

DOI: 10.11883/bzycj-2021-0139

密闭空间油页岩粉尘爆炸特性研究*

武林媛¹, 于立富¹, 王天枢¹, 孙威², 徐建航¹, 李航¹

(1. 沈阳化工大学环境与安全工程学院, 辽宁 沈阳 110142;

2. 沈阳化工大学化学工程学院, 辽宁 沈阳 110142)

摘要: 为探究油页岩粉尘的爆炸特性, 以龙口 (Longkou, LK)、茂名 (Maoming, MM)、桦甸 (Huadian, HD) 和抚顺 (Fushun, FS) 4种油页岩粉尘为研究对象, 采用 20 L 球形爆炸装置, 对这 4 种油页岩粉尘样品开展系统的爆炸实验, 探讨油页岩粉尘的粉尘云质量浓度、粒径、挥发分、灰分、氧含量等对其爆炸特性的影响。结果表明: 挥发分含量越高, 油页岩粉尘的最大爆炸压力 p_{\max} 、最大压力上升速率 $(dp/dt)_{\max}$ 越高, 爆炸下限越低; 挥发分和灰分对油页岩粉尘云爆炸分别有显著的促进和抑制作用。在 37.52~106.43 μm 粒径范围内, 这 4 种油页岩粉尘样品的 p_{\max} 和 $(dp/dt)_{\max}$ 均随其粉尘粒径的增大而降低, 且到达最大爆炸压力的时间逐步缩短, 说明小粒径油页岩粉尘较高的脱挥发速率能提高爆炸的反应程度。当粉尘质量浓度在 400~2 500 g/m^3 范围内时, p_{\max} 和 $(dp/dt)_{\max}$ 均随粉尘云质量浓度的升高呈现先升高后降低的变化趋势, 高于最佳粉尘云质量浓度 (1 000 g/m^3) 时略有下降, 但维持在较高水平, 表明超过最佳质量浓度的粉尘云引燃后仍有较强的破坏力; LK 样品的 p_{\max} 和 $(dp/dt)_{\max}$ 均最高, 分别为 0.61 MPa 和 29.32 MPa/s, 与挥发分含量相当的褐煤在同一水平, 其爆炸下限为 200 g/m^3 , 在 4 种样品中最低, 高于挥发分含量相当的褐煤; 在 N_2 惰化条件下, LK 样品的 p_{\max} 和 $(dp/dt)_{\max}$ 均随环境氧含量的降低而降低, 当氧含量降至 15% 时, 系统不再发生爆炸, 极限氧含量为 16%。

关键词: 油页岩粉尘; 粉尘爆炸; 爆炸下限; 最大爆炸压力; 爆炸压力最大上升速率; 极限氧含量

中图分类号: O381; X932

国标学科代码: 13035; 6203020

文献标志码: A

Explosion characteristics of oil shale dust in a confined space

WU Linyuan¹, YU Lifu¹, WANG Tianshu¹, SUN Wei², XU Jianhang¹, LI Hang¹

(1. College of Environmental and Safety Engineering, Shenyang University of Chemical Technology,

Shenyang 110142, Liaoning, China;

2. College of Chemical Engineering, Shenyang University of Chemical Technology, Shenyang 110142, Liaoning, China)

Abstract: To investigate the explosion characteristics of oil shale dust, four kinds of oil shale dust from main mining areas such as Longkou (LK), Maoming (MM), Huadian (HD) and Fushan (FS) in China were chosen as experimental samples. A 20-litre explosion sphere vessel was used as the experimental device to carry out explosion experiments to systematically explore the influences of the parameters of the samples, including dust mass concentration, particle size, the content of volatile and ash, and oxygen content on the explosion characteristics of oil shale dust. The experimental results show that the higher the volatile content of the oil shale, the higher the maximum explosion pressure, the maximum rise rate of explosion pressure $(dp/dt)_{\max}$, and the lower the minimum explosion mass concentration; the volatile has a significant promoting effect on the explosion of the oil shale dust, while the ash has a significant inhibiting effect on it. In the dust particle size range from 37.52 microns to 106.43 microns, the magnitudes of p_{\max} and $(dp/dt)_{\max}$ of the four oil shale samples all decrease with the increase of particle size, and the time to reach p_{\max} decreases gradually as the particle size becomes smaller. The smaller the particles are, the faster

* 收稿日期: 2021-04-22; 修回日期: 2021-08-19

基金项目: 辽宁省科技厅博士启动基金 (2019-BS-188); 辽宁省教育厅科学研究经费 (LQ2020024)

第一作者: 武林媛 (1997—), 女, 硕士研究生, zjtchc@163.com

通信作者: 于立富 (1985—), 男, 博士, 讲师, yulifu@syuct.edu.cn

the volatiles are released, which can improve the reaction degree of the explosion. In the dust mass concentration range from 400 g/m^3 to $2\,500 \text{ g/m}^3$, the magnitudes of p_{\max} and $(dp/dt)_{\max}$ of the four samples all took on a trend of increasing first and then decreasing with the increase of dust mass concentration. After the critical pressure concentration ($1\,000 \text{ g/m}^3$) was exceeded, the explosion intensity decreased slightly, but still maintained at a high level, and still had relatively strong destructive power. The magnitudes of p_{\max} (0.61 MPa) and $(dp/dt)_{\max}$ (29.32 MPa/s) of the LK sample are the highest in the four samples, which are at the same level as that of lignite with similar volatile content. The minimum explosion concentration (200 g/m^3) of the LK sample is the lowest among the four samples, which is higher than that of the lignite with the similar volatile content. By using N_2 as the inert gas, the oxidation, the heat released and the magnitudes of p_{\max} and $(dp/dt)_{\max}$ of the LK sample all decreased with the decrease of oxygen content. When the oxygen content was reduced to 15%, there were no more explosions in the system, and the limiting oxygen concentration was found to be 16%.

Keywords: oil shale dust; dust explosion; minimum explosion concentration; maximum explosion pressure; maximum rate of explosion pressure rise; limiting oxygen concentration

粉尘爆炸属于工业生产中的高风险事故类型, 虽然在世界范围内对粉尘爆炸机理及防治技术的研究在不断加强, 但重特大粉尘爆炸事故仍时有发生, 至今粉尘爆炸仍严重威胁着粉体企业的安全生产^[1]。一方面, 在工业生产趋向自动化、规模化发展的同时, 可燃性粉体物料的处理量变大, 在加工、输送、存储等过程中易形成被忽视的粉尘爆炸危险性环境^[2]; 另一方面, 粉尘爆炸防控措施随物料种类、组分、状态和环境条件的变化, 存在较大差异^[3]; 此外, 对物料爆炸特性的认识不足, 易忽略或低估发生粉尘爆炸的可能性及后果严重程度^[4]。这反过来又需要对物料的爆炸特性参数如: 爆炸下限 (minimum explosion concentration, MEC)、最大爆炸压力 (maximum explosion pressure, p_{\max})、最大压力上升速率 (maximum rise rate of explosion pressure, $(dp/dt)_{\max}$) 和极限氧含量 (limiting oxygen concentration, LOC) 等进行评估, 并为根据特定技术应用可能发生爆炸的不同情况设计适当的防爆措施^[5]。

油页岩是一种高灰分且富含可燃有机质的化石燃料, 是干馏炼油的主要原材料^[6]。在干馏炼油过程中, 油页岩粉尘作为主要产物或副产品在破碎筛分、干馏及除尘等工艺中大量存在, 尤其在干馏炉喂料时, 因落料时既有的高度落差而形成粉尘云, 增加了发生粉尘爆炸的可能性^[7]。抚顺式干馏炉就已发生多次爆炸事故, 导致炉膛塌陷、炉壁破损, 严重制约着干馏炼油的安全生产^[8]。目前在油页岩爆炸特性方面, Hamdan 等^[9]利用 G-G 炉和 Hartmann 管对不同粒径的油页岩粉尘云最低着火温度进行了测试, 同时研究了粉体惰化介质对油页岩粉尘防爆的适用情况。Sweis^[10]在不同粒径的油页岩粉尘中加入石灰石、石屑和粗粒度的油页岩等惰性材料, 研究其 MEC 的变化。Wang 等^[11]对油页岩与煤粉混合物的爆炸特性进行了研究, 发现煤尘中含有少量油页岩粉尘, 会降低煤尘的着火温度, 增大发生爆炸事故的风险。Liu 等^[12]通过研究 CaCO_3 与 SiO_2 对油页岩粉尘爆炸特性的影响, 发现油页岩中的 CaCO_3 比 SiO_2 有更好的惰化效果。但由于我国油页岩有机质成熟度相对较低, 所以国外关于油页岩的研究成果对我国油页岩粉尘爆炸的防治参考价值有限。韩放等^[13]对抚顺式干馏炉存在火灾、爆炸等事故风险的原因进行了安全性分析与评价, 并提出了相应的防范措施。郭文杰^[14]对抚顺油页岩孔隙度、硬度、活化能、着火点和导热系数对反应速度、反应温度及产气量的影响进行了研究, 发现孔隙度和反应速率会影响干馏炉落料空间, 而过大的落料空间会导致空气进入干馏段造成干馏炉爆炸。孟祥豹等^[7]研究了惰性粉体对油页岩粉尘爆炸火焰的抑制性能和作用机理, 发现惰性粉体 ABC 干粉、 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 、 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 、 NaHCO_3 和岩粉的抑制性能依次减弱。李刚等^[6]对油页岩综合利用过程的危险性 & 干馏炉火灾爆炸事故的原因进行了分析, 夯实了油页岩粉尘防爆安全的研究基础。上述研究从宏观上明确了油页岩干馏过程中存在火灾爆炸的危险性, 但油页岩组分含量的不同导致其爆炸机理也存在差异, 需要继续深入研究。且已开展的相关研究多关注干馏工艺过程的危险性, 而对油页岩材料本身爆炸特性的关注较少。鉴于此, 本文中采用 20 L 球形爆炸装置, 系统研究油页岩粉尘爆炸特性参数的变化规律, 以期油页岩开发利用过程中粉尘爆炸的防治工作提供实验依据。

1 实验材料与装置

1.1 实验材料

实验材料取来自龙口、茂名、桦甸及抚顺的 4 种油页岩粉尘, 分别标记为 LK、MM、HD 和 FS, 样品的工业分析结果如表 1 所示, w 为各组分在油页岩粉尘中的质量分数。

表 1 4 种油页岩粉尘样品工业分析结果

油页岩粉尘	w/%			
	固定碳	挥发分	灰分	水分
LK	10.07	39.15	49.28	1.50
MM	0.10	29.47	67.76	2.87
HD	0.09	27.11	69.11	3.87
FS	1.08	22.73	74.30	1.98

将从破碎筛分工段获取的原始粉尘样品进行筛分后, 分别取 150、200、270 和 400 目筛下物, 利用 Rise-2012 粒度分析仪对样品进行分析得到粒度分布如图 1 所示, 其中中位径 D_{50} 分别为 37.52、54.41、76.46 及 106.43 μm 。油页岩粉尘颗粒大小分布不均, 样品表面呈不规则层岩状结构, 200 目筛下物在放大倍数为 20 000 时的电镜扫描图像如图 2 所示, 实验前样品恒温干燥 4 h。

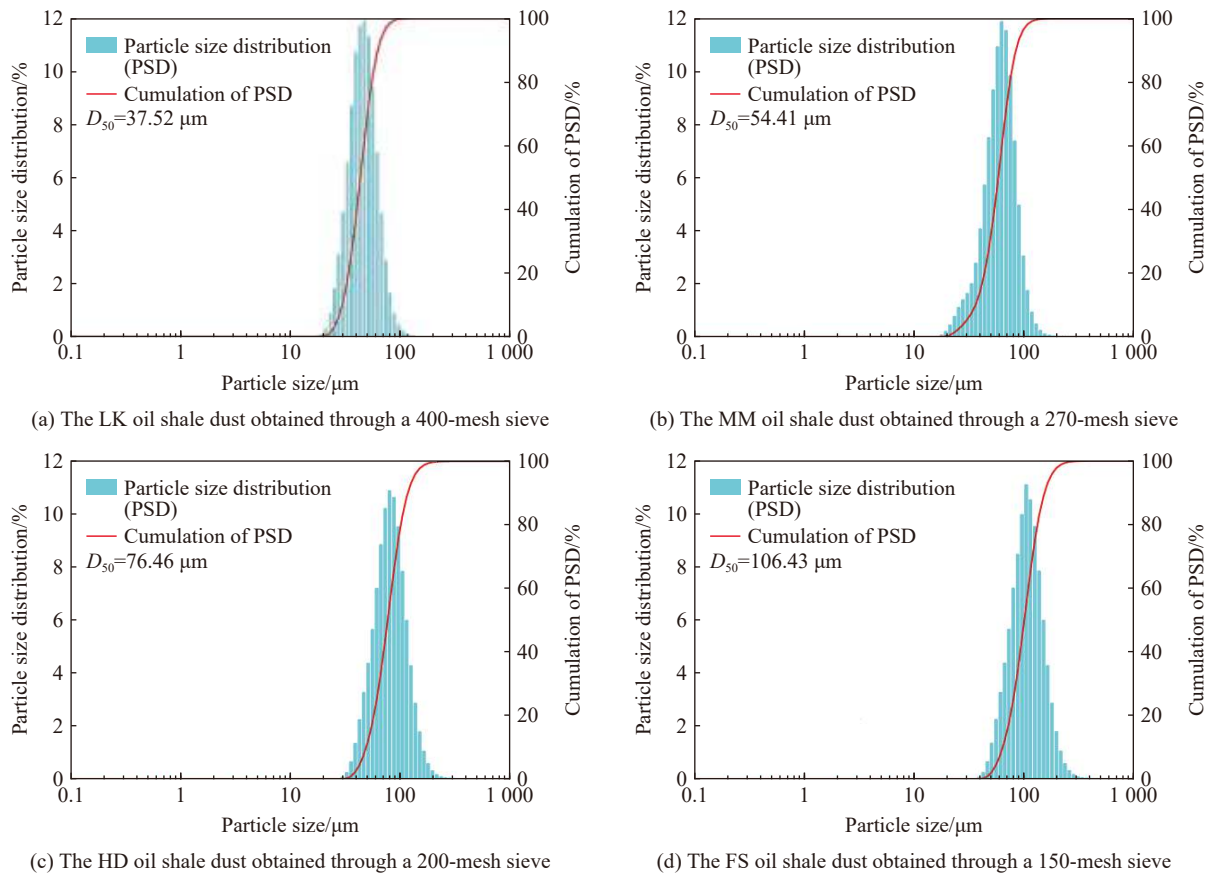


图 1 样品粒径分布

Fig. 1 Size distribution of sample particles

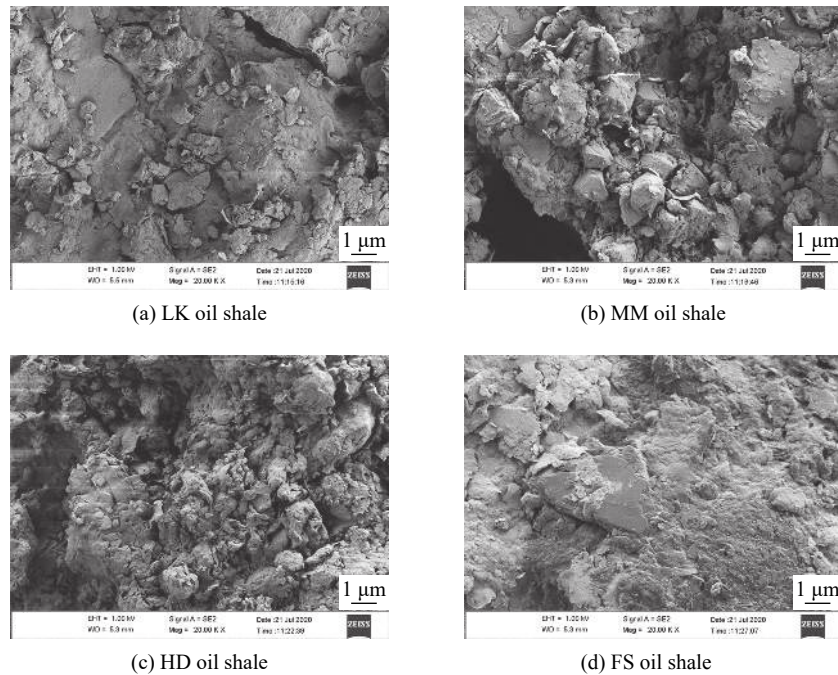


图 2 不同油页岩粉尘颗粒的电镜扫描图像

Fig. 2 Scanning electron microscope images of different oil shale dust particles

1.2 实验装置

实验测试系统由爆炸球及控制采集系统组成,如图 3 所示。为保证压力采集的准确性,实验过程中进气、喷粉及点火等动作所需时间以毫秒单位计。预先置于储粉罐内的样品,经 2 MPa 高压空气喷入-60 kPa 的爆炸球内。为避免 Y 形分散喷嘴在反射及分散时形成的高湍流度的影响,点火头经 60 ms 延迟后引爆点火,以确保爆炸球内样品分散均匀。压力采用 Dytran 2300v1 型压电式传感器测量,灵敏度为 3.27 mV/kPa,采样时间为 1 s,频率为 1 kHz,实验参数由采集系统记录并保存。为避免测试结果的偶然性,每次测试重复 3 次以上。

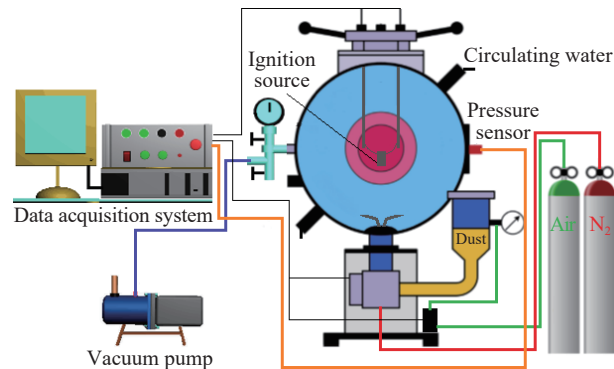


图 3 20 L 标准球形爆炸装置

Fig. 3 The standard 20-L spherical explosion device

2 实验结果与讨论

2.1 油页岩粉尘爆炸下限及影响规律

测试爆炸下限时,为避免过驱效应,采用 2 kJ 能量点火头^[15],从粉尘可发生爆炸的某一质量浓度 (mass concentration, ρ) 开始,采用二分法逐步降低 ρ ,直至不爆为止,当爆炸超压不低于 0.05 MPa 时,即认

为爆炸发生。粒径 $75\ \mu\text{m}$ 级的 FS、HD、MM 和 LK 等 4 种油页岩样品的爆炸下限(MEC, ρ_{\min})与其挥发分含量 w_v 及灰分含量 w_a 的关系如图 4~5 所示,可以看出,油页岩的爆炸下限与其挥发分含量呈负相关,与灰分含量呈正相关。FS、HD、MM 和 LK 等 4 种样品的爆炸下限依次降低,LK 样品挥发分的含量最高($w_v=39.15\%$),其爆炸下限 $\rho_{\min}=200\ \text{g/m}^3$,远高于挥发分含量相当的褐煤($w_v=37.45\%$, $\rho_{\min}=50\ \text{g/m}^3$)^[16-17],其爆炸敏感性低于褐煤的。

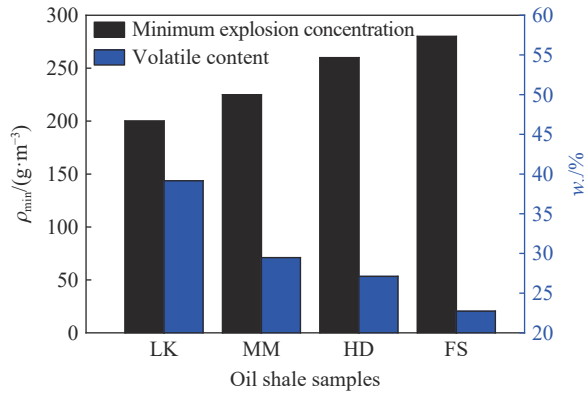


图 4 挥发分含量对爆炸下限的影响

Fig. 4 Effect of volatile content on the minimum explosion mass concentration

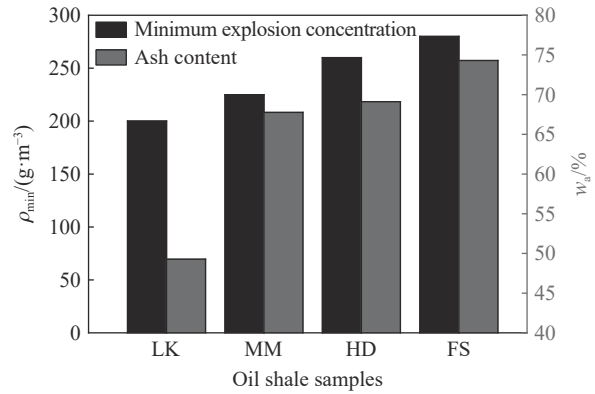


图 5 灰分含量对爆炸下限的影响

Fig. 5 Effect of ash content on the minimum explosion mass concentration

由表 1 可知,油页岩中挥发分、灰分含量较高,固定碳含量普遍较低。从图 4~5 可以看出,挥发分、灰分含量是影响油页岩粉尘爆炸下限的主要因素。根据爆炸机理,颗粒表面受热后析出可燃性气体促进爆炸的发展,而灰分在爆炸过程中吸收热量并抑制爆炸的传播,因而油页岩的挥发分含量越高,其爆炸下限越低,相应的灰分含量越高,爆炸下限越高,越不易发生爆炸。从总体规律来看,挥发分含量的增高使爆炸下限大幅度降低,而灰分含量的影响能力相对次之。

2.2 粉尘云质量浓度对 p_{\max} 与 $(dp/dt)_{\max}$ 的影响

采用 10 kJ 能量点火头^[18],对粒径为 $75\ \mu\text{m}$ 级的 4 种样品的爆炸特性进行研究,其 p_{\max} 和 $(dp/dt)_{\max}$ 随粉尘云质量浓度 ρ 的变化如图 6~7 所示。

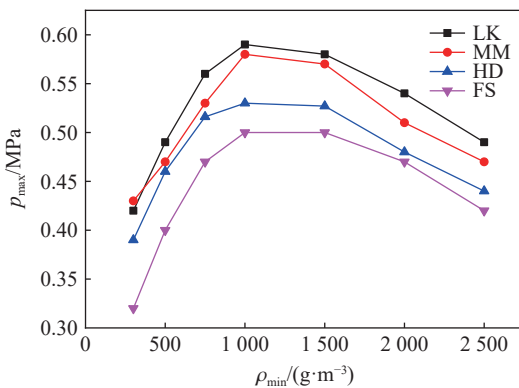


图 6 质量浓度对最大爆炸压力的影响

Fig. 6 Effect of dust mass concentration on the maximum explosion pressure

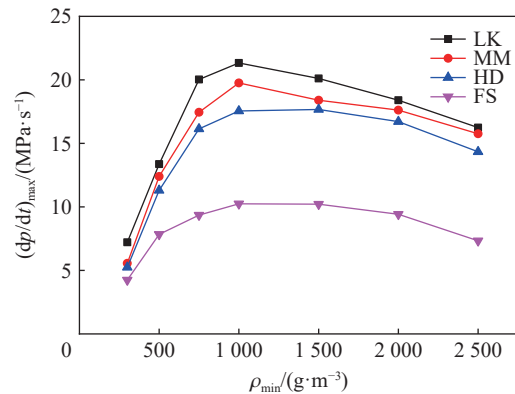


图 7 质量浓度对最大爆炸压力上升速率的影响

Fig. 7 Effect of dust mass concentration on the maximum rate of explosion pressure rise

从测试结果看,当 $\rho=400\sim 2500\ \text{g/m}^3$ 时,4 种样品各自的 p_{\max} 与 $(dp/dt)_{\max}$ 随着 ρ 的增大,均呈现先升高后降低的变化趋势;在 $\rho\approx 1000\ \text{g/m}^3$ 时 p_{\max} 达到峰值,LK 样品的 p_{\max} 最大,为 0.59 MPa,与挥发分含量相当的褐煤^[19]($w_v=37.45\%$, $\rho=250\ \text{g/m}^3$, $p_{\max}=0.60\ \text{MPa}$)在同一水平。由于不同矿区油页岩组分含量的差异, p_{\max} 差别也较大,FS 样品的 p_{\max} 最小,为 0.50 MPa。当 $\rho=400\sim 1000\ \text{g/m}^3$ 时,制约爆炸压力的关键

因素是粉尘的质量浓度, 此时为富氧环境, 随着粉尘质量浓度的升高, 单位空间内参与反应的有效颗粒增多, 放热量变大, p_{\max} 升高。当 $\rho=1\ 000\ \text{g/m}^3$ 时, 油页岩粉尘云与氧气质量浓度比例达到最佳, 此时反应最充分, p_{\max} 最大。而 ρ 继续升高时, 环境中氧气不足, 反应热被过多的颗粒吸收, 从而降低爆炸压力, 爆炸压力呈现 U 形变化规律。

需要指出的是, 在 p_{\max} 附近, p_{\max} 的限制因素是油页岩粉尘质量浓度和环境氧含量。当 $\rho=1\ 000\sim 2\ 500\ \text{g/m}^3$, 随着 ρ 继续增高, p_{\max} 缓慢下降, $(dp/dt)_{\max}$ 仍维持在较高水平。对应于干馏炼油的实际工况, 落料时干馏炉内粉尘云质量浓度处于较高水平, 如果喂料时炉内进入了过量的空气, 即补充了氧气, 改变了控制因素, 仍会形成较大破坏力, 以往事故也印证了这一点^[6,20]。

2.3 粒径对 p_{\max} 与 $(dp/dt)_{\max}$ 的影响

利用 10 kJ 能量点火头^[18], 在 $\rho=1\ 000\ \text{g/m}^3$ 的情况下, 对 4 种样品的 150、180、200、240、270、325 及 400 目筛下物进行测试, 以探究粒径变化对爆炸特性的影响。

从图 8~9 可以看出, 在 $\rho=1\ 000\ \text{g/m}^3$ 的情况下, 4 种样品的 p_{\max} 和 $(dp/dt)_{\max}$ 均随 D_{50} 的增大而降低, 但降低的趋势存在差异。在 $D_{50}\leq 76.46\ \mu\text{m}$ 时, 粒径的变化对 $(dp/dt)_{\max}$ 的影响较大; 在 $D_{50}> 76.46\ \mu\text{m}$ 时, 粒径的变化对 p_{\max} 的影响较显著。一方面, 油页岩颗粒比表面积及与氧气的接触面积, 随粒径的增大而减小, 粒径变大, 颗粒表面燃烧放热速率降低, 同时颗粒内部因氧含量不足而形成不完全燃烧, 从而降低了产热率; 另一方面, 粒径变小, 比表面积变大, 小颗粒较高的挥发速率能提高爆炸的反应程度, 其达到 p_{\max} 的时间 t 也随粒径的变小而缩短。以 LK 样品为例, 其最大爆炸压力随时间 t 的变化如图 10 所示。此两方面的综合作用, 导致油页岩粉尘的 p_{\max} 及 $(dp/dt)_{\max}$ 随粒径的增大而降低。

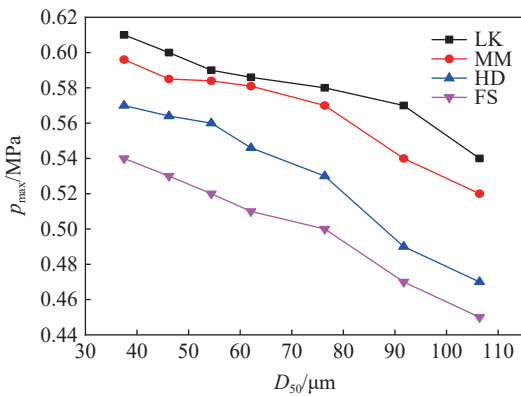


图 8 粒径对最大爆炸压力的影响

Fig. 8 Effect of particle size on the maximum explosion pressure

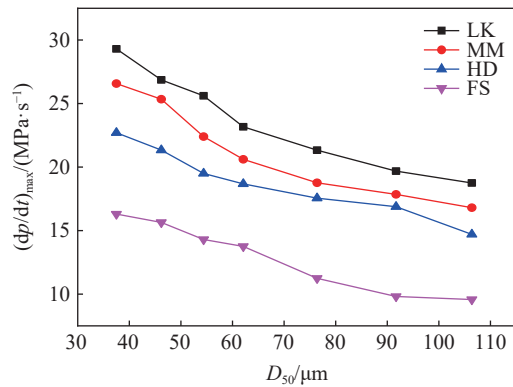


图 9 粒径对最大压力上升速率的影响

Fig. 9 Effect of particle size on the maximum rate of pressure rise

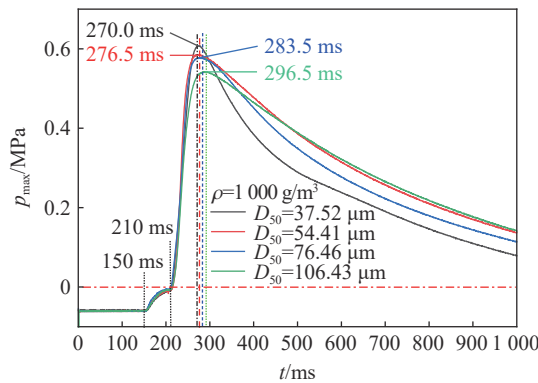


图 10 质量浓度相同粒径不同的 LK 样品最大爆炸压力随时间的变化曲线

Fig. 10 Change of the maximum explosion pressure with time for the LK oil shale dust samples with different particle sizes and the same mass concentration

2.4 挥发分和灰分对 p_{\max} 和 $(dp/dt)_{\max}$ 的影响

为进一步探究油页岩中挥发分的质量分数 w_v 及灰分的质量分数 w_a 对 p_{\max} 和 $(dp/dt)_{\max}$ 的影响, 对比分析粒径为 $75 \mu\text{m}$ 级的 4 种样品在 $\rho=1\ 000 \text{ g/m}^3$ 的情况下的测试结果, 如图 11 所示。发现这 4 种样品 FS、HD、MM 和 LK 的 w_v 从 22.73% 增大到 39.15%, 其 p_{\max} 依次升高, p_{\max} 从 0.50 MPa 升高 0.59 MPa, 但变化范围不大; FS、HD、MM 和 LK 的 $(dp/dt)_{\max}$ 依次升高, 从 10.24 MPa/s 升高到 21.33 MPa/s。由于 p_{\max} 是在最佳爆炸质量浓度处获得的, 此刻挥发分完全析出, 随着 w_v 的升高, 挥发分逐渐在两相爆炸过程中起主导作用, 释放的能量引起瞬间的压力上升, 加速了颗粒的燃烧反应过程, 提高了压力上升速率。

图 12 给出了 4 种样品的 w_v 和 w_a 对 p_{\max} 和 $(dp/dt)_{\max}$ 的影响, 可以看出 p_{\max} 和 $(dp/dt)_{\max}$ 均随 w_v 的升高而升高、随 w_a 的升高而降低, 对应组分的影响权重与爆炸下限的情况类似。油页岩灰分主要是不燃及难燃性物质^[10-12], 在燃烧灰化过程中吸收可燃组分放出的热量, 因而 w_a 越高, 油页岩燃烧的热效率越低。油页岩的 w_a 从 49.28% 升高到 74.3%, 其 p_{\max} 从 0.59 MPa 下降到 0.50 MPa, 表现为递减趋势, 即 w_a 越高, 阻碍爆炸传播的作用越明显, 样品组分含量的不同导致爆炸特性参数之间的差异越大。

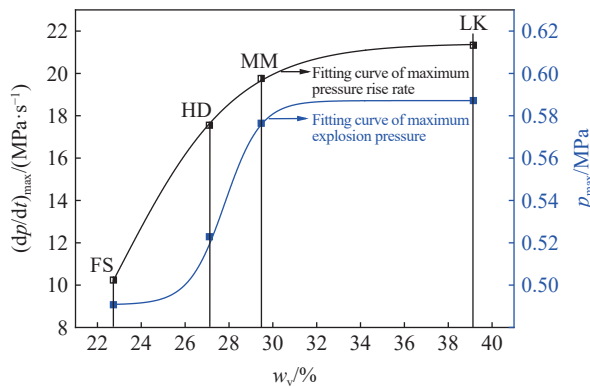


图 11 挥发分质量分数对 p_{\max} 和 $(dp/dt)_{\max}$ 的影响

Fig. 11 Effect of volatile mass fraction on p_{\max} and $(dp/dt)_{\max}$

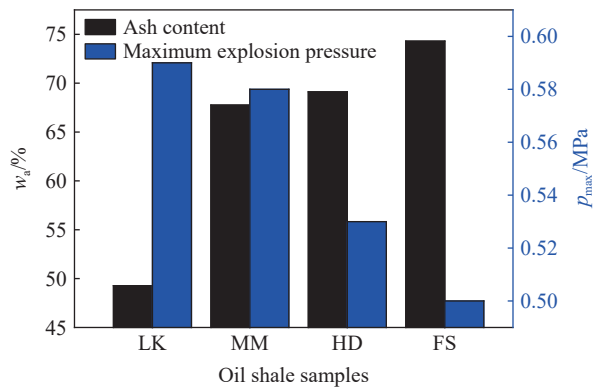


图 12 灰分质量分数对 p_{\max} 的影响

Fig. 12 Effect of ash mass fraction on p_{\max}

油页岩中挥发分和灰分对其爆炸特性的影响与煤粉存在较大的不同。从文献 [21-25] 可知, 煤的灰分对其爆炸性的影响与挥发分含量有关, 对于挥发分质量分数小于 15% 的煤尘, 灰分的作用会更显著。主要原因是, 煤中固定碳质量分数在 60% 以上, 而油页岩中固定碳质量分数普遍小于 10%。

2.5 极限氧含量

极限氧含量 (limit oxygen content, LOC, w_{oc} , 即极限氧气质量分数) 是在惰化气氛下粉尘云发生爆炸所需的最低氧含量^[26], 是粉尘惰化防爆的重要参数, 采用惰化保护时, 通常保持系统的氧含量 (oxygen content, w_{oc}) 比 LOC 至少低 2%^[27-29]。测试时采用 10 kJ 能量点火头, 采用 N_2 逐步降低环境中的 w_{oc} , 直至系统不发生爆炸为止, 在粉尘云任何质量浓度下都不会发生爆炸的氧气含量与发生爆炸的最低氧气含量之间的差值不超过 1%^[30]。以危险性最高的 LK 样品为例, 分别测试粒径为 $75 \mu\text{m}$ 级样品在 $\rho=350, 500, 750, 1\ 000, 1\ 500, 2\ 000, 2\ 500 \text{ g/m}^3$, $w_{oc}=21\%, 20\%, 19\%, 18\%, 17\%, 16\%, 15\%$ 时的爆炸情况。

由图 13、14 知, 随着氧含量的降低, 爆炸压力逐步降低, 氧含量由 21% 降至 16%, p_{\max} 由 0.590 MPa 降至 0.074 MPa。继续降低氧含量至 15% 时, 测得爆炸压力为 0.047 MPa, 该值小于 0.050 MPa, 此时判定系统未发生爆炸, 如图 15 所示, 即 LK 样品的极限氧含量为 16%, 高于褐煤 ($w_v=37.45\%$) 的极限氧含量 12%^[17]。

由图 14 可以看出, p 在 w_{oc} 达到一定水平时几乎与 w_{oc} 成线性变化, 然而这种线性关系随着 w_{oc} 的接近而改变, 即爆炸压力会随着 w_{oc} 的降低而迅速下降, 直至不发生爆炸。从图 16 可见, $(dp/dt)_{\max}$ 几乎随 w_{oc} 呈指数变化, 表明了 w_{oc} 对燃烧过程动力学的强烈影响。此外, 惰性气体在可燃组分与氧之间形成屏障, 使活化分子与惰性气体分子撞击时减少了活化能; 同时, 惰性气体含量的增加, 直接导致环境中

w_{oc} 的降低。惰性气体的阻隔、活化能的降低及氧气分子的减少, 综合导致反应温度急剧降低, 直至不再发生燃烧或爆炸。

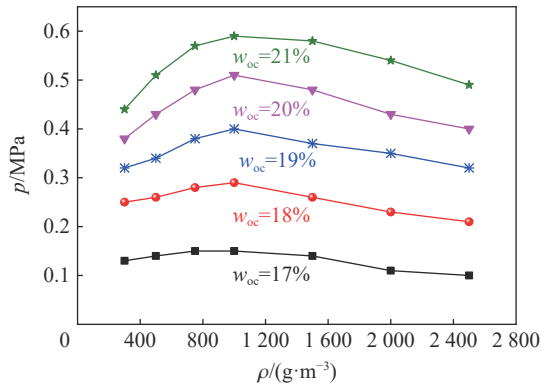


图 13 不同氧含量下, LK 样品的爆炸压力随粉尘云质量浓度的变化

Fig. 13 Explosion pressure of the LK oil shale dust sample at different oxygen contents varying with dust cloud mass concentration

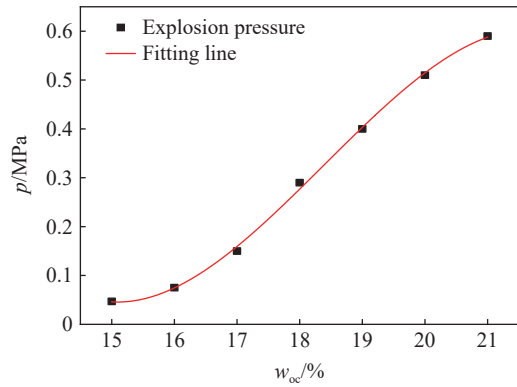


图 14 氧含量对爆炸压力的影响

Fig. 14 Effect of oxygen content on explosion pressure

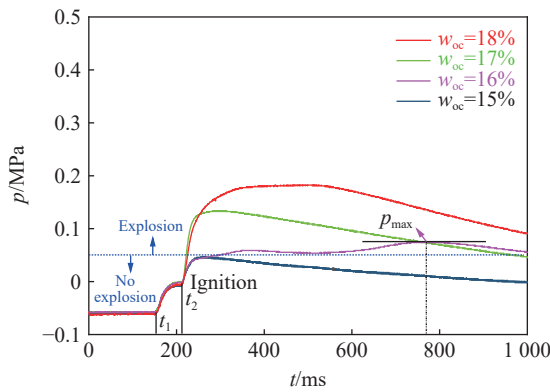


图 15 不同氧含量下爆炸压力发展过程

Fig. 15 Development of explosion pressure at different oxygen contents

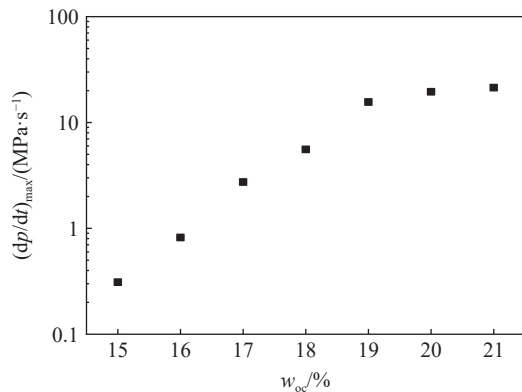


图 16 氧含量对最大压力上升率的影响

Fig. 16 Effect of oxygen content on the maximum rate of pressure rise

3 结 论

(1) 实验所选的龙口(LK)、茂名(MM)、桦甸(HD)和抚顺(FS)4种油页岩样品, 其爆炸下限与其挥发分含量呈负相关, 与灰分含量呈正相关。其中 LK 样品的爆炸下限最低, 为 200 g/m^3 , 远高于挥发分含量相当的褐煤。

(2) 4种样品的最大爆炸压力 p_{\max} 和最大压力上升速率 $(dp/dt)_{\max}$, 在 $37.52 \sim 106.43 \mu\text{m}$ 粒径范围内均随粒径的增大而降低。随着粒径的减小, 达到最大爆炸压力的时间缩短。在测试质量浓度范围内, 4种样品的 p_{\max} 与 $(dp/dt)_{\max}$ 随粉尘质量浓度的升高均呈现为先升高后降低的变化趋势; 在质量浓度高于 1000 g/m^3 的情况下, p_{\max} 和 $(dp/dt)_{\max}$ 呈现下降趋势, 但仍维持在较高水平, 表明此时样品爆炸仍有较强的破坏性。

(3) 油页岩中挥发分和灰分对爆炸特性的影响与煤粉存在较大的不同, 所研究的4种样品的 p_{\max} 和 $(dp/dt)_{\max}$ 呈现出随灰分含量的增加而降低、随挥发分含量增加而升高的变化规律, 且在这4种样品中 LK 样品的 p_{\max} 、 $(dp/dt)_{\max}$ 均最高, 分别达到 0.61 MPa 和 29.32 MPa/s , 与挥发分含量相当的褐煤在同一水平。

(4) 在 N_2 惰化条件下, LK 样品随着氧含量的降低, 爆炸压力逐步降低, 氧含量降至 16% 时, 爆炸压力为 0.074 MPa, 氧含量至 15% 时, 系统不再发生爆炸, 即 LK 样品的极限氧含量为 16%, 高于褐煤的。

参考文献:

- [1] ECKHOFF R K. Understanding dust explosions: the role of powder science and technology [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2009, 22(1): 105–116. DOI: 10.1016/j.jlp.2008.07.006.
- [2] JOSEPH G. Combustible dusts: a serious industrial hazard [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, 142(3): 589–591. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2006.06.127.
- [3] JIANG H P, BI M S, LI B, et al. Inhibition evaluation of ABC powder in aluminum dust explosion [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2019, 361: 273–282. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2018.07.045.
- [4] LIN S, LIU Z T, QIAN J F, et al. Comparison on the explosivity of coal dust and of its explosion solid residues to assess the severity of re-explosion [J]. *Fuel*, 2019, 251: 438–446. DOI: 10.1016/j.fuel.2019.04.080.
- [5] ECKHOFF R K. Scaling of dust explosion violence from laboratory scale to full industrial scale: a challenging case history from the past [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2015, 36: 271–280. DOI: 10.1016/j.jlp.2014.12.020.
- [6] 李刚, 杨红霞, 于立富. 油页岩利用过程粉尘爆炸研究现状及趋势分析 [J]. *中国安全生产科学技术*, 2015, 11(10): 38–42. DOI: 10.11731/j.issn.1673-193x.2015.10.007.
LI G, YANG H X, YU L F. Current status and trend analysis of dust explosion research in utilizing process of oil shale [J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2015, 11(10): 38–42. DOI: 10.11731/j.issn.1673-193x.2015.10.007.
- [7] 孟祥豹, 王俊峰, 张延松, 等. 惰性粉体对油页岩粉尘爆炸火焰的抑制性能和作用机理研究 [J]. *爆炸与冲击*, 2021, 41(10): 105401. DOI: 10.11883/bzycj-2020-0306.
MENG X B, WANG J F, ZHANG Y S, et al. Study on the inhibitory property and mechanism of inert powder on dust explosion flame of oil shale [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2021, 41(10): 105401. DOI: 10.11883/bzycj-2020-0306.
- [8] YU L F, LI G, LIU W C, et al. Experimental investigations on ignition sensitivity of hybrid mixtures of oil shale dust and syngas [J]. *Fuel*, 2017, 210: 1–7. DOI: 10.1016/j.fuel.2017.06.082.
- [9] HAMDAN M A, SAKHRIEH A. Dust explosion of oil shale and olive cake solid fuels: a comparison study [J]. *International Journal of Energy Research*, 2010, 29(10): 871–878. DOI: 10.1002/er.1055.
- [10] SWEIS F K. The effect of admixed material on the minimum explosible concentration of oil shale [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2006, 19(6): 701–704. DOI: 10.1016/j.jlp.2006.04.003.
- [11] WANG J F, ZHANG Y S, SU H F, et al. Explosion characteristics and flame propagation behavior of mixed dust cloud of coal dust and oil shale dust [J]. *Energies*, 2019, 12(20): 3807–3814. DOI: 10.3390/en12203807.
- [12] LIU B, ZHANG Y Y, MENG X B, et al. Study on explosion characteristics of the inert substances at Longkou oil shale of China [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2020, 136: 324–333. DOI: 10.1016/j.psep.2019.12.033.
- [13] 韩放, 鲍明福, 高健. 抚顺式油页岩干馏炉安全性分析与评价 [C]//中国职业安全健康协会 2009 年学术年会论文集. 厦门: 煤炭工业出版社, 2009: 5.
- [14] 郭文杰. 油页岩干馏炉物料安全生产基础参数研究 [D]. 辽宁阜新: 辽宁工程技术大学, 2011: 35–37.
- [15] ASTM International. Standard test method for minimum explosible concentration of combustible dust: ASTM E1515–14 [S]. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International, 2014: 1–6. DOI: 10.1520/E1515-14.
- [16] LI Q Z, WANG K, ZHENG Y N, et al. Experimental research of particle size and size dispersity on the explosibility characteristics of coal dust [J]. *Powder Technology*, 2016, 292: 290–297. DOI: 10.1016/j.powtec.2016.01.035.
- [17] 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. DOI: 10.1016/j.jlp.2013.04.012.
- [18] ASTM International. Standard test method for explosibility of dust clouds: ASTM E1226–19 [S]. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International, 2019: 2–4. DOI: 10.1520/E1226-19.
- [19] 曹卫国. 褐煤粉尘爆炸特性实验及机理研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2016: 73–74.
CAO W G. Experimental and mechanism study on explosion characteristic of lignite coal dust [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2016: 73–74.
- [20] 于立富, 李刚, 潘超, 等. 中国油页岩粉尘爆炸特性实验研究 [J]. *东北大学学报 (自然科学版)*, 2016, 37(8): 1203–1206.

- DOI: 10.3969/j.issn.1005-3026.2016.08.028.
- YU L F, LI G, PAN C, et al. Experimental research on China's oil shale dust explosibility [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2016, 37(8): 1203–1206. DOI: 10.3969/j.issn.1005-3026.2016.08.028.
- [21] 刘雪岭, 张奇. 密闭空间煤粉气动分散湍流对爆炸参数的影响规律 [J]. *煤炭学报*, 2018, 43(11): 3137–3144. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2018.0099.
- LIU X L, ZHANG Q. Influence of turbulence flow on explosion characteristics of coal dust in 20 L vessel [J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(11): 3137–3144. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2018.0099.
- [22] CLONEY C T, RIPLEY R C, PEGG M J, et al. Laminar combustion regimes for hybrid mixtures of coal dust with methane gas below the gas lower flammability limit [J]. *Combustion and Flame*, 2018, 198: 14–23. DOI: 10.1016/j.combustflame.2018.09.004.
- [23] 刘天奇, 李雨成, 罗红波. 不同变质程度煤尘爆炸压力特性变化规律实验研究 [J]. *爆炸与冲击*, 2019, 39(9): 155–162. DOI: 10.11883/bzycj-2018-0265.
- LIU T Q, LI Y C, LUO H B. Experimental study on explosion pressure variation law of coal dust with different degrees of metamorphism [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2019, 39(9): 155–162. DOI: 10.11883/bzycj-2018-0265.
- [24] WANG X, ZHANG Y S, LIU B, et al. Effectiveness and mechanism of carbamide/fly ash cenosphere with bilayer spherical shell structure as explosion suppressant of coal dust [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2019, 365: 555–564. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2018.11.044.
- [25] 喻健良, 孙会利, 纪文涛, 等. 甲烷/石松子两相混合体系爆炸强度参数 [J]. *爆炸与冲击*, 2018, 38(1): 92–97. DOI: 10.11883/bzycj-2016-0276.
- YU J L, SUN H L, JI W T, et al. Explosion severity parameters of hybrid mixture of methane and lycopodium dust [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2018, 38(1): 92–97. DOI: 10.11883/bzycj-2016-0276.
- [26] ECKHOFF R K. Dust explosion prevention and mitigation, status and developments in basic knowledge and in practical application [J]. *International Journal of Chemical Engineering*, 2009, 2009: 569825. DOI: 10.1155/2009/569825.
- [27] TSAI Y T, HO S C, HUANG A C, et al. Potential explosion hazard of polyester resin dust formed from a granulation process: limiting oxygen concentration with different pressures [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2018, 135: 74–82. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2018.02.047.
- [28] MIYAMOTO K, HUANG X Y, HASHIMOTO N, et al. Limiting oxygen concentration (LOC) of burning polyethylene insulated wires under external radiation [J]. *Fire Safety Journal*, 2016, 86: 32–40. DOI: 10.1016/j.firesaf.2016.09.004.
- [29] GOING J E, CHATRATHI K, CASHDOLLAR K L. Flammability limit measurements for dusts in 20-L and 1-m³ vessels [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2000, 13(3/4/5): 209–219. DOI: 10.1016/S0950-4230(99)00043-1.
- [30] 国家煤炭工业局. 煤尘爆炸极限氧含量测定方法: MT/T 837–1999 [S]. 北京: 中国煤炭工业出版社, 2000: 1–2.

(责任编辑 张凌云)