

文章编号: 1671-6612 (2024) 01-112-07

基于示踪气体释放和计算流体力学模拟的 事故后矿井通风状况预测

朱振锋¹ 刘同欢¹ 石军安²

(1. 陕西华彬煤业股份有限公司蒋家河煤矿 咸阳 713509;

2. 上海煤科信息科技有限公司 上海 200030)

【摘要】 在地下矿井发生意外事件后, 快速确定矿井内部通风状态对于矿工和救援队伍做出有效决策至关重要。开发了一种将示踪气体和计算流体力学模型相结合的方法, 用以在事故后预测矿井通风系统内部的流场。实验在一个实际的地下矿井中进行, 使用 SF₆ 气体作为示踪气体分别测试了事故中最容易出现的四种通风状态下矿井巷道中的示踪气体分布, 同时使用 CFD 对混合效应和扩散效应复杂的关键区域进行了精确预测。研究发现, 模拟与实验的误差在大约 10% 以内, 加压风机的开关对巷道中的示踪气体分布几乎没有影响, 而停止门的开启可以使得巷道中的示踪气体浓度下降 2000ppb 左右。因此在实际运行中因尽量采取措施确保停止门在事故后的开启。这项工作为事故后远程识别通风系统损坏的程度提供了参考。

【关键词】 矿井通风系统; 示踪气体; 计算流体力学; 流场模拟

中图分类号 TU5 文献标志码 A

Study of Flow Fields in Different Conditions of Underground Mine Ventilation System Based on Tracer Gas and Computational Fluid Dynamics

Zhu Zhenfeng¹ Liu Tonghuan¹ Shi Junan²

(1. Shaanxi Huabin Coal Co., Ltd, Jiangjiahe Coal Mine, Xianyang, 713509;

2. Shanghai Coal Science Information Technology Co., Ltd, Shanghai, 200030)

【Abstract】 After accidents in underground mines, rapidly determining the internal ventilation status of the mine is crucial for effective decision-making for both miners and rescue teams. This study has developed an approach that combines tracer gases and computational fluid dynamics (CFD) models to predict the airflow within the mine ventilation system following accidents. Experiments were conducted in an actual underground mine where SF₆ gas was used as a tracer gas to test the distribution of tracer gas in the mine drift under four common ventilation conditions that can occur during accidents. Simultaneously, CFD was employed to accurately predict the complex mixing and diffusion effects in critical areas. The research revealed that the error between simulation and experiments was within approximately 10%. The operation of the booster fan had minimal impact on the distribution of tracer gas in the drifts, whereas the opening of stopping resulted in a decrease of approximately 2000 ppb in the tracer gas concentration within the drifts. Therefore, in practical operation, it is advisable to take measures to ensure that stoppings are opened following accidents. This work provides a reference for assessing the extent of damage to the ventilation system remotely after accidents.

【Keywords】 Mine ventilation system; Tracer gas; Computational fluid dynamics; Flow fields simulation

作者(通讯作者)简介: 朱振锋(1976.12-), 男, 本科, 机电高级工程师, E-mail: 513926337@qq.com
收稿日期: 2023-08-22

0 引言

地下矿井发生意外后, 现场情况可能会阻止人们进入矿井, 如天花板坍塌、涌水或爆炸等情况。在确定救援方法之前, 必须立即采集有关矿井状态的信息, 以估计内部损害程度。一些替代方法可用于安全地收集信息, 如从钻孔采集空气样本, 将视频摄像机插入钻孔来可视化地下状态, 以及在可能的情况下使用救援机器人。然而, 这些方法都不足以独立可靠地使用, 因此本研究提出了一种新颖的方法, 使用示踪气体试验和计算流体力学模型, 来通过模拟预测地下矿井出现紧急事件后远程识别通风系统损坏的程度。该方法需要与其他方法一起使用, 以实现紧急情况下的远程、安全、快速和准确的收集信息, 方便进行有效的紧急管理和救援。

示踪气体首次在建筑通风系统中使用于 1950 年代^[1], 在建筑和地下矿井中的通风分析中被广泛使用^[2]。同时许多研究利用示踪气体技术来评估地下金属/非金属和煤矿的通风系统。六氟化硫(SF₆)被广泛接受为标准矿井通风示踪气体^[3,4], 因为它可以在低浓度下被检测到, 且无毒、无臭、无色、化学和热稳定, 且在自然环境中不存在^[5]。示踪气体在地下矿井中的应用包括测量湍流扩散^[6]、甲烷控制^[7]、研究矿井通风回流进入进风气流、通过封闭区域的传输流时间、辅助风机的效果, 以及体积流率的估算^[5]、气漏调查^[8]以及评估粉尘控制措施^[9]。CFD 已经成为一个强大的工具, 广泛用于模拟与地下空间安全有关的问题, 包括地下矿井通风气流模式建模^[10]、煤自然发热和地下火灾的研究与控制^[11]、爆炸调查^[12,13]以及粉尘控制^[14]。实验测量与示踪气体的 CFD 建模相结合, 已被用于研究室内环境和其他工业应用中的气流和污染物传输^[15]。示踪气体和 CFD 建模的结合也被用于地下矿井通风。Krog 等进行了示踪气体研究, 描述了地下煤矿通风的气流模式。研究结果与通风网络模型的结果一起被用于校准 CFD 模型, 解释了矿井中采空区域内部气流的相互作用^[16]。

本研究的目标是开发一种新的方法, 使用示踪气体和 CFD 建模来识别通风系统损坏的程度。首先需要明确在意外事件发生后矿井可能的损害程度和可能的内部通风变化。然后根据之前信息建立 CFD 模型, 模拟事件发生前的正常通风状态以及可能的通风损坏的情形。同时, 在现场进行示踪气

体试验。示踪气体可以在指定位置通过恒定或瞬态释放技术释放, 并在其他位置采集气体样本, 使用气相色谱进行分析。最后, 通过比较事故后示踪气体随时间变化情况和提前实验的示踪气体随时间的变化情况, 可以确定通风系统损伤的程度。实验结果说明了该方法可以帮助确定通风系统的状态。这种方法提供了一种收集矿井内部信息的替代方式, 可以被矿井人员和救援人员用于采取安全有效的行动。

1 现场实验

1.1 矿井模型

为了获得矿井内部示踪气体随时间衰减数据用于事故发生后对巷道内的通风状态进行预测, 本文进行了一系列的实测。实验在如图 1 所示的矿井段进行。它是一个 250 米的传送带入口, 连接到一个 40 米的走廊。传送带所在的巷道的平均断面尺寸为 5m×2.8m, 走廊的平均断面尺寸为 5.87m×3.82m。为了确保模型准确性, 每 10 米测量一次模型的横截面尺寸, 并将结果用于构建 CFD 模型。入口内有三根钢水管和一条传送带。由于它们足够大, 足以影响气流, 因此也测量了它们的尺寸和位置, 并将其作为固体放置在 CFD 模型中。速度入口有两个, 一个在传送带入口的下端, 另一个是走廊末端的停止门。气流方向如图 1 中箭头所示。

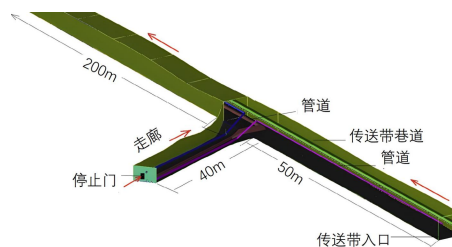


图 1 矿井段示意图

Fig.1 The schematic diagram of mine

1.2 实验工况

为了对事故后可能出现的通风情况进行模拟, 本文进行了一系列实验。在传送带入口有一个增压风扇, 可以通过打开或关闭影响传送带入口的总气流。因此, 可以通过打开和关闭停止门, 打开和关闭增压风扇来有意地创造不同的通风场景。表 1 给出了四种不同通风工况的组合。每个工况都分配了一个案例编号。进口处的速度边界条件也如表 1 所

示。本研究的目的是设计合适的示踪气体测试并建立 CFD 模型来识别这四种通风场景。

表 1 实验工况

Table 1 The boundary conditions

案例	停止门的状态	通风风机状态	门口风速 (m/s)	传送带入口风速 (m/s)
Case 1	开	开	4.21	2.54
Case 2	关	开	0.06	2.54
Case 3	开	关	4.21	2.10
Case 4	关	关	0.06	2.10

1.3 样本的采集与分析

示踪气体在释放点连续释放。在测试管道内测量风速时，通常需要一段直管段来平稳化流动。通过在进入管道后超过管道直径十倍的距离内进行测量^[17]，可以确保在测量点附近的风速已经相对稳定，以获得准确的测量结果。当空气流速稳定时，空气中的示踪气体分布才会稳定。空气采样点如图 2 所示。每隔 5s 用 10mL 的真空容器采集空气样本。真空容器是一种真空的玻璃管状容器，上面有一个自密封的橡胶隔膜。它已广泛用于矿井空气和燃烧产物的采样。因为它们方便，即使在储存一到两周后也能获得高精度^[18]。这些抽真空的容器在购买时没有完全抽真空，因此在实验室提前抽真空，以提高采样精度。采用配备电子捕获检测器 (ECD) 的气相色谱仪 (GC) 对样品中 SF₆ 的浓度进行分析。使用真空容器收集气体样本并将其带到气相色谱实验室后，从真空容器中取出 20μL 气体样本，并使用 100μL 气密玻璃注射器注入气相色谱进行进一步的分析。

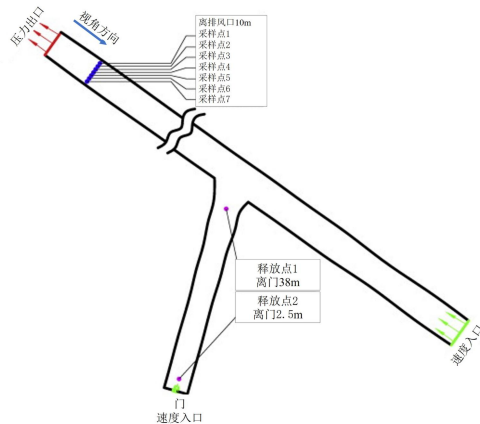


图 2 释放点和采样点位置

Fig.2 The location of the release point and sampling

2 数值模拟

2.1 模型的简化和网格划分

三维模型的几何结构比较复杂，主要是因为入口存在水管。采用 ICEM 软件生成网格，采样点所在截面网格质量如图 3 所示。为了提高网格质量、收敛性能和结果精度，模型采用结构性网格进行离散。由于几何体的复杂性，本文将其分为四个部分，然后在 ICEM 中分别生成网格，然后在 Fluent 中合并。

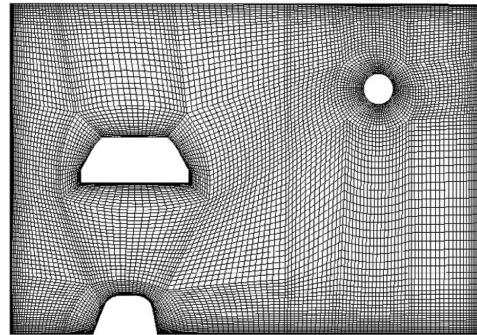


图 3 传送带巷道采样点所在截面网格划分

Fig.3 The section of the grid mesh in the tunnel equipped with the conveyor

2.2 模拟边界条件

模拟的目的是对实验进行补充，通过模拟可以确定示踪气体释放位置和采样点，同时使用模拟还可以对混合效应和扩散效应复杂的关键区域进行精确预测。模型的送风口和排风口分别为速度入口和压力出口。平均速度值如表 1 所示，分别应用于传送带入口和停止门的速度入口。这些边界条件是基于热线风速计测量得到的平均风速。所有其他表面都被视为固定的墙壁，没有滑动。假设空气和壁面温度都是恒定的。采用两方程 Realizable *k-ε* 湍流模型对气流进行了模拟。对压力、动量、湍流动能、湍流耗散率和 SF₆ 输运等变量采用二阶迎风格式确保更高阶的精度结果。采用 CFD 程序中的 SIMPLEC 算法离散流动方程，并将压力、速度、动量和连续性方程耦合起来。采用 9.81m/s² 的重力加速度来确定重力对流动和 SF₆ 分布的影响。首先本文计算所有情况下的稳态流量，然后使用空气和 SF₆ 两种运输模型在指定地点释放一定时间的 SF₆。采用了两个收敛准则，首先连续性方程残差减小到 10⁻⁵，并且在预选点处速度达到稳态。并对 CFD 模型进行网格独立性验证，确保计算结果与网格尺

寸无关。

2.3 网格独立性检验

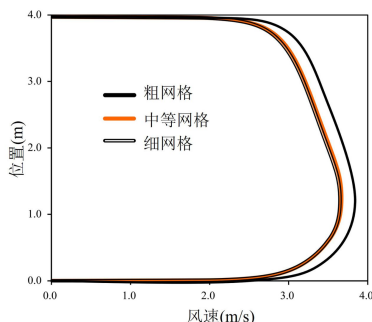


图 4 网格独立性检验结果

Fig.4 Mesh independence testing

为了进行网格独立性检验,本文比较了中等网格和细网格的结果。这一步在 CFD 建模中是必不可少的,因为数值解,如速度和示踪气体浓度,可能会受到网格大小的影响,如果网格独立性没有实现^[19]。随着网格的细化,数值解将逐渐接近控制方程的精确解^[20],实验结果也会发生变化。网格独立性检验中采用的粗网格的网格数约为 500 万个,中等网格的网格数约为 2000 万个,细网格的网格数约为 4000 万个。由于本研究的重点不是寻找能够获得可接受的精确结果的最细网格,因此选择的节点数量相对较大的网格,以保证结果准确性的同时减少计算量。图 4 为距离巷道排风口 10m 处横截面垂直中心线上的速度分布图。中等网格和细网格的风速分布几乎相同,表明中等网格的模拟结果已经达到了网格独立性。为了节省计算时间,选择中等网格进行进一步建模。

2.4 示踪气体释放点的确定

对于矿井的模拟,存在着三个问题,第一个是释放点在哪?第二个是释放量多少?第三个是采样点在哪?为了解决这些问题,本文进行了预实验。针对第一个问题,本文对比了 SF₆ 在释放点 1 (距离门 38 米,巷道中心位置)与释放点 2 (距离门 2.5 米,巷道中心位置)分别释放后采样点的 SF₆ 浓度。研究发现,选择点 1 作为释放点,可以在释放 10 分钟内捕集到示踪气体的浓度,而选择点 2 作为释放点,需要 20 分钟才能捕集到示踪气体浓度。对于示踪气体的释放量,它由释放速率与释放时间决定,本文通过对比不同释放速率发现 8.89L/min 是在气相色谱检测范围内的合理速率。通过对比了示踪气体释放时间分别为 10s, 30s,

1min 和 2min 的工况发现释放时间为 10s 时,示踪气体峰值仅能持续 30s。当示踪气体释放时间增大到 30s 时,最大浓度水平会增大,而当释放时间超过 30s 时,并没有增大最大浓度水平,这是因为释放时间足够长,在固定的释放速率下,最高浓度趋于平稳。综合考虑采样和分析方便,推荐释放时长为 1min。对于示踪气体的采样点,本文在离排风口 10m 的位置布置了 7 个测点,如图 2 所示,预实验显示,在靠近采样点 7 附近的示踪气体浓度较高。而靠近采样点 1 一侧的示踪气体浓度较低。因此采用采样点 7 进行空气采样。根据以上研究,本文采用点 1 作为释放点,释放速率为 8.89L/min,持续 1min,采样位置在采样点 7。

图 5 为四种通风情况下示踪气体随时间变化的情况。根据图 5 可以看出不同通风工况下 SF₆ 浓度随时间变化的曲线是不同的。尤其是对于停止门打开和关闭的情况,示踪气体的曲线有很大的不同,这是因为走廊处的流场特征不一样。图 6 为示踪气体在点 1 释放时横截面的流场特征。当停止门打开时,示踪气体将直接流向传送带巷道,因为释放点周围空气直接流向巷道排风口。然而,当停止门关闭时,在释放点周围存在湍流,导致示踪气体在走廊上的涡流中停留,之后非常缓慢的流向巷道排风口。

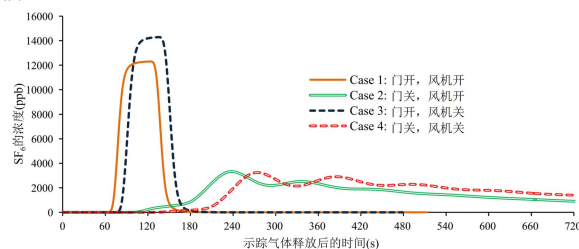


图 5 不同工况下 SF₆ 浓度

Fig.5 The SF₆ under different conditions

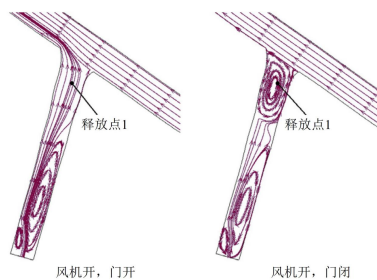


图 6 门开启和关闭时走廊流场特征

Fig.6 The flow field characteristics in the corridor when doors are opened and closed

3 结果

3.1 模拟结果的验证

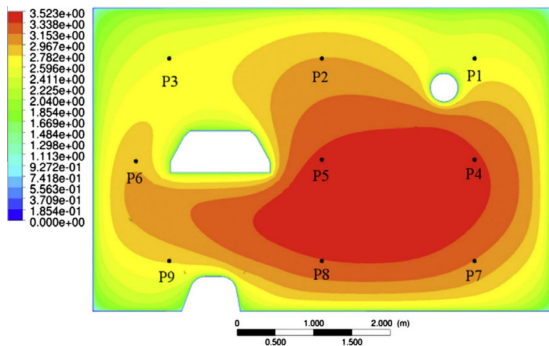
为了验证模拟精度，将模型结果与测量结果进行了比较。对距离巷道排风口 10m 的截面上的 9 个点的速度进行监测，并将其与实测结果进行比较。这些点被编号并显示在图 7 (a) 中。使用热线风速仪在每个点测量实际速度，测量时间为 1 分钟，取平均值作为测量值。表 2 显示了每个点的速度值以及与实测值相比的误差。可以看出，误差可

以达到 12.76%，但大多数误差在 5% 以下。由于卡车移动等因素，巷道内的流量不断变化，因此误差是可以接受的。由于巷道左侧存在水管和传送带等设施，难以进入该区域进行测量，截面左侧出现了较大的误差。同时截面送风流量的变化也会造成较大的测量误差。因此，认为 CFD 模型与实测数据吻合较好，特别是在高速区域。图 7 (a) 所示的速度分布图也可以看出，水管和传送带对气流分布有显著影响。

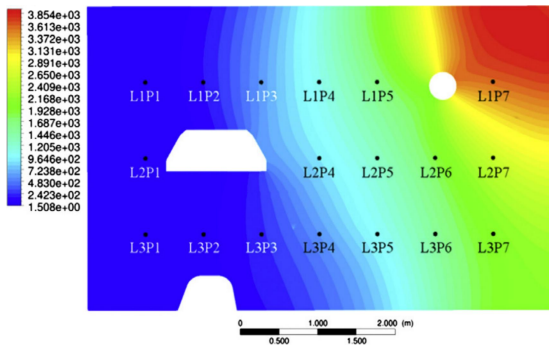
表 2 实测与模拟风速对比

Table 2 Comparison between measured and simulated air velocity

测点	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9
模拟结果 (m/s)	2.58	2.97	2.6	3.37	3.39	2.92	3.15	3.33	2.92
实测结果 (m/s)	2.64	2.97	2.34	3.55	3.22	2.67	3.15	3.14	2.67
误差	2.27%	0%	11.11%	5.07%	5.28%	9.36%	0%	0.06%	9.36%



(a) 速度分布图



(b) SF₆ 浓度分布图

图 7 距离传送带巷道排风口 10m 横截面处的速度和 SF₆ 浓度的分布图

Fig.7 Distribution of air velocity and SF₆ concentration at a cross-section of 10m away from the outlet of the tunnel equipped with the conveyor

使用 CFD 模拟 SF₆ 的输运。图 7 (b) 为示踪

气体释放 130s 后距离巷道排风口 10m 的截面上 SF₆ 浓度分布图，图中显示为 Case 2 的工况。实际上四种通风工况下的示踪气体分布非常相似。可以看出，SF₆ 浓度在右上角较高，在左下角较低。这表明，虽然 SF₆ 比空气重，但它不一定沉降在底部，因为空气的流动特性可以克服重力的影响。

本文在模型中设置多个监测点监测 SF₆ 浓度。这些点被标记为 L#P#，表示水平和点数，如图 7 (b) 所示。图 2 所示的采样点 7 与图 7 (b) 所示的监测点 L2P7 对应，因为该点位于巷道的垂直中段。图 7 (b) 中采样点 L2P7 在入口处高度约 2m，不是一个方便的采样点。实际上模拟与实验对比时的采样点选择 L3P7，距地面约 1m。图 8 用虚线绘制了该点的 SF₆ 浓度曲线随时间变化情况。与 L2P7 的剖面相比，它们的浓度水平较低，因为 SF₆ 在入口底部的分布较低。与实际测量浓度分布的比较将在下一节中讨论。

3.2 示踪气体浓度实测与模拟对比

现场进行示踪气体浓度测试时，SF₆ 在释放点 1 进行释放，释放流量 8.8L/min，采样点为点 L3P7，采样间隔为 5s，采样时间为 500s。采样点上测得的 SF₆ 浓度分布如图 8 所示。结果表明不同通风工况下的示踪气体分布与 CFD 模拟结果对比良好。开启风机时，示踪气体到达采样点的时间较关闭风机时早，最大浓度水平较关闭风机时低。当停止门关闭时，SF₆ 浓度曲线比停止门打开时更平坦、分

布更宽。然而, 模拟的浓度水平通常比测量结果低 30%, 并且与测量结果相比, 示踪气体到达采样点的时间差异较小。

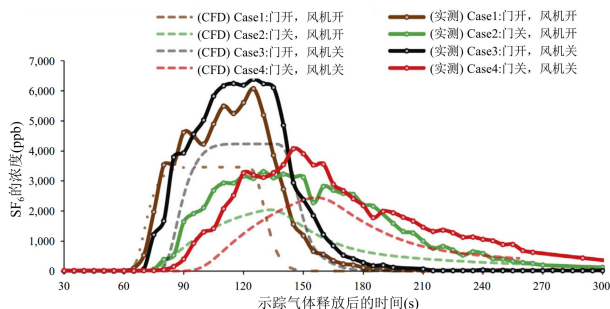


图 8 实测和模拟 SF₆ 浓度对比

Fig.8 Comparison of measured and simulated SF₆ concentrations

这些误差可能由许多因素引起, 例如与实际几何形状相比, 模型几何形状简化了。由于车辆的大量移动或班次的变化, 通风状态也在不断变化。然而, 造成误差最大的可能有两个主要因素: 一是现场进行示踪试验时的通风总流量比之前建立 CFD 模型时测得的总流量少 13%左右; 二是风机的流量比之前测量的要小。第一个因素可以导致截面的浓度水平上升, 第二个因素可能会导致随着风机的开启和关闭, 示踪气体到达采样点的时间差异变小。

对于第一个因素, 有几种可能的解释。在现场实验期间, 由于维修, 位于传送带巷道入口较远的另一个辅助风机附近的停止门保持打开状态。这可能会导致内部气体的再循环, 减少了巷道内的总流量。CFD 模型是在 2023 年夏季建立的, 但现场实验是在 6 个月前的冬季进行的。从夏季到冬季的气压变化也会使总通风量减少。第二个因素的原因尚不确定。这可能是由于夏季速度测量存在误差, 巷道内气压变化, 或者矿井结构改变。后两个原因可能导致风机产生的部分风量流向了其他地方, 而不是采样点。

然而, 由于任何矿井通风系统都是动态的, 并且会持续变化, 因此 CFD 模型没有根据冬季测量的空气流量进行调整。CFD 模型也没有更新, 因为在同一天建立模型并进行示踪气体测试以解释变化是不切实际的。在本文研究的案例中, 虽然实验与模拟的总流量不同, 但 CFD 模型仍然成功地提供了良好的预测结果, 可用于设计示踪试验和预测预期通风状态。从图 8 可以看出, 无论是 CFD

还是现场试验结果都表明, 与关闭风扇相比, 打开风扇时, 示踪气体到达采样点的时间更早, 但最大浓度水平偏低。当门关闭时, SF₆ 浓度曲线要比门打开时平坦得多, 并且在巷道内停留时间更长。

4 讨论

当本文需要使用示踪气体释放和计算流体力学模拟相结合的方法确定传送带巷道内的示踪气体分布情况时, 只需要一次示踪气体测试就可以获得巷道内的示踪气体浓度状态, 只需要将其与 CFD 模拟结果相比较即可。根据图 8 可以看出, 巷道内的示踪气体状态对停止门的开关状态更敏感, 对风机的开启或者关闭并不敏感。当停止门关闭时, 曲线有一个很长的缓慢下降过程, 这个与停止门关闭时的曲线形状明显不同, 然而当停止门的状态相同时, 增压风扇的开启和关闭时的示踪气体随时间变化的曲线十分相似, 唯一的区别是当打开风扇时, 示踪气体到达测点的速度较快, 这就要求本文建立 CFD 模型时基于最新的矿井数据同时建模的示踪剂到达测试点的时间结果足够准确。这种情况下, 本文需要更加准确的现场测试数据, 同时更改测试点或者释放点的位置, 使得两者之间的时差足够长, 以准确捕捉风扇状态。

在事故后的紧急情况下, 快速部署测点至关重要, 在本研究中, 示踪气体释放位置由 CFD 模拟确定, 从而消除了试错的过程。事实证明, 从模型中获得优化的参数至关重要, 因为本文在一次模拟后就确定了示踪气体释放点, 通过减少矿井次数和重新布置示踪气体释放位置节省了大量救援时间和金钱。

应该指出获得稳健的 CFD 模拟结果特别耗时, 尤其在高性能计算机的前提下, 通过提前实验测试不同通风工况下矿井内的示踪气体浓度更为实用。但是它无法测试示踪气体的具体分布情况。因此 CFD 模拟是现场测试的重要补充部分。这两种方法的混合允许将 CFD 用于精确预测混合效应和扩散效应复杂的关键区域, 同时可以对矿山的通用区域进行实测以节省模拟时间。该方法只有提前开发一个矿井模型并在事故后使用它才切合实际, 特别是在应用于矿井紧急情况时。这项研究表明, 示踪气体测试加 CFD 模拟对于预测矿井内部的流场情况十分有效。

5 结论

本实验是在一段实际使用的石灰石矿进行的。通过打开和关闭停止门,打开和关闭增压风扇,创建了四种不同的通风场景。同时本文利用 CFD 模型确定最佳示踪气体测试参数,如示踪气体释放位置、速率、持续时间和采样位置,并将 CFD 模型确定的参数进行了现场示踪实验。本文的结论如下:

(1) CFD 模型结果与实验结果对比良好,两者之间的差异最大大约在 10%左右,结果可以接受。

(2) 开启停止门会使得传送带巷道内部示踪气体浓度下降大约 2000ppb。而风扇的开关几乎不会影响示踪气体的浓度变化,但是会影响示踪气体到达测点所需的时间。

(3) CFD 和示踪气体实测相结合的方法可以用于事故后远程识别通风系统损坏的程度,在事故前,可以通风 CFD 确定示踪气体释放点,测点和流场复杂的关键区域,同时通过示踪气体实测提前建立内部流场数据库,当实际事故发生时,本文仅需对比实测数据与数据库中的数据即可确定矿井内通风状态。

参考文献:

- [1] JB Dick. Measurement of ventilation using tracer gas technique[J]. Heating Pipe Air Conditioning, 1950,22: 131-137.
- [2] 李晓锋,朱颖心.示踪气体浓度衰减法在民用建筑自然通风研究中的应用[J].暖通空调,1997,27(4):7-10.
- [3] DJ Kennedy, AW Stokes, WG Klinowski. Resolving complex mine ventilation problems with multiple tracer gases[C]. 3rd Mine Ventilation Symposium, University Park, Pennsylvania, 1987.
- [4] 吴中立,刘西才,赵时海,等.用六氟化硫气体示踪技术检测采空区漏风[J].煤炭科学技术,1983,(4):6-8.
- [5] ED Thimons, FN Kissell. Tracer gas as an aid in mine ventilation analysis[M]. 1st ed. Pittsburgh, PA, USA: US Bureau of Mines, 1974.
- [6] G Arpa, A Widiatmojo, NP Widodo, et al. Tracer gas measurement and simulation of turbulent diffusion in mine ventilation airways[J]. Journal of Coal Science and Engineering (China), 2008,14(4):523-529.
- [7] TP Mucho, WP Diamond, F Garcia, et al. Implications of recent NIOSH tracer gas studies on bleeder and gob gas ventilation design[C]. SME Annual Meeting 2000, Salt Lake City, UT, USA, 2000.
- [8] AKAISNVNK Singh, VK Singh. Air leakage through underground ventilation stoppings and in situ assessment of air leakage characteristics of remote filled cement concrete plug by tracer gas technique[J]. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 2004,104(2):101-106.
- [9] RJ Timko, ED Thimons. Sulfur hexafluoride as a mine ventilation research tool: recent field applications[M]. 1st ed. US Department of the Interior, Bureau of Mines, 1982.
- [10] 张琛.基于数值仿真模拟的矿井通风系统优化设计研究[J].机械管理开发,2018,33(10):22-24.
- [11] 郝树青,黄宏伟.CFD 在隧道安全工程中的应用及基于 CFD 技术的长大隧道火灾疏散技术模拟[C].第十四届全国工程设计计算机应用学术会议论文集,2008.
- [12] J Huang, J Bruining, KH Wolf. Modeling of gas flow and temperature fields in underground coal fires[J]. Fire Safety Journal, 2001,36(5):477-489.
- [13] 刘旭红,张湘凤,宋贤生,等.火灾爆炸 CFD 数值模拟在 LNG 接收站中的应用[J].石油化工安全环保技术,2017, 33(3):29-32.
- [14] VAN Heerden. The application of CFD for evaluation of dust suppression and auxiliary ventilating system used with continuous miners[C]. SME Annual Meeting 1993, Salt Lake City, Utah, USA, 1993.
- [15] X Yang, J Srebric, X Li, et al. Performance of three air distribution systems in VOC removal from an area source[J]. Building and Environment, 2004,39(11):1289-1299.
- [16] RB Krog, SJ Schatzel, HN Dougherty. Airflow distribution patterns at a longwall mine depicted by CFD analysis and calibrated by a tracer gas field study[C]. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Denver,USA, 2011.
- [17] PK Kundu, IM Cohen, DR Dowling. Fluid mechanics, 6th edition[M]. ed. San Diego, USA: Academic Press, 2016.

- 时数评价方法[J].西安工程大学学报,2022,36(4):4753.
- [4] 田振武,黄翔,褚俊杰,等.干燥地区数据中心水侧蒸发冷却空调系统的实测分析[J].暖通空调,2021,51(8):12-17.
- [5] 樊丽娟,黄翔,徐方成.管式间接蒸发冷风机性能测试及分析[J].建筑科学,2011,27(10):55-57,82.
- [6] 宋祥龙,黄翔.立管式间接蒸发冷却器的节能效果[J].棉纺织技术,2022,50(5):9-11.
- [7] 褚俊杰,黄翔,孙铁柱,等.逆流式露点间接蒸发冷却器性能实验研究[J].制冷学报,2019,40(1):121-127.
- [8] 贺红霞,黄翔,张鸿,等.露点间接蒸发冷却器中布水与存水的试验研究[J].西安工程大学学报,2019,33(4):395-100.
- [9] 王玉刚,王怡,黄翔,等.一种新型露点间接蒸发冷却器在我国不同气候区适用性的试验研究[J].流体机械,2015,43(8):68-72,58.
- [10] 王玉刚,陈奕.露点蒸发冷却空调系统的热力学性能分析[J].西安工程大学学报,2022,36(4):92-97.
- [11] 胡凯,郭春梅,李勇刚,等.不同运行工况下间接蒸发冷却器换热性能试验研究[J].流体机械,2021,49(8):21-27,70.
- [12] 贾晨昱,黄翔,田振武,等.间接蒸发冷却技术在国内外数据中心的应用研究[J].制冷与空调,2020,20(1):61-67.
- [13] GB50174-2017,数据中心设计规范[S].北京:中国计划出版社,2017.
- [14] 黄翔.蒸发冷却空调原理与设备[M].北京:机械工业出版社,2019.
- [15] 靳如意,黄翔,王颖,等.数据中心用高分子板翅式间接蒸发冷却器换热性能的试验研究[J].流体机械,2022,50(12):7-13.
- [16] 张丹,黄翔,吴志湘.蒸发冷却空调最佳淋水密度的实验研究[J].西安工程科技学院学报,2006,(2):191-194.
- [17] 于号,李征涛,王智楷,等.间接蒸发冷却器在干湿模式下的冷却特性[J].化学工程,2022,50(6):38-42,60.

(上接第 118 页)

- [18] RW Freedman, BI Ferber. Sampling capability of vacutainers for fixed gases and low-molecular-weight hydrocarbons[M]. ed. US Department of the Interior, Bureau of Mines, 1976.
- [19] T Bui. CFD Analysis of the Nozzle Jet Plume Effects on Sonic Boom Signature[C]. 47th AIAA Aerospace Sciences Meeting, Orlando, Florida, USA, 2009.
- [20] DN Sørensen, PV Nielsen. Quality control of computational fluid dynamics in indoor environments[J]. Indoor Air, 2003,13(1):2-17.