

文章编号:1671-251X(2018)06-0080-07

DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.2017100056

煤尘二次爆炸特性研究

刘浩雄^{1,2}, 刘贞堂^{1,2}, 钱继发^{1,2}, 洪森^{1,2}, 邱黎明^{1,2}, 张瑞^{1,2}

(1. 中国矿业大学 安全工程学院, 江苏 徐州 221116;

2. 中国矿业大学 煤矿瓦斯与火灾防治教育部重点实验室, 江苏 徐州 221116)

摘要:利用 20 L 球形爆炸装置研究了煤尘浓度、煤尘粒径和点火能量对煤尘二次爆炸特性的影响,并与煤尘一次爆炸特性进行了对比分析。结果表明:随着煤尘浓度的增加,煤尘二次爆炸最大压力和爆炸压力最大上升速率均先增大后减小,一次爆炸与二次爆炸的最大压力差先减小后增大,一次爆炸与二次爆炸的压力最大上升速率差先减小后增大再减小;随着煤尘粒径的减小,煤尘二次爆炸最大压力和爆炸压力最大上升速率不断增大,一次爆炸与二次爆炸的最大压力差及压力最大上升速率差均先增大后减小;随着点火能量的增加,煤尘二次爆炸最大压力和爆炸压力最大上升速率,以及一次爆炸与二次爆炸的最大压力差及压力最大上升速率差均呈增大的变化趋势;煤尘二次爆炸最大压力和爆炸压力最大上升速率与一次爆炸时相比均减小;煤尘浓度为煤尘二次爆炸特性与一次爆炸产生差异的主要影响因素。

关键词:煤尘爆炸;二次爆炸;煤尘浓度;煤尘粒径;点火能量;爆炸最大压力;爆炸压力最大上升速率

中图分类号:TD714.5 文献标志码:A

网络出版地址:<http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1627.TP.20180517.1446.001.html>

Research on secondary explosion characteristic of coal dust

LIU Haoxiong^{1,2}, LIU Zhentang^{1,2}, QIAN Jifa^{1,2}, HONG Sen^{1,2}, QIU Liming^{1,2}, ZHANG Rui^{1,2}

(1. School of Safety Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China;

2. Key Laboratory of Coal Methane and Fire Control, Ministry of Education,
China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: Influence of concentration, particle size and ignition energy of coal dust on secondary explosion characteristic of coal dust were studied by use of 20 L spherical explosion device, and the secondary explosion characteristic of coal dust was compared with the first explosion characteristic of coal dust. The results show that with the increase of coal dust concentration, the maximum pressure and the maximum rising rate of pressure of secondary explosion of coal dust increase firstly and then decrease, the maximum pressure difference between the first explosion and secondary explosion decreases firstly and then increases, and the maximum rising rate difference of pressure between the first explosion and secondary explosion decreases firstly, then increases and decreases lastly; with the decrease of coal dust particle size, the maximum pressure and the maximum rising rate of pressure of secondary explosion of coal dust gradually increase, the maximum pressure difference and the maximum rising rate difference of

收稿日期:2017-10-25;修回日期:2018-05-11;责任编辑:盛男。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51174200)。

作者简介:刘浩雄(1993—),男,河北石家庄人,硕士研究生,研究方向为瓦斯煤尘的爆炸及防治,E-mail:617316301@qq.com。

引用格式:刘浩雄,刘贞堂,钱继发,等.煤尘二次爆炸特性研究[J].工矿自动化,2018,44(6):80-86.

LIU Haoxiong, LIU Zhentang, QIAN Jifa, et al. Research on secondary explosion characteristic of coal dust[J]. Industry and Mine Automation, 2018, 44(6): 80-86.

pressure between the first explosion and secondary explosion increase firstly and then decrease; with the increase of ignition energy, the maximum pressure and the maximum rising rate of pressure of secondary explosion of coal dust, and the maximum pressure difference and the maximum rising rate difference of pressure between the first explosion and secondary explosion increase; the maximum pressure and the maximum rising rate of pressure of secondary explosion of coal dust is smaller than that of the first explosion; coal dust concentration is the main influence factor on the characteristic difference between secondary explosion and the first explosion of coal dust.

Key words: coal dust explosion; secondary explosion; coal dust concentration; coal dust particle size; ignition energy; the maximum explosion pressure; the maximum rising rate of explosion pressure

0 引言

井下发生煤尘爆炸后,爆炸气固态产物会在原始位置漂浮和沉积,随着环境的变化,当煤尘浓度、温度和氧气再次满足爆炸条件后,煤尘爆炸气固态产物有可能发生二次爆炸。国内外学者对煤尘爆炸特性进行了大量实验研究和分析。B. Jensen 等^[1]利用小型爆炸实验设备,对煤尘爆炸特性及影响爆炸倾向的物理和化学变量进行了研究,得出煤尘爆炸性受挥发分、粒度、灰分、含水量、温度、爆炸反应时间和甲烷的影响。C. H. Medina 等^[2]在 1 m³ 标准煤尘爆炸设备中对 2 种烟煤样品及 2 种生物质燃料进行了爆炸实验,研究了煤粉和生物质燃料的爆炸特性及火焰速度的变化规律。M. J. Sapko 等^[3]在实验矿井对煤尘爆炸进行了研究,发现煤尘压缩后爆炸超压会显著增加。M. Mittal^[4]利用 20 L 球形爆炸装置对 2 种挥发分含量不同的煤尘的极限氧浓度、最小爆炸浓度、最低点燃温度和最小点火能量进行了研究,为惰化煤尘爆炸提供了重要依据。王育德等^[5]研究了煤尘浓度和粒度对煤尘燃烧爆炸特性的影响,得到煤尘出现稳定爆轰的最佳煤尘浓度和粒度。杜兵等^[6]在 20 L 球形爆炸测试系统内研究了煤粉-惰性介质混合体系的爆炸特性、敏感度和惰性介质的抑爆效力,结果表明添加惰性介质能显著降低煤粉爆炸特性,增加煤粉热值可显著提高混合体系的爆炸威力,增加惰性介质添加量可降低爆炸上限、提高爆炸下限。Li Qingzhao 等^[7]使用 20 L 球形爆炸装置研究了煤粉粒径和粒度分布对煤尘爆炸程度的影响,结果表明随着粒径和粒度分布的降低,最大压力和压力最大上升速率呈增加规律。曹卫国等^[8]研究了不同煤粉在 20 L 球形密闭容器中的爆炸机理和规律,结果显示煤尘爆炸压力随着点火具质量的增加而增加,随着浓度的增加呈先上升后下降的趋势,添加惰性介质能有效降低煤尘爆

炸压力。刘贞堂等^[9-10]使用 20 L 球形装置进行了煤尘爆炸实验,研究了不同条件下煤尘爆炸特征的变化规律。

目前对煤尘爆炸特性的研究主要为煤尘一次爆炸,对煤尘二次爆炸的研究较少。本文采用 20 L 球形爆炸装置进行煤尘二次爆炸实验,研究煤尘浓度、粒径和点火能量对煤尘二次爆炸特性的影响,并和煤尘一次爆炸特性进行对比分析。

1 实验装置及样品

实验系统由 20 L 球形爆炸装置、控制系统和数据采集系统组成,如图 1 所示。该系统可用于测试煤尘的爆炸最大压力、爆炸压力最大上升速率和最佳爆炸浓度。

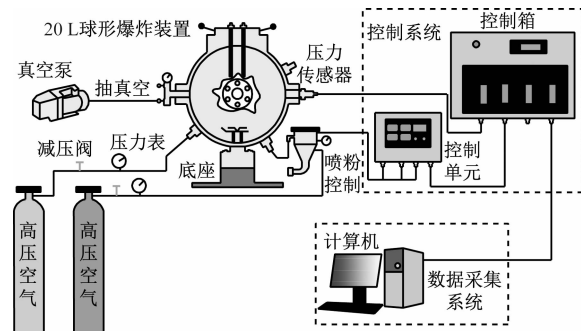


图 1 实验系统

Fig. 1 Experimental system

实验所用煤样为褐煤,煤样经破碎、过筛后形成煤尘样品并装入自封袋。实验前,煤尘样品需在 60 °C 恒温干燥箱干燥 24 h。通过改变煤尘浓度、煤尘粒径和点火能量,进行煤尘爆炸实验。在 20 L 球形爆炸装置的喷粉处放入一定质量的煤尘,然后注入 2 MPa 的空气,将煤尘吹扬起来与空气形成煤尘云,用点火药头引燃煤尘爆炸,收集煤尘一次爆炸后的固态产物,并将其作为二次爆炸的实验样品,然后在爆炸装置中重复上述步骤进行煤尘二次爆炸实验,对煤尘爆炸最大压力、爆炸压力最大上升速率、

爆炸最大压力差和爆炸压力最大上升速率差的规律进行研究。爆炸最大压力定义为爆炸过程中达到的最高压力;爆炸压力最大上升速率定义为爆炸过程中测得的爆炸压力随时间变化曲线的最大斜率;爆炸最大压力差和爆炸压力最大上升速率差分别定义为一次爆炸与二次爆炸的最大压力之差和压力最大上升速率之差;最佳爆炸浓度定义为煤尘爆炸过程

中爆炸最大压力达到峰值时的煤尘浓度。

2 实验结果及分析

2.1 煤尘浓度对二次爆炸特性的影响

在煤尘粒径为 $37\sim75\ \mu\text{m}$, 点火能量为 $5\ \text{kJ}$ 条件下, 分别加入煤尘浓度为 $100, 200, 300, 400, 500, 700\ \text{g}/\text{m}^3$ 的煤尘进行爆炸实验, 结果如图 2 所示。

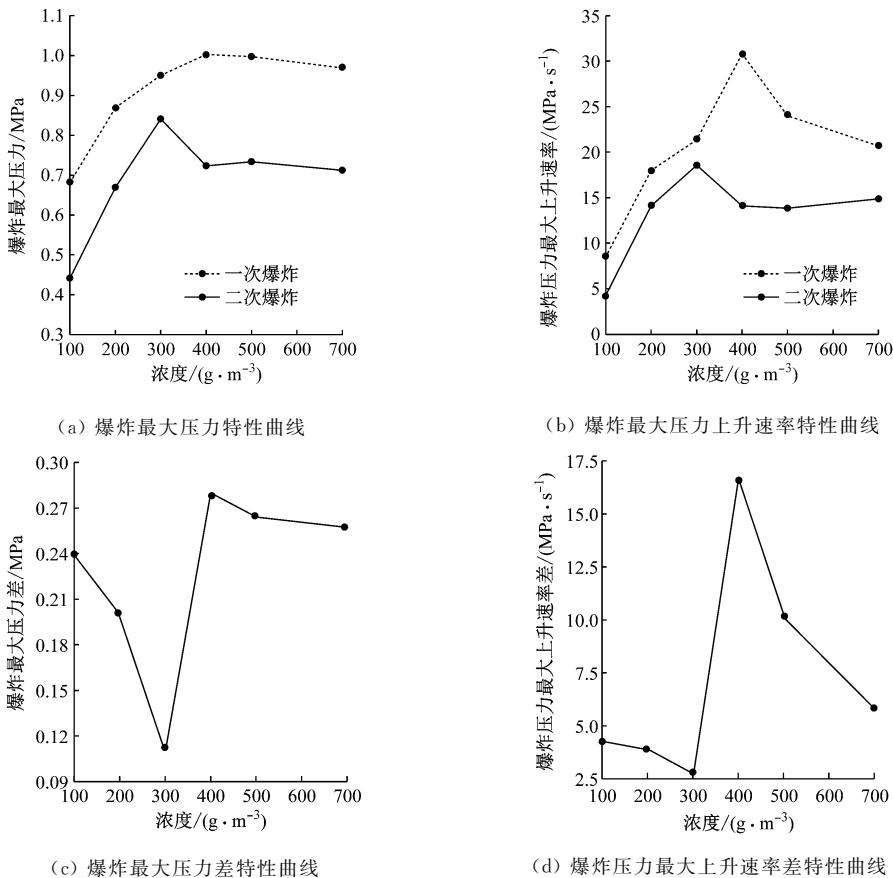


图 2 不同煤尘浓度下的爆炸实验结果

Fig. 2 Experimental result of explosion under different coal dust concentration

从图 2 可看出, 煤尘发生二次爆炸时, 爆炸最大压力和爆炸压力最大上升速率与一次爆炸时相比均减小。这是由于煤尘发生一次爆炸时, 挥发分的产率和释放的能量高, 爆炸后固态产物中的颗粒由于受到冲击、碰撞和化学反应的影响, 颗粒的物理和化学性质、结构形态等会发生变化, 且可燃成分含量减少, 抑制成分(如灰分、 H_2O 、 C_2O 等)相对增加, 抑制成分通过吸收燃烧颗粒的热量达到抑制爆炸的目的^[11], 造成二次爆炸后最大压力和压力最大上升速率减小。

随着煤尘浓度的增加, 煤尘二次爆炸最大压力的变化趋势与一次爆炸时相似, 均为先增大后减小; 爆炸最大压力差则呈先减小后增大的变化趋势。二次爆炸最大压力在煤尘浓度为 $300\ \text{g}/\text{m}^3$ 时取得峰

值, 二次爆炸的最佳爆炸浓度较一次爆炸的最佳爆炸浓度 $400\ \text{g}/\text{m}^3$ 有所减小。这是由于煤尘的一次爆炸反应使参与二次爆炸的固态产物中的挥发分减小, 而挥发分对煤尘爆炸特性的影响最大, 煤尘最佳爆炸浓度随着挥发分含量的减小而降低, 所以二次爆炸的最佳爆炸浓度减小。当煤尘浓度高于最佳爆炸浓度, 一次爆炸和二次爆炸的最大压力均变化缓慢。爆炸最大压力差在煤尘浓度为 $300\ \text{g}/\text{m}^3$ 时达到波谷, 而在煤尘浓度为 $400\ \text{g}/\text{m}^3$ 时达到峰值, 为 $0.279\ 9\ \text{MPa}$ 。这是由于二次爆炸在煤尘浓度为 $300\ \text{g}/\text{m}^3$ 时反应最完全, 二次爆炸最大压力最大, 与一次爆炸时的差值最小; 在煤尘浓度为 $400\ \text{g}/\text{m}^3$ 时, 一次爆炸最大压力最大, 参与二次爆炸的固态产物与原煤尘相比, 物理和化学性质、形态结构及可燃

成分含量相差最大,所以此时爆炸最大压力差最大。

随着煤尘浓度的增加,煤尘二次爆炸压力最大上升速率呈先增大后减小的变化趋势,爆炸压力最大上升速率差先减小后增大再减小。爆炸压力最大上升速率差在煤尘浓度为 300 g/m^3 时达到波谷,在煤尘浓度为 400 g/m^3 时达到峰值,在煤尘浓度高于 400 g/m^3 后急剧减小。这是由于随着煤尘浓度的增加,氧气成为制约爆炸反应的主要因素,有效参与燃烧反应的煤尘减少,过多的煤尘抑制反应的进行^[12],爆炸反应时间增加,且爆炸压力开始缓慢降低,导致一次爆炸压力最大上升速率明显减小;参与二次爆炸的固态产物在一次爆炸过程中受热导致表

面软化并产生黏性,在爆炸冲击波作用下,煤尘颗粒间碰撞粘结^[13],使部分颗粒尺寸和质量增大,在二次爆炸中煤尘浓度继续增加,但悬浮的颗粒浓度变化较小,爆炸压力和爆炸反应时间变化较小,导致爆炸压力最大上升速率缓慢变化。二次爆炸压力最大上升速率的缓慢变化与一次爆炸时的迅速减小形成鲜明对比,造成爆炸压力最大上升速率差急剧下降。

2.2 煤尘粒径对二次爆炸特性的影响

在煤尘浓度为 400 g/m^3 ,点火能量为 5 kJ 条件下,分别加入粒径为 $250 \sim 425, 180 \sim 250, 125 \sim 180, 75 \sim 125, 37 \sim 75, <37 \mu\text{m}$ 的煤尘进行爆炸实验,结果如图3所示。

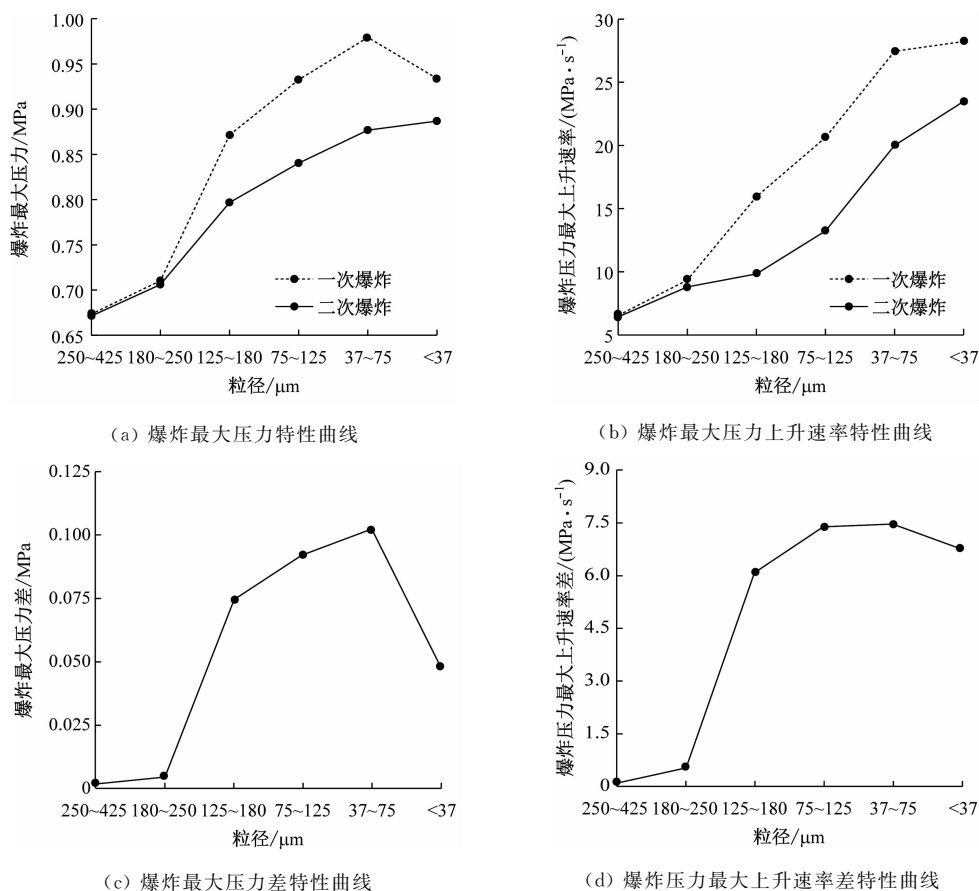


图3 不同煤尘粒径下的爆炸实验结果

Fig. 3 Experimental result of explosion under different coal dust particle size

从图3可看出,煤尘二次爆炸最大压力和爆炸压力最大上升速率与一次爆炸相比均减小。随着煤尘粒径的减小,二次爆炸最大压力不断增大,爆炸最大压力差先增大后减小。在煤尘粒径为 $250 \sim 425 \mu\text{m}$ 和 $180 \sim 250 \mu\text{m}$ 时,颗粒尺寸较大,二次爆炸最大压力与一次爆炸时接近,爆炸最大压力差较小。这是由于大粒径煤尘化学结构稳定,比表面积小,一次爆炸时只在部分煤尘表面发生燃烧,粒子内

部残留的能量未在第一时间释放,影响能量释放率^[14],一次爆炸最大压力较小;参与二次爆炸的固态产物中颗粒表面或孔隙内会吸附一次爆炸的气态产物(如 CO_2),阻隔氧气与颗粒接触,大粒径煤尘对燃烧依然起冷却作用,爆炸反应受阻,二次爆炸最大压力仍然较小,所以大粒径煤尘的一次爆炸与二次爆炸的最大压力之差较小。在煤尘粒径为 $37 \sim 75 \mu\text{m}$ 时,一次爆炸最大压力取得峰值,此时一次爆

炸反应最剧烈、最完全,参与二次爆炸的固态产物中的可燃成分与原煤尘中的相差最大,导致爆炸最大压力差达到最大。在煤尘粒径 $<37\ \mu\text{m}$ 时,一次爆炸最大压力减小而二次爆炸最大压力增大。这是由于一次爆炸中煤尘粒径较小,单位体积内的颗粒增多,间距减小,与氧气接触面减少,导致反应不充分而造成一次爆炸最大压力减小;而在二次爆炸中颗粒呈多孔状结构,氧气可通过孔隙与可燃物接触,增大接触面,因一次爆炸的不完全反应使固态产物中残留较多的挥发分和固定碳等可燃物,所以二次爆炸最大压力增大。

随着煤尘粒径的减小,煤尘二次爆炸压力最大上升速率的变化趋势与一次爆炸时相同,均为逐渐

增大;爆炸压力最大上升速率差则呈先增大后减小的变化趋势。这是由于煤尘粒径越小,比表面积越大,氧气向颗粒表面扩散的时间缩短,反应加快,爆炸压力增大,一次爆炸和二次爆炸的压力最大上升速率不断增大;参与二次爆炸的固态产物与原煤尘相比,煤尘吸附性降低,可燃成分和挥发分含量减小,燃烧热的释放和传递越来越缓慢,二次爆炸与一次爆炸的压力最大上升速率差逐渐增大,在煤尘粒径为 $37\sim75\ \mu\text{m}$ 时达到最大,而后减小。

2.3 点火能量对二次爆炸特性的影响

在煤尘浓度为 $400\ \text{g}/\text{m}^3$,煤尘粒径为 $37\sim75\ \mu\text{m}$ 条件下,采用不同能量的点火药头引爆煤尘,实验结果如图4所示。

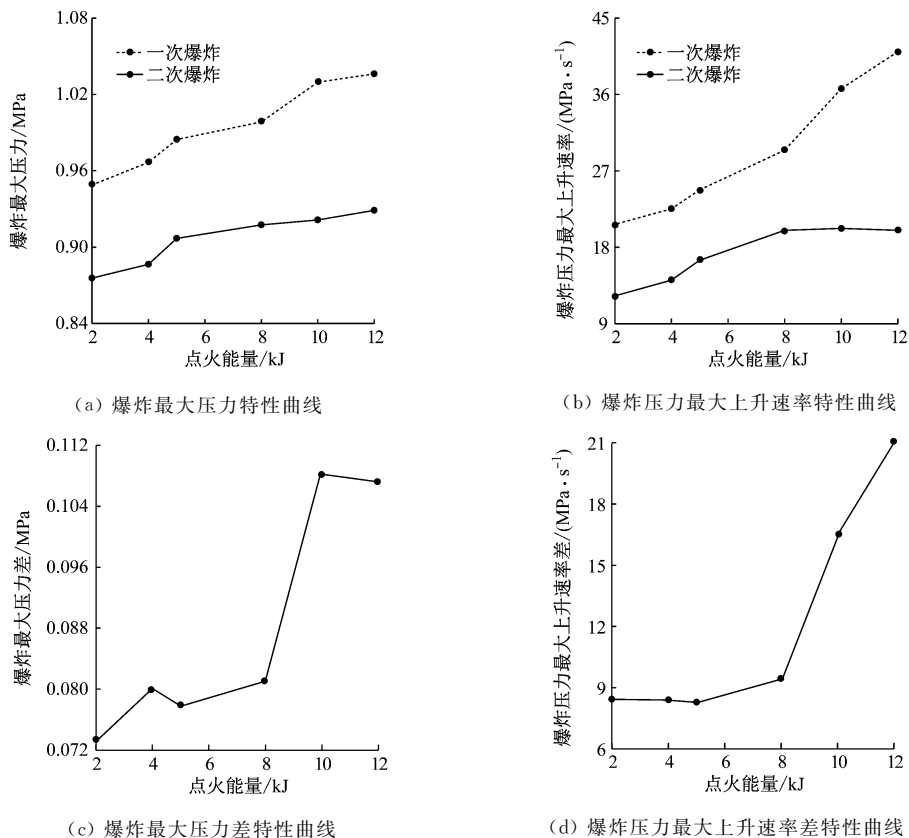


图4 不同点火能量下的爆炸实验结果

Fig. 4 Experimental result of explosion under different ignition energy

从图4可看出,煤尘二次爆炸最大压力和爆炸压力最大上升速率与一次爆炸相比均减小。随着点火能量的增加,煤尘二次爆炸最大压力和爆炸最大压力差均呈增大的变化趋势,其中爆炸最大压力差在点火能量为10 kJ时达到峰值,为0.108 2 MPa;与一次爆炸时相比,二次爆炸最大压力在点火能量高于5 kJ后缓慢上升。这是由于在点火能量增大时,受限空间内单个煤尘颗粒获得的能量增大,活化

分子数量增多,逸散出更多的挥发分,一次爆炸最大压力增加较快,而在参与二次爆炸的固态产物中,可燃物含量减少,抑制成分相对增加,二次爆炸最大压力变化缓慢,所以爆炸最大压力差越来越大。

随着点火能量的增加,煤尘二次爆炸压力最大上升速率和爆炸压力最大上升速率差均呈增大的变化趋势;与一次爆炸时相比,二次爆炸压力最大上升速率在点火能量高于8 kJ后基本保持不变。这是

由于在一次爆炸过程中,随着点火能量增大,点火产生的冲击强度增加,引起腔体内气体湍流,加速颗粒融化和挥发分的燃烧,爆炸最大压力升高,促进爆炸压力最大上升速率快速增大^[15];在二次爆炸过程中,虽然点火能量增加能够使爆炸压力最大上升速率增大,但一次爆炸后的固态产物挥发出的可燃气体相对减少,爆炸反应时间增加,爆炸压力变化缓慢,爆炸压力最大上升速率增加缓慢。二次爆炸压力最大上升速率的缓慢变化与一次爆炸时的快速上升形成鲜明对比,因此爆炸压力最大上升速率差不断增大。

3 结论

(1) 随着煤尘浓度的增加,煤尘二次爆炸最大压力和爆炸压力最大上升速率均先增大后减小,爆炸最大压力差先减小后增大,爆炸压力最大上升速率差先减小后增大再减小。二次爆炸最佳爆炸浓度为 300 g/m^3 ,比一次爆炸最佳爆炸浓度 400 g/m^3 有所减小。爆炸最大压力差和爆炸压力最大上升速率差在煤尘浓度为 300 g/m^3 时达到波谷,在煤尘浓度为 400 g/m^3 时达到峰值。

(2) 随着煤尘粒径的减小,煤尘二次爆炸最大压力和爆炸压力最大上升速率不断增大,爆炸最大压力差和爆炸压力最大上升速率差均先增大后减小。大粒径煤尘对二次爆炸最大压力和爆炸压力最大上升速率变化的影响较小,煤尘粒径为 $37 \sim 75 \mu\text{m}$ 时爆炸最大压力差和爆炸压力最大上升速率差取得最大值。

(3) 随着点火能量的增加,煤尘二次爆炸最大压力和爆炸压力最大上升速率,以及爆炸最大压力差和爆炸压力最大上升速率差均呈增大的变化趋势。二次爆炸最大压力在点火能量高于 5 kJ 后缓慢上升,爆炸压力最大上升速率在点火能量高于 8 kJ 后基本保持不变,爆炸最大压力差在点火能量为 10 kJ 时取得最大值。

(4) 煤尘发生二次爆炸时,爆炸最大压力和爆炸压力最大上升速率与一次爆炸时相比均减小。比较不同煤尘浓度、煤尘粒径和点火能量条件下的煤尘一次爆炸和二次爆炸的最大压力,发现在煤尘浓度变化情况下爆炸最大压力差最大,因此煤尘浓度为煤尘二次爆炸特性与一次爆炸产生差异的主要影响因素。

参考文献 (References):

[1] JENSEN B, GILLIES S. Review of coal dust

explosibility research[J]. *Annales Durologie*, 1994, 20 (5): 9-14.

[2] MEDINA C H, MACCOITIR B, SATTAR H, et al. Comparison of the explosion characteristics and flame speeds of pulverised coals and biomass in the ISO standard 1 m^3 dust explosion equipment[J]. *Fuel*, 2015, 151(1): 91-101.

[3] SAPKO M J, WEISS E S, CASHDOLLAR K L, et al. Experimental mine and laboratory dust explosion research at NIOSH[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2000, 13(3/4/5): 229-242.

[4] MITTAL M. Limiting oxygen concentration for coal dusts for explosion hazard analysis and safety[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2013, 26(6): 1106-1112.

[5] 王育德, 曲志明. 煤尘浓度和粒度对煤尘燃烧爆炸特性影响的实验研究[J]. *中国矿业*, 2013, 22(8): 136-140.

WANG Yude, QU Zhiming. Experimental study on the impact of coal dust concentration and particles on combustion and explosion characteristics[J]. *China Mining Magazine*, 2013, 22(8): 136-140.

[6] 杜兵, 蒯念生, 黄卫星, 等. 煤粉-惰性介质混合体系爆炸特性实验研究[J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2012, 44(增刊1): 229-234.

DU Bing, KUAI Niansheng, HUANG Weixing, et al. Experiment-based investigations on explosion behaviors of coal dust-inertant mixtures[J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2012, 44(S1): 229-234.

[7] LI Qingzhao, WANG Ke, ZHENG Yuannan, et al. Experimental research of particle size and size dispersity on the explosibility characteristics of coal dust[J]. *Powder Technology*, 2016, 292: 290-297.

[8] 曹卫国, 黄丽媛, 梁济元, 等. 球形密闭容器中煤粉爆炸特性参数研究[J]. *中国矿业大学学报*, 2014, 43(1): 113-119.

CAO Weiguo, HUANG Liyuan, LIANG Jiyuan, et al. Research on characteristic parameters of coal dust explosion in a spherical sealed container[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2014, 43(1): 113-119.

[9] 刘贞堂, 郭汝林, 喜润泽. 煤尘爆炸特征参数影响因素研究[J]. *工矿自动化*, 2014, 40(8): 30-33.

LIU Zhentang, GUO Rulin, XI Runze. Research of influence factors on characteristic parameters of coal dust explosion[J]. *Industry and Mine Automation*, 2014, 40(8): 30-33.

- [10] LIU Zhentang, LIN Song, ZHANG Songshan, et al. Observations of microscopic characteristics of post-explosion coal dust samples [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2016, 43: 378-384.
- [11] DASTIDAR A G, AMYOTTE P R. Using calculated adiabatic flame temperatures to determine dust explosion inerting requirements [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2004, 82(2): 142-155.
- [12] 彭于怀, 黄丽媛, 曹卫国, 等. 石松子粉尘爆炸危险性 & 抑爆研究[J]. *爆破器材*, 2014(6): 16-21.
PENG Yuhuai, HUANG Liyuan, CAO Weiguo, et al. Hazards and suppressions research on lycoposium dust explosion [J]. *Explosive Materials*, 2014 (6): 16-21.
- [13] 来诚锋, 段滋华, 张永发, 等. 煤粉末的爆炸机理[J]. *爆炸与冲击*, 2010, 30(3): 325-328.
LAI Chengfeng, DUAN Zihua, ZHANG Yongfa, et al. Explosion mechanism of carbon powder [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2010, 30(3): 325-328.
- [14] 魏嘉. 煤矿瓦斯煤尘爆炸数值模拟研究[D]. 太原: 中北大学, 2015.
- [15] KUAI Niansheng, HUANG Weixing, DU Bing, et al. Experiment-based investigations on the effect of ignition energy on dust explosion behaviors [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2013, 26(4): 869-877.