

DOI: 10.11883/bzycj-2026-0154

碳酸盐抑制乙炔爆炸的特性与机理*

纪文涛^{1,2,3}, 王旭^{1,2,3}, 苏洋^{1,2,3}, 吕先舒^{1,2,3}, 侯振海^{1,2,3}, 许亚北^{1,2,3}, 时建朝⁴, 王燕^{1,2,3*}

(1. 河南理工大学 安全科学与工程学院, 河南 焦作, 454000;

2. 河南省燃爆动力灾害预警与应急工程技术研究中心, 河南 焦作, 454000;

3. 煤炭安全生产与清洁高效利用省部共建协同创新中心, 河南 焦作, 454000;

4. 河南理工大学 化学化工学院, 河南 焦作, 454000)

摘 要: 乙炔作为工业加工和合成有机产品的基础原料, 遇明火极易发生爆炸事故。为探究碳酸盐对乙炔爆炸特性的抑制效果, 选取碳酸钠和碳酸氢钠两种粉体作为抑爆剂, 分别运用 20 L 球爆炸装置和 5 L 粉尘爆炸火焰传播测试装置, 研究碳酸钠和碳酸氢钠粉体对乙炔爆炸超压及火焰传播特性的抑爆效果, 并结合 Chemkin 数值模拟结果揭示了两种粉体对乙炔爆炸的抑爆机理。实验结果表明, 当碳酸钠和碳酸氢钠的浓度均为 1500 g/m³ 时, 乙炔的爆炸压力分别降低 32.56% 和 34.88%, 爆炸压力上升速率分别降低 51.35% 和 54.9%, 且乙炔爆炸火焰结构的连续性明显降低, 火焰到达管道顶端的时间分别延长 120% 和 130%, 平均传播速度分别降低 54.54% 和 56.52%, 两粉体的抑爆效果显著。数值模拟结果表明, 碳酸钠和碳酸氢钠作为热解吸热型粉体, 可以有效降低反应体系温度, 同时生成的 NaOH 可与反应体系的高活性自由基结合形成稳态产物, 从而达到抑爆效果; 但由于两粉体热解生成的 NaOH 浓度存在差异, 最终导致碳酸氢钠的抑爆效果优于碳酸钠。研究结果有助于深入理解乙炔爆炸本质, 对优化乙炔抑爆技术, 进而保障我国工业安全高效生产具有重要意义。

关键词: 乙炔爆炸; 粉体抑爆剂; 抑爆特性; 抑爆机理

中图分类号: X932

国标学科代码: 620.3020

文献标志码: A

Suppression characteristics and mechanism of acetylene explosion by Carbonate

Ji Wentao^{1,2,3}, WANG Xu^{1,2,3}, SU Yang^{1,2,3}, LV Xianshu^{1,2,3}, HOU Zhenhai^{1,2,3}, XU Yabei^{1,2,3},
SHI Jianchao⁴, WANG Yan^{1,2,3*}

(1. School of Safety Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China;

2. Henan Province Engineering Technology Research Center of Explosion Dynamic Disaster Early Warning and Emergency, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China;

3. Collaborative Innovation Center of Coal Work Safety and Clean High Efficiency Utilization, School of Safety Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China;

4. College of Chemistry and Chemical Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China;)

*收稿日期: 2026-05-18; 修回日期: 2026-08-28;

基金项目: 国家自然科学基金 (52474217, 52374197); 河南省高校科技创新团队 (25IRTSTHN005); 河南省科技研发计划联合基金-青年科学家项目 (235200810079); 河南省自然科学基金-优秀青年基金 (252300421106)

第一作者: 纪文涛 (1989—), 男, 博士, 教授. E-mail: jiwentao@hpu.edu.cn;

通讯作者: 王 燕 (1982—), 女, 博士, 教授. E-mail: yanwang@hpu.edu.cn.

Abstract: As a fundamental raw material for industrial processing and organic product synthesis, acetylene is highly susceptible to explosion accidents when exposed to open flames. To investigate the inhibitory effects of carbonates on acetylene explosion characteristics, sodium carbonate and sodium bicarbonate powders were selected as explosion suppressants. This study used a 20 L spherical explosion device to quantitatively obtain explosion overpressure and pressure rise rate under standard ignition and powder dispersion conditions. Meanwhile, a 5 L dust explosion flame propagation test device combined with high-speed photography was applied to record flame morphology evolution, and measure flame arrival time as well as average propagation velocity. TG-DSC thermal analysis was conducted to characterize the pyrolysis and endothermic properties of the two carbonate samples. Combined with Chemkin-Pro numerical simulations using a zero-dimensional homogeneous constant-volume reactor and elementary reaction sensitivity analysis, the explosion suppression mechanisms of these two powders on acetylene explosions were clarified. The experimental results show that when both sodium carbonate and sodium bicarbonate are at a concentration of 1500 g/m³, the acetylene explosion pressure is reduced by 34.88% and 32.56% respectively, and the explosion pressure rise rate is reduced by 51.35% and 54.9% respectively. The structural continuity of the acetylene explosion flame is also significantly weakened: the time for the flame to reach the top of the pipeline is prolonged by 120% and 130% respectively, and the average propagation speed is reduced by 54.54% and 56.52% respectively. Both powders exhibit remarkable inhibitory effects. Numerical simulation results indicate that as pyrolytic endothermic powders, sodium carbonate and sodium bicarbonate can effectively reduce the temperature of the reaction system. In addition, the NaOH generated during pyrolysis can combine with highly active free radicals in the reaction system to form stable products, thereby achieving the explosion suppression effect. Due to the difference in NaOH concentration produced by pyrolysis of the two powders, sodium bicarbonate ultimately shows a better inhibitory effect than sodium carbonate.

The research results are of great significance for deepening the understanding of the nature of acetylene explosions. They can support the optimization of acetylene explosion suppression technology, and further guarantee the safe and efficient development of industrial production in China.

Keywords: Acetylene explosion; Powder explosion suppressant; Explosion suppression characteristics; Explosion suppression mechanism

乙炔广泛应用于金属焊接和淬火等加工作业，同时也是现代合成塑料、橡胶、纤维等多种有机产品的基础原料^[1-3]。然而，乙炔因其分子结构不稳定，在空气中的爆炸极限范围宽，遇高温及明火易发生燃烧爆炸^[4-6]。近年来，乙炔爆炸事故频发^[7-8]，例如，2017年大连市旅顺口区某乙炔车间发生爆炸，造成1人死亡、3人受伤；2019年广东省惠州市某乙炔充装车间发生火灾，过火面积达200平方米，直接经济损失59.77万元；2022年某港口船舶发生乙炔气瓶爆炸事故，造成3人死亡。乙炔燃爆风险不仅制约相关行业安全生产，同时对厂区周边公共安全形成潜在威胁，因此开展乙炔爆炸灾害专项防控研究，对工业事故预防与安全稳定生产具有重要现实价值。

现有可燃气体爆炸防控技术主要分为泄爆、隔爆、抑爆等^[9-11]。相较于其他防控技术，爆炸抑制技术因具有阻止爆炸发生和降低爆炸强度的双重优势，更适配乙炔充装间、密闭加工厂房等受限空间的风险防控需求^[12-14]。国内外学者已围绕不同相态抑爆介质开展大量研究，研发出气相七氟丙烷^[15-16]，液态细水雾^[17-18]，固态碳酸氢钠^[19]等多种相态的抑爆剂。其中，气态与液态抑爆剂存在储运条件苛刻、环境敏感性强、应用成本高等局限，固态抑爆剂因储存便捷、抑爆效能高且成本低廉等优点，在工业防爆领域得到广泛应用^[20-22]。目前，国内外粉体抑爆相关研究大多以甲烷、氢气等常规可燃气体为研究对象^[23-26]。但乙炔具有较常规可燃气体更高的爆炸强度和点火敏感性，甚至无需氧化剂即可发生自分解爆炸，特殊的爆炸特性大幅增加了乙炔爆炸抑制难度。虽然已有学者开展了气体浓度、点火位置、点火时间、外部约束条件等不同工况对乙炔爆炸特性的影响规律^[27-28]，并初步验证了二氧化硅、氢氧化铝等^[29]典型固体抑爆剂以及氮气等^[30]惰性气体对乙炔爆炸的抑制作用，但在研究方法与

机理分析方面仍存在显著局限。研究方法方面, 现有研究多直接沿用常规可燃气体的抑爆研究范式与表征体系, 未充分考虑乙炔爆炸强度高、链式反应活性强、可发生自分解爆炸的独特特性, 尚未形成适配乙炔体系的标准化研究方法, 表征维度多局限于爆炸超压峰值、最大升压速率等参数, 缺乏火焰形貌演化、光谱辐射特性、火焰传播速度等参数的定量可视化表征, 难以从多尺度辨识不同抑爆剂的效能差异。机理分析方面, 现有研究多直接迁移常规可燃气体的抑爆机制, 未结合乙炔独特的链式反应路径与自分解特性开展针对性分析, 机理阐释的体系适配性不足, 对抑爆作用的认知多停留在物理吸热、惰性稀释、自由基消除的定性描述层面, 缺乏基于化学反应动力学的基元反应敏感性定量分析, 无法精准量化 $\text{H}\cdot$ 、 $\cdot\text{OH}$ 等关键活性自由基的演化规律。碳酸盐类矿物盐化学性质稳定、储量丰富, 且热解过程具备显著吸热效应, 是工业干粉灭火剂的核心组分。以碳酸钠、碳酸氢钠为代表的钠盐碳酸盐, 在甲烷、氢气、乙烯等常规可燃气体抑爆场景中已验证具备良好的抑制效果, 分解产生 CO_2 和 H_2O 可实现物理降温与惰性稀释, 同时热解生成的 NaOH 能够消除爆炸关键自由基、中断链式反应, 具备物理-化学双重抑爆机制。但目前关于两类碳酸盐抑制乙炔爆炸效能与微观作用机理仍缺乏系统探究。

立足于乙炔工业场景燃爆灾害防控的现实需求, 针对现有研究存在的不足, 本文通过 20 L 球形爆炸装置与 5 L 粉尘爆炸火焰传播测试装置, 选取碳酸钠和碳酸氢钠为抑爆剂, 开展碳酸盐抑制乙炔爆炸性能和机理研究。从爆炸超压、火焰传播特性、光谱辐射特性三方面对比分析两种碳酸盐抑制乙炔爆炸效能, 并结合两种碳酸盐的物化特性和 Chemkin 数值模拟, 揭示两种碳酸盐抑制乙炔爆炸的物理-化学协同作用机理, 研究结果可为乙炔爆炸灾害防治提供参考和依据。

1 实验材料和实验装置

1.1 实验材料

实验所用的乙炔气体纯度为 99.9%。两种抑爆粉体(碳酸钠和碳酸氢钠)由天津市河东区红岩试剂厂提供, 纯度为 99.9%。为避免粒径差异对抑爆性能的影响, 通过研磨调整粒径并检测粒径分布, 两种碳酸盐粉体的粒径均呈正态分布, 其中碳酸钠粉体的中位粒径 $D_{50}=8.29\ \mu\text{m}$, 碳酸氢钠粉体的 $D_{50}=7.18\ \mu\text{m}$, 粒径大小相近, 如图 1 所示。实验前将粉体材料置于真空干燥箱中, 在 60°C 条件下干燥 12 小时, 经检测, 两种粉体干燥后的含水率基本一致, 均降至 0.1% 以下, 由此排除了湿度对实验结果的干扰。

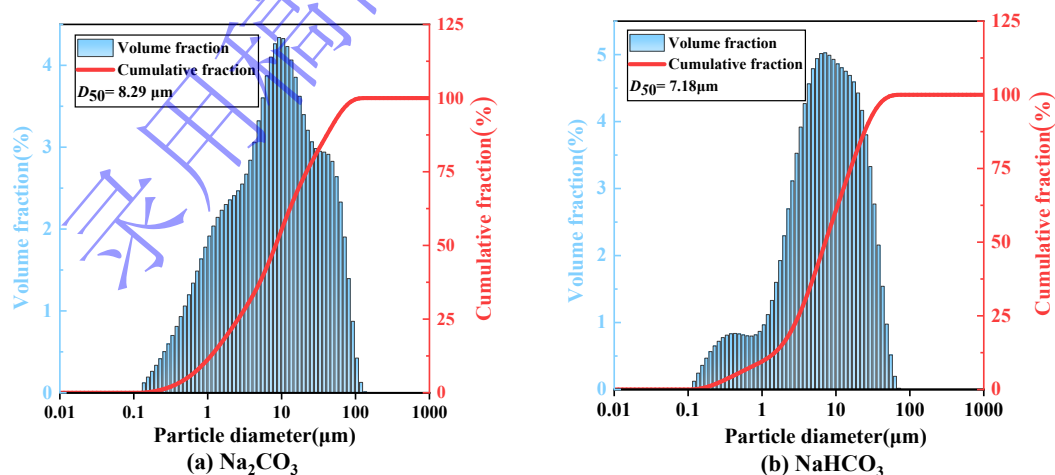


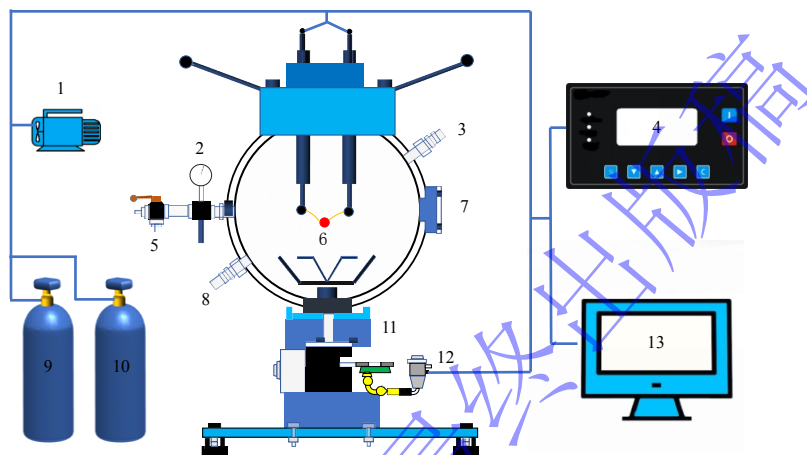
图 1 碳酸钠和碳酸氢钠粒径分布图

Fig.1 Particle size distribution map of sodium carbonate and sodium bicarbonate

1.2 实验装置

实验采用 20 L 球形爆炸装置及 5 L 粉尘爆炸火焰传播测试装置，分别从爆炸压力及火焰传播特性方面对碳酸钠和碳酸氢钠粉体抑制乙炔爆炸效果进行研究。

20 L 球形爆炸装置结构示意图如图 2 所示，装置主要由 20 L 球体、喷粉系统、点火系统、数据采集系统、配气系统组成。喷粉装置位于 20 L 球底部，通过压缩空气将储粉罐内的粉体抑爆剂喷入到容器内。实验采用脉冲点火，以爆炸压力、爆炸压力上升速率、粉体在球体内的分散均匀性为评价指标，经预实验确定点火延迟时间为 60 ms，喷粉压力为 2 MPa。为确保实验结果的可靠性，每组实验重复 3 组以上取平均值。

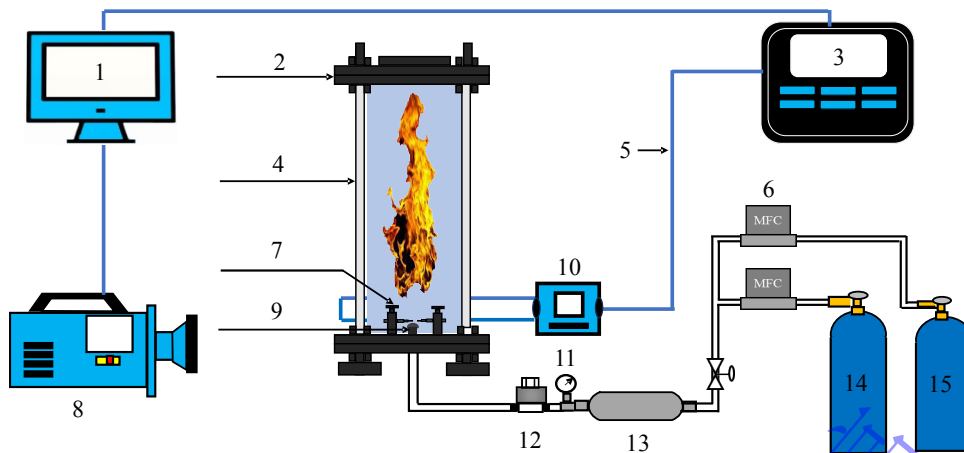


1.Vacuum pump; 2.negative pressure gauge; 3.Thermostatted water; 4.Control system; 5.Vent valve;
6.Igniter head; 7.Observation window; 8.Pressure relief valve; 9.Compressed acetylene; 10.Compressed air;
11.Air-powder two-phase valve; 12.Powder storage bin; 13.Computer

图 2 20L 球形爆炸装置系统示意图

Fig.2 Schematic diagram of 20 L spherical explosion test system

5L 粉尘爆炸火焰传播测试装置主要用于测试爆炸火焰传播特性，结构示意图如图 3 所示，其主要由 5 L 管道、同步控制系统、喷粉系统、点火系统、配气系统及高速摄影系统组成。管道部分由 100 mm×100 mm×500 mm 的透明玻璃制成；喷粉系统主要由储粉槽、分散喷头、200 mL 预混储气罐、电磁阀、压力表以及空气压缩机等配件构成；点火系统由点火器与点火电极组成，其中点火电极是一对钨电极棒，输出电压为 6 kV。以火焰形貌完整性、火焰传播连续性与传播速度稳定性为评价指标，经预实验确定最佳喷粉时长 300 ms，点火时长为 200 ms，点火延迟时间为 600 ms。本实验使用高速摄像机(Phantom Miro M310)实时拍摄火焰传播行为，帧率设置为 8000 帧/秒，分辨率设为 1024×1024，实验全过程固定拍摄机位、焦距、曝光、白平衡、帧率与分辨率，保证各组图像采集条件完全一致。每组实验均重复 3 次以上，取火焰传播速度最快一组为分析对象。



1.Computer; 2.PVC film; 3.Control system; 4.Explosion chamber; 5.Circuit;
6.Mass flow controller; 7.Electrodes; 8.High speed camera; 9.Powder container; 10.Ignition transformer;
11.Pressure gauge; 12.solenoid valve; 13.Premixed gas cylinder; 14.Compressed acetylene; 15.Compressed air

图3 5L 粉尘爆炸火焰传播测试装置系统示意图

Fig.3 Experimental device of 5 L capacity for testing dust explosion and flame propagation characteristics

2. 实验结果与分析

首先在标准 20 L 球形爆炸装置内测试不同体积分数下乙炔爆炸压力和爆炸压力上升速率，实验结果如图 4 所示。由图 4 可知，乙炔的爆炸压力和爆炸压力上升速率均随乙炔体积分数的增大先增大后减小；当乙炔体积分数为 14% 时，爆炸压力和爆炸压力上升速率均达到最大值，分别为 0.86 MPa 和 213.18 MPa/s，为乙炔最危险爆炸浓度，作为抑爆研究对象具有典型性与代表性。

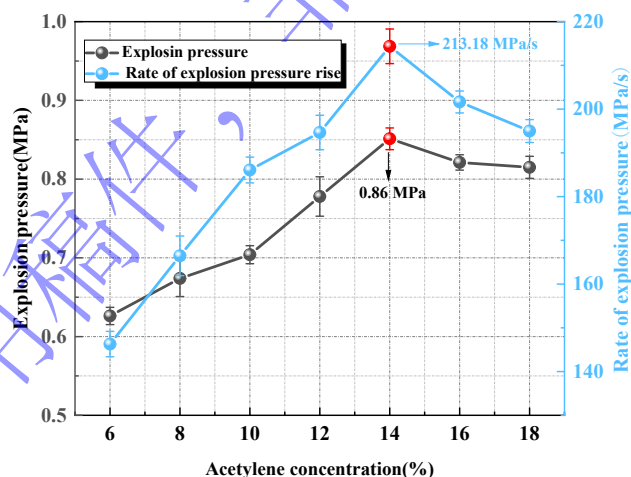


图4 不同体积分数下乙炔爆炸压力和爆炸压力上升速率

Fig.4 Explosion pressure and pressure rise rate of acetylene at different volume fractions

2.1 碳酸盐抑制乙炔爆炸超压特性

以体积分数为 14% 的乙炔作为抑爆对象，利用 20 L 球形爆炸装置，对不同质量浓度碳酸盐抑爆乙炔爆炸超压效果进行了测量，获得不同质量浓度碳酸钠和碳酸氢钠作用下乙炔爆炸超压变化规律，如图 5 所示。由图 5 可知，乙炔爆炸压力随两种碳酸盐质量浓度的增大而降低，当碳酸钠和碳酸氢钠质量浓度增加至 1500 g/m³ 时，乙炔爆炸压力从 0.86 MPa 分别下降至 0.58 MPa 和 0.56 MPa，下降幅度分别为 32.56% 和 34.88%，即碳酸氢钠对乙炔爆炸压力的抑制效果优于碳酸钠。

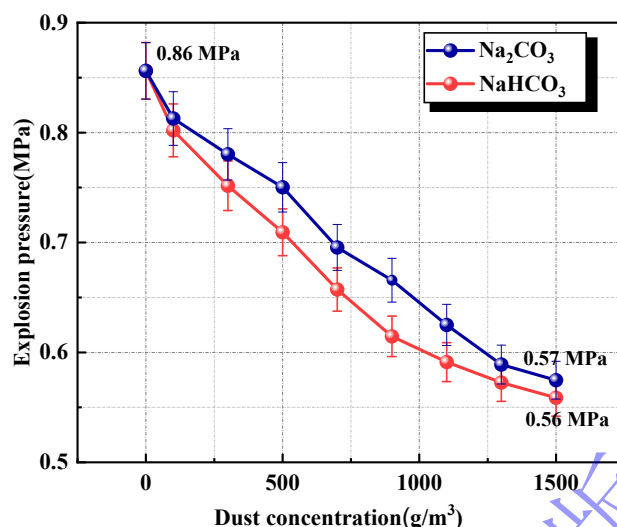


图 5 不同质量浓度碳酸钠和碳酸氢钠粉体抑制作用下乙炔爆炸压力变化规律

Fig.5 The variation law of the explosion pressure of acetylene under the inhibitory effect of different concentrations of sodium carbonate and sodium bicarbonate powder

图 6 为不同质量浓度碳酸盐作用下乙炔爆炸压力上升速率变化规律。由图 6 可知，乙炔爆炸压力上升速率同样随两种碳酸盐质量浓度的增大而降低，当碳酸钠和碳酸氢钠质量浓度增加至 1500 g/m³ 时，乙炔爆炸压力上升速率从 213.18 MPa/s 分别下降至 103.72 MPa/s 和 96.18 MPa/s，下降幅度分别为 51.35%和 54.9%，即两种碳酸盐对乙炔爆炸压力上升速率具有明显的抑制效果，但碳酸氢钠抑制效果更佳。

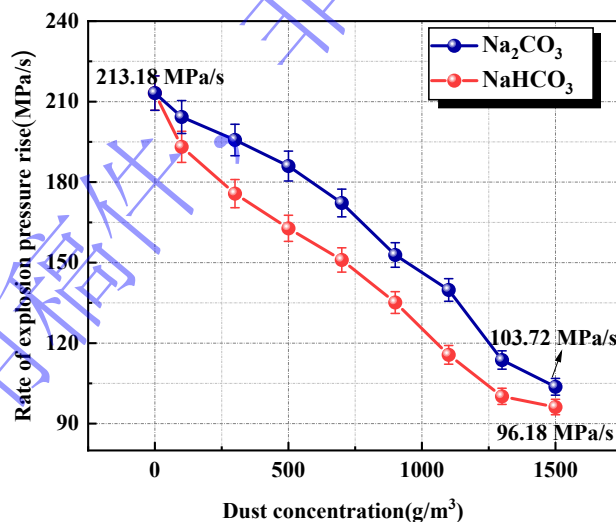


图 6 不同质量浓度碳酸钠和碳酸氢钠粉体抑制作用下乙炔爆炸压力上升速率变化规律

Fig.6 The variation law of the explosion pressure rise rate of acetylene under the inhibitory effect of different concentrations of sodium carbonate and sodium bicarbonate powder

2.2 碳酸盐抑制乙炔爆炸火焰特性

利用 5 L 粉尘爆炸火焰传播测试装置对体积分数为 14% 的乙炔爆炸火焰传播特性开展测试，结果如图 7 所示。从图中可以看出，点火后爆炸火焰呈球状结构向管道四周传播，当火焰与管道内壁相接触时，在管道壁面的约束作用下，其火焰形态向指状结构演变，且呈明亮的白色火焰。对火焰核心反

应特征区域提取 RGB 平均色值 ($\bar{R}=254$ 、 $\bar{G}=252$ 、 $\bar{B}=250$) 可得, 该工况下火焰三分量整体均值处于较高水平, 宏观呈现明亮白色火焰特征。这是因为体积分数为 14% 乙炔燃烧强度较高, 释放的高能量以光辐射的形式向外散发, 不同种类的原子、分子参与到激发态以及辐射过程之中, 形成白色亮光。此外, 体积分数为 14% 乙炔不完全燃烧反应会产生大量的炭黑颗粒^[32], 炭黑颗粒的散射作用也会在一定程度上增加火焰亮度。

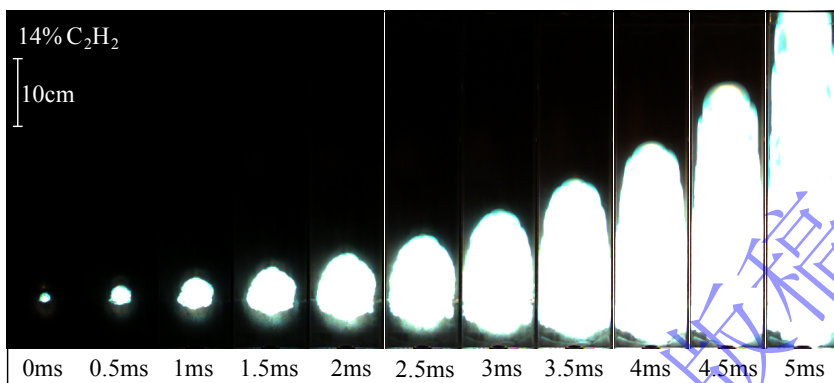
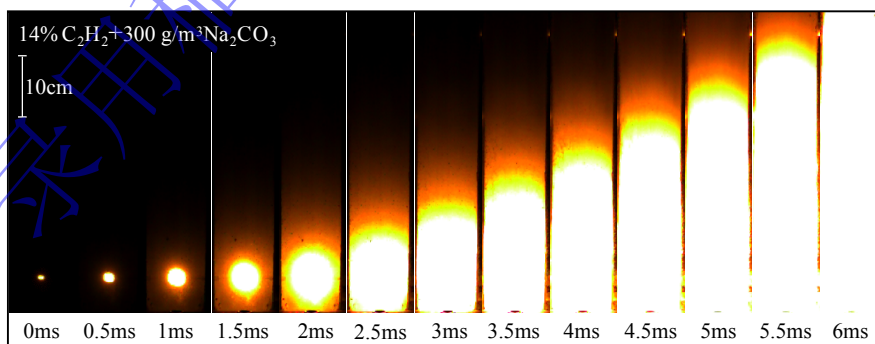


图 7 体积分数为 14% 乙炔爆炸火焰传播特征及形貌结构

Fig.7 Propagation characteristics and morphological structure of acetylene explosion flame with a volume fraction of 14%

图 8 和图 9 分别为碳酸钠和碳酸氢钠作用下乙炔爆炸火焰结构的变化规律。由图 8 和图 9 可知, 相较于纯乙炔爆炸火焰, 加入两种碳酸盐后乙炔爆炸火焰颜色宏观表现为由初始亮白色逐步转为亮黄色。随着两种粉体添加浓度不断提升, 火焰锋面完整性持续弱化, 火焰剖面逐步分化出白色、黄色、橘红色三层分区结构。当添加质量浓度达到 1500 g/m^3 时, 火焰连续性遭到显著破坏, 相较碳酸钠体系, 碳酸氢钠工况下火焰碎片化、离散化特征更为突出。对火焰核心反应特征区域提取 RGB 平均色值, 得到 1500 g/m^3 碳酸钠作用下爆炸火焰核心 RGB 均值为 $\bar{R}=186$ 、 $\bar{G}=163$ 、 $\bar{B}=92$, 相较于纯乙炔, R、G、B 通道色值分别下降 26.8%、35.3%、63.2%; 1500 g/m^3 碳酸氢钠作用下爆炸火焰核心 RGB 均值为 $\bar{R}=172$ 、 $\bar{G}=148$ 、 $\bar{B}=78$, 三色通道降幅依次达 32.3%、41.3%、68.8%, 即掺入碳酸盐后火焰 RGB 总色值整体显著下降, 且碳酸氢钠作用下的降幅更大。在火焰传播时序层面, 纯乙炔火焰抵达管道顶端用时 5 ms; 添加 1500 g/m^3 碳酸钠、碳酸氢钠后, 火焰抵达顶端时长分别延长至 11 ms、11.5 ms, 传播时长分别延长 120%、130%。结合 RGB 色值衰减幅度与火焰传播延迟特征综合分析, 两种碳酸盐均可有效抑制乙炔爆炸火焰的发展, 且同等浓度下碳酸氢钠的抑制果更优。



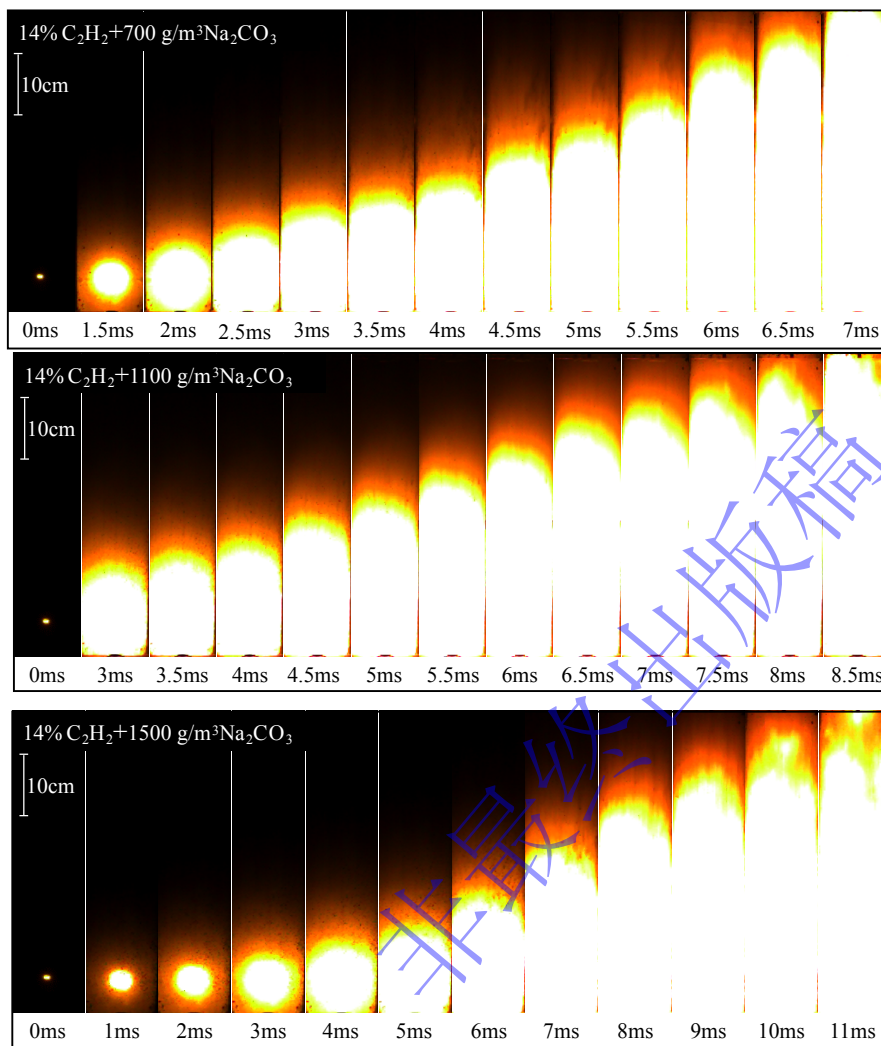
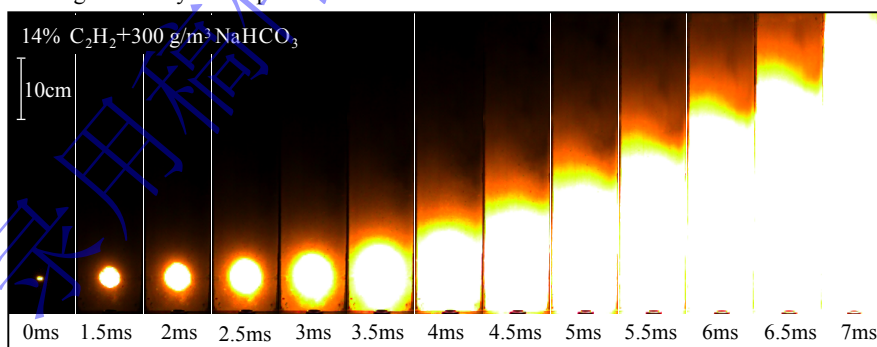


图 8 不同浓度碳酸钠作用下乙炔爆炸火焰结构变化规律

Fig.8 The structural changes of acetylene explosion flame under the action of different concentrations of sodium carbonate



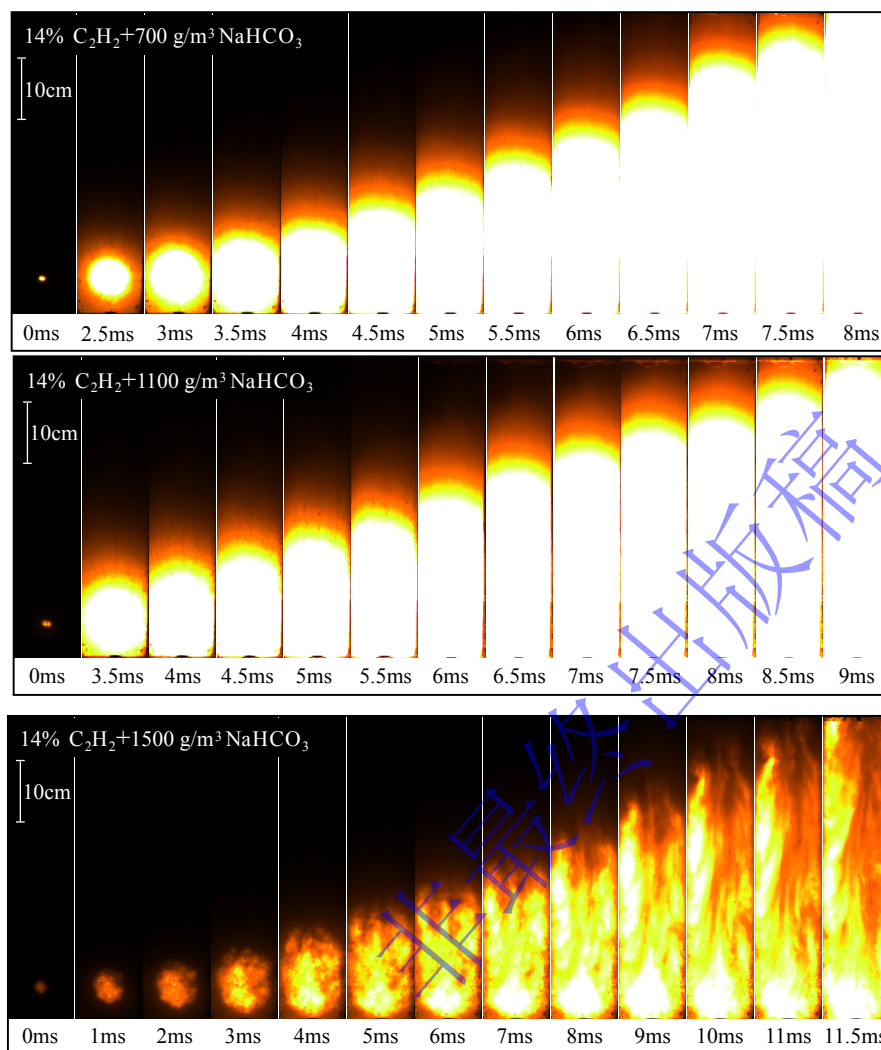


图9 不同浓度碳酸氢钠作用下乙炔爆炸火焰结构变化规律

Fig.9 The structural changes of acetylene explosion flame under the action of different concentrations of sodium bicarbonate

2.3 碳酸盐抑制乙炔爆炸火焰传播速度特性

为了定量分析碳酸盐对乙炔爆炸火焰传播速度的抑制效果，运用自编图像检测程序及 MATLAB 软件，对火焰图像进行处理，以精确定位火焰前沿位置，进而可准确地计算火焰传播速度。

图 10 为碳酸钠和碳酸氢钠作用下乙炔爆炸火焰瞬时传播速度变化规律。由图 10 可知，纯乙炔爆炸火焰最大瞬时传播速度为 219.6 m/s。当在碳酸钠和碳酸氢钠质量浓度为 1500 g/m³ 的作用下，乙炔爆炸火焰最大瞬时传播速度分别为 82.8 m/s 和 71.4 m/s，分别下降 62.3%和 67.5%。图 11 为碳酸钠和碳酸氢钠作用下乙炔爆炸火焰平均传播速度变化规律。由图 11 可知，乙炔爆炸火焰平均传播速度均随碳酸钠和碳酸氢钠浓度的增大而降低。纯乙炔爆炸火焰平均传播速度为 90 m/s，当碳酸钠和碳酸氢钠浓度为 1500 g/m³ 时，乙炔爆炸火焰平均传播速度分别降低至 40.91 m/s 和 39.13 m/s，相较于纯乙炔爆炸分别下降了 54.54%和 56.52%。由此可见，两种碳酸盐均能有效抑制乙炔爆炸火焰传播速度，且碳酸氢钠抑制效果优于碳酸钠。

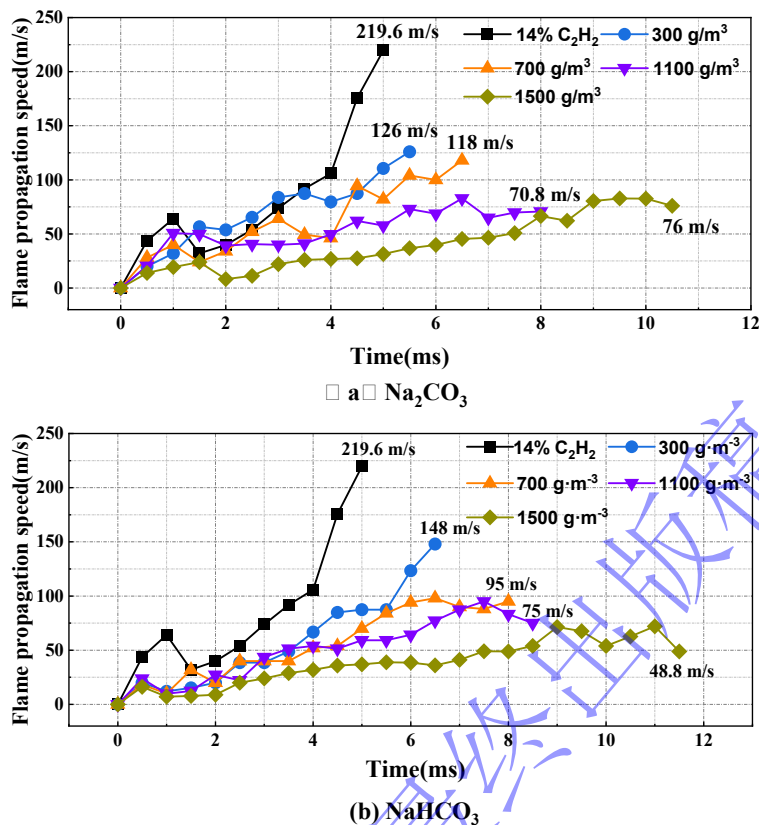


图 10 碳酸钠和碳酸氢钠对乙炔爆炸火焰传播速度影响

Fig.10 The influence of sodium carbonate and sodium bicarbonate on the propagation speed of acetylene explosion flame

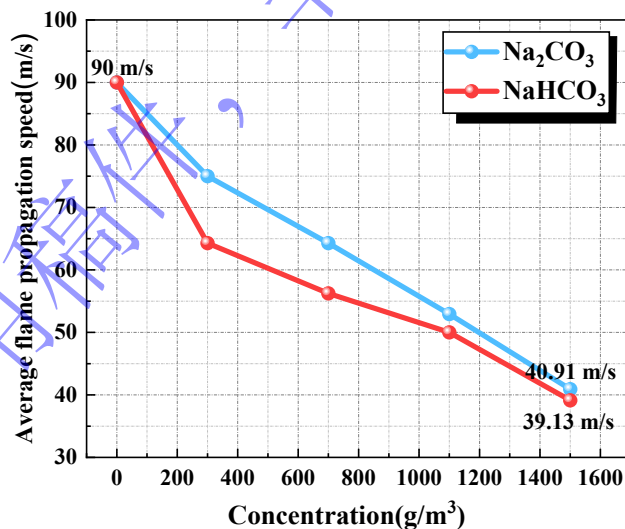


图 11 碳酸钠和碳酸氢钠对乙炔爆炸平均火焰传播速度影响

Fig.11 The influence of sodium carbonate and sodium bicarbonate on the average flame propagation speed of acetylene explosion

3. 碳酸盐抑制乙炔爆炸机理分析

综合上述实验结果与分析可知,碳酸钠和碳酸氢钠均能有效抑制乙炔爆炸超压和火焰传播,其中碳酸氢钠的抑制效果更为显著,这一现象的产生原因及作用机理可从碳酸盐的物理抑爆作用和化学抑

爆作用两个方面进行分析。

3.1 物理抑爆作用

本研究通过对碳酸氢钠的 TG-DSC 同步热分析（如图 12 所示）与碳酸钠热解特性参数^[32]展开对比分析。碳酸氢钠受热发生分步分解反应，最终生成碳酸钠、二氧化碳与水蒸气，单位质量热解吸热量可达 690.103 J/g，分解过程同步释放二氧化碳和水蒸气两种惰性气相产物，惰性气体可稀释可燃混合气浓度、阻隔热量传递、降低爆炸反应强度；现有研究表明碳酸钠热稳定性极强，爆炸温度区间内自身难以发生显著分解，仅当环境温度高于 1000 °C 时才发生缓慢热解^[32]，乙炔爆炸虽峰值温度较高，但反应持续时间仅为毫秒级，瞬时温度场中碳酸钠自身热解程度十分有限，主要依靠固相颗粒吸收体系热量，单位质量吸热能力仅为 59.7 J/g，仅为碳酸氢钠热解吸热量的 8.6%，且无法大量释放惰性气相产物。由此可见，碳酸氢钠可通过剧烈热解吸收大量反应体系热量，快速降低体系峰值温度，同时分解产生的惰性产物可进一步稀释可燃混合气浓度、阻隔热量传递、降低爆炸反应强度，物理抑爆效应显著强于碳酸钠。

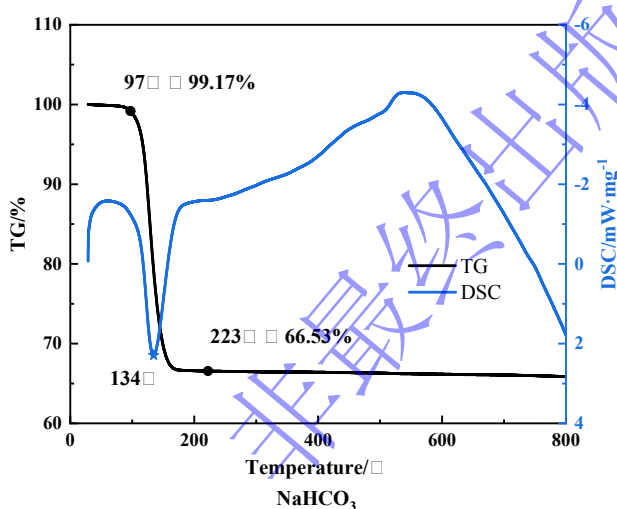


图 12 碳酸氢钠热分解 TG-DSC 曲线

Fig.12 TG-DSC curves for thermal decomposition of sodium bicarbonate

3.2 化学抑爆作用

为深入揭示碳酸钠和碳酸氢钠抑制乙炔爆炸化学作用机制，采用 Chemkin 数值模拟软件，使用零维均质定容封闭反应器模型，对体积分数为 14% 的乙炔爆炸过程开展模拟分析。模拟设置的初始温度和压力分别为 298 K 和 1.01×10⁵ Pa，反应器体积为 20 L，计算总时长为 10 ms，选取了影响乙炔爆炸的 10 个主要基元反应进行敏感性分析。图 13 为体积浓度为 14% 的乙炔爆炸压力和主要基元反应敏感性分析。

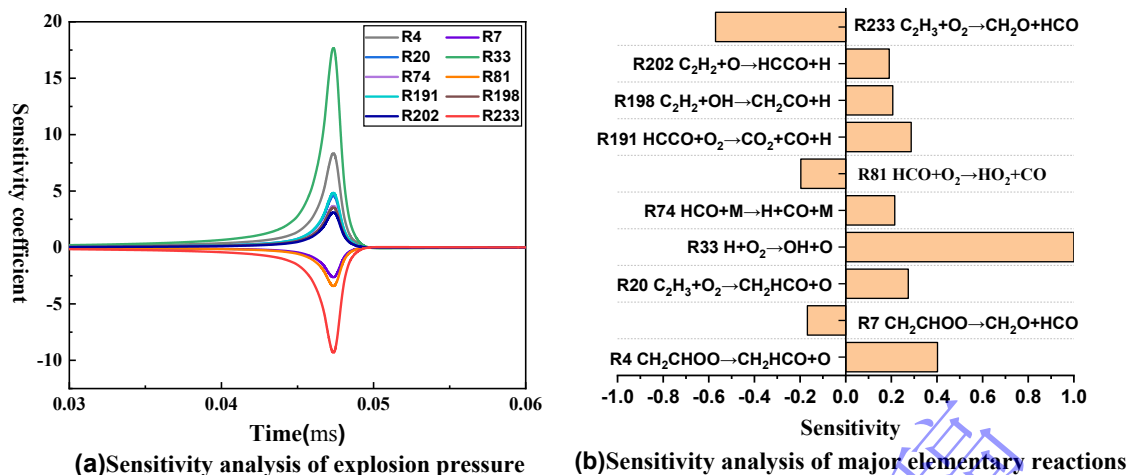


图 13 体积分数为 14% 的乙炔爆炸压力的敏感性分析和主要基元反应敏感性分析

Fig.13 Sensitivity analysis of explosion pressure and major elementary reaction sensitivity for 14% acetylene-air premixed gas

由图 13 (a) 可知, R4、R20、R33、R74、R191、R198 和 R202 反应促进爆炸压力上升, R7、R81 和 R233 反应抑制爆炸压力上升, 其中 R33 ($\text{H}+\text{O}_2 \rightarrow \text{OH}+\text{O}$) 的敏感性系数最高, 反应占主导地位。由图 13 (b) 可知, 推动乙炔爆炸的关键正向基元反应与升压敏感反应一致, 乙炔爆炸负向基元反应和抑制爆炸压力基元反应相同。因此, 抑制正向基元反应或促进负向基元反应, 均可以提高对乙炔爆炸的抑制效果。

已有大量碱金属粉体抑爆相关研究表明^[33-34], 碳酸钠、碳酸氢钠在火焰高温环境下热解生成气态 NaOH 组分, 可消除 $\text{H}\cdot$ 、 $\cdot\text{OH}$, 中断燃烧链式反应, 相关基元反应路径已得到燃烧动力学试验与模拟验证。热力学分析表明 NaOH 与 $\text{H}\cdot$ 、 $\cdot\text{OH}$ 的复合反应活化能较低, 在乙炔爆炸高温环境下可自发进行, 生成 H_2O 、NaO 等产物。本文 Chemkin 模拟结果进一步证实, NaOH 会持续消耗 $\text{H}\cdot$ 、 $\cdot\text{OH}$, 显著降低主导爆炸增强的基元反应 R33 ($\text{H}+\text{O}_2 \rightarrow \text{OH}+\text{O}$) 的反应速率, 具体反应如式 (1-4) 所示, 具体抑爆机理如图 14 所示:



上述反应通过持续消耗 $\text{H}\cdot$ 、 $\cdot\text{OH}$, 直接削弱 R33 等核心支链反应的反应速率, 从源头阻断爆炸链式反应的传递。结合实验结果可知, 添加碳酸盐后乙炔爆炸压力下降、火焰 RGB 色值衰减、火焰传播速度降低等现象, 与自由基淬灭导致的链式反应强度削弱完全对应: 在 1500 g/m^3 粉尘浓度掺量下, 碳酸氢钠对爆炸压力的抑制幅度 (34.88%)、爆炸压力上升速率降幅 (54.9%)、火焰 B 通道色值衰减幅度 (68.8%)、火焰传播速度降低幅度 (56.52%)、火焰传播时长增幅 (130%) 均高于碳酸钠体系相对应的 32.56%、51.35%、63.2%、54.54%、120%, 宏观参数的差异也直接反映了二者消除自由基能力的强弱之分, 为碳酸盐的化学抑爆作用提供了多维度的定量证明。此外, 两种碳酸盐粉体粒径相近 (D_{50} 分别为 $8.29 \mu\text{m}$ 和 $7.18 \mu\text{m}$), 比表面积相当, 固相颗粒表面对自由基的非均相吸附复合作用的贡献差异较小, 因此化学抑爆能力的差异主要来源于气态 NaOH 生成量的不同。

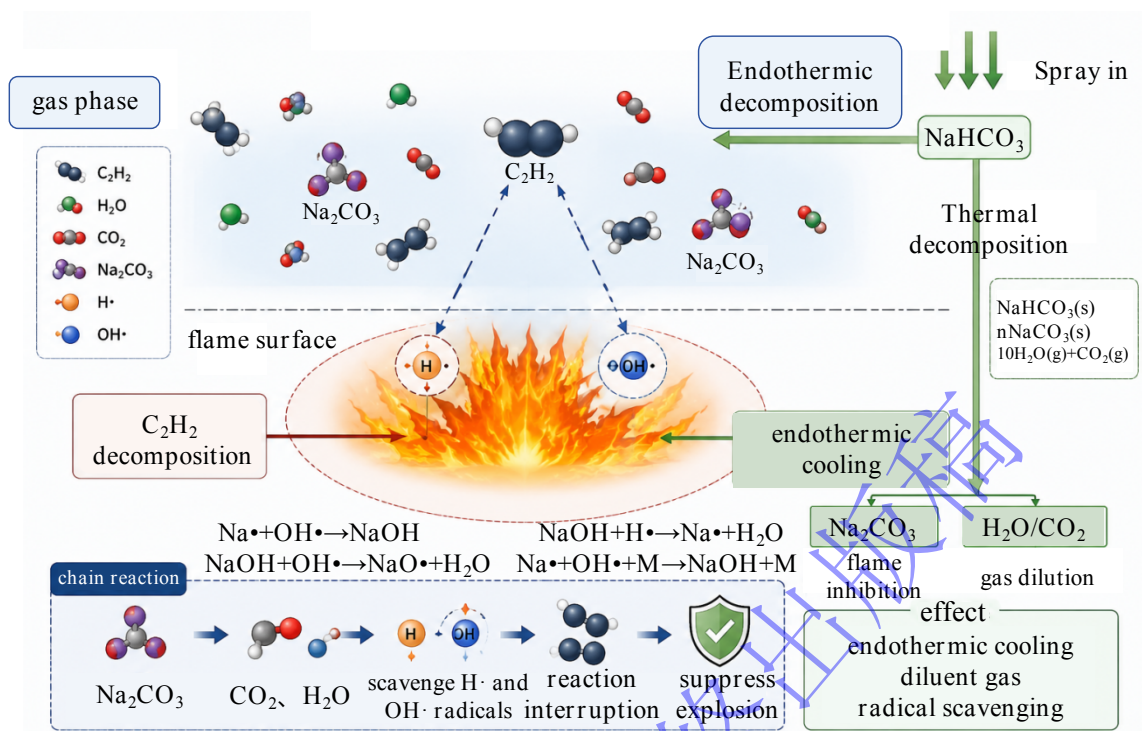


图 14 碳酸钠和碳酸氢钠抑制乙炔爆炸的抑制机理

Fig.14 Inhibition mechanism of sodium carbonate and sodium bicarbonate on acetylene explosion

4. 结论

本文以体积分数为 14% 的乙炔为抑爆对象，分别运用 20 L 球爆炸装置、5 L 管道爆炸装置，对比分析了碳酸钠和碳酸氢钠粉体的抑爆性能，并结合 TG-DSC 热分析与 Chemkin 数值模拟结果，揭示了两粉体抑制乙炔爆炸机理，主要结论如下：

(1) 两种碳酸盐对乙炔爆炸均具有抑制效果，且抑爆效果随粉体浓度的升高而增强。当粉体浓度达到 1500 g/m^3 时，碳酸钠、碳酸氢钠分别使乙炔爆炸压力峰值下降 32.56%、34.88%，爆炸压力上升速率下降 51.35%、54.9%，火焰平均传播速度下降 54.54%、56.52%，火焰抵达管道顶端的时间分别延长 120%、130%，火焰 B 通道色值分别衰减 63.2%、68.8%，即浓度为 1500 g/m^3 的碳酸钠和碳酸氢钠均能有效降低乙炔爆炸压力及爆炸压力上升速率，破坏爆炸火焰的连续性，延长火焰传播时间，降低火焰亮度，且碳酸氢钠的抑爆效果更优。

(2) 热解吸热降温与惰性气体稀释是两类碳酸盐物理抑爆作用的核心来源，二者热稳定性的差异是物理抑爆效能分化的基础。碳酸氢钠热解反应活性高，单位质量热解吸热量达 690.103 J/g ，分解可同步释放 CO_2 与 H_2O 双重惰性介质，兼具吸热降温与稀释反应物浓度的双重物理效应；碳酸钠相对稳定，爆炸反应过程中热解程度低，仅依靠固相颗粒吸收体系热量，单位质量吸热能力仅为碳酸氢钠的 8.6%，且无显著惰性气相稀释作用。

(3) 乙炔爆炸链式反应以 R33 ($H+O_2\rightarrow OH+O$) 为核心支链反应， $H\cdot$ 与 $OH\cdot$ 是驱动爆炸发展的关键活性自由基；钠盐热解生成的气态 $NaOH$ 可通过多步链式反应持续消耗核心自由基，削弱主导支链反应速率，从源头阻断爆炸链式反应进程。因此，气态 $NaOH$ 对乙炔爆炸核心活性自由基的淬灭效应是化学抑爆作用的关键机制，两种粉体化学作用强度的差异主要源于气态 $NaOH$ 生成量的不同。

致谢：感谢国家自然科学基金、河南省自然科学基金、河南省科技研发计划联合基金、河南省高校科技创新团队等项目对本工作的支持，感谢河南省燃爆动力灾害预警与应急工程技术研究中心和煤炭安全生产与清洁利用省部共建协同创新中心为本工作的开展提供的实验装置和平台。

参考文献

- [1] SHEN X B, YANG X L, SANTNER J, et al. Experimental and kinetic studies of acetylene flames at elevated pressures[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2015, 35(1): 721 - 728. DOI: 10.1016/j.proci.2014.05.106.
- [2] 刘宇, 罗蒙蒙, 田富超, 等. C_2H_2/CH_4 燃烧特性实验及反应动力学研究[J]. *燃烧科学与技术*, 2024, 30(05): 473 - 480. DOI 10.11715/rskxjs.R202309001.
- LIU Y, LUO M M, TIAN F C, et al. Combustion Characteristics Experiment and Reaction Kinetics of C_2H_2/CH_4 [J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2024, 30(05): 473 - 480. DOI 10.11715/rskxjs.R202309001.
- [3] 薛红魁. 乙炔性质对乙炔安全储存和使用的影响论述[J]. *化工管理*, 2016(03): 222.
- XUE H K. Discussion on the influence of acetylene properties on the safe storage and use of acetylene[J]. *Chemical Engineering Management*, 2016(03): 222.
- [4] ZHANG M, ZHOU B, CHEN Y, et al. Mechanism and safety analysis of acetylene decomposition explosion: A combined ReaxFF MD with DFT study[J]. *Fuel*, 2022, 327: 124996. DOI: 10.1016/j.fuel.2022.124996.
- [5] 侯万兵. 乙炔爆炸危险性及其安全措施浅析[J]. *科技创新导报*, 2012(36): 101 - 102. DOI: 10.16660/j.cnki.1674-098x.2012.36.017.
- HOU W. Acetylene explosion hazard and brief analysis on security measure[J]. *Science and Technology Innovation Herald*, 2012(36): 101 - 102. DOI: 10.16660/j.cnki.1674-098x.2012.36.017.
- [6] LI J, LIANG W, HAN W, et al. On the Z-shaped explosion limits of acetylene-oxygen mixtures[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2024, 40(1-4): 105300. DOI: 10.1016/j.proci.2024.105300.
- [7] 张玲明. 生产乙炔的爆炸危险性研究与对策[J]. *化工管理*, 2017(21): 174.
- ZHANG L. Study and countermeasures on the explosion risk of acetylene production[J]. *Chemical Engineering Management*, 2017(21): 174.
- [8] 其乐木格, 韩漠, 胡长峰. 乙炔火灾爆炸危险性分析及预防事故对策[J]. *化工进展*, 2010, 29(S2): 340 - 345. DOI: 10.16085/j.issn.1000-6613.2010.s2.029.
- QILE M G, HAN M, HU C F. Hazard analysis and accident prevention measures for fire explosion of acetylene[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2010, 29(S2): 340 - 345. DOI: 10.16085/j.issn.1000-6613.2010.s2.029.
- [9] 袁帅, 王庆慧, 王丹枫, 等. 粉尘爆炸防护措施的研究进展[J]. *爆破器材*, 2017, 46(04): 13 - 20. DOI: 10.3969/j.issn.1001-8352.2017.04.003.
- YUAN S, WANG Q H, WANG D F, et al. Research Progress of Preventive and Control Measures for Dust Explosion[J]. *Explosive Materials*, 2017, 46(04): 13 - 20. DOI: 10.3969/j.issn.1001-8352.2017.04.003.
- [10] DUBANIEWICZ T H, DUCARME J P. Internal short circuit and accelerated rate calorimetry tests of lithium-ion cells: Considerations for methane-air intrinsic safety and explosion proof/flameproof protection methods[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2016, 43: 575 - 584. DOI: 10.1016/j.jlp.2016.07.027.
- [11] PAN R, CUI B, ZHANG X, et al. Study on pressure wave response and overpressure attenuation law of explosion-proof doors[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2023, 169: 706 - 717. DOI: 10.1016/j.psep.2022.11.032.
- [12] 陈记合, 时训先, 孟祥豹, 等. 典型金属粉尘燃爆抑制技术研究现状[J]. *中国安全生产科学技术*, 2023, 19(S2): 159 - 165. DOI: 10.11731/j.issn.1673-193x.2023.S2.025.
- CHEN J H, SHI X X, MENG X B, et al. Research Progress of Preventive and Control Measures for Dust Explosion[J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2023, 19(S2): 159 - 165. DOI: 10.11731/j.issn.1673-193x.2023.S2.025.
- [13] 纪文涛, 张国涛, 杨帅帅, 等. 惰性粉体抑制瓦斯/煤尘复合爆炸特性及机理研究[J]. *煤炭科学技术*, 2024, 52(11):

- 337 - 345. DOI: 10.12438/cst.2023-1411.
- JI W T, ZHANG G T, YANG S S, et al. Study on the characteristics and mechanism of inert powder inhibition of gas/coal dust compound explosion[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(11): 337 - 345. DOI: 10.12438/cst.2023-1411.
- [14] 蔡冲冲, 苏洋, 王燕. 富氢甲烷的爆燃特性与爆炸抑制研究进展[J]. 爆炸与冲击, 2024, 44(07): 14 - 37. DOI: 10.11883/bzyej-2023-0330.
- CAI C C, SU Y, WANG Y. Research progress on the deflagration characteristics and explosion suppression of hydrogen-rich methane[J]. Explosion and Shock Waves, 2024, 44(07): 14 - 37. DOI: 10.11883/bzyej-2023-0330.
- [15] 杨克, 王跃胜, 邢志祥, 等. 不同复配比SiO₂/七氟丙烷抑爆剂对甲烷/空气爆炸特性的影响[J]. 消防科学与技术, 2023, 42(04): 443 - 448.
- YANG K, WANG Y S, XING Z X, et al. Influence of SiO₂/HFC-227ea explosion suppressor with different complex ratio on methane/air explosion characteristic[J]. Fire Science and Technology, 2023, 42(04): 443 - 448.
- [16] CAO X Y, LU Y W, JIANG J C, et al. Experimental study on explosion inhibition by heptafluoropropane and its synergy with inert gas[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2021, 71: 104440. DOI: 10.1016/J.JLP.2021.104440.
- [17] XIAO F, REN J J, PU M Z, et al. Suppression effect of ultra-fine water mist on methane-coal dust hybrid explosion[J]. Powder Technology, 2022, 406: 117590. DOI: 10.1016/j.powtec.2022.117590.
- [18] JIANG H P, BI M S, HUANG L, et al. Suppression mechanism of ultrafine water mist containing phosphorus compounds in methane/coal dust explosions[J]. Energy, 2022, 239: 121987. DOI: 10.1016/J.ENERGY.2021.121987.
- [19] ZHENG L G, WANG Y L, YU S J, et al. The premixed methane/air explosion inhibited by sodium bicarbonate with different particle size distributions[J]. Powder Technology, 2019, 354: 630 - 640. DOI: 10.1016/j.powtec.2019.06.034.
- [20] LU K L, JIANG B Y, XIAO Y, et al. Experimental investigation on the suppression of aluminum dust explosion by sodium carbonate powder[J]. Process safety and environmental protection, 2024, 183: 568 - 579. DOI: 10.1016/J.PSEP.2024.01.034.
- [21] WANG Y, LIN C, QI Y, et al. Suppression of polyethylene dust explosion by sodium bicarbonate[J]. Powder Technology, 2020, 367: 206 - 212. DOI: 10.1016/j.powtec.2020.03.049.
- [22] ZHOU J, JIANG H, ZHOU Y, et al. Flame suppression of 100 nm PMMA dust explosion by KHCO₃ with different particle size[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2019, 132: 303 - 312. DOI: 10.1016/j.psep.2019.10.027.
- [23] 王信群, 孔丽丽, 徐海顺, 等. 超细粉体云幕抑制大型管道内瓦斯爆炸火焰传播[J]. 煤炭学报, 2017, 42(06): 1482 - 1488. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2017.0040.
- WANG X Q, KONG L L, XU H S, et al. Suppression of methane/air flame propagation in large scale pipelines by clouds of ultrafine powders[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(06): 1482 - 1488. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2017.0040.
- [24] 余明高, 王天政, 游浩. 粉体材料热特性对瓦斯抑爆效果影响的研究[J]. 煤炭学报, 2012, 37(05): 830 - 835. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2012.05.025.
- YU M G, WANG T Z, YOU H. Study on gas explosion suppression influence of thermal properties of powder[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 37(05): 830 - 835. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2012.05.025.
- [25] 郑立刚, 王亚磊, 于水军, 等. NaHCO₃抑制瓦斯爆炸火焰与压力的耦合分析[J]. 化工学报, 2018, 69(09): 4129 - 4136. DOI: 10.11949/j.issn.0438-1157.20180433.
- ZHENG L G, WANG Y L, YU W J, et al. Coupled relationship between flame and overpressure of gas explosion inhibited by NaHCO₃[J]. CIESC Journal, 2018, 69(09): 4129 - 4136. DOI: 10.11949/j.issn.0438-1157.20180433.
- [26] 王燕, 杨帅帅, 张国涛, 等. 改性沸石抑制乙烯爆炸性能及机理研究[J]. 化工学报, 2023, 74(12): 5048 - 5060. DOI: 10.11949/0438-1157.20231063.
- WANG Y, YANG S S, ZHANG G T, et al. Explosion suppression characteristics and mechanism of ethylene by modified zeolite[J]. CIESC Journal, 2023, 74(12): 5048 - 5060. DOI: 10.11949/0438-1157.20231063.

- [27] 王文涛. 不同约束条件下乙炔/空气预混气体的燃爆机理研究[D]. 安徽理工大学, 2022. DOI:10.26918/d.cnki.ghngc.2022.000326.
- WANG W T. Study on the Deflagration Mechanism of Acetylene/air Premixed Gas Under Different Constraints[D]. Anhui University of Science and Technology, 2022. DOI: 10.26918/d.cnki.ghngc.2022.000326.
- [28] 高凯. 乙炔气体燃爆特性实验研究[D]. 南京理工大学, 2021. DOI: 10.27241/d.cnki.gnjgu.2021.001515.
- GAO K. Experimental Study on the Combustion and Explosion Characteristics of Acetylene Gas[D]. Nanjing University of Science and Technology, 2021. DOI: 10.27241/d.cnki.gnjgu.2021.001515.
- [29] 夏煜, 程扬帆, 胡芳芳, 等. 典型固体抑爆剂对乙炔-空气的抑爆特性[J]. 高压物理学报, 2022, 36(6): 171 - 179. DOI: 10.11858/gywlb.20220580.
- XIA Y, CHENG Y F, HU F F, et al. Inhibition Characteristics of Typical Solid Explosion Suppressors on Acetylene-Air Explosion[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2022, 36(6): 171 - 179. DOI: 10.11858/gywlb.20220580.
- [30] 郭璐, 徐徽, 朱云峰, 等. 杂质对乙炔气体分解爆炸的影响研究[J]. 现代化工, 2019, 39(S1): 153 - 157. DOI: 10.16606/j.cnki.issn 0253-4320.2019.S.034.
- GUO L, XU H, ZHU Y F, et al. Study on influence of impurities on decomposition and explosion of acetylene gas[J]. Modern Chemical Industry, 2019, 39(S1): 153 - 157. DOI: 10.16606/j.cnki.issn 0253-4320.2019.S.034.
- [31] 张薇, 谢洪勇. 丙烷不完全燃烧法制备优质炭黑的研究[J]. 中国粉体技术, 2004(02): 11 - 14. DOI:10.13732/j.isn.1008-5548.2004.02.005.
- ZHANG H, XIE H Y. Research of High Qualified Carbon Black Prepared by Incomplete Combustion of Propane[J]. China Powder Science and Technology, 2004(02): 11 - 14. DOI: 10.13732/j.isn.1008-5548.2004.02.005.
- [32] 李剑, 蒲舸, 陈家善, 等. 常见钠盐的高温挥发特性及热解机理[J]. 化工学报, 2020, 71(8): 3452 - 3459. DOI: 10.11949/0438-1157.20200061.
- Li J, Pu G, Chen J S, et al. High-temperature volatilization characteristics and pyrolysis mechanism of common sodium salts[J]. CIESC Journal, 2020, 71(8): 3452 - 3459. DOI: 10.11949/0438-1157.20200061.
- [33] 夏煜, 程扬帆, 胡芳芳, 等. 典型固体抑爆剂对乙炔-空气的抑爆特性[J]. 高压物理学报, 2022, 36(6): 173 - 181. DOI: 10.11858/gywlb.20220580.
- XIA Y, CHENG Y F, HU F F, et al. Inhibition characteristics of typical solid suppressants on acetylene-air explosions[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2022, 36(6): 173 - 181. DOI: 10.11858/gywlb.20220580.
- [34] 纪文涛, 徐子晖, 毛文哲, 等. 碳酸氢盐抑制乙烯/聚乙烯两相爆炸特性研究[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(8): 138- 146. DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2024.08.1669.
- JI W T, XU Z H, MA W Z, et al. Study on two-phase explosion suppression characteristics of ethylene/polyethylene by bicarbonate[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(8): 138-146. DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2024.08.1669.