

碳酸氢盐抑制豆粕粉尘爆炸特性实验研究

许加玲, 许开立, 刘 博

(东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 为探究碳酸氢盐对豆粕粉尘爆炸的抑爆特性, 选取 NaHCO_3 , KHCO_3 , NH_4HCO_3 3种碳酸氢盐作为抑爆粉体, 用最大爆炸压力 P_{ex} 、最大爆炸压力上升速率 $(dP/dt)_{\text{ex}}$ 和爆炸指数 K_{st} 等参数分析了碳酸氢盐对豆粕粉尘爆炸的抑制效果. 结果表明, 质量浓度为 400 g/m^3 的豆粕粉尘爆炸特性参数最高, 最大爆炸压力为 0.763 MPa , 最大爆炸压力上升速率为 24.8 MPa/s , 爆炸指数为 $6.7 \text{ MPa}\cdot\text{m/s}$. 随着碳酸氢盐粉末质量分数的增加, 爆炸特性参数呈现下降趋势, 且抑制效果不断增强. 同一条件下, 抑爆性能 $\text{NH}_4\text{HCO}_3 > \text{KHCO}_3 > \text{NaHCO}_3$. 结合抑爆粉体热重分析及红外光谱分析, 探究了3种抑爆粉体的抑爆机理及不同离子导致的差异性原因.

关键词: 粉尘爆炸; 爆炸参数; 碳酸氢盐; 抑制机理; 热重分析

中图分类号: X 932

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2024)12-1798-07

Experimental Study on the Characteristics of Bicarbonate Inhibiting Soybean Meal Dust Explosion

XU Jia-ling, XU Kai-li, LIU Bo

(School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: XU Kai-li, professor, E-mail: kaili_xu@aliyun.com)

Abstract: To investigate the explosion suppression characteristics of bicarbonate on soybean meal dust explosion, NaHCO_3 , KHCO_3 , and NH_4HCO_3 bicarbonate were selected as explosion suppression powders. The inhibitory effect of bicarbonate on soybean meal dust explosion was analyzed from parameters such as maximum explosion pressure P_{ex} , maximum explosion pressure rise rate $(dP/dt)_{\text{ex}}$, and explosion index K_{st} . The results showed that the explosion characteristic parameters of soybean meal dust with a mass concentration of 400 g/m^3 were the highest, with a maximum explosion pressure of 0.763 MPa , a maximum explosion pressure rise rate of 24.8 MPa/s , and an explosion index of $6.7 \text{ MPa}\cdot\text{m/s}$. As the mass fraction of bicarbonate powder increased, the explosion characteristic parameters showed a decreasing trend, and the inhibitory effect continued to increase. Under the same conditions, the explosion suppression performance of $\text{NH}_4\text{HCO}_3 > \text{KHCO}_3 > \text{NaHCO}_3$. Combined with thermogravimetric analysis and infrared spectroscopy analysis of explosion suppression powders, the explosion suppression mechanisms of three types of powders and the differences caused by different ions were explored.

Key words: dust explosion; explosion parameters; bicarbonate; inhibition mechanism; thermogravimetric analysis

随着经济水平的日益提高与食用油脂需求量的不断攀升, 以大豆为主要原料的加工工厂发展迅猛. 目前大豆浸出厂大多采用热脱皮浸出工艺, 在生产过程中粗豆粕需经过粉碎等工序以及豆皮和豆粕的混合等, 容易产生较高浓度豆粕粉

尘云. 由粉尘引起的爆炸安全事故频发^[1-3], 抑制粉尘爆炸的技术措施已成为相关企业安全生产的重要条件^[4-5]. 因此, 研究豆粕粉尘抑爆技术具有重要意义.

国内外学者针对粉尘抑爆技术进行了大量

研究.鲁昆仑等^[6]采用 20 L 球形爆炸装置测试玉米淀粉在添加不同抑制比 NaHCO_3 及其固态分解产物 Na_2CO_3 后爆炸参数变化规律,表明爆炸特性参数随质量分数增加而降低. Jiang 等^[7-8]通过实验对比了碳酸氢钠和磷酸二氢铵对生物质粉尘爆炸的抑制效果,得出碳酸氢钠对生物质粉尘爆炸的抑制更加有效的结论. Chen 等^[9]研究表明添加惰性粉尘可以降低火焰传播过程中预热区的厚度、火焰传播速度和火焰温度. Wang 等^[10]得出固体抑爆剂清洁高效、对环境毒性低、成本低廉且易于长期储存,应用最为广泛. Eckhoff^[11-12]从微观角度研究了纳米级粉尘发生爆炸的作用机理. Xiang 等^[13]对爆炸抑制性粉末及铝粉进行火焰抑制和超压抑制实验,建立了惰性粉末对铝粉爆炸火焰的作用模型. Cheng 等^[14]利用煤尘的本质安全参数,研究了火电厂环境的火灾和爆炸危险性.

本文选取 NaHCO_3 , KHCO_3 , NH_4HCO_3 3 种碳酸氢盐作为抑爆粉体,采用实验与理论分析相结合的方法研究不同质量浓度抑爆粉体对豆粕粉尘爆炸的抑制性能,并结合抑爆粉体的理化性质,分析抑爆机理,为豆粕粉尘抑爆以及食用油脂加工的安全提供技术支撑.

1 实验装置与材料

1.1 实验装置

实验装置选取国际通用的粉尘爆炸性参数测试装置,是由北京博伊尔科技发展有限公司生产的 20 L 球型爆炸测试装置 (BYR-Z01),主要由爆炸罐、点火系统、粉尘分散系统、数据采集系统等构成,装置示意图如图 1 所示. 本文实验采用 10 kJ 化学点火头点火,点火延迟时间为 60 ms.

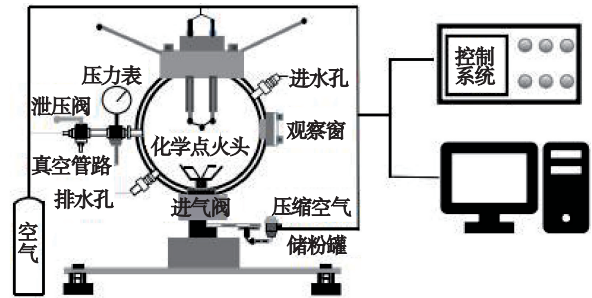


图 1 球形爆炸实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of spherical explosion experimental device

1.2 实验材料

本实验所用豆粕粉体和 3 种抑爆粉体均为分析纯试剂. 豆粕粉体由河北省石家庄市某生化公司提供,3 种抑爆粉体均购于天津市致远化学试剂有限公司. 实验前利用磨粉机将豆粕粉体磨碎,放入恒温干燥箱中,60 °C 下连续干燥 8 h,以去除粉尘中的水分.

利用激光粒度分析仪测试 4 种粉体粒径分布,图 2 为豆粕粉体的粒径分布图,中值粒径 (D_{50}) 为 23.197 μm . 图 3 为 NaHCO_3 , KHCO_3 , NH_4HCO_3 的粒径分布图, NaHCO_3 , KHCO_3 , NH_4HCO_3 的中值粒径 (D_{50}) 分别为 77.039, 79.355, 86.365 μm .

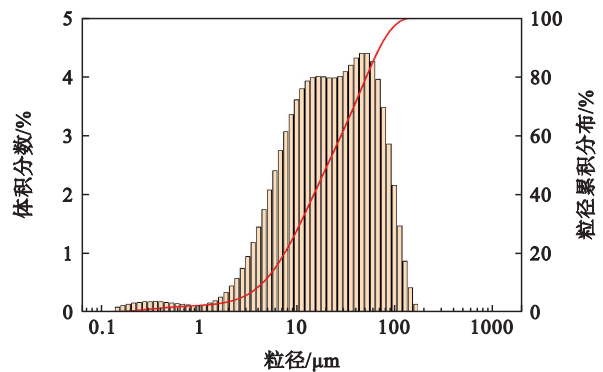


图 2 豆粕粉体的粒径分布

Fig. 2 Particle size distribution of soybean meal dust

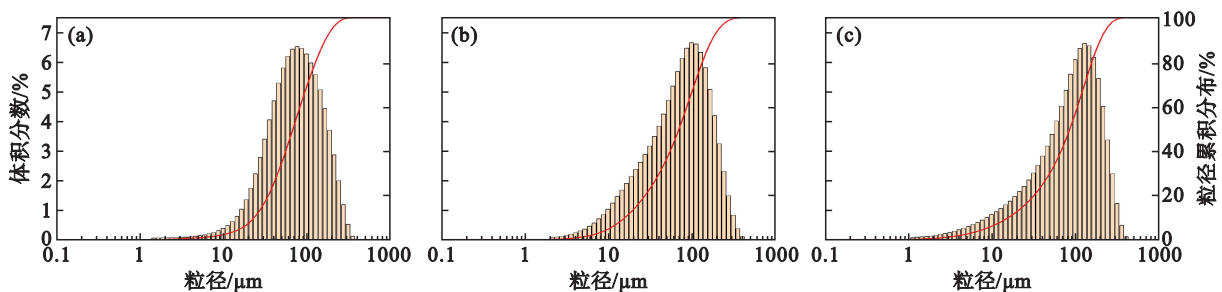


图 3 抑爆粉体的粒径分布

Fig. 3 Particle size distribution of explosive suppression powders

(a)— NaHCO_3 ; (b)— KHCO_3 ; (c)— NH_4HCO_3 .

2 结果与讨论

2.1 豆粕粉尘爆炸特性研究

实验确定豆粕粉尘质量浓度分别为 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800 g/m^3 , 利用 20 L 球型爆炸实验装置对 7 种不同质量浓度的豆粕粉尘进行参数测定, 爆炸特性参数测定值如图 4 所示, 爆炸指数变化如图 5 所示。

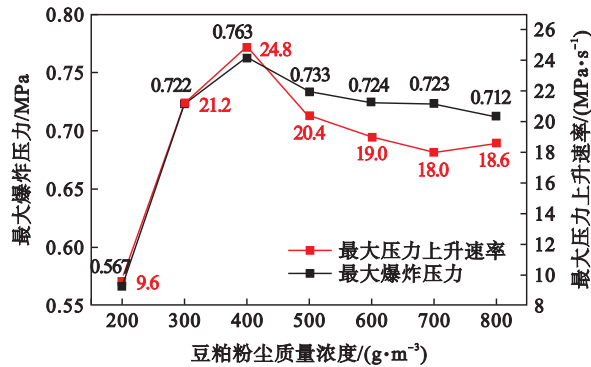


图4 豆粕粉尘的最大爆炸压力及最大爆炸压力上升速率
Fig. 4 The maximum explosion pressure and maximum explosion of soybean meal dust

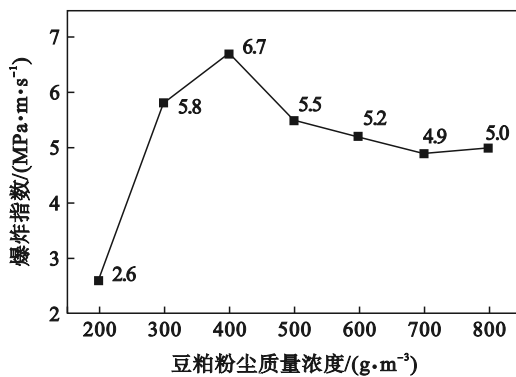


图5 豆粕粉尘的爆炸指数
Fig. 5 Explosion index of soybean meal dust

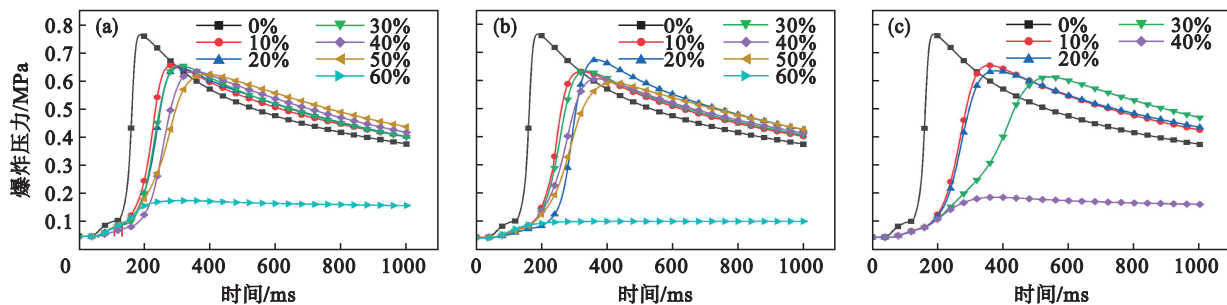


图6 添加不同质量分数抑爆粉体的混合粉尘爆炸压力-时间进程图

Fig. 6 Explosion pressure time diagram of mix dust with different mass fraction of explosion suppression powders
(a)— NaHCO_3 ; (b)— KHCO_3 ; (c)— NH_4HCO_3 .

根据参数测定值可知,随着质量浓度的增加,豆粕粉尘的最大爆炸压力及最大爆炸压力上升速率均呈现急速上升到达最高值,随后平缓下降。

豆粕粉尘爆炸特性参数测定值中,当质量浓度为 $400 \text{ g}/\text{m}^3$ 时最大爆炸压力和最大爆炸压力上升速率值最高,分别为 0.763 MPa 和 $24.8 \text{ MPa}/\text{s}$, 爆炸指数为 $6.7 \text{ MPa}\cdot\text{m}/\text{s}$. 因此,抑爆实验中选择质量浓度为 $400 \text{ g}/\text{m}^3$ 的豆粕粉尘,改变 3 种碳酸氢盐抑爆粉体与豆粕粉尘比例,测定不同配比下混合粉尘的爆炸特性参数。

2.2 碳酸氢盐对豆粕粉尘的抑爆效果分析

在抑制实验中,豆粕粉尘质量浓度为 $400 \text{ g}/\text{m}^3$, 选取 NaHCO_3 , KHCO_3 , NH_4HCO_3 作为抑爆粉体,研究不同质量分数抑爆粉体对豆粕粉尘爆炸抑制效果。

在空气预混气爆炸条件下,将抑爆粉体质量分数分别设为 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60% 进行抑爆粉体-豆粕混合粉体实验。

添加不同质量分数抑爆粉体的混合粉尘爆炸压力曲线如图 6 所示。

从图 6a, 6b 可知,随着抑爆粉体质量分数的增加,爆炸压力峰值明显下降,爆炸曲线斜率明显变小. 如图 7 所示,当 NaHCO_3 和 KHCO_3 质量分数为 60% 时,最大爆炸压力降低到 0.171 和 0.1 MPa ; 最大压力上升速率降低到 1.4 和 $1.1 \text{ MPa}/\text{s}$; 最大爆炸指数降低到 0.4 和 $0.3 \text{ MPa}\cdot\text{m}/\text{s}$, 此时豆粕粉尘已被完全惰化抑制爆炸。

从图 6c 可知,当添加 40% NH_4HCO_3 时,最大爆炸压力降低到 0.185 MPa , 降低了 75.7%; 最大爆炸压力上升速率降低到 $1.2 \text{ MPa}/\text{s}$, 降低了 95.1%; 爆炸指数降低到 $0.3 \text{ MPa}\cdot\text{m}/\text{s}$, 降低了 95.52%, 此时豆粕粉尘可以完全被抑制爆炸, 即 3 种碳酸氢盐抑爆粉体对豆粕粉尘最大爆炸压力和最大爆炸压力上升速率均具有显著抑制效果。

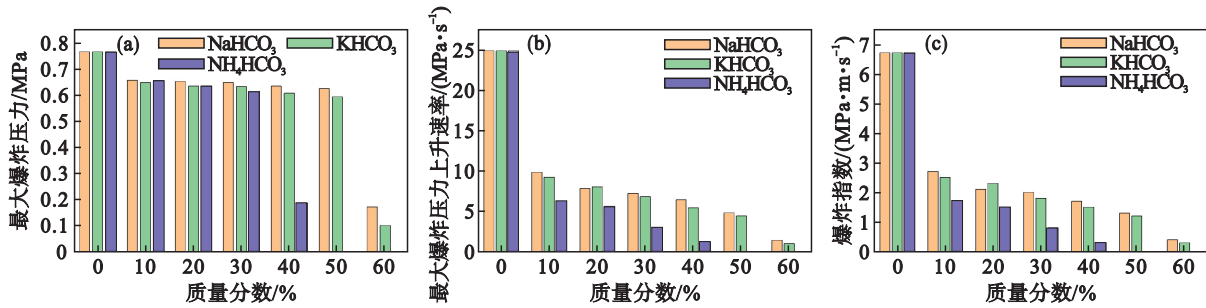


图 7 添加不同质量分数抑爆粉体的爆炸特性参数对比

Fig. 7 Comparison of explosion characteristic parameters of mixed dust with different mass fractions of explosion suppression powders

(a)—最大爆炸压力; (b)—最大爆炸压力上升速率; (c)—爆炸指数.

实验结果分析表明,当添加 60%NaHCO₃ 和 KHCO₃ 时,豆粕粉尘爆炸性被完全抑制.而仅添加 40%NH₄HCO₃ 就已经达到抑制效果,即 NH₄HCO₃ 抑爆性能比 NaHCO₃ 和 KHCO₃ 强.

NaHCO₃ 与 KHCO₃ 的抑制效果相仿,但通过对比图 8,图 9 随质量分数增加,NaHCO₃ 与 KHCO₃ 分别达到最大爆炸压力及最大爆炸压力上升速率时间可知,添加 KHCO₃ 比添加 NaHCO₃ 拖延爆炸时间.当添加 60%NaHCO₃,达到最大爆炸压力时间从 189.2 ms 延长到 297.8 ms; 添加 60% KHCO₃,达到最大爆炸压力时间从 189.2 ms 延长到 475.6 ms,即 KHCO₃ 抑制效果比 NaHCO₃ 强.

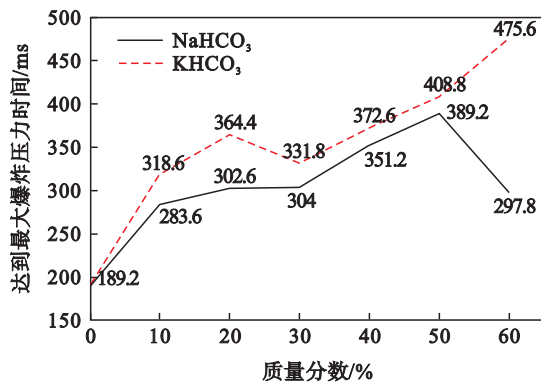


图 8 添加不同质量分数抑爆粉体达到最大爆炸压力时间

Fig. 8 Time to reach maximum explosion pressure by adding different mass fractions of explosive suppression powders

3 抑爆粉体的作用机理

以上实验结果表明,不同抑爆粉体对豆粕粉尘均有抑制作用且抑爆特性存在显著差异^[15].为研究 3 种抑爆粉体的抑爆机理,对豆粕粉尘、抑爆粉体及豆粕粉尘与抑爆粉体混合物分别进行热

重分析.实验设定豆粕粉尘样品和抑爆粉体样品质量为 10 mg,混合样品质量为 10 mg,质量比为 1:1,升温速率为 10 °C/min.抑爆粉体对豆粕粉尘爆炸的抑制机理可以从物理抑制和化学抑制作用结合的角度进行分析.

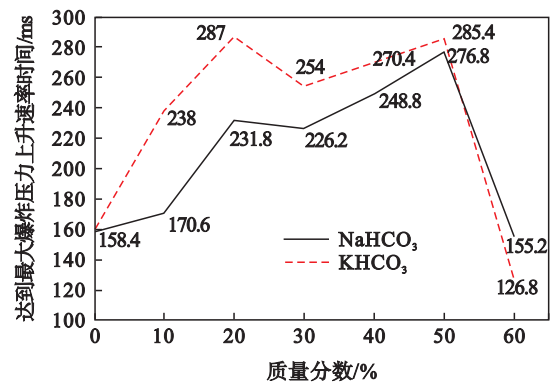


图 9 添加不同质量分数抑爆粉体达到最大爆炸压力上升速率时间

Fig. 9 Time to achieve maximum explosion pressure rise rate by adding different mass fractions of explosive suppression powders

3.1 物理抑制作用

图 10 所示为豆粕粉尘的 TG(热重分析)、DTG(导数热重)和 DSC(差热)曲线图,其反映了热分解特性,从 DTG 曲线中可以直观地看出热解时的最大热失重速率温度^[16].

从图 10 曲线可以看出,豆粕粉尘从 204.878 °C 开始分解,失重率在 307.533 °C 达到最大值.结合 DSC 曲线可知,204 °C 以后,DSC 曲线逐渐上升,表明温度升高,豆粕热解的放热量逐渐增加,在 405.923 °C 时有放热峰值,即豆粕粉尘热解是放热反应.

从图 11 抑爆粉体的热分解特性图分析可知,NaHCO₃,KHCO₃,NH₄HCO₃ 均有一个质量损失过

程,在 115.344~174.436 °C, 158.931~231.872 °C 和 77.874~153.329 °C 范围内,分析表明其都能在较低温度下迅速完成热解,会分解产生 CO₂ 与 H₂O,降低氧气浓度,从而达到物理抑制效果. NH₄HCO₃ 起始分解温度较低,快速分解并且吸收反应过程中所产生的热量,使得抑制效率提高. 此外,抑爆粉体在质量损失阶段均存在吸热峰,即热解过程均为吸热过程.

图 12 为不同抑爆粉体与豆粕粉尘混合后的热重曲线,由图 12 可知,加入抑爆粉体后豆粕粉尘起始分解温度变高,分解速度显著缓慢,当温度上升到 800 °C 时反应物还存在未分解部分.

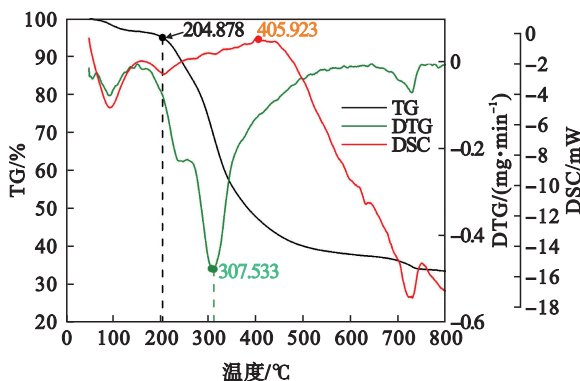


图 10 豆粕粉尘的 TG-DTG-DSC 曲线

Fig. 10 TG-DTG-DSC curves of soybean meal dust

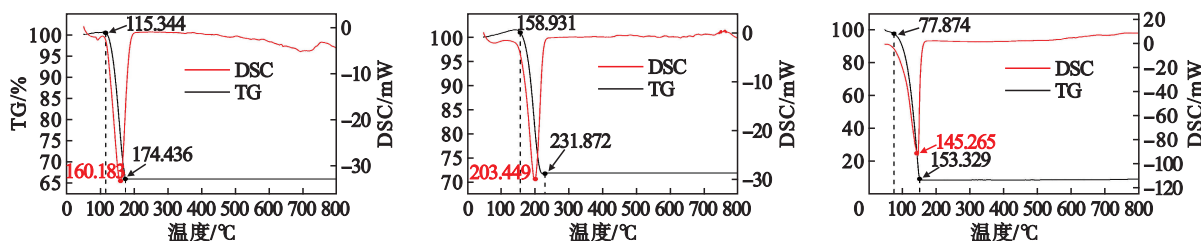


图 11 3 种抑爆粉体的热分解特性

Fig. 11 Thermal decomposition characteristics of three explosion suppression powders

(a)—NaHCO₃; (b)—KHCO₃; (c)—NH₄HCO₃.

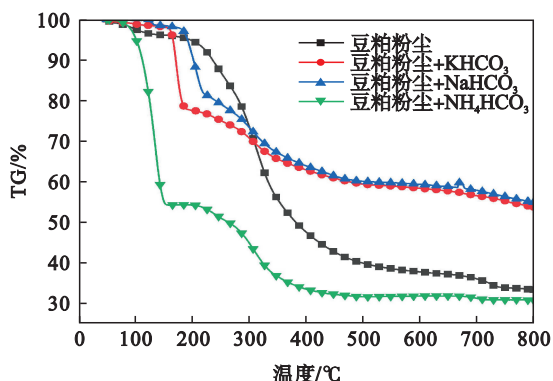


图 12 混合粉尘的 TG 曲线

Fig. 12 TG curves of mixed dust

3.2 化学抑制作用

图 13 为豆粕粉尘红外光谱图.由图 13 可知豆粕粉尘的特征峰出现在 3 010 cm⁻¹ (—CH₂—), 2 250 cm⁻¹ (O=C=O), 1 600 cm⁻¹ (—C=O), 1 490 cm⁻¹ (C—O—C), 1 200 cm⁻¹ (—C—C—), 888 cm⁻¹ (—CH₂—), 反应分解过程中会生成 OH·, O·, H· 等活性自由基, 自由基与豆粕粉尘颗粒发生碰撞并且相互反应, 进而造成粉尘爆炸.

图 14 为 3 种碳酸氢盐红外光谱图. NaHCO₃ 的特征峰出现在 2 180 cm⁻¹ (O=C=O), 1 880 cm⁻¹ (水分子), 1 570 cm⁻¹ (C=O), 1 130 cm⁻¹ (C—O), 917 和 760 cm⁻¹ 是 CO₃²⁻ 的弯曲振动吸收峰.

KHCO₃ 的特征峰出现在 2 220 cm⁻¹ (O=C=O), 1 510 cm⁻¹ (C=O), 1 130 cm⁻¹ (C—O), 898 和 734 cm⁻¹ 是 CO₃²⁻ 的弯曲振动吸收峰. 根据 NH₄HCO₃ 红外吸收光谱表明在 3 250 cm⁻¹ 强吸收峰为 NH₄⁺ 基团的伸缩与弯曲振动, 2 700 和 2 210 cm⁻¹ 等吸收峰为 HCO₃²⁻ 基团的伸缩与弯曲振动.

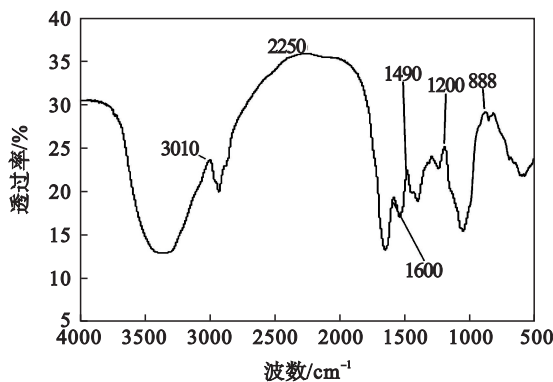


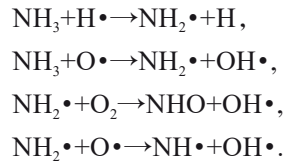
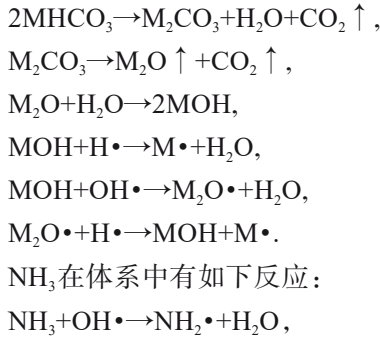
图 13 豆粕粉尘傅里叶变换红外光谱图

Fig. 13 FTIR spectra of soybean meal dust

热解过程中会产生大量活性自由基^[17], 它们会消耗延长爆炸反应过程中传播的氧并且与豆粕粉尘爆炸反应产生的高活性自由基 H·, OH· 等相互作用, 抑爆原理如图 15 所示, 有效降低自

由基浓度,从而导致爆炸强度降低,关键反应如下.

MHCO₃高温下发生的分解反应方程式(M表示Na或K):



上述抑爆粉体高温分解反应表明,热解生成的活性自由基与豆粕粉尘爆炸分解生成的高活性自由基H·,OH·会相互反应,进而发挥抑爆作用^[18].氨和氨基自由基的中间物质活跃地存在,消耗氧和其他自由基(OH·,O·,H·).这些中间反应物和产物由于其相对不稳定而以低浓度存在,消耗自由基的中间反应争夺氧气,但对提高化学抑制效率至关重要.

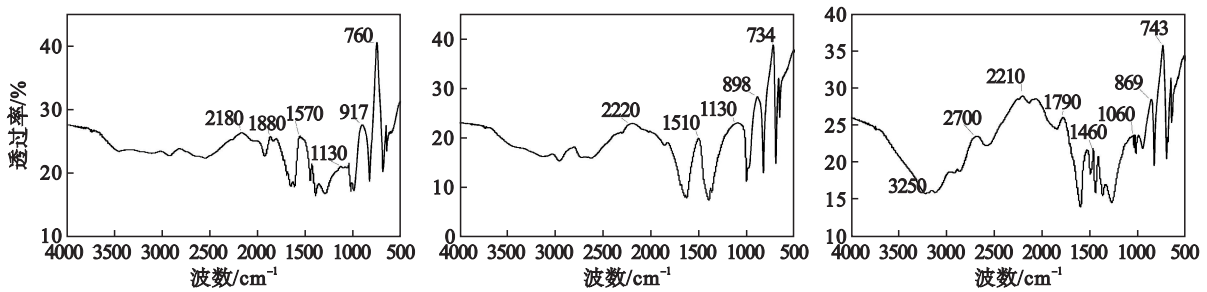


图 14 傅里叶变换红外光谱图

Fig. 14 FTIR spectra of three explosion suppression powders (a)—NaHCO₃; (b)—KHCO₃; (c)—NH₄HCO₃.

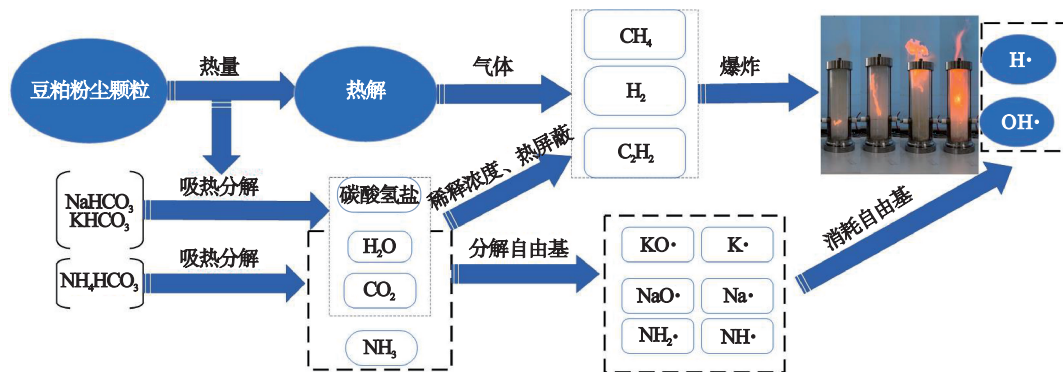


图 15 抑爆粉体抑爆原理图

Fig. 15 Schematic diagram of explosion suppression powders

4 结 论

1) 豆粕粉尘的爆炸特性参数随着质量浓度增加呈现急速上升到达最高值随后平缓下降的趋向.当质量浓度为 400 g/m³时反应最剧烈,最大爆炸压力和最大爆炸压力上升速率值最高,分别为 0.763 MPa 和 24.8 MPa/s,爆炸指数为 6.7 MPa·m/s.

2) 随着抑爆粉体质量分数的增加,测定的爆

炸特性参数均不断下降,趋势明显,削弱了豆粕粉尘的爆炸强度,抑爆性能为 NH₄HCO₃>KHCO₃>NaHCO₃.

3) 碳酸氢盐抑爆粉体抑制豆粕粉尘爆炸的作用机理可分为物理抑制作用和化学抑制作用.物理抑制作用表现在抑爆粉体的加入,可以吸收反应的热量,稀释爆炸过程中的氧浓度,并隔绝粉尘与氧气的接触.化学抑制作用表现在生成的分解产物消耗了反应过程中产生的 OH·和 H·,减缓了爆炸链反应.

参考文献:

- [1] 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(8): 76–83.
(Chen Gang, Zhang Xiao-lei, Xu Shuai, et al. Statistical analysis on dust explosion accidents occurring in China during 2005—2022 [J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2022, 32(8): 76–83.)
- [2] 覃小玲, 李晓泉. 粮食粉尘爆炸事故统计分析[J]. 工业安全与环保, 2020, 46(5): 78–82.
(Tan Xiao-ling, Li Xiao-quan. Statistical analysis of grain dust explosion accidents[J]. *Industrial Safety and Environmental Protection*, 2020, 46(5): 78–82.)
- [3] Wei M C, Cheng Y C, Lin Y Y, et al. Applications of dust explosion hazard and disaster prevention technology [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2020, 68: 61–73.
- [4] Wang Y, Lin C D, Qi Y Q, et al. Suppression of polyethylene dust explosion by sodium bicarbonate [J]. *Powder Technology*, 2020, 367: 206–212.
- [5] Yan X Q, Yu J L. Dust explosion incidents in China [J]. *Process Safety Progress*, 2012, 31(2): 187–189.
- [6] 鲁昆仑, 陈晓坤, 王媛媛, 等. 碳酸氢钠及其固态分解产物对玉米淀粉爆炸抑制实验研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2021, 17(9): 126–131.
(Lu Kun-lun, Chen Xiao-kun, Wang Yuan-yuan, et al. Experimental study on inhibition of sodium bicarbonate and its solid decomposition products on explosion of corn starch [J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2021, 17(9): 126–131.)
- [7] Jiang H P, Bi M S, Peng Q K, et al. Suppression of pulverized biomass dust explosion by NaHCO_3 and $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ [J]. *Renewable Energy*, 2020, 147: 2046–2055.
- [8] Jiang H P, Bi M S, Li B, et al. Flame inhibition of aluminum dust explosion by NaHCO_3 and $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ [J]. *Combustion and Flame*, 2019, 200: 97–114.
- [9] Chen X F, Zhang H M, Chen X, et al. Effect of dust explosion suppression by sodium bicarbonate with different granulometric distribution [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2017, 49: 905–911.
- [10] Wang Z, Meng X B, Yan K, et al. Study on the inhibition of Al–Mg alloy dust explosion by modified $\text{Mg}(\text{OH})_2$ [J]. *Powder Technology*, 2021, 384: 284–296.
- [11] Eckhoff R K. Does the dust explosion risk increase when moving from μm -particle powders to powders of nm-particles? [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2012, 25: 448–459.
- [12] 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: 223–230.
- [13] Xiang B M, Ke Y, Zhi C P, et al. Study on mechanism and dynamics of inert powder explosion inhibitor inhibiting aluminum powder explosion [J]. *Advanced Powder Technology*, 2022, 11: 103773.
- [14] Cheng Y C, Huang H C, Luo J W, et al. Evaluation of the dust potential hazard of thermal power plants through coal dust combustion and explosion characteristics [J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2021, 144(2): 575–585.
- [15] Han O S, Lee J S. Pyrolysis characteristic and ignition energy of high-density polyethylene powder [J]. *Journal of The Korean Institute of Gas*, 2014, 18(3): 31–37.
- [16] Reding N S, Shiflett M B. Characterization of thermal stability and heat absorption for suppressant Agent/Combustible dust mixtures via thermogravimetric Analysis/Differential scanning calorimetry [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2019, 58(11): 4674–4687.
- [17] Zhao Q, Chen X F, Dai H M, et al. Inhibition of diammonium phosphate on the wheat dust explosion [J]. *Powder Technology*, 2020, 367: 751–761.
- [18] 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(2): 613–620.