

DOI: 10.11883/bzycj-2018-0228

开口阻塞比对粉体抑制甲烷爆炸的影响研究*

郑立刚^{1,3}, 李 刚^{1,3}, 王亚磊^{1,3}, 朱小超^{1,3}, 窦增果^{1,3}, 杜德朋^{1,3}, 余明高²

(1. 河南理工大学煤炭安全生产河南省协同创新中心, 河南 焦作 454003;

2. 重庆大学煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室, 重庆 400044;

3. 河南理工大学瓦斯地质与瓦斯治理国家重点实验室培育基地, 河南 焦作 454003)

摘要: 为了研究开口阻塞比 φ 对粉体抑爆特性的影响, 采用质量浓度 C 为 0、80、160、240 g/m³ 的 Al(OH)₃ 和 NaHCO₃ 粉体, 分别抑制具有不同 φ (0、0.2、0.4、0.6、0.7、1.0) 值的 5 L 管道内甲烷/空气预混气爆炸。实验结果表明: 火焰的破碎度随粉体抑爆效率的增大而增大; 最大超压峰值 p_{\max} 、爆燃指数 K_{st} 由燃烧速率和泄爆速率共同决定。 $\varphi=0.7$ 是每条爆炸特征参数曲线的拐点。随着 φ 值增加, 超压峰值下降率 δ 先增大后减小, 在 0.4 和 0.6 之间达到最大; 总体上, Al(OH)₃ 和 NaHCO₃ 两种粉体的抑爆效率相近。但在某些阻塞比下, 阻塞比引起的低湍流影响着粉体颗粒的沉降行为, 使得 Al(OH)₃ 抑爆效率优于 NaHCO₃。当粉体质量浓度从 80 g/m³ 增加到 240 g/m³ 时, 热阻增加, 火焰的热量不能扩散到粒子云的中心, 不利于内部粒子的吸热分解, 致使浓度效应越来越弱。

关键词: 开口阻塞比; 粉体质量浓度; 抑爆; 瓦斯爆炸

中图分类号: O389

国标学科代码: 13035

文献标志码: A

瓦斯爆炸是最严重的煤矿事故灾害之一, 每年造成大量的人身伤亡和巨大的财产损失。为此, 相关学者在其防灾减灾方面开展了大量研究工作。惰性气体、细水雾、多孔介质和粉体等为抑制剂的主动式抑爆措施在煤矿安全中起到了重要作用^[1-8]。依据瓦斯抑爆效果与煤矿井下环境条件而言, 粉体抑制剂具有优越的抑制效率^[3]。粉体材料作为一种具有便于储存、成本低廉、环保高效特点的抑爆材料, 备受专家学者的关注, 并在抑爆领域得到了一定程度的应用。研究表明: 化学抑制型粉体(如二茂铁、NaHCO₃ 干粉)、物理抑制型粉体(如 Al(OH)₃、岩粉、硅石)等以单一或协同机制削弱爆炸强度达到抑制甲烷爆炸的目的^[3-6]。

真空腔、泄压口则是泄爆释放能量的被动措施, 亦受到煤矿与化工行业学者关注^[9-12]。在输送可燃气管道上同时采用主动式和被动式措施能提高抑爆效果。在采取主动式抑爆措施的场所中, 也存在不同面积的通风口或者强度薄弱区域, 这就自然形成了释放爆炸压力的泄压口, 即在释放抑制剂的受限空间中无法避免主动型和被动型措施同时存在。研究表明, 火焰形态不仅受甲烷浓度的影响而且与爆炸空间的尺度、泄压状况密切相关^[13]。例如, 封闭管道爆炸产生的超压高于部分开口的管道爆炸超压, 且火焰形态比传统的 4 个阶段更为复杂^[14-15]。泄压口比例也极大地影响着受限空间的爆炸强度^[9]。所以, 被动型泄爆措施必然会影响到主动型措施的抑爆效果。

近年来, 人们在小尺度实验条件下分别进行了被动泄爆^[9-12]和粉体主动抑爆^[3-6]的研究, 但被动措施(泄爆)对主动措施(粉体抑爆通常以主动措施形式存在)的影响鲜有报道。因此, 本文以当量比 1 的甲烷/空气预混气为研究对象, 在 5 L 垂直管中开展 NaHCO₃、Al(OH)₃ 这 2 种粉体的 4 种质量浓度(0、80、160、240 g/m³)抑制 6 组开口阻塞比(0、0.2、0.4、0.6、0.7、1.0)管道内瓦斯爆炸的实验; 通过研究 6 组开

* 收稿日期: 2018-06-26; 修回日期: 2018-08-22

基金项目: 国家自然科学基金(51674104, 51874120); 中国博士后科学基金(2013M540570); 河南理工大学创新型科研团队(T2018-2)

第一作者: 郑立刚(1979—), 男, 博士, 教授, zhengligang97@163.com;

通信作者: 余明高(1963—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, mg_yu@126.com。

口阻塞比管内火焰结构、传播速度及爆炸特征参数,以期探索出 2 种减灾模式相互作用机制,为预防可燃气体爆炸和减轻爆炸危害提供理论依据和数据支持。

1 实验部分

1.1 抑爆实验

实验系统如图 1 所示,包括透明方形有机玻璃管道、配气系统、喷粉系统、点火系统、火焰图像采集系统、压力与光信号采集系统和同步控制系统。管道长 500 mm,当 ϕ 为 0 时,管道开口尺寸为边长 100 mm 的正方形,管道下端刚性封闭,管道上端用 PVC 膜或盲板密封。质量流量控制器控制通入 9.5% 甲烷-空气预混气持续 10 min 以保证 3~5 倍容积的预混气流经管道^[16]。随后关闭进气和排气阀,静置 30 s。在此期间将预先制备的 9.5% 预混气通至压缩气瓶中至 0.3 MPa,关闭通气阀,启动同步控制器的一键触发按钮。启动喷粉 650 ms 后,点火系统、火焰图像采集系统、压力与光电信号采集系统同时触发。研究过程中,每组工况都进行 3 次以上重复性实验。

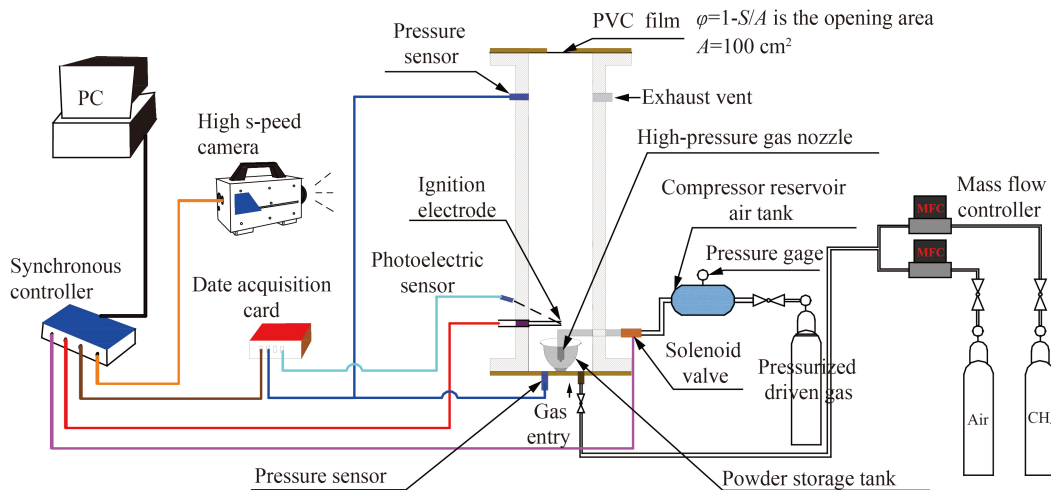


图 1 实验系统示意

Fig. 1 Schematic diagram of experimental system

1.2 实验材料

$\text{Al}(\text{OH})_3$ 粉体在高温下发生分解,放出结晶水,水受热蒸发进一步吸收潜热而降低温度,而分解生成的水蒸气又可稀释燃烧区域的氧气浓度,起到了冷却与窒息的作用,因此 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 对瓦斯爆炸的抑制主要来源于物理作用^[5]。相比较而言, NaHCO_3 受热除了冷却、窒息稀释物理抑制外,其分解产生的部分原子或化合物参与燃烧链式反应中,化学抑制作用优于 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 。本文意在研究泄压口阻塞比对粉体抑爆性能的影响,探讨泄压口引起火焰动力学对抑爆剂物理化学抑制机制的影响,因此实验采用抑制机制具有较大差异的两种粉体。实验中发现,较大粒径的粉体抑制效果较差,而较小粒径粉体又存在无法点火现象。综合实际抑制效果,本文采用经过标准筛制备的 200~220 目 NaHCO_3 粉体和未过筛的 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 粉体。采用同一粒径分布的粉体,而粒径对抑制效率的影响将通过后续具体的实验进行探究。利用 Malvern Sizer 2000 设备测试粒度分布 (particle size distribution, PSD) 结果如图 2 所示。利用公式:

$$\sigma_D = \frac{D_{90} - D_{10}}{D_{50}} \quad (1)$$

分别计算粉体粒度的分散性^[17]。其中 D_{10} 代表粉体中有 10% 的粉体颗粒的粒径小于此值,另外 90% 的粉体颗粒大于该值, D_{50} 和 D_{90} 定义与 D_{10} 类似。 NaHCO_3 的 D_{10} 、 D_{50} 、 D_{90} 值分别为 65.5 μm 、97.3 μm 、141 μm ,而 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 的 D_{10} 、 D_{50} 、 D_{90} 值则分别为 1.87 μm 、8.93 μm 、19.66 μm 。 NaHCO_3 粉体分散度

$\sigma_D=0.775$ 远小于 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 粉体分散度 $\sigma_D=1.992$, 表明 NaHCO_3 粉体颗粒大小均匀性较好。由于 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 和 NaHCO_3 粉体抑爆实验结果相似, 为避免重复, 对爆燃指数 K_{st} 、最大超压峰值 p_{\max} 、最大升压速率 $(dp/dt)_{\max}$ 研究时, 均选取 NaHCO_3 粉体的抑制曲线为分析对象。

2 实验结果及分析

2.1 火焰结构与传播速度

分析火焰传播过程有助于进一步理解物理和化学抑制机制。对于化学粉体来说, 其热分解对抑制效率至关重要^[18]。 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 、 NaHCO_3 颗粒在热解时会吸收部分爆炸释放的热量, 热解产生的水蒸气降低火焰温度, 降低火焰亮度。火焰进行截取时首先确定在每组工况中处在管内最后时刻的火焰图像, 然后经过 Photoshop 软件进行整体截取火焰区域, 最后将完整的图像粘贴到 PowerPoint 里进行局部截图和同比例的局部放大, 图像处理结果如图 3 所示, $\text{Al}(\text{OH})_3$ 抑制的火焰亮度普遍暗淡。一方面由于金属氢氧化物的比热容较高, 在爆炸环境中大量吸热, 产生的水蒸气冷却作用显著^[19]。另一方面受金属元素特征光谱影响, Na 发出黄橙色火焰, 即使加入少量 NaHCO_3 粉体, 火焰亮度都会增强。对于 φ 为 1.0 工况而言, 管道封闭不存在泄爆, 较其他工况而言除了器壁散热几乎不存在散热效果, 也就使得爆炸产生的热量持续累积, 管内温度大于其他工况 ($\varphi=0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.7$), 就造成了 φ 为 1.0 的图像比其他工况 ($\varphi=0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.7$) 的图像更亮。由于管壁和颗粒之间的热交换, 管壁处火焰暗淡且边缘存在消光现象。火焰受抑制作用越大, 散失的热量越多, 火焰结构中边缘消光现象越严重。通过观察所有被 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 、 NaHCO_3 粉体抑制的火焰, 发现其前缘出现撕裂或片状孤立的火焰。随开口阻塞比的增加, 锋面的破碎度先增大后减小, φ 值 0.4 和 0.6 之间达到最大。这种规律不受粉体质量浓度及抑制机制类型的影响。

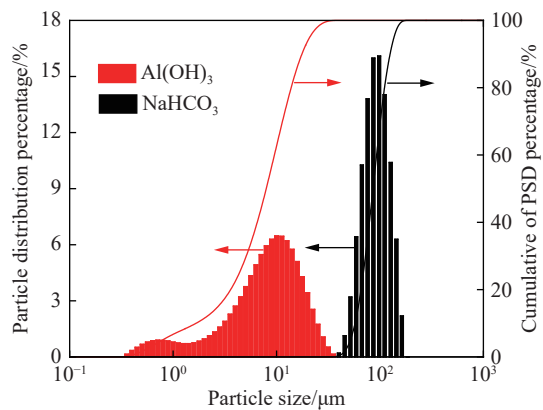


图 2 样品的粒度分布

Fig. 2 Particle size distributions of samples

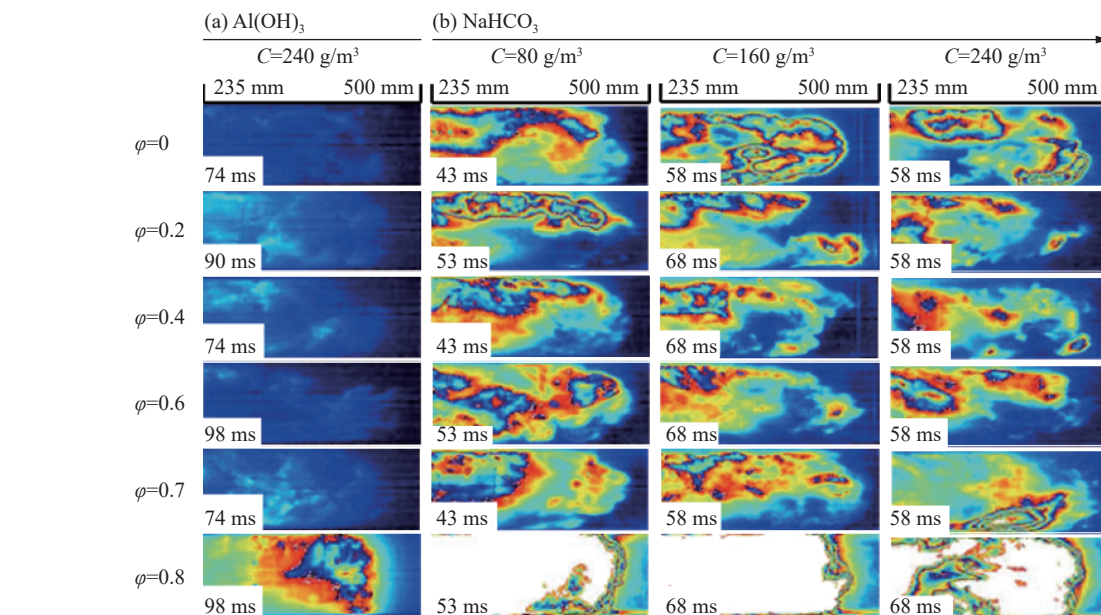


图 3 不同工况的火焰结构

Fig. 3 Comparison of flame structures with different experimental conditions

比较 3 种 NaHCO_3 粉体质量浓度抑制的火焰结构,发现质量浓度越大,其火焰锋面出现撕裂与破碎现象越严重。以 NaHCO_3 粉体为例分析原因如下:一方面 NaHCO_3 粉体分解吸热释放 CO_2 和 H_2O 形式的挥发物,导致火焰锋面热量散失及局部混合物稀释。另一方面,作为典型自由基清除剂的气相分解产物(例如 $\text{Na}/\text{NaOH}/\text{Na}_2\text{O}$)浓度增加,使得反应区中的自由基与气相分解产物之间的重组反应速率增加。此外,随着质量浓度持续增加,火焰前沿变得模糊不均匀,火焰前锋撕裂的情况加剧。例如,抑制剂质量浓度 $C=80 \text{ g/m}^3$ 的火焰锋面在侧壁附近破碎出现胞络面。当质量浓度达到 160 g/m^3 时,局部消光出现在火焰前端以及侧壁附近。当质量浓度达到 240 g/m^3 时,火焰前锋撕裂,中心局部出现消光。由此推测,高效率抑制的火焰前沿不连续且破裂度高。同时,受粉体抑制的火焰前沿不再沿管道轴线呈对称结构,这是由于喷粉时很难做到粉体分布均匀的缘故^[20]。

为了更加详细地研究开口阻塞比对火焰传播速度 v 的影响,对四种典型 φ 值的 v 值进行比较,如图 4 所示,指形火焰的 v 值在 $\varphi=0.7$ 时最大,在 $\varphi=1.0$ 时最小,按 $\varphi=0.7, 0.6, 0.4, 1.0$ 的顺序依次减小。火焰传播速度主要来源于火焰前沿未燃气速度,火焰前方未燃气的湍流度逐渐增加,速度逐渐增大。由图 4 可知, $\varphi=0.6, 0.7$ 时火焰传播速度较为接近,表明 $\varphi=0.6$ 的管内湍流度几乎达到最值。湍流强弱严重依赖 φ 值,即 φ 值从 0 增加至 1.0 时湍流度呈现先增大后减少的趋势。有趣的是,粉体的抑制效率及火焰结构随 φ 值的变化规律与湍流度的趋势保持高度一致。

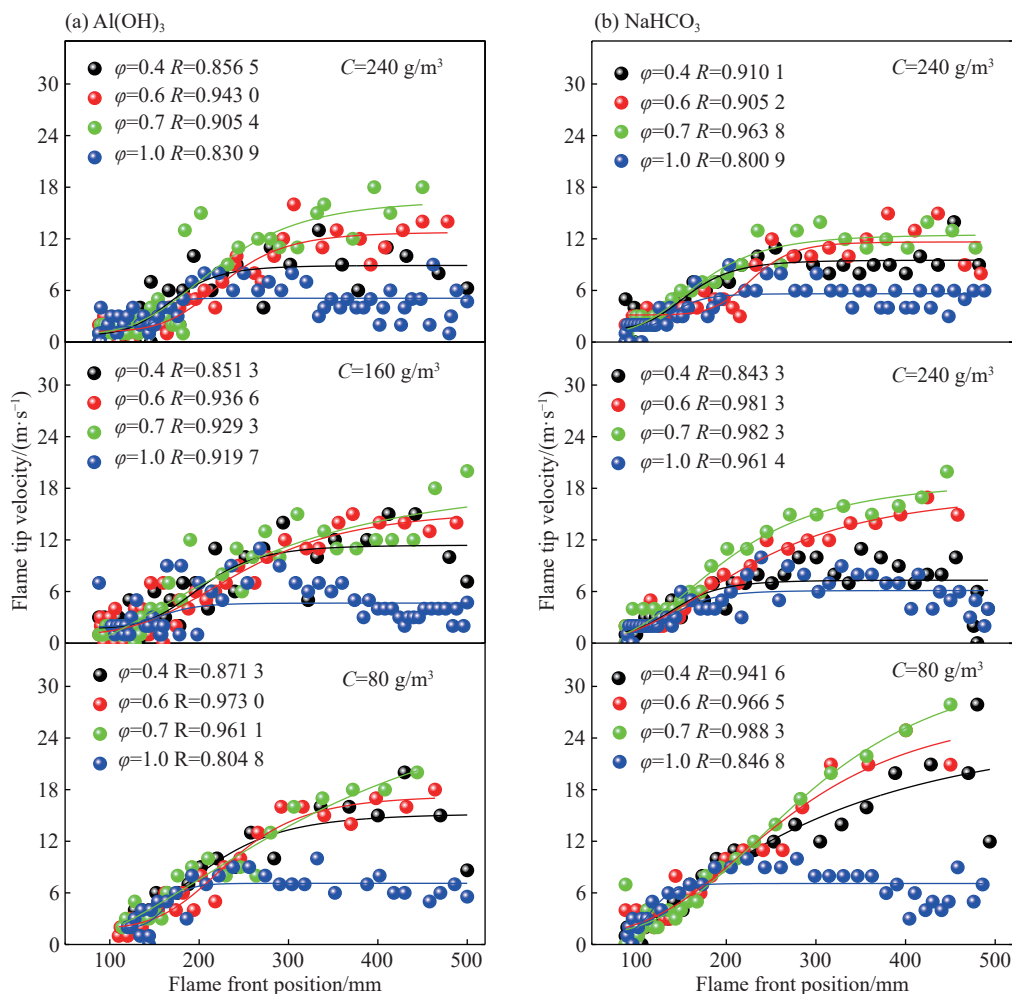


图 4 四种开口阻塞比下的火焰传播速度

Fig. 4 The flame tip velocity under four blockage ratios with different powder concentrations

2.2 爆炸特征参数分析

抑爆效果采用 Rallis^[21] 提出的爆燃指数:

$$K_{st} = \left(\frac{dp}{dt} \right)_{\max} V^{1/3} \quad (2)$$

以及最大超压峰值 p_{\max} 、最大升压速率 $(dp/dt)_{\max}$ 、超压峰值下降率 δ 进行评估。图 5 为 $C=0 \text{ g/m}^3$ 时爆炸特征参数, 三条曲线走势相同, 即 $\varphi < 0.7$ 时相应特征参数相差不大, $\varphi=1.0$ 的参数是 $\varphi=0.7$ 参数的 7~10 倍。曲线存在拐点 $\varphi=0.7$, 曲线斜率自 $\varphi=0.7$ 处急剧增大。例如, p_{\max} 和 $(dp/dt)_{\max}$ 随开口阻塞比 φ 值减小而单调下降, 即 $\varphi=1.0, 0.7, 0.6, 0.4, 0.2, 0$ 的值依次减小。由 K_{st} 公式可知, 爆燃指数正比于 $(dp/dt)_{\max}$, 所以其变化趋势等同于 $(dp/dt)_{\max}$ 。管内爆炸压力升高主要取决于燃烧速率与泄爆速率的共同作用。当阻塞比从 0 增加到 0.7 时, 泄爆时气流速度逐渐增加 (见 图 4), 但较大阻塞比意味着泄爆面积减少, 总泄爆速率降低, 有利于压力升高。从 图 6 可以看出, $C=80, 160, 240 \text{ g/m}^3$ 的爆炸特征参数 $K_{st}, p_{\max}, (dp/dt)_{\max}$ 变化趋势与 $C=0 \text{ g/m}^3$ 的结果相似。因此, 开口阻塞比对爆炸特性参数的作用规律几乎一致, 不因粉体质量浓度而改变。总之, 开口阻塞比 φ 值越小, 爆炸特征参数 $K_{st}, p_{\max}, (dp/dt)_{\max}$ 值越小, 其爆炸所产生的破坏力也就越小。 φ 值在 0~0.7 区间时爆炸破坏力单调递增, 但增大的幅度较小; φ 值大于 0.7 之后爆炸破坏力陡增, 这种规律同样不受粉体质量浓度及粉体类型的影响。所以, 现实受限空间应尽可能避免出现高开口阻塞比结构。

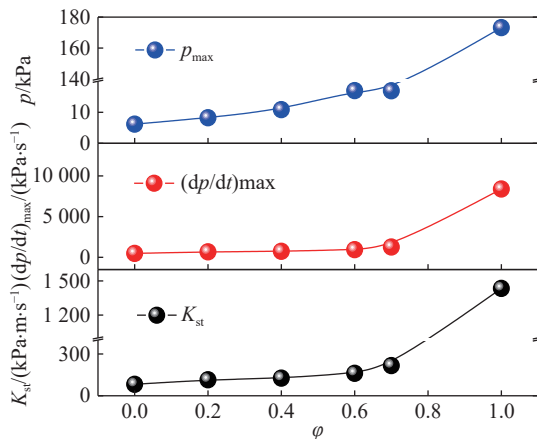


图 5 NaHCO₃ 质量浓度 $C=0 \text{ g/m}^3$ 时封闭端爆炸参数
Fig. 5 The explosion parameters at the lower end with $C=0 \text{ g/m}^3$

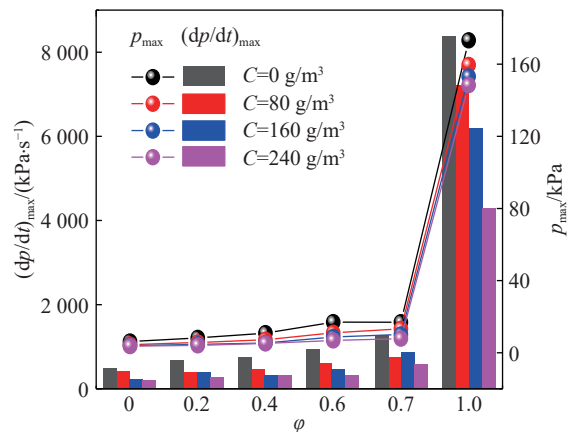


图 6 NaHCO₃ 抑制时封闭端超压峰值及最大升压速率
Fig. 6 The p_{\max} and $(dp/dt)_{\max}$ at the lower end with NaHCO₃

定义超压峰值下降率 δ 为有无粉体时的 p_{\max} 差值与无粉体时 p_{\max} 的比值。 $K_{st}, p_{\max}, (dp/dt)_{\max}$ 有效地评估了爆炸强度, 而 δ 直观地体现了开口阻塞比对粉体抑爆效率的影响。本文 2.1 节已经揭示了火焰结构的破碎度随 φ 值的关系, 得到了与 图 7 高度一致的结论。火焰破碎度及 δ 值随开口阻塞比的变化走势一致, 且最大火焰破碎度及最大 δ 值出现在开口阻塞比 0.4 和 0.6 之间 (图 3 和 图 7)。

在 图 7 的基础上, 以相邻质量浓度引起的 δ 增量 $\delta|_{C=160} - \delta|_{C=80}, \delta|_{C=240} - \delta|_{C=160}$ 为参量, 分析质量浓度对抑制效率的作用程度随 φ 值的变化。由 表 1 可知, 质量浓度 C 从 80 g/m^3 增加到 160 g/m^3

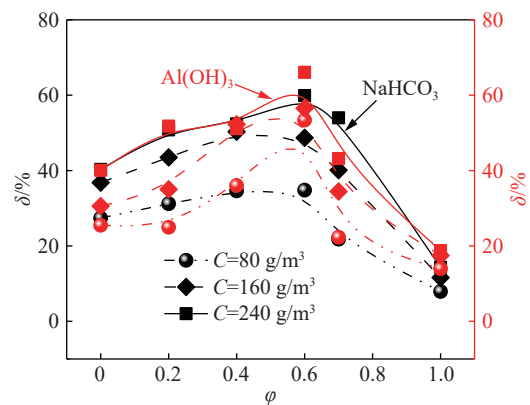


图 7 封闭端超压峰值下降率
Fig. 7 The drop rate of p_{\max} at the lower end as a function of the blockage ratio

时的 δ 增量($\delta|_{C=160}-\delta|_{C=80}$)大于质量浓度从 160 g/m^3 到 240 g/m^3 时的 δ 增量($\delta|_{C=240}-\delta|_{C=160}$)。这说明,粉体质量浓度越高,抑爆效率越好;但在高浓度区间增加粉体质量浓度引起的抑爆效率增加低于低浓度区间,即浓度越高,浓度间抑制效果差值越小,表明浓度效应相对在减弱,如表 1 所示。

表 1 不同工况下超压峰值下降率增值的比较

Table 1 Comparison of the increment in the drop rate of p_{\max} with different experimental conditions

粉体	φ	$(\delta _{C=160}-\delta _{C=80})/\%$	$(\delta _{C=240}-\delta _{C=160})/\%$
NaHCO ₃	0	9.4	3.5
	0.2	12.3	7.3
	0.4	15.7	2.1
	0.6	13.9	11.2
	0.7	18.3	13.9
	1.0	3.7	2.7
Al(OH) ₃	0	5.1	9.5
	0.2	10.1	16.8
	0.4	16.2	1.1
	0.6	9.6	3.1
	0.7	12.1	8.7
	1.0	3.5	1.3

3 抑爆作用机理分析

结合图 3 和图 7 可知,随开口阻塞比的增加,粉体的抑制效率 δ 及火焰锋面的破碎度先增大后减小,在 φ 值 0.4 和 0.6 之间达到最大。阻塞比 φ 通过影响管内流场的湍流度以及粉体颗粒间的凝并状态改变粉体的抑爆效率。当 φ 从 0 增大到 0.7 时,火焰前方未燃气的速度逐渐增大(见图 4,火焰传播速度主要来源于火焰前沿未燃气速度),湍流度逐渐增加;当 φ 从 0.7 增大到 1.0 时,泄爆面积急剧减小,使管内湍流度减小。一方面,增大的湍流度使粉体在反应区停留时间及火焰经过预热区的时间越短,粉体的抑爆效率下降;再者,湍流输运有利于传热传质,增大了粉体抑爆效率。另一方面,粉体颗粒间普遍存在两种团聚状态:软团聚和硬团聚^[22]。范德华力是颗粒软团聚的根本原因^[23],增大的湍流度促使管内粉体颗粒剧烈运动,而颗粒剧烈的运动减弱了因吸引力造成的凝并程度^[24]。当 φ 从 0 增大到 1.0 时,管内湍流度先增加后减少,使颗粒软团聚程度先减少后增加,进而因软团聚引起的抑制效率先增加后减少,因此中等阻塞比的抑制效率最佳。Eckhoff 等^[24]、李国栋等^[25]认为羟基层间的化学反应是硬团聚的根源。化学反应进行的程度与颗粒在火焰中的停留时间(即火焰传播速度 v)有关, $\varphi=0.7$ 的火焰传播速度大于 φ 为 0.4、0.6 的火焰传播速度(见图 4),这将减弱颗粒间的化学反应(如 OH·基间聚合反应),进而极大地降低了抑制粉体效率。因此,中等 φ 值(0.4~0.6)的抑制效率最佳,火焰破碎度最大。由此推断火焰结构及抑制效率是由随 φ 变化的湍流度和软硬团聚共同竞争的结果。

粉体的抑制效率与抑制机理密不可分。由图 8 可知,Al(OH)₃ 参与自由基反应较弱,主要通过物理机制抑爆;而 NaHCO₃ 可能通过物理抑制和化学机制抑爆。理论上,偏重于物理抑制的 Al(OH)₃ 与化学抑制显著的 NaHCO₃ 两者的抑制效率本应相差很大。但由图 7 可知,总体上,两种粉体的抑爆效率相近。这是因为粉体粒径会影响抑爆机理。NaHCO₃ 如要发挥化学抑制,它首先必须能分解形成气态 NaOH(g)。理论分析证明,NaHCO₃ 在甲烷预混火焰中的临界分解直径为 $16 \mu\text{m}$ ^[20],本文中 NaHCO₃ 索特直径 $D_{32}=92.7 \mu\text{m}$,因此 NaHCO₃ 在反应区中难以完全分解。一方面,Al(OH)₃ 索特直径($D_{32}=4.139 \mu\text{m}$)远小于 NaHCO₃ 索特直径,依据颗粒升温速率反比于颗粒直径的平方($dT_p/dt \propto D_p^{-2}$);且较小粒径的 Al(OH)₃ 颗粒与爆炸流场之间的速度滑移小(颗粒与气流速度差),在反应区中的停留时间更长,

所以 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 颗粒较 NaHCO_3 颗粒吸热速率要快得多; 而 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 的热容 ($c_p=1.17 \text{ J/g}\cdot\text{K}$) 与 NaHCO_3 的热容 ($c_p=1.04 \text{ J/g}\cdot\text{K}$) 相近, 因此在质量浓度 C 相同时, $\text{Al}(\text{OH})_3$ 的吸热能力 ($Cc_p dT_p/dt$) 高于 NaHCO_3 。据此可以推断, NaHCO_3 仍然发挥了一部分化学抑制作用。尽管 NaHCO_3 平均粒径 D_{32} 远大于临界分解直径, 但仍然有一部分 NaHCO_3 颗粒能够在后燃烧区部分或完全分解, 形成的气态 NaOH 反向扩散到反应区, 参与自由基重组反应。因此, 两者粉体的抑制效率差别不大。另一方面, 某些阻塞比下 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 的抑制效率优于 NaHCO_3 , 这表明阻塞比能够改变粉体的抑制效率。管内颗粒存在沉降现象, 并且小粒径的 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 颗粒沉降程度弱于大粒径的 NaHCO_3 。由于 φ 为 1.0 时的湍流度较其他阻塞比而言较小, 大粒径的 NaHCO_3 粉体更易沉降(颗粒沉降方向与未燃气流动方向相反), 使得偏重于物理抑制的 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 在湍流度较小的工况 ($\varphi=1.0$) 下其抑制效率反而较好(图 7)。除此之外, 比较封闭端所有阻塞比的抑制效率发现, φ 在 0.4 与 0.6 时, 即湍流度较高的工况, $\text{Al}(\text{OH})_3$ 的抑制效率也较好, 这是由于小粒径 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 颗粒与爆炸流场之间的速度滑移远小于 NaHCO_3 颗粒, 使其在反应区的停留时间更长, $\text{Al}(\text{OH})_3$ 颗粒有更充分机会与反应区发生热量交换。

文虎等^[5]的研究表明 $1.3 \mu\text{m}$ 的 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 最佳抑爆粉体质量浓度为 250 g/m^3 。本文采用最高质量浓度 240 g/m^3 且粒径远大于 $1.3 \mu\text{m}$ 的 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 。 NaHCO_3 质量浓度的抑制效率同样没有达到饱和(见图 6)。因此这两种粉体的抑制效率会随着质量浓度的增加而逐渐增加。从表 1 可以看出, 抑制效果随着粉体质量浓度增加而相对地减弱。在粉体粒子处于低浓度区域时, 热阻低, 反应区的热量更容易传导到粒子云内部, 粒子云内部颗粒都能有效吸收反应区热量, 使粒子云中颗粒处于单颗粒吸热分解模式; 在高粉体质量浓度下, 颗粒的体积荷载增加, 这导致粒子间空间的减少, 热阻增加, 限制了反应区的热量向粒子云内部扩散^[26], 从而只有粒子云外围的颗粒才能有效受热分解, 而粒子云内部的颗粒不能有效受热分解, 粉体颗粒呈粒子云外鞘分解模式, 如图 8 所示。在单颗粒吸热分解模式下, 粒子云中的每个粒子都可以被周围火焰独立分解; 在外鞘分解模式下, 粒子云中的内部颗粒不能有效分解。随着粉体质量浓度的增加, 粒子云半径增加, 增大了热量向粒子云内部扩散的特征时间, 粒子云外鞘分解模式程度加剧^[27]。因此, 粉体颗粒分解模式取决于颗粒质量浓度。在各个开口阻塞比作用下, 160 g/m^3 的分解效果比 240 g/m^3 的分解效果好, 高浓度抑制效果相对地弱化。

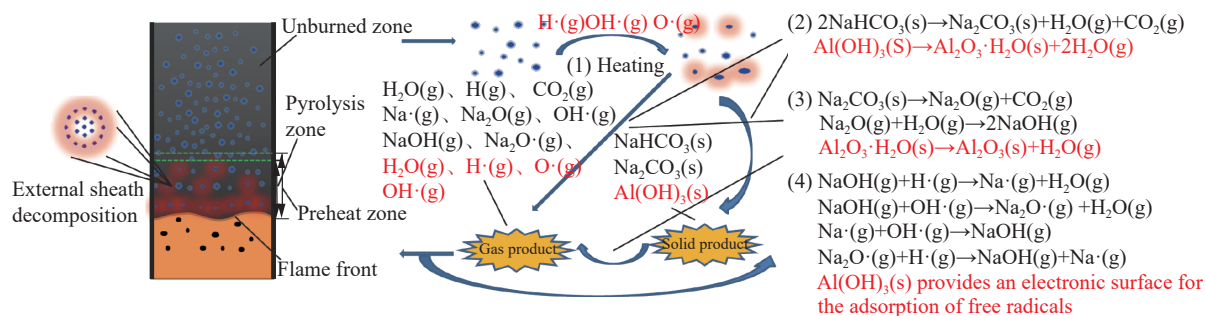


图 8 NaHCO_3 与 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 粉体抑爆机理示意

Fig. 8 Mechanism illustration of the methane explosion suppression by NaHCO_3 and $\text{Al}(\text{OH})_3$ powders

4 结 论

(1) 随着开口阻塞比 φ 的增大, 火焰锋面的破碎度先增大后减小, 在 φ 处于 0.4 和 0.6 之间达到最大值。提高抑爆粉体的质量浓度, 火焰前锋撕裂度大。这是由于变化的湍流度和粒子自发凝并改变了粉体抑制效率。综合分析可得: 高效率抑制的火焰前沿不连续且破裂度高。

(2) 爆炸特征参数 K_{st} 、 p_{\max} 、 $(dp/dt)_{\max}$ 随着开口阻塞比 φ 增加单调上升, $\varphi=0.7$ 是一个拐点。无论是偏重于物理抑制作用的 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 还是偏于化学抑制作用的 NaHCO_3 , 粉体的抑制效率随开口阻塞比变化规律不变。最大爆炸超压下降率 δ 表现出相同的规律, 即随着 φ 增加, δ 值先增加后减小。在 φ 处于

0.4 和 0.6 之间时, δ 值达到最大。这归因于泄爆产生的湍流及粉体团聚机制对抑制的两个相对作用。综合以上两条结论可知, 采取过抑爆措施的爆炸危险空间, 其开口阻塞比处在 0.4 至 0.6 之间时抑爆措施能达到最佳的减灾效果。

(3) 总体上, $\text{Al}(\text{OH})_3$ 和 NaHCO_3 两种粉体的抑爆效率相近。考虑到两者的比热容相近, 因粒径差异, $\text{Al}(\text{OH})_3$ 的升温速率远高于 NaHCO_3 , 推测 NaHCO_3 发挥了一定的化学抑制作用。在某些阻塞比(如 $\phi=1.0$)下, 阻塞比引起的低湍流影响着粉体颗粒的沉降行为, 使得 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 抑爆效率优于 NaHCO_3 。

(4) 当粉体质量浓度从 80 g/m^3 增加到 240 g/m^3 时, δ 差值逐渐减少, 表明浓度效应越来越弱, 即在高浓度区间提高粉体质量浓度对提高抑爆效率有限。结合粉体抑爆机理可知: 抑制剂浓度较高时, 热阻越来越大, 增大了热量向粒子云内部扩散的特征时间, 火焰的热量不能扩散到粒子云的中心, 从而使内部粒子不能完全分解, 从而起不到抑制作用。

参考文献:

- [1] 余明高, 杨勇, 裴蓓, 等. N_2 双流体细水雾抑制管道瓦斯爆炸实验研究 [J]. *爆炸与冲击*, 2017, 37(2): 194–200. DOI: 10.11883/1001-1455(2017)02-0194-07.
YU Minggao, YANG Yong, PEI Bei, et al. Experimental study of methane explosion suppression by nitrogen twin-fluid water mist [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2017, 37(2): 194–200. DOI: 10.11883/1001-1455(2017)02-0194-07.
- [2] 张培理, 杜扬. 油气爆炸的氮气非预混抑制实验 [J]. *爆炸与冲击*, 2016, 36(3): 347–352. DOI: 10.11883/1001-1455(2016)03-0347-06.
ZHANG Peili, DU Yang. Experiments of nitrogen non-premixed suppression of gasoline-air mixture explosion [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2016, 36(3): 347–352. DOI: 10.11883/1001-1455(2016)03-0347-06.
- [3] JIANG H, BI M, GAO W, et al. Inhibition of aluminum dust explosion by NaHCO_3 with different particle size distributions [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2017, 344: 902–912. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2017.11.054.
- [4] 范宝春, 李鸿志. 惰性颗粒抑爆过程的数值模拟 [J]. *爆炸与冲击*, 2000, 20(3): 208–214.
FAN Baochun, LI Hongzhi. Numerical simulations of explosion suppression by inert particles [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2000, 20(3): 208–214.
- [5] 文虎, 王秋红, 邓军, 等. 超细 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 粉体浓度对甲烷爆炸压力的影响 [J]. *煤炭学报*, 2009(11): 1479–1482. DOI: 10.3321/j.issn:0253-9993.2009.11.009.
WEN Hu, WANG Qiuhong, DENG Jun, et al. Effect of the concentration of $\text{Al}(\text{OH})_3$ ultrafine powder on the pressure of methane explosion [J]. *Journal of China Coal Society*, 2009(11): 1479–1482. DOI: 10.3321/j.issn:0253-9993.2009.11.009.
- [6] ZHENG L G, ZHENG K, PAN R K, et al. Inhibition of the premixed CH_4 /air deflagration by powdered extinguishing agents [J]. *Procedia Engineering*, 2014, 71: 230–237. DOI: 10.1016/j.proeng.2014.04.033.
- [7] 喻健良, 闫兴清. 硅酸铝棉对火焰速度和爆炸超压的抑制作用 [J]. *爆炸与冲击*, 2013, 33(4): 363–368. DOI: 10.11883/1001-1455(2013)04-0363-06.
YU Jianliang, YAN Xingqing. Suppression of flame speed and explosion overpressure by aluminum silicate wool [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2013, 33(4): 363–368. DOI: 10.11883/1001-1455(2013)04-0363-06.
- [8] 周佩杰, 王坚, 陶钢, 等. 泡沫材料对冲击波的衰减特性 [J]. *爆炸与冲击*, 2015, 35(5): 675–681. DOI: 10.11883/1001-1455(2015)05-0675-07.
ZHOU Peijie, WANG Jian, TAO Gang, et al. Attenuation characteristics of shock waves interacting with open and closed foams [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2015, 35(5): 675–681. DOI: 10.11883/1001-1455(2015)05-0675-07.
- [9] 邵昊, 蒋曙光, 李钦华, 等. 真空腔体积对真空腔抑制瓦斯爆炸性能的影响 [J]. *采矿与安全工程学报*, 2014, 31(3): 489–493. DOI: 10.13545/j.issn1673-3363.2014.03.025.
SHAO Hao, JIANG Shugang, LI Qinhu, et al. Influence of vacuum chamber volume on gas explosion suppression [J]. *Journal of Mining and Safety Engineering*, 2014, 31(3): 489–493. DOI: 10.13545/j.issn1673-3363.2014.03.025.
- [10] 胡俊, 浦以康, 万士昕, 等. 柱形容器开口泄爆过程中压力发展特性的实验研究 [J]. *爆炸与冲击*, 2001, 21(1): 47–52.
HU Jun, PU Yikang, WAN Shixin, et al. Experimental investigations of pressure development during explosion vent from cylindrical vessels [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2001, 21(1): 47–52.

- [11] 任少峰, 陈先锋, 王玉杰, 等. 泄压口比率对气体泄爆过程中的动力学行为的影响 [J]. *煤炭学报*, 2011, 36(5): 830–833. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2011.05.033.
REN Shaofeng, CHEN Xianfeng, WANG Yujie, et al. Effect of pressure-orifice ratio on dynamic behavior during gas venting [J]. *Journal of China Coal Society*, 2011, 36(5): 830–833. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2011.05.033.
- [12] 尤明伟, 蒋军成, 喻源, 等. 等泄压比条件下连通容器泄爆实验研究 [J]. *爆炸与冲击*, 2012, 32(2): 221–224. DOI: 10.11883/1001-1455(2012)02-0221-04.
YOU Mingwei, JIANG Juncheng, YU Yuan, et al. Experimental study on premixed flammable gas explosion venting in linked vessels under the same effective vent area [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2012, 32(2): 221–224. DOI: 10.11883/1001-1455(2012)02-0221-04.
- [13] 陈东梁, 孙金华, 刘义, 等. 甲烷/空气预混气体火焰的传播特征 [J]. *爆炸与冲击*, 2008, 28(5): 385–390. DOI: 10.11883/1001-1455(2008)05-0385-06.
CHEN Dongliang, SUN Jinhua, LIU Yi, et al. Propagation characteristics of premixed methane-air flames [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2008, 28(5): 385–390. DOI: 10.11883/1001-1455(2008)05-0385-06.
- [14] XIAO H, WANG Q, HE X, et al. Experimental study on the behaviors and shape changes of premixed hydrogen–air flames propagating in horizontal duct [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2011, 36(10): 6325–6336. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2011.02.049.
- [15] CLANET C, SEARBY G. On the “tulip flame” phenomenon [J]. *Combustion and Flame*, 1996, 105(1/2): 225–238. DOI: 0010-2180(95)00195-6.
- [16] LV X, ZHENG L, ZHANG Y, et al. Combined effects of obstacle position and equivalence ratio on overpressure of premixed hydrogen–air explosion [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2016, 41(39): 17740–17749. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2016.07.263.
- [17] CASTELLANOS D, CARRETO-VAZQUEZ V H, MASHUGA C V, et al. The effect of particle size polydispersity on the explosibility characteristics of aluminum dust [J]. *Powder Technology*, 2014, 254(2): 331–337. DOI: 10.1016/j.powtec.2013.11.028.
- [18] HUANG D, WANG X, YANG J. Influence of particle size and heating rate on decomposition of BC dry chemical fire extinguishing powders [J]. *Particulate Science and Technology*, 2015, 33(5): 488–493. DOI: 10.1080/02726351.2015.1013591.
- [19] 王秋红, 邓军, 罗振敏, 等. 超细氢氧化镁粉体抑制甲烷-空气混合物爆炸效能研究 [J]. *中国安全科学学报*, 2014, 24(12): 33–37. DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2014.12.006.
WANG QiuHong, DENG Jun, LUO Zhenmin, et al. Research on effects of methane explosion suppression by ultrafine magnesium hydroxide powder [J]. *China Safety Science Journal*, 2014, 24(12): 33–37. DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2014.12.006.
- [20] OMAR Dounia, OLIVIER Vermorel, THIERRY Poinso. Theoretical analysis and simulation of methane/air flame inhibition by sodium bicarbonate particles [J]. *Combustion & Flame*, 2018, 193: 313–326. DOI: 10.1016/j.combustflame.2018.03.033.
- [21] RALLIS C J, GARFORTH A M. The determination of laminar burning velocity [J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 1980, 6(4): 303–329. DOI: 10.1016/0360-1285(80)90008-8.
- [22] 徐跃萍, 郭景坤, 黄校先, 等. 无团聚 ZrO_2 - Y_2O_3 陶瓷超细粉的制备及微观结构表征 [J]. *硅酸盐学报*, 1991(3): 269–273. DOI: 10.3321/j.issn:0454-5648.1991.03.001.
XU Yueping, GUO Jingkun, HUANG Xiaoxian, et al. Preparation and microstructure characteristics of free-agglomerate ultrafine ZrO_2 - Y_2O_3 ceramic powder [J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 1991(3): 269–273. DOI: 10.3321/j.issn:0454-5648.1991.03.001.
- [23] 冯拉俊, 刘毅辉, 雷阿利. 纳米颗粒团聚的控制 [J]. *微纳电子技术*, 2003, 40(7): 536–539. DOI: 10.3969/j.issn.1671-4776.2003.07.158.
FENG Lajun, LIU Yihui, LEI Ali. The controlling of nanoparticle agglomerates [J]. *Micronanoelectronic Technology*, 2003, 40(7): 536–539. DOI: 10.3969/j.issn.1671-4776.2003.07.158.
- [24] ECKHOFF R K. Influence of dispersibility and coagulation on the dust explosion risk presented by powders consisting of nm-particles [J]. *Powder Technology*, 2013, 239(17): 223–230. DOI: 10.1016/j.powtec.2013.02.007.
- [25] 李国栋, 熊翔, 黄伯云. 纳米粉体大气环境团聚机理及无团聚纳米粉体的制备 [J]. *中南大学学报 (自然科学版)*, 2004,

- 35(4): 527–531. DOI: 10.3969/j.issn.1672-7207.2004.04.002.
- LI Guodong, XIONG Xiang, HUANG Boyun. Agglomerate mechanism of nanometer powders in atmosphere and methods of preparation of nan-agglomerate nanometer powders [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2004, 35(4): 527–531. DOI: 10.3969/j.issn.1672-7207.2004.04.002.
- [26] RANGANATHAN S, ROCKWELL S R, PETROW D, et al. Radiative fraction of dust entrained turbulent premixed flames [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2017, 51: 65–71. DOI: 10.1016/j.jlp.2017.11.009.
- [27] RANGANATHAN S, PETROW D, ROCKWELL S R, et al. Turbulent burning velocity of methane–air–dust premixed flames [J]. *Combustion and Flame*, 2018, 188: 367–375. DOI: 10.1016/j.combustflame.2017.10.015.

Effect of blockage ratios on the characteristics of methane/air explosions suppressed by dry chemicals

ZHENG Ligang^{1,3}, LI Gang^{1,3}, WANG Yalei^{1,3}, ZHU Xiaochao^{1,3},
Dou Zengguo^{1,3}, DU Depeng^{1,3}, YU Minggao²

(1. *The Collaborative Innovation Center of Coal Safety Production of Henan Province, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, Henan, China;*

2. *State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics Control, Chongqing University, Chongqing 400044, China;*

3. *State Key Laboratory Cultivation Base for Gas Geology and Gas Control, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, Henan, China)*

Abstract: To investigate the effect of blockage ratios (φ) on the inhibited flame, an experimental study was performed to suppress the methane-air explosions in a 5 L duct with the blockage ratios $\varphi = 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.7, 1.0$ under BC and $\text{Al}(\text{OH})_3$ inhibitors with the mass concentrations $C = 0 \text{ g/m}^3, 80 \text{ g/m}^3, 160 \text{ g/m}^3$ and 240 g/m^3 . The results indicated that the flame fragmentation increased with the improvement of the suppression efficiency. The maximum explosion pressure (p_{\max}) and the deflagration index of the explosion (K_{st}) were dominated by the combustion rate and the discharge rate. Furthermore, $\varphi = 0.7$ was the inflection point of p_{\max} and K_{st} curves. The drop rate in the P_{\max} (δ) firstly increased and then decreased as the blockage ratio increased. And the maximum δ_{\max} was achieved at the blockage ratio between 0.4 with 0.6. In general, the suppression efficiency of $\text{Al}(\text{OH})_3$ and NaHCO_3 powders was comparable. However, the low turbulence caused by certain blocking ratios impacted the sedimentation of inhibitor particles, which made the suppression efficiency of $\text{Al}(\text{OH})_3$ better than that of NaHCO_3 . There was an increasing heat resistance as the powder concentration increased from 80 g/m^3 to 240 g/m^3 , which blocked the penetration of heat from the flame into the interior of particle cloud and disabled interior particles' thermal decomposition, leading to a weakening concentration effect.

Keywords: blockage ratios; powder concentration; explosion suppression; methane explosion

(责任编辑 王易难)