

采空区失稳诱发冲击气浪传播规律研究

卢悦^{1,2,3,4,5}, 刘洋^{1,2,3,4}, 王文才^{1,2,3,4}

1. 内蒙古科技大学 矿业与煤炭学院, 内蒙古 包头 014010;
2. 内蒙古煤炭绿色开采与绿色利用协同创新中心, 内蒙古 包头 014010;
3. 内蒙古自治区矿业工程重点实验室, 内蒙古 包头 014010;
4. 内蒙古自治区煤炭安全开采与利用工程技术研究中心, 内蒙古 包头 014010;
5. 包钢勘察测绘研究院, 内蒙古 包头 014010)

摘要:以采空区失稳诱发的冲击气浪为研究背景,构建了冲击气浪传播模型,并采用模拟冲击气浪的室内试验和数值模拟方法分析了传播速率的变化规律。研究表明,冲击气浪“绕流”模型由匀速运动阶段和加速运动阶段组成;采空区顶板的冒落高度越大,匀速运动阶段持续时间占比越小,加速运动阶段持续时间占比越大。研究结果可为采空区失稳诱发的冲击气浪灾害防治提供参考。

关键词:采空区;冲击气浪;传播规律;失稳灾变

中图分类号:TD325.3

文献标识码:B

文章编号:1009-5438(2025)03-0014-06

Study on Propagation Law of Shock Gas Induced by Instability of Goaf

Lu Yue^{1,2,3,4,5}, Liu Yang^{1,2,3,4}, Wang Wencai^{1,2,3,4}

1. School of Mining and Coal, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, Inner Mongolia Autonomous Region, China;
2. Inner Mongolia Collaborative Innovation Center for Green Mining and Green Utilization of Coal, Baotou 014010, Inner Mongolia Autonomous Region, China;
3. Inner Mongolia Key Laboratory of Mining Engineering, Baotou 014010, Inner Mongolia Autonomous Region, China;
4. Inner Mongolia Research Center for Engineering Technology of Safe Coal Mining and Utilization, Baotou 014010, Inner Mongolia Autonomous Region, China;
5. Baotou Steel Survey and Mapping Research Institute, Baotou 014010, Inner Mongolia Autonomous Region, China)

Abstract: The propagation model of shock gas is established by taking the shock gas induced by instability of goaf as research background as well as the change rules of propagation rate are analyzed with the laboratory test that simulates shock gas and numerical simulation method. The study results showed that the model of flow past body of shock gas consisted of stages of uniform motion and accelerated motion; the larger the falling height of roof of goaf, the smaller the proportion of duration of uniform motion stage and the larger the proportion of duration of accelerated motion stage. The study results

收稿日期:2025-04-09

作者简介:卢悦(1996-),女,辽宁省盘锦市人,工程师,现从事矿山安全及矿产勘查工作。

could provide references for prevention and treatment of shock gas disaster induced by instability of goaf.

Key words: goaf; shock gas; propagation law; instability disaster

采用崩落法和空场法开采时将产生大量采空区^[1-3]。采空区失稳极易诱发冲击气浪灾害,严重威胁矿山高效开采和员工生命安全^[4-7]。因此,研究冲击气浪的传播规律不仅能够消除采空区失稳带来的地质灾害,也可以提高地下矿山的开采效率。

很多学者对采空区失稳诱发的冲击气浪灾害进行了研究。贾凯跃等^[8]提出了诱导冒落处理相邻采空区的技术方案,并计算了采空区的可冒性。赵新等^[9]对采空区空气冲击灾害进行理论计算,利用流体力学数值模拟软件对采空区顶板冒落进行模拟分析。项宇等^[10]以某矿为例,研究了顶板冒落的两种方式(“打气筒”模型和“绕流”模型)。曹健等^[11]研究了顶部单一煤层及下煤层重复采动的覆岩裂隙发育规律及其影响因素。吴周康等^[12]采用理论计算和FLAC3D数值模拟的方法,对锚杆、锚索联合支护参数进行了优化。鲁宇等^[13]利用室内相似材料试验和PFC2D数值分析方法对覆盖层运动变化规律进行研究。以上学者的研究成果主要针对采空区失稳灾害机理及治理方法,然而采空区失稳诱发的冲击气浪传播规律却少有体现。

本文通过建立冲击气浪传播模型研究冲击气浪传播的演化过程,采用模拟采空区失稳诱发冲击气浪的室内试验分析冲击气浪的传播速率演化规律。研究结果为采空区失稳诱发的冲击气浪灾害治理提供技术支撑。

1 冲击气浪传播模型

基于采空区失稳诱发冲击气浪的“绕流”模型^[10],构建冲击气浪传播速率模型。该模型由匀速运动阶段和加速运动阶段组成。其中,由于压差的影响,匀速运动的速度接近0 m/s,加速运动阶段计算公式由流体力学和经典力学推导而来。综上所述,加速运动阶段可以做出如下基本的假设和概化。

- (1) 采空区内空气被认为是理想气体;
- (2) 冲击气浪传播过程为等温过程;
- (3) 采空区被认为是封闭状态,采空区体积差被忽略;
- (4) 采空区出口压强为标准大气压。

基于崩落法开采形成的采空区实际条件,推导冲击气浪加速运动阶段的二维动量守恒公式为:

$$\rho \frac{dv}{dt} = \rho F_i - \frac{dP}{dV} + \mu \Delta v \quad (1)$$

式中: Δ 为拉普拉斯算子; ρ 为采空区内气体密度,kg/m³; F_i 为体积力,N; μ 为采空区内气体黏度,Pa·s; v 为采空区内气体速度,m/s; V 为采空区内气体体积,m³。

根据假设(1)~(4), μ 值为0, ρ 值由理想气体定律得到, $\rho = P/RT$,其中 R 为通用气体常数, T 为绝对温度,体积力为冒落岩体自身的重量。因此,式(1)可以简化为:

$$\frac{dv}{dt} = g - \frac{P_n - P_{n-1}}{\rho_d N} \quad (2)$$

式中: ρ_d 为冒落岩体的密度,kg/m³; N 为冒落岩体的厚度,m; P_n 和 P_{n-1} 为冲击气浪加速运动过程中相邻两个阶段的压力,Pa; g 为重力加速度,m/s²。

基于现场采空区的实际条件,加速运动阶段的初始下落高度不是采空区顶板高度,而是匀速运动阶段结束的高度。因此,得出冲击气浪加速运动阶段冲击气浪的压力、速度及冒落高度为:

$$P_n = \frac{H - H_m - H_{n-1}}{H - H_m - H_n} P_{n-1} \quad (3)$$

$$H_n = H_{n-1} + v_{n-1} \cdot \Delta t \quad (4)$$

$$v_n = v_{n-1} + \left[g - \frac{P_{n-1}(H_n - H_{n-1})}{\rho_d(H - H_n - H_m)} \right] \cdot \Delta t \quad (5)$$

式中: H_m 为匀速运动阶段结束的高度,m; H_n 和 H_{n-1} 分别为冲击气浪加速运动过程中相邻两个阶段的下落高度,m; v_n 和 v_{n-1} 为冲击气浪加速运动过程中相邻两个阶段的速度,m/s; Δt 为时间步长,s。

基于式(3)~(5)冲击气浪加速阶段气流压力、速度及冒落体高度的求解流程如图1所示。

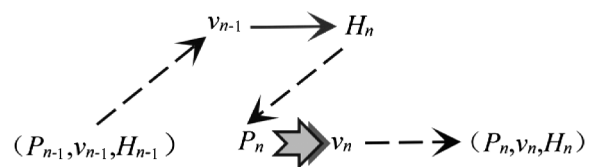


图1 冲击气浪速度模型求解流程

由于工作面与采空区相连接,冲出工作面的冲击气浪适用于伯努利方程。因此,得出冲出工作面的冲击气浪速度计算公式为:

$$v_b = \sqrt{\frac{2(P_{bn} - P_{i0}) + v_n^2 \cdot \rho_n}{9.8 + \rho_L}} \quad (6)$$

式中: v_b 为冲出工作面的冲击气浪速度, m/s; P_{bn} 为工作面的大气压强, Pa; P_{i0} 为工作面的初始大气压强, Pa; ρ_n 为采空区内气体的密度, kg/m³; ρ_L 为工作面内气体的密度, kg/m³。基于假设(4), P_{i0} 被认为标准大气压。

基于矿山采空区的实际情况, 冒落体面积小于采空区顶板的面积, 因此工作面的压强如式(7)所示:

$$P_{bn} = P_n \frac{S_b}{S + S_b - S_a} \quad (7)$$

式中: S 为采空区顶板面积, m²; S_a 为采空区内冒落体的面积, m²; S_b 为工作面的横截面积, m²。

将式(7)代入式(6)中, 得出冲击气浪加速运动阶段的速度模型为:

$$v_b = \sqrt{\frac{2S_b(P_n - P_0) + v_n^2 \cdot \rho_n}{(9.8 + \rho_L)(S - S_a + S_b)}} \quad (8)$$

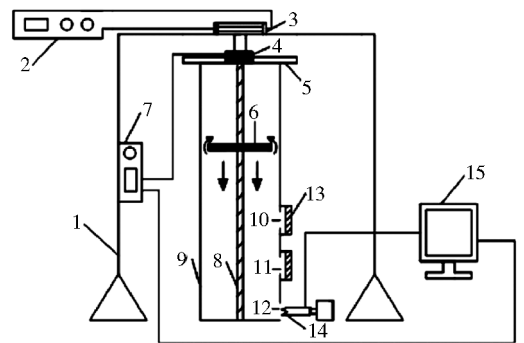
式中: P_0 为工作面的初始大气压强, Pa。

2 冲击气浪试验研究

为了研究冲击气浪速度的演化规律, 设计了采空区失稳诱发的冲击气浪试验模型, 如图 2 所示。试验模型包括冲击气浪产生设备、IFA300 型热线热膜风速计以及数据采集系统。其中, 冲击气浪产生设备由刚性框架、3 个出风口、提升机以及模拟冒落体的铁盘组成。刚性框架为圆柱形铁桶(直径为 0.1 m, 高度为 1.25 m), 底部固定在地面上。出风口形状为正方形(0.03 m × 0.03 m), 1[#]出风口在距离地面 0.05 m 处, 2[#]出风口在距离地面 0.35 m 处, 3[#]出风口在距离地面 0.65 m 处。IFA300 型热线热膜风速计放置于出风口处。模拟冒落体的铁盘直径为 0.09 m, 厚度为 0.01 m, 密度为 4 500 kg/m³。为了验证冲击气浪传播模型, 分别采用 0.6 m、0.9 m 以及 1.2 m 的冒落高度进行试验。考虑到试验数据的离散性, 每组试验进行 3 次, 取其平均值作为试验结果。

不同下落高度释放铁盘产生的冲击气浪速度-时间曲线如图 3—图 5 所示, 3 条曲线均呈现出先保持不变后持续增长的趋势。根据图中冲击气浪速度-时间曲线的变化趋势, 可以将冲击气浪演化过程分为 2 个阶段: ①匀速运动阶段, 采空区顶板冒

落初期, 由于采空区处于相对密闭的状态, 当冒落体突然断裂, 脱离顶板, 采空区内将产生巨大的压力差, 阻碍采空区内气体冲出工作面, 导致冲击气浪的速度基本不变。②加速运动阶段, 由于冒落体下降时间非常短, 所以空气被认为是不可压缩的。冒落体上方为负压区, 下方为正压区, 出风口保持常压。由于冒落体上、下方的气压差, 下方气体会绕流回到冒落体的上方。随着冒落体的不断下降, 采空区内压差不断减小, 从而导致了冲击气浪速度不断增加, 呈现出加速运动现象。



1 - 电缆; 2 - 交流电源; 3 - 提升机; 4 - 电磁继电器; 5 - 封盖; 6 - 铁盘; 7 - 控制开关; 8 - 固定连接; 9 - 刚性框架; 10 - 3[#]出口; 11 - 2[#]出口; 12 - 1[#]出口; 13 - 阀门; 14 - IFA300型热线热膜风速计; 15 - 数据收集电脑

图 2 试验设备

由图 3—图 5 得出, 冒落高度为 0.6 m、0.9 m 及 1.2 m 时, 冲击气浪最大速度分别为 21.35 m/s、26.10 m/s 及 28.45 m/s, 匀速运动阶段的持续时间分别为 0.23 s、0.27 s 及 0.31 s。

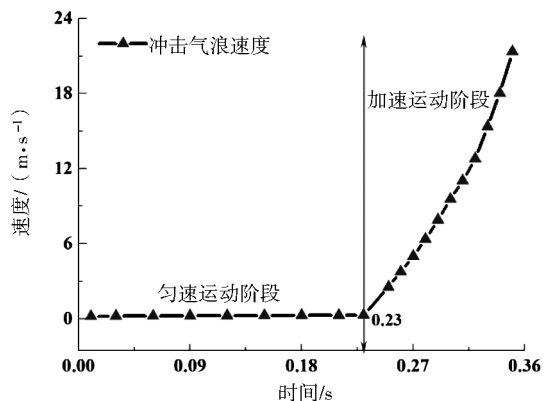


图 3 冒落高度为 0.6 m 时冲击气浪速度-时间曲线

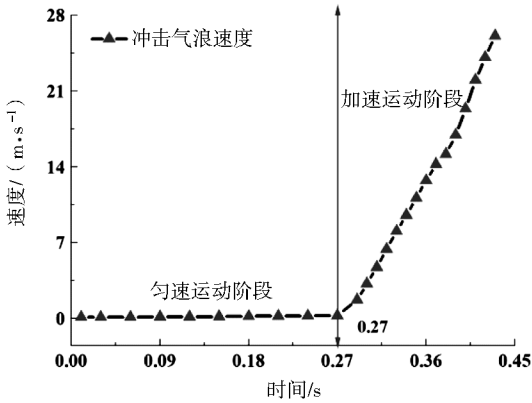


图 4 冒落高度为 0.9 m 时冲击气浪速度-时间曲线

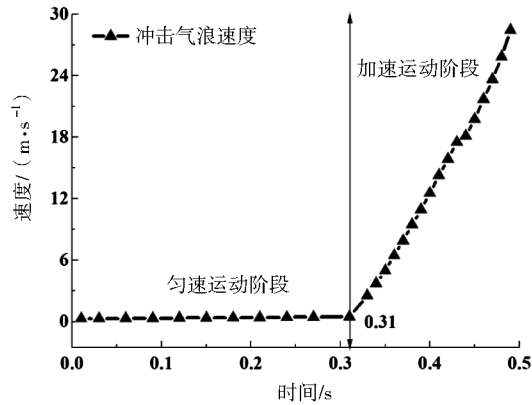


图 5 冒落高度为 1.2 m 时冲击气浪速度-时间曲线

试验结果表明,采空区顶板的冒落高度越大,匀速运动阶段持续时间占比越小,加速运动阶段持续时间占比越大;冒落高度越大,加速运动阶段速度的增长率越小;匀速运动阶段的持续高度与顶板冒落高度呈现出线性关系。因此,拟合得出匀速运动阶段的持续高度为:

$$H_m = aH + b \quad (9)$$

式中, a 和 b 分别是拟合曲线的参数, $a = 0.36$, $b = 0.04583 \text{ m}$, R^2 为 0.99635。

结合构建的冲击气浪加速运动阶段模型,得出采空区失稳诱发的冲击气浪速度模型为:

$$v_b = \begin{cases} 0 & H_m \leq 0.36H + 0.04583 \\ \sqrt{\frac{2S_b(P_b - P_0) + v_n^2 \cdot \rho_n}{(g + \rho_L)(S - S_a + S_b)}} & H_m > 0.36H + 0.04583 \end{cases} \quad (10)$$

基于公式(10),得出加速运动阶段速度理论值和试验值对比图如图 6—图 8 所示,其相对误差小于 10%。

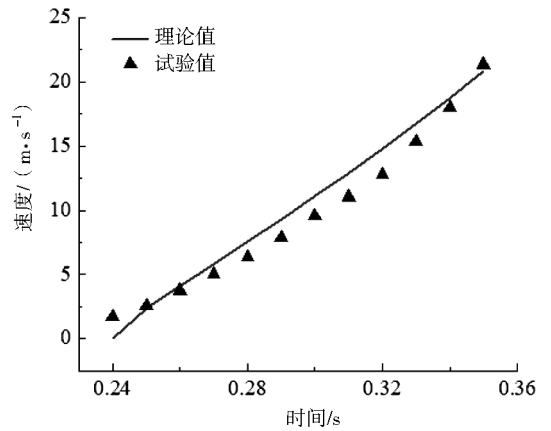


图 6 冒落高度为 0.6 m 时理论值和试验值对比图

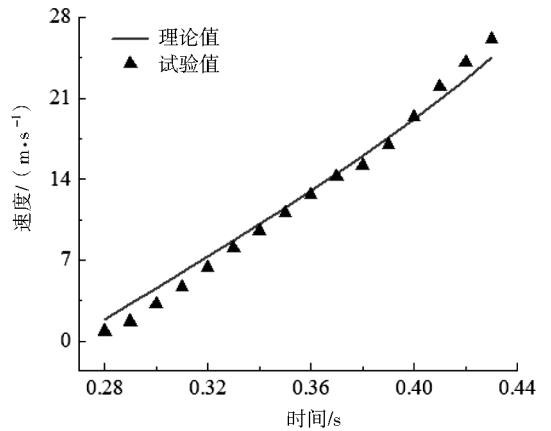


图 7 冒落高度为 0.9 m 时理论值和试验值对比图

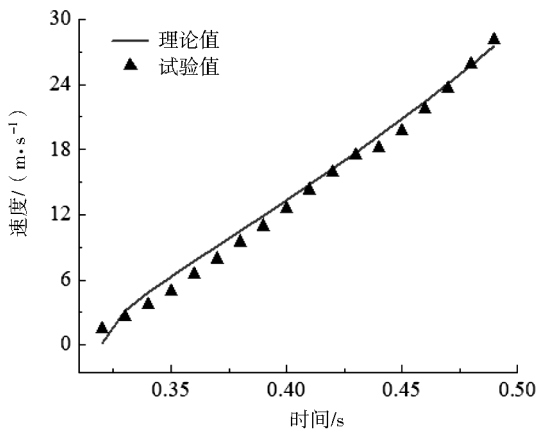


图 8 冒落高度为 1.2 m 时理论值和试验值对比图

3 冲击气浪模拟研究

将采空区和工作面划分为两个区域,将工作面设置为出风口,出风口边界设置为 PRESSURE -

OUTLET。采用 ICEM 软件构建采空区物理模型,采空区宽度为 0.1 m,高度分别设置为 0.6 m、0.9 m 以及 1.2 m;冒落体尺寸为 0.09 m×0.01 m。划分网格后,将模型导入 FLUENT 软件中模拟采空区失稳诱发冲击气浪灾害。

不同高度采空区失稳诱发冲击气浪速度-时间曲线如图 9—图 11 所示,3 条曲线呈现出相似的演化规律,即先保持不变后持续增长,与采空区失稳引发冲击气浪试验数据相吻合。因此,可以将采空区失稳诱发冲击气浪模拟过程分为匀速运动阶段和加速运动阶段。

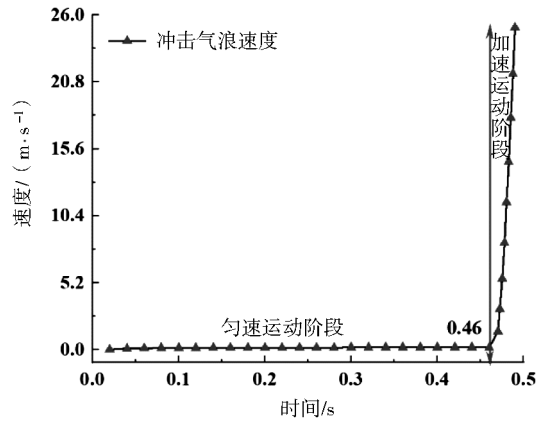


图 11 模拟冒落高度为 1.2 m 时冲击气浪速度-时间曲线

采空区高度为 0.6 m、0.9 m 和 1.2 m 引发的冲击气浪匀速运动阶段持续时间分别为 0.32 s、0.39 s 和 0.46 s,最大速度分别为 13.21 m/s、19.63 m/s 和 25.03 m/s。当冒落高度相同时,试验得出的冲击气浪速度大于数值模拟,而匀速运动阶段持续时间小于数值模拟。由于数值模拟过程忽略了流体的能量转换,从而扩大了压差的影响程度。因此,数值模拟中匀速运动阶段的持续时间大于试验结果。

不同高度采空区失稳诱发冲击气浪阶段拐点处的压强与速度分布图如图 12—图 14 所示。由于模拟过程中压力被认为是均匀分布的,且空气被认为是不可压缩气体,因此,在加速运动阶段,空气将立即被冲到工作面,从而导致数值模拟曲线的增长速率大于试验数据。根据不同高度采空区诱发冲击气浪运动阶段拐点处的速度分布云图得出,冒落体上部空气速度大于下部空气速度,这一现象较好地解释了冲击气浪产生过程中压差的作用。

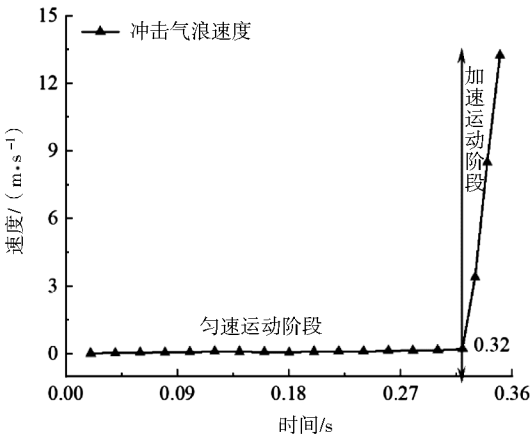


图 9 模拟冒落高度为 0.6 m 时冲击气浪速度-时间曲线

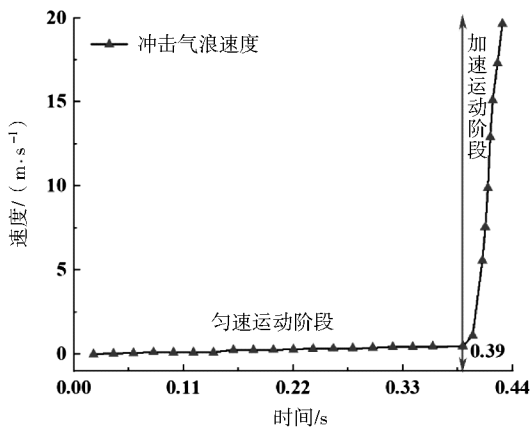


图 10 模拟冒落高度为 0.9 m 时冲击气浪速度-时间曲线

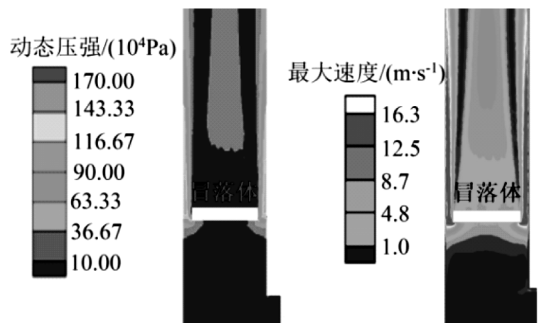


图 12 模拟冒落高度为 0.6 m 时拐点处压强与速度分布图

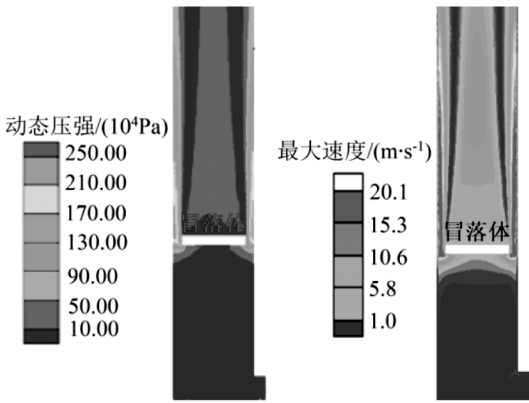


图13 模拟冒落高度为0.9 m时
拐点处压强与速度分布图

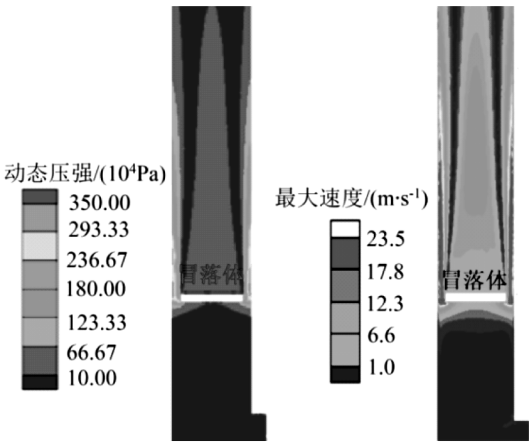


图14 模拟冒落高度为1.2 m时
拐点处压强与速度分布图

数值模拟研究表明采空区失稳引发冲击气浪运动模型由匀速运动阶段和加速运动阶段组成,进而验证了本文冲击气浪传播模型的可靠性。

4 结论

(1)以采空区失稳诱发的冲击气浪灾害为研究背景,构建冲击气浪传播速率模型。模型由匀速运动阶段和加速运动阶段构成。

(2)基于崩落开采形成的采空区实际条件,设计了采空区失稳诱发的冲击气浪试验和数值模拟模型,验证了冲击气浪传播速率模型的可靠性。

(3)采空区顶板的冒落高度越大,匀速运动阶段持续时间占比越小,加速运动阶段持续时间占比越大;冒落高度越大,加速运动阶段速度的增长率越小。

参 考 文 献

- [1] 侯禹丞. 隐伏采空区治理与残矿回采技术分析[J]. 有色金属设计, 2023, 50(2): 5-8.
- [2] 杨程, 李夕兵, 王少锋. 国家风险及其对中国矿业海外直接投资影响研究: 以澳大利亚为例[J]. 矿业研究与开发, 2020, 40(12): 169-176.
- [3] 刘洋, 李旭东, 陈世江, 等. 基于临界冒落跨度理论的残矿协同开采技术研究[J]. 矿业研究与开发, 2022, 42(10): 13-18.
- [4] 陈光波, 滕鹏程, 陈世江, 等. 特殊环境影响下煤矿开采学发展探讨与应用研究[J]. 内蒙古科技大学学报, 2023, 42(2): 190-195.
- [5] 夏磊, 陈世江. 基于AHP-FUZZY模型的急倾斜中厚矿体采矿方法优选[J]. 内蒙古科技大学学报, 2023, 42(2): 103-106.
- [6] 温欣, 黄显武, 尚海丽. 开采沉陷对地表变形影响的试验研究[J]. 内蒙古科技大学学报, 2022, 41(4): 329-333.
- [7] 刘赞, 王创业. 浅埋大采高工作面导水裂隙带发育规律的数值模拟[J]. 内蒙古科技大学学报, 2020, 39(2): 21-26.
- [8] 贾凯跃, 安丽萍, 谭宝会, 等. 相邻采空区诱导冒落处理方案研究及实践[J]. 矿业研究与开发, 2023, 43(10): 21-26.
- [9] 赵新, 刘明, 史峰. 采空区覆盖层对顶板大规模冒落冲击灾害的防治研究[J]. 黄金, 2023, 44(8): 21-25.
- [10] 项宇, 邹雄刚. 采空区顶板冒落形成冲击气浪的研究[J]. 中国矿山工程, 2022, 51(5): 59-62.
- [11] 曹健, 师世图, 赵宇琦, 等. 浅埋近距离煤层开采覆岩裂隙发育规律与影响因素[J]. 内蒙古科技大学学报, 2024, 43(2): 145-150.
- [12] 吴周康, 王文才, 高小雷, 等. 基于理论计算与FLAC3D模拟的巷道支护优化设计[J]. 内蒙古科技大学学报, 2023, 42(3): 221-226.
- [13] 鲁宇, 金长宇, 王湟, 等. 露天转地下开采覆盖层合理厚度优化研究[J]. 金属矿山, 2021(2): 23-28.