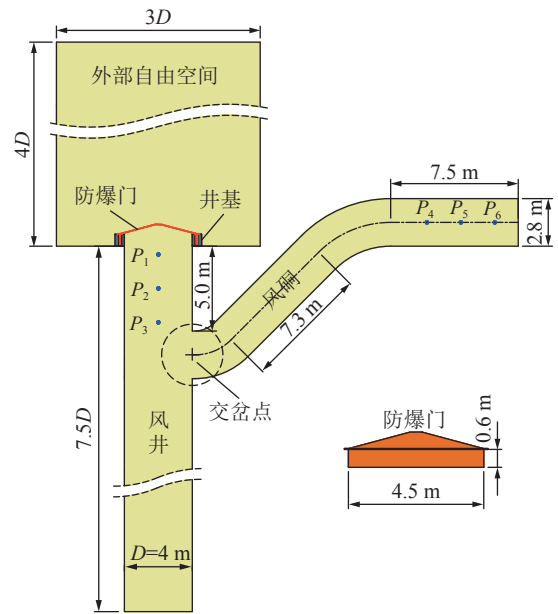


图 2 我国煤矿立风井井口段全尺寸几何模型

Fig.2 Full-size geometric model for wellhead section of coal mine vertical air shafts in China

对流体和结构体分别划分网格,且保证结构网格被流体网格所完全“浸没”。建立疏密不同的多套网格进行无关性校验,发现当流体核心区域(流固耦合区域等)和防爆门网格尺寸缩小至 60 mm 时,计算结果差异已较小。故选定该尺寸对流体核心区域和防爆门划分网格。在满足网格无关性要求下,其他流体区域和结构体的网格划分相对稀疏些,以减少计算量。流体区域共划分网格 600 余万个。防爆门、

井基网络单元类型均采用 Shell(壳)单元,材料本构模型分别选择随动强化模型和刚体模型,材质均为结构钢。流体为 Solid(体)单元,空气介质为理想气体。

通过设置流体边界条件,使井筒、风硐内部空间和外部自由空间构成连通的流体计算域,如图 3 所示。其中,井筒底端面为预定义边界,用于定义爆炸载荷;外部自由空间上端面及侧表面、风硐出口为非反射边界;其他表面均设为壁面。为井基和防爆门添加接触约束,并对井基设置固定约束。防爆门可在外部自由空间内运动,除流场外,还受重力场作用。

爆炸载荷是一个较难确定的重要条件,在缺乏可靠数据的条件下,暂由试验与理论成果推定。根据瓦斯、煤尘爆炸试验及理论研究所揭示的冲击波衰减规律^[19-20],可推测在大多数大中型矿井发生的爆炸事故中,冲击波经井巷网络远距离传播至风井口时,超压已衰减到 100 kPa 以下水平;冲击波正压作用会持续数百毫秒,但威胁风机安全的正压作用时间会较短些。基于此,将爆炸载荷定义为由峰值压力 100 kPa 和正压作用时间 80 ms 所确定的直三角波载荷。

流动模型选择无黏流动。环境压力、环境温度、气体密度、定容比热容等基本参数分别设为:101.3 kPa、288 K、1.22 kg/m³、713.5 J/(kg·K)。

以上基于现行防爆门建立的模型称为“基本模

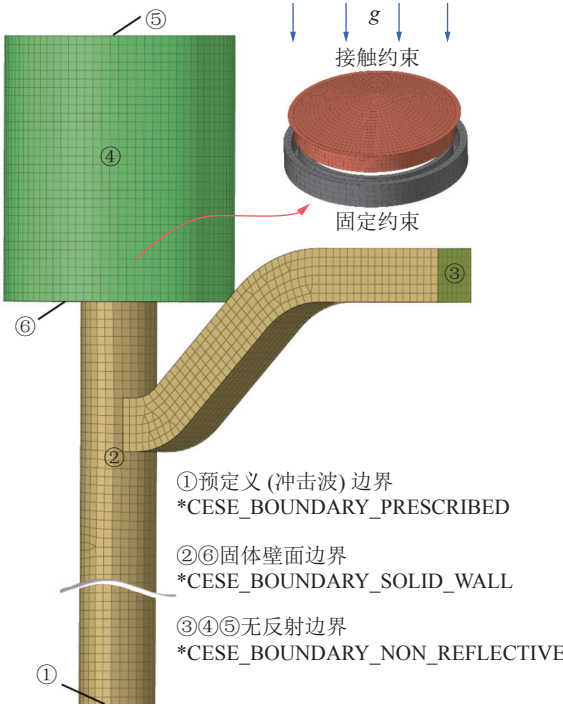


图 3 边界条件与约束

Fig.3 Boundary conditions and constraints

型”。在此基础上,为探寻增强泄爆效果的方法,建立了多种改进模型,详见表 1 和图 4。

1.3 模型可靠性分析

由于模型是基于简化的工程原型且按全尺寸建立的,物理试验验证较为困难,但可从波的传播是否符合理论规律、流固耦合关系是否正确等方面来检验模型的可靠性,现结合基本模型作具体分析。

表 1 改进模型
Table 1 Improved models

模型名称	研究目的	模型描述
无立壁结构模型	立壁结构对泄爆效果的影响	去除防爆门的立壁结构,将其质量摊在剩余结构上,门体质量保持不变,如图4a所示
不同门体质量模型	(减轻)门体质量对泄爆效果的影响	减小防爆门厚度,将其质量 m 由 m_0 分别减至 $0.50m_0$ 、 $0.25m_0$,构成2组轻质化模型;对防爆门施加固定约束,模拟门体质量无穷大
不同井基高度模型	防爆门到交岔点的距离对泄爆效果的影响	将井基高度 h 分别增加至3.6 m和7.2 m,建立防爆门到交岔点距离不同的模型,如图4b所示
侧向先行泄爆模型	井基开挖先行泄爆孔洞对泄爆效果的影响	井基分别增高至1.8 m和3.6 m,对应沿周向开挖单层(6孔)、双层(12孔)矩形泄爆孔,尺寸为 $0.8\text{ m}\times 1.0\text{ m}$;侧向先行泄爆孔面积 $S_{\text{侧}}$ 分别为 $0.38S_0$ 和 $0.76S_0$;防爆盖板厚度 δ 取3 mm和1 mm,如图4c所示
正向先行泄爆模型	防爆门设先行泄爆孔对泄爆效果的影响	沿防爆门周向阵列布置泄爆孔;各组泄爆孔直径为400、600、800 mm;正向先行泄爆孔面积 $S_{\text{前}}$ 分别为 $0.18S_0$ 、 $0.41S_0$ 、 $0.72S_0$;开孔后防爆门质量保持不变;防爆盖板厚度 δ 取3 mm和1 mm,如图4d所示

空气冲击波波阵面上的超压、密度、温度等特性参数具有内在联系,已知一个参数,可由理论公式计算出其余参数。由模拟结果可知,图 2 中 P_2 点的入射冲击波超压峰值为 74.8 kPa(文中监测点数据均为多点均值),代入理论公式,可得波阵面上其他参数的理论值,发现这些参数的理论值和模拟值非常接

近,见表 2。对于 P_1 、 P_3 等其他点,检验结果是相同的。在距离防爆门较近的 P_1 点,监测到反射冲击波和入射冲击波(以下简称“反射波”和“入射波”)的超压峰值之比为 2.41,同冲击波在正反射条件下该比值的理论值(2.57)相接近。膨胀波属于连续波,较难对其进行定量分析和验证,但从压力云图(图 5)可

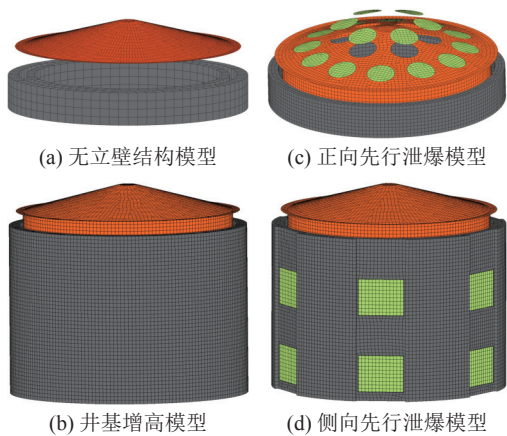


图 4 部分改进模型(结构部分)
Fig.4 Some improved models (structure parts)

以看出,膨胀波所表现出的特征是符合物理规律的。以上分析在较大程度上说明模型中流场(波)的模拟结果是符合理论规律的。

通过泄漏检查和载荷传递检验,可基本判定模型中的流固耦合关系是正确的。泄漏是指耦合失败

表 2 冲击波波阵面主要参数对比
Table 2 Comparison of main parameters of shock wave front

对比参数	密度 /($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	温度/ K	气流速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
理论值	1.82	341.1	143.4
模拟值	1.80	339.3	141.4

时流体直接穿透结构体,会影响计算精度。不发生泄漏是流固耦合模拟的基本要求。由图 5 可知,模型中未发生明显的泄漏。对比作用在防爆门上的比冲量和防爆门下方紧邻区域内的比冲量(多点均值),发现在防爆门在脱离井基前,两者(4 273 Pa·s 和 3 808 Pa·s)在数值上是基本相当的。这在一定程度上表明流固耦合界面上传递的载荷数据传递是正确的。

通过以上对影响流固耦合模拟结果的两个重要方面的检验分析,大体可判定所建立模型是比较可靠的。相应地,模拟结果的正确性和信度是较有保证的。

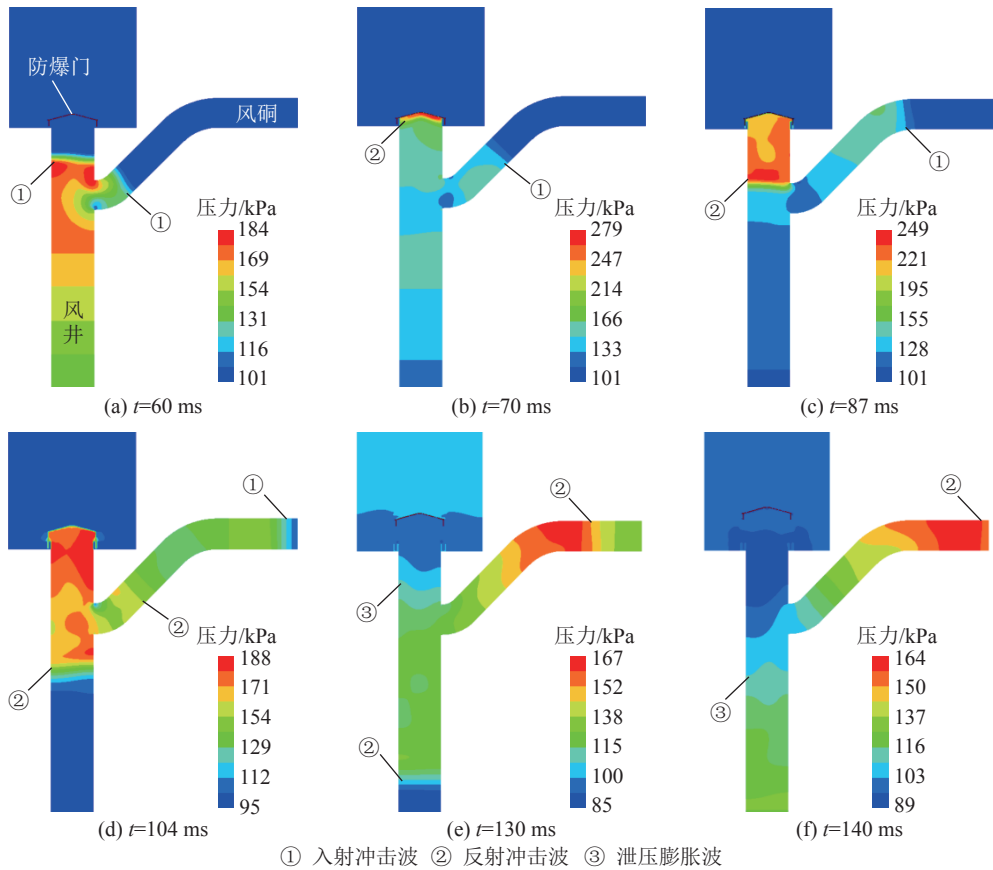


图 5 泄爆过程流场压力云图
Fig.5 Pressure field contours during explosion venting

需要说明的是,数值模型是基于无黏流动假定和简化原型建立的,模拟结果不体现壁面摩擦、井内设施阻碍等因素对冲击波的影响。故而,模拟超压值比对应实际要高。但这不影响定性分析。

2 现行防爆门泄爆过程模拟分析

2.1 爆炸波传播、演变与泄出过程

图 5 是部分特征时刻的流场压力云图,较完整

地显示了爆炸波在井口段的传播、演变和泄放过程,具体为:井下冲击波在交岔点分流为2股冲击波,分别沿风井和风硐传播,如图5a所示;沿风井继续上行的冲击波到达防爆门位置后,形成超压显著增强的反射波,折向井底方向传播,如图5b、图5c所示;反射波到达交岔点后,再次分流,部分向风硐内扩散和传播,在风硐中第1道冲击波后方,叠加形成第2道冲击波,如图5d所示;同时,防爆门已从井基中脱离,有少量气体泄出(图5d);随着防爆门开启高度的增大,可观察到以膨胀波传播为特征的爆炸压力泄放过程,膨胀波所及区域的压力不断下降,由正压区转为负压区,泄爆过程逐渐结束,如图5e、图5f所示。

对比图5中膨胀波和冲击波时空位置发现,当防爆门脱离井基开始泄爆时,进入风硐的第1道冲击波已到达风硐出口处,膨胀波在时空上已无法影响到第1道冲击波,如图5d所示;当防爆门开启一定高度使井口敞开和爆炸压力快速泄放时,风硐中第2道冲击波(反射波)波阵面已到达风硐平巷段,泄压作用在时空上也难以有效消弱第2道冲击波,如图5e、图5f所示。这样,风硐口处的风机显然会遭受2次冲击过程。

图6为井筒、风硐中的冲击波超压时程曲线,显示了反射波的相对强弱程度,并直观揭示出风硐中2道冲击波形成的双峰现象。分析可知,因防爆门阻挡作用形成了较强烈的反射波,其超压峰值在防爆门附近(如 P_1 点)达到入射波的2倍以上,如图6a所示;到达风硐出口(P_6 点)时,衰减后的反射波的超压峰值仍高于入射波(第1道冲击波),超压曲线呈现出后峰高于前峰的双峰形态,如图6b所示。对于这一现象,文献[10]在模拟现行防爆门开启失败情形时已有发现。本研究模拟结果表明,在正常开启条件下,该现象依然存在且显著。防爆门作为被动的泄爆设施,其泄爆过程中必然会产生反射波,但若反射波强到可能对风机造成二次破坏,则背离了防爆门的使用目的。可见,现行防爆门的泄爆功能存在缺陷和不足。

根据图6揭示的风硐中的冲击波双峰现象和过程,可将目前认识较为模糊的风井泄爆的主要目的和作用,明确为消减风硐中2道冲击波的峰值压力。

由图6还可看出反射波的叠加形态和特点。分析可知,反射波所表现出的强弱程度,是叠加波前流场的结果;波前为正压时,叠加波增强,波前负压时则减弱;波前流场压力越高,叠加波越强,反之亦然。如图6b所示,风硐中反射波(第2道冲击波)是叠加

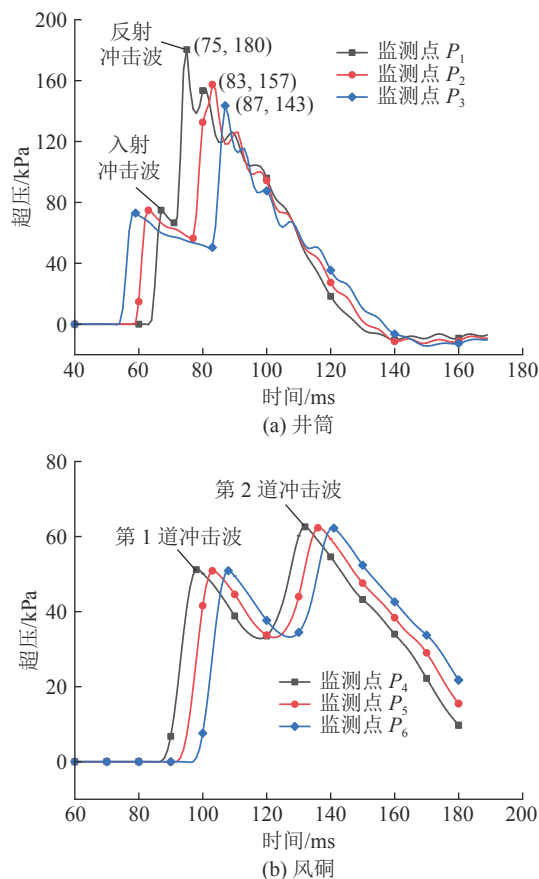


图6 井筒和风硐中的冲击波超压时程曲线

Fig.6 Pressure time curves at monitoring points set in air shaft and fan drift

在第1道冲击波上形成的,若能在时空上改变叠加位置,例如拉大两个波峰的间距,则可改变反射波的强弱。这一规律用于改进泄爆方法。

2.2 防爆门动态响应过程与特征

图7为防爆门的加速度和位移时程曲线,完整反映了防爆门的动态响应过程和特征。图7中A、B、C、D为加速度曲线上的4个特征点,依次为加速度突增点、峰值点、衰减速度增大点和归零点,其在位移曲线上的对应点为A'、B'、C'和D'。当冲击波触及防爆门后,防爆门加速度骤然由0(A点)跃升至最大值(B点),历时仅6 ms,其间发生位移仅0.01 m,反映出结构体对冲击载荷的响应特点。此后,防爆门加速度开始衰减,在C点之后衰减速度有较明显的加快趋势。对照位移曲线,在C点时防爆门开始脱离井基,之后井口逐渐敞开,可推知防爆门加速度衰减加快与其泄压作用显现有关。随着开启高度的增加,防爆门所受冲击力逐渐减小,其加速度相应地减小并在D点归零,此时防爆门速度达到最大值。之后,防爆门开始作减速运动。

根据现行防爆门结构可知,在爆炸工况下,防爆

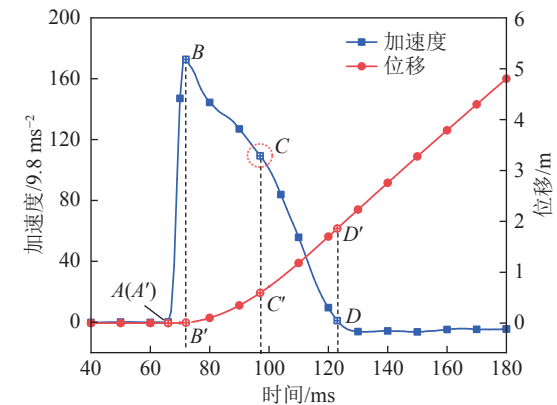


图 7 防爆门加速度和位移时程曲线

Fig.7 Acceleration and displacement curves of explosion door

门须先移开一个立壁高度(0.6 m),才能使井口逐渐敞开和泄爆。这就造成了防爆门开启和泄爆的不同步,不利于实现快速泄爆。具体到图 7 中,防爆门从 A 点开始动作,直至 C 点才使井口逐渐敞开,泄爆滞后长达 31 ms。除不利于快速泄爆外,还会使防爆门额外多吸收爆炸能量,从而给其自身防护带来困难。因此,从泄爆角度考虑,现行防爆门的立壁结构设计是不合理的。

图 7 中特征点 D 是防爆门由加速转入减速的分界点。在该特征点位置,爆炸气流已不能使防爆门做加速运动,说明井口已完全敞开。对于盖式防爆门,开启多大高度时可视为完全开启,目前尚无共识。显然,根据特征点 D 处的位移来确定防爆门的开启高度是合适的。系列模拟结果显示,防爆门在特征点 D 处的开启高度一般不大于井筒直径的 1/2,最大未超过 1 倍直径(表 3)。基于此,暂取井筒直径的 1/2(2 m)作为防爆门的“全开高度”,并将对应的开启时间称为“全开时间”。当防爆门处于该全开高度时,其下方泄爆面积(圆柱体侧面积)是井筒面积的 2 倍。后文防爆盖板的全开状态,也参照这一面积关系来判定。

表 3 常规改进方法模拟结果

Table 3 Results of general improved methods

试验组别	防爆门最大 动能/MJ	风硐口反射 波峰值超压/kPa	全开 时间/ms	特征点 D 对应 高度/m
基本模型	1.94	62.3	71	1.26
去除立壁	1.11	61.0	68	1.23
$m=0.50m_0$	2.43	59.2	50	1.96
$m=0.25m_0$	2.71	54.7	37	2.84
$h=3.6\text{ m}$	2.04	52.4	71	1.45
$h=7.2\text{ m}$	2.01	40.1	71	1.62

根据防爆门在特征点 D 处所达到的最大速度值

(53.2 m/s),使用文献 [21] 所述方法,可计算出该最大速度条件下,防爆门遭爆炸损毁后的飞行高度达 57.7 m。根据文献 [5] 不完全统计,在可查考的防爆门被冲飞的爆炸事故案例中,有较确切记录的防爆门飞行高度约为 10 m。据此判断,1.2 节定义的爆炸载荷条件,在风井防爆领域应属较强爆炸条件。

3 多种改进泄爆方法模拟分析

3.1 常规改进方法

针对现行防爆门泄爆功能的缺陷和不足,以消减反射波为目标,尝试去除防爆门立壁、减轻防爆门质量和增大防爆门到交岔点距离等常规改进方法,探寻增强泄爆效果的方法和途径。

由图 8 可知,去除立壁后,防爆门开启和泄爆实现了同步,特征点 C 已不再明显,整体上加速度衰减更快,特征点 D 出现时间提前了 9 ms,积累的速度增量明显减小。由表 3 可知,同比基本模型,去除立壁后,防爆门的最大动能减少 42.8%,但风硐出口处反射波超压峰值仅下降 1.3 kPa。可见,去除立壁对防爆门有明显的减冲效果,有利于保护防爆门自身,但对提升泄爆效果作用不明显。

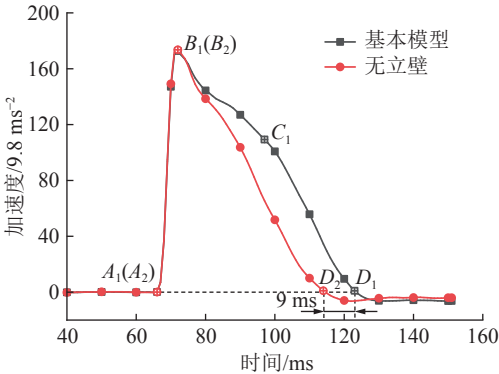


图 8 有无立壁条件下防爆门加速度时程曲线

Fig.8 Acceleration curves of explosion door with and without ring part

分析可知,去除立壁后,虽然消除了防爆门泄爆的滞后时间,但全开时间仅缩短了 3 ms(表 3),说明防爆门的整体开启速度并未明显加快。此外,结合云图(图 5)分析可知,在立壁脱离井基前,防爆门的向外移出过程必然伴随着膨胀波的发生,从而引起气体压力降低。换言之,防爆门在开始向外泄爆之前,已开始发挥泄压作用。由于这两方面原因,就消减反射波而言,去除立壁未见明显效果。

由图 9 和表 3 可知,当防爆门质量 m 减轻至 $0.50m_0$ 和 $0.25m_0$ 时,防爆门开启速度相应加快,全开时间分别缩短 29.6% 和 47.8%;防爆门最大动能增加

明显,分别增加 25.3% 和 39.7%; 风硐出口处反射波超压峰值分别下降 5.0% 和 12.2%。这表明,在一定范围内减小防爆门质量(惯性),对提高泄爆效果的作用较为有限,且会使防爆门吸收的爆炸能量明显增加。

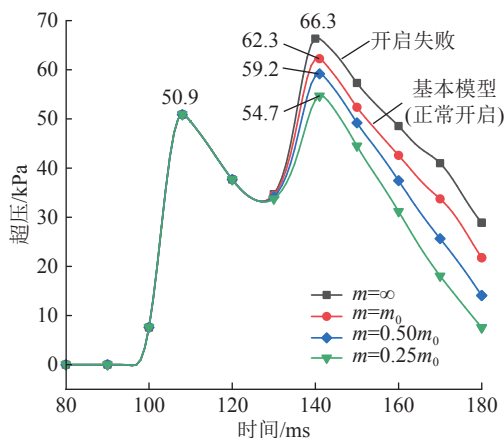


图9 不同防爆门质量条件下风硐出口处超压时程曲线
Fig.9 Overpressure curves at monitoring point near fan drift exit with different mass of explosion door

对比图9中 $m=m_0$ 和 $m=\infty$ 两曲线可知,在现行防爆门正常开启和开启失败2种情形中,风硐出口处反射波超压峰值仅相差 4.0 kPa。这意味着,现行防爆门正常开启与否,对风硐中反射波强度影响不大。这再次突显出现行防爆门泄爆功能的缺陷和不足。

由图10和表3可知,当井基高度 h 增加至 3.6 m 和 7.2 m 后,同比基本模型,风硐出口处反射波衰减较为明显,超压峰值分别减小 15.9% 和 35.6%。分析可知,增大井基高度,相当于增加了防爆门到交岔点的距离,会对冲击波的传播产生影响:一是冲击波强度会随传播距离的延长而有所减弱;二是拉大了风硐中2道冲击波的时空间距,减弱了叠加效应。故而,反射波超压峰值发生了明显的衰减。可见,防爆门到交岔点的距离是影响泄爆效果的重要因素;且在增量不大的情况下,增大该距离即可有效消减反射波。但是,对于生产风井,增大该距离会受到限制。

3.2 先行泄爆方法

为探索更为通用有效的泄爆方法,本节模拟了侧向和正向2种先行泄爆方法。先行泄爆是指利用易于快速开启的防爆盖板(或爆破膜)先于防爆门泄压的泄爆方法。

由图11可知,井基设置先行泄爆孔对反射波具有显著的消减作用,且符合侧向先行泄爆面积 S_{lat} 越大、防爆盖板越轻泄爆效果越好的经验性规律。当防爆盖板厚度 δ 取 3 mm 时,在 $0.38S_0$ 和 $0.76S_0$ 两种

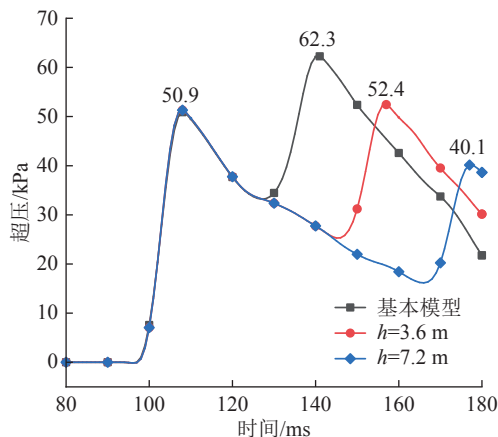


图10 不同井基高度条件下风硐出口处超压时程曲线
Fig.10 Overpressure curves at monitoring point near fan drift exit with different height of shaft foundation

泄爆面积条件下,风硐出口处的反射波超压峰值较基本模型分别下降 18.9% 和 39.8%。泄爆面积 $S_{\text{lat}}(0.76S_0)$ 不变,防爆盖板厚度 δ 由 3 mm 减至 1 mm 后,反射波超压峰值较基本模型下降达 49.4%。由图11中反射波的叠加位置(虚线圈标示)可知,井基的增高对消减反射波也有一定作用。对比“ $h=3.6$ m”(表3)和“ $S_{\text{lat}}=0.76S_0, \delta=1$ mm”(表4)两组数据可知,在相同井基高度($h=3.6$ m)条件下,设泄爆孔时反射波超压峰值可减小 39.9%。这表明,剔除井基高度因素后,侧向先行泄爆方法的泄爆效果依然显著。

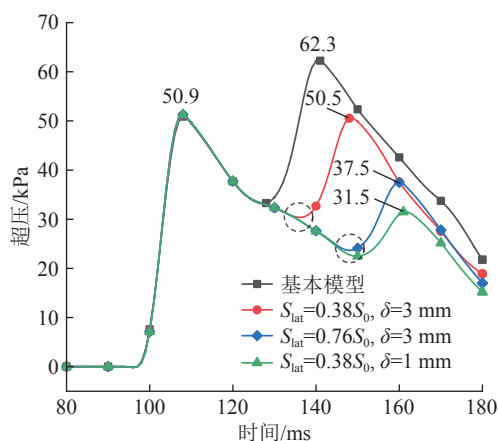


图11 侧向先行泄爆条件下风硐出口处超压时程曲线
Fig.11 Overpressure curves at monitoring point near fan drift exit under lateral advance explosion venting conditions

由图12可知,在防爆门上设置先行泄爆孔对反射波也有较明显的消减效果,且也随正向先行泄爆面积 S_{ver} 的增大和防爆盖板质量的减轻而愈加明显。当防爆盖板厚度 δ 为 3 mm 时,在正向先行泄爆面积 S_{ver} 为 $0.18S_0$ 、 $0.41S_0$ 和 $0.72S_0$ 的3组试验中,风硐出口处的反射波超压峰值较基本模型分别下降

9.3%、14.8% 和 18.9%。在泄爆面积 S_{ver} 同为 $0.72S_0$ 的 2 组实验中, 防爆盖板厚度 δ 由 3 mm 减至 1 mm 后, 风硐出口处的反射波超压峰值较基本模型下降达 28.3%。可见, 若先行泄爆面积和盖板质量选取合适, 正向先行泄爆方法也能获得明显的泄爆效果。

表 4 先行泄爆方法模拟结果

Table 4 Results of advance explosion venting methods

试验组别	防爆门最大动能/MJ	风硐口反射波峰值超压/kPa	全开时间/ms
基本模型	1.94	62.3	71
$S_{\text{lat}}=0.38S_0$, $\delta=3$ mm	1.45	50.5	78
$S_{\text{lat}}=0.76S_0$, $\delta=3$ mm	1.10	37.5	84
$S_{\text{lat}}=0.76S_0$, $\delta=1$ mm	0.99	31.5	89
$S_{\text{ver}}=0.18S_0$, $\delta=3$ mm	1.16	56.5	88
$S_{\text{ver}}=0.41S_0$, $\delta=3$ mm	0.55	53.1	—
$S_{\text{ver}}=0.72S_0$, $\delta=3$ mm	0.10	50.5	—
$S_{\text{ver}}=0.72S_0$, $\delta=1$ mm	0.09	44.7	—

注：最后3组试验，因防爆门未达到全开高度，故无全开时间。

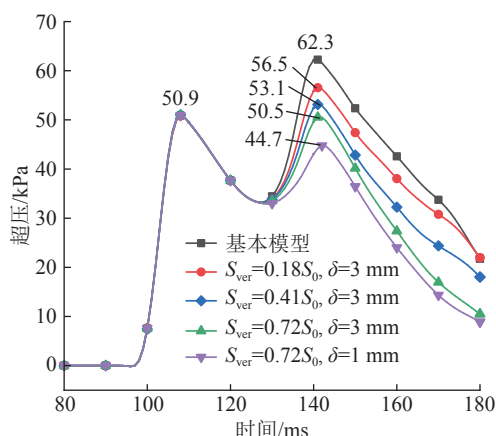


图 12 正向先行泄爆条件下风硐出口处超压时程曲线

Fig.12 Overpressure curves at monitoring point near fan drift exit under vertical advance explosion venting conditions

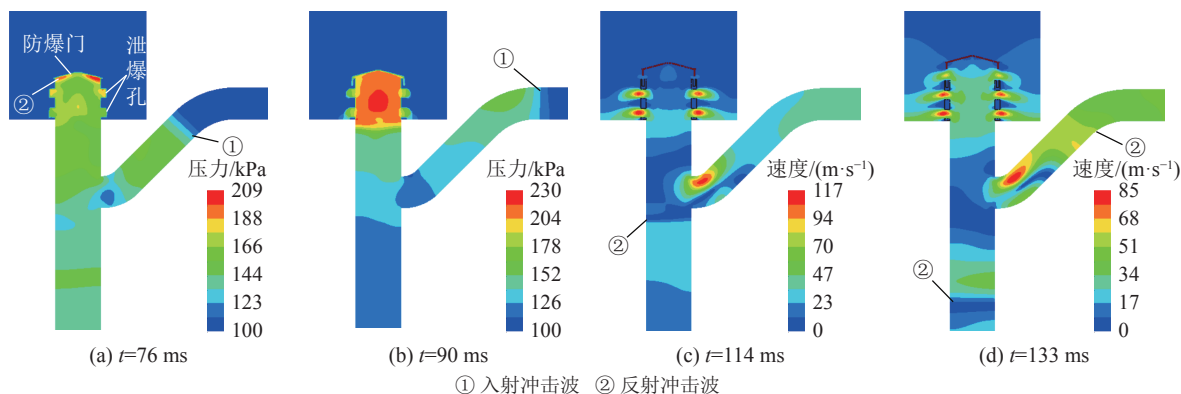


图 13 侧向先行泄爆过程的流场云图

Fig.13 Flow contours under the lateral advance explosion venting condition

由表 4 可知, 随着先行泄爆面积的增大和防爆盖板质量的减小, 在两种先行泄爆方法中, 防爆门的泄爆功能都有弱化的趋势, 突出表现为防爆门最大动能的减小, 约可分别减小至基本模型的 1/2 和 1/20。分析易知, 防爆门和防爆盖板在泄爆过程中形成了协同泄爆关系, 防爆门泄爆功能的弱化正是先行泄爆作用强化的结果。利用这种协同泄爆关系, 在增强风井泄爆效果的同时, 还能有效减弱防爆门受到的冲击。

图 13 为侧向先行泄爆模拟结果 ($S_{\text{lat}}=0.76S_0$, $\delta=3$ mm) 的流场云图, 显示了侧向先行泄爆过程和特征。当入射波通过井基泄爆孔时, 防爆盖板受波及后开始动作, 待形成的反射波 (图 13a) 扫过泄爆孔时, 防爆盖板旋开角度已超过 60° , 可视为达到全开状态, 如图 13b 所示。此后, 在防爆门开启前, 爆炸气流持续从泄爆孔喷出, 如图 13c 所示。待到防爆门开启一定高度后, 井口和泄爆孔同时泄爆, 如图 13d 所示。

从反射波形成至防爆盖板全开 (图 13a—图 13b), 历时仅 14 ms 左右, 约为基本模型中防爆门全开时间 (71 ms) 的 1/5。开启时间的大幅缩短, 使得泄爆过程能够在反射波扫过泄爆孔及尚未远离 (图 13b) 的有利时机内展开。此外, 泄爆孔还为入射波、反射波提供了额外的泄压空间, 加高的井基也增大了防爆门到交岔点的距离, 这些对增强泄爆效果都有一定作用。可见, 侧向先行泄爆方法泄爆效果显著, 是多重有利因素叠加的结果。

图 14 为正向先行泄爆模拟结果 ($S_{\text{ver}}=0.72S_0$, $\delta=1$ mm) 的流场云图, 显示了正向先行泄爆的基本过程和特征。当入射波触及防爆门和防爆盖板后, 由于防爆盖板惯性较防爆门小得多, 防爆盖板先于防爆门快速开启, 如图 14a 所示。在此过程中, 防爆盖板的全开时间约为 11 ms, 不足基本模型中防爆门开启

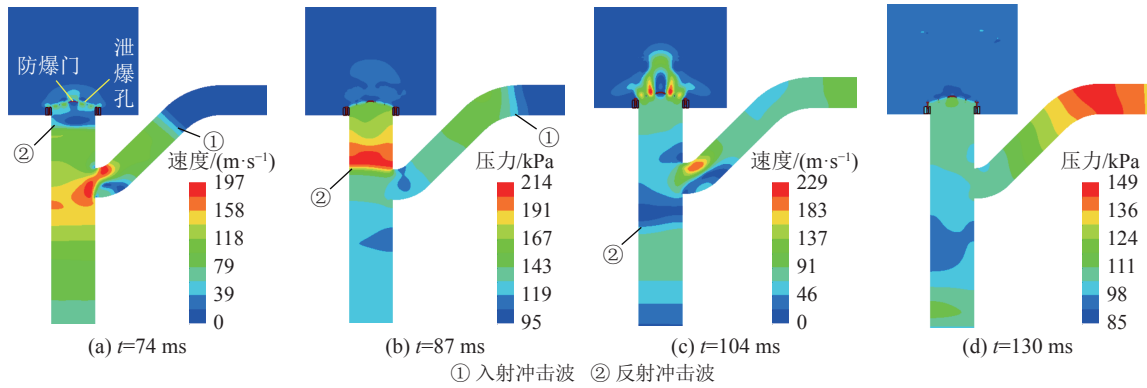


图14 正向先行泄爆过程的流场云图

Fig.14 Flow contours under vertical advance explosion venting condition

时间的 1/6。由于防爆盖板的快速泄爆作用, 同比基本模型(图 5c), 反射波到达交岔点时已有明显衰减, 如图 14b 所示。图 14c 为泄爆发展过程中的速度云图, 直观显示了泄爆流场的形态。在泄爆后期, 可观察到防爆门仍未脱离井基, 如图 14d 所示。可见, 防爆门基本未发挥泄爆作用, 也说明其受到的冲击已大为减弱。

综上分析可知, 先行泄爆方法能获得良好泄爆效果的主要原因是其大幅缩短了开启时间。在算例条件下, 两种先行泄爆方法开启时间约可缩短至现行防爆门的 1/5 和 1/6。这也说明, 获得良好泄爆效果所需要的开启时间比现行防爆门要短得多。

4 主辅防爆门协同泄爆方法

对比图 9—图 12 中的超压时程曲线可知, 随着泄爆方法的改进, 风硐中反射波超压峰值可降至较低水平, 但风硐中的第 1 道波的超压峰值均未被消减。这一现象表明, 仅在井口设置防爆门, 其泄爆作用存在明显的局限性。

要克服上述局限, 自然会考虑沿风硐增设防爆门。为方便描述, 将这种防爆门称为“风硐辅助防爆门”, 并将侧向先行泄爆的防爆盖板, 改称为“井口辅助防爆门”; 相应地, 将封盖井口的防爆门称为“主防爆门”。风硐辅助防爆门较早已被提到^[22], 但并未引起广泛重视。文献 [5] 使用 Fluent 软件分析了该类防爆门的泄压作用, 结果表明能够显著减小风硐出口处冲击波的超压和冲量。图 15 为主辅两类防爆门泄爆效果对比, 综合本文和文献 [5] 的模拟结果绘制, 凸显出风硐辅助防爆门直接有效的泄压作用, 也直观说明了采用主辅防爆门协同泄爆的必要性。

现结合我国煤矿实际, 提出一种旨在提升风井整体防护水平的主辅防爆门协同泄爆方法。主要特征为: 在主防爆门、井基、风硐中增设多种泄爆孔, 装

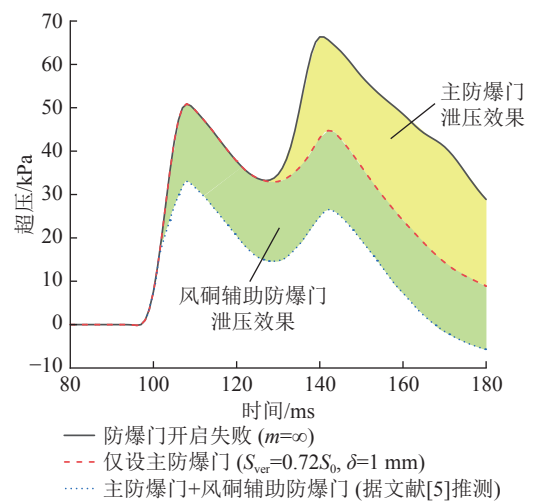


图15 主辅防爆门泄压效果对比

Fig.15 Pressure relief effect comparison between main explosion door and auxiliary explosion doors

配可快速开启的防爆门(或防爆盖板等), 空间上构成井口、风硐两大泄爆区, 整体上形成两区域多通道的协同泄爆模式, 如图 16 所示。基本原理为: 在井口泄爆区, 主防爆门、防爆盖板和井口辅助防爆门三者协同泄爆, 以充分消弱反射波, 并保护主防爆门安全; 井口和风硐两个泄爆区相协同, 将风硐中的冲击

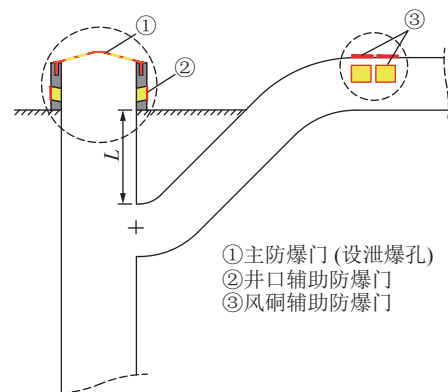


图16 协同泄爆方法原理

Fig.16 Schematic of cooperative explosion venting

波充分消弱,以消除其对风机的危害。

该方法在实施时有以下技术要求:①各类辅助防爆门的开启时间应尽可能短,以不超过 15 ms 为佳;②井口到交岔点的距离 L 不宜过短,推荐在现行 5~8 m 常见范围内取上限值。③辅助防爆门在反风时应易于快速处置,且灾变后可自行复位。

该方法可结合矿井实际进行调整或简化,工程量和投资相对较少,新增日常维护和紧急处置工作量可控,对于生产矿井可采用预制装配法来减少干扰。因而,对新建和在用风井均具有较高的适用性。

5 结 论

1) 现行防爆门在算例给定的典型条件下,会引发较强烈的反射波且不能快速有效地予以消减,致使风机遭受两次冲击波峰值过程。风井泄爆的主要目的和作用因此可明确为消减风硐中两道冲击波的峰值压力。

2) 去除防爆门立壁结构,对提升泄爆效果作用不明显,但能大幅减少防爆门吸收的爆炸能量;在一定范围内,减轻防爆门质量对提高泄爆效果的作用较为有限,且会明显增加防爆门吸收的爆炸能量;增加防爆门到风井和风硐交岔点的距离,能对冲击波传播产生多重影响,在增量不大的情况下,即可有效改善泄爆效果。

3) 侧向和正向先行泄爆方法均能明显增强泄爆效果,并对防爆门有显著的减冲和保护作用,在算例条件下,最优可使反射冲击波超压峰值下降 49.4% 和 28.3%,使防爆门吸收的冲击能量约减少为现行防爆门的 1/2 和 1/20;开启时间的大幅缩短是先行泄爆方法增强泄爆效果明显的主要原因;防爆盖板和防爆门二者协同泄爆是防爆门所受冲击减弱的原因。

4) 防爆门开启时间、泄爆面积和防爆门到风井/风硐交岔点的距离是影响泄爆效果的重要因素。特别指出,获得良好泄爆效果所需要的开启时间比现行防爆门要短得多。

5) 提出了以两区域多通道泄爆为特征的主辅防爆门协同泄爆方法。该方法能有效消减风硐中的两道冲击波,且把风机保护和防爆门自保统一起来,能整体增强风井关键设备设施的防爆水平。

参考文献(References):

[1] 余明高,阳旭峰,郑 凯,等.我国煤矿瓦斯爆炸抑爆减灾技术的研究进展及发展趋势[J].煤炭学报,2020,45(1):168-188.
YU Minggao, YANG Xufeng, ZHENG Kai, et al. Progress and development of coal mine gas explosion suppression and disaster re-

duction technology in China[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(1): 168-188.

[2] 宋维宾,孙玉宁.煤矿立风井防爆门发展现状分析[J].中国安全生产科学技术,2015,11(6):108-114.

SONG Weibin, SUN Yuning. Analysis on current situation of explosion door for vertical air shaft in coal mine[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2015, 11(6): 108-114.

[3] 游 浩.瓦斯爆炸冲击波作用下快速复位防爆门的动态响应特性研究[D].焦作:河南理工大学,2013.

YOU Hao. Investigation on dynamic response characteristics of venting doors for quick resetting by shock waves of gas explosion[D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2013.

[4] 刘志超,宋稳亚,纪文涛,等.防爆门质量对瓦斯爆燃泄爆特性影响实验研究[J].热科学与技术,2014,13(4):359-364.

LIU Zhichao, SONG Wenya, JI Wentao, et al. Experimental study on effects of explosion door mass on venting characteristics of gas deflagration[J]. Journal of Thermal Science and Technology, 2014, 13(4): 359-364.

[5] 宋维宾.煤矿立风井防爆门安全防护理论与技术研究[D].焦作:河南理工大学,2018.

SONG Weibin. Study on the safety protection theory and technology of explosion doors for vertical shafts in coal mines[D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2018.

[6] PAN Rongkun, CUI Bang, ZHANG Xuebo, et al. Study on pressure wave response and overpressure attenuation law of explosion-proof doors[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2023, 169: 706-717.

[7] ZHANG Xuebo, SHEN Shuaishuai, GAO Zhiyang, et al. Research on the decompression effects of shaft explosion-proof door at different lifting heights[J]. Shock and Vibration, 2021, 2021: 1-10.

[8] 高建良,任镜璋,潘荣锬,等.瓦斯爆炸对风机叶片及防爆门的冲击载荷特性[J].中国矿业大学学报,2021,50(4):624-632.

GAO Jianliang, REN Jingzhang, PAN Rongkun, et al. Impact load characteristics of gas explosion on fan blades and explosion-proof door[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2021, 50(4): 624-632.

[9] 张学博,高建良,沈帅帅,等.矿井大尺度冲击波传播规律数值模拟研究[J].中国矿业大学学报,2021,50(4):676-684.

ZHANG Xuebo, GAO Jianliang, SHEN Shuaishuai, et al. Numerical simulation of shock wave propagation law in large-scale mine[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2021, 50(4): 676-684.

[10] 刘佳佳,陈守奇,任镜璋,等.瓦斯积聚量及爆炸距离对风机和防爆门的影响研究[J].中国安全生产科学技术,2020,16(9):57-63.

LIU Jiajia, CHEN Shouqi, REN Jingzhang, et al. Research on influence of gas accumulation amount and explosion distance on fan and explosion-proof door[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2020, 16(9): 57-63.

[11] 邱 天,潘荣锬,顾秋月,等.不同爆炸条件下 MFBL 型防爆门泄压的模拟研究[J].南京工业大学学报(自然科学版),2021,43(2):177-183.

QIU Tian, PAN Rongkun, GU Qiuyue, et al. Simulation study on

- pressure relieving of MFBL explosion-proof door under different explosion conditions[J]. *Journal of Nanjing Tech University (Natural Science Edition)*, 2021, 43(2): 177–183.
- [12] 邱 天. 煤矿风井防爆门结构泄压特性及效果研究[D]. 焦作: 河南理工大学, 2021.
- QIU Tian. Research on pressure relief characteristics and effect of explosion-proof door structure in coal mine[D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2021.
- [13] 冯 丽, 郝海清, 王 凯. 矿井立井防爆盖泄压复位技术及动力学响应规律研究[J]. *山东科技大学学报(自然科学版)*, 2022, 41(3): 50–57.
- FENG Li, HAO Haiqing, WANG Kai. Study on pressure relief and reset technology and dynamic response law of mine shaft explosion-proof covers[J]. *Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science)*, 2022, 41(3): 50–57.
- [14] 王雁鸣, 牛开强, 董玉革, 等. 新型立井防爆门冲击力学响应与泄压复位行为[J]. *中国矿业大学学报*, 2021, 50(4): 755–763.
- WANG Yanming, NIU Kaiqiang, DONG Yuge, *et al.* Impact mechanical response and pressure relief-reset behavior of innovative shaft explosion-proof door[J]. *Journal of China University of Mining and Technology*, 2021, 50(4): 755–763.
- [15] JIANG Yazhong, WEN Chih-Yung, ZHANG Deliang. Space-time conservation element and solution element method and its applications[J]. *AIAA Journal*, 2020, 58(12): 5408–5430.
- [16] ASLAM Rana Danish, ALI Ashiq, REHMAN Asad, *et al.* The space-time conservation element and solution element scheme for simulating two-phase flow in pipes[J]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2019, 11(12): 1–12.
- [17] WOOJIN Kim, HAECHEON Choi. Immersed boundary methods for fluid-structure interaction: A review[J]. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2019, 75: 301–309.
- [18] ROKHY Hamid, SOURY Hossein. Fluid structure interaction with a finite rate chemistry model for simulation of gaseous detonation metal-forming[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, 44(41): 23289–23302.
- [19] 王海燕, 曹 涛, 周心权, 等. 煤矿瓦斯爆炸冲击波衰减规律研究与应用[J]. *煤炭学报*, 2009, 34(6): 778–782.
- WANG Haiyan, CAO Tao, ZHOU Xinquan, *et al.* Research and application of attenuation law about gas explosion shock wave in coal mine[J]. *Journal of China Coal Society*, 2009, 34(6): 778–782.
- [20] 景国勋, 彭 乐, 班 涛, 等. 甲烷煤尘耦合爆炸传播特性及伤害研究[J]. *中国安全科学学报*, 2022, 32(1): 72–78.
- JING Guoxun, PENG Le, BAN Tao, *et al.* Research on pressure propagation and injury of methane and coal dust coupled explosion[J]. *China Safety Science Journal*, 2022, 32(1): 72–78.
- [21] 宋维宾, 孙玉宁, 王永龙, 等. 煤矿风井防爆门设计爆炸载荷计算方法研究[J]. *中国安全生产科学技术*, 2020, 16(12): 72–78.
- SONG Weibin, SUN Yuning, WANG Yonglong, *et al.* Research on calculation methods for designed blast load of explosion-proof doors for air shafts of coal mine[J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2020, 16(12): 72–78.
- [22] Conn John, Verakis Harry. System design analysis for explosion protection of mine fans[C]//*Proceedings of the US mine ventilation symposium littleton: SME*, 1993: 463–467.