

中文引用格式: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.

英文引用格式:JI Wentao, XU Zihui, MAO Wenzhe, et al. Investigation on inhibition characteristics of bicarbonate on hybrid explosion of ethylene/polyethylene mixture[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(8): 138-146.

碳酸氢盐抑制乙烯/聚乙烯两相爆炸特性研究*

纪文涛^{1,2,3}副教授, 徐子晖^{1,2,3}, 毛文哲^{1,2,3}, 杨帅帅^{1,2,3},
张国涛^{1,2,3}, 王燕^{**1,2,3}教授

(1 河南理工大学 安全科学与工程学院, 河南 焦作 454003; 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 454003; 3 煤炭安全生产与清洁利用省部共建
协同创新中心, 河南 焦作 454003)

中图分类号: X937

文献标志码: A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2024.08.1669

基金项目: 国家自然科学基金资助(52374197); 国家重点研发计划(2022YFC3080700); 河南省优秀青年科学基金资助(212300410042)。

【摘要】 为防治乙烯/聚乙烯两相体系爆炸危害, 选取碳酸氢盐作为抑爆粉体, 在 20 L 球型爆炸装置内开展抑爆试验, 探究不同碳酸氢盐对乙烯/聚乙烯两相体系的爆炸抑制效果及机制, 并讨论不同碳酸氢盐对两相体系爆炸抑制性能之间的差异性。结果表明: 两相体系较单相聚乙烯更难抑制, 且随着乙烯体积分数的增加, 两相体系爆炸抑制难度增大; 碳酸氢盐对不同质量浓度的乙烯/聚乙烯两相体系均具有抑制作用, 其抑制效率受乙烯体积分数和碳酸氢盐质量浓度的综合影响; 碳酸氢盐均能在聚乙烯爆炸过程中通过物化反应抑制乙烯/聚乙烯两相爆炸, 碳酸氢钾的分解吸热性能及其对聚乙烯热解的延缓作用均优于碳酸氢钠, 故碳酸氢钾对乙烯/聚乙烯两相体系爆炸的抑制效果优于碳酸氢钠。

【关键词】 碳酸氢盐; 乙烯; 聚乙烯; 两相体系; 抑爆特性

Investigation on inhibition characteristics of bicarbonate on hybrid explosion of ethylene/polyethylene mixture

JI Wentao^{1,2,3}, XU Zihui^{1,2,3}, MAO Wenzhe^{1,2,3}, YANG Shuaishuai^{1,2,3},
ZHANG Guotao^{1,2,3}, WANG Yan^{1,2,3}

(1 College of Safety Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo Henan 454003, China; 2 Explosion Dynamic Disaster Early Warning and Emergency Engineering Technology Research Center of Henan Province, Jiaozuo Henan 454003, China; 3 Collaborative Innovation Center of Coal Work Safety and Clean High Efficiency Utilization, Jiaozuo Henan 454003, China)

Abstract: In order to prevent and control the explosion hazards of ethylene/polyethylene hybrid mixture, bicarbonate was selected as the explosion suppression powder, and the explosion suppression experiment was carried out in a 20 L spherical explosion device to explore the explosion inhibition effect and mechanism of different bicarbonate on ethylene/polyethylene hybrid mixture. The differences of

* 文章编号: 1003-3033(2024)08-0138-09; 收稿日期: 2024-02-20; 修稿日期: 2024-05-12

** 通信作者: 王燕(1982—), 女, 河南周口人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事气体与粉尘爆炸防治、危化品安全等方面的研究。E-mail: yanwang@hpu.edu.cn.

explosion inhibition performance of different bicarbonate on the hybrid mixture were discussed. The results show that the hybrid mixture is more difficult to inhibit than the single-phase polyethylene. With the increase of ethylene concentration, the explosion inhibition of the hybrid mixture becomes more difficult. The bicarbonate has an inhibitory effect on the ethylene/polyethylene hybrid mixture with different concentrations, and the inhibition efficiency is affected by the concentration of ethylene and bicarbonate. Bicarbonate can inhibit the ethylene/polyethylene hybrid explosion through physicochemical reaction during the polyethylene explosion. The decomposition and endothermic properties of potassium bicarbonate and its retardation effect on polyethylene pyrolysis are better than those of sodium bicarbonate, so the inhibition effect of potassium bicarbonate on the explosion of ethylene/polyethylene hybrid mixture is better than that of sodium bicarbonate.

Keywords: bicarbonate; ethylene; polyethylene; hybrid system; explosion suppression characteristic

0 引言

聚乙烯因其较好的化学稳定性、电绝缘性和耐腐蚀性而广泛应用于工业、农业、医学等领域^[1]。聚乙烯加工生产过程中容易发生粉尘积聚,形成粉尘云^[2-3];当聚乙烯粉尘云与生产过程产生的乙烯气体形成两相体系时爆炸风险较高^[4-6]。由乙烯/聚乙烯两相体系(简称两相体系)引起的爆炸事故已经成为聚乙烯生产安全事故的主要类型之一^[7-8]。

目前已有大量关于惰性粉体抑制单相乙烯和聚乙烯爆炸的研究。WANG Yang等^[9]研究了碳酸氢盐和磷酸氢盐对乙烯的抑爆特性,发现碳酸氢盐具有更为优异的乙烯爆炸抑制性能。王燕等^[10-11]研究了沸石对乙烯的抑爆特性,并结合乙烯爆炸反应动力学机制,对沸石进行了改性处理,显著提升了沸石的抑爆性能。JIANG Bingyou等^[12]发现当聚磷酸铵和聚乙烯粉尘质量浓度比为1:1时,可完全抑制聚乙烯粉尘爆炸。ZHANG Yansong等^[13]研究了碳酸铵和碳化硅对聚乙烯粉尘爆炸火焰的抑爆特性,发现碳酸铵和碳化硅均能有效抑制聚乙烯粉尘爆炸火焰,碳酸铵抑制效果更佳。WANG Yan等^[14]指出碳酸氢钠粉体具有较强自由基销毁能力,可中断聚乙烯爆炸链式反应。但两相体系具有明显高于单相乙烯和聚乙烯的爆炸危险性和危害性^[15-16],且两相体系爆炸机制更为复杂^[17-18],更难被抑制。

目前关于惰性粉体对两相体系的抑爆特性和机制的研究相对较少。因此,本文拟选取对单相乙烯和聚乙烯均具有较好抑爆效果的碳酸氢钠和碳酸氢钾^[19]粉体为抑爆剂,利用20 L球形爆炸测试系统探究2种不同碳酸氢盐对两相体系的抑爆特性及机

制,以便为两相体系防爆提供理论依据。

1 抑爆试验材料和装置

1.1 抑爆试验材料

试验采用的聚乙烯和碳酸氢盐粉体均为分析纯,其粒径分析结果如图1所示。可以看出,聚乙烯、碳酸氢钠和碳酸氢钾3种粉体的中位粒径 D_{50} 分别为16.6、69.6和73.1 μm ,碳酸氢钠和碳酸氢钾的中位粒径相近,可以避免对比2种抑爆粉体抑爆性能时粒径的影响。为确保试验粉体不受湿度的影响,试验前一天对试验粉体在50 $^{\circ}\text{C}$ 的真空干燥箱中进行12 h的干燥处理。

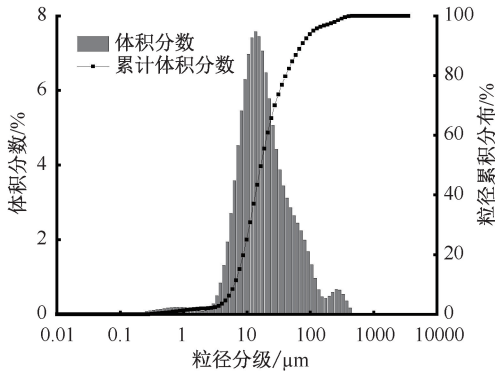
1.2 抑爆试验装置与方法

20 L球形爆炸试验系统^[20]如图2所示,该系统主要由微机控制模块、爆炸容器、扬尘模块、点火装置、配气模块和数据采集模块组成。先将10 kJ化学点火头安装在容器中心的电极两端,再将试验所需质量的抑爆剂与聚乙烯粉尘均匀混合后置于0.6 L粉尘仓中,并向粉尘仓中充入2 MPa的空气。采用分压法在爆炸容器内配置试验所需体积分数的乙烯气体。在控制模块的作用下,开启气粉两相阀,粉尘仓中的混合粉尘在2 MPa的空氣的驱动下通过气粉两相阀均匀的分散到爆炸容器中,60 ms后点火,容器内的压力变化过程由数据采集系统采集并保存在计算机中。为避免试验误差,每组试验至少重复3次,在误差范围允许范围内取平均值。

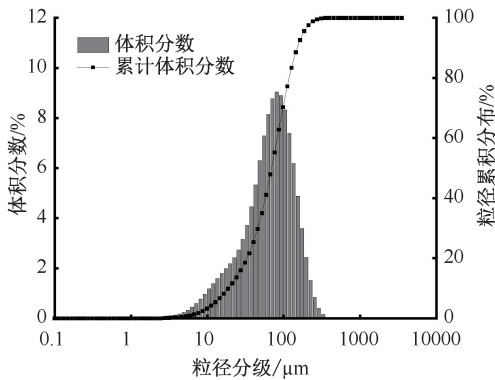
2 碳酸氢盐抑爆特性与机制分析

2.1 两相体系爆炸超压

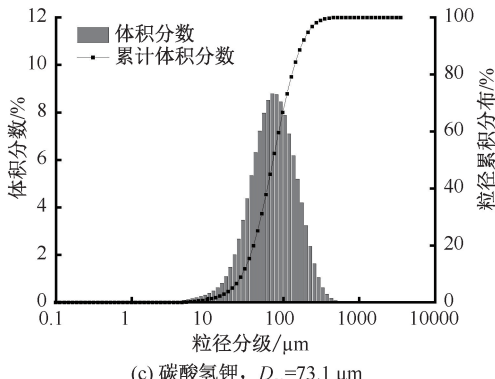
不同乙烯体积分数条件下两相体系爆炸压力和



(a) 聚乙烯, $D_{50}=16.6 \mu\text{m}$



(b) 碳酸氢钠, $D_{50}=69.6 \mu\text{m}$



(c) 碳酸氢钾, $D_{50}=73.1 \mu\text{m}$

图1 聚乙烯和碳酸氢盐粉体的粒径分布

Fig. 1 Particle size distribution of polyethylene dust and bicarbonate powder

爆炸压力上升速率测试和分析结果如图3所示。当乙烯体积分数分别为0、2%、4%和6%时,两相体系爆炸压力和爆炸压力上升速率均随聚乙烯粉尘质量浓度的增大先增大后减小,并分别在聚乙烯粉尘质量浓度为400、200、100、50 g/m^3 时到达峰值,分别为0.634 4、0.706 8、0.764 4、0.786 4 MPa和59.014 9、64.251 8、72.403 2、76.124 1 MPa/s 。但是,当乙烯体积分数为8%时,两相体系在聚乙烯质量浓度为0时到达峰值,即将任何质量浓度的聚乙烯添加至体积分数为8%的乙烯中均将导致乙烯爆炸强度的降低。这是因为试验条件下测得的乙烯爆

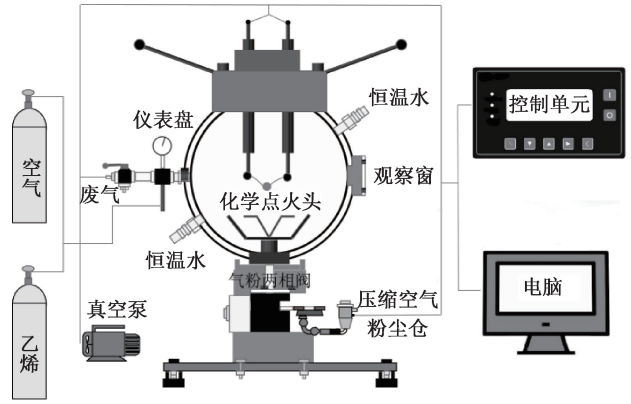


图2 20 L球形爆炸试验系统

Fig. 2 Schematic diagram of structure of 20 L spherical explosion experimental system

炸最佳体积分数为8%,在该体积分数条件下,乙烯与聚乙烯在两相爆炸过程中形成氧气竞争机制,气相乙炔会优先与氧气发生反应,聚乙烯则仅起到吸热抑爆的作用。

不同乙烯体积分数条件下,两相体系的最大爆炸压力和最大爆炸压力上升速率并非固定值,而是随乙烯体积分数的增大而增大,并且对应着不同的乙烯体积分数和聚乙烯质量浓度。乙烯爆炸是由化学反应控制的均相燃烧,而聚乙烯爆炸则是由扩散控制的异相燃烧。不同乙烯体积分数和聚乙烯质量浓度条件下的两相体系爆炸机制必将发生变化。当乙烯体积分数较低时,两相体系爆炸以由扩散控制的异相燃烧为主;当乙烯体积分数较高时,两相体系爆炸则以由化学反应控制的均相燃烧为主。爆炸强度和爆炸机制的不同,将导致碳酸氢盐对其抑爆性能及机制发生变化。因此,若要全面反映碳酸氢盐抑制两相体系爆炸特性和机制,需分析和研究多种不同乙烯体积分数和聚乙烯质量浓度组合下的两相体系爆炸抑制特性。基于此,抑爆试验以5种两相体系为对象,主要参数见表1。

表1 乙烯/聚乙烯两相体系最大爆炸压力和最大爆炸压力上升速率

Table 1 Maximum explosion pressure and explosion pressure rise rate of ethylene/polyethylene hybrid mixture

介质	名称	乙烯体积分数/%	聚乙烯质量浓度/ $(\text{g} \cdot \text{m}^{-3})$	爆炸压力/MPa	爆炸压力上升速率/ $(\text{MPa} \cdot \text{s}^{-1})$
两相	A	0	400	0.63	59.01
	B	2	200	0.71	64.25
	C	4	100	0.76	72.40
	D	6	50	0.79	76.12
乙烯	E	8	0	0.82	80.91

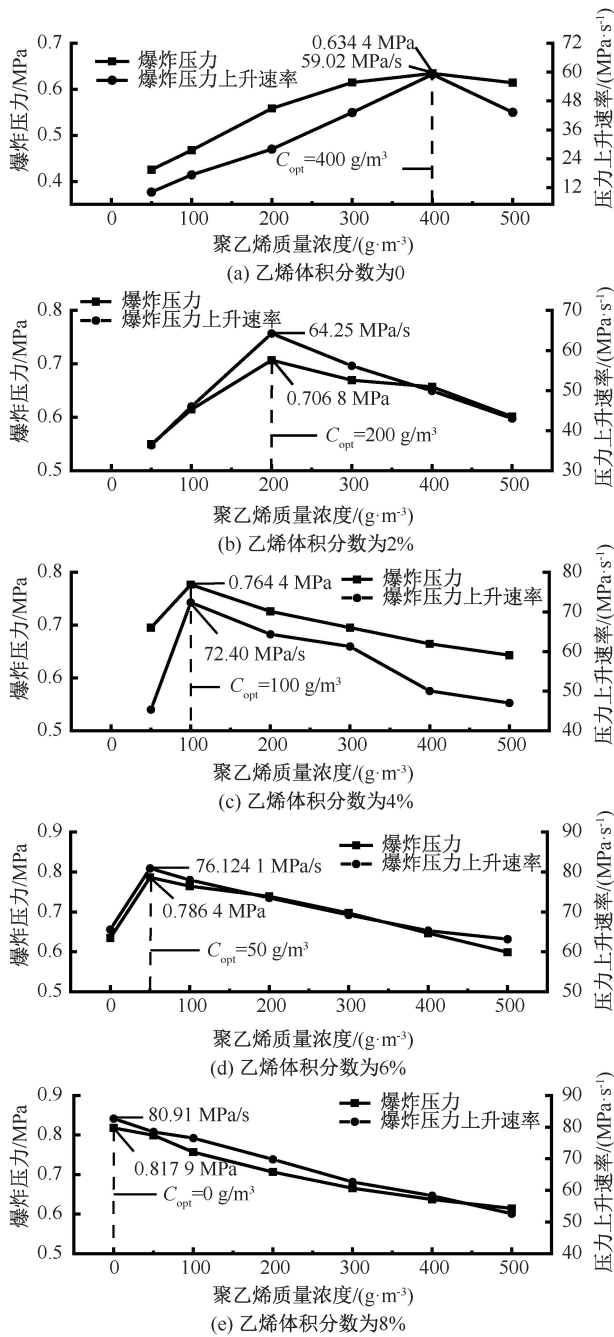


图 3 两相体系爆炸压力和爆炸压力上升速率
Fig. 3 Explosion pressure and pressure rise rate of hybrid mixture

2.2 碳酸氢盐抑制两相体系爆炸压力性能

图 4 为不同质量浓度碳酸氢盐作用下 5 种两相体系的爆炸压力。可以看出, 5 种两相体系爆炸压力均随碳酸氢盐质量浓度的增大而减小, 工况 A、B、C 爆炸压力能在碳酸氢盐的作用下降至 0.15 MPa 以下。当容器内爆炸压力 $P_e < (P_i + 0.05)$ MPa 时 (P_i 为 10 kJ 化学点火头爆炸产生的压力), 可认为容器内粉尘未发生爆炸^[21]。试验中 $P_i \approx 0.1$ MPa,

因此, 可推断碳酸氢盐能完全抑制工况 A、B、C 爆炸, 而工况 D、E 爆炸则难以被完全抑制。碳酸氢钠和碳酸氢钾完全抑制工况 A、B、C 爆炸所需质量浓度分别为 1 600、2 000、2 000 g/m^3 和 1 200、1 600、1 800 g/m^3 。这说明两相体系较单相聚乙烯更难抑制, 且随着两相体系中乙烯体积分数的增加, 抑制难度增大; 碳酸氢钾对两相体系的抑爆效果优于碳酸氢钠。

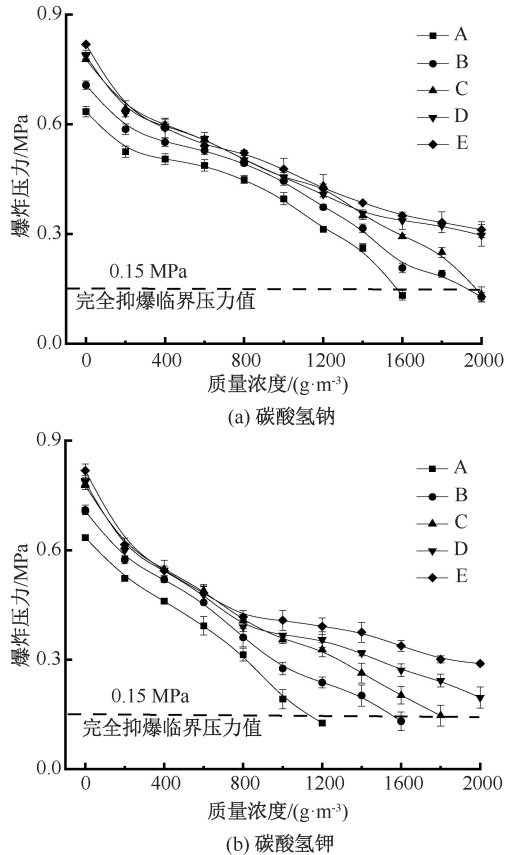


图 4 碳酸氢盐作用下两相体系爆炸压力变化
Fig. 4 Explosion pressure of ethylene/polyethylene hybrid mixture under action of bicarbonate

基于图 4 计算不同质量浓度碳酸氢盐作用下两相体系爆炸压力降低幅度如图 5 所示。可以看出, 当碳酸氢钠和碳酸氢钾质量浓度分别低于 1 400 和 800 g/m^3 时, 两相体系爆炸压力降低幅度随乙烯体积分数的增大而增大; 当碳酸氢钠和碳酸氢钾质量浓度分别增加至 1 600 和 1 000 g/m^3 时, 两相体系爆炸压力降低幅度随乙烯体积分数的增大而减小, 即碳酸氢盐抑制两相体系爆炸压力效率存在临界值。当碳酸氢盐质量浓度低于临界值时, 抑爆效率随乙烯体积分数的增大而升高; 高于临界值时, 抑爆效率随乙烯体积分数的增大而降低。这是因为碳酸氢盐对乙烯/聚乙烯两相体系爆炸压力的抑制作用

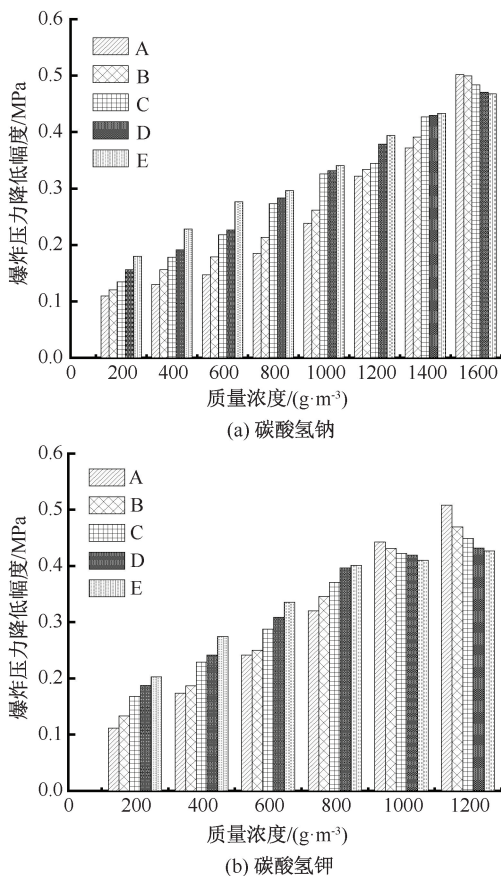


图5 碳酸氢盐作用下两相体系爆炸压力降低幅度
Fig. 5 Reduction of explosion pressure of ethylene/polyethylene hybrid mixture induced by bicarbonate

主要来自于其自身热解形成的吸热作用和自由基销毁作用,而碳酸氢盐的吸热性能和自由基销毁性能主要受其热解率的影响,热解率越高,吸热量越大,分解形成的自由基数量越多。因此,碳酸氢盐的热解率是影响其抑制两相体系爆炸压力效率的关键参数,而碳酸氢盐热解率主要受两相体系爆炸过程中介质燃烧温度和燃烧时间影响。工况 A 为纯聚乙烯爆炸,其爆炸强度相对较低,即其在爆炸过程中燃烧产生的温度相对较低,因此,该工况下碳酸氢盐热解率相对较小,抑爆效率较低。工况 B、C、D 为乙烯和聚乙烯的混合爆炸,根据工况 B、C、D 爆炸强度可知:两相体系中的乙烯体积分数越大,爆炸强度越高,燃烧产生的温度也越高,进而导致碳酸氢盐的热解率越高,抑爆效率也越高。但是,随着两相体系中乙烯体积分数的持续提升,两相体系爆炸燃烧温度也将持续增大,这将导致对碳酸氢盐热解率影响较大的主要因素由两相体系爆炸燃烧温度转化为燃烧时间。工况 E 为纯乙烯爆炸,虽然体系的燃烧温度较高,但燃烧时间较短。所以,当碳酸氢盐质量浓度

较低时,温度在碳酸氢盐热解过程中仍然占据主导地位,较高的燃烧温度作用下碳酸氢盐仍然可以充分热解。但是随着碳酸氢盐质量浓度的增加,碳酸氢盐热解率开始受燃烧时间的主导,此时,纯乙烯爆炸条件下的碳酸氢盐热解率反而会降低,导致抑爆效率降低。

2.3 碳酸氢盐抑制两相体系爆炸压力上升速率性能

图 6 为不同质量浓度碳酸氢盐作用下 5 种两相体系爆炸压力上升速率。可以看出,5 种两相体系爆炸压力上升速率均随碳酸氢盐质量浓度的增大而减小,工况 A、B、C 爆炸压力上升速率均能在碳酸氢盐的作用下降至 1.5 MPa/s 左右。但将工况 A、B、C 爆炸压力上升速率降低至 1.5 MPa/s 所需的碳酸氢钾质量浓度低于碳酸氢钠,即碳酸氢钾对两相体系爆炸压力上升速率的抑制效果同样优于碳酸氢钠。

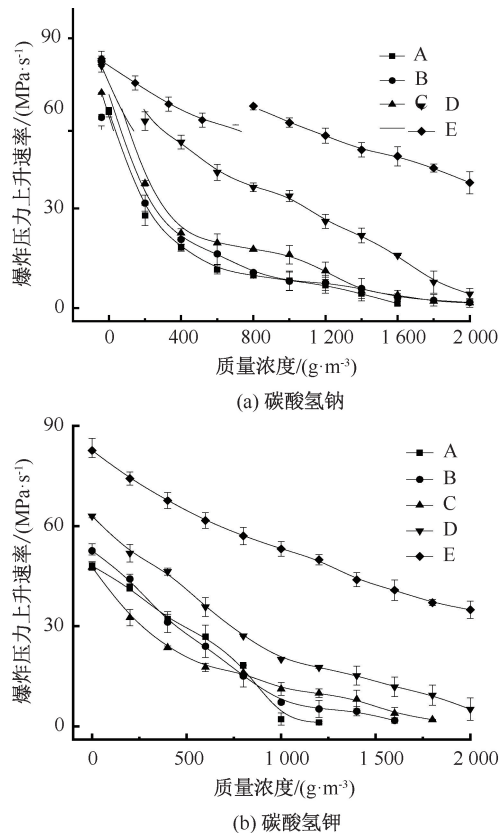


图6 碳酸氢盐作用下两相体系爆炸压力上升速率变化

Fig. 6 Rise rate of explosion pressure of ethylene/polyethylene hybrid mixture under bicarbonate

基于图 6 计算得到不同工况下两相体系爆炸压力上升速率降低幅度结果如图 7 所示。可以看出,两相体系爆炸压力上升速率降低幅度由工况 A-E 先增大后减小,即碳酸氢盐抑制两相体系爆炸压力

上升速率的效率由工况 A-E 先升高后降低。这是因为碳酸氢盐对两相体系爆炸压力上升速率的抑制作用主要来自于碳酸氢盐因热解形成的吸热效应和自由基销毁效应,热解速率越快,吸热速率越快,单位时间内热解产生的离子或自由基浓度越高,对爆炸自由基的销毁能力越强。碳酸氢盐的热解速率主要受两相体系爆炸过程中燃烧温度的影响,温度越高,热解速率越快。对于工况 A、B、C,两相体系中乙烯体积分数越大,体系的燃烧温度越高。这将导致碳酸氢盐的分解速率由工况 A-C 越来越快,吸热速率也越来越快,抑爆效率越来越高。随着工况 D 和 E 中乙烯体积分数的进一步提升,两相体系爆炸过程逐渐由乙烯为主的均相燃烧控制。虽然此时的燃烧温度较高,但燃烧速度较快,作用于碳酸氢盐的时间相对较短,热解率反而会降低,进而导致抑爆效率的降低。

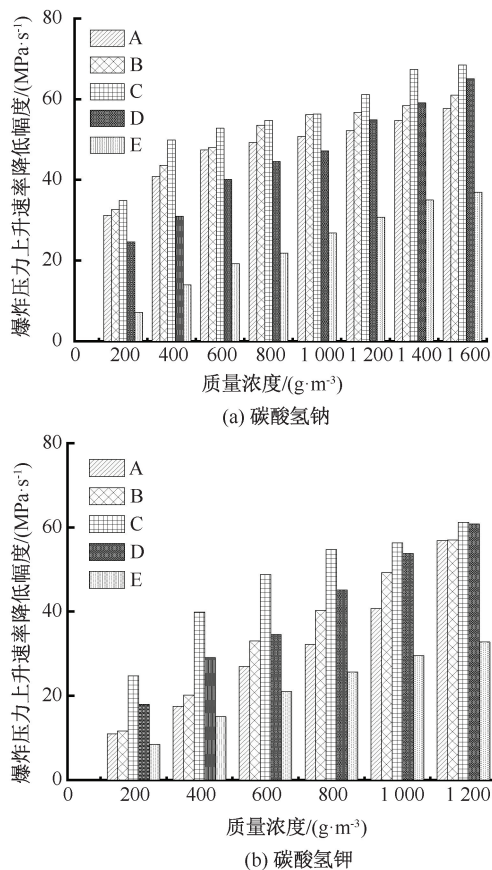


图 7 碳酸氢盐作用下两相体系爆炸压力上升速率的降低
Fig. 7 Reduction of rise rate of explosion pressure of ethylene/polyethylene hybrid mixture induced by bicarbonate

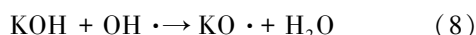
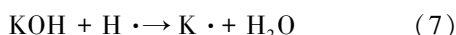
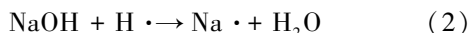
2.4 碳酸氢盐抑制两相体系爆炸机制

碳酸氢盐对两相体系爆炸的抑制作用主要由化

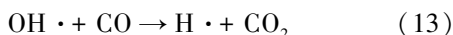
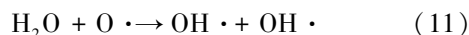
学抑制和物理抑制 2 方面^[22-23]。

2.4.1 化学抑制

爆炸开始后,分散在聚乙烯粉尘中的碳酸氢盐,充分接触并捕捉爆炸产生的活性自由基^[24]。



碳酸氢盐分解产生的 CO_2 和 $\text{H} \cdot$ 、 $\text{OH} \cdot$ 自由基结合后,同样可减少聚乙烯粉尘爆炸反应关键自由基数量,降低反应速率^[25-26]和燃烧产生的热量^[27]。



碳酸氢盐对乙烯/聚乙烯粉尘爆炸的化学抑制机制如图 8 所示。

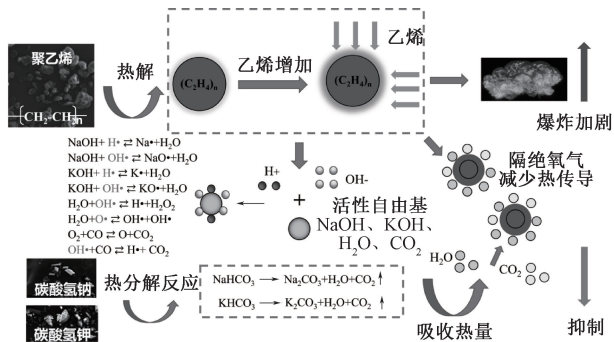
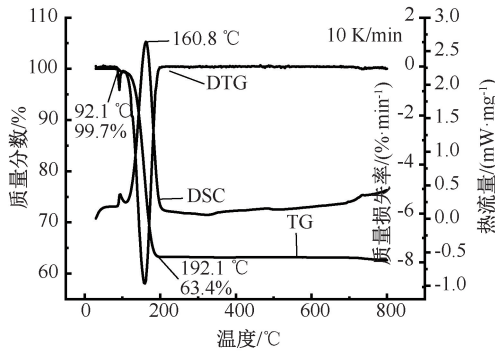


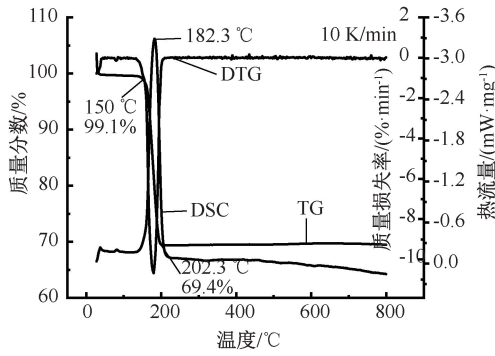
图 8 碳酸氢盐抑制两相体系爆炸化学机制
Fig. 8 Chemical inhibition mechanism of bicarbonate on hybrid explosion of ethylene/polyethylene mixture

2.4.2 物理抑制

采用同步热分析仪分析碳酸氢盐的热解特性(升温速率为 10 K/min , 空气),结果如图 9 所示。可以看出,碳酸氢钠粉体约在 $92.1 \text{ }^\circ\text{C}$ 开始失重分解,在 $192.1 \text{ }^\circ\text{C}$ 基本结束,碳酸氢钾粉体约在 $150 \text{ }^\circ\text{C}$ 开始失重分解,在 $202.3 \text{ }^\circ\text{C}$ 基本结束,2 种粉体在热解过程中均存在明显的吸热峰。因此,碳酸氢盐对两相体系爆炸的物理抑制作用主要来自于其自身的热解吸热。此外,碳酸氢盐热解产生的 H_2O 和 CO_2



(a) 碳酸氢钠



(b) 碳酸氢钾

图9 碳酸氢盐的热解特性

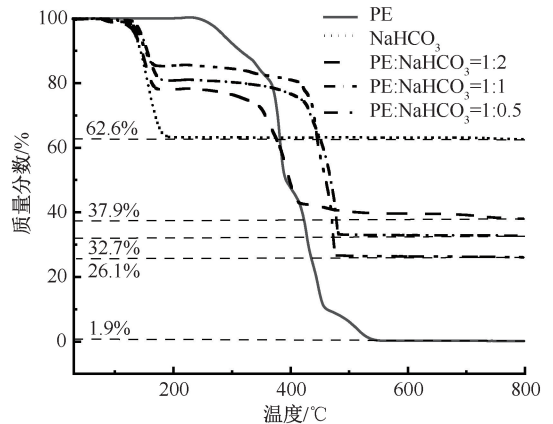
Fig. 9 Pyrolysis characteristics of bicarbonate

可以稀释氧气和可燃气体积分数,同样可以起到物理抑爆作用^[28]。

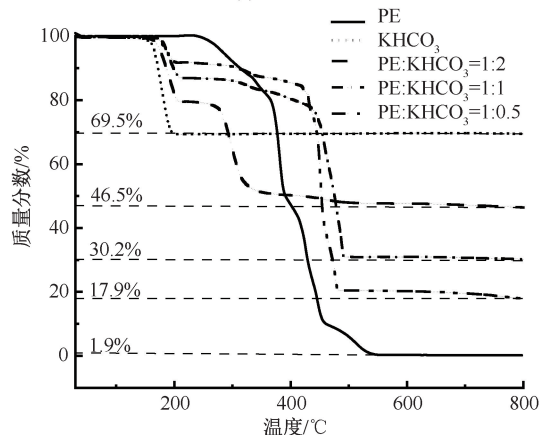
聚乙烯、碳酸氢盐以及碳酸氢盐与聚乙烯质量浓度的比值分别为0.5、1.0、2.0的混合粉体热重测试结果如图10所示。可以看出,随着混合粉体中碳酸氢盐占比的增大,混合粉体的初始分解温度提前,说明碳酸氢盐的初始热解温度低于聚乙烯粉体,即碳酸氢盐先于聚乙烯粉体发生热解,进而及时吸收爆炸产生的热量,减缓爆炸反应进程。

3 结论

- 1) 乙烯/聚乙烯两相体系较单相聚乙烯更难抑制,而且随着两相体系中乙烯体积分数的增加,两相体系爆炸抑制难度增大。
- 2) 碳酸氢盐对不同乙烯体积分数和聚乙烯质量浓度组合下的乙烯/聚乙烯两相体系均具有抑制作用。当乙烯体积分数低于6%时,碳酸氢盐可完



(a) 碳酸氢钠



(b) 碳酸氢钾

图10 混合粉体的热重曲线

Fig. 10 Thermogravimetric curve of polyethylene dust and bicarbonate powder

全抑制乙烯/聚乙烯两相体系爆炸,且相同条件下碳酸氢钾抑制效果优于碳酸氢钠。

3) 碳酸氢盐对乙烯/聚乙烯两相体系爆炸压力的抑制效率随着体系中乙烯体积分数的增大而升高。但当碳酸氢盐质量浓度增加到临界值时,抑制效率将随着体系中乙烯体积分数的增大而降低。碳酸氢盐对乙烯/聚乙烯两相体系爆炸压力上升速率的抑制效率随着体系中乙烯体积分数的增大先升高后降低。

4) 2种碳酸氢盐均能在聚乙烯爆炸过程中通过热解吸热、消耗自由基、降低聚乙烯分解速率、稀释氧气等物理和化学作用抑制乙烯/聚乙烯两相体系爆炸。

参考文献

[1] GAN Bo, LI Bing, JIANG Haipeng, et al. Ethylene/polyethylene hybrid explosions: part 1 effects of ethylene concentrations on flame propagations[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2018, 54: 93-102.

- [2] MITTAL M, GUHA B K. Minimum ignition temperature of polyethylene dust: a theoretical model[J]. *Fire and Materials*, 1997, 21: 169–177.
- [3] LIN Chendi, QI Yingquan, GAN Xiangyang, et al. Investigation into the suppression effects of inert powders on the minimum ignition temperature and the minimum ignition energy of polyethylene dust[J]. *Processes*, 2020, 8(3): DOI: 10.3390/pr8030294.
- [4] 马冉, 高建村, 杨凯, 等. 聚乙烯粉尘爆炸研究进展[J]. *中国粉体技术*, 2017, 23(6): 59–63.
MA Ran, GAO Jiancun, YANG Kai, et al. Research progress on polyethylene dust explosion[J]. *Chinese Powder Technology*, 2017, 23(6): 59–63.
- [5] PENG Lei, CAO JiaoJiao, ZHAO Yu, et al. Minimum ignition energy of LDPE dust/ethylene hybrid mixture[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2021, 72: DOI: 10.1016/J.JLP.2021.104546.
- [6] PENG Lei, CAO Jiaojiao, MA Ruirui, et al. Risk assessment method of polyethylene dust explosion based on explosion parameters[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2021, 69: DOI: 10.1016/J.JLP.2021.104397.
- [7] 关世钧. 浅析辽化“2·23”爆震事故的成因及预防[J]. *消防科学与技术*, 2002, 21(5): 83–85.
GUAN Shijun. Analysis of the causes and prevention of "2·23" knock accident in Liao hua[J]. *Fire Science and Technology*, 2002, 21(5): 83–85.
- [8] SONG Lin, LIU Zhengtang, QIAN Jifa, et al. Inertant effects and mechanism of $\text{Al}(\text{OH})_3$ powder on polyethylene dust explosions based on flame propagation behavior and thermal analysis[J]. *Fire Safety Journal*, 2021, 124: DOI: 10.1016/J.FIRESAF.2021.103392.
- [9] WANG Yang, YANG Jingjing, HE Jia, et al. Inhibition effect of KHCO_3 and KH_2PO_4 on ethylene explosion[J]. *ACS Omega*, 2023, 8(8): 7566–7574.
- [10] 王燕, 李忠, 张一民, 等. 不同磷酸氢盐作用下的乙烯抑爆特性及机制[J]. *中国安全科学学报*, 2022, 32(5): 48–54.
WANG Yan, LI Zhong, ZHANG Yimin, et al. The explosion suppression characteristics and mechanisms of ethylene under different effects of hydrogen phosphate salts[J]. *China Safety Science Journal*, 2022, 32(5): 48–54.
- [11] 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.
WANG Yan, YANG Shuaishuai, ZHANG Guotao, et al. Research on the inhibition performance and mechanism of ethylene explosion by modified zeolite[J]. *Journal of Chemical Engineering*, 2023, 74(12): 5048–5060.
- [12] JIANG Bingyou, DING Dawei, SU Mingqing, et al. Experimental study on the explosion suppression characteristics of polyethylene dust by ammonium polyphosphate[J]. *Powder Technology*, 2024, 437: DOI: 10.1016/J.POWTEC.2024.119491.
- [13] ZHANG Yansong, PAN Zhichao, YANG Junjie, et al. Study on the suppression mechanism of $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ and SiC for polyethylene deflagration based on flame propagation and experimental analysis[J]. *Powder Technology*, 2022, 399: DOI: 10.1016/J.POWTEC.2022.117193.
- [14] WANG Yan, LIN Chendi, QI Yingquan, et al. Suppression of polyethylene dust explosion by sodium bicarbonate[J]. *Powder Technology*, 2020, 367: 206–212.
- [15] ADDAI E K, GABELI D, KRAUSE U. Lower explosion limit of hybrid mixtures of burnable gas and dust[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2015, 36: 499–506.
- [16] SONG Shixiang, CHENG Yanggan, MENG Xiangrui, et al. Hybrid CH_4 /coal dust explosions in a 20-L spherical vessel[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2019, 122: 281–287.
- [17] 喻健良, 纪文涛, 孙会利, 等. 乙烯/聚乙烯两相体系爆炸特性[J]. *化工学报*, 2017, 68(12): 4841–4847.
YU Jianliang, JI Wentao, SUN Huili, et al. Explosion characteristics of ethylene/polyethylene mixed system[J]. *CIESC Journal*, 2017, 68(12): 4841–4847.
- [18] JI Wentao, YAN Xinqing, SUN Huili, et al. Comparative analysis of the explosibility of several different hybrid mixtures[J]. *Powder Technology*, 2018, 325: 42–48.
- [19] ZHOU Jianhua, JIANG Haipeng, ZHOU Yonghao, et al. Flame suppression of 100 nm PMMA dust explosion by KHCO_3 with different particle size[J]. *Process Safety and Environment Protection*, 2019, 132: 303–312.
- [20] GB/T 16426—1996, 粉尘云最大爆炸压力和最大压力上升速率测定方法[S].
GB/T 16426—1996, Method for determining the maximum explosion pressure and maximum pressure rise rate of dust

clouds[S].

- [21] EN 14034-3-2011, Determination of the explosive properties of the dust clouds. part 3: determination of low explosion limit LEL; German version EN 14034-3-2006+A1-2011[S].
- [22] RUDOLF K, MICHAL K, MARIAN G. Suppression of dust explosions by means of an active superfast explosion-suppression system of five liter volume[J]. International Journal of Energetic Materials and Chemical Propulsion, 2010, 9(1): DOI: 10.1615/IntJEnergeticMaterialsChemProp. v9. i1. 10.
- [23] JIANG Haipeng, BI Mingshu, LI Bei, et al. Flame inhibition of aluminum dust explosion by NaHCO_3 and $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$, Combust[J]. Combustion and Flame, 2019, 200: 97-114.
- [24] WILLIAMS A, FLEMING J W. Suppression mechanisms of alkali metal compounds[C]. Halon Options Technical Working Conference, 1999: 157-169.
- [25] 罗振敏,康凯. CO_2 抑制甲烷-空气链式爆炸微观机制的仿真分析[J]. 中国安全科学学报, 2015, 25(5):42-48. LUO Zhenmin, KANG Kai. Simulation analysis of microscopic mechanism of CO_2 inhibition of methane-air chain explosion[J]. China Safety Science Journal, 2015, 25(5): 42-48.
- [26] WANG Yan, CHENG Yishen, YU Minggao, et al. Methane explosion suppression characteristics based on the NaHCO_3 /red-mud composite powders with core-shell structure[J]. Journal of Hazardous Materials, 2017, 335: 84-91.
- [27] 路长,刘洋,王鸿波,等. CO_2 、 H_2 对 CH_4 /Air 预混气爆炸特性的影响[J]. 安全与环境学报, 2018, 18(5): 1788-1795. LU Chang, LIU Yang, WANG Hongbo, et al. Experimental study of the effects of CO_2 / H_2 on the characteristic features of methane/air bursts[J]. Journal of Safety and Environment, 2018, 18(5): 1788-1795.
- [28] LI Rui, HE Guoqiang, QIN Fei, et al. Skeletal chemical kinetic model generation and analysis for combustion of ethylene[J]. Aerospace Power, 2018, 33(9): 2074-2083.



作者简介: 纪文涛 (1989—),男,河南周口人,博士,副教授,河南理工大学安全学院化工安全研究所所长,主要从事气体与粉尘爆炸灾害防治方面的研究。E-mail: jiwentao@hpu.edu.cn。