Mine Engineering 矿山工程, 2026, 14(6), 1523-1531
Published Online November 2026 in Hans. https://www.hanspub.org/journal/me
https://doi.org/10.12677/me.2026.146151

Hans汉斯

不同改性干水抑爆剂对煤尘爆炸压力与火焰演化特性的影响

邢长政

安徽理工大学安全科学与工程学院，安徽 淮南

收稿日期：2026年9月3日；录用日期：2026年10月5日；发布日期：2026年11月6日

摘　要

为比较不同活性组分改性干水对煤尘爆炸的抑制差异，采用20 L球形爆炸装置，以200 g/m³烟煤煤尘为对象，考察普通干水及磷酸二氢铵(MAP)、三聚氰胺聚磷酸盐(MPP)、三聚氰胺氰尿酸盐(MCA)改性干水在5%~30%添加量下对爆炸压力、压力上升速率、特征时间和火焰演化的影响。低添加量普通干水、MPP干水和MCA干水会使最大爆炸压力短暂升高，而MAP干水随添加量增加始终表现为抑制。添加量为30%时，4种干水体系的最大爆炸压力分别降至0.109、0.113、0.099和0.103 MPa，抑制率为83.80%、83.33%、85.40%和84.81%；最大压力上升速率降至7.5、7.5、5.0和5.0 MPa/s。添加量为25%时，爆炸感应时间和燃烧时间均明显延长，其中MPP干水对应的延长幅度最大。火焰在0~16 ms快速发展，爆炸压力响应相对滞后；10%添加量下MAP干水使火焰衰减最快。结果表明，干水抑爆存在明显临界添加量，其中MAP干水在低添加量阶段的稳定抑制作用更具优势。

关键词

干水抑爆剂，煤尘爆炸，爆炸压力，压力上升速率，火焰演化

Effects of Different Modified Dry-Water Explosion Suppressants on the Explosion Pressure and Flame Evolution Characteristics of Coal Dust

Changzheng Xing

School of Safety Science and Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui

Received: September 3, 2026; accepted: October 5, 2026; published: November 6, 2026

文章引用: 邢长政. 不同改性干水抑爆剂对煤尘爆炸压力与火焰演化特性的影响[J]. 矿山工程, 2026, 14(6): 1523-1531.
DOI: 10.12677/me.2026.146151

Abstract

To compare the explosion suppression performance of dry water modified with different active components, a 20 L spherical explosion vessel was employed to investigate the effects of conventional dry water and dry water modified with ammonium dihydrogen phosphate (MAP), melamine polyphosphate (MPP), and melamine cyanurate (MCA) on the explosion pressure, pressure rise rate, characteristic time, and flame evolution of bituminous coal dust at a concentration of 200 g/m³. The addition ratios of the suppressants ranged from 5% to 30%. At low addition ratios, conventional dry water, MPP-modified dry water, and MCA-modified dry water caused a temporary increase in the maximum explosion pressure, whereas MAP-modified dry water exhibited a continuous suppression effect with increasing addition ratio. At an addition ratio of 30%, the maximum explosion pressures for the four dry-water systems decreased to 0.109, 0.113, 0.099, and 0.103 MPa, corresponding to suppression efficiencies of 83.80%, 83.33%, 85.40%, and 84.81%, respectively. Meanwhile, the maximum pressure rise rates decreased to 7.5, 7.5, 5.0, and 5.0 MPa/s, respectively. At an addition ratio of 25%, both the explosion induction time and combustion duration were significantly prolonged, with MPP-modified dry water producing the greatest extension. Flame propagation developed rapidly within 0~16 ms, whereas the explosion pressure response showed a relative time lag. At an addition ratio of 10%, MAP-modified dry water resulted in the fastest flame attenuation. The results indicate that dry-water-based explosion suppression exhibits a distinct critical addition ratio, and MAP-modified dry water shows a particular advantage owing to its stable suppression performance at relatively low addition ratios.

Keywords

Dry-Water Explosion Suppressant, Coal Dust Explosion, Explosion Pressure, Pressure Rise Rate, Flame Evolution

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).
http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Open Access

1. 引言

煤尘在受限空间形成可燃粉尘云后，一旦受到足够能量点燃，会在短时间内释放大量热量并形成冲击波。隔爆和泄爆侧重限制事故后果，抑爆技术则通过快速吸热、稀释反应介质或阻断链式反应降低爆炸强度[1]。水雾具有冷却与稀释作用，但储运稳定性和空间分散均匀性会限制其应用；传统惰性粉体便于储存，却可能存在用量大、持续冷却能力不足等问题。

干水是由疏水型气相 SiO_2 包覆水滴形成的液芯–壳层粉体，兼具高含水率、粉体流动性和可改性特征[2]-[4]。已有研究证实，普通或改性干水可抑制瓦斯爆燃及粉尘火焰传播[5]-[7]，含磷、含氮组分还可强化化学抑制作用[8] [9]。然而，不同改性组分在低添加量阶段是否稳定抑制，以及压力、特征时间与火焰响应是否同步，仍需在统一工况下比较。据此，本文选取普通、MAP、MPP 和 MCA 四类干水抑爆剂，建立添加量–爆炸强度–火焰演化之间的对应关系，为改性干水的类型选择和临界用量确定提供依据。

2. 实验材料与方法

2.1. 煤样与干水抑爆剂

煤样取自平顶山十一矿烟煤。工业分析中水分、灰分、挥发分和固定碳分别为 0.71%、7.91%、27.51%

和 63.87%；元素分析中 C、O、H、N 和 S 含量分别为 77.73%、13.904%、4.09%、4.02%和 0.256%。煤粉粒径主要分布于 0.1~100 μm，D10、D50 和 D90 分别为 1.700、10.937 和 78.195 μm。

普通干水由疏水型气相 SiO_2 与去离子水制备，质量比为 1:10，在 4000 r/min 下剪切 60 s。MAP、MPP 和 MCA 改性干水先将相应活性组分分散于水相，再按相同工艺制备；三类改性剂的加入比例均为 10%。所制样品分别记为普通干水、MAP 干水、MPP 干水和 MCA 干水。

2.2. 爆炸测试系统与工况

如图 1，煤尘爆炸试验采用 HY164260 型标准 20 L 球形爆炸装置。爆炸容器设石英视窗和压力传感器，传感器量程为−0.1~4 MPa，精度为 0.25% FS，采样间隔为 0.2 ms。喷粉仓压力为 2.1 MPa，点火延迟时间为 60 ms。预试验比较 100~500 g/m^3 煤尘后，200 g/m^3 工况的最大爆炸压力、最大压力上升速率和爆炸指数均达到峰值，分别为 0.678 MPa、97.5 MPa/s 和 26.5 MPa·m/s，故后续采用 4 g 煤粉(200 g/m^3)开展抑爆试验。

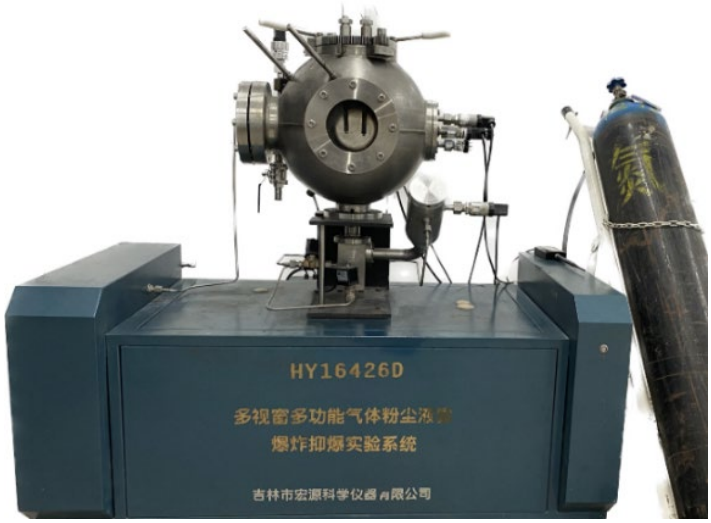


Figure 1. Standard 20 L spherical experimental apparatus for coal dust explosion tests
图 1. 标准 20 L 球形煤尘爆炸试验装置

将煤粉与干水抑爆剂充分混合后装入粉尘仓。干水添加量 φ 定义为干水质量 m(dw)与煤粉质量 m(c)之比，即 $\varphi = m(dw)/m(c) \times 100\%$，设置 0、5%、10%、15%、20%、25%和 30%共 7 个水平。最大爆炸压力抑制率 $I_p = \left[\left(P_{m^0} - P_m\right)/P_{m^0}\right] \times 100\%$，最大压力上升速率抑制率 I_r 按相同方式计算。爆炸感应时间定义为压力开始上升至压力上升速率达到峰值的时间；爆炸燃烧时间定义为压力开始上升至压力达到峰值的时间。

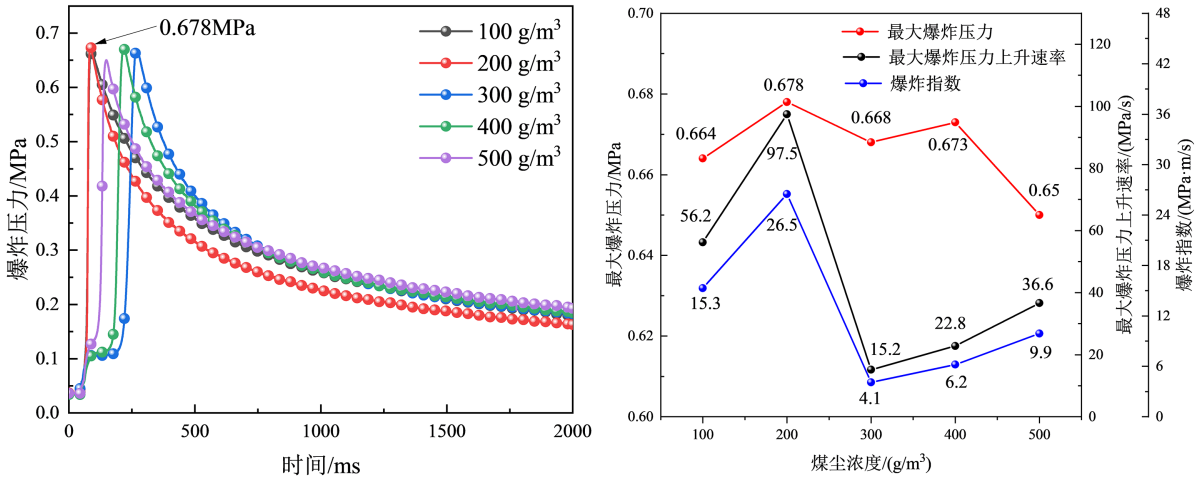
2.3. 火焰图像分析

以煤粉初始被点燃时刻为 0 ms，同步记录 0、1、2、3、8、16、48、96、112 和 160 ms 等时刻的火焰形态。在固定视窗区域内对图像进行灰度分割，提取发光火焰区域并计算火焰投影面积占比；以直径 110 mm 的石英视窗进行尺度标定，根据相邻时刻火焰等效半径变化计算等效火焰传播速度。压力数据以点火时刻归零后与火焰图像同步，用于比较火焰传播、衰减与压力响应之间的动态关系。为突出改性组分差异，火焰比较采用 10%添加量。

3. 结果与分析

3.1. 基准煤尘浓度的确定及爆炸危险性

煤尘浓度决定受限空间内参与燃烧的燃料量及单位体积内煤粉与氧气的匹配关系，因此，抑爆试验首先需要确定具有代表性的危险工况。如图 2，当煤尘质量浓度由 100 g/m³ 增至 500 g/m³ 时，最大爆炸压力、最大压力上升速率和爆炸指数均呈先升高后降低的变化，说明煤尘爆炸强度并不随浓度持续增加，而是存在最危险浓度区间。



(a) 爆炸压力－时间曲线；　　(b) 爆炸特性参数

Figure 2. Explosion pressure curves and variations in characteristic parameters at different coal dust concentrations
图 2. 不同煤尘浓度下的爆炸压力曲线及特性参数变化

煤尘浓度为 100 g/m³ 时，最大爆炸压力、最大压力上升速率和爆炸指数分别为 0.664 MPa、56.2 MPa/s 和 15.3 MPa·m/s；浓度增至 200 g/m³ 时，三项指标分别达到 0.678 MPa、97.5 MPa/s 和 26.5 MPa·m/s。继续提高至 500 g/m³ 后，三项指标分别降至 0.650 MPa、36.6 MPa/s 和 9.9 MPa·m/s。相比最大爆炸压力不足 3%的变化，压力上升速率和爆炸指数的变化幅度更大，表明煤尘浓度对爆炸发展速率和猛烈程度的影响比对最终压力峰值更敏感。

在低浓度区间，煤粉数量不足限制挥发分析出及火焰连续传播；当浓度增至 200 g/m³ 时，悬浮煤粉与氧气的匹配更充分，颗粒间传热和火焰扩展加快。高浓度下，密闭容器内氧气含量保持不变，过量煤粉无法充分燃烧，并会吸收部分点火和反应热量，使压力上升速率和爆炸指数下降。因此，200 g/m³ 不仅对应最高压力，也对应最快压力增长，是评价抑爆剂性能的保守工况。

3.2. 抑爆效果的评价基准

本文以 200 g/m³ 纯煤粉的 0.678 MPa 和 97.5 MPa/s 分别作为最大爆炸压力与最大压力上升速率的基准值。在该基准下，抑制率为正表示干水降低爆炸强度，抑制率为负则表明混合体系出现促进效应。这种处理可同时识别高添加量下的最终抑制能力和低添加量下的潜在风险，避免只凭某一终点数据判断材料优劣。

3.3. 干水添加量对最大爆炸压力的影响

四类干水均表现出明显的添加量阈值，但低添加量阶段的响应不同。如图 3，普通干水添加量为 5%

时，最大爆炸压力由 0.678 MPa 升至 0.688 MPa，抑制率为−1.47%；MPP 干水在 15%时升至 0.717 MPa，抑制率为−5.75%；MCA 干水在 5%时升至 0.689 MPa，抑制率为−1.60%。三类体系的负抑制率说明，少量干水并不足以形成持续吸热和隔离作用，反而可能通过改善粉尘分散或引入局部水蒸气扰动，使煤粉与氧气接触更充分。因此，不能仅依据材料含水率判断其抑爆有效性，实际应用必须避开促进区间。

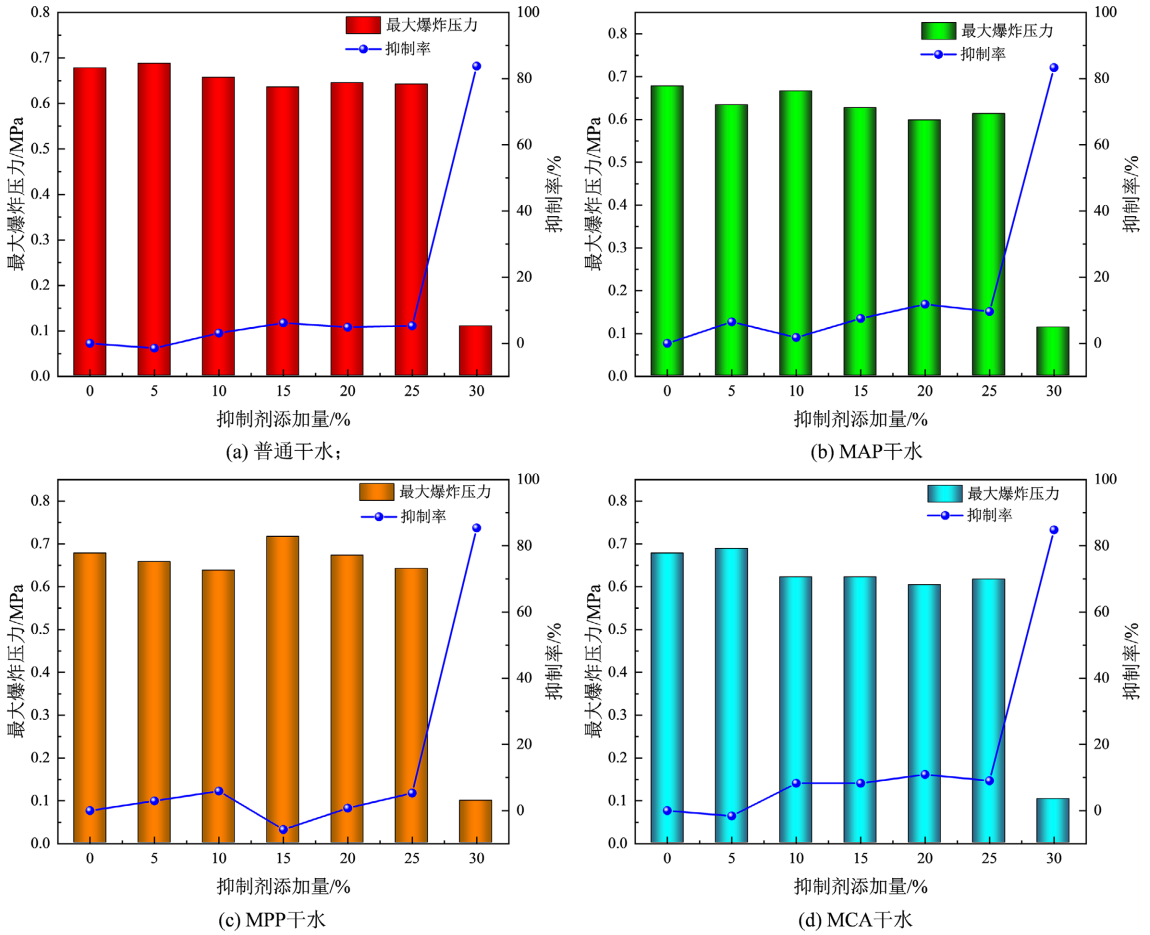


Figure 3. Effects of different dry-water addition ratios on the maximum explosion pressure and its suppression efficiency
图 3. 不同干水添加量对最大爆炸压力及其抑制率的影响

MAP 干水的变化规律与其余三类不同。添加量由 0 增至 30%时，最大爆炸压力持续下降，5%添加量下已降至 0.634 MPa，对应抑制率为 6.49%，表明 MAP 改性后在低用量阶段即可抵消普通干水可能产生的促进作用。当添加量达到 30%时，普通、MAP、MPP 和 MCA 干水体系的压力峰值均消失，最大压力分别为 0.109、0.113、0.099 和 0.103 MPa，抑制率分别达到 83.80%、83.33%、85.40%和 84.81%。此时记录到的低幅压力主要来自点火头及喷粉扰动，煤尘主体爆炸已受到抑制。

从终点抑制率看，MPP 和 MCA 略高于普通干水和 MAP 干水，但四者差异仅约 2 个百分点；从完整添加量区间看，MAP 干水没有出现压力促进，更能体现稳定性。由此可见，评价抑爆剂不能只比较高添加量下的最终抑制率，还应同时考察低添加量安全性和达到有效抑制所需的临界用量。

3.4. 压力上升速率及爆炸特征时间

如图 4，随着干水添加量增加，各体系的压力上升速率曲线由尖锐逐渐变平缓，说明干水不仅降低最

终压力，还直接削弱了爆炸反应速率。约 50 ms 处出现的小幅波动来自化学点火头，不能作为煤尘爆炸峰值。30%添加量下，普通干水和 MAP 干水的最大压力上升速率均由 97.5 MPa/s 降至 7.5 MPa/s，抑制率为 92.31%；MPP 和 MCA 干水均降至 5.0 MPa/s，抑制率为 94.87%。

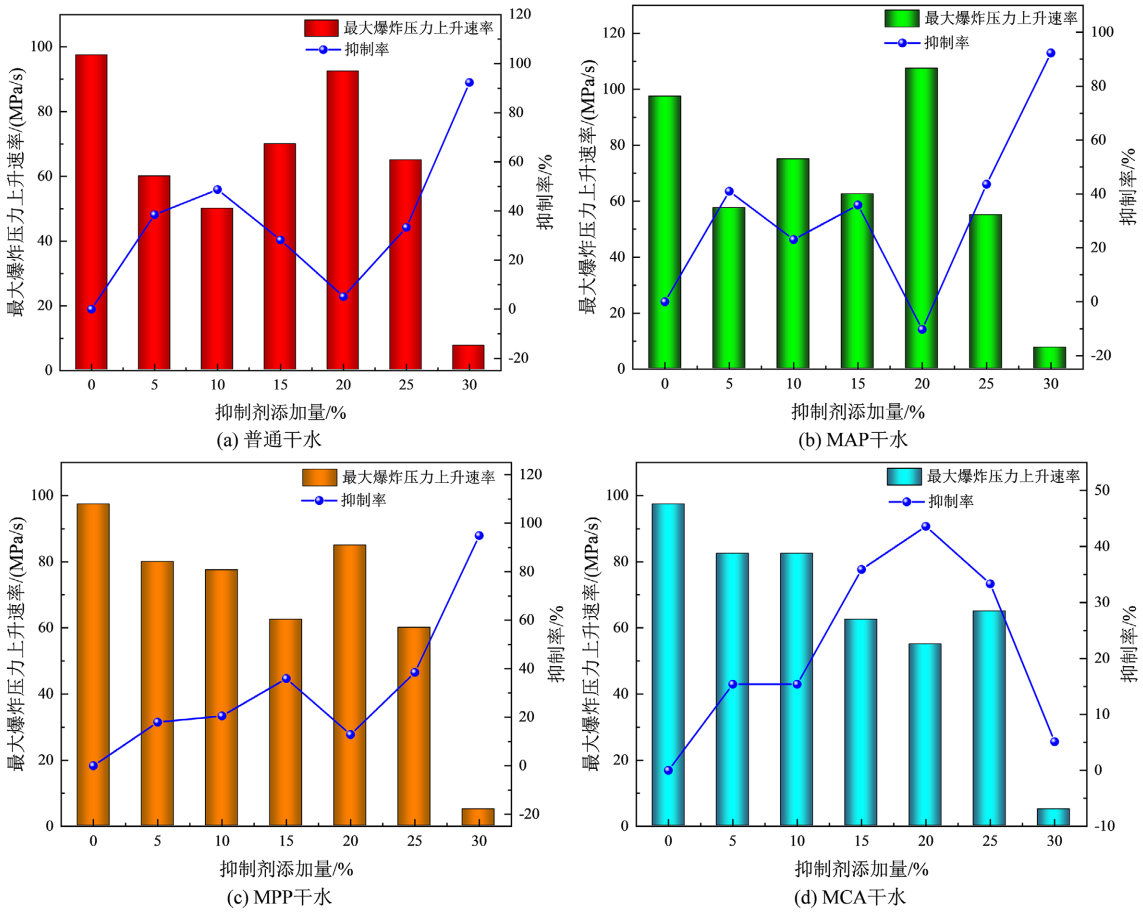


Figure 4. Effects of different dry-water addition ratios on the maximum rate of explosion pressure rise and its suppression efficiency

图 4. 不同干水添加量对最大爆炸压力上升速率及其抑制率的影响

干水的作用还体现在爆炸启动与发展过程的延缓。添加量为 25%时，四类干水对应的感应时间和燃烧时间见表 1。与纯煤粉相比，所有体系的两个特征时间均延长，其中 MPP 干水的感应时间和燃烧时间分别达到 19.4 和 29.6 ms，增幅最大；MCA 干水的感应时间次之。30%添加量下不再出现煤尘爆炸峰值，因而感应时间可视为无限延长。

Table 1. Characteristic explosion times of different dry-water systems at an addition ratio of 25%

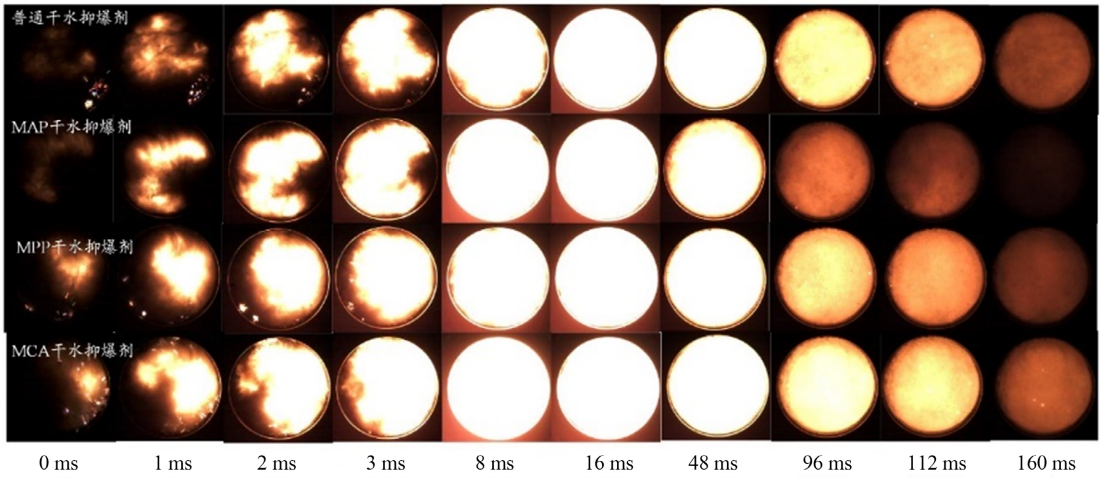
表 1. 25%添加量下不同干水体系的爆炸特征时间

体系	纯煤粉	普通干水	MAP 干水	MPP 干水	MCA 干水
感应时间/ms	8.8	15.8	15.6	19.4	18.2
较纯煤粉延长/ms	0	7.0	6.8	10.6	9.4
燃烧时间/ms	18.2	25.0	24.6	29.6	25.4
较纯煤粉延长/ms	0	6.8	6.4	11.4	7.2

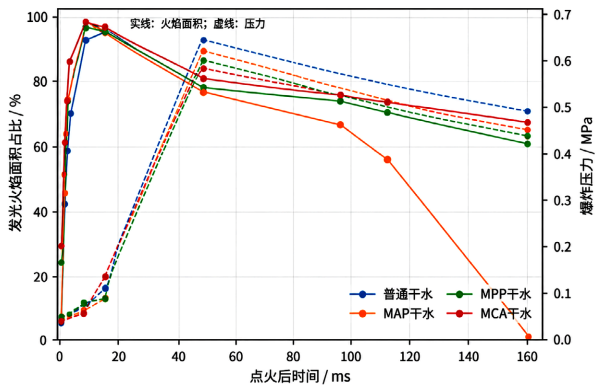
感应时间和燃烧时间同步延长，说明干水颗粒在点火初期已阻碍煤粉受热与能量传递，并在燃烧发展阶段持续削弱反应。然而，MPP 干水在中低添加量下曾出现压力促进，而 25%时又表现出最长特征时间，表明单一时序指标不能替代压力指标；抑爆性能应由峰值压力、反应速率和特征时间共同判断。

3.5. 火焰演化及压力－火焰响应关系

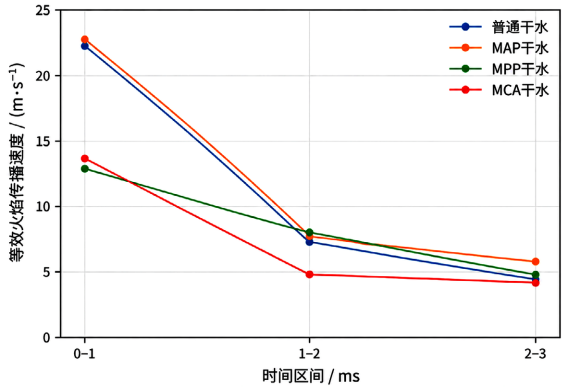
如图 5，10%添加量下，四类混合体系在 0~3 ms 均进入火焰快速扩散阶段；8 ms 时，MCA 干水体系的火焰已充满视窗，而普通、MAP 和 MPP 干水体系尚未完全充满，说明 MCA 在爆燃初期的延缓能力相对较弱。16 ms 时四类体系火焰均达到最亮，48 ms 后逐步进入衰减阶段。96 ms 时 MAP 干水体系已呈暗红色，其余三类仍以橘黄色为主；160 ms 时 MAP 干水体系的火焰几乎消失。



(a) 火焰演化图像



(b) 发光火焰面积与压力同步关系



(c) 早期等效火焰传播速度

Figure 5. Flame evolution and quantitative parameters of coal dust explosions after the addition of 10% different dry-water explosion suppressants

图 5. 添加 10%不同干水抑爆剂后煤尘爆炸火焰演化及定量参数

火焰与压力并非同步达到峰值。纯煤粉点火后 0~16 ms 内火焰迅速充满视窗，压力仅由 0.043 MPa 升至 0.078 MPa；16~48 ms 内压力快速上升并接近 0.661 MPa，而火焰亮度保持较高。160 ms 时火焰已明显衰减，压力仍为 0.478 MPa。加入 10%干水后仍存在同样的滞后关系，其中 160 ms 时普通、MAP、MPP 和 MCA 干水体系压力分别为 0.478、0.419、0.423 和 0.439 MPa。因此，火焰消失不能直接等同于压力危险解除；工程监测与泄压设计应覆盖火焰衰减后的高温高压阶段。

3.6. 不同改性组分的抑爆作用差异

MAP、MPP 和 MCA 改性干水均以干水的物理冷却为基础，但化学抑制路径存在差异。MAP 中的 $NH_4H_2PO_4$ 受热后可生成 NH_3 及含磷中间产物，水分汽化吸热和 SiO_2 隔离作用降低反应区温度，含磷中间产物进一步消耗 H·、O·和 OH·等活性自由基，从而削弱煤尘燃烧链式反应。MPP 同时含有三聚氰胺结构和聚磷酸结构，热分解过程中发生脱水并形成含磷、含氮中间产物，可通过吸热、稀释及自由基消耗发挥抑制作用。MCA 由三聚氰胺与氰尿酸组成，受热后可产生 HNCO 等含氮中间产物，对 O·等活性自由基具有消耗作用。三者均表现为物理冷却与化学链终止的协同作用，差异主要来自热分解产物组成及其对活性自由基的捕获能力。

上述差异可用于解释低添加量下的“促进/抑制”分化。普通干水、MPP 干水和 MCA 干水在添加量较低时，冷却和自由基消耗作用尚不足以占据主导，粉体加入后对煤尘分散和局部流动的扰动可能使煤粉与氧气接触更加充分，因此出现短暂的压力促进；随添加量提高，吸热冷却、隔氧和自由基消耗逐渐增强，体系转为明显抑制。MAP 干水在 5%添加量下已表现出正抑制率，说明其低添加量阶段的化学抑制能够更早抵消上述促进作用。黄等[8]报道了磷酸二氢盐与 SiO_2 对煤尘爆炸的物理－化学协同抑制；LU 等[9]从宏观和微观角度证实了 MPP 对煤粉爆炸的抑制作用；本文在较高添加量下与其结论一致，同时进一步表明，不同改性组分在低添加量区间的响应并不完全相同。

4. 结论

统一 20 L 球形爆炸工况下，四类干水均存在由弱作用向完全抑制转变的添加量阈值。普通、MPP 和 MCA 干水在低添加量阶段出现压力促进，MAP 干水则随添加量增加持续降低最大爆炸压力，低用量安全性更好。添加量达到 30%时，四类体系最大爆炸压力抑制率均超过 83%，最大压力上升速率抑制率均超过 92%，煤尘主体爆炸被抑制。

干水可同时延长感应时间和燃烧时间，25%添加量下 MPP 干水的延长幅度最大。火焰传播快于压力响应，且火焰衰减后容器内仍保持较高压力。综合终点抑制率、低添加量响应和火焰衰减特征，MAP 干水表现出更稳定的宽区间抑制优势；实际用量仍应依据临界添加量并结合压力与时序指标确定。

MAP 改性干水在不同添加量下均表现出较稳定的抑爆作用，尤其在低添加量阶段未出现明显的爆炸促进现象，综合抑爆性能优于其他体系，具有较好的应用潜力。实际工程应用中，除抑爆效果外，还需综合考虑抑爆剂的制备与使用成本、储存稳定性以及含磷、含氮组分可能带来的环境影响，并结合具体应用场景进一步评估其经济性和适用性。

参考文献

[1] 陈硕, 路长, 苏振国, 等. 煤矿瓦斯爆炸发展规律及防治的综述及展望[J]. 火灾科学, 2021, 30(2): 63-79.

[2] 崔博雅, 袁振东. 干水: 从概念提出到实际应用[J]. 化学通报, 2020, 83(9): 850-855.

[3] 高健强, 贺拥军, 杨惠, 等. 干水及其在灭火材料中的应用研究进展[J]. 化工新型材料, 2021, 49(5): 43-47.

[4] 叶乔涵, 张存位, 刘立文. 新型核壳结构干水灭火剂应用现状与发展趋势[J]. 化工新型材料, 2021, 49(2): 52-55.

[5] Wang, Q., Ma, C., Deng, J., Luo, Z., Shu, C., Gao, W., *et al*. (2023) Gas Explosion Suppression by Ammonium Dihydrogen Phosphate-Modified Dry Water Powder. *Powder Technology*, **416**, Article ID: 118228. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2023.118228

[6] 陈先锋, 樊傲, 袁必和, 等. 干水材料对瓦斯爆燃抑制的实验研究[J]. 爆炸与冲击, 2019, 39(11): 123-133.

[7] 廖若愚, 陈先锋, 袁必和, 等. 干水材料对小麦淀粉火焰抑制的研究[J]. 中国安全科学学报, 2018, 28(5): 86-91.

[8] 黄寅生, 戴晓静, 曹卫国. 磷酸二氢盐与 SiO_2 粉体抑制煤尘爆炸的试验研究[J]. 中国安全科学学报, 2013, 23(3): 57-61.

[9] Lu, K., Jiang, B., Xiao, Y., Luo, Z., Chen, X., Zhao, Y., *et al*. (2024) Study on Inhibiting Effects of Melamine Polyphosphate on Pulverized Coal Explosion: Investigation from Macro and Micro Perspectives. *Fuel*, **360**, Article ID: 130574. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.130574