

DOI: 10.11858/gywlxb.20251210

富燃状态下固体惰化剂对镁粉爆炸的惰化效果*

李润之¹, 刘明帅¹, 曹梦婷¹, 孟祥豹¹, 丁建旭², 李世航³, 韩志跃⁴

(1. 山东科技大学安全与环境工程学院, 山东 青岛 266590;

2. 广州市特种机电设备检测研究院, 广东 广州 510663;

3. 中国矿业大学碳中和研究院, 江苏 徐州 221008;

4. 北京理工大学爆炸科学与安全防护全国重点实验室, 北京 100081)

摘要: 为了更好地防控镁粉在富燃条件下的爆炸风险, 利用爆炸抑爆综合试验装置, 对镁粉在不同粒径及浓度等条件下的爆炸特性进行了研究, 分析了固体惰化剂 $Mg(OH)_2$ 、 $Ca(OH)_2$ 、 $Ca(HCO_3)_2$ 对镁粉的惰化效果, 揭示了富燃条件下固体惰化剂对镁粉的惰化机理。结果表明: 在 17~74 μm 范围内, 镁粉的最大爆炸压力随粒径的增大而减小; 而增大粉尘浓度却导致最大爆炸压力呈现先增后降的趋势, 17 μm 下的镁粉最佳爆炸浓度和最大爆炸压力分别为 350 g/m^3 和 0.716 MPa; 3 种惰化剂的加入均使镁粉的最大爆炸压力和最大压力上升速率有所下降, 得到了 3 种惰化剂对镁粉有效惰化和完全惰化时的惰化比, 其中, $Mg(OH)_2$ 的惰化效果最优, 到达有效惰化和完全惰化时的惰化比分别为 170% 和 220%。通过分析 $Mg(OH)_2$ 的惰化机理发现: $Mg(OH)_2$ 通过受热分解产生 MgO 隔离层, 吸附到镁颗粒表面进而阻碍氧气接触来实现惰化; $Ca(OH)_2$ 仅受热分解起到惰化效果; $Ca(HCO_3)_2$ 通过受热分解产生 CO_2 增强惰化效果。所得结论为实现富燃条件下镁粉爆炸的有效惰化提供了重要参考。

关键词: 镁粉爆炸; 固体惰化; 爆炸超压; 惰化机理

中图分类号: X932; O521.9 **文献标识码:** A **文章编号:**

随着工业技术的迭代, 金属材料的应用前景日益广阔, 其中镁及其合金因轻质、高比强度等优势, 使其成为多个领域的关键材料^[1-5]。镁在其利用过程中, 往往会伴随大量的悬浮粉尘, 由于镁的化学性质非常活泼, 悬浮粉尘在接触到足够能量的点火源情况下, 将会引发灾难性的爆炸事故, 造成重大的人员伤亡和财产损失^[6-8]。例如 2019 年 10 月 30 日, 东莞市某五金制品有限公司内发生一起镁粉爆炸事故, 造成 1 人受伤, 后经救治无效死亡, 直接经济损失约 80 万元人民币。2019 年 3 月 31 日, 昆山某金属公司数控机床加工车间北墙外堆放镁合金废屑的集装箱发生爆燃事故, 造成 7 人死亡、1 人重伤、4 人轻伤, 直接经济损失 4186 万元。2023 年 6 月 5 日, 河南省南阳市某原料储存仓库发生镁粉爆燃事故, 造成 4 人死亡, 直接经济损失约 800 万元。爆炸事故的发生往往带来巨大损失, 如何对镁粉尘爆炸防控尤为重要。

目前, 我国对金属粉尘爆炸的防控手段主要有以下几种, 分别是惰化、抑爆、泄爆、隔爆等^[9-11]。惰化技术因其高效性、普适性、经济性等优点, 成为防控金属粉尘爆炸的常用手段。项国等^[12]基于 20 L 球形装置研究了镁粉爆炸压力特性, 结果表明, 对于金属镁粉来说, 粒径越小, 其最大爆炸压力 (P_{max}) 以及最大压力上升速率 ($(dp/dt)_{max}$) 越大。王二飞等^[13]通过实验, 研究了粉尘云浓度、粉尘粒径等对镁粉、球磨镁铝合金粉和雾化镁铝合金粉三种粉体爆炸特性的影响, 结果表明, 相同粒径下随着粉尘浓度的增加, 镁粉、球磨镁铝合金粉、雾化镁铝合金粉的最大爆炸压力均呈现出先增大后减小的趋势。伍毅等^[14]研究了碳酸钙、碳酸氢钠及碳酸氢钾三种惰化剂对最佳爆炸浓度

*收稿日期: 2025-09-25; 修回日期: 2026-01-21

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2023YFC3010604); 山东省自然科学基金 (ZR2022ME085)

作者简介: 李润之 (1981-), 男, 博士, 教授, 主要从事气体粉尘爆炸理论及防治技术研究. E-mail: runzhi_li@126.com

通信作者: 曹梦婷 (1991-), 女, 博士, 主要从事燃爆安全研究. E-mail: caomengting1991@163.com

下镁粉的惰化效果，发现碳酸氢钠和碳酸氢钾分解产生二氧化碳，降低了惰化效果，使得碳酸钙的惰化效果远优于其他两种惰化剂的惰化效果。代琳琳等^[15]研究了碳酸盐和磷酸盐对最佳爆炸浓度下铝粉的惰化效果，得出磷酸盐通过物理及化学协同惰化作用优于碳酸盐单一物理惰化作用。付羽等^[16]研究了降温缓燃型惰化介质和化学抑制性介质对最佳爆炸浓度下镁粉的影响，指出降温缓燃型惰化介质通过抢夺部分燃烧热，延缓燃烧反应速度起到惰化效果，化学抑制性介质通过与镁粉混合物燃烧，形成表面薄膜隔绝氧气起到惰化效果。结果表明，化学抑制型的物质比降温缓燃型的惰化效果更为明显。Wang 等^[17]通过哈特曼管开展了氢氧化铝和氢氧化镁对最佳爆炸浓度下镁铝合金的惰化效果研究，结果表明，在低惰化比下（当惰化剂的质量分数小于 50%时），氢氧化铝抑制效果更显著，在高惰化比下（当惰化剂的质量分数大于 50%时），氢氧化镁的抑制效果更显著。陈攀^[18]对二氧化钛惰性条件下微米及纳米钛粉反应动力学特性进行了研究，揭示了纳米粉末惰化介质对微米及纳米钛粉的惰化机理。

当前研究大多集中于对惰化剂在金属粉尘最佳爆炸浓度下的惰化效果，但现实情况下发生粉尘爆炸事故时，金属粉尘通常处于紊乱状态（富燃状态、最佳爆炸浓度状态及贫燃状态并存）。为了实现对富燃条件下镁粉尘爆炸的防控，本研究基于爆炸抑爆综合试验装置，运用粉尘爆炸相关理论，从宏观爆炸特性角度以及微观机理层面分析，综合开展氢氧化镁(Mg(OH)₂)、氢氧化钙(Ca(OH)₂)和碳酸氢钙(Ca(HCO₃)₂)三种固体惰化剂对富燃条件下镁粉的惰化效果研究，揭示固体惰化剂对镁粉的惰化机理，以为富燃镁粉爆炸的预防及应急措施提供基础数据。

1 实验介绍

1.1 实验样品前处理

为降低实验误差，镁粉的纯度均为 99.9%，粒径分析如图 1 所示，实验过程中镁粉粒径及浓度质量分数的选择如表 1 所示，选取 100 g/m³~300 g/m³ 浓度和 17 μm~74 μm 粒径的镁粉，研究镁粉粒径及浓度对爆炸参数的影响，选取导致爆炸危险性最大的镁粉粒径以及 100 g/m³~450 g/m³ 浓度的镁粉，研究 17 μm 粒径下的富燃范围。

表 1 镁粉粒径及浓度质量分数的选择
Table 1 Size and concentration of magnesium powder particle

	100 g/m ³	200 g/m ³	300 g/m ³	350 g/m ³	400 g/m ³	450 g/m ³
17 μm	√	√	√	√	√	√
34 μm	√	√	√			
50 μm	√	√	√			
74 μm	√	√	√			

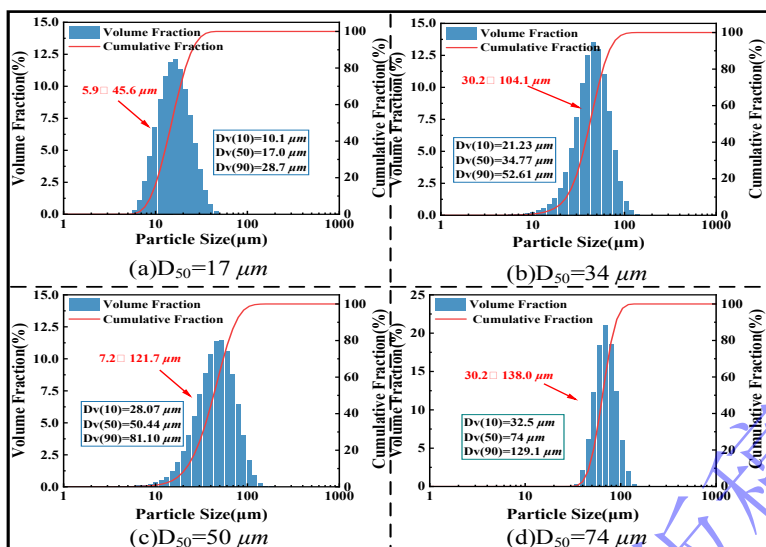


图1 实验材料粒度分布图

Figure 1 Particle size distribution

固体惰化剂 $Mg(OH)_2$ 、 $Ca(OH)_2$ 、 $Ca(HCO_3)_2$ 纯度为 99.9%，粒径统一为 70 μm 。试验前将样品放置在干燥箱内，在 60 $^{\circ}C$ 温度下干燥 20 h，置于室温保存，使环境湿度不大于 30%^[19]。固体惰化剂的基本物理参数如表 2 所示。

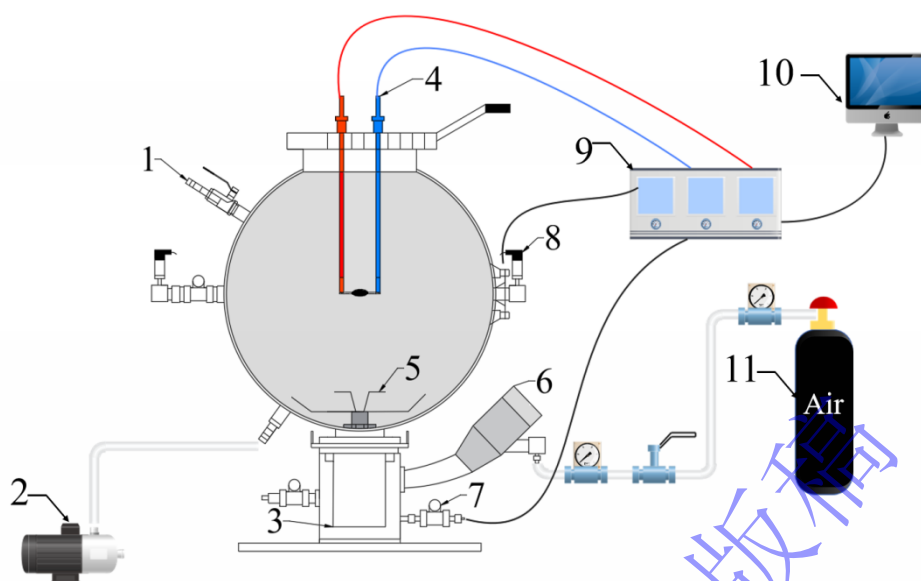
表 2 固体惰化剂的基本物理参数

Table 2 Basic physical parameters of solid inerting agents

Solid inert substance	Dv (50)(μm)	pureness	water content
$Mg(OH)_2$	70	AR	小于 5%
$Ca(OH)_2$	70	AR	小于 5%
$Ca(HCO_3)_2$	70	AR	小于 5%

1.2 实验设备及操作步骤

实验设备主要采用爆炸抑爆综合试验装置，测定不同工况下镁粉的爆炸压力参数。装置主要由 20 L 球形爆炸罐、点火系统、喷粉系统及数据采集系统等组成，如图 2 所示。实验开始先将已干燥的镁粉放置在储粉罐中，待真空泵将 20 L 球形爆炸罐抽气至 0.04 MPa，向储粉罐中通入压缩气体直至 2.1 MPa，爆炸抑爆综合试验装置将在喷粉结束 60ms 后自动启动点火系统，使得 2 kJ 化学药头得以点燃扩散的镁粉尘云，对相同工况进行三次实验，以确保实验合理性。此时化学药头产生最大爆炸压力为 0.12 MPa。



1-Manual Pressure Relief Valve; 2-Vacuum Pump; 3-Powder Spraying Device; 4-Ignition Electrode; 5-Rebound Nozzle; 6-Powder Storage Tank; 7-Powder Tank Pressure Sensor; 8-Main Pressure Sensor; 9-Data Acquisition System; 10-Data Computer; 11-Air Cylinder.

图2 爆炸抑爆试验装置

Figure 2 Explosion suppression test device

1.3 惰化效果评价标准

依据国家标准 GB/T 37241-2018 惰化防爆指南^[20], 完全惰化指无论可燃物和含氧混合气体的比例如何变化都不会形成爆炸性环境。依据国家标准 GB/T 16425-2018 粉尘云爆炸下限浓度测定方法^[21], 对粉尘未发生爆炸的定义为 P_{max} 小于 0.15 MPa。本文对完全惰化的定义为当粉尘未发生爆炸时 (P_{max} 小于 0.15 MPa), 粉尘所处环境不具备爆炸性, 达到完全惰化。

有效惰化指的是惰化率超过 60%, 在其惰化效果下的最大爆炸压力为纯镁粉最大爆炸压力的 40%。有效惰化和完全惰化两种惰化表征参数的提出, 能够明确阐述惰化剂效果的优劣^[6]。其中惰化率 (Inert Rate) 指的是添加惰性物质之后, 粉尘最大爆炸压力的变化对粉尘爆炸的惰化能力, 其公式为:

$$\text{Inert Rate} = \frac{P_0 - P_1}{P_0} \times 100\%$$

其中, P_0 为无惰化物质下粉尘的最大爆炸压力, P_1 为惰化作用下粉尘的最大爆炸压力。

惰化比(φ)指的是添加惰化物质质量与可燃粉体质量的比值, 其公式为

$$\varphi = \frac{m_1}{m_0} \times 100\%$$

其中, m_0 为可燃粉体的质量, m_1 为惰化物质的质量。

2 试验结果与讨论

2.1 镁粉爆炸超压变化规律

基于前期学者的研究^[22, 23], 镁粉最佳爆炸浓度 C 受镁粉粒径及镁粉纯度影响, 镁粉的最佳爆

炸浓度为 $250 \text{ g/m}^3 \sim 500 \text{ g/m}^3$ 。为确定本样品富燃浓度，需测得样品的最佳爆炸浓度。为此对 $17 \mu\text{m}$ 镁粉在不同浓度下的爆炸特性进行测试。

不同浓度镁粉的爆炸压力 P 升压变化如图 3 所示，可以看出， P 随时间变化呈现先急速上升后缓慢下降的趋势，且每组升压曲线都经历了相同的阶段。其中， $0 \text{ ms} \sim 48 \text{ ms}$ 时间段为 t_v 时间段，为满足当储粉罐内高压气体通入设备后，容器内部气压恢复为 0.101 MPa （常压下），在喷粉前，将设备内部气压抽至小于 0.101 MPa ； $48 \text{ ms} \sim 108 \text{ ms}$ 时间段为 t_d 时间段，此时间段为设备预设的点火延迟时间，点火延迟时间为 60 ms ，能确保粉尘在设备中得到最佳扩散。

由图 3 可知，从 100 g/m^3 到 450 g/m^3 浓度， P_{max} 随浓度的增大呈现先增大后减小的趋势， P_{max} 出现的时间随浓度的增大呈现先减小后增大的趋势。当粉尘浓度为 350 g/m^3 时， P_{max} 最大， P_{max} 出现的时间最早，分别为 0.792 MPa 、 193.6 ms 。此时氧气与爆炸物处于最佳爆炸状态， 350 g/m^3 粉尘浓度时为最佳爆炸浓度，当粉尘浓度低于最佳爆炸浓度时，镁粉处于富燃状态^[24,25]。

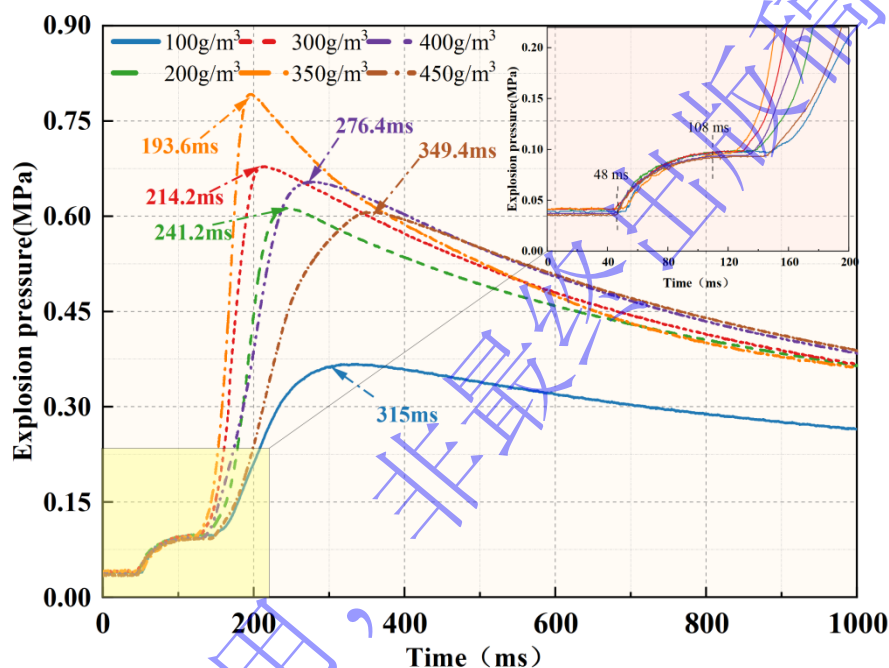


图 3 不同浓度镁粉的爆炸升压

Figure 3 Explosion pressure rise of magnesium powder with different concentrations

为研究富燃条件下不同浓度及粒径对镁粉尘爆炸特性的影响，选取了三种粉尘浓度（ 100 g/m^3 、 200 g/m^3 、 300 g/m^3 ）。图 4 与表 3 展示了相关实验结果。以下将对粉尘浓度与粒径对最大爆炸压力 (P_{max}) 和最大压力上升速率 $(dp/dt)_{max}$ 的影响规律进行系统分析，并对其成因进行阐述。

P_{max} 随粒径减小或浓度升高而增大。在相同粒径下，提高粉尘浓度可显著提升 P_{max} ，且该增强效应随粒径增大而更为显著。例如，当浓度从 100 g/m^3 增至 300 g/m^3 ，粒径为 $17 \mu\text{m}$ 、 $34 \mu\text{m}$ 、 $50 \mu\text{m}$ 与 $74 \mu\text{m}$ 的粉尘，其 P_{max} 分别提高 0.288 MPa 、 0.308 MPa 与 0.348 MPa ，显示粒径越大，增幅越明显。在相同浓度下，增大粒径会抑制 P_{max} ，且该抑制效应随浓度升高而减弱。例如，粒径从 $17 \mu\text{m}$ 增至 $74 \mu\text{m}$ ，在 100 g/m^3 、 200 g/m^3 与 300 g/m^3 条件下， P_{max} 分别下降 0.114 MPa 、 0.092 MPa 与 0.07 MPa 。

$(dp/dt)_{max}$ 同样随粒径减小或浓度升高而增大。提高粉尘浓度对 $(dp/dt)_{max}$ 的提升效果随粒径增大而减弱。例如，浓度从 100 g/m^3 增至 300 g/m^3 ， $17 \mu\text{m}$ 、 $34 \mu\text{m}$ 、 $50 \mu\text{m}$ 与 $74 \mu\text{m}$ 粉尘的 $(dp/dt)_{max}$ 分别提高 13.575 MPa/s 、 10.8 MPa/s 、 7.4 MPa/s 与 4.6 MPa/s 。粒径增大的抑制效应：增大粒径对 $(dp/dt)_{max}$ 的抑制效果随浓度升高而增强。例如，粒径从 $17 \mu\text{m}$ 增至 $74 \mu\text{m}$ ，在 100 g/m^3 、 200 g/m^3 与 300 g/m^3 条件下， $(dp/dt)_{max}$ 分别下降 1.1 MPa/s 、 7.4 MPa/s 与 10.075 MPa/s 。

总结上述规律和成因, 在相同浓度条件下, 减小粒径可显著增大颗粒比表面积, 增强与氧气的接触, 促进燃烧反应更充分进行, 从而提高 P_{max} 。同时, 更多颗粒同时参与反应, 释放的热量增多, 加快了火焰传播与能量释放速率, 进而提升 $(dp/dt)_{max}$ 。在相同粒径条件下, 提高浓度增加了单位体积内参与反应的颗粒数量, 从而增强爆炸强度, 提高 P_{max} 。更多的颗粒同时燃烧也导致热量累积加快, 反应速率上升, 使 $(dp/dt)_{max}$ 随之增大。另外, 在富燃条件下, 尽管氧气有限, 但小粒径颗粒因其更大比表面积仍能更充分利用有限氧气, 因而在浓度升高时 P_{max} 提升显著。而大粒径颗粒在低浓度下反应不完全, 浓度升高后因热量累积增强, 燃烧效率提高, 故 P_{max} 增幅更为明显。浓度升高增强了颗粒间的相互作用与湍流效应, 有利于小粒径颗粒快速反应, 显著提升 $(dp/dt)_{max}$ 。而大粒径颗粒的惯性大、扩散混合能力差, 在高浓度下喷粉均匀性下降, 导致部分区域反应不充分, 抑制了压力上升速率, 因此粒径增大对 $(dp/dt)_{max}$ 的抑制效果在高浓度下更为显著。

表 3 粒径与浓度对 P_{max} 及 $(dp/dt)_{max}$ 影响

Table 3 Effects of Particle Size and Concentration on P_{max} and $(dp/dt)_{max}$

Concentration(g/m ³)	Particle Size(μm)	Maximum explosion pressure(MPa)	Maximum pressure rise rate (MPa/s)
100g/m ³	17	0.412	2.95
	34	0.392	3.1
	50	0.36	2.45
	74	0.298	1.85
200g/m ³	17	0.618	10.725
	34	0.545	5.35
	50	0.533	4.75
	74	0.526	3.325
300g/m ³	17	0.716	16.525
	34	0.68	13.9
	50	0.668	9.85
	74	0.646	6.45

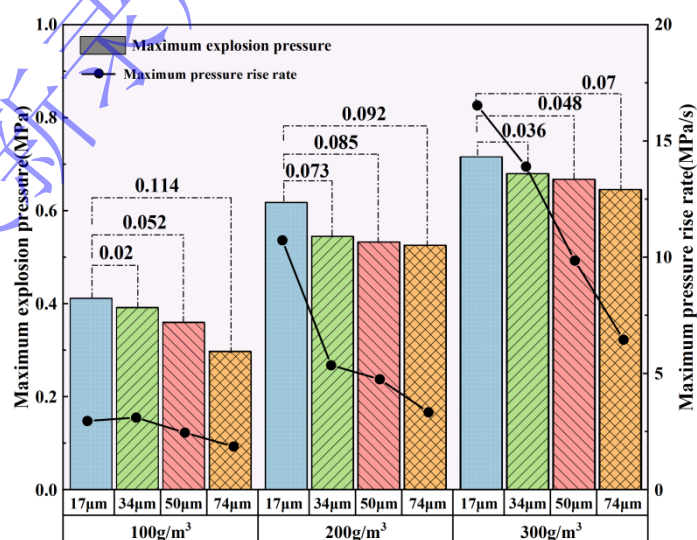


图 4 粒径与浓度对 P_{max} 及 $(dp/dt)_{max}$ 的影响

Figure 4 Effects of Particle Size and Concentration on P_{max} and $(dp/dt)_{max}$

将实验所得不同粒径和浓度条件下的镁粉最大爆炸压力数据绘制成三维曲面图 (如图 5 所示),

更能直观地展示粒径和浓度的影响程度。从图中可知，在富燃条件下，镁粉浓度对最大爆炸压力的影响远大于粒径对其影响。相较于其他工况，300 g/m³、17 μm 工况下镁粉的最大爆炸压力最大，其最大爆炸压力为 0.716 MPa。最大爆炸压力出现的时间最早，为 193.6 ms，最大压力上升速率最大，为 16.525 MPa/s。将采用该浓度与粒径下的镁粉，对固体惰化剂惰化效果进行实验研究。

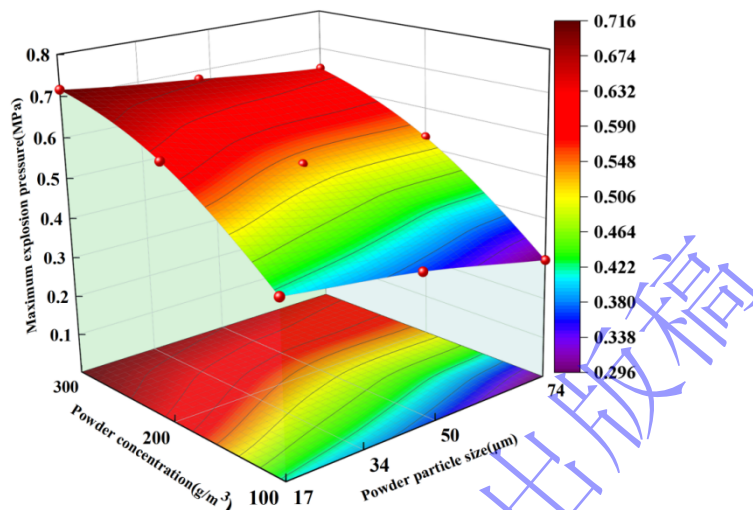


图 5 镁粉浓度和粒径对 P_{max} 影响曲面图

Figure 5 Surface Diagram of the Influence of Magnesium Powder Concentration and Particle Size on P_{max}

2.2 固体惰化剂下富燃镁粉爆炸的惰化规律

为评估固体惰化剂对镁粉 ($C=300$ g/m³) 爆炸的惰化性能，实验测得了镁粉在 $Mg(OH)_2$ 、 $Ca(OH)_2$ 及 $Ca(HCO_3)_2$ 三种不同固体惰化剂条件下的爆炸压力变化规律，如图 6 所示。

图 6 为不同固体惰化剂条件下的镁粉爆炸压力曲线，从图中可知，随着三种固体惰化剂惰化比的增加，镁粉 P_{max} 逐渐减小， P_{max} 出现的时间得到延缓。随着惰化剂惰化比从 50% 增长到 100%，三种固体惰化剂 ($Mg(OH)_2$ 、 $Ca(OH)_2$ 、 $Ca(HCO_3)_2$) 惰化作用下最大爆炸压力出现时间分别从 299.4 ms、297 ms 及 308.8ms 变为 328.6 ms、292.2 ms 及 307.2ms。可以发现在低惰化比 ($\leq 100\%$) 下，三种固体惰化剂对镁粉尘 P_{max} 的惰化效果不显著， P_{max} 出现的时间没有显著延缓，同时未能实现有效惰化。这是由于在富燃条件下惰化剂少量的添加，惰化剂难以通过吸收反应热，限制镁粉的链式反应，镁粉仍能充分与氧气接触发生爆炸反应，从而难以降低镁粉尘 P_{max} 和延缓 P_{max} 出现的时间。

随着惰化比从 150% 增长到 200%，三种固体惰化剂 ($Mg(OH)_2$ 、 $Ca(OH)_2$ 、 $Ca(HCO_3)_2$) 惰化作用下最大爆炸压力出现时间分别从 362.2 ms、422.6 ms 及 435.6ms 变为 316.2 ms、471.2 ms 及 265.6 ms。在高惰化比 ($> 100\%$) 下，随着惰化比的增加，三种固体惰化剂对镁粉尘 P_{max} 惰化效果逐渐明显，且延迟了 P_{max} 出现的时间，其中 $Mg(OH)_2$ 和 $Ca(HCO_3)_2$ 随着惰化比的增加， P_{max} 出现时间呈先增大后减小的变化规律，这是由于惰化剂大量的添加，惰化粉体能有效吸收热量和隔绝氧气，从而明显起到惰化效果，从而降低镁粉尘 P_{max} 和延缓 P_{max} 出现时间，但随着 $Ca(HCO_3)_2$ 的大量添加，其分解产生的 CO_2 加速了吸热过程，使得 P_{max} 出现的时间提前。而 $Mg(OH)_2$ 大量添加，其分解产生大量的 MgO 更早的惰化了镁粉爆炸，使得镁粉在更早的时间开始压力下降，从而使得 P_{max} 出现的时间提前。

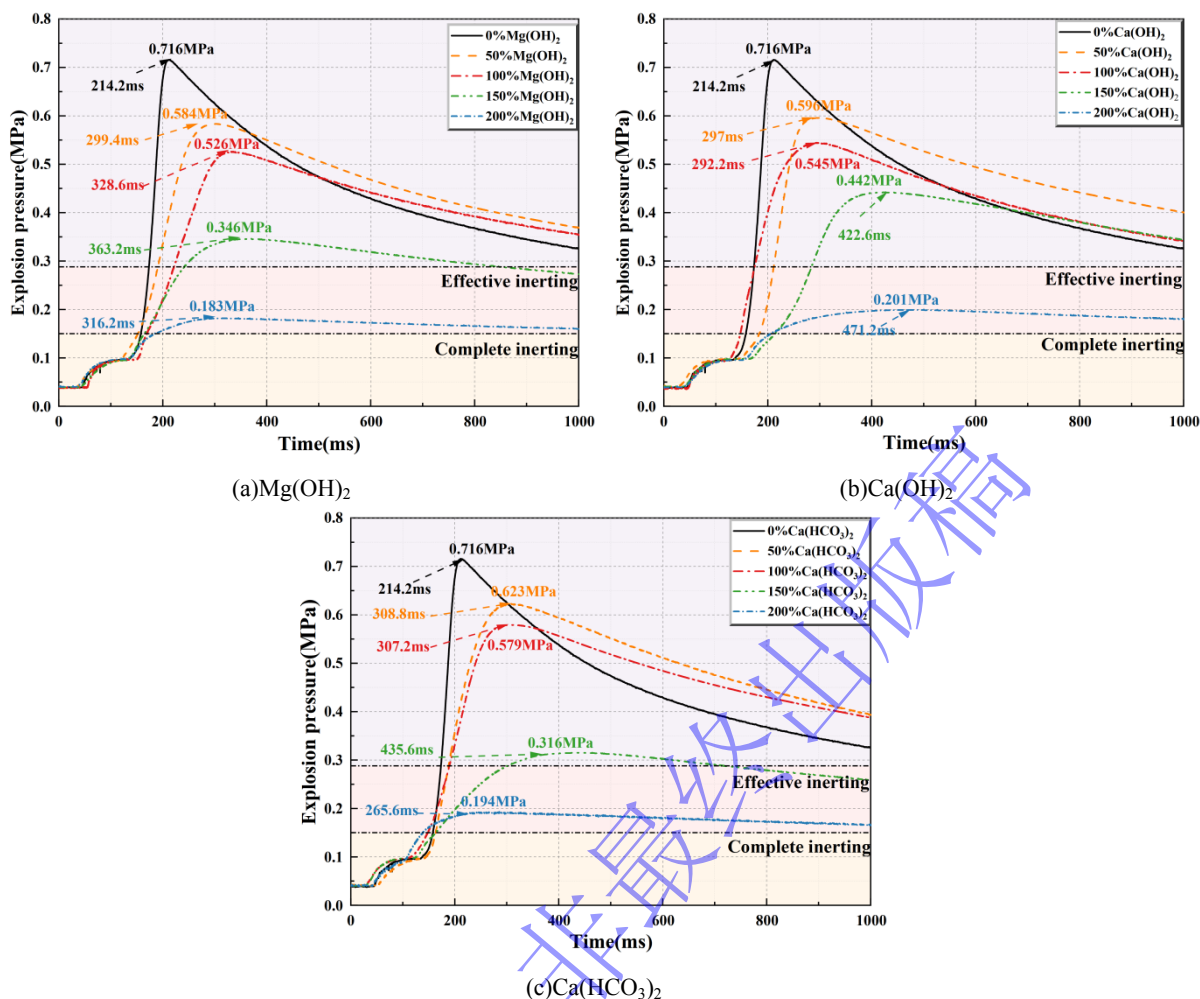


图 6 不同固体惰化剂条件下的镁粉爆炸压力曲线 ($C=300\text{g/m}^3$)

Figure 6 Effect of Solid Inert Agent on the Explosion Pressure of Oxygen Enriched Magnesium Powder ($C=300\text{g/m}^3$)

图 7 为镁粉在三种固体惰化剂下不同惰化比的 P_{max} 及 $(dp/dt)_{max}$ 。由图所知, $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 与 $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ 在 50% 惰化比下, 镁粉 P_{max} 分别降为 0.584 MPa、0.595 MPa 及 0.623 MPa, $(dp/dt)_{max}$ 分别降为 5.08 MPa/s、7.39 MPa/s 及 4.9 MPa/s; 在 100% 惰化比下, 镁粉 P_{max} 分别降为 0.526 MPa、0.545 MPa 及 0.579 MPa, $(dp/dt)_{max}$ 分别降为 4.82 MPa/s、5.25 MPa/s 及 4.57 MPa/s; 在 150% 惰化比下, 镁粉 P_{max} 分别降为 0.346 MPa、0.442 MPa 及 0.316 MPa, $(dp/dt)_{max}$ 分别降为 2.18 MPa/s、2.8 MPa/s 及 1.85 MPa/s; 在 200% 惰化比下, 镁粉 P_{max} 分别降为 0.183 MPa、0.2 MPa 及 0.194 MPa, $(dp/dt)_{max}$ 分别降为 1.83 MPa/s、1.6 MPa/s 及 3.4 MPa/s。

随着 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 惰化比的增加, 镁粉的 P_{max} 及 $(dp/dt)_{max}$ 均逐渐降低。在相同惰化比条件下, $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 对 P_{max} 及 $(dp/dt)_{max}$ 的抑制效果均优于 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 。随着 $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ 惰化比的增加, 镁粉 P_{max} 持续降低。 $(dp/dt)_{max}$ 随 $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ 惰化比增加呈现先降低后上升的非单调变化规律。当惰化比为 50%、100% 和 200% 时, $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ 对 P_{ma} 的抑制效果弱于 $\text{Mg}(\text{OH})_2$; 而在 150% 惰化比时, 其抑制效果反而优于 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 。

总结以上惰化现象, 三种惰化剂均能通过受热分解产生水蒸气, 水蒸发吸热可降低反应体系温度, 这是它们共有的物理惰化途径。不同的是, $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 属于化学抑制性介质, 其热分解产物 MgO 能够有效包裹未燃镁粉颗粒, 阻断其与氧气的接触, 这种物理覆盖与化学抑制的协同作用使其惰化效果优于仅依靠物理作用的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 。 $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ 在热分解时同时产生水蒸气和 CO_2 气体, 当惰化比较低时, 生成的少量 CO_2 主要通过吸热和稀释氧气发挥作用, 抑制爆炸强度。随着惰化比增加, 大量 CO_2 产生可能改变反应路径, 在特定条件下 (如 150% 惰化比), 充足的 CO_2 作为高效

惰性气体显著稀释氧气浓度，此时其物理惰化效果优于 $Mg(OH)_2$ 的化学抑制作用。同时，低浓度 CO_2 抑制反应速率，而高浓度 CO_2 可能与镁粉发生气固反应，或改变火焰传播特性，导致 $(dp/dt)_{max}$ 出现回升现象。在富燃条件下，还会呈现出特殊响应：适量 CO_2 的引入不会显著影响镁粉与氧气的反应平衡，而过量 CO_2 则可能打破富燃状态，通过强烈的物理稀释作用实现更高效的惰化，这解释了 $Ca(HCO_3)_2$ 在特定比例下抑制效果反超 $Mg(OH)_2$ 的现象。

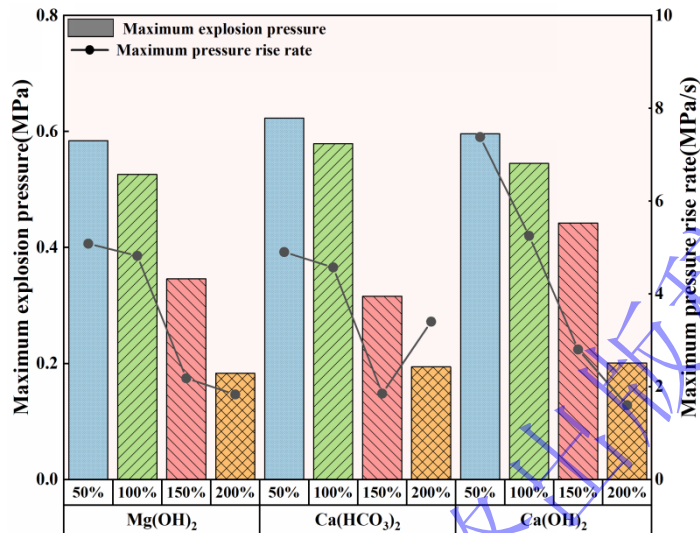


图 7 不同固体惰化剂与不同 ϕ 对镁粉 P_{max} 及 $(dp/dt)_{max}$ 的影响

Figure 7 Effects of solid inert agents and diameters on P_{max} and $(dp/dt)_{max}$ of magnesium powder

图 8 显示了三种固体惰化剂对镁粉爆炸起到有效惰化和完全惰化效果时的惰化比，并展现了有效惰化和完全惰化时的最大爆炸压力和最大压力上升速率。可以看出，达到有效惰化效果时，惰化比用量排序为 $Ca(OH)_2 > Mg(OH)_2 > Ca(HCO_3)_2$ ，分别为 185%、170%、165%。达到完全惰化效果时，惰化比用量排序为 $Ca(OH)_2 > Ca(HCO_3)_2 > Mg(OH)_2$ ，分别为 270%、250%、220%。在完全惰化效果方面，惰化比最小的为 $Mg(OH)_2$ ，同质量下的更大的吸热效率，更易实现完全惰化效果。相比于无惰化剂的情况，固体惰化剂有效惰化时，大幅度降低了最大爆炸升压速率的大小，降低了约为 6.45 MPa/s，最大爆炸压力降低了 0.421 MPa，使得爆炸得到有效控制。到达完全惰化后，其最大爆炸升压速率下降幅度不明显，仅下降约 0.6 MPa/s，而爆炸压力降低了约 0.13 MPa，约束到了 0.15 MPa 左右。结合图 7 与图 8 数据，在所选三种固体惰化剂中 ($Ca(OH)_2$ 、 $Ca(HCO_3)_2$ 、 $Mg(OH)_2$)， $Mg(OH)_2$ 在 220% 的惰化比下实现对富燃镁粉的完全惰化，在三种固体惰化剂中惰化比最小，认定 $Mg(OH)_2$ 对富燃状态下的镁粉惰化效果最佳。

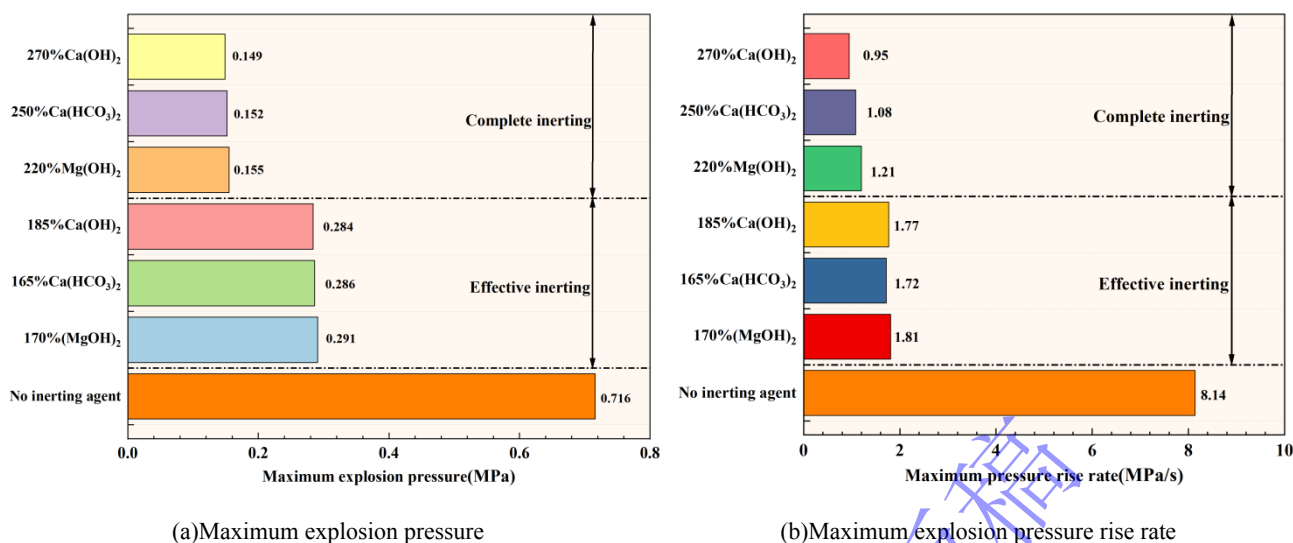


图 8 不同固体惰化剂对镁粉爆炸惰化效果

Figure 8 Effects of solid agents on the inerting effect of magnesium powder explosion

2.3 固体惰化剂对镁粉的惰化机理

镁粉通过吸收热量逐步经历液化和汽化过程。在接触氧气后，释放出大量热量并产生氧化镁，释放的热量进一步促使未燃镁粉燃烧，从而产生链式反应引发爆炸效果。此时镁颗粒在爆炸过程中处于固态粒子、熔融粒子及汽化粒子三相共存体系。在镁粉相态变化之前，三种固体惰化剂均会抢夺热量，阻止镁粉相变，并根据分解所需的温度和热量，在镁粉爆炸过程的不同阶段吸收不同程度热量。一方面固体惰化剂的加入阻碍镁粒子的相态转变，从而延缓镁粒子的活跃运动，降低镁粒子与氧原子碰撞进行反应，另一方面吸收足够的热量使得镁达不到爆炸所需的温度，仅进行短暂的燃烧。图 9 为镁粉及三种固体惰化剂加热过程中的 TG-DSC 图，从图可知，本样品镁粉在热解过程中存在三个阶段，第一阶段，镁粉质量没有发生明显变化，此时镁粉逐渐吸热；第二阶段，镁粉热重开始增加，此时镁粉氧化缓慢，吸氧增重。第三阶段，镁粉与氧剧烈反应，放热现象明显，镁粉质量显著增加。镁粉与氧气在 530 °C 开始反应，在 600 °C 后反应剧烈。Mg(OH)₂ 在 235 °C 开始通过分解反应吸收大量热量，分解产生 MgO 与 H₂O，吸热量为 870 J/g。Ca(OH)₂ 在 281 °C 开始通过分解反应吸收大量热量，分解产生 CaO 与 H₂O，吸热量为 885 J/g。Ca(HCO₃)₂ 在 484 °C 开始通过分解反应吸收大量热量，分解产生 CaO、CO₂ 与 H₂O，吸热量为 733 J/g。其中 Ca(OH)₂ 吸热量最大，Ca(OH)₂ 和 Mg(OH)₂ 均可在镁粉尘剧烈反应之前吸收热量，起到物理惰化作用^[26, 27]。Ca(HCO₃)₂ 吸热量最小，剧烈吸热的初始温度最高，但 Ca(HCO₃)₂ 惰化粉体极难稳定存在，可在一开始分解释放大量的 CO₂^[28]。

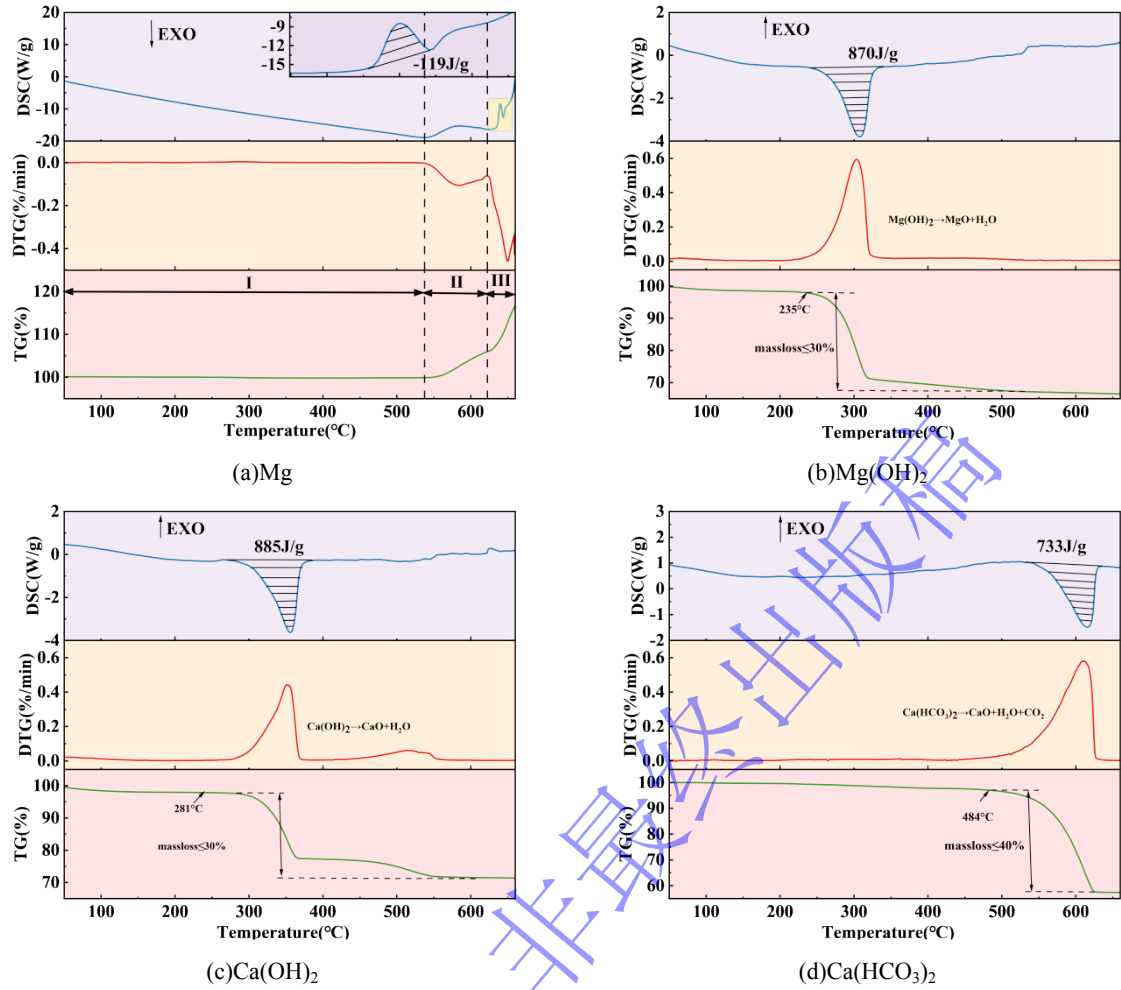


图9 镁粉及三种固体惰化剂 TG-DSC 图

Figure 9 TG-DSC diagram of Magnesium Powder and Three Solid Inerting Agents

三种固体惰化剂对镁粉爆炸的惰化机理如图 10 所示。三种固体惰化剂吸热分解均产生液态水，可以进一步吸收热量进行汽化，同时气态水可以稀释氧气，进一步起到惰化效果。 $Mg(OH)_2$ 在 $235^\circ C$ 左右吸热分解，其受热分解产生的 MgO 质地紧密，耐热性强，可以在未燃镁粉表面附着形成氧化膜，阻止链式反应的产生， $Ca(OH)_2$ 在 $281^\circ C$ 左右吸热分解，其吸热能力较强，其受热分解产生的 CaO 仅通过阻碍镁粒子与氧碰撞实现惰化效果，但高浓度的 CaO 也会停止镁燃烧的链式反应，从而达到完全惰化效果。 $Ca(HCO_3)_2$ 在 $484^\circ C$ 左右大量吸热分解，不仅受热分解产生 CaO 和 H_2O ，起到上述作用，还极易分解产生 CO_2 惰化气体，营造了惰化气氛，虽然 CO_2 在高温作用下与镁粉进行化学反应，但大量 CO_2 仍会对镁粉尘云起到惰化效果^[29, 30]。其中 $Mg(OH)_2$ 凭借其分解温度与镁粉燃烧高度适配、极优的吸热能力和分解后生成致密 MgO 保护层等协同作用，从而实现了对于镁粉爆炸最优异的惰化效果。

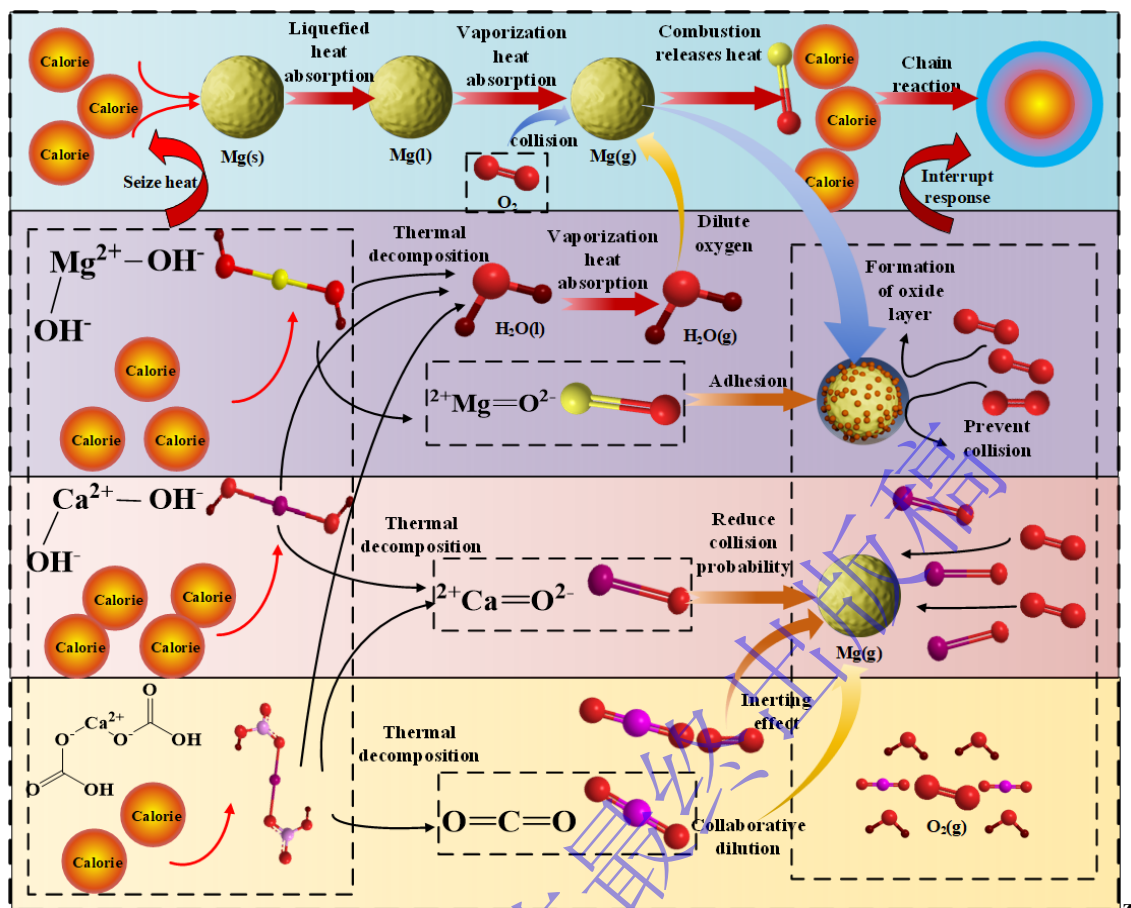


图 10 三种固体惰化剂对镁粉爆炸惰化机理图

Figure 10 Mechanism diagram of explosion inerting of magnesium powder by three solid inerting agents

3 结论

1) 得到了不同粒径及浓度下的镁粉爆炸特性。镁粉 P_{max} 随粉尘颗粒的增大而减小，随粉尘浓度呈增大后减小的趋势。当 $17\ \mu\text{m}$ 镁粉浓度为 $350\ \text{g}/\text{m}^3$ 时， P_{max} 为最大值 $0.792\ \text{MPa}$ ，此时镁粉浓度为最佳爆炸浓度。 $17\ \mu\text{m}$ 镁粉富燃浓度范围为 $0\ \text{g}/\text{m}^3\sim 350\ \text{g}/\text{m}^3$ 。

2) 得到了粒径及浓度耦合作用下对镁粉爆炸特性的影响规律。相同浓度梯度下，浓度增加对镁粉 P_{max} 的促进效果随着粒径的减小而增强，对镁粉 $(dp/dt)_{max}$ 的促进效果随着粒径的减小而减弱；相同粒径梯度下，粒径增大对镁粉 P_{max} 的抑制效果随着浓度的增大而增强，对镁粉 $(dp/dt)_{max}$ 的抑制效果随着浓度的增大而增强。

3) 得到了三种固体惰化剂 ($\text{Mg}(\text{OH})_2$ 、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、 $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$) 对镁粉的惰化效果。随着 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 惰化比增加，镁粉 P_{max} 和 $(dp/dt)_{max}$ 均呈现降低的趋势，随着 $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ 惰化比增加，镁粉 P_{max} 呈现降低趋势， $(dp/dt)_{max}$ 呈现先降低后上升的趋势；低惰化比 ($\leq 100\%$) 下，三种固体惰化剂无法实现对富燃条件镁粉的有效惰化。高惰化比 ($> 100\%$) 下，三种固体惰化剂对镁粉开始起到明显作用。 $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ 惰化比为 165% 时，率先实现有效惰化， $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 惰化比为 220% 时，率先实现完全惰化。确定 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 为最优惰化剂。

4) 揭示了三种固体惰化剂对镁粉爆炸的惰化机理。三者通过物理吸热作用进行惰化， $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 吸热分解产生 MgO 附着在镁颗粒表面，隔绝氧气起到了惰化效果，其效果优于 CaO 阻碍链式反应及 CO_2 对氧气的稀释作用，使得 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 完全惰化效果最好。

参考文献

- [1] 陆继锋, 李方, 刘吉庆. 非煤粉尘抑爆领域文献计量分析[J]. 消防科学与技术, 2022, 41(10): 1464-1468.
LU J F, LI F, LIU J Q. Bibliometric analysis of non coal dust explosion suppression field literature [J]. Fire Science and Technology, 2022, 41(10): 1464-1468.
- [2] 郭瑞, 李南, 张新燕, 等. 微米/纳米 PMMA 粉尘爆炸抑制过程中压力特性与热化学动力学的相关性[J]. 爆炸与冲击, 2023, 43(12): 141-155.
GUO R, LI N, ZHANG X Y, et al. Correlation between pressure characteristics and thermochemical kinetics in the suppression process of micro/nano PMMA dust explosion [J]. Explosion and Shock Waves, 2023, 43(12): 141-155.
- [3] WANG Y, MAO W, SU Y, et al. Investigation on explosion overpressure and flame propagation characteristics of magnesium hydride dust of different particle sizes [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2025, 101438-449.
- [4] QIN C, FENG T, LI G, et al. Pre-carbonization and Mg powder induced synergistic optimization: enhancing the pore structure of coffee grounds-derived hard carbon to improve sodium storage performance [J]. Journal of Power Sources, 2025, 630236093-236093.
- [5] MENG F, LUO Z, YU Y, et al. Multiple effects of high efficiency solid inertants on fire hazard of the accumulated mg dust layer [J]. Energy, 2024, 313133807-133807.
- [6] YUAN C, YUL, LI C, et al. Thermal analysis of magnesium reactions with nitrogen/oxygen gas mixtures [J]. Journal of Hazardous Materials, 2013. 260, 707-714.
- [7] 陈刚, 张晓蕾, 徐帅, 等. 我国 2005—2020 年粉尘爆炸事故统计分析[J]. 中国安全科学学报, 2022, 32(08): 76-83.
CHEN G, ZHANG X L, XU S, et al. Statistical analysis of dust explosion accidents in China from 2005 to 2020 [J]. China Safety Science Journal, 2022, 32(08): 76-83.
- [8] 刘贞堂, 周西方, 林松, 等. 我国工业粉尘爆炸事故统计及趋势分析[J]. 消防科学与技术, 2020, 39(06): 879-882.
LIU Z T, ZHOU X F, LIN S, et al. Statistics and trend analysis of industrial dust explosion accidents in China [J]. Fire Science and Technology, 2020, 39(06): 879-882.
- [9] 李珍宝, 李超, 王虎, 等. MPP 抑制铝镁合金粉尘爆炸微观机理研究[J]. 化工学报, 2023, 74(08): 3608-3614.
LI Z B, LI C, WANG H, et al. Study on the microscopic mechanism of MPP inhibition of dust explosion in aluminum magnesium alloy [J]. CIESC Journal, 2023, 74(08): 3608-3614.
- [10] 冯晓美, 崔楚凝, 张轩鸣, 等. 粉尘爆炸及防护措施研究进展[J]. 山东化工, 2022, 51(12): 204-206.
FENG X M, CUI C N, ZHANG X M, et al. Research progress on dust explosion and protective measures [J]. Shandong Chemical Industry, 2022, 51(12): 204-206.
- [11] 中华人民共和国应急管理部. 粉尘防爆安全规程: GB 15577-2018[S]. 中国标准出版社, 2018.
Emergency Management Department of the people's Republic of China Safety regulations for dust explosion protection: GB 15577-2018[S]. China Standards Press, 2018
- [12] 项国, 王继仁, 刘天奇. 基于 20L 球形装置的镁粉爆炸压力特性[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2018, 37(03): 508-511.
XIANG G, WANG J R, LIU T Q, et al. Explosion pressure characteristics of magnesium powder based on a 20L spherical device [J]. Journal of Liaoning Technical University(Natural Science), 2018, 37(03): 508-511.
- [13] 王二飞. 受限空间内微米级镁粉及镁铝合金粉燃爆实验研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2020.

- WANG E F. Experimental study on combustion and explosion of micron sized magnesium powder and magnesium aluminum alloy powder in confined space[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2020.
- [14] 伍毅, 袁旌杰, 蒯念生, 等. 碳酸盐对密闭空间粉尘爆炸压力影响的试验研究[J]. 中国安全科学学报, 2010, 20(10): 92-96.
- WU Y, YUAN J J, KUAI N S, et al. Experimental study on the influence of carbonate on dust explosion pressure in confined spaces [J]. China Safety Science Journal, 2010, 20(10): 92-96.
- [15] 代琳琳. 碳酸、磷酸盐对铝粉爆炸的抑制作用研究及数值模拟[D]. 天津: 天津大学, 2020.
- DAI L L. Study on the inhibitory effect of carbonic acid and phosphate on aluminum powder explosion and numerical simulation[D]. Tianjin: Tianjin University, 2020.
- [16] 付羽, 李刚, 孙飞, 等. 镁粉粉末惰化性能实验研究[C]//2008 (沈阳) 国际安全科学与技术学术研讨会论文集. 东北大学; 2008: 616-620.
- FU Y, LI G, SUEN F. Experimental Study on the Inertization Performance of Magnesium Powder [C]//Proceedings of the 2008 (Shenyang) International Symposium on Safety Science and Technology. Northeastern University, 2008: 616-620.
- [17] WANG Z, MENG X, YAN K, et al. Inhibition effects of $\text{Al}(\text{OH})_3$ and $\text{Mg}(\text{OH})_2$ on Al-Mg alloy dust explosion [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2020, 66: 104206.
- [18] 陈攀. 粉末惰化条件下微纳米钛粉反应动力学研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2018.
- CHEN P. Study on the reaction kinetics of micro nano titanium powder under powder inerting conditions[D]. Shenyang: Northeastern University, 2018.
- [19] 谭迎新, 李亚男. 磷酸二氢铵对铝粉的爆炸抑制研究[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2015, 36(04): 458-461. DOI: CNKI: SUN: HBGG. 0.2015-04-013.
- TAN Y X, LI Y N. Study on the Explosive inhibition of ammonium dihydrogen phosphate on aluminum powder [J]. Journal of North University of China (Natural Science Edition), 2015, 36(04): 458-461.
- [20] 全国安全生产标准化技术委员会(SAC/TC 288). 惰化防爆指南: GB/T 37241-2018[S]. 中国标准出版社, 2018.
- National Technical Committee for work safety standardization (sac/tc 288). Inerting explosion proof Guide: GB/T 37241-2018[S]. China Standards Press, 2018
- [21] 全国安全生产标准化技术委员会(SAC/TC 288). 粉尘云爆炸下限浓度测定方法: GB/T 16425-2018[S]. 中国标准出版社, 2018.
- National Technical Committee for work safety standardization (sac/tc 288). Determination method of lower explosive limit concentration of dust cloud: GB/T 16425-2018[S]. China Standards Press, 2018
- [22] 李雨成, 富健涛, 奇佳民, 等. 密闭空间镁粉爆炸压力特性研究[J]. 爆破, 2018, 35(03): 114-119.
- LI Y C, FU J T, QI J M, et al. Research on the pressure characteristics of magnesium powder explosion in confined spaces [J]. Blasting, 2018, 35(03): 114-119.
- [23] MITTAL M. Explosion characteristics of micron- and nano-size magnesium powders [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2014, 2755-64.
- [24] 许扬, 黄睿, 宋民航, 等. 颗粒间距对煤粉颗粒着火和燃烧行为影响的理论研究[J]. 煤炭学报, 2022, 47(04): 1701-1708.
- XU Y, HUANG Q, SONG M H, et al. Theoretical study on the influence of particle spacing on the ignition and combustion behavior of coal powder particles [J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(04): 1701-1708.
- [25] 王涛, 孟帆, 弋伟斋, 等. 碳酸钾改性干水-六氟丙烷抑制甲烷爆炸特性[J]. 高压物理学报, 2025, 39(04): 79-90.

- WANG T, MENG F, YI W Z, et al. Coupling inhibition effects of dry water modified by potassium carbonate and hexafluoropropane on methane explosion [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2025, 39(04): 79-90.
- [26] 谢度坤, 邹响, 陈小鹏, 等. 碳酸氢钙改性及其热分解动力学[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2023, 48(01): 181-191. DOI: 10.13624/j.cnki.issn.1001-7445.2023.0181.
- XIE D K, ZOU Y, CHEN X P, et al. Modification of calcium hydrogen carbonate and its thermal decomposition dynamics [J]. Journal of Guangxi University(Natural Science Edition), 2023, 48(01): 181-191. DOI: 10.13624/j.cnki.issn.1001-7445.2023.0181.
- [27] 钟英鹏. 镁粉爆炸特性实验研究及其危险性评价[D]. 沈阳: 东北大学, 2008.
- ZHONG Y P. Experimental study on explosion characteristics of magnesium powder and its hazard assessment[D]. Shenyang: Northeastern University, 2018.
- [28] Ciudad A, Haurie L, Lacasta M A. Kinetic analysis of endothermic degradation of magnesium hydroxide, calcium hydroxide and calcium carbonate in the context of passive fire protection [J]. Fire and Materials, 2015, 39(1): 14-25.
- [29] LI G, YUAN C M, FU Y, et al. Inerting of magnesium dust cloud with Ar, N₂ and CO₂ [J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 180-183, 0304-3894.
- [30] XIONG X, GAO K, JI C, et al. Study on the characteristics parameters of magnesium dust explosion suppression by various inert gases [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2024, 87105242-.

Effects of Solid Inerting Agent on Magnesium Powder Explosion under Fuel-Rich Conditions

LI Runzhi¹, LIU Mingshuai¹, CAO Mengting¹, MENG Xiangbao¹, DING Jianxu², LI Shihang³,
HAN Zhiyue⁴

(1. College of Safety and Environmental Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, Shandong, China;

2. Guangzhou Academy of Special Equipment Inspection and Testing, Guangzhou 510663, Guangdong, China;

3. Carbon Neutrality Institute, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, Jiangsu, China;

4. State Key Laboratory of Explosion Science and Safety Protection, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: In order to prevent and control the deflagration hazard of magnesium powder in fuel-rich conditions, the explosion suppression test device was used to test the effect of solid inerting agents (Mg(OH)₂, Ca(OH)₂, Ca(HCO₃)₂) on the explosion characteristics of magnesium powder. The particle size and concentration were considered. The results show that in the range of 17~74 μm, the maximum explosion pressure increases with the decrease of particle size. The magnesium powder with 17 μm diameter the best explosion concentration of 350 g/m³, the maximum explosion pressure of 0.716 MPa. The addition of Mg(OH)₂, Ca(OH)₂, and Ca(HCO₃)₂ inerting agents make the maximum explosion pressure and maximum pressure rise decrease, and the inerting mechanism of solid inerting agents on oxygen-enriched magnesium powder under oxygen-enriched conditions is revealed. Pressure and the maximum pressure rise rate decreased, and the inerting ratios of three inerting agents for effective inerting and complete inerting of magnesium powder were obtained, among which Mg(OH)₂ inerting effect was the optimal, and the inerting ratios of reaching effective inerting and complete inerting were 170% and 220%, respectively. The inerting mechanisms of different inertants were revealed. Mg(OH)₂ was inerted by the thermal decomposition to produce MgO isolation layer, which was adsorbed to the surface of magnesium particles to hinder oxygen contact.

$\text{Ca}(\text{OH})_2$ was inerted only by thermal decomposition, and $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ was inerted by thermal decomposition to produce CO_2 to enhance the inerting effect. The obtained conclusions provide an important reference for realizing the effective inerting of magnesium powder explosion under rich combustion conditions.

Key words: Magnesium powder explosion; Solid inerting; Explosion overpressure; Inert mechanis

最新录用，非最终出版稿