

中文引用格式:贾进章,田秀媛. 钾盐粉体抑制瓦斯爆炸超压特性研究[J]. 中国安全科学学报,2025,35(7):48-56.

英文引用格式:JIA Jinzhang, TIAN Xiuyuan. Study on characteristics of potassium salt powder in inhibiting gas explosion overpressure[J]. China Safety Science Journal, 2025,35(7):48-56.

钾盐粉体抑制瓦斯爆炸超压特性研究^{*}

贾进章^{1,2}教授, 田秀媛^{**1,2}

(1 辽宁工程技术大学 安全科学与工程学院, 辽宁 阜新 123000;

2 辽宁工程技术大学 矿山热动力灾害与防治教育部重点实验室, 辽宁 葫芦岛 125105)

中图分类号:X932

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.07.1624

基金项目:国家自然科学基金资助(52374203, 52174183)。

【摘要】 为防范矿井瓦斯爆炸事故,深入探究钾盐粉体的抑爆性能及其在管网中的作用特征,利用包含并联管路、分岔管路和角联管路的管网,开展在 N_2 驱动下的 $KHCO_3$ 、 $K_2C_2O_4$ 和 KH_2PO_4 这3种钾盐粉体抑制瓦斯爆炸的试验,通过热重(TG)分析粉体的热解特性,结合超压变化监测,探究不同钾盐粉作用下的爆炸超压和超压衰减系数,并借助Chemkin-Pro模拟软件剖析抑爆机制。结果表明:3种粉体抑爆后冲击波压力叠加衰减过程消失,超压时程曲线呈单峰值特性, $KHCO_3$ 粉体对爆炸超压峰值的抑制效果最佳,下降幅度达83.2%~88.9%, $K_2C_2O_4$ 次之, KH_2PO_4 相对较弱;斜角联支管4中的压力衰减程度较其他支管中更大;支管4和拐弯段能够借助自身结构特性提升超压衰减效果,是布设抑制剂的优选位置, $KHCO_3$ 能最大程度利用这一结构特性增强抑爆效果;支线段冲击波超压衰减系数 K_2 出现了小于1的情况,添加 $K_2C_2O_4$ 和 KH_2PO_4 粉体会加剧这一现象; $KHCO_3$ 工况下自由基含量最低,抑爆效果最佳,其次是 $K_2C_2O_4$ 工况,最后是 KH_2PO_4 工况。

【关键词】 钾盐粉体; 瓦斯爆炸; 爆炸超压; 超压衰减; 管网

Study on characteristics of potassium salt powder in inhibiting gas explosion overpressure

JIA Jinzhang^{1,2}, TIAN Xiuyuan^{1,2}

(1 College of Safety Science and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin Liaoning 123000, China; 2 Key Laboratory of Mine Thermodynamic disasters and Control of Ministry of Education, Liaoning Technical University, Huludao Liaoning 125105, China)

Abstract: To prevent and contain mine gas explosion accidents, the explosion suppression performance of potassium salt powders and their action laws in the pipe network were deeply explored. In a pipe network with parallel pipelines, branching pipelines, and angular connecting pipelines, an experimental study on the suppression of gas explosions by three potassium salt powders, namely $KHCO_3$, $K_2C_2O_4$, and KH_2PO_4 , driven by N_2 , was carried out. The pyrolysis characteristics of the powders were studied through thermogravimetric (TG) analysis. By combining explosion experiments, the overpressure changes were monitored. The explosion overpressure and overpressure attenuation coefficient under the action of

* 文章编号:1003-3033(2025)07-0048-09; 收稿日期:2025-03-01; 修稿日期:2025-05-07

** 通信作者:田秀媛(1997—),女,辽宁大连人,博士研究生,主要研究方向为瓦斯灾害防治。E-mail:1406784586@qq.com。

potassium salt powder were explored. Moreover, the explosion suppression mechanism was analyzed with the assistance of the Chemkin-Pro simulation software. The results indicate that after the explosion suppression by the three powders, the superposition and attenuation process of the shock wave pressure is eliminated, and the overpressure time-history curve exhibits a "single peak value" characteristic. Among them, the KHCO_3 powder has the best suppression effect on the explosion overpressure peak value, with a decrease range of 83.2% – 88.9%. $\text{K}_2\text{C}_2\text{O}_4$ ranks second, and KH_2PO_4 is relatively weaker. The pressure attenuation degree in the oblique angular connecting branch pipe 4 is greater than that in other branch pipes. Both the branch pipe 4 and the turning section can leverage their own structural characteristics to enhance the overpressure attenuation effect, and they are regarded as preferred locations for installing explosive inhibitors. KHCO_3 is able to maximize the utilization of this structural characteristic to enhance the explosion suppression effect. Additionally, the shock wave overpressure attenuation coefficient K_2 of the branch pipeline section shows a situation where it is less than 1. This phenomenon is found to be exacerbated by the addition of $\text{K}_2\text{C}_2\text{O}_4$ and KH_2PO_4 powders. Through the analysis using the Chemkin-Pro simulation software, it is concluded that the free radical content under the KHCO_3 working condition is the lowest, and the explosion suppression effect is the best, followed by the $\text{K}_2\text{C}_2\text{O}_4$ working condition, and finally the KH_2PO_4 working condition.

Keywords: potassium salt powder; gas explosion; explosion overpressure; overpressure attenuation; pipe network

0 引言

在煤矿安全生产领域,瓦斯爆炸是极具破坏性的灾害之一。其发生时,瞬间产生的高温、冲击波以及大量有毒气体,对作业人员生命安全构成严重威胁。因此,开展瓦斯爆炸抑制技术研究,对于有效防范和遏制矿井瓦斯爆炸事故,保障煤矿安全生产,具有极为重要的现实意义^[1-2]。

目前,常用的瓦斯爆炸抑制剂包括惰性气体、细水雾、粉体等^[3-4]。惰性气体通过稀释爆炸源内的瓦斯和氧气,降低爆炸概率和强度^[5]。细水雾因价格低、来源广、比热容高而被广泛应用,其抑爆机制包括物理抑爆(冷却吸热、物理惰化、阻隔辐射热)和化学抑爆(消除关键自由基)^[6-7]。粉体抑制剂则因便携、易于存储且经济高效而成为研究热点^[8-9]。WANG Yan 等^[10]发现,碳酸氢钾(KHCO_3)粉体对乙烯(C_2H_4)爆炸有抑制作用,且效果优于磷酸二氢钾(KH_2PO_4)粉末; KHCO_3 粉末在抑制火焰传播速度方面效果更好,然而在降低火焰亮度方面,其性能不如 KH_2PO_4 粉末。王燕等^[11]验证了草酸钾($\text{K}_2\text{C}_2\text{O}_4$)、草酸钠($\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4$)、草酸亚铁(FeC_2O_4)粉体对甲烷爆炸有抑制作用,由强到弱依次为 $\text{K}_2\text{C}_2\text{O}_4$ 、 $\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4$ 和 FeC_2O_4 。WANG Yueying 等^[12]发现, KHCO_3 和水合草酸钾($\text{K}_2\text{C}_2\text{O}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$)对自由基有较好的抑制作用。JIA Jinzhang 等^[13]研究发

现, KHCO_3 粉体粒径和喷粉压力对抑制爆炸效果有显著影响,当粒径为 50~75 μm ,喷粉压力为 0.2 MPa 时,抑制爆炸效果最佳。王晓玲等^[14]研究发现,含钾盐细水雾在燃气泄漏场景下具有良好的抑爆能力,其中 $\text{K}_2\text{C}_2\text{O}_4$ 的抑爆能力最强,其次为碳酸钾(K_2CO_3)与氯化钾(KCl)。然而现有研究侧重于在单段长直管道^[15-16]和球形爆炸罐^[17-18]等封闭容器中开展,与实际管网的联系不紧密,结论普适性不强,且钾盐粉体抑爆性能之间的比较以及超压衰减特征有待深入研究。

鉴于此,笔者拟在包含并联管路、分岔管路和有倾角的角联管路的复杂管网结构中,选取常见的 3 种钾盐粉体(KHCO_3 、 $\text{K}_2\text{C}_2\text{O}_4$ 、 KH_2PO_4),开展在 N_2 驱动下针对 9.5% 瓦斯/空气爆炸的抑制试验。通过分析不同钾盐粉体抑爆剂作用下的爆炸超压、超压衰减系数,以及探究抑爆剂对不同管路结构超压衰减特征的影响,获取更具普适性的数据,以弥补单一监测场景(如单段长直管道或球形爆炸罐)研究的局限性,以期为矿井管网瓦斯爆炸的防控提供更贴合实际的理论依据与技术支持。

1 钾盐粉体抑爆试验装置与方法

1.1 试验系统

试验系统由角联管网、动态数据采集系统、喷粉

系统和点火系统构成,如图 1 所示。角联管网的每根管道均设有传感器插孔,用于监测压力变化。动态数据采集系统配备压力传感器,其量程为 0 ~ 10 MPa,响应时间为 1 ms,以及动态数据采集仪,其相对精度为 0.2%,连续采集频率为 10 kHz/CH。喷粉系统以储气瓶中的 N_2 为驱动气体,通过气泵控制喷粉压力,设定 N_2 喷粉气压为 0.2 MPa,喷粉时间为 300 ms。点火系统由高能点火器、高能火花塞、耐高压耐高温电缆、电源电缆和外触发装置组成,点火控制箱与外部触发线相连,火花塞置于爆炸室前端,点火电压约 2 200 V,单次储能 30 J,可有效引发瓦斯/空气混合物爆炸。

1.2 试验工况

选用粒径范围为 75 ~ 100 μm 的 KHCO_3 、 $\text{K}_2\text{C}_2\text{O}_4$ 、 KH_2PO_4 作为抑爆剂^[6,19],并参照文献[20]将每种粉体的质量设定为 30 g。瓦斯体积分数设置

为 9.5%,采用道尔顿分压法进行配气,喷粉系统以储气瓶中的 N_2 作为驱动气体。各组件通过内螺纹与管道相连,并在连接处安装硅胶垫片,以增强气密性。每次试验前,依次将 KHCO_3 、 $\text{K}_2\text{C}_2\text{O}_4$ 、 KH_2PO_4 粉体均匀放置于管道底部(图 1),使用聚四氟乙烯薄膜分隔爆炸腔体和管道。随后,将爆炸腔体抽真空,再通入体积分数为 9.5% 的瓦斯试验气体,同时保持管道中为常压空气。完成配气后,封闭进气孔和泄爆口,静置 30 s。接着,打开气泵,使储气罐内的 N_2 快速喷出,吹起管道内的抑爆粉体。经过 600 ms 的静止后,接通外触发装置开关,确保点火器与数据采集系统同步启动。待装置信号灯亮起后,按下外触发装置上的触发按钮,完成点火。试验结束后,排出管道中的废气,并对管道进行洗气处理,为下一次试验做准备。

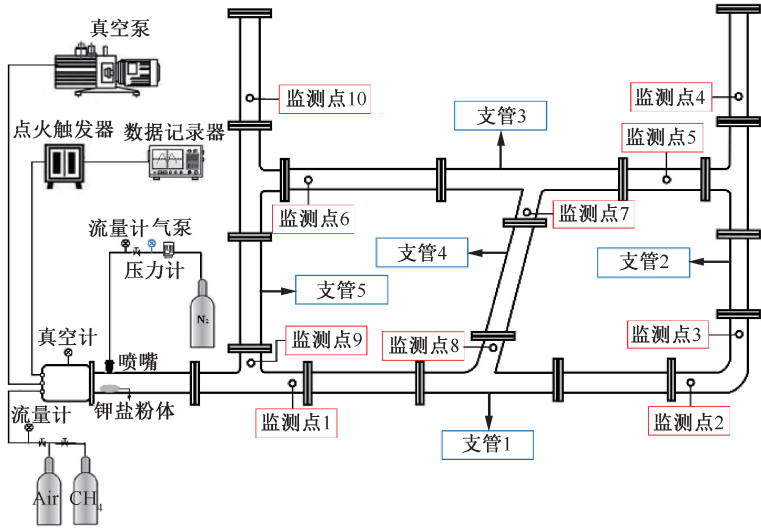


图 1 试验系统

Fig. 1 Experimental system

2 钾盐粉体热解与超压影响特性

2.1 钾盐粉体热解特性

在 10 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的升温速率、40 ~ 800 $^{\circ}\text{C}$ 的温度范围以及氮气气氛条件下,测试 KHCO_3 、 $\text{K}_2\text{C}_2\text{O}_4$ 和 KH_2PO_4 的热解特性,3 种粉体的热重 (Thermogravimetric Analysis, TG) 和差示扫描量热 (Differential Scanning Calorimetry, DSC) 曲线如图 2 所示。

KHCO_3 的热解过程可分为 3 个阶段,第 1 阶段为 40 ~ 134.7 $^{\circ}\text{C}$,失重率不足 1%,主要是由于高温导致 KHCO_3 中水分的蒸发;第 2 阶段为 134.7 ~

210.2 $^{\circ}\text{C}$,质量损失 31.3%, KHCO_3 热解生成 K_2CO_3 、 CO_2 和 H_2O ,该阶段存在明显的吸热峰,吸热量为 643.6 J/g;第 3 阶段为 210.2 ~ 800 $^{\circ}\text{C}$,质量基本保持不变,当温度达到 270 $^{\circ}\text{C}$ 时, K_2CO_3 受热分解生成 K_2O 和 CO_2 。

$\text{K}_2\text{C}_2\text{O}_4$ 的热解过程分为 2 个主要阶段,第 1 阶段为 40 ~ 84.9 $^{\circ}\text{C}$,第 2 阶段为 80.9 ~ 577.8 $^{\circ}\text{C}$,期间存在 2 段明显的质量损失。第 1 段质量损失发生在 84.9 ~ 145.7 $^{\circ}\text{C}$,质量损失为 8.7%,主要是由于 $\text{K}_2\text{C}_2\text{O}_4$ 中结合水的急剧减少。第 2 段质量损失则在 385.4 ~ 577.8 $^{\circ}\text{C}$, $\text{K}_2\text{C}_2\text{O}_4$ 在此温度期间开始分解,生成 K_2CO_3 ,质量损失约为 15%。当温度超过

577.8℃后,质量基本保持稳定。DSC 曲线显示,整个热解过程存在 2 个吸热峰和 1 个放热峰,但总体放热量大于吸热量,表明整个热解过程为放热过程,放热量为 371.7 J/g。

KH₂PO₄ 粉体的热解过程则分为 3 个阶段。第 1 阶段为 40 ~ 170.3℃,失重率低于 1%,主要是由于粉体中少量吸附水分的蒸发。第 2 阶段为 170.3~421.9℃,失重率为 14.4%,主要是 KH₂PO₄ 吸热分解为 KPO₃ 和水蒸气。DSC 曲线显示此阶段出现明显的吸热峰。第 3 阶段为 421.9 ~ 800℃,质量变

化不大。整体 DSC 曲线上呈现不同的吸热峰, KH₂PO₄ 的吸热量为 436.2 J/g。

对比分析 TG 过程,可以明确 3 中钾盐粉体热解的气态产物:KHCO₃ 热解主要生成 K₂CO₃、K₂O、CO₂ 和 H₂O, K₂C₂O₄ 热解主要生成 K₂CO₃、CO、CO₂, KH₂PO₄ 热解主要生成 KPO₃ 和 H₂O。在热解过程中, KHCO₃ 的吸热量明显大于 KH₂PO₄, 而 K₂C₂O₄ 的热解过程属于放热过程。此外, KHCO₃ 能够产生更多的惰性气体。因此, KHCO₃ 具有更好的吸热特性。

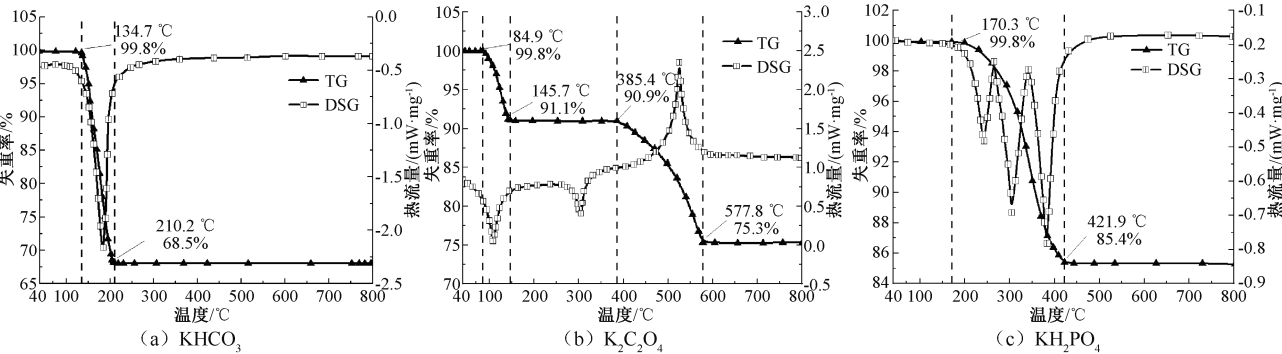


图 2 3 种粉体 TG 和 DSC 分析

Fig. 2 Thermogravimetric analysis of three powders

2.2 抑制爆炸超压特性

图 3a 和图 3b 为在不同粉体抑爆剂作用下,监测点 1(T₁)与监测点 2(T₂)的超压时程曲线。在纯瓦斯爆炸工况下,冲击波压力在传播过程中出现多次叠加与衰减,形成多个超压极值点。T₁ 处的爆炸超压在 0.209 s 时达到峰值 0.453 MPa, T₂ 处的爆炸超压在 0.252 s 时达到峰值 0.421 MPa。

加入粉体抑爆剂后,超压峰值大幅下降,且达到峰值所需的时间明显增加。T₁ 处,加入 KHCO₃、K₂C₂O₄、KH₂PO₄ 粉体后的超压峰值分别为 0.076、0.112、0.226 MPa,相较于纯瓦斯爆炸工况,分别下降 83.2%、75.3%、50.1%; T₂ 处,超压峰值分别为 0.068、0.097、0.211 MPa,相较于纯瓦斯爆炸工况,分别下降 83.8%、76.9%、49.9%。

图 3c 和图 3d 为在不同粉体抑爆剂作用下,监测点 3(T₃)与监测点 4(T₄)的超压时程曲线。在纯瓦斯爆炸工况下,由于支管位置的影响,支管 2 中冲击波压力的叠加与衰减次数明显多于支管 1, T₃ 与 T₄ 的超压峰值出现时间较支管 1 延迟。T₃ 在 0.574 s 时达到超压峰值 0.384 MPa, T₄ 在 0.616 s 时达到超压峰值 0.352 MPa。

加入粉体抑爆剂后,超压峰值显著降低,且达到

峰值的时间明显增加。在加入 KHCO₃、K₂C₂O₄、KH₂PO₄ 粉体的工况下, T₃ 的超压峰值分别为 0.057、0.092、0.189 MPa,相较于纯瓦斯爆炸工况,分别降低 85.2%、76.0%、50.8%; T₄ 的超压峰值分别为 0.039、0.080、0.172 MPa,相较于纯瓦斯爆炸工况,分别降低 88.9%、77.3%、51.3%。

图 4a 和图 4b 为在不同粉体抑爆剂作用下,监测点 5(T₅)与监测点 6(T₆)的超压时程曲线。在纯瓦斯爆炸工况下,支管 3 中冲击波压力的叠加与衰减次数较支管 2 无明显增加,但总体上支管 3 中冲击波的升降次数略有增加,主要是由于支管 3 连通的管路更多,冲击波压力受其他管路中冲击波的影响更为显著。T₅ 的爆炸超压在 0.769 s 时达到峰值 0.379 MPa; T₆ 的爆炸超压在 0.513 s 时达到峰值 0.412 MPa。

加入 KHCO₃、K₂C₂O₄、KH₂PO₄ 粉体后, T₅ 的超压峰值分别为 0.055、0.088、0.188 MPa,相较于纯瓦斯爆炸工况,分别降低了 85.5%、76.8%、50.4%; T₆ 的超压峰值分别为 0.062、0.093、0.208 MPa,相较于纯瓦斯爆炸工况,分别降低了 84.9%、77.4%、49.5%。

图 4c 和图 4d 为在不同粉体抑爆剂作用下,监

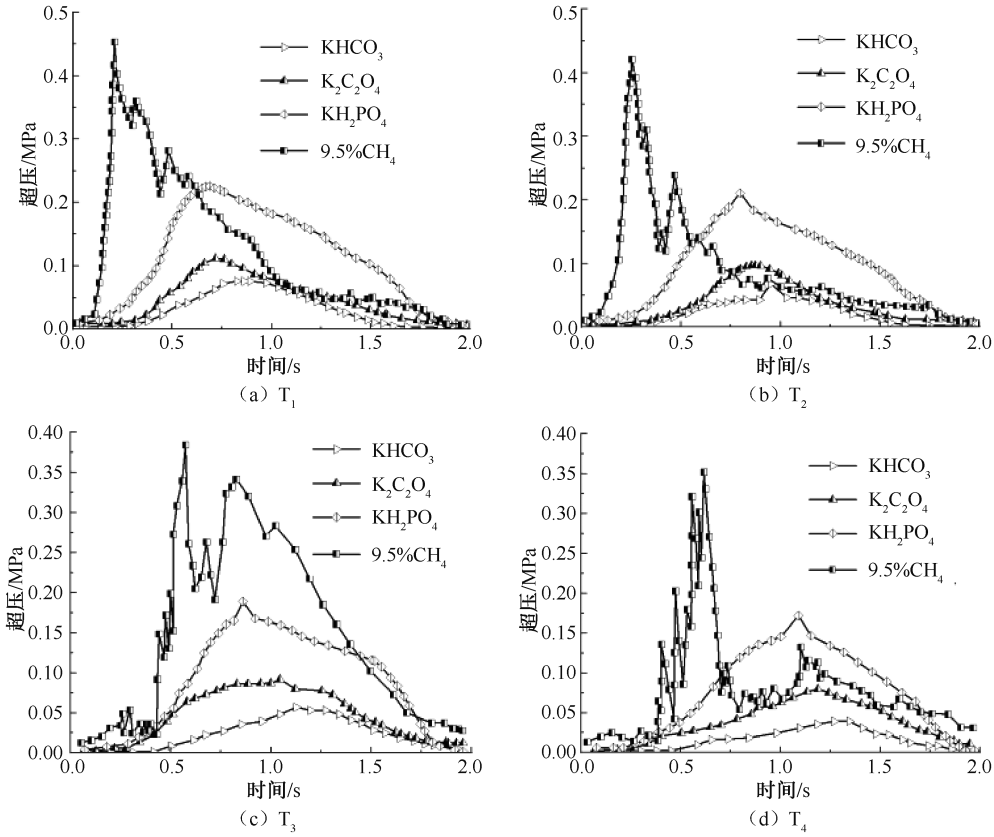


图3 含不同粉体抑爆前后 T_1 — T_4 超压变化

Fig.3 Overpressure changes at monitoring points 1—4 before and after explosion suppression with different powders

测点 7(T_7)与监测点 8(T_8)的超压时程曲线。在纯瓦斯爆炸工况下, T_8 的超压峰值出现时间较 T_7 提前了 0.586 s, T_8 的超压峰值在 0.403 s 时达到 0.408 MPa,而 T_7 处的超压峰值因受到多股冲击波压力的叠加作用,在 0.989 s 时达到 0.372 MPa。

在加入 KHCO_3 、 $\text{K}_2\text{C}_2\text{O}_4$ 、 KH_2PO_4 粉体后, T_7 的超压峰值分别为 0.054、0.081、0.181 MPa,相较于纯瓦斯爆炸工况,分别降低 85.5%、78.2%、51.3%; T_8 的超压峰值分别为 0.062、0.092、0.205 MPa,相较于纯瓦斯爆炸工况,分别降低 85.0%、77.5%、49.8%。

图 5a 和图 5b 为在不同粉体抑爆剂作用下,监测点 9(T_9)与监测点 10(T_{10})的超压时程曲线。在纯瓦斯爆炸工况下,支管 5 中 2 个监测点的超压变化趋势与支管 2 相似,均因正向冲击波的作用而达到超压峰值。 T_9 的超压在 0.435 s 时达到峰值 0.395 MPa; T_{10} 的超压在 0.495 s 时达到峰值 0.369 MPa。

在加入 KHCO_3 、 $\text{K}_2\text{C}_2\text{O}_4$ 、 KH_2PO_4 粉体后, T_9 的超压峰值分别为 0.060、0.090、0.196 MPa,相较于纯瓦斯爆炸工况,分别下降 84.8%、77.2%、50.4%; T_{10} 的超压峰值分别为 0.053、0.079、0.179 MPa,相较于

纯瓦斯爆炸工况,分别下降 85.6%、78.6%、51.5%。

分析支管 1—支管 5 中 10 个监测点的爆炸超压时程变化曲线可知;在未添加抑爆剂的工况下,各监测点的超压时程曲线均呈现出明显的超压峰值和多个超压极大值。这些超压极大值的出现主要是由于冲击波在管道内壁的多次反射以及受到其他管路中反向冲击波的叠加影响,导致冲击波相背传播并形成多重振荡。而在加入 N_2 协同钾盐粉体后,各监测点的超压时程曲线均呈现出单峰值特性。这种单峰值特性主要归因于抑爆剂有效抑制了冲击波的前向传播,减少了冲击波在管道内壁的反射次数,以及削弱了各管道受到其他管路反向冲击波叠加的影响,从而减少了冲击波相背传播形成的多重振荡,进而显著降低了各监测点处的超压峰值。因此,加入抑爆剂后,多个超压极大值消失,超压时程曲线呈现出单峰值特性。

其中, KHCO_3 粉体工况下爆炸超压峰值的下降幅度为 83.2%~88.9%, $\text{K}_2\text{C}_2\text{O}_4$ 粉体工况下爆炸超压峰值的下降幅度为 75.3%~78.6%, KH_2PO_4 粉体工况下爆炸超压峰值的下降幅度为 49.5%~51.5%。由此可见:在 N_2 协同作用下,3 种粉体对

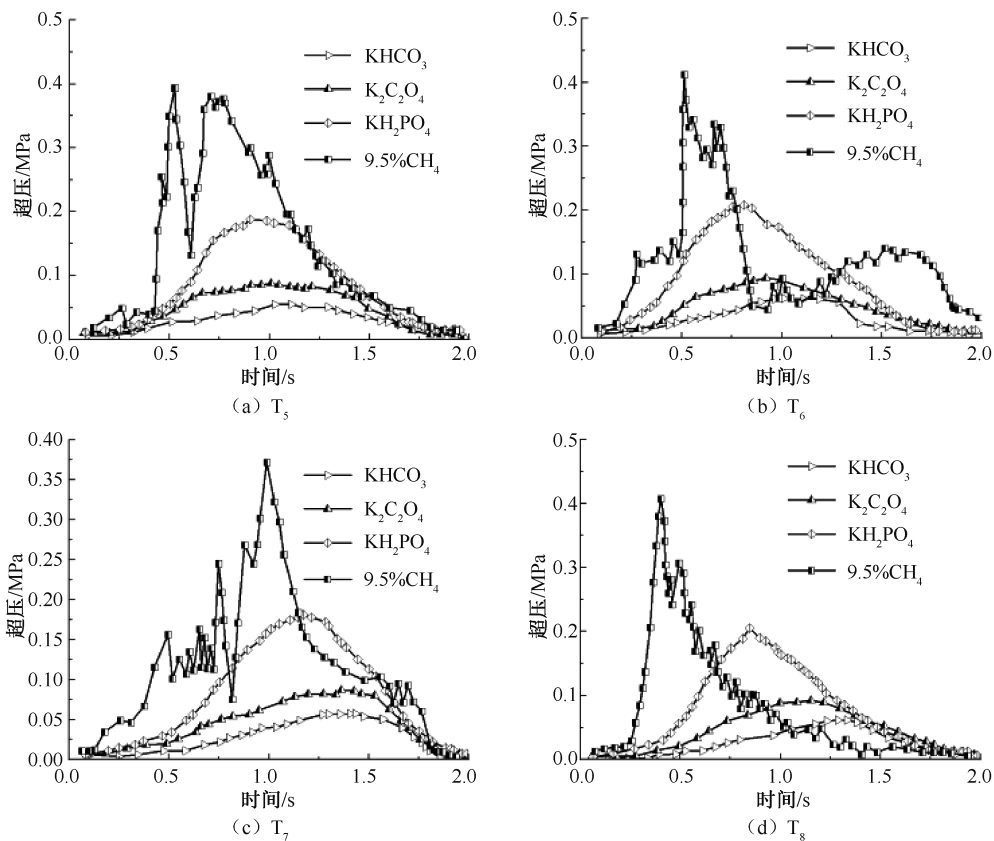


图 4 含不同粉体抑爆前后 T_5 — T_8 超压变化

Fig. 4 Overpressure changes at monitoring points 5–8 before and after explosion suppression with different powders

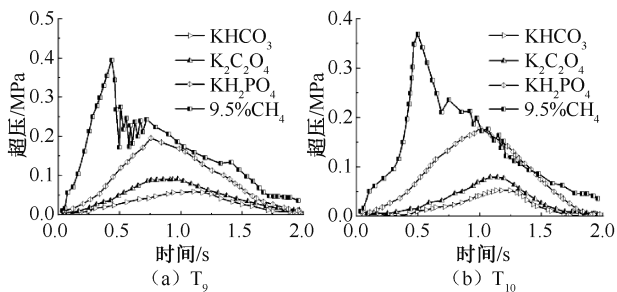


图 5 含不同粉体抑爆前后 T_9 — T_{10} 超压变化

Fig. 5 Overpressure changes at monitoring point 9–10 before and after explosion suppression with different powder explosive suppressor

爆炸超压的抑制作用强弱顺序依次为 $\text{KHCO}_3 > \text{K}_2\text{C}_2\text{O}_4 > \text{KH}_2\text{PO}_4$ 。

2.3 超压衰减特性

定义不同类型的超压衰减系数: K_1 为直线段冲击波的超压衰减系数; K_2 为支线段冲击波的超压衰减系数; K_3 为拐弯段冲击波的超压衰减系数; M 为支线段冲击波的超压分流系数^[21]。

试验管道类型如图 6 所示, 图 6a 分岔管道中, K_1 = 监测点 X 处的超压最大值/监测点 Y 处的超压

最大值; K_2 = 监测点 X 处的超压最大值/监测点 Z 处的超压最大值; M = 监测点 Z 处的超压最大值/监测点 Y 处的超压最大值。图 6b 直角分岔管道中, K_1 = 监测点 O 处的超压最大值/监测点 N 处的超压最大值; K_2 = 监测点 O 处的超压最大值/监测点 P 处的超压最大值; M = 监测点 P 处的超压最大值/监测点 N 处的超压最大值。图 6c 的 L 型管道中, K_3 = 监测点 F 处的超压最大值/监测点 G 处的超压最大值。各监测点的超压衰减系数见表 1。

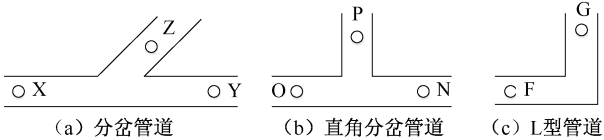


图 6 试验管道类型

Fig. 6 Experimental pipeline types

在钾盐粉体不同程度的抑爆作用下, 管网中不同管路结构呈现出不同的超压衰减特征。以直线段冲击波超压衰减系数 K_1 为例, 抑爆前, T_8/T_7 的值最大, 且 T_8 和 T_7 均位于斜角联支管 4 内, 这表明相比于其他管路结构, 斜角联支管 4 的压力损失更大, 压力衰减程度也更为显著。因此, 在斜角联支管 4

表 1 各监测点超压衰减系数

Table 1 Overpressure attenuation coefficient at each monitoring point

系数类型	无抑爆剂	KHCO ₃	K ₂ C ₂ O ₄	KH ₂ PO ₄
K ₁	T ₁ /T ₂ = 1.076	1.118	1.154	1.071
	T ₆ /T ₅ = 1.087	1.127	1.068	1.106
	T ₉ /T ₁₀ = 1.070	1.132	1.125	1.090
	T ₃ /T ₄ = 1.091	1.025	1.110	1.099
	T ₈ /T ₇ = 1.097	1.148	1.136	1.132
K ₂	T ₁ /T ₈ = 1.110	1.226	1.217	1.102
	T ₃ /T ₅ = 1.027	1.036	1.045	1.005
	T ₉ /T ₆ = 0.960	0.968	0.957	0.942
	T ₆ /T ₇ = 1.176	1.148	1.160	1.149
	T ₅ /T ₇ = 1.045	1.018	1.086	1.039
K ₃	T ₂ /T ₃ = 1.097	1.193	1.054	1.116
M	T ₉ /T ₁ = 0.872	0.789	0.803	0.867
	T ₈ /T ₂ = 0.969	0.912	0.948	0.972
	T ₅ /T ₄ = 1.063	1.375	1.100	1.093
	T ₆ /T ₁₀ = 1.117	1.170	1.175	1.162
	T ₇ /T ₅ = 0.982	0.982	0.920	0.963

中安设抑制剂,能够借助该支管的特性,进一步增强对爆炸超压的抑制效果。在添加 N₂ 驱动的钾盐粉体后,斜角联支管 4 中 KHCO₃ 抑爆剂的压力损失最大,这表明在添加 N₂-KHCO₃ 抑爆剂的工况下,爆炸超压在流经斜角联支管 4 时能够得到更大幅度的衰减。

支线段冲击波的超压衰减系数 K₂ 出现了小于 1 的情况,且添加 K₂C₂O₄ 和 KH₂PO₄ 抑爆剂会进一步加剧这一现象。这主要是由于支线段的弯折、分叉结构改变了冲击波反射模式,导致能量重新分配,使 T₆ 处相对超压峰值反而升高。

分析拐弯段冲击波超压衰减系数 K₃,抑爆前的 K₃ 为 1.097。经过不同钾盐粉体的抑爆作用后, KHCO₃ 工况下的超压衰减系数最大,为 1.193,超过抑爆前的 1.097。这一结果表明:N₂ 协同 KHCO₃ 抑爆不仅能够有效利用拐弯段本身的结构特性,还能通过抑爆剂的作用进一步增大冲击波在拐弯段传播时的压力损失,从而更高效地降低爆炸超压在管网拐弯区域的传播强度。因此,在管网拐弯段安设抑制剂能够进一步增强对爆炸超压的抑制效果。

综上所述,经过 N₂ 协同钾盐粉体不同程度的抑爆后,管网中不同管路结构的超压衰减特征如下:①斜角联支管 4 中的压力衰减程度较其他支管更大,是布设抑制剂的优选位置,而 KHCO₃ 能最大程度利用这一结构特性来增强抑爆效果。②支线段冲击波的超压衰减系数 K₂ 出现了小于 1 的情况,且添

加 K₂C₂O₄ 和 KH₂PO₄ 抑爆剂会进一步加剧这一现象。③在拐弯段, KHCO₃ 显著提升超压衰减系数,此处布设抑制剂可增强对爆炸超压的抑制效果。

3 抑爆机制分析

从爆炸反应中的关键自由基摩尔分数入手,分析抑制机制。

在瓦斯爆炸过程中, H · 和 OH · 等自由基的生成直接影响瓦斯的爆炸程度。因此,控制自由基的摩尔分数在一定程度上可抑制瓦斯爆炸。基于 Chemkin-Pro 模拟软件,使用层流燃烧计算模块模拟研究 3 种粉体作用下的瓦斯/空气预混气爆炸。模拟采用封闭的均质 0 维反应器,初始压力设置为 1.01×10⁵Pa,初始温度为 1 350 K (高于 KHCO₃、K₂C₂O₄、KH₂PO₄ 的热解温度)。模拟中 N₂ 与 O₂ 的摩尔比为 79:21,甲烷的摩尔分数为 9.5%。

图 7 为不同粉体工况下瓦斯爆炸过程中关键自由基摩尔分数的变化特征,由图可 7 知:在 KHCO₃ 工况下, H · 和 · OH 自由基的含量最低,其次是

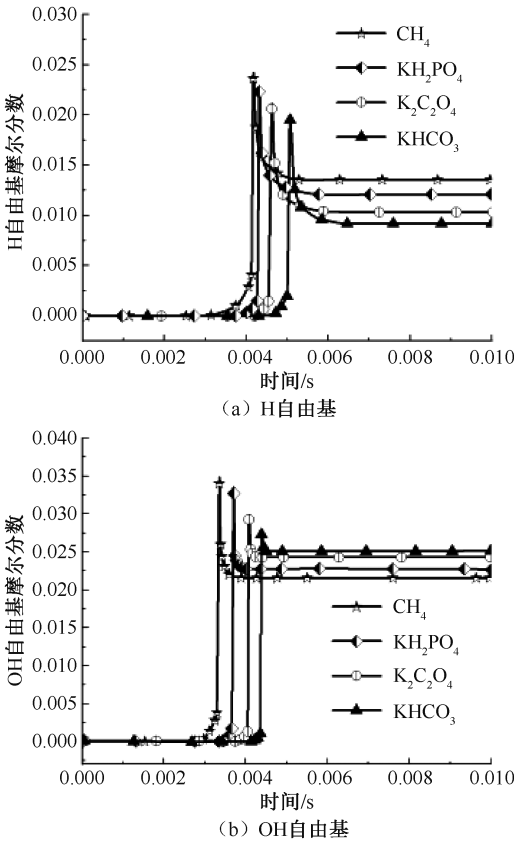


图 7 不同粉体作用下 H 和 OH 自由基摩尔分数的变化特征

Fig. 7 Changes of concentration of H and OH free radicals under different powder

$K_2C_2O_4$ 工况,而 KH_2PO_4 工况下自由基的含量最高,这表明 $KHCO_3$ 能够吸附更多的爆炸过程中产生的自由基。其原因为:3 种粉体热解生成的 KOH 在抑爆反应中起到了关键作用,其反应为: $KOH + H \rightleftharpoons K + H_2O$ 。此外,热解生成的 K 、 KO 和 K_2O 通过消耗 H_2O 和 OH 生成 KOH ,持续消耗爆炸反应中的自由基,延缓了反应的进行。相比之下, KH_2PO_4 在高温条件下产生大量的 KPO_3 和少量的 KOH ,而 KPO_3 不具有抑爆特性。因此, KH_2PO_4 粉体工况下, $H \cdot$ 和 $\cdot OH$ 自由基的含量最高。进一步分析 $KHCO_3$ 和 $K_2C_2O_4$ 工况, $KHCO_3$ 热解生成 K_2CO_3 和 H_2O 和 CO_2 , H_2O 能够与 $H \cdot$ 反应,从而更多地消耗爆炸反应中的自由基。而 $K_2C_2O_4$ 热解生成 K_2CO_3 和 CO ,缺乏直接与自由基反应的产物。

因此, $KHCO_3$ 工况下自由基的含量最低,抑爆效果最佳,其次是 $K_2C_2O_4$ 工况,而 KH_2PO_4 工况下抑爆效果相对较弱。

4 结 论

1) 加入 3 种粉体后,冲击波压力的多次叠加与

衰减过程几近消失,监测点的超压时程曲线均呈单峰值特性。具体而言, $KHCO_3$ 工况下爆炸超压峰值的下降幅度为 83.2%~88.9%, $K_2C_2O_4$ 工况下爆炸超压峰值的下降幅度为 75.3%~78.6%, KH_2PO_4 工况下爆炸超压峰值的下降幅度为 49.5%~51.5%。3 种粉体在 N_2 驱动下对抑制爆炸作用的强弱顺序依次为 $KHCO_3 > K_2C_2O_4 > KH_2PO_4$ 。

2) 斜角联支管 4 中的压力衰减程度较其他支管更大,是布设抑制剂的优选位置。 N_2 驱动下的 $KHCO_3$ 能最大程度利用该结构特性,增强抑爆效果。此外,在拐弯段, N_2 驱动下的 $KHCO_3$ 借助其结构和自身的抑爆能力,显著提升了超压衰减效果。这表明在管网拐弯段布设抑制剂能够进一步增强对爆炸超压的抑制。

3) 支线段冲击波的超压衰减系数 K_2 出现了小于 1 的情况,且添加的 $K_2C_2O_4$ 和 KH_2PO_4 抑爆剂会进一步加剧这一现象。

4) $KHCO_3$ 工况下自由基含量最低,抑爆效果最佳,其次是 $K_2C_2O_4$ 工况,而 KH_2PO_4 工况下自由基含量最高。

参 考 文 献

- [1] 孙慧敏. 采空区中多元惰性气体对瓦斯爆炸特性的影响规律研究[D]. 阜新:辽宁工程技术大学,2024.
SUN Huimin. Research on the influence of multivariate inert gas on the properties of gas explosion in mined-out areas[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2024.
- [2] 田思雨. 碱金属改性干水材料对瓦斯(煤尘)爆炸的抑爆特性研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2024.
TIAN Siyu. Research on the suppression and isolation characteristics of alkali metal-modified dry water materials for gas (coal dust) explosions[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2024.
- [3] WANG Tao, YANG Zhe, YANG Peng, et al. The deflagration suppression effect of ammonium salt-modified dry water on methane-air mixtures: an experimental investigation [J]. Powder Technology, 2024, 434: DOI: 10.1016/j.powtec.2023.119313.
- [4] YU Minggao, WANG Xueyan, ZHENG Kai, et al. Investigation of methane/air explosion suppression by modified montmorillonite inhibitor [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2020, 144(1): DOI: 10.1016/j.psep.2020.07.050.
- [5] 张莉聪,李斯曼. 基于基元反应的气液两相协同抑爆阻燃效果分析[J]. 中国安全科学学报,2024,34(3):101-108.
ZHANG Licong, LI Siman. Analysis of gas-liquid two-phase coordinated explosion and explosion flame retardant effect based on fundamental reaction[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(3): 101-108.
- [6] 贾进章,田秀媛. 瓦斯爆炸抑制研究进展及发展趋势[J]. 安全与环境学报,2025,25(1):95-107.
JIA Jinzhang, TIAN Xiuyuan. Progress and development trends in gas explosion suppression research[J]. Journal of Safety and Environment, 2025, 25(1): 95-107.
- [7] JING Qi, WANG Dan, LIU Qingming, et al. Inhibition effect and mechanism of ultra-fine water mist on CH_4 /air detonation: quantitative research based on CFD technology [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2021, 148(1): DOI: 10.1016/j.psep.2020.10.007.
- [8] CAO Xingyan, WANG Zhirong, LU Yawei, et al. Numerical simulation of methane explosion suppression by ultrafine

- water mist in a confined space[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2021, 109 (5): DOI: 10. 1016/j. tust. 2020. 103777.
- [9] LIANG Xiaoqing, ZHOU Xinying, LU Xiner, et al. Investigation on slag resource utilization: KHCO_3 /modified slag composite powder applied to methane/air explosion suppression[J]. Powder Technology, 2024: DOI: 10. 1016/j. powtec. 2024. 119814.
- [10] WANG Yan, YANG Jingjing, HE Jia, et al. Inhibition effect of KHCO_3 and KH_2PO_4 on ethylene explosion[J]. ACS Omega, 2023, 8(8): DOI: 10. 1021/acsomega. 2c06894.
- [11] 王燕, 林晨迪, 郑立刚, 等. 草酸盐粉体抑制甲烷爆炸的试验研究[J]. 安全与环境学报, 2020, 20(4): 1 327–1 333.
WANG Yan, LIN Chendi, ZHENG Ligang, et al. Experimental investigation into the inhibitive effect of the methane explosion via the oxalate powders[J]. Journal of Safety and Environment, 2020, 20(4): 1 327–1 333.
- [12] WANG Yueying, ZHU Feihao, ZHOU Hailin, et al. Investigation in the fire suppression properties of KHCO_3 and $\text{K}_2\text{C}_2\text{O}_4$ dry water incorporates core-shell structures[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2024, 87: DOI: 10. 1016/j. jlp. 2023. 105205.
- [13] JIA Jinzhang, TIAN Xiuyuan, WANG Fengxiao. Study on the effect of KHCO_3 particle size and powder spraying pressure on the methane explosion suppression characteristics of pipe networks[J]. ACS Omega, 2022, 36(7): DOI: 10. 1021/acsomega. 2c02945.
- [14] 王晓玲, 刘震起. 甲烷-空气预混区外含钾细水雾抑爆特性研究[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(1): 150–157.
WANG Xiaoling, LIU Zhenqi. Study on explosion suppression characteristics of water mist containing potassium compounds outside methane-air premixed area[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(1): 150–157.
- [15] 杨克, 李雪瑞, 纪虹, 等. 改性煤矸石-海藻酸钠粉体对管道内甲烷/空气爆炸的抑爆实验[J]. 爆炸与冲击, 2024, 44(7): 174–187.
YANG Ke, LI Xuerui, JI Hong, et al. Experimental on suppression of methane/air explosion in pipeline by modified gangue-sodium alginate powder[J]. Explosion and Shock Waves, 2024, 44(7): 174–187.
- [16] ZHANG Yansong, ZHANG Youning, SHI Jing, et al. Experimental and numerical study on suppressing coal dust deflagration flame with NaHCO_3 and MPP[J]. Fuel, 2024, 358: DOI: 10. 1016/j. fuel. 2023. 130152.
- [17] WEI Xiangrui, ZHANG Yansong, WU Guangan, et al. Study on explosion suppression of coal dust with different particle size by shell powder and NaHCO_3 [J]. Fuel, 2021, 306: DOI: 10. 1016/j. fuel. 2021. 121709.
- [18] 余明高, 王雪燕, 郑凯, 等. 催化型复合粉体抑爆剂抑制瓦斯爆炸压力实验研究[J]. 煤炭学报, 2021, 46(10): 3 212–3 220.
YU Minggao, WANG Xueyan, ZHENG Kai, et al. Experimental investigation of gas explosion suppression by catalytic composite powder inhibitor[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(10): 3 212–3 220.
- [19] 吴君安, 朱杭钦, 梁志星, 等. CO_2 驱动下 NaHCO_3 对甲烷爆炸特性的影响[J]. 安全与环境工程, 2024, 31(4): 37–44.
WU Jun'an, ZHU Hangqin, LIANG Zhixing, et al. Effect of NaHCO_3 on methane explosion characteristics driven by CO_2 [J]. Safety and Environmental Engineering, 2024, 31(4): 37–44.
- [20] CAI Chongchong, SU Yang, WANG Yan, et al. Suppressive effects of potassium salt modified dry water material on hydrogen/methane mixture explosion[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024, 79: 537–550.
- [21] QIU Jinwei, JIANG Bingyou, TANG Mingyu, et al. Effect of different bend pipes on the propagation characteristics of premixed methane-air explosion in confined spaces[J]. Geofluids, 2021, 2021(10): DOI: 10. 1155/2021/6635156.



作者简介: 贾进章 (1974—),男,河北石家庄人,博士,教授,主要从事矿井智能通风与瓦斯防治、 CO_2 封存与促抽煤层气等方面的研究。E-mail: jiajinzhang@163.com。