

密闭管道内瓦斯爆炸卷扬沉积煤尘爆炸传播特性

江丙友^{1,3}, 洪 汉^{1,3}, 苏明清², 鲁昆仑^{1,3}, 杨炳辉^{1,3}, 王培龙^{1,3}, 丁大伟^{1,3}

(1. 安徽理工大学 工业粉尘防控与职业安全健康教育部重点实验室, 安徽 淮南 232001; 2. 中国安全生产科学研究院, 北京 100012; 3. 安徽理工大学 安全科学与工程学院, 安徽 淮南 232001)

摘 要: 为了探究密闭管道内瓦斯爆炸卷扬沉积煤尘爆炸的传播特性, 在自主研制的瓦斯爆炸卷扬沉积煤尘爆炸试验系统内, 从爆炸压力、火焰以及压力-火焰的耦合关系等方面, 研究了不同瓦斯体积分数及煤尘质量浓度下瓦斯爆炸卷扬沉积煤尘爆炸的爆炸压力传播特性及火焰传播特性, 并利用 Fluent 数值模拟软件分析了煤尘的卷扬分散特征。结果表明: 密闭管道内瓦斯体积分数为 10% 时的最大爆炸压力整体高于瓦斯体积分数为 12% 和 8% 时的最大爆炸压力。当瓦斯体积分数为 10%, 煤尘质量浓度为 250 g/m³ 时, 最大爆炸压力传播规律表现为在瓦斯段先升后降再升, 到达煤尘段后持续上升; 随着煤尘质量浓度的增加, 在瓦斯段则表现为先升后降, 在煤尘段依旧持续上升。当瓦斯体积分数为 8% 和 12% 时, 最大爆炸压力随煤尘质量浓度增加呈上升趋势, 而瓦斯体积分数为 10% 时则呈现下降趋势。密闭管道内火焰锋面到达时间与传播距离呈正相关, 瓦斯体积分数为 10% 时火焰锋面到达各测点的时间短于瓦斯体积分数为 12% 和 8% 的传播时间。火焰传播速度随传播距离呈先增大后减小的趋势, 当瓦斯体积分数为 10% 时, 火焰传播速度最快。密闭管道内瓦斯爆炸卷扬沉积煤尘爆炸的爆炸压力-时间曲线会出现 2 次峰值。第 1 次峰值是由瓦斯爆炸的前驱冲击波产生, 当火焰传播至煤尘段后, 压力同时开始上升, 且压力峰值时刻和火焰峰值时刻耦合, 达到第 2 次压力峰值, 随着火焰信号的消失, 压力逐渐减小直至反应停止。密闭管道内前驱冲击波与反射波使得煤尘卷扬分散, 形成“漩涡状”煤尘云, 促进煤粉与爆燃波接触。当煤尘质量浓度一定时, 体积分数为 10% 瓦斯的卷扬程度优于体积分数 12% 和 8% 瓦斯; 当瓦斯体积分数一定时, 煤尘卷扬程度随煤尘质量浓度的增加而递减。

关键词: 密闭管道; 瓦斯爆炸; 煤尘爆炸; 煤尘卷扬; 火焰传播特性; 压力-火焰耦合

中图分类号: TD714 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9993(2024)04-1941-11

Characterization of explosion propagation of coal dust deposited by gas explosion convolutions in closed pipelines

JIANG Bingyou^{1,3}, HONG Han^{1,3}, SU Mingqing², LU Kunlun^{1,3}, YANG Binghui^{1,3},
WANG Peilong^{1,3}, DING Dawei^{1,3}

(1. Key Laboratory of Industrial Dust Control and Occupational Health, Ministry of Education, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China; 2. China Academy of Safety Science and Technology, Beijing 100012, China; 3. School of Safety Science and Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

Abstract: To explore the propagation characteristics of gas explosion-induced coal dust detonations in enclosed pipelines,

收稿日期: 2023-09-04 修回日期: 2024-01-06 责任编辑: 王晓珍 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2023.1095

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52074012); 安徽省自然科学基金资助项目 (2308085J19); 安徽省教育厅高校杰出青年基金资助项目 (2022AH020057)

作者简介: 江丙友 (1987—), 男, 安徽利辛人, 教授, 博士。E-mail: cumtjiangby@163.com

引用格式: 江丙友, 洪汉, 苏明清, 等. 密闭管道内瓦斯爆炸卷扬沉积煤尘爆炸传播特性[J]. 煤炭学报, 2024, 49(4): 1941-1951.

JIANG Bingyou, HONG Han, SU Mingqing, et al. Characterization of explosion propagation of coal dust deposited by gas explosion convolutions in closed pipelines[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(4): 1941-1951.



移动阅读

a custom-developed experimental system was employed for gas explosions involving accumulated coal dust. Various aspects were focused such as explosion pressure, flame dynamics, and the interplay between pressure and flame in the context of different gas and coal dust concentrations. Additionally, Fluent Numerical simulation software was utilized for analyzing the dispersion behavior of coal dust. The results reveal that the peak explosion pressure inside the closed pipeline is the highest at a 10% gas concentration, surpassing the maximum pressures observed at 12% and 8% concentrations. At a gas concentration of 10% and coal dust mass concentration of 250 g/m^3 , the explosion pressure exhibits a unique pattern: initially increasing, then decreasing, and subsequently rising again in the gas phase, followed by a continuous ascent in the coal dust phase. As the coal dust concentration increases, this pattern remains evident, with a persistent upward trend in the coal dust section. Conversely, at 8% and 12% gas concentrations, the maximum explosion pressure consistently rises with increasing coal dust concentrations, but shows a declining trend at 10% gas concentration. Furthermore, the time taken for the flame front to traverse the pipeline is positively correlated with the distance traveled. The flame front reaches various checkpoints more rapidly at a 10% gas concentration than at 12% and 8%. The flame's propagation speed first increases and then decreases over distance, reaching its fastest at 10% gas concentration. The explosion pressure-time curve during a gas explosion in a closed pipeline showcases two peak values. The initial peak is caused by the shock wave preceding the gas explosion. As the flame advances into the coal dust section, the pressure concurrently begins to rise, reaching its second peak as it synchronizes with the flame's peak. Following the flame signal's disappearance, the pressure gradually diminishes until the reaction ceases. In the enclosed pipeline, the precursor shock waves and reflected waves contribute to the dispersion of coal dust, forming a "vortex-like" dust cloud. This formation enhances the interaction between the coal dust and the deflagration wave. When the coal dust concentration is fixed, the degree of dispersion at 10% gas concentration is more effective than at 12% or 8%. Furthermore, at a constant gas concentration, the dispersion degree of coal dust decreases as its mass concentration increases.

Key words: closed pipeline; gas explosion; coal dust explosion; coal dust curling; flame propagation characteristics; pressure flame coupling

瓦斯爆炸和煤尘爆炸严重危害煤矿安全生产。煤矿井下的爆炸事故往往是由瓦斯、煤尘的共同爆炸作用引起。瓦斯爆炸产生的冲击波卷扬起沉积煤尘形成煤尘云,爆炸产生的火焰加速了煤尘的热解与燃烧,导致更加严重的二次爆炸^[1]。

国内外学者对瓦斯/煤尘的爆炸特性和影响因素进行了大量的实验和数值模拟研究。裴蓓^[2]、刘丹^[3]、杨书召^[4]、尉存娟^[5]、NIU^[6]、HOU^[7]、汤其建^[8]、宫广东^[9]等通过实验研究了瓦斯体积分数、煤尘的质量浓度、含水率、挥发分、分散度、粒径等因素对瓦斯/煤尘体系的爆炸下限、爆炸压力及火焰传播的影响,指出增加瓦斯体积分数、选用高挥发分的煤尘、增大煤尘的分散度、减小煤尘的粒径均能降低煤尘爆炸的最小点火能和煤尘爆炸浓度下限;瓦斯体积分数为9.5%时,瓦斯/煤尘体系的爆炸压力最大,火焰传播速度最快;煤尘质量浓度和含水率的增加,爆炸压力先增后减。李润之^[10-11]、郗雪辰^[12]、魏嘉^[13]、王新^[14]等采用数值模拟的方法,研究了瓦斯爆炸诱导沉积煤尘爆炸的爆炸机理,并分析了煤尘卷扬的原因及过程。林柏泉、朱传杰等^[15-17]研究了爆炸过程中粉尘颗粒的运动特征,并分析了波前流速、沉积粉尘密度及粒径

对冲击波扬尘的影响。景国勋、段新伟等^[18-20]利用自制半封闭垂直管道系统,发现随着煤尘粉尘质量浓度的增加,最大爆炸压力和最大爆炸压力上升速率呈现先增大后减小的趋势,且瓦斯的体积分数为9%,煤尘质量浓度为 50 g/m^3 ,爆炸火焰传播速度最大。SONG等^[21-23]采用了数值模拟技术,研究了煤尘厚度、粒径对瓦斯/煤尘爆炸的影响,并分析了煤尘与火焰的相互作用。李海涛等^[24]构建了开放管道,运用实验验证与数值模拟相结合的方式研究了甲烷/煤尘扩散中流场的时空演化规律,并分析了火焰的传播行为。

然而,现有相关研究大多在开口或半封闭管道内进行,关于密闭管道内瓦斯爆炸卷扬沉积煤尘爆炸传播影响因素的研究很少。因此,笔者基于自主研发的瓦斯爆炸卷扬沉积煤尘爆炸试验系统,利用薄膜将瓦斯与煤尘分隔开,构建两段式非预混环境,探究密闭管道内瓦斯爆炸卷扬沉积煤尘爆炸的传播规律。为预防井下煤尘二次爆炸事故提供理论依据。

1 实 验

1.1 实验材料

实验煤样取自于山东省邹城市东滩煤矿。在工

作面取得新鲜煤样后,用保鲜膜包裹紧实运至实验室制成煤粉,选用 200 目 (0.075 mm) 网筛将煤粉筛分为粒径统一的煤粉样品。采用激光粒度分析仪 (Master-sizer-3 000) 测量了煤粉样品的粒径,煤样的 D_{10} 、 D_{50} 、 D_{90} 分别为 1.390、8.189、30.130 μm , 如图 1 所示。采用自动工业分析仪 (WS-G401) 对煤样进行工业分析,结果见表 1。在实验开始前,需将煤粉放置在 30 $^{\circ}\text{C}$ 真空干燥箱中 8 h,以备实验所需。

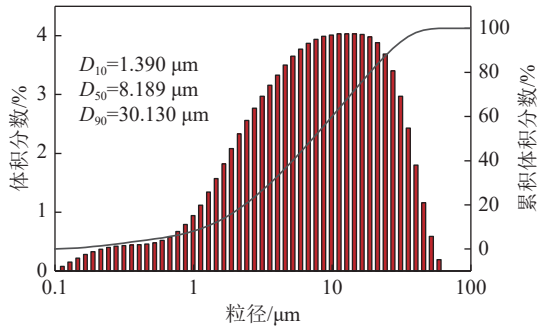


图 1 煤尘的粒径分布

Fig.1 Particle size distribution of coal dust

1.2 实验系统

自主研发的瓦斯爆炸卷扬沉积煤尘爆炸试验系

表 1 煤尘的工业分析

Table 1 Proximate analysis of coal dust %			
水分	挥发分	灰分	固定碳
2.74	33.69	7.79	55.78

统由不锈钢长方体管道、高压点火系统、配气系统以及数据采集及控制系统组成,如图 2 所示。管道由一段 0.08 m×0.08 m×3 m 的瓦斯段管道和一段 0.08 m×0.08 m×1 m 的煤尘段管道连接组成,两端封闭,且瓦斯段和煤尘段用聚四氟乙烯 (PTFE) 薄膜分隔开,在连接处均采用法兰、橡胶垫圈密封以及螺栓紧固,以保证装置的气密性;高压点火系统由 TYT-1 点火能量试验台、点火杆以及继电器组成;配气系统由配气压力传感器 (P_0)、气瓶、气囊、真空泵以及循环泵组成;数据采集及控制系统由计算机、管道燃气爆炸控制及多参数采集系统、爆炸压力传感器 ($P_1 \sim P_6$) 以及火焰光传感器 ($F_1 \sim F_6$) 组成,爆炸压力传感器的检测范围为 $-0.1 \sim 2.1$ MPa,精度为 0.001 MPa,频响为 5 kHz;火焰光传感器的检测范围为 $0 \sim 5$ V,精度为 0.002 5 V,频响为 5 kHz。可利用计算机对高压点火系统、配气系统以及数据采集及控制系统进行联动控制。

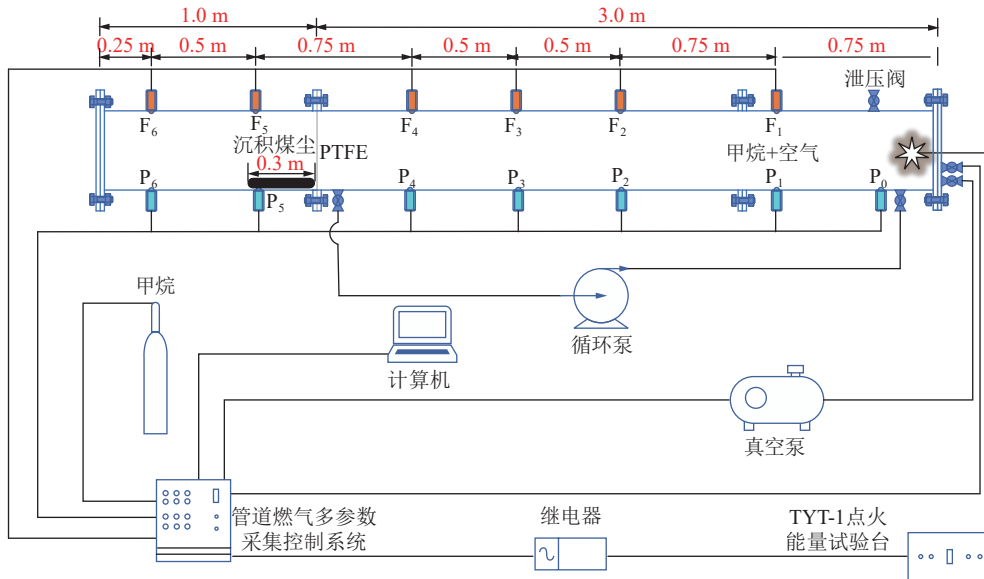


图 2 瓦斯爆炸卷扬沉积煤尘爆炸试验系统

Fig.2 Gas explosion winch deposition coal dust explosion test system

1.3 实验工况与实验方法

在瓦斯段管道中通入体积分数分别为 8%、10% 与 12% 的瓦斯,在煤尘段管道底部沉积煤尘区间内 (图 2) 均匀铺设质量分别为 1.6、3.2、4.8 g 的煤尘,当煤尘全部被卷扬起来,充满整个煤尘段管道时,煤尘质量浓度分别为 250、500、750 g/m^3 。实验前,根据实验方案铺设好煤尘,安装管道、薄膜以及测试系统,检

查管道各连接处的气密性。瓦斯通过道尔顿分压法混合,即使用真空泵将管道抽至一定的真空度,随后通入预设体积分数的瓦斯,打开循环泵循环 15 min,形成瓦斯-空气预混气体;关闭循环泵阀门,通过计算机控制 TYT-1 点火能量试验台进行点火;待反应完成后,数据采集及控制系统通过传感器获取压力和火焰光信号,将处理好的压力、光强数据显示于计算机

上,并绘制压力-时间与光信号-时间曲线。实验结束后,将瓦斯段与煤尘段的法兰拆卸,用吸尘器吸出残余的废气和煤尘。每个测试至少重复3次,以确保重复性。

2 结果与分析

2.1 最大爆炸压力传播

2.1.1 瓦斯体积分数对最大爆炸压力传播的影响

瓦斯爆炸卷扬沉积煤尘爆炸必然会沿着管道进行传播,通过对各测点的最大爆炸压力的监测,以揭示密闭管道内瓦斯爆炸卷扬沉积煤尘爆炸的传播规律。图3显示了不同煤尘质量浓度下瓦斯体积分数对最大爆炸压力传播的影响。从图3(b)和(c)可以看出:各测点的最大爆炸压力整体在瓦斯段先略微升高,然后下降,突破薄膜至煤尘段之后又持续上升,并在管道尾部达到最大爆炸压力峰值。这是因为在管道内爆炸的初始阶段,点火源附近的瓦斯被引燃会向外高速冲击,到达压力峰值后会降低,由于管道长径比增幅较小,导致这一过程中最大爆炸压力增幅不明显。冲击波突破薄膜后卷扬起沉积煤尘,煤尘云被爆炸火焰点燃,促使爆炸压力进一步持续增大^[25]。对比图3(b)和(c),图3(a)可以看出,当瓦斯体积分数为10%时,瓦斯段的最大爆炸压力则是先升后降再升,这是由于在最佳瓦斯体积分数10%和最佳煤尘质量浓度 250 g/m^3 下,密闭管道内煤尘卷扬爆炸后经过法兰盘回弹的压力高于了瓦斯爆炸在4号传感器位置产生的最大爆炸压力,导致此条件下在瓦斯段出现压力再次上升的现象。此外,瓦斯体积分数为10%时,爆炸最为猛烈,各测点爆炸强度整体明显高于体积分数为12%和8%的瓦斯。主要是在管道中,瓦斯爆炸过程中的火焰燃烧与传播存在热损失,此外高速湍流火焰的运移也影响着混合气体在当量比下完全反应的程度,因此略微过量的甲烷可以弥补爆炸过程中的热损失,最大爆炸压力产生在略高于瓦斯体积分数10%处^[26]。

2.1.2 煤尘质量浓度对煤尘段最大爆炸压力的影响

图4为煤尘质量浓度与最大爆炸压力之间的关系。由图4(a)可以看出,当瓦斯体积分数为8%时,随着煤尘质量浓度的增加,煤尘段从 P_5 传至 P_6 处的最大爆炸压力的增幅分别为0.98%、1.41%和3.43%。 P_5 处最大爆炸压力从0.205 MPa上升至0.233 MPa,增幅为13.66%, P_6 处最大爆炸压力从0.207 MPa上升至0.241 MPa,增幅为16.43%。这主要是瓦斯体积分数低,煤尘质量浓度对最大爆炸压力的影响较大,瓦斯煤尘体系表现出“强煤尘性”^[27]。由图4(b)可以看出,当瓦斯体积分数为10%时,随着煤尘质量浓度的

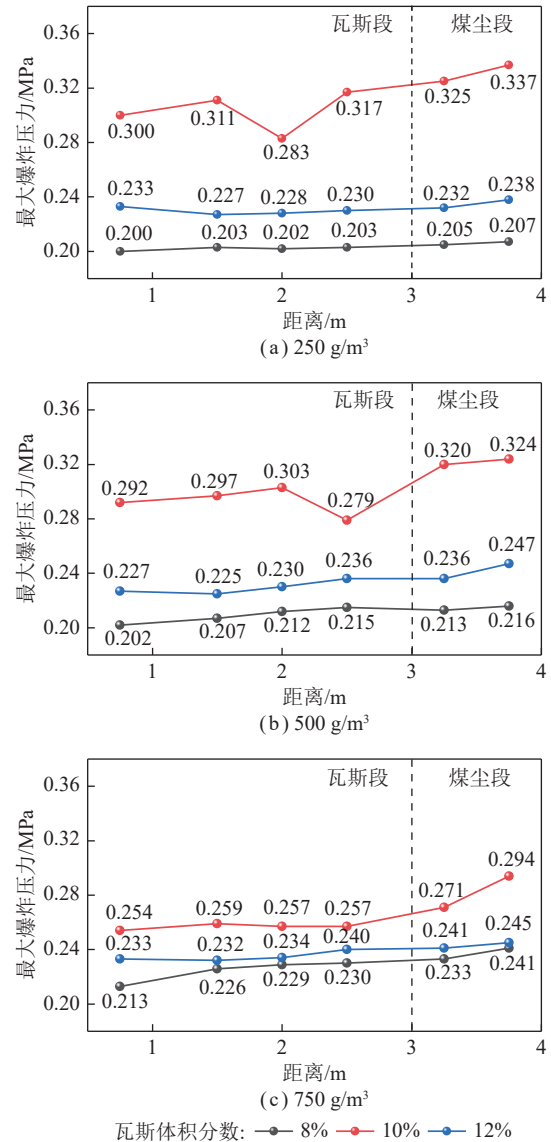


图3 不同煤尘质量浓度下瓦斯体积分数对最大爆炸压力传播的影响

Fig.3 Effect of gas volume fraction on maximum explosion pressure propagation at different coal dust mass concentrations

增加,煤尘段从 P_5 传至 P_6 处的最大爆炸压力的增幅分别为3.69%、1.25%和8.49%。 P_5 处最大爆炸压力从0.325 MPa下降至0.271 MPa,降幅为16.62%, P_6 处最大爆炸压力从0.337 MPa下降至0.294 MPa,降幅为12.76%。这主要是瓦斯体积分数略高于当量比,瓦斯体积分数起主导作用,煤尘质量浓度的增加反而表现为抑制作用^[28]。由图4(c)可以看出,当瓦斯体积分数为12%时,随着煤尘质量浓度的增加,最大爆炸压力呈上升趋势。煤尘段从 P_5 传至 P_6 处的最大爆炸压力的增幅分别为2.57%、4.66%和1.66%。此时管道内氧气体积分数低,爆炸强度低,管道内煤尘质量大意味着会被卷扬起更多煤尘发生热解与燃烧,产生的爆炸压力更强。

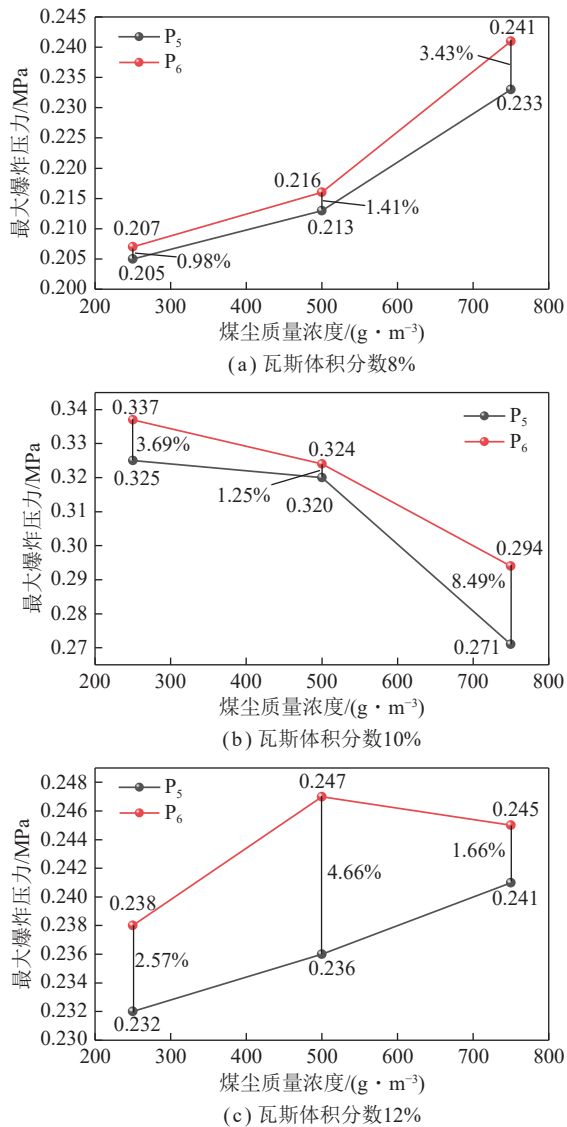


图4 煤尘质量浓度与最大爆炸压力之间的关系

Fig.4 Relationship between coal dust mass concentration and maximum explosion pressure

2.2 火焰传播

2.2.1 火焰锋面到达时间

火焰也是研究瓦斯爆炸卷扬沉积煤尘爆炸传播规律的重要影响因素之一。各测点火焰光传感器初次监测到火焰信号的时间即火焰锋面到达时间。图5为不同煤尘质量浓度下瓦斯体积分数对各测点火焰锋面到达时间的影响。由图5可知,火焰锋面到达时间整体上表现为瓦斯体积分数为8%时最长,12%次之,10%时间最短。这是由于爆炸反应中的氧气体积分数对爆炸起着决定性作用,实际反应中体积分数略高于10%的瓦斯爆炸强度高,火焰传播快,火焰锋面到达时间短。由图5(a)可知,当煤尘质量浓度为250 g/m³时,体积分数为8%、10%和12%的瓦斯爆炸火焰到达2.5 m处的时间分别为305.0、108.2、185.6 ms,突

破薄膜后至3.25 m处的时间增加至1196.6、123.4、580.8 ms,说明爆炸火焰在瓦斯段传播很快,但是由于PTFE薄膜具有一定的阻燃性和热稳定性^[29],阻碍了火焰的传播,导致火焰的到达煤尘段3.25 m处的时间延长。瓦斯体积分数为10%的时间增幅为15.2 ms,而8%和12%的瓦斯,时间增幅为680.8 ms和395.2 ms,火焰锋面到达时间显著增长。6号位置的传感器检测不到火焰信号,说明火焰无法传播至封闭管道末端,原因是冲击波碰撞法兰盘反弹,阻碍了火焰的传播,且越接近管道末端,对火焰传播的抑制作用越明显^[23]。对比图5(b)和(c)可知,煤尘质量浓度对火焰锋面到达时间-距离关系的影响规律与图5(a)是一致的。

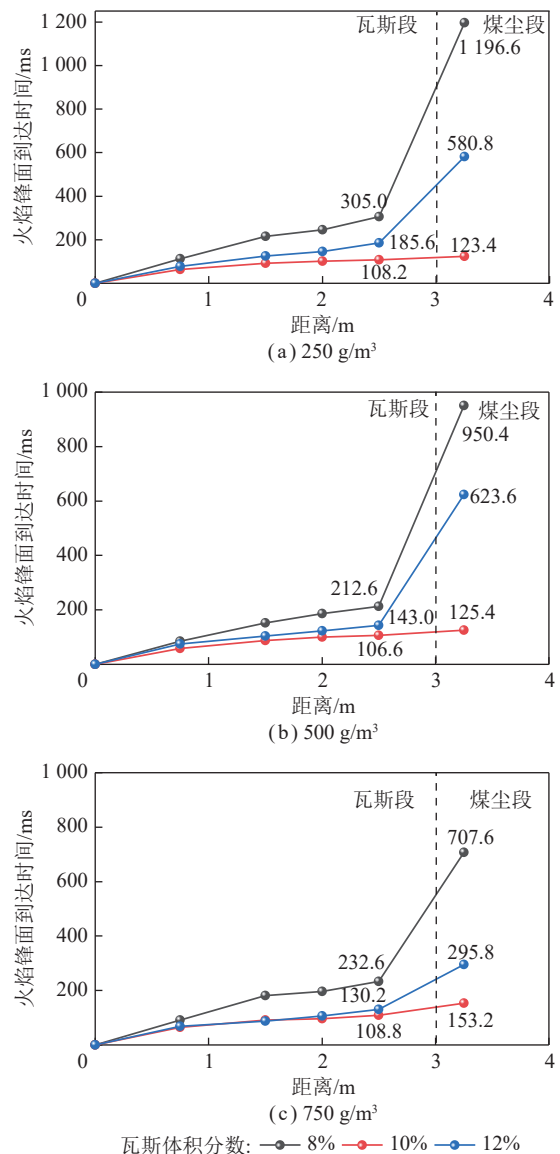


图5 不同煤尘质量浓度下瓦斯体积分数对火焰锋面到达时间的影响

Fig.5 Effect of gas volume fraction on flame front arrival time at different coal dust mass concentrations

2.2.2 火焰传播速度

火焰传播速度是根据火焰锋面位置随时间变化而获得的。图6为不同煤尘质量浓度下瓦斯体积分数对火焰传播速度的影响。由图6可知,火焰传播速度在点火源附近较低,随着传播距离的增大,火焰的传播速度会加快,在达到某一峰值后开始下降,整体呈现出先增后减的趋势。这是因为火焰传播速度在瓦斯爆炸后迅速加快,之后由于瓦斯、氧气体积分数的降低及煤尘爆炸在密闭管道末端产生的反射波和压缩气体的阻力等因素,阻碍了火焰向管道末端的传播,从而降低了火焰传播速度^[30]。火焰传播速度整体上表现为瓦斯体积分数为10%时最大,12%时次之,8%时最小。由图6(a)可知,当煤尘质量浓度为250 g/m³,瓦斯体积分数为10%时,火焰传播速度在瓦斯段持续上升,并在2.5 m处达到最大速度78.1 m/s,之后传播至煤尘段3.25 m处,传播速度下降至49.3 m/s;而瓦斯体积分数8%和12%时火焰传播速度则在2 m处达到峰值,分别为17.1 m/s和23.1 m/s,传播至煤尘段3.25 m处,传播速度分别下降至1.1 m/s和1.9 m/s。这是因为瓦斯体积分数10%为管道内最佳爆炸浓度,瓦斯和氧气充分完全反应,所以在瓦斯段火焰持续加速,并在瓦斯段末端达到速度峰值;而瓦斯体积分数8%条件下在瓦斯段末端没有持续的瓦斯供应,火焰传播速度开始下降,瓦斯体积分数12%条件下,则是在瓦斯后段氧气体积分数不足,导致出现下降趋势。所以峰值位置较瓦斯体积分数10%时提前。正是因为瓦斯体积分数8%和12%条件下,瓦斯体积分数低以及氧气体积分数不足,导致爆炸强度低,波前流速慢,火焰传播速度慢,所以整体比瓦斯体积分数10%爆炸火焰传播速度慢。火焰传播至煤尘段时,尽管受到反向冲击波的阻碍,体积分数为10%瓦斯爆炸产生的火焰仍然能够高速传播;体积分数为8%和12%瓦斯爆炸的火焰传播速度则在瓦斯段就开始下降,导致进入煤尘段后,由于爆燃波不足以卷扬起足够浓度的煤尘云并使之燃烧,火焰传播介质不足,所以火焰传播速度更低。从图6可以看出,当瓦斯体积分数为10%时,煤尘段煤尘质量浓度为250、500、750 g/m³条件下火焰传播速度分别为49.3、39.9、16.9 m/s,呈持续下降的趋势。这是因为煤尘质量浓度为500 g/m³和750 g/m³时,相对于质量浓度250 g/m³的煤尘需要更多能量支持煤尘热解与燃烧。

2.3 煤尘段爆炸压力-火焰耦合

瓦斯爆炸后,爆炸产生的冲击波卷扬起沉积煤尘,使煤尘逐渐悬浮于整个管道中,爆炸产生的火焰与悬浮于空气中的煤尘接触,促使煤尘燃烧和爆炸。爆炸

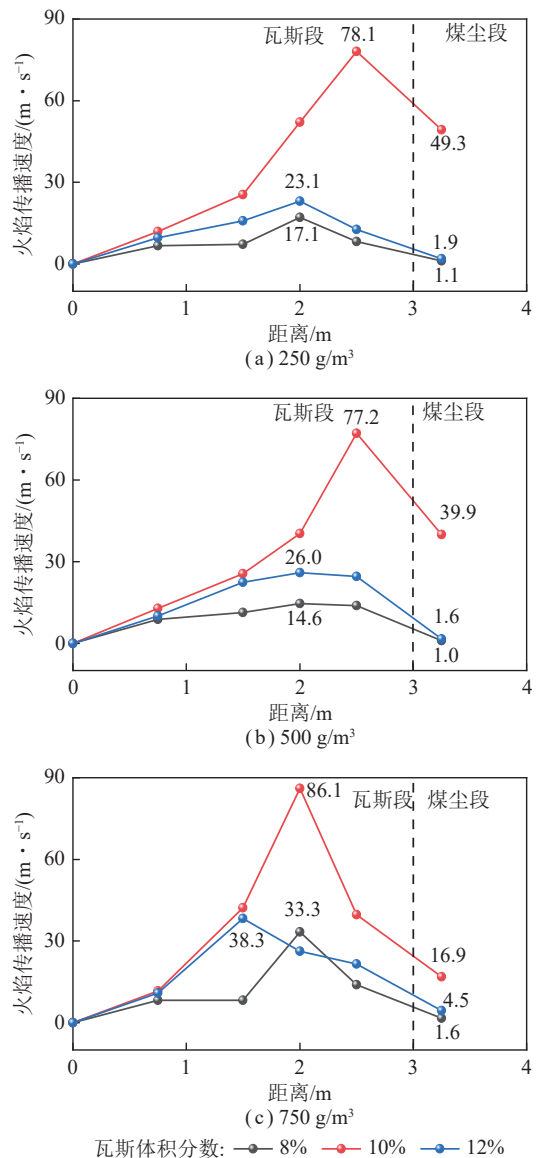


图6 不同煤尘质量浓度下瓦斯体积分数对火焰传播速度的影响

Fig.6 Effect of volume fraction of gas concentration on flame propagation velocity at different coal dust mass concentrations

压力进程图能够直观反应管道内的压力随时间的变化,而光强进程图可以反应火焰信号大小随时间的变化,这对于研究瓦斯爆炸卷扬沉积煤尘爆炸具有重要意义。因为火焰不能传播到密闭管道末端,所以对煤尘段5号传感器位置点进行分析。图7为密闭管道内瓦斯体积分数和煤尘质量浓度对煤尘段5号传感器处爆炸压力-火焰耦合的影响。由图7(a)可知,当瓦斯体积分数为8%,煤尘质量浓度为250 g/m³时,煤尘段5号传感器位置在196.8 ms出现压力,并在321.2 ms时到达第1次压力峰值,此时并未监测到火焰信号,说明此次压力峰值的产生是由瓦斯爆炸的前驱冲击波产生的。之后虽然存在能量的耗散,但是由于瓦斯持续爆炸产生冲击波,在管道约束作用下,使压力在

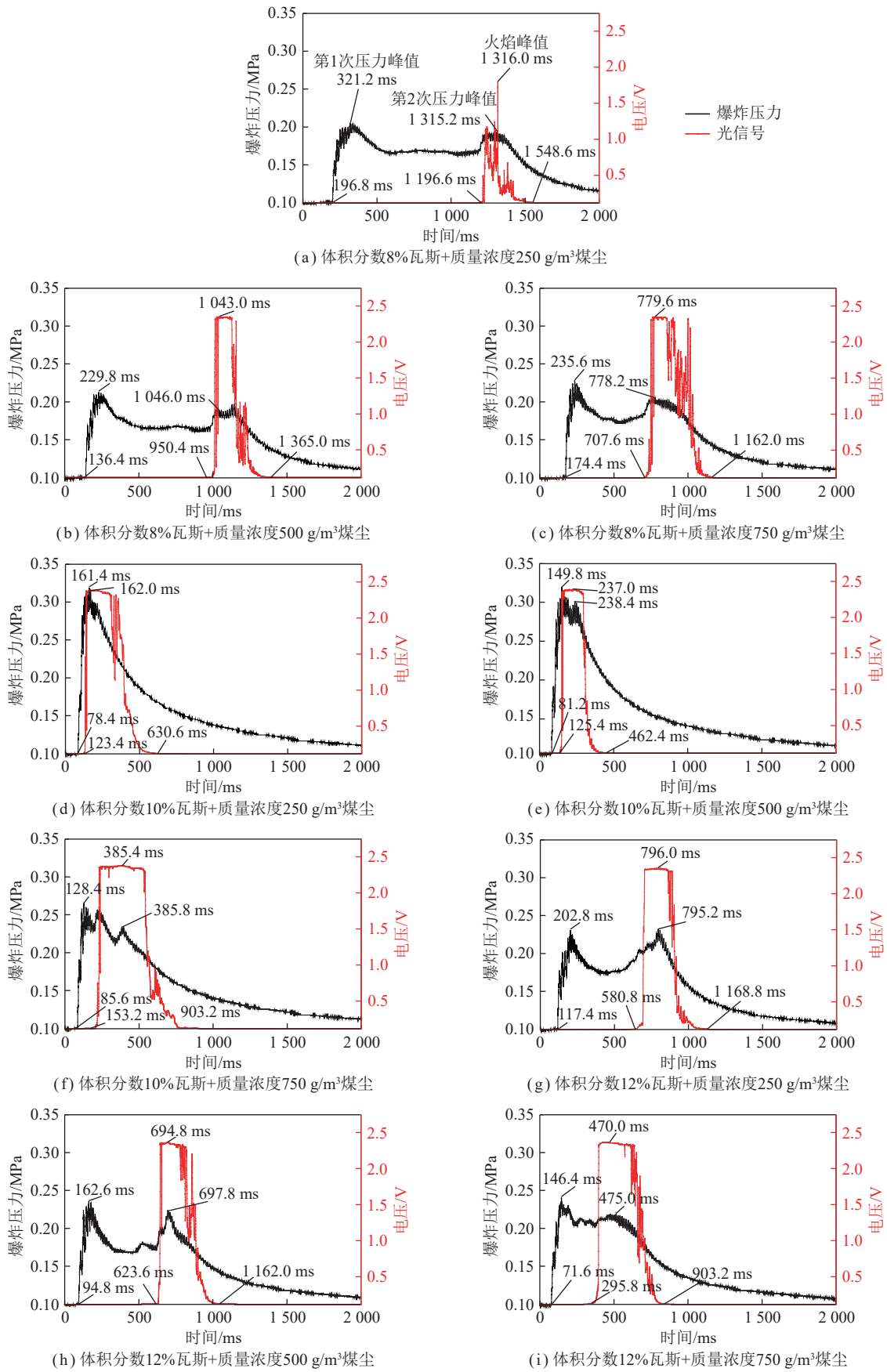


图7 瓦斯体积分数和煤尘质量浓度对煤尘段5号传感器处爆炸压力-火焰耦合的影响

Fig.7 Effect of gas volume fraction and coal dust mass concentration on explosion pressure-flame coupling at sensor No.5 in the coal dust section

略微下降后能够基本维持。在 1 196.6 ms 时,火焰传播至 5 号传感器的位置,此时压力再次开始抬升,表明氧气在火焰作用下与被前驱冲击波卷扬起的煤尘以及热解作用产生的可燃性气体开始反应,导致火焰与压力几乎同时达到峰值。在 1 548.6 ms 时,火焰信号消失,爆炸压力此时逐渐下降向远处延伸,直至反应停止。对比其余工况,除了图 7(d) 仅出现了 1 个压力峰值。这是因为瓦斯体积分数 10%、煤尘质量浓度 250 g/m³ 为管道的最佳爆炸条件,瓦斯爆炸产生的前驱冲击波与煤尘卷扬爆炸发生的时间极短,导致压力峰值时刻重合。

由图 7(a)、(d) 和 (g) 可知,当煤尘质量浓度为 250 g/m³ 时,发现出现压力信号时间分别为 196.8、78.4、117.4 ms,第 1 次压力峰值的时间分别为 321.2、161.4、202.8 ms,第 2 次压力峰值分别为 1 315.2、161.4、795.2 ms,出现火焰信号时刻分别为 1 196.6、123.4、580.8 ms,火焰峰值时刻分别为 1 316.0、162.0、796.0 ms。发现瓦斯体积分数 10% 各时刻大幅提前。由图 7(d)、(e) 和 (f) 可知,当瓦斯体积分数为 10% 时,5 号传感器第 1 次接收到压力信号时间接近,分别为 78.4、81.2、85.6 ms,而体积分数 8% 和 12% 的瓦斯爆炸则在开始接收到压力信号的位置时刻差距较大,这是由于爆炸强度低,致使破膜形状和位置等有差异,不同程度地限制了压力波传播到传感器的时间。

2.4 煤尘卷扬分散特征数值模拟

为了研究密闭管道内瓦斯爆炸卷扬沉积煤尘爆炸的煤尘分布特征,使用 Fluent 模拟软件,瓦斯体积分分数分别设置为 8%、10%、12%,煤尘卷扬区域内的煤尘总流量分别设置为 0.001 6、0.003 2、0.004 8 kg/s,通入时间设为 1 s,煤尘被卷扬后的质量浓度分别达到 250、500、750 g/m³。研究两相爆炸过程中煤尘卷扬分散状况。

2.4.1 建模和网格

模拟是按照水平爆炸管道尺寸建立,直径 0.08 m、长 4 m,两端均封闭。点火区域在管道最右侧,管道从右侧点火端开始 0~3 m 为瓦斯/空气预混区域,3~4 m 为煤尘卷扬区域。网格尺寸:节点 79 960 个,四边形 77 922 个。二维网格划分如图 8 所示。

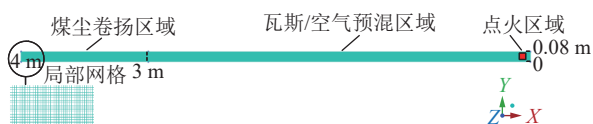
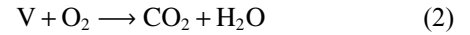
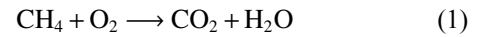


图 8 建模与网格划分

Fig.8 Modeling and meshing

2.4.2 初始参数及边界条件

连续相采用 RNG $k-\epsilon$ 模型,离散相采用 DPM 模型^[22]。采用有限体积法和组分输运模型,主要反应^[10]为



式中,V 为低挥发分煤粉燃烧的挥发物。

DPM 模型主要为了监测煤尘的运移,在煤尘卷扬区域下表面设置煤尘,煤尘的质量根据总流量和时间来改变^[31],湍流扩散采用随机游走模型。

初始化设置点火区域、甲烷空气预混区域以及煤尘卷扬区域,并根据 CH₄ 体积分数改变分别赋值,设置点火温度。煤粉具体参数设置见表 2^[32]。

表 2 初始参数及边界条件设置

Table 2 Initial parameter and boundary condition settings

初始参数	数值
初始压力/MPa	0.01
初始温度/K	300
X/Y方向初始速度/(m·s ⁻¹)	0
湍流动能/(m ² ·s ⁻²)	1
湍流耗散率/(m ² ·s ⁻³)	1
O ₂ 体积分数	0.233
CH ₄ 体积分数	0
CO ₂ 体积分数	0
H ₂ O体积分数	0
V的体积分数	0
煤粉粒径/mm	0.008
点火温度/K	2 000

2.4.3 模拟结果分析

图 9 显示了密闭管道内煤尘段的煤尘质量浓度一定时,不同瓦斯体积分分数下煤尘卷扬分散程度随时间变化过程,其中左侧为管道末端。可以看出,随着前驱冲击波传播至煤尘段的初始阶段,沉积煤尘由平铺逐渐向左端法兰盘移动,之后由于瓦斯爆炸不断产生的前驱冲击波与经过密闭管道末端反射的冲击波的作用,煤尘在靠近法兰盘末端位置开始抬升,随着冲击波的不断传播,煤尘悬浮的长度被拉长,形成“漩涡状”,且中心的漩涡逐渐封闭,煤尘逐渐抬升,直至贴近管道壁上端,在正向冲击波和反射波作用下维持悬浮在管道中。

当瓦斯体积分分数为 8% 时,煤尘在 3.2 ms 开始被抬升,而瓦斯体积分分数为 10% 和 12% 则在 2.8 ms 开

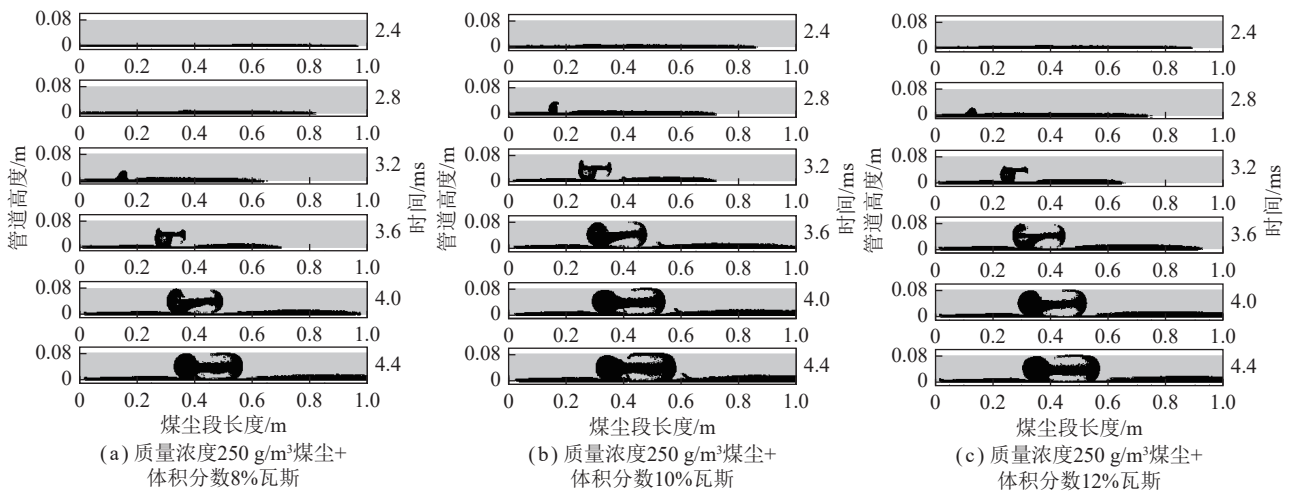


图9 不同瓦斯体积分数下煤尘卷扬分散程度随时间的变化过程

Fig.9 Process of coal dust curl dispersion with time for different gas volume fractions

始升起,且体积分数 10% 条件下煤尘升起的高度更高。这说明瓦斯体积分数为 10% 的爆炸产生的波前流速最高,致使煤粉随着爆炸冲击波快速移动,煤粉更快形成煤尘云。3.6 ms 时,体积分数 10% 的瓦斯扬起的煤尘质量明显多于 12% 和 8% 的瓦斯卷扬起的煤尘质量,煤尘的卷扬分散程度更好,与爆燃波接触的煤粉会更多。导致当煤粉质量一定时,煤尘段的爆炸压力和火焰传播速度是体积分数 10% 的瓦斯优于体积分数 12%、8% 的瓦斯。

图 10 为不同煤尘质量浓度下煤尘卷扬分散随时间的变化过程。由图 10 可以看出,当瓦斯体积分数一定时,爆炸冲击波对煤尘初始阶段 (2.4 ms) 的卷扬

程度几乎无明显变化,这是因为在相同瓦斯体积分数爆炸条件下,冲击波到达煤尘段的时间一致。2.8 ms 时,在 250 g/m^3 和 500 g/m^3 煤尘质量浓度下,煤尘的卷扬高度明显大于 750 g/m^3 煤尘条件,这是因为煤尘质量浓度越大越难以被扬起。3.6 ms 时,3 种煤尘质量浓度下的煤尘云几乎贴近管道壁上端,但是 250 g/m^3 煤尘较 500 g/m^3 和 750 g/m^3 煤尘情况下扬起的煤尘质量更多,卷扬分散程度更好,致使有更多的煤粉与爆燃波接触。说明了当瓦斯体积分数一定时,煤尘卷扬分散效果是质量浓度 250 g/m^3 煤尘优于 500 、 750 g/m^3 煤尘。这间接导致了煤尘段的最大爆炸压力和火焰传播速度在 250 g/m^3 最优。

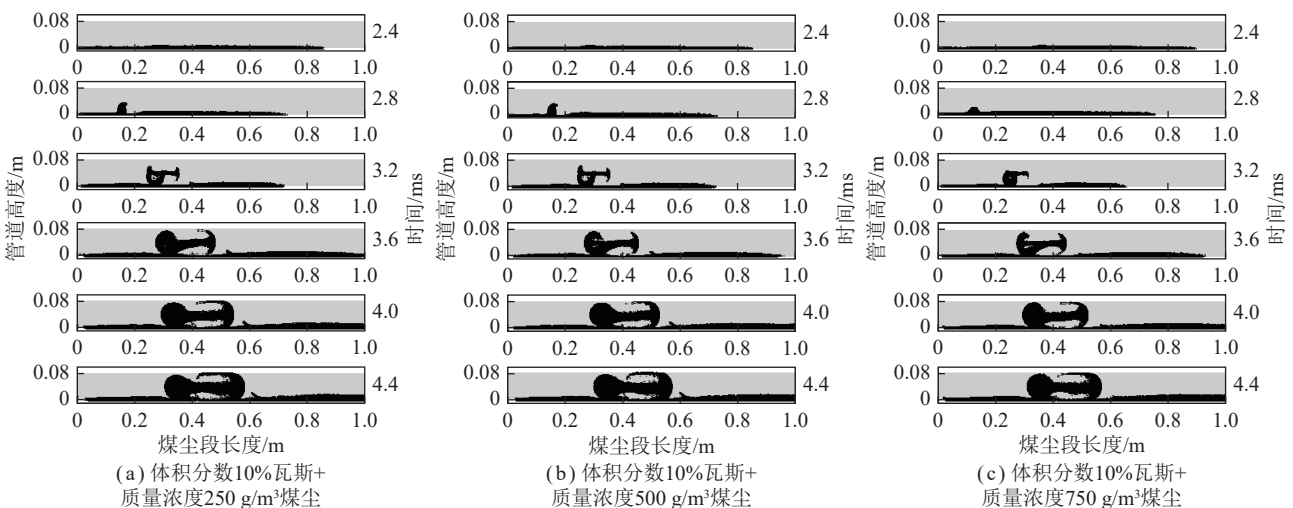


图 10 不同煤尘质量浓度下煤尘卷扬分散程度随时间的变化过程

Fig.10 Variation process of coal dust curl dispersion degree with time under different coal dust mass concentrations

3 结 论

(1) 密闭管道内瓦斯爆炸卷扬沉积煤尘爆炸整体上表现为体积分数 10% 瓦斯产生最大爆炸压力大于

体积分数 12% 和 8% 瓦斯产生的最大爆炸压力;当瓦斯体积分数为 10%,煤尘质量浓度为 250 g/m^3 时,瓦斯段的最大爆炸压力先升后降再升,到达煤尘段后压

力持续上升;随着煤尘质量浓度的增加,瓦斯段的最大爆炸压力变为先升后降,而煤尘段的传播规律不变。当瓦斯体积分数为8%和12%时,随着煤尘质量浓度的增加,最大爆炸压力是增加的;而瓦斯体积分数为10%时则呈下降趋势。

(2) 密闭管道内火焰无法传播至管道末端,火焰锋面到达时间表现为瓦斯体积分数为8%时最长,12%次之,10%时间最短,体积分数10%瓦斯爆炸产生的火焰突破至煤尘段的时间很短;火焰传播速度瓦斯体积分数为10%时最大,12%时次之,8%时最小,当瓦斯体积分数为10%时,火焰在瓦斯段持续加速,到达煤尘段速度大幅下降但仍然较大,而体积分数8%和12%的瓦斯则在瓦斯段先升后降,最后突破煤尘段传播速度很小。

(3) 密闭管道内瓦斯爆炸卷扬沉积煤尘爆炸的压力-时间曲线会出现2个峰值,第1次压力峰值由瓦斯爆炸前驱冲击波产生,之后在持续瓦斯爆炸产生冲击波作用下能够基本维持,当火焰传播至煤尘段后,同时压力又开始上升,第2次压力峰值由瓦斯爆炸火焰引燃沉积煤尘产生,最后火焰信号消失,压力逐渐减小直至整个体系反应停止。

(4) 根据Fluent模拟结果,密闭管道内沉积煤尘在前驱冲击波与经过管道末端固壁反射波的作用下抬升,逐渐贴近管道壁上端,并悬浮于管道中,形成“漩涡状”煤尘云;当煤尘质量浓度为 250 g/m^3 时,体积分数10%瓦斯的卷扬分散程度优于体积分数12%和8%瓦斯;当瓦斯体积分数为10%时,质量浓度 250 g/m^3 煤尘的卷扬分散程度优于质量浓度 500 g/m^3 和 750 g/m^3 煤尘。分散程度好表明有更多煤尘参与燃烧与爆炸,导致此时煤尘的爆炸压力和火焰传播度更大。

参考文献(References):

- [1] 杨前意,石必明,张雷林,等.不同含水率煤尘在瓦斯爆炸诱导下爆炸传播规律研究[J].中国安全生产科学技术,2019,15(3):25-29.
YANG Qianyi, SHI Biming, ZHANG Leilin, et al. Study on the explosion propagation law of coal dust with different moisture content induced by gas explosion[J]. China Safety Production Science and Technology, 2019, 15(3): 25-29.
- [2] 裴蓓,张子阳,潘荣锟,等.不同强度冲击波诱导沉积煤尘爆炸火焰传播特性[J].煤炭学报,2021,46(2):498-506.
PEI Bei, ZHANG Ziyang, PAN Rongkun, et al. Flame propagation characteristics of coal dust explosion induced by different intensity shock waves[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(2): 498-506.
- [3] 刘丹,司荣军.冲击气流诱导对沉积煤尘参与瓦斯爆炸的试验研究[J].煤炭科学技术,2014,42(11):46-49.
LIU Dan, SI Rongjun. Experimental study on the participation of sedimentary coal dust in gas explosion induced by impact airflow[J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(11): 46-49.
- [4] 杨书召,杜学胜.瓦斯煤尘耦合二次爆炸火焰传播实验[J].河南工程学院学报(自然科学版),2020,32(1):20-23.
YANG Shuzhao, DU Xuesheng. Experimental study on flame propagation of gas coal dust coupled secondary explosion[J]. Journal of Henan University of Engineering (Natural Science Edition), 2020, 32(1): 20-23.
- [5] 尉存娟,谭迎新,胡双启,等.瓦斯爆炸诱导瓦斯-煤尘二次爆炸的试验研究[J].中国安全科学学报,2014,24(12):29-32.
WEI Cunjuan, TAN Yingxin, HU Shuangqi, et al. Experimental study on the induction of gas coal dust secondary explosions by gas explosions[J]. Chinese Journal of Safety Sciences, 2014, 24(12): 29-32.
- [6] NIU Y, ZHANG L, SHI B M. Experimental study on the explosion-propagation law of coal dust with different moisture contents induced by methane explosion[J]. Powder Technology, 2020, 361: 507-511.
- [7] HOU Z, WANG D, ZHU Y. Experimental study on pressure wave-induced explosion of different types of deposited coal dust[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2023, 172: 825-835.
- [8] 汤其建,秦汝祥,戴广龙.索特平均直径对煤粉及其在瓦斯气氛下爆炸特性的影响[J].煤炭学报,2021,46(2):489-497.
TANG Qijian, QIN Ruxiang, DAI Guanglong. The influence of So-te average diameter on coal powder and its explosion characteristics in gas atmosphere[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(2): 489-497.
- [9] 宫广东,刘庆明,胡永利,等.管道中煤尘爆炸特性实验[J].煤炭学报,2010,35(4):609-612.
GONG Guangdong, LIU Qingming, HU Yongli, et al. Experiment on explosion characteristics of coal dust in pipelines[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(4): 609-612.
- [10] 李润之.瓦斯爆炸诱导沉积煤尘爆炸的数值模拟[J].爆炸与冲击,2010,30(5):529-534.
LI Runzhi. Numerical simulation of gas explosion induced sedimentary coal dust explosion[J]. Explosion and Shock, 2010, 30(5): 529-534.
- [11] 李润之.不同总量沉积煤尘在瓦斯爆炸诱导下的传播规律模拟研究[J].矿业安全与环保,2013,40(1):17-20,25.
LI Runzhi. Simulation study on the propagation law of coal dust with different total deposits induced by gas explosion[J]. Mining Safety and Environmental Protection, 2013, 40(1): 17-20,25.
- [12] 郗雪辰.障碍物对激波诱导沉积煤粉影响的数值模拟研究[D].太原:中北大学,2015.
XI Xuechen. Numerical simulation study on the effect of obstacles on shock induced deposition of coal powder [D]. Taiyuan: North University of China, 2015.
- [13] 魏嘉.煤矿瓦斯煤尘爆炸数值模拟研究[D].太原:中北大学,2015.
WEI Jia. Numerical simulation study on gas and dust explosion in coal mines [D]. Taiyuan: North University of China, 2015.
- [14] 王新.瓦斯浓度对爆炸传播及瓦斯爆炸诱导煤尘爆炸的影响研

- 究[D]. 沈阳: 东北大学, 2013.
- WANG Xin. Research on the influence of gas concentration on explosion propagation and gas explosion induced coal dust explosion [D]. Shenyang: Northeastern University, 2013.
- [15] 林柏泉, 孙豫敏, 朱传杰, 等. 爆炸冲击波扬尘过程中的颗粒动力学特征[J]. 煤炭学报, 2014, 39(12): 2453-2458.
- LIN Baiquan, SUN Yumin, ZHU Chuanjie, et al. Particle dynamics characteristics during explosive shock wave dust generation[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(12): 2453-2458.
- [16] 朱传杰, 林柏泉, 江丙友, 等. 基于欧拉-欧拉方法的冲击波扬尘特征及其影响因素[J]. 中国矿业大学学报, 2012, 41(5): 733-738.
- ZHU Chuanjie, LIN Baiquan, JIANG Bingyou, et al. Characteristics and influencing factors of shock wave dust based on the Euler-Euler method[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2012, 41(5): 733-738.
- [17] 朱传杰. 爆炸冲击波前流场扬尘特征及其多相破坏效应[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2011.
- ZHU Chuanjie. Dust characteristics and multiphase damage effects of explosion shock wave front flow field [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2011.
- [18] 景国勋, 刘闯, 段新伟, 等. 半封闭管道内瓦斯-煤尘耦合爆炸实验研究[J]. 煤炭学报, 2019, 44(S1): 157-163.
- JING Guoxun, LIU Chuang, DUAN Xinwei, et al. Experimental study on gas coal dust coupling explosion in a semi closed pipeline[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(S1): 157-163.
- [19] 景国勋, 邵泓源, 吴昱楼, 等. 半封闭管道内瓦斯煤尘爆炸火焰传播特性试验[J]. 安全与环境学报, 2020, 20(4): 1321-1326.
- JING Guoxun, SHAO Hongyuan, WU Yulou, et al. Experimental study on flame propagation characteristics of gas and coal dust explosions in semi enclosed pipelines[J]. Journal of Safety and Environment, 2020, 20(4): 1321-1326.
- [20] 段新伟, 吴昱楼, 景国勋, 等. 半封闭管道内瓦斯煤尘爆炸火焰传播规律研究[J]. 安全与环境学报, 2020, 20(2): 524-529.
- DUAN Xinwei, WU Yulou, JING Guoxun, et al. Study on the flame propagation law of gas and coal dust explosions in semi enclosed pipelines[J]. Journal of Safety and Environment, 2020, 20(2): 524-529.
- [21] SONG Y, ZHANG Q. Criterion and propagation process of spark-induced dust layer explosion[J]. Fuel, 2020, 371: 117205.
- [22] SONG Y, ZHANG Q WU W. Interaction between gas explosion flame and deposited dust[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2017, 111: 775-784.
- [23] SONG Y, ZHANG Q. Multiple explosions induced by the deposited dust layer in enclosed pipeline[J]. Journal of Hazardous Materials, 2019, 317: 423-432.
- [24] 李海涛, 陈晓坤, 邓军, 等. 开放管道内煤粉云形成机制及爆炸过程火焰动态行为数值模拟[J]. 煤炭学报, 2021, 46(8): 2600-2613.
- LI Haitao, CHEN Xiaokun, DENG Jun, et al. Numerical simulation of coal dust cloud formation mechanism and flame dynamic behavior during explosion in open pipelines[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(8): 2600-2613.
- [25] 司荣军, 牛宜辉, 王磊, 等. 煤矿瓦斯煤尘爆炸的动力学特性研究进展[J]. 工程爆破, 2023, 29(1): 30-39.
- SI Rongjun, NIU Yihui, WANG Lei, et al. Research progress on dynamic characteristics of coal mine gas and dust explosions[J]. Engineering Blasting, 2023, 29(1): 30-39.
- [26] 朱云飞, 王德明, 赵安宁, 等. 大尺度直巷中瓦斯爆炸传播规律及影响因素研究[J]. 煤炭技术, 2023, 42(9): 169-172.
- ZHU Yunfei, WANG Deming, ZHAO Anning, et al. Research on the propagation law and influencing factors of gas explosions in large-scale straight tunnels[J]. Coal Technology, 2023, 42(9): 169-172.
- [27] 王者鹏. 低浓度瓦斯对煤尘爆炸下限的影响研究[J]. 煤矿安全, 2017, 48(2): 26-27, 32.
- WANG Zhepeng. Research on the influence of low concentration gas on the lower limit of coal dust explosion[J]. Safety in Coal Mines, 2017, 48(2): 26-27, 32.
- [28] 李润之. 瓦斯煤尘共存条件下的煤尘云爆炸下限[J]. 爆炸与冲击, 2018, 38(4): 913-917.
- LI Runzhi. The lower limit of coal dust cloud explosion under the coexistence of gas and coal dust[J]. Explosion and Shock, 2018, 38(4): 913-917.
- [29] 肖高军. 以聚四氟乙烯为核的复合粒子的制备及应用性能[D]. 杭州: 浙江大学, 2010.
- XIAO Gaojun. Preparation and application performance of composite particles with polytetrafluoroethylene as core [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010.
- [30] 王培龙. 密闭管道内一段瓦斯爆炸引燃瓦斯二次爆炸试验研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2023.
- WANG Peilong. Experimental study on secondary gas explosion caused by a gas explosion in a closed pipeline [D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2023.
- [31] 孙跃. 瓦斯爆炸引燃悬浮煤尘参与耦合爆炸的特性研究[D]. 焦作: 河南理工大学, 2023.
- SUN Yue. Characterization of gas explosion igniting suspended coal dust involved in coupled explosion [D]. Jiaozuo: Henan University of Science and Technology, 2023.
- [32] 班涛. 复杂条件下瓦斯煤尘混合爆炸特性及冲击波传播规律研究[D]. 焦作: 河南理工大学, 2022.
- BAN Tao. Research on the characteristics of gas and coal dust mixture explosion and shock wave propagation law under complex conditions [D]. Jiaozuo: Henan University of Science and Technology, 2022.