

DOI: 10.11883/bzycj-2018-0265

# 不同变质程度煤尘爆炸压力特性 变化规律实验研究\*

刘天奇<sup>1</sup>, 李雨成<sup>2</sup>, 罗红波<sup>2</sup>

(1. 沈阳航空航天大学安全工程学院, 辽宁 沈阳 110136;

2. 辽宁工程技术大学安全科学与工程学院, 辽宁 阜新 123000)

**摘要:** 为研究不同变质程度煤尘爆炸压力特性变化规律, 以最大压力  $p_{\max}$  和最大压力上升速率  $(dp/dt)_{\max}$  表征压力特性, 使用近球形煤尘爆炸装置对褐煤、长焰煤、不黏煤和气煤的爆炸压力特性变化规律展开分析。研究发现: 在4种煤尘样品中, 褐煤的  $p_{\max}$  和  $(dp/dt)_{\max}$  均最大, 分别达 0.71 MPa 和 65.69 MPa/s。随变质程度增大, 长焰煤、不黏煤和气煤的  $p_{\max}$  和  $(dp/dt)_{\max}$  均明显减小, 说明以爆炸压力特性为标准, 4种煤尘爆炸强度由高到低依次是褐煤、长焰煤、不黏煤和气煤。通过对比爆炸前后煤尘挥发分含量, 得出参与爆炸的挥发分含量所占质量分数为 46.28%~68.19%。在喷尘压力  $p_0=2.0$  MPa, 点火延迟时间  $t_0=100$  ms 时, 4种煤尘  $p_{\max}$  值均达最大, 分别为 0.71、0.60、0.55 和 0.47 MPa。褐煤、不黏煤和气煤在  $p_0=2.0$  MPa,  $t_0=80$  ms 时  $(dp/dt)_{\max}$  达最大, 而长焰煤则在  $p_0=2.0$  MPa,  $t_0=100$  ms 时  $(dp/dt)_{\max}$  达到最大。

**关键词:** 煤尘爆炸; 压力特性; 喷尘压力; 点火延迟时间

**中图分类号:** O381; X936

**国标学科代码:** 13035

**文献标志码:** A

煤尘爆炸特性主要由煤尘爆炸着火敏感特性和强度特性两方面组成<sup>[1]</sup>。前者反映了煤尘爆炸的着火难易程度, 从爆炸发生概率角度描述爆炸发生的可能性, 而后者反映了煤尘爆炸的猛烈程度, 从爆炸后波及范围和损伤程度描述爆炸产生的威力及造成的破坏性<sup>[2-3]</sup>。体现煤尘爆炸强度特性的因素很多, 包括爆炸火焰、压力、温度、冲击气流等<sup>[4]</sup>, 本文中以煤尘爆炸压力特性为出发点, 考虑到影响煤尘爆炸压力特性的因素众多, 很多情况下某些因素的变化会极大影响爆炸强度, 甚至改变爆炸性质, 例如: 某些因素改变后爆炸不再发生, 或由简单的轻爆转为爆燃, 甚至由相对温和的爆燃转为猛烈爆轰等<sup>[5-6]</sup>。而爆炸强度特性的变化特征往往呈现出显著的变化规律性, 因此研究不同变质程度煤尘爆炸压力特性变化规律, 对探索煤尘爆炸发展过程及发展有效防爆技术意义重大。

目前在煤尘爆炸强度特性方面, Eckhoff<sup>[7]</sup> 分析了粒径分散度、粉尘云聚合度、粉尘云浓度和湍流度对爆炸强度的影响; 蔡周全等<sup>[8]</sup> 研究了 658 m 巷道中瓦斯煤尘爆炸冲击波能量和传播速度的衰减规律; 刘贞堂<sup>[9]</sup> 使用 20 L 球形爆炸容器分析了煤尘爆炸火焰场和温度场的变化过程; 司荣军<sup>[10]</sup> 使用大型实验巷道研究了煤尘爆炸火焰和压力的传播特性; 刘义等<sup>[11]</sup> 使用 3.2 L 管体研究了瓦斯含量、煤尘种类和粒径对煤尘爆炸下限浓度的影响; 曹卫国等<sup>[12]</sup>、程磊<sup>[13]</sup> 分别采用半封闭竖直管、单向分叉管研究了煤尘爆炸火焰特性。综上所述, 目前对煤尘爆炸强度特性的研究已取得一定进展, 但对不同变质程度煤尘爆炸压力特性的变化规律尚未充分展开研究。

鉴于此, 本文中选取褐煤、长焰煤、不黏煤、气煤 4 种不同变质程度的煤尘样品为研究对象, 以近球形空间内煤尘爆炸最大压力和最大压力上升速率表征爆炸强度, 探究褐煤、长焰煤、不黏煤、气煤 4 种煤质的煤尘爆炸压力特性随喷尘压力、点火延迟时间的变化规律。结合煤尘爆炸影响因素复杂多变的特征, 在充分发挥实验装置的实验周期短和便于重复的优势基础上, 分析不同测试参数条件下爆炸压力特性的变化规律。

\* 收稿日期: 2018-07-18; 修回日期: 2018-09-18

基金项目: 国家自然科学基金(51774168); 博士科研启动基金(18YB37)

第一作者: 刘天奇(1990—), 男, 博士, 讲师, [ltq613@163.com](mailto:ltq613@163.com)。

## 1 煤尘爆炸压力特性测试装置与测试原理

### 1.1 煤尘爆炸压力特性测试装置

煤尘爆炸压力特性是煤尘爆炸强度的重要体现。煤尘爆炸压力特性主要包括爆炸最大压力  $p_{\max}$  和最大压力上升速率  $(dp/dt)_{\max}$  两项参数,两者受实验工况和爆炸条件等因素的影响,具有很强的变化性和波动性,具有通过实验分析展开变化规律研究的价值。参照国家相关标准《GB/T 16426-1996 粉尘云最大爆炸压力和爆炸指数测定方法》<sup>[14]</sup>,采用国际上通用的煤尘爆炸压力特性测试装置,开展实验研究。从图1可以看出,该装置主要由自动喷尘、点火数据采集、数据无线传输及自动水循环降温模块构成,可自动绘制压力-时间曲线。装置为双层不锈钢结构,容积为20 L,粉尘贮槽容积为0.6 L,压力检测范围为-0.1~2.0 MPa,检测精度为0.001 MPa,数据采集时间间隔为0.2 ms,最大采样深度12 s。

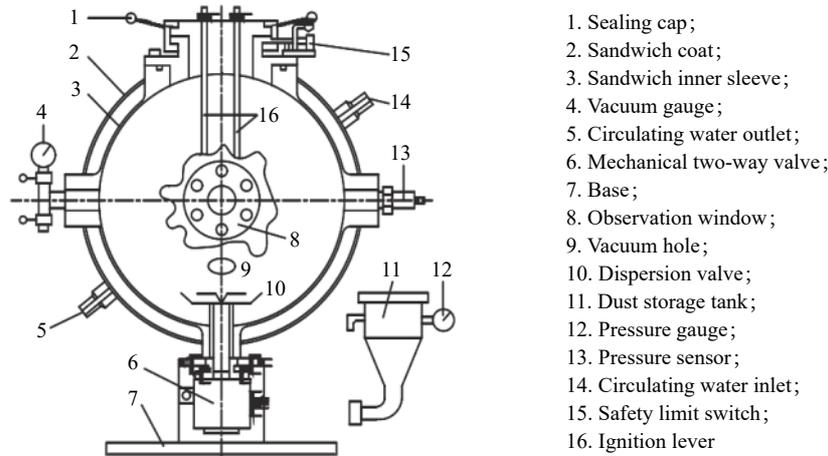


图1 爆炸压力特性测试装置结构示意图

Fig. 1 Structural sketch of the test device for explosion pressure characteristics

### 1.2 煤尘爆炸压力特性测试原理

在测试煤尘爆炸压力特性时,喷尘压力和点火延迟时间是影响煤尘入射速度和点火瞬间煤尘云湍流程度的重要参数。喷尘压力默认设置为2.0 MPa;点火延迟时间默认设置为100 ms,该值可在0~1 000 ms范围内调控。实验装置在喷尘压力的作用下,利用压缩空气将贮槽中的煤尘吹送到20 L球体中,在达到点火延迟时间后,2个5 kJ的化学点火头同时点火,通过直径为20 mm的圆形石英玻璃窗判断爆炸情况,随后压力特性检测单元开始检测记录数据,并无线传输到数据接收端,数据可转存到Excel做进一步分析。装置下端配有取样接口,具有自动排除残粉功能。该装置的优点主要有自动喷粉、数据自动采集处理、快速循环水降温、无线监控、人机分离保证人身安全等。

## 2 不同变质程度煤尘爆炸压力特性的变化规律

### 2.1 不同变质程度煤尘爆炸压力特性的变化

为便于观测不同变质程度煤尘爆炸压力特性并分析其变化规律,选取的煤质为褐煤、长焰煤、不黏煤和气煤。每次实验在贮槽中放置的煤尘质量为10 g,在球体内分散均匀的前提下,煤尘云浓度可达500 g/m<sup>3</sup>。实验工况为:煤尘粒径,75 μm;喷尘压力  $p_0$ , 2.0 MPa;点火延迟时间  $t_0$ , 100 ms;点火能量,10 kJ。4种煤质的煤尘爆炸压力  $p$  随时间  $t$  的变化情况如图2所示,将最大压力  $p_{\max}$  和最大压力上升速率  $(dp/dt)_{\max}$  汇总于表1。

从图2和表1可以看出:在所选取的4种不同变质程度的煤尘样品中,变质程度最低的褐煤的  $p_{\max}$  最大,达到0.71 MPa。而随变质程度升高,长焰煤、不黏煤和气煤的  $p_{\max}$  依次明显降低,分别为

0.60、0.55 和 0.47 MPa; 而在最大压力上升速率方面, 褐煤的  $(dp/dt)_{\max}$  也是最大, 达到 65.69 MPa/s。随变质程度升高, 长焰煤、不黏煤和气煤的  $(dp/dt)_{\max}$  依次减小。上述分析结果说明: 在同等测试条件下, 以爆炸最大压力和最大压力上升速率为标准, 褐煤、长焰煤、不黏煤和气煤的爆炸强度依次降低。

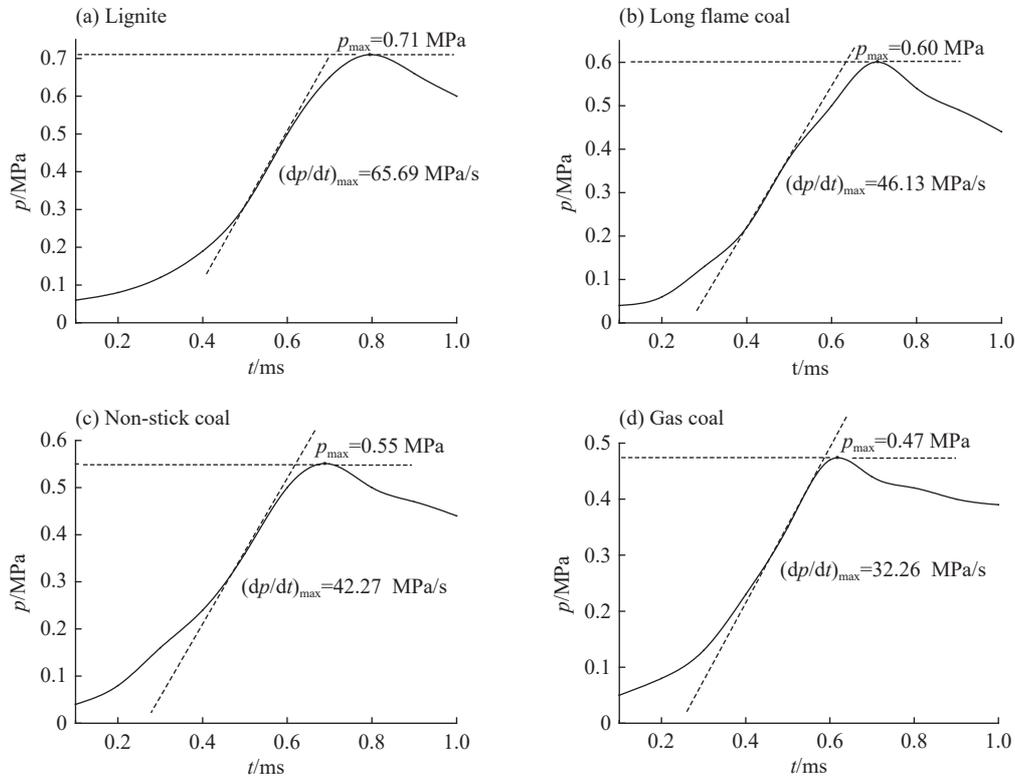


图 2 煤尘爆炸压力随时间变化情况

Fig. 2 Temporal evolution of coal dust explosion pressure

表 1 不同煤质煤尘爆炸压力特性测试数据

Table 1 Explosion pressure characteristics of coal dust with different metamorphism

煤质	爆炸压力特性		煤质	爆炸压力特性	
	$p_{\max}/\text{MPa}$	$(dp/dt)_{\max}/(\text{MPa}\cdot\text{s}^{-1})$		$p_{\max}/\text{MPa}$	$(dp/dt)_{\max}/(\text{MPa}\cdot\text{s}^{-1})$
褐煤	0.71	65.69	不黏煤	0.55	42.27
长焰煤	0.60	46.13	气煤	0.47	32.26

## 2.2 爆炸前后不同煤质煤尘挥发分含量对比

20 L 近球形煤尘爆炸压力特性测试装置下端配有取样接口, 可收集到爆炸后的残尘样品。将 4 种煤样爆炸后的残尘干燥后, 重新进行煤样工业分析测试, 并将结果与原煤样进行对比, 见表 2。由表 2 可以看出: 4 种煤尘爆炸后挥发分含量均大幅度下降, 其中, 褐煤样品参与爆炸的挥发分含量所占质量分数最大, 达到 68.19%, 长焰煤参与爆炸的挥发分含量所占质量分数为 58.33%, 而不黏煤和气煤参与爆炸的挥发分含量所占质量分数相对较小且较接近, 分别达到 46.28% 和 47.65%。

通过上述爆炸前后煤样挥发分含量对比分析, 可知在所选用的 4 种样品中, 参与爆炸的挥发分含量所占的质量分数范围为 46.28%~68.19%, 该结果对判定爆炸现场煤尘是否参与爆炸反应及确定爆炸波及的空间范围具有重要意义。

表 2 爆炸前后不同煤质煤尘挥发分含量对比

Table 2 Comparison of volatile content among coal samples with different metamorphisms before and after explosion

煤质	挥发分含量/%		参与爆炸比例/%	煤质	挥发分含量/%		参与爆炸比例/%
	爆炸前	爆炸后			爆炸前	爆炸后	
褐煤	36.88	11.73	68.19	不黏煤	30.27	16.26	46.28
长焰煤	32.55	16.16	58.33	气煤	35.26	18.46	47.65

### 3 爆炸压力特性随喷尘压力和点火延迟时间的变化

在基于 20 L 球形装置的煤尘爆炸压力特性实验中, 喷尘压力与点火延迟时间是影响密闭空间内点火瞬间煤尘云湍流程度的两项重要实验工况参数, 两者与爆炸压力特性的关系十分密切。为定量探究这一关系, 在保持其他实验工况不变的前提下, 分别设置喷尘压力  $p_0$  为 1.8、2.0 和 2.2 MPa, 设置点火延迟时间  $t_0$  为 60、80、100 和 120 ms, 将实测结果汇总于表 3~4, 并绘制出关系图如图 3~4 所示, 以下分别从最大压力和最大压力上升速率两方面展开变化规律分析。

表 3 不同实验工况下煤尘爆炸最大压力

Table 3 Maximum pressure of coal dust explosion under different test conditions

煤质种类	$p_0/\text{MPa}$	$p_{\max}/\text{MPa}$			
		$t_0=60\text{ ms}$	$t_0=80\text{ ms}$	$t_0=100\text{ ms}$	$t_0=120\text{ ms}$
褐煤	1.8	0.31	0.58	0.64	0.51
	2.0	0.42	0.65	0.71	0.66
	2.2	0.40	0.61	0.66	0.50
长焰煤	1.8	0.35	0.45	0.52	0.49
	2.0	0.43	0.55	0.60	0.54
	2.2	0.39	0.49	0.55	0.46
不黏煤	1.8	0.22	0.30	0.49	0.36
	2.0	0.29	0.41	0.55	0.44
	2.2	0.25	0.36	0.52	0.41
气煤	1.8	0.14	0.27	0.37	0.29
	2.0	0.21	0.34	0.47	0.36
	2.2	0.16	0.28	0.41	0.32

表 4 不同实验工况下煤尘爆炸最大压力上升速率

Table 4 Maximum pressure rise rate of coal dust explosion under different test conditions

煤质种类	$p_0/\text{MPa}$	$(dp/dt)_{\max}/(\text{MPa}\cdot\text{s}^{-1})$			
		$t_0=60\text{ ms}$	$t_0=80\text{ ms}$	$t_0=100\text{ ms}$	$t_0=120\text{ ms}$
褐煤	1.8	49.75	60.11	58.24	52.07
	2.0	52.87	67.81	65.69	61.22
	2.2	48.17	63.21	61.10	55.87
长焰煤	1.8	25.22	36.80	41.94	33.26
	2.0	32.36	45.29	46.13	39.46
	2.2	29.54	39.79	44.75	36.72
不黏煤	1.8	23.47	40.83	30.29	24.07
	2.0	33.21	45.03	42.27	34.17
	2.2	29.16	41.36	38.69	27.65
气煤	1.8	18.64	31.98	26.28	19.86
	2.0	23.55	37.29	32.26	25.81
	2.2	20.77	33.94	29.83	23.90

#### 3.1 煤尘爆炸最大压力随喷尘压力和点火延迟时间的变化

由表 3 可知: 褐煤、长焰煤、不黏煤和气煤 4 种煤尘在  $p_0$  保持不变、 $t_0$  变化时, 观测到最大爆炸压力时对应的  $t_0$  均为 100 ms, 说明在  $t_0=100\text{ ms}$  时, 煤尘在近球形空间内达到了最佳分散状态, 爆炸强度最高。在  $t_0$  保持不变、 $p_0$  变化时, 观测到 4 种煤尘爆炸最大压力时所对应的  $p_0$  均为 2.0 MPa, 说明在  $p_0=2.0\text{ MPa}$  时, 煤尘在近球形空间内具有最高的初始湍流程度。

综合考虑  $p_0$  和  $t_0$  这两项实验工况参数对最大爆炸压力的影响, 图 3 给出的褐煤、长焰煤、不黏煤和气煤  $p_{\max}$  与  $p_0$ 、 $t_0$  之间的关系式分别为:

$$p_{\max} = -10.556 + 8.805p_0 + 0.05t_0 - 2.09p_0^2 - 0.0002t_0^2 - 0.004p_0t_0 \quad (R^2 = 0.95)$$

$$p_{\max} = -7.78 + 7.05p_0 + 0.03t_0 - 1.69p_0^2 - 0.0001t_0^2 - 0.003p_0t_0 \quad (R^2 = 0.95)$$

$$p_{\max} = -10.556 + 8.805p_0 + 0.05t_0 - 2.09p_0^2 - 0.0002t_0^2 - 0.004p_0t_0 \quad (R^2 = 0.93)$$

$$p_{\max} = -7.45 + 6.50p_0 + 0.03t_0 - 1.63p_0^2 - 0.0001t_0^2 - 0.0007p_0t_0 \quad (R^2 = 0.91)$$

从图 3 可见, 4 种煤样的  $p_{\max}$  拟合函数曲面均有极大值, 分别为 0.71、0.60、0.55 和 0.47 MPa, 相应的测试工况均为  $p_0=2.0$  MPa,  $t_0=100$  ms, 而随  $p_0$  和  $t_0$  在该工况附近不断增大或不断减小,  $p_{\max}$  均逐渐减小, 即爆炸强度随之降低。

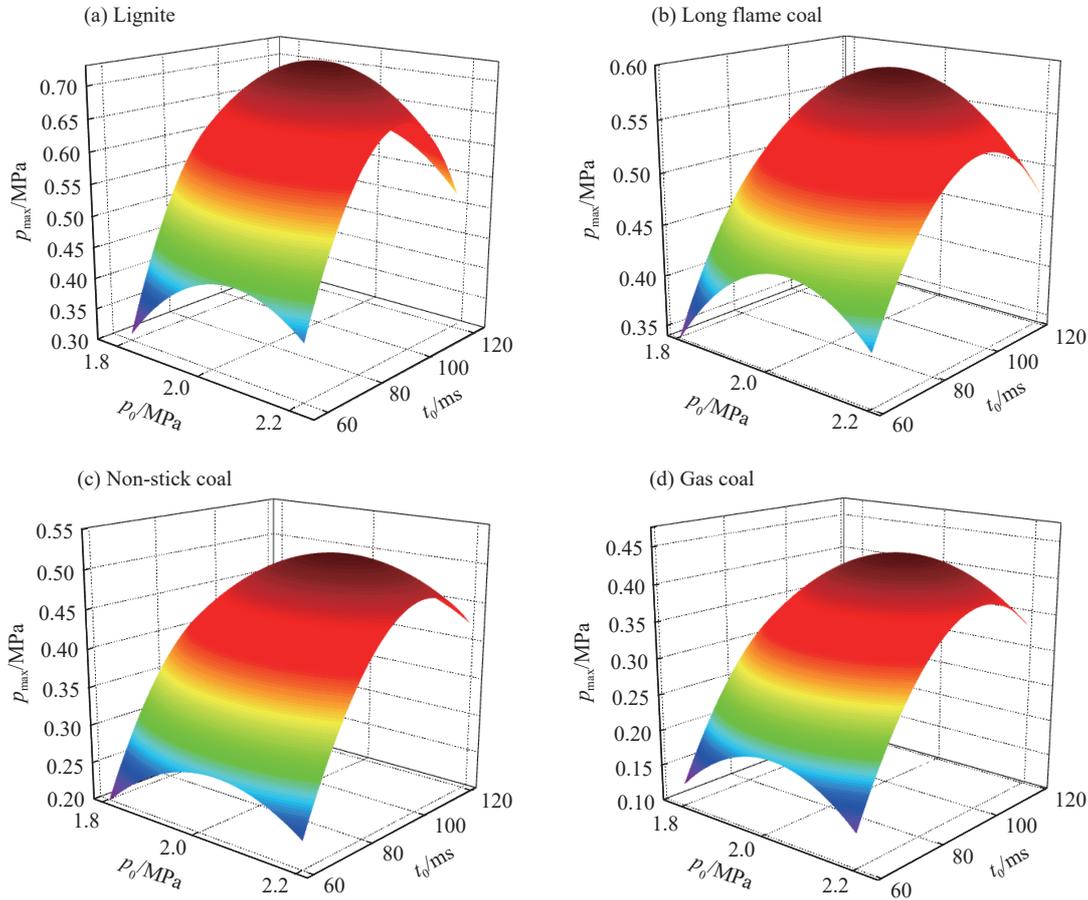


图 3 最大爆炸压力随喷尘压力和点火延迟时间的变化关系

Fig. 3 Maximum explosion pressure  $p_{\max}$  as a function of dispersion pressure  $p_0$  and ignition delay time  $t_0$

### 3.2 煤尘爆炸最大压力上升速率随喷尘压力和点火延迟时间的变化

$(dp/dt)_{\max}$  与  $p_{\max}$  的不同之处在于,  $p_{\max}$  从压力峰值角度体现了爆炸强度, 而  $(dp/dt)_{\max}$  则是从压力变化率最大值的角度体现了爆炸强度。从表 4 可以看出, 4 种煤尘中: 在  $p_0$  保持不变、 $t_0$  变化时, 褐煤、不黏煤和气煤的  $(dp/dt)_{\max}$  达最大时对应的  $t_0$  均为 80 ms, 而长焰煤为 100 ms, 说明在  $t_0=80$  ms 时, 褐煤、不黏煤和气煤的  $(dp/dt)_{\max}$  值相对更大, 而长焰煤在  $t_0=100$  ms 时的  $(dp/dt)_{\max}$  值相对更大。在  $t_0$  保持不变、 $p_0$  变化时, 观测到  $(dp/dt)_{\max}$  最大值时所对应的  $p_0$  均为 2.0 MPa, 这与观测  $p_{\max}$  时的结果一致。

综合考虑  $p_0$  和  $t_0$  这两项实验工况参数对  $(dp/dt)_{\max}$  的影响, 图 4 给出的褐煤、长焰煤、不黏煤和气煤  $(dp/dt)_{\max}$  与  $p_0$ 、 $t_0$  之间的关系式分别为:

$$(dp/dt)_{\max} = -592.15 + 570.48p_0 + 1.79t_0 - 145.81p_0^2 - 0.01t_0^2 + 0.2p_0t_0 \quad (R^2 = 0.93)$$

$$(dp/dt)_{\max} = -566.87 + 492.34p_0 + 2.38t_0 - 120.19p_0^2 - 0.01t_0^2 - 0.03p_0t_0 \quad (R^2 = 0.97)$$

$$(dp/dt)_{\max} = -756.91 + 682.64p_0 + 2.44t_0 - 168.25p_0^2 - 0.01t_0^2 + 0.02p_0t_0 \quad (R^2 = 0.92)$$

$$(\mathrm{d}p/\mathrm{d}t)_{\max} = -470.40 + 406.81p_0 + 2.04t_0 - 101.94p_0^2 - 0.01t_0^2 + 0.09p_0t_0 \quad (R^2 = 0.91)$$

结合  $(\mathrm{d}p/\mathrm{d}t)_{\max}$  与  $p_0$  和  $t_0$  的关系式及拟合曲面 (图4) 可以看出, 4种煤样的  $(\mathrm{d}p/\mathrm{d}t)_{\max}$  在拟合曲面上均有极大值, 分别为 67.81、46.13、45.03 和 37.29 MPa/s, 相应的褐煤、不黏煤和气煤测试工况均为  $p_0=2$  MPa,  $t_0=80$  ms, 长焰煤的测试工况为  $p_0=2$  MPa,  $t_0=100$  ms, 当  $p_0$  和  $t_0$  在相应工况附近不断增大或不断减小时,  $(\mathrm{d}p/\mathrm{d}t)_{\max}$  均逐渐减小, 即爆炸强度随之降低。

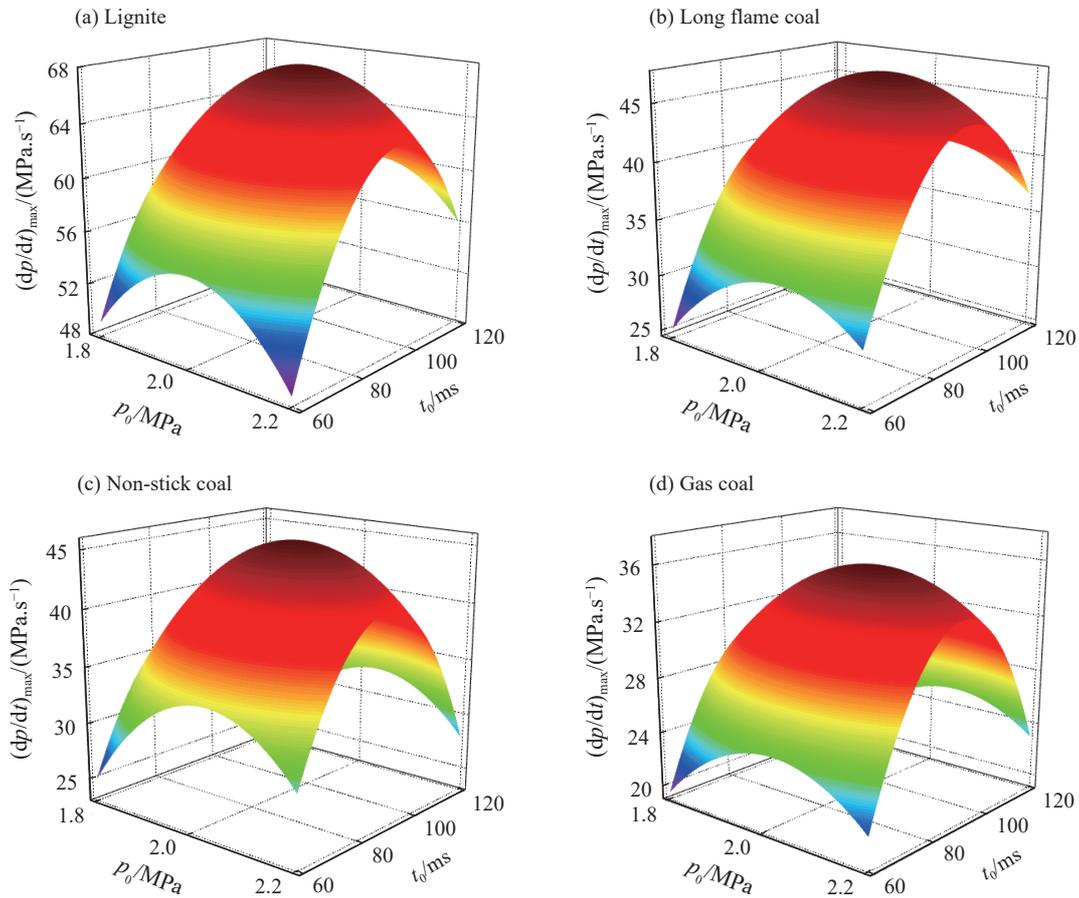


图4 最大爆炸压力上升速率随喷尘压力和点火延迟时间的变化关系

Fig. 4 Maximum pressure rise rate  $(\mathrm{d}p/\mathrm{d}t)_{\max}$  as a function of dispersion pressure  $p_0$  and ignition delay time  $t_0$

### 3.3 不同喷尘压力和点火延迟时间条件下煤尘爆炸压力特性变化的机理

在综合分析了煤尘爆炸最大压力、最大压力上升速率随喷尘压力和点火延迟时间变化规律的基础上, 发现在以爆炸压力特性表征爆炸强度的条件下, 爆炸强度最大的测试工况对应了最佳喷尘压力和最佳点火延迟时间。从煤尘爆炸压力特性变化机理的角度分析可知: 喷尘压力和点火延迟时间对爆炸强度均具有重要影响, 当喷尘压力低于最佳喷尘压力时, 煤尘颗粒在受热点火时的湍流度没有达到最大, 而当喷尘压力设置超过最佳喷尘压力后, 煤尘颗粒受高压气流的喷射作用, 会使点火源头附近的煤尘云浓度低于最佳浓度, 从而减少了整体煤尘云团表面的自由基数量和种类, 降低了煤尘粒子之间的活化能, 进而导致爆炸强度向弱化的趋势发生变化。另一方面, 当点火延迟时间小于或大于最佳点火延迟时间时, 在点火源附近区域的煤尘云均无法达到最佳分散状态和最大湍流度, 因此造成爆炸强度大大降低。上述分析从煤尘爆炸压力特性变化机理的角度解释了最大压力、最大压力上升速率随喷尘压力和点火延迟时间变化的原因。

## 4 结 论

选取褐煤、长焰煤、不黏煤和气煤4种不同变质程度煤尘样品,使用近球形煤尘爆炸实验装置,测试分析了煤尘爆炸最大压力和最大压力上升速率变化规律。

(1)在所选取的4种煤尘样品中,褐煤的爆炸最大压力 $p_{\max}$ 和最大压力上升速率 $(dp/dt)_{\max}$ 均最大,分别达到0.71 MPa和65.69 MPa/s。随变质程度的升高,长焰煤、不黏煤和气煤的 $p_{\max}$ 和 $(dp/dt)_{\max}$ 均明显减小,说明以爆炸最大压力和最大压力上升速率为标准,褐煤、长焰煤、不黏煤和气煤4种煤尘的爆炸强度依次降低。4种煤尘爆炸后挥发分含量均大幅度下降,参与爆炸的挥发分含量所占的质量分数范围为46.28%~68.19%,该结果对判定爆炸现场煤尘是否参与爆炸反应及确定爆炸波及的空间范围具有重要意义。

(2)以最大压力表征爆炸强度的条件下,在喷尘压力 $p_0=2.0$  MPa,点火延迟时间 $t_0=100$  ms时,4种煤尘在近球形空间内达到了最佳分散状态和最大初始湍流度,爆炸强度最高,随 $p_0$ 和 $t_0$ 在该工况附近不断增大或不断减小, $p_{\max}$ 均逐渐减小,即爆炸强度随之降低。通过构建 $p_{\max}$ 与 $p_0$ 、 $t_0$ 之间的三维空间曲面模型,得出4种煤样的 $p_{\max}$ 拟合函数曲面均有极大值,分别为0.71、0.60、0.55和0.47 MPa。

(3)以最大压力上升速率表征爆炸强度的条件下,褐煤、不黏煤和气煤在 $p_0=2.0$  MPa, $t_0=80$  ms时,爆炸强度达最高。而长焰煤在 $p_0=2.0$  MPa, $t_0=100$  ms时,爆炸强度达最高。通过构建 $(dp/dt)_{\max}$ 与 $p_0$ 、 $t_0$ 三维空间曲面模型,得出4种煤样的 $(dp/dt)_{\max}$ 拟合函数曲面均有极大值,分别为67.81、46.13、45.03和37.29 MPa/s。

研究结果对摸清不同测试条件对煤尘爆炸压力特性的影响具有重要意义。

## 参考文献:

- [1] 金龙哲. 矿井粉尘防治理论 [M]. 北京: 科学出版社, 2010: 17-28.
- [2] 毕明树. 气体和粉尘爆炸防治工程学 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2012: 19-32.
- [3] 景国勋, 杨书召. 煤尘爆炸传播特性的实验研究 [J]. *煤炭学报*, 2010, 35(4): 605-608. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2010.04.023.  
JING Guoxun, YANG Shuzhao. Experimental study on flame propagation characteristic of coal dust explosion [J]. *Journal of China Coal Society*, 2010, 35(4): 605-608. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2010.04.023.
- [4] 程卫民. 矿井粉尘防治理论与技术 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2016: 9-21.
- [5] 宁建国, 王成, 马天宝. 爆炸与冲击动力学 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2010: 31-37.
- [6] 司荣军. 矿井瓦斯煤尘爆炸传播规律研究 [D]. 青岛: 山东科技大学, 2007: 8-21.
- [7] 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: 10.2514/6.1993-427.
- [8] 蔡周全, 罗振敏, 程方明. 瓦斯煤尘爆炸传播特性的实验研究 [J]. *煤炭学报*, 2009, 34(7): 938-941. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2009.07.020.  
CAI Zhouquan, LUO Zhenmin, CHENG Fangming. Experimental study on propagation characteristic of gas and coal dust explosion [J]. *Journal of China Coal Society*, 2009, 34(7): 938-941. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2009.07.020.
- [9] 刘贞堂. 瓦斯煤尘爆炸物证特性参数实验研究 [D]. 北京: 中国矿业大学, 2010: 12-31.
- [10] 司荣军. 矿井瓦斯煤尘爆炸传播规律研究 [D]. 青岛: 山东科技大学, 2007: 19-25.
- [11] 刘义, 孙金华, 陈东梁. 甲烷-煤尘复合体系中煤尘爆炸下限的实验研究 [J]. *安全与环境学报*, 2007, 7(4): 129-131. DOI: 10.3969/j.issn.1009-6094.2007.04.033.  
LIU Yi, SUN Jinhua, CHEN Dongliang. Experimental study on the lower limit of coal dust explosion in methane-coal dust composite system [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2007, 7(4): 129-131. DOI: 10.3969/j.issn.1009-6094.2007.04.033.
- [12] 曹卫国, 徐森, 梁济元. 煤粉爆炸过程中火焰的传播特性 [J]. *爆炸与冲击*, 2014, 34(5): 586-593. DOI: 10.11883/1001-1455(2014)05-0586-08.  
CAO Weiguo, XU Sen, LIANG Jiyuan. Flame propagation characteristic of coal dust explosion [J]. *Explosion and Shock*

Waves, 2014, 34(5): 586–593. DOI: 10.11883/1001-1455(2014)05-0586-08.

[13] 程磊. 受限空间煤尘爆炸冲击波传播衰减规律研究 [D]. 焦作: 河南理工大学, 2011: 41–56.

[14] 煤炭工业部煤炭科学研究总院. 粉尘云最大爆炸压力和最大压力上升速率测定方法: GBTT 16426-1996 [S]. 北京: 中国煤炭工业部, 1996.

## Experimental study on explosion pressure variation law of coal dust with different degrees of metamorphism

LIU Tianqi<sup>1</sup>, LI Yucheng<sup>2</sup>, LUO Hongbo<sup>2</sup>

(1. College of Safety Engineering, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, Liaoning, China;

2. College of Safety Science and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, Liaoning, China)

**Abstract:** In order to study the variation law of coal dust explosion pressure with different metamorphic degrees, the maximum pressure  $p_{\max}$  and maximum pressure rise rate  $(dp/dt)_{\max}$  are characterized. The variation of explosion pressure characteristics of lignite, long flame coal, non-coking coal and gas coal is investigated by using a near-spherical coal dust explosion device. It is found that, among the selected coal dust samples, lignite has the largest  $p_{\max}$  and  $(dp/dt)_{\max}$ , up to 0.71 MPa and 65.69 MPa/s, respectively. With the increase of metamorphism, the  $p_{\max}$  and  $(dp/dt)_{\max}$  of long-flame coal, non-coking coal and gas coal are significantly reduced. Characterizing the explosion intensity by the explosion pressure characteristics, the four coal dust explosion strengths are then ranked from lignite, long flame coal, non-coking coal to gas coal. By comparing the volatile matter content of coal dust before and after the explosion, it is concluded that the proportion of volatile matter involved in the explosion is 46.28%–68.19%. At dispersion pressure  $p_0=2.0$  MPa and ignition delay time  $t_0=100$  ms, the  $p_{\max}$  values of the four types of coal dust reach the maximum 0.71, 0.60, 0.55 and 0.47 MPa, respectively. However, lignite, non-viscous coal and gas coal have the highest  $(dp/dt)_{\max}$  at  $p_0=2.0$  MPa and  $t_0=80$  ms, while long-flame coal reaches the maximum  $(dp/dt)_{\max}$  at  $p_0=2.0$  MPa and  $t_0=100$  ms. The results are of significance for mastering explosion pressure characteristics under different test conditions.

**Keywords:** explosion of coal dust; pressure characteristic; pressure of dust injection; ignition delay time

(责任编辑 张凌云)