

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2024.01.007

$\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4\text{-KHCO}_3$ 混合粉体对管网甲烷爆炸的抑制特性*

贾进章^{①②} 张先如^{①②} 王枫潇^{①②}

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(辽宁阜新,123000)

[摘要] 在自行搭建的管网实验系统中,将常用于抑制甲烷爆炸的碳酸氢钾 KHCO_3 与磷酸二氢铵 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 进行不同比例的混合。选取5种不同的粉体配比,对比单一粉体以及各抑爆工况下各测点的爆炸峰值压力、火焰峰值速度和火焰峰值温度等爆炸特征参数,获得抑制管网甲烷爆炸的最佳工况,并阐述了抑爆机理。结果表明:混合粉体对管网甲烷爆炸的抑制性能优于单一粉体; KHCO_3 与 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 都易受热分解;其中, KHCO_3 可以在相对较低的温度下迅速完成热解过程,从而吸收更多的反应热,抑爆性能优于 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 粉体;混合粉体中,抑爆效果随着 KHCO_3 含量的增加显著提高。在5种混合比例中,当 KHCO_3 与 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 质量比为 2.0 : 1.0 时,抑爆效果最佳。 KHCO_3 与 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 表现出良好的爆炸抑制效果,研究所得结论可为抑制甲烷爆炸研究提供参考。

[关键词] 甲烷爆炸;混合粉体;抑爆性能;混合比例;实验管网

[分类号] TJ53.3; TQ221.1+1

Inhibition Properties of $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4\text{-KHCO}_3$ Mixed Powder on Methane Explosion in the Pipe Network

JIA Jinzhang^{①②}, ZHANG Xianru^{①②}, WANG Fengxiao^{①②}

①College of Safety Science and Engineering, Liaoning Technical University (Liaoning Fuxin, 123000)

②Key Laboratory of Mine Thermodynamic Disasters and Control of Ministry of Education, Liaoning Technical University (Liaoning Fuxin, 123000)

[ABSTRACT] Potassium bicarbonate (KHCO_3), commonly used as the methane explosion suppression, was mixed with ammonium dihydrogen phosphate ($\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$) in different proportions in a self-built pipeline experimental system. Five different powder ratios were selected to compare the explosion characteristic parameters such as peak explosion pressure, peak flame velocity, and peak flame temperature at each monitoring point under a single powder and various explosion suppression conditions. The optimal conditions for suppressing methane explosion in the pipeline network were obtained, and the explosion suppression mechanism was explained. The results show that the suppression performance of mixed powder on methane explosion in pipeline networks is better than that of the single powder. Both KHCO_3 and $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ are prone to decomposition during heating, among which KHCO_3 can quickly complete the pyrolysis process at a relatively low temperature, thereby absorbing more heat of reaction, and its explosion suppression performance is better than that of $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ powder. The explosion suppression effect significantly improves with the increase of concentration of KHCO_3 . Among the five mixing ratios, when the mass ratio of KHCO_3 to $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ is 2.0 : 1.0, the explosion suppression effect is the best. KHCO_3 and $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ exhibit excellent explosion suppression effects. The conclusions obtained in the study can provide theoretical support for the study on methane explosion suppression.

[KEYWORDS] methane explosion; mixed powder; explosion suppression performance; mixing ratio; experimental pipe network

* 收稿日期:2023-07-04

基金项目:国家自然科学基金(52174183)

第一作者:贾进章(1974—),男,博士,教授,博导,主要从事矿井瓦斯爆炸冲击波与通风动力耦合传播机理等方面的研究。E-mail:jiainzhang@163.com

通信作者:张先如(1999—),女,硕士研究生,主要研究方向为安全技术及应用。E-mail:392996844@qq.com

0 引言

随着经济的发展,天然气作为常见的清洁能源,在我国的能源消费总量中逐年递增^[1]。天然气主要成分之一甲烷具有可燃性和爆炸性。如果甲烷在运输或使用过程中泄漏,可能会发生爆炸,造成巨大损失^[2]。因此,研究抑制甲烷爆炸的措施对减少人员伤亡和财产损失具有重要意义。常用的甲烷爆炸抑制剂有惰性气体、水雾、粉体、多孔材料等。其中,粉体因价格低廉、运输方便等优势成为爆炸抑制剂研究的热门。粉体抑爆技术是利用具有防火、灭火能力的固体粉体的物理或化学特性抑制气体爆炸火焰的蔓延,可减小爆炸范围,减少爆炸损失^[3]。磷酸二氢铵 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ ^[4]、碳酸氢钠 NaHCO_3 ^[5]、碳酸氢钾 KHCO_3 ^[6]、氯化钠 NaCl 、氯化钾 KCl ^[7]、硅藻土^[8]、尿素^[9]等粉体均可对甲烷爆炸有一定的抑制效果。有学者研究了粉体对甲烷爆炸的抑制机理,分析了甲烷爆炸中自由基的影响^[10-11]。另有研究中将粉体与其他抑制剂混合,提高对甲烷等气体的抑爆效果^[12-14]。

随着研究不断地发展,多组分粉体和改性粉体逐渐成为抑制气体爆炸的主要手段^[15]。与以往研究中常使用的单一粉体相比,多组分粉体不仅对气体爆炸具有较好的抑制效果,而且有效抑制浓度较低^[16],抑制能力大小主要取决于粉体的选择和配比^[17]。多组分粉体成本往往低于改性粉体,并且有些多组分粉体的抑制效果大于改性粉体的抑制效果^[18]。因此,选择适宜的粉体进行组合抑爆研究是很有必要的。Krasnyansky^[19]在爆炸抑制剂的使用中采用尿素与 KCl 进行复合,发现该复合材料可增强抑爆效果。Xie 等^[18]将疏水纳米二氧化硅 SiO_2 作为增硫添加剂,与碳酸钙 CaCO_3 协同抑制瓦斯爆炸;结果表明:疏水粉体的加入可以减小混合粉体的休止角,提高粉体流动性,两种粉体对爆炸的协同抑制效果优于单一粉体。改变粉体的配比和浓度对燃烧反应有明显的影 响。Wang 等^[20]采用溶剂-反溶剂法制备了 NaHCO_3 /赤泥复合粉体,用于抑制甲烷爆炸;结果表明: NaHCO_3 /赤泥复合粉体的抑爆性能明显优于纯赤泥粉体和纯 NaHCO_3 粉体。Yan 等^[21]在球形爆炸罐中研究了 NaHCO_3 /高岭土复合粉体对铝粉爆炸的抑制作用;结果表明:随着复合粉体抑制剂含量的增加,爆炸火焰长度逐渐减小,温度逐渐降低,复合粉体对于铝粉爆炸的火焰传播和爆

炸压力的抑制效果均优于单一粉体。Wang 等^[22]研究了尿素/粉煤灰空心微珠(FAC)复合抑制剂,该抑制剂具有微、纳米级互补效应和减速-降压耦合效应,可改善抑爆效果,并提出了复合抑制机理。杨克等^[23]制备了聚多巴胺包覆 SiO_2 和 CaCO_3 混合粉体,对比了不同质量比的混合粉体对甲烷爆炸的抑制效果;结果表明:聚多巴胺包覆的混合粉体符合一般抑爆粉体特征,表征并分析了抑爆机理。袁必和^[24]研究了多孔矿物和聚磷酸铵复合粉体对甲烷爆炸的抑制效果;研究表明:复合粉体对甲烷爆炸具有协同抑制作用,在适宜配比下,复合粉体抑制效果要优于单一粉体的抑爆效果。

在考虑成本与抑爆性能的基础上,寻找易获得、制备简单的复合抑爆剂,提高对甲烷爆炸的抑制效果。选取绿色环保的 KHCO_3 粉体与 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 粉体进行混合,制备了甲烷爆炸抑制剂。以爆炸峰值压力、火焰峰值速度以及火焰峰值温度作为表征抑爆性能的参数,探究不同组分质量比时的抑爆性能。基于分子热运动理论对 2 种粉体热解性能进行研究,得到组分质量比变化对甲烷爆炸抑制效果的影响,以期对管网甲烷爆炸防治理论与技术提供理论参考。

1 粉体抑爆实验

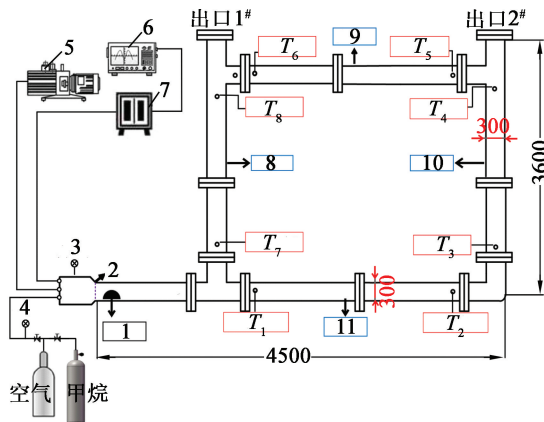
1.1 实验系统

自行搭建的实验系统如图 1 所示。实验系统主要由管网、配气系统、动态数据采集、点火系统组成。

管网尺寸为 $4\ 500\ \text{mm} \times 3\ 600\ \text{mm}$ 。管道内径为 $300\ \text{mm}$,最大耐压为 $20\ \text{MPa}$ 。各个部件及管道连接处安装硅胶垫片,保证管网的气密性。动态数据调节和收集采用 TST6300 型数据采集仪;压力传感器为 QSY8124 型高频动态实验室压力收集系统,量程 $0\sim 10\ \text{MPa}$,响应时间为 $1\ \text{ms}$;高温热电偶型号为 NANMAC,量程 $0\sim 2\ 000\ \text{K}$,响应时间为 $10\ \text{ms}$;高速火焰传感器型号为 CKG100,响应时间为 $1\ \text{ms}$,数据采集装置精度为 0.2% ,连续采集频率为 $10\ \text{kHz}$ 。点火系统主要包括 DX-GDH 型高能点火器、电力电缆、耐高压(高温)电缆、爆炸室前端高能火花塞、点火控制箱、通过导线连接的外触发装置。

1.2 实验材料

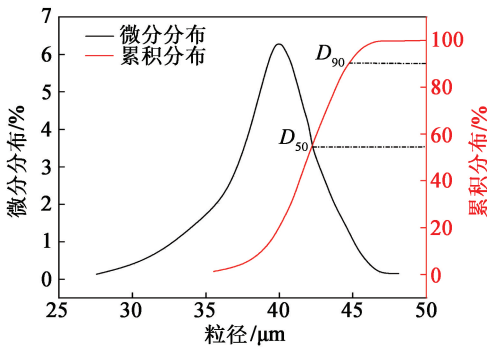
配制甲烷体积分数为 9.5% 的甲烷-空气混合气体。 KHCO_3 与 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 混合抑爆粉体质量为 $40\ \text{g}$ ^[25],各组分粒径在 $25\sim 50\ \mu\text{m}$ 之间,粒径分布见图 2。通过高速搅拌器将 2 种粉体均匀混合,



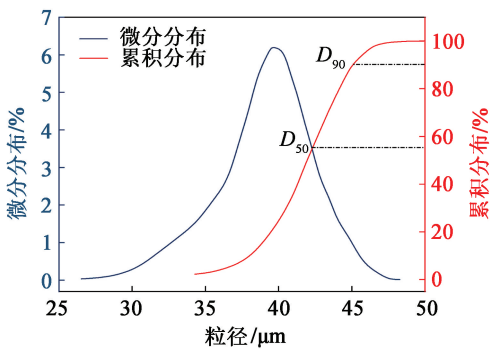
1 - 粉体; 2 - 薄膜; 3 - 真空计; 4 - 流量计;
5 - 真空泵; 6 - 数据采集仪; 7 - 点火器;
8 - 支管 4#; 9 - 支管 3#; 10 - 支管 2#; 11 - 支管 1#。

图1 实验系统(单位:mm)

Fig. 1 Experimental system (Unit: mm)



(a) NH₄H₂PO₄



(b) KHCO₃

图2 NH₄H₂PO₄ 和 KHCO₃ 的粒径分布

Fig. 2 Particle size distribution of NH₄H₂PO₄ and KHCO₃

NH₄H₂PO₄ 与 KHCO₃ 质量比为 1.0 : 1.0、1.0 : 1.5、1.0 : 2.0、1.0 : 2.5、1.0 : 3.0, 分标记为样品 1#~5#。

1.3 实验步骤

用聚四氟乙烯薄膜将爆炸腔与管网隔开,如图1所示。在 T₁~T₈ 8 个不同测点分别安装 8 个压力传感器,在管网的 2 个不同出口安装 2 个火焰传感器。将空气从爆炸室中抽出后,用体积分数为 9.5%

的甲烷混合气体充满爆炸室;将 40 g 的 KHCO₃ 与 NH₄H₂PO₄ 混合粉体放置在管道底部;点燃甲烷混合气体,外部触发装置接通;粉末通过爆炸冲击波的带动在管道中扬起;采集实时动态数据系统与点火器同步工作。在装置上的信号灯亮起后触发电火。重复上述实验操作,分别测试不同组分质量比的混合粉体对甲烷爆炸的抑制参数。为确保结果准确可靠,每个工况至少进行 3 次实验。

2 粉体抑爆实验结果分析

2.1 混合比例对爆炸峰值压力的影响

管道内压力的变化可以反映出管道爆炸的剧烈程度^[26]。图3显示了 NH₄H₂PO₄ (样品 6#)、KHCO₃ (样品 7#) 与不同混合粉体样品在实验中各测点的爆炸峰值压力。从图3中可以看出,在空白(无粉体)对照组实验中,由于冲击波能量的损耗、管网散热等现象,其他各测点压力峰值均小于测点 T₁ 的峰值压力。不同工况下峰值压力呈现的变化趋势相似。在管网中,冲击波沿着管道从测点 T₁ 传到测点 T₂,测点 T₂ 变化情况与测点 T₁ 相似,由于能量损耗以及管道散热等因素,测点 T₂ 峰值压力小于测点 T₁;测点 T₅、T₆ 峰值压力降幅较小的原因可能是管道路径较长,造成较远测点处的粉体过少,且管网内冲击波的叠加造成测点 T₅、T₆ 抑制效果减弱;冲击波沿着管道传播到管网末端测点 T₈ 时,管网中冲击波发生叠加,使测点 T₈ 峰值压力变大。当管网中分别添加 NH₄H₂PO₄ 与 KHCO₃ 粉体时,管网各测点峰值压力与空白实验相比均有降低;对比图3中单一粉体与混合粉体的峰值压力的变化可以看出,不同工况下混合粉体的抑制效果均优于单一粉体。添加了组分质量比为 1.0 : 1.0 的混合粉体后,测点 T₁ 的峰值压力由粉体 KHCO₃ 单独作用下的 0.342 MPa 降到了 0.273 MPa。当管网添加混合粉体后,甲烷最大爆炸压力呈下降趋势,混合粉体 NH₄H₂PO₄ 与 KHCO₃ 质量比为 1.0 : 1.0、1.0 : 1.5、1.0 : 2.0、1.0 : 2.5、1.0 : 3.0 时,测点 T₁ 处峰值压力分别为 0.273、0.236、0.191、0.188、0.187 MPa。峰值压力随着混合粉体中 KHCO₃ 质量占比的增加而减小,当混合粉体中的 KHCO₃ 与 NH₄H₂PO₄ 质量比超过 2.0 : 1.0 时,各测点的峰值压力变化较小。NH₄H₂PO₄ 与 KHCO₃ 质量比 1.0 : 2.0 变为 1.0 : 2.5 时,测点 T₄、T₅、T₆、T₈ 处峰值压力保持不变,测点 T₁、T₂、T₃、T₇ 处略有下降。当 NH₄H₂PO₄ 与

KHCO_3 质量比为 1.0 : 3.0 时, 峰值压力只有测点 T_1 、 T_7 处略有下降, 其余测点保持不变。当混合粉体中 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 与 KHCO_3 质量比为 1.0 : 2.0 时, 8 个测点中峰值压力最大衰减可达 66.13%。

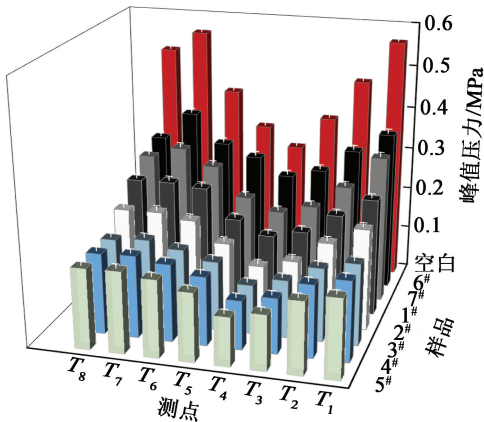


图3 不同工况下各测点的峰值压力比较

Fig. 3 Comparison of peak pressure at each measuring point under different working conditions

2.2 混合比例对火焰峰值速度的影响

图4显示了 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 、 KHCO_3 与不同组分质量比的 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 与 KHCO_3 混合粉体对各测点爆炸火焰波的峰值速度的影响。在火焰传播过程中, 火焰波从爆炸腔传出, 经过 T 字形分岔口, 会增大火焰波的面积、降低传播面的速度^[27]; 火焰波气流与管内壁会发生碰撞, 损失部分能量, 从而造成测点 T_7 处波速小于测点 T_1 处的波速。在 T 字形分岔口, 火焰波速度沿着直线方向的损失低于垂直方向的损失^[28], 所以, 测点 T_1 、 T_2 处比测点 T_7 、 T_8 处火焰波速度略大。从图4可以看出, 单一 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 与 KHCO_3 粉体均可降低火焰波速度, KHCO_3 粉体降低火焰波速度的幅度大于 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 粉体。当加入混合粉体时, 甲烷爆炸火焰最大传播速度不断降低, 混合粉体的抑制效果均优于单一粉体。单一粉体 KHCO_3 与 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 分别作用下, 测点 T_1 处的火焰波峰值速度分别由空白(无粉体)实验时的 313.12 m/s 降为 141.76 m/s。在 5 种不同比例的混合粉体抑制下, 火焰速度分别降为 108.01、85.88、62.92、57.54、55.38 m/s。从图4中各个工况下火焰波速度变化中可以看出, 加入 KHCO_3 与 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 可以增强降低火焰波速度的能力。 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 与 KHCO_3 的质量比由 1.0 : 2.0 变为 1.0 : 2.5 时, 测点 T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_7 、 T_8 处峰值速度略有下降, 其余测点保持不变。当质量比为 1.0 : 3.0 时, 仅有测点 T_1 、 T_2 、 T_7 处火焰波峰值速度减小, 其余测点峰值速度不变。在 5 种混合粉体配比中, 随

着 KHCO_3 质量占比的增加, 火焰波峰值速度逐渐降低, 当 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 与 KHCO_3 质量比为 1.0 : 2.0 时, 继续增加 KHCO_3 的质量占比对火焰波峰值速度抑制影响较小。当 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 与 KHCO_3 质量比为 1.0 : 2.0 时, 对于甲烷爆炸火焰波峰值速度的抑制效果最佳, 爆炸火焰波峰值速度衰减可达 79.90%。

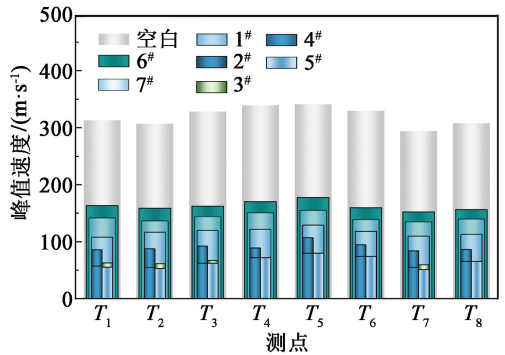


图4 不同工况下各测点火焰峰值速度变化

Fig. 4 Changes in peak velocity of flames at each measuring point under different working conditions

2.3 混合比例对火焰峰值温度的影响

图5显示了不同粉体样品时各测点处爆炸火焰峰值温度的变化。从图5可以发现, 当无粉体抑爆剂存在(空白实验)时, 管网发生爆炸, 各测点中测点 T_1 温度最高, 为 1 807 K, 测点 T_4 温度最低, 为 1 522 K。添加粉体后, 由于爆炸冲击波的带动, 粉体会悬浮在管道的上半部分, 甲烷发生爆炸时压力增加的原因之一是燃烧释放的热量以热辐射形式传递到未燃区, 粉体会阻止热辐射的传递。当管网中分别添加 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 与 KHCO_3 粉体时, 测点 T_1 的温度分别降为 865、1 091 K, 测点 T_4 的温度分别降为 806、913 K。图5中可以清晰地看出, 混合粉体的降温效果优于粉体单一作用。 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 与 KHCO_3 的质量比由 1.0 : 1.0 变为 1.0 : 2.0 时, 测点 T_1 最高温度由 779 K 降到 264 K, 测点 T_4 最高温度由 738 K 降到 205 K。 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 与 KHCO_3 的质量比由 1.0 : 2.0 变为 1.0 : 2.5 时, 测点 T_4 、 T_5 、 T_6 处峰值温度保持不变, 其余测点略微减小。质量比为 1.0 : 3.0 时, 测点 T_4 、 T_5 、 T_6 、 T_8 处峰值温度保持不变, 其余测点略微减小。由此可见, 每个测点的火焰波的峰值温度随着混合粉体中的 KHCO_3 质量占比的增大而减小。这是由于 KHCO_3 会阻止甲烷爆炸中热辐射的传递^[29], KHCO_3 在较低的温度下可以迅速发生热解, 吸热冷却, 达到降温效果^[6]。但 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 与 KHCO_3 的质量比为 1.0 : 2.0 时, 继续增加 KHCO_3 质量占比, 峰值温度的抑制效果无显

著变化。NH₄H₂PO₄ 与 KHCO₃ 的质量比为 1.0 : 2.0 时,对火焰波温度抑制效果优于其余 4 种组分质量比的混合粉体。

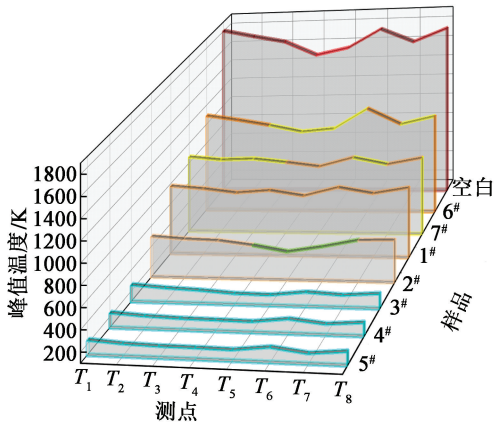


图5 不同工况下各测点火焰峰值温度变化

Fig. 5 Changes in peak flame temperature at each measuring point under different working conditions

2.4 抑爆机理分析

图6为NH₄H₂PO₄的TG-DSC曲线。NH₄H₂PO₄在211~474℃发生分解,分解出NH₃和H₃PO₄;其中,NH₃和H₃PO₄对甲烷爆炸均有一定的弱化作用^[11]。随着温度进一步的升高,H₃PO₄分解为H₄P₂O₇、HPO₃,最后生成P₂O₅。NH₄H₂PO₄受热分解的每一步反应都是吸热反应,具有较好的冷却作用,具体反应过程如下^[30]:

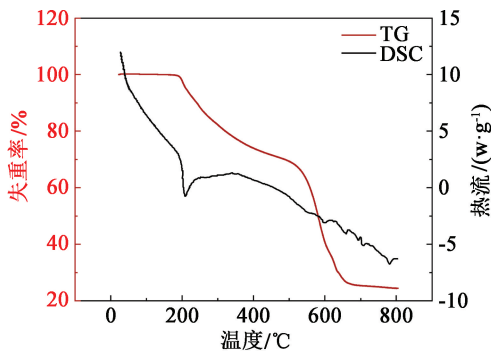
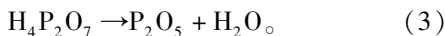
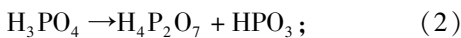
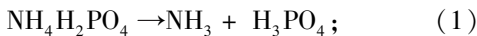


图6 NH₄H₂PO₄的TG-DSC曲线

Fig. 6 TG-DSC curves of NH₄H₂PO₄

此外,NH₄H₂PO₄分解出的氮离子和磷离子能夺取甲烷爆炸反应的游离基,减少甲烷化学键断裂产生的游离基,抑制爆炸反应过程的发生^[30]。

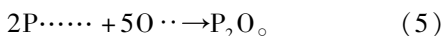
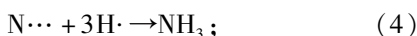


图7为KHCO₃的TG-DSC曲线。从图7中可以发现:KHCO₃在0~147.0℃之间保持平稳,质量几乎没有变化;147.0℃左右开始分解,质量分数高速下降;215.6℃左右分解基本完成,曲线保持平稳状态,质量分数维持在69.6%左右不再分解;最终,质量分数减少了30.4%。在分解过程中出现了一个明显的吸热峰,甲烷爆炸时最高温度可达1700℃^[31],远大于KHCO₃所需分解温度;在此过程中,KHCO₃可以被完全分解并吸收大量热量^[32],KHCO₃的分解产物含有CO₂和H₂O。CO₂作为爆炸反应中的第三体,可以降低氧浓度,对火焰起到窒息作用;而且链式反应中,自由基与CO₂会发生碰撞,从而将自由基能量转移到CO₂身上,降低高能自由基数量,使反应速率降低。H₂O会吸收热量,形成水蒸气,降低氧浓度,削弱甲烷爆炸强度^[6]。KHCO₃的分解产物K₂CO₃,会进一步分解,生成K₂O和CO₂,削弱燃烧反应速率^[33]。具体反应如下:

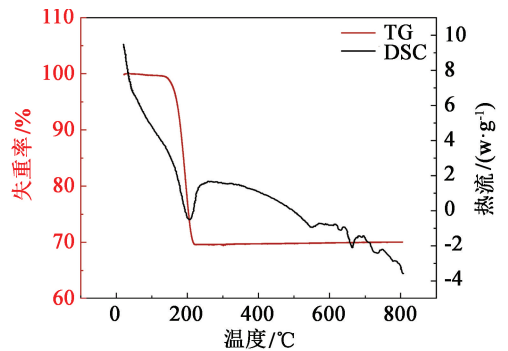
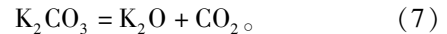
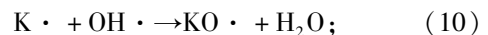
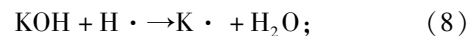


图7 KHCO₃的TG-DSC曲线

Fig. 7 TG-DSC curves of KHCO₃

此外,KHCO₃受热易分解出大量活性基团,捕获甲烷爆炸中的关键自由基。金属离子能和酸根离子有效抑制爆炸。KHCO₃中的钾离子会与甲烷爆炸中的OH·结合^[34-35]。KHCO₃中的酸根离子HCO₃⁻能吸收大量的热量^[36],从而中断链式反应。KHCO₃分解产物与爆炸中关键自由基的作用过程如下^[32]:



混合粉体在甲烷爆炸产生的冲击波带动下能够悬浮于管道的上半部分,形成一道阻止火焰传播的保护层,当火焰传播到保护层时,会与混合粉体接触;由于NH₄H₂PO₄与KHCO₃受热分解,会吸收大

量热量,从而阻碍火焰的热辐射传递。相同质量的混合粉体, KHCO_3 占比越大,抑制效果越好。 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 的氮离子和磷离子能夺取甲烷爆炸反应的游离基, KHCO_3 中的钾离子会与甲烷链式反应中的 $\text{OH}\cdot$ 结合,生成水,抑制甲烷爆炸。

3 结 论

采用自主搭建的爆炸管网实验系统进行了 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 与 KHCO_3 混合粉体对甲烷爆炸的抑制实验,研究了不同组分质量比的混合粉体对管网甲烷爆炸的抑制特性,并阐述了抑爆机理,得到以下主要结论:

1) $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 粉体或 KHCO_3 粉体对甲烷爆炸具有一定的抑制作用, $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 与 KHCO_3 混合粉体的抑爆效果优于单一粉体。

2) 不同工况下的混合粉体对甲烷爆炸均有显著的抑制作用, $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 与 KHCO_3 表现出协同作用。混合粉体中,随着 KHCO_3 质量占比的增加,对甲烷爆炸的抑制效果增强;当混合粉体中 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 和 KHCO_3 的质量比为 1.0 : 2.0 时,继续增加 KHCO_3 的质量比,对甲烷爆炸的抑制作用逐渐减弱,抑制效果不显著。在 5 种不同的粉体配比中,当 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 与 KHCO_3 的质量比为 1.0 : 2.0 时,对甲烷爆炸的抑制效果最佳,此时的爆炸峰值压力、火焰峰值速度和火焰峰值温度分别下降了 66.13%、79.90%、85.40%。

3) KHCO_3 与 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 都受热易分解,分解过程都是吸热反应。 KHCO_3 可以在相对较低的温度下(147.0 ℃)开始分解,甲烷爆炸过程中产生的热量足以使 KHCO_3 完全分解,吸收大量热量,抑制甲烷爆炸。在物理抑制中, KHCO_3 比 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 对甲烷爆炸的抑制效果好。在化学抑制中, $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 分解出的氮离子和磷离子能夺取甲烷爆炸反应的游离基,减少甲烷断裂产生的游离基,中断爆炸链式反应; KHCO_3 的钾离子会与与甲烷链式反应中的 $\text{OH}\cdot$ 结合,自由基被消耗,从而抑制甲烷爆炸。

参 考 文 献

[1] 董冰岩, 查裕学, 邹颖, 等. 球形压力容器甲烷-氢气-空气爆炸过程数值模拟及实验研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2023, 19(3): 157-163.
DONG B Y, ZHA Y X, ZOU Y, et al. Numerical simulation and experimental study of methane-hydrogen-air ex-

plosion process in spherical pressure vessels [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2023, 19(3): 157-163.

[2] LI Z, CHEN L, YAN H C, et al. Gas explosions of methane-air mixtures in a large-scale tube [J]. Fuel, 2021, 285: 119239.

[3] DONG Z Q, LIU L J, CHU Y Y, et al. Explosion suppression range and the minimum amount for complete suppression on methane-air explosion by heptafluoropropane [J]. Fuel, 2022, 328: 125331.

[4] 丁超, 王信群, 徐海顺, 等. 喷射超细 ABC 粉体对瓦斯爆炸的抑制与增强作用[J]. 煤炭学报, 2021, 46(6): 1799-1807.
DING C, WANG X Q, XU H S, et al. Suppression and enhancement of methane/air explosion by discharge of ultrafine ABC powders [J]. Journal of China Coal Industry, 2021, 46(6): 1799-1807.

[5] 郑立刚, 王亚磊, 于水军, 等. NaHCO_3 抑制瓦斯爆炸火焰与压力的耦合分析[J]. 化工学报, 2018, 69(9): 4129-4136.
ZHENG L G, WANG Y L, YU S J, et al. Coupled relationship between flame and overpressure of gas explosion inhibited by NaHCO_3 [J]. CIESC Journal, 2018, 69(9): 4129-4136.

[6] JIA J Z, TIAN X Y, WANG F X. 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, 7(36): 31974-31982.

[7] 徐小猛, 汪泉, 张军, 等. 典型盐粉及盐溶液对甲烷爆燃火焰传播特性的影响研究[J]. 煤炭工程, 2022, 54(3): 159-164.
XU X M, WANG Q, ZHANG J, et al. Influence of typical salt powder and salt solution on flame propagation characteristics of methane deflagration [J]. Coal Engineering, 2022, 54(3): 159-164.

[8] 何文浩, 郝朝瑜, 张亚超, 等. 硅藻土抑制瓦斯爆炸的微观机理分析[J]. 煤炭学报, 2022, 47(10): 3695-3703.
HE W H, HAO C Y, ZHANG Y C, et al. Microscopic mechanism analysis of inhibition on methane explosion by diatomite [J]. Journal of Coal Science, 2022, 47(10): 3695-3703.

[9] 张庆利, 李孝斌, 张瑞杰, 等. 尿素抑制甲烷爆炸关键基元反应机理研究[J]. 消防科学与技术, 2022, 41(6): 732-735.
ZHANG Q L, LI X B, ZHANG R J, et al. Study on the key element reaction of urea inhibition of methane explosion [J]. Fire Science and Technology, 2022, 41(6): 732-735.

- [10] 李孝斌, 张瑞杰, 孙婧雯, 等. 甲烷爆炸中尿素粉体浓度对典型自由基影响研究[J]. 安全与环境学报, 2023, 23(4): 1093-1100.
LI X B, ZHANG R J, SUN J W, et al. Experiment of typical free radical change during urea inhibition of methane explosion[J]. Journal of Safety and Environment, 2023, 23(4): 1093-1100.
- [11] 罗振敏, 张江, 任军莹, 等. NH₄H₂PO₄粉体热分解产物在瓦斯爆炸中的作用[J]. 煤炭学报, 2017, 42(6): 1489-1495.
LUO Z M, ZHANG J, REN J Y, et al. Role of thermal decomposition products of NH₄H₂PO₄ powder in gas explosion [J]. Journal of Coal Science, 2017, 42(6): 1489-1495.
- [12] WANG Y, MENG X Q, JI W T, et al. The inhibition effect of gas-solid two-phase inhibitors on methane explosion[J]. Energies, 2019, 12(3): 398.
- [13] 苏洋, 罗振敏, 王涛. CO₂/海泡石抑爆剂对氢气/甲烷爆炸特性参数的影响[J]. 化工进展, 2022, 41(11): 5731-5736.
SU Y, LUO Z M, WANG T. Effect of CO₂/sepiolite explosion suppressants on hydrogen/methane deflagration characteristic parameters [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2022, 41(11): 5731-5736.
- [14] WANG F X, JIA J Z, TIAN X Y. Suppression of methane explosion in a pipe network by carbon dioxide-driven montmorillonite powder with different masses [J]. Arabian Journal of Chemistry, 2022, 5(10): 104126.
- [15] LU K L, CHEN X K, LUO Z M, et al. The inhibiting effects of sodium carbonate on coal dust deflagration based on thermal methods [J]. Fuel, 2022, 315: 123122.
- [16] WANG X, ZHANG Y S, LIU B, et al. Effectiveness and mechanism of carbamide/fly ash cenosphere with bilayer spherical shell structure as explosion suppressant of coal dust[J]. Journal of Hazardous Materials, 2019, 365: 555-564.
- [17] ZHENG L G, LI G, WANG Y L, et al. Effect of blockage ratios on the characteristics of methane/air explosion suppressed by BC powder [J]. Journal of Hazardous Materials, 2018, 355: 25-33.
- [18] XIE J B, ZHANG J Q, DING C, et al. Hydrophobic nano SiO₂ as flow-enhancing additives and flame retardant synergizes with CaCO₃ to suppress gas explosion [J]. RSC Advances, 2021, 11(8): 4672-4681.
- [19] KRASNYSKY M. Prevention and suppression of explosions in gas-air and dust-air mixtures using powder aerosol-inhibitor [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2006, 19(6): 729-735.
- [20] WANG Y, CHENG Y S, YU M G, et al. Methane explosion suppression characteristics based on the NaHCO₃/red-mud composite powders with core-shell structure [J]. Journal of Hazardous Materials, 2017, 335: 84-91.
- [21] YAN K, MENG X B, WANG Z, et al. Inhibition of aluminum powder explosion by a NaHCO₃/kaolin composite powder suppressant [J]. Combustion Science and Technology, 2022, 194(4): 815-831.
- [22] WANG X, ZHANG Y S, LIU B, et al. Effectiveness and mechanism of carbamide/fly ash cenosphere with bilayer spherical shell structure as explosion suppressant of coal dust [J]. Journal of Hazardous Materials, 2019, 365: 555-564.
- [23] 杨克, 王辰升, 纪虹, 等. 聚多巴胺包覆混合粉体抑制甲烷爆炸的实验研究[J]. 化工学报, 2022, 73(9): 4245-4254.
YANG K, WANG C S, JI H, et al. Experimental study on inhibition of methane explosion by polydopamine coated mixed powder [J]. CIESC Journal, 2022, 73(9): 4245-4254.
- [24] 袁必和, 陶红吉, 孙亚如, 等. 多孔矿物-聚磷酸铵对甲烷爆炸的协同抑制研究[J]. 中国安全科学学报, 2021, 31(3): 41-46.
YUAN B H, TAO H J, SUN Y R, et al. Study on synergistic suppression of methane explosion by porous mineral materials-ammonium polyphosphate composite powder [J]. Chinese Safety Science Journal, 2021, 31(3): 41-46.
- [25] WANG F X, JIA J Z, TIAN X Y. Performance and mechanism of bentonite in suppressing methane explosions in a pipeline network [J]. Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources, 2023, 9: 13.
- [26] 李艳超, 毕明树, 高伟. 耦合火焰不稳定的爆炸超压预测[J]. 爆炸与冲击, 2020, 40(1): 45-50.
LI Y C, BI M S, GAO W. Explosion pressure prediction considering the flame instabilities [J]. Explosion and Shock Waves, 2020, 40(1): 45-50.
- [27] 杜玉晶, 王亮. 分岔管道内瓦斯爆炸火焰传播规律实验及数值模拟[J]. 重庆大学学报, 2019, 4(6): 69-77.
DU Y J, WANG L. Experimental and numerical simulation of gas propagation law of gas explosion flame in bifurcation pipelines [J]. Journal of Chongqing University, 2019, 42(6): 69-77.
- [28] 贾进章, 王东明, 牛鑫, 等. 复杂管网中瓦斯爆炸冲击波与火焰波传播实验研究[J]. 煤田地质与勘探,

- 2022, 52(4): 84-91.
- JIA J Z, WANG D M, NIU X, et al. Propagation characteristics of flame wave and shock wave during the gas explosion in complex pipeline network [J]. *Coal Geology & Exploration*, 2022, 52(4): 84-91.
- [29] GU Z J, LIU Z T, WANG Z R, et al. Study on characteristics of methane explosion flame and pressure wave propagation to the non-methane area in a connected chamber [J]. *Fire and Materials*, 2021, 46(4): 639-650.
- [30] 蔡周全, 张引合. 干粉灭火剂粒度对抑爆性能的影响 [J]. *矿业安全与环保*, 2001, 28(4): 14-16.
- CAI Z Q, ZHANG Y H. Influence of particle size of dry fire-extinguishing powder on explosion suppression performance [J]. *Mining Safety and Environmental Protection*, 2001, 28(4): 14-16.
- [31] 王秋红, 王二飞, 陈晓坤, 等. 管道内瓦斯爆炸火焰传播压力与温度特性 [J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2020, 51(1): 239-247.
- WANG Q H, WANG E F, CHEN X K, et al. Pressure and temperature characteristics of flame propagation of gas explosion in pipeline [J]. *Journal of Central South University (Natural Science Edition)*, 2020, 51(1): 239-247.
- [32] 林森. KHCO_3 冷气溶胶的甲烷抑爆特性研究 [D]. 焦作: 河南理工大学, 2021.
- LIN S. Suppression characteristics of KHCO_3 cold aerosol on methane explosion [D]. Jiaozuo: He'nan Polytechnic University, 2021.
- [33] 王燕, 程义伸, 曹建亮, 等. 核-壳型 KHCO_3 /赤泥复合粉体的甲烷抑爆特性 [J]. *煤炭学报*, 2017, 42(3): 653-658.
- WANG Y, CHENG Y S, CAO J L, et al. Suppression characteristics of KHCO_3 /red-mud composite powders with core-shell structure on methane explosion [J]. *Journal of China Coal Industry*, 2017, 42(3): 653-658.
- [34] CAO X Y, BI M S, REN J J, et al. Experimental research on explosion suppression affected by ultrafine water mist containing different additives [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2019, 368: 613-620.
- [35] LIU Z Q, ZHONG X X, ZHANG Q, et al. Experimental study on using water mist containing potassium compounds to suppress methane/air explosions [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, 394: 122561.
- [36] LIN C D, QI Y Q, GAN X Y, et al. Investigation into the suppression effects of inert powders on the minimum ignition temperature and the minimum ignition energy of polyethylene dust [J]. *Processes*, 2020, 8(3): 294.