

沉积煤尘卷扬诱发燃爆过程实验研究¹

范晶¹⁾, 马砺^{1)✉}, 张鹏宇¹⁾, 张庆勇²⁾, 石新慧²⁾

1) 西安科技大学 安全科学与工程学院, 陕西 西安 710054

2) 鄂尔多斯市转龙湾煤炭有限公司, 内蒙古 鄂尔多斯 017205

✉ 通信作者, 马砺, E-mail: mal@xust.edu.cn

摘要 电厂制粉系统运行时具有环境高、设备表面的沉积煤尘易出现热失控的特点, 自然煤尘被卷扬后可能会诱发燃爆。为揭示煤尘在气流卷扬作用下诱发粉尘云燃爆过程, 本研究搭建煤尘燃爆实验装置, 从自然过程及特征参数、卷扬燃爆临界条件、燃爆行为及机制等方面进行了研究。结果表明: 热传导和氧化放热是沉积煤尘自燃过程高温点迁移的主因, 高温点由热表面向上再向下移动; 最高温度、燃烧蔓延和衰减阶段时间随堆积厚度增加而增加, 8 mm、10 mm 厚度下最高温度和燃烧蔓延阶段时间分别为 538 °C、510 °C、810 s、1520 s。煤尘卷扬诱发燃爆包含颗粒分散、喷射传播、燃爆蔓延、熄灭四个阶段, 离散火焰形成并引燃可燃气体形成连续性火焰是喷射传播阶段的重要特征。中心温度为 280 °C~420 °C 的煤尘层卷扬后可诱发燃爆; 随着中心温度的增加, 火焰传播速度先增加后减小, 固体残余物粒径、表面平滑度降低; 爆炸强度随煤尘质量增加先增加后减小。沉积煤尘燃爆是由碳颗粒非均相燃烧和 CO、H₂ 等挥发分均相燃烧共同作用导致, 低浓度、低自燃程度的煤尘燃爆由非均相燃烧主导; 两种点火机制的耦合作用也会造成燃烧不完全、二次引燃和多点火源等现象。本研究对工业制粉系统的自燃诱发爆炸灾害防治提供了理论依据。

关键词 沉积煤尘; 温度演化; 煤尘云燃爆; 火焰传播; 诱发机制

分类号 TD 751

Experimental study on the combustion and explosion process induced by entrainment of deposited coal dust

FAN Jing¹⁾, MA Li^{1)✉}, ZHANG Pengyu¹⁾, ZHANG Qingyong²⁾, SHI Xinhui²⁾

1) College of Safety Science and Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an, Shaanxi 710054, China

2) Ordos Zhuanlongwan Coal Co., Ltd., Erdos, Inner Mongolia Autonomous Region 017205, China

✉ Corresponding author, MA Li, E-mail: mal@xust.edu.cn

ABSTRACT During the operation of pulverizing systems in power plants, the high ambient temperature creates conditions where coal dust deposited on equipment surfaces is prone to thermal runaway. When these self-ignited coal dust particles are lifted by airflow, a significant risk of combustion and explosion is posed. To reveal the process and mechanism of dust cloud explosion induced by airflow entrainment, this study constructed an experimental setup capable of monitoring coal dust self-ignition, dispersion into a dust cloud, and subsequent ignition and explosion. Subsequently, research was conducted on the self-ignition process and characteristic parameters, critical conditions for entrainment-induced explosion, explosion behavior, and underlying mechanisms. The experimental procedure involves first placing the coal powder on a high-temperature flat plate, then using high-pressure airflow to entrain the coal powder into the air under various spontaneous combustion conditions, and subsequently observing the phenomena of spontaneous combustion, explosion, and their transitions. The results indicate that thermal conduction and oxidative heat release are the primary causes of high-temperature spot migration in the self-ignition process of deposited coal dust, with the high-temperature point moving upward from the

收稿日期: 2024-10-XX

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (52174206)

地址: 北京市海淀区学院路 30 号

E-mail: xuebaozr@ustb.edu.cn

邮政编码: 100083

http://cje.ustb.edu.cn

电话: 010-62333436

hot surface and then downward. As the deposition thickness increases, both the peak temperature and the duration of the combustion propagation and decay stages increase, reaching 538°C, 510°C, 810 s, and 1520 s for thicknesses of 8 mm and 10 mm, respectively. The degree of self-ignition and the mass of coal dust significantly influence the occurrence of explosions, with the central temperature representing the self-ignition level. When the central temperature of the coal dust layer ranges from 280°C to 420°C, the entrained coal dust can trigger an explosion. As the central temperature increases, the flame propagation speed first increases and then decreases, while the particle size and surface smoothness of the solid residues decrease. The flame propagation speed of the explosion is the largest at a mass of 6.0 g and a central temperature of 340 °C, which is 4.76m/s. Additionally, the explosion intensity initially increases and then decreases with the increasing coal dust mass, the maximum flame length and flame area occurring at 6.0 g, measuring 26.81 cm and 301.4 cm², respectively. A lower dust mass results in insufficient combustible particles, leading to a decrease in flame intensity, whereas a higher dust mass limits combustion due to inadequate oxygen supply. Furthermore, the combined effects of heterogeneous combustion of carbon particles and homogeneous combustion of volatiles such as CO and H₂ are the primary trigger mechanisms driving the explosion of deposited coal dust. The homogeneous combustion of combustible gases ignites coal dust particles, further promotes the pyrolysis and combustion of coal dust, produces more combustible gases, and strengthens the explosion process. When the coal dust is at a low concentration and low spontaneous combustion degree, the combustion and explosion are dominated by heterogeneous combustion. Additionally, the coupling of these two ignition mechanisms will also lead to incomplete combustion, secondary ignition, and multiple ignition sources. This study provides a theoretical basis for the prevention and control of spontaneous combustion-induced explosion hazards in industrial pulverizing systems.

KEY WORDS deposited coal dust; temperature evolution; coal dust cloud ignition; flame propagation; trigger mechanism

煤炭作为重要的能源之一，在火力发电厂、煤化工等工业生产中被广泛应用^[1]，利用制粉系统将原煤研制成粉并用作二次加工材料是最常见的应用方法^[2, 3]。在生产、输送、贮存过程中，沉积在热表面的煤粉在无点火源的情况下也会因导热发生热失控，当这些高温颗粒被卷扬分散在空中形成粉尘云会显著增加燃爆风险^[4]。因此，研究沉积煤尘卷扬诱发燃爆过程对煤尘燃爆事故防治具有重要意义。

可燃性粉尘燃爆需氧气、点火源、浓度和分散程度等条件，点火源包括电火花、开放火源、人为点火等^[5]。国内外学者对影响煤尘燃爆的因素进行了大量研究，梁运涛^[6]研究煤尘着火引发煤粉云发现，挥发分含量是引燃成功的关键因素。杨前意^[7]探究了诱发煤尘爆炸的含水率临界范围。江丙友^[8]采用密闭管道研究瓦斯爆炸卷扬沉积煤尘爆炸，认为分散程度越好，燃爆压力和火焰传播速度越大。贺杰^[9]发现煤尘云爆炸经过表面燃烧、可燃性挥发气体释放及燃烧、预热煤尘颗粒继续热分解等过程。其中煤尘挥发分析出增加了燃爆强度^[10]。Hou^[11]对比不同挥发分含量的沉积煤尘燃爆结果，发现挥发分和焦炭是决定燃烧过程中均相反应和非均相反应强度的主要因素。李海涛^[12]通过实验和模拟发现煤尘爆炸中均相与非均相燃烧模式可以相互依存和转化。聂百胜^[13]从宏观和微观角度出发，提出气-固-液三相耦合反应过程是引起爆炸的机理。此外，在沉积煤尘卷扬爆炸方面学者们也进行了一定的研究。Hou^[14]采用水平爆炸实验管道研究了不同强度压力波引发煤尘分散和火焰传播特性。Jia^[15]基于瓦斯爆炸引发沉积煤尘爆炸的冲击波传播过程研究，揭示了煤尘云在高温高压条件下可燃气体分解和碳颗粒爆炸的发生次序和强度。Chen^[16]在其基础上采用大型巷道研究瓦斯卷积煤尘燃爆过程，发现参与燃烧反应的煤尘越多，爆炸波能增长速度越快。Li^[17]发现随着煤尘含量的增加，沉积煤尘卷扬燃烧的火焰锋面减小。Song^[18, 19]采用封闭管道模拟气体和激波引发沉积粉尘爆炸过程，认为煤粉扬起形成悬浮煤尘后更容易发生爆炸。李雨成^[20]发现瓦斯爆炸冲击后在沉积煤粉上方瞬间形成的压力差是沉积煤粉扬起的主要动力。黄文仕^[21]认为强湍流混合会改变煤粉的升温、脱挥发分、焦炭燃烧等过程，进而影响着火延迟、火焰结构和等问题。刘静平^[22]研究了煤尘爆炸的火焰传播发现热解产物和氧气的结合会进一步加快煤尘燃烧和火焰传播。Qian^[23]对煤尘云燃烧气体产物进处理后得到煤尘燃烧的主要气态产物是 CO、H₂、CH₄。Sahu^[24]发现随

着煤尘云着火温度的升高，燃烧时间越短。Niu [25]基于直管爆炸系统发现煤尘爆炸后的超压峰值和火焰传播速度随煤尘含水率的增加先增大后减小。Liu [26]利用卧式玻璃管爆炸装置发现随着沉积煤尘重量增加，火焰传播距离和持续时间先增大后减小。在数值模拟方面，李山山 [27]研究了煤粉颗粒在气固两相流的作用下的弥散过程，验证了湍流效应和颗粒粒径对煤粉运动的影响。Liu [28]模拟了密闭空间内的煤尘爆炸，发现粒径对煤尘云着火特性影响显著。Santosh Kumar [29]基于离散颗粒模型（DPM）模拟了煤尘颗粒在 20 L 球中爆炸扩散过程。Rao [30]模拟发现非均相燃烧是矿尘爆炸的主要控制机制。

综上所述，煤矿巷道瓦斯爆炸引起的沉积煤尘卷扬和爆炸过程，以及点火能量、最佳点火时机、爆炸强度等特征参数是当前研究热点，无外界点火源的煤尘燃爆研究较少。在电厂制粉系统中，如磨煤机和输粉管道内沉积的煤尘也可能发生自燃。当吹扫气流作用时，自燃的煤尘可能被分散形成含有着火颗粒的煤尘云，具有演变为燃爆事故的潜在风险。因此，本文聚焦于煤尘层自燃演化及煤尘颗粒分散、着火、燃爆过程，深入探究煤尘质量和自燃程度对煤尘云燃爆后火焰传播、最大温度、燃爆产物等特征的影响，并揭示沉积煤尘诱发燃爆的动力学过程。研究旨在为防治工业中煤炭制粉输送系统的煤尘燃爆事故提供理论支持。

1 实验设置

1.1 实验装置

基于 ASTM E2021-2015 热板点火装置 [31]和 ASTM E1491-06（2019）中 BAM 炉 [32]装置，设计搭建了煤尘燃爆实验装置，如图 1 所示。装置由燃烧室、加热板、喷粉系统、数据采集系统、高速摄像机组成。燃烧室容积 45 L，由长方体和圆柱体腔体连接组成，长方体腔体尺寸为 15 cm×15 cm×30 cm，圆柱体腔体半径 15 cm，长度 45cm，装置右侧敞开。在燃烧室前方设 12 cm×26 cm、14 cm×30 cm 视窗用于高速摄像机记录火焰传播，高速摄像机的像素分辨率为 1280×960，曝光时间 200um，帧率为 1000 帧/s。加热板垂直方向上间距 2 mm 布置 3 个 K 型热电偶，在燃烧室中心线上水平布置 3 个 R 型热电偶，分别为 P1、P2、P3，距离圆柱体部分左侧边缘分别为 30、90、150 mm。燃烧室上方设一个导管用于燃爆气体采集。

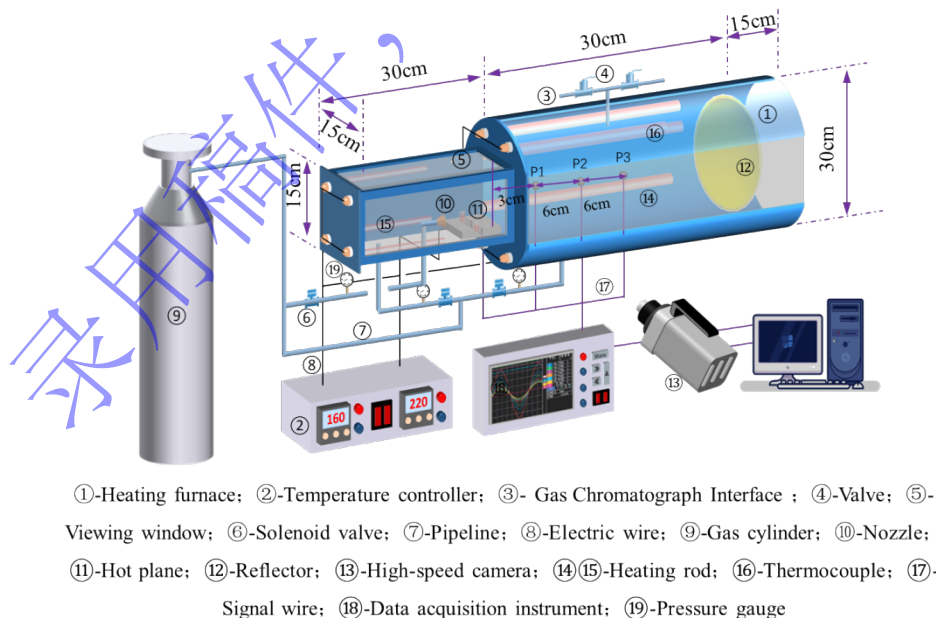


图 1 煤尘燃爆试验系统图

Fig. 1 Coal dust ignition and explosion test system

1.2 实验材料

选取鲁新煤矿褐煤作为实验样品，利用破碎机和筛分机获取经 150 目筛分的煤尘，其工业分析和元素分析结果如表 1。利用 Malvern Mastersizer 2000 激光粒度分析仪、扫描电子显微镜(SEM)、比表面积分析仪等设备对样品的粒度分布和形貌进行测试，结果如图 2、图 3 所示。

表 1 煤的工业分析和元素分析

Table 1 Industrial and Elemental Analysis of Coal

Mad/%	Aad/%	Vad/%	FCad/%	S/%	N/%	C/%	H/%	O/%
11.97	4.55	35.98	46.12	0.11	0.54	46.56	4.70	48.09

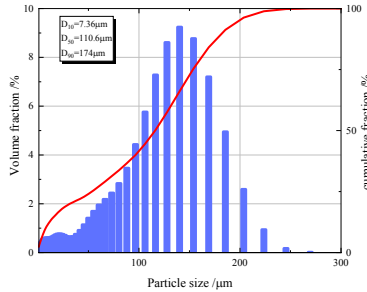


图 2 粒径分布分析图

Fig. 2 Particle size analysis of coal dust samples

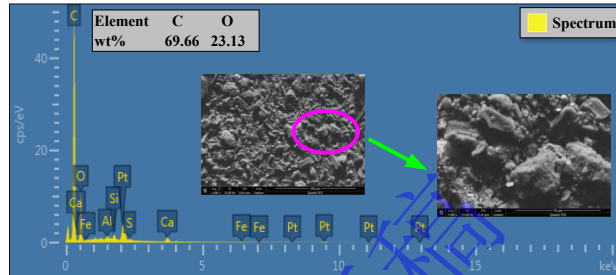


图 3 原煤 EDS 和 SEM 结构

Fig. 3 EDS and SEM structure of raw coal

煤尘样品的中位粒径为 110.6 μm ，主要成分为 C、O，占比分别为 69.66%、23.13%，爆炸前颗粒以块状分布为主，棱角分明，表面较为平滑，多点 BET 比表面积为 4.49 m^2/g 。

1.3 实验工况

标准 ASTM E2021-2015 规定，粉尘层中心温度是确定热板上粉尘自燃发生和最小点火温度的关键参数，当热板温度超过煤尘层的最小点火温度，就会出现热失控而发生自燃。Li^[33, 34]发现室温下煤粉层的最小点火温度为 200~220 $^{\circ}\text{C}$ ，根据磨机运行方式和煤质的不同，磨机故障时出口温度在 130~190 $^{\circ}\text{C}$ 之间^[35]。当煤尘层的半径远大于厚度，热板与煤尘能量传递以一维热传导为主，这在热板测试中被广泛接受^[36-39]。

因此，本文设定燃烧室温度为 160 $^{\circ}\text{C}$ 模拟制粉系统发生煤粉自燃的环境温度，设置喷射压力为 0.6MPa，喷射时间为 0.5s 模拟吹扫瞬间状态。实验中先将样品放置在加热板上方高度为 8 mm 和 10 mm 不锈钢环内并将上表面刮平，实验中采用煤尘层中心温度表征其自燃程度，当其超过热板温度（220 $^{\circ}\text{C}$ ）时，采用细铁丝将金属圆环向上提起，同时开启喷粉系统，利用高压空气将煤尘卷扬至燃烧室中；当分散煤尘燃烧火焰长度大于 60 mm，则判定为燃爆发生。煤尘中心温度以步长 20 $^{\circ}\text{C}$ 逐次进行试验，记录卷扬后发生燃爆的中心温度，结果如表 2 所示，其中“Y”为发生燃爆，“N”为未发生。

表 2 煤尘卷扬燃爆发生温度

Table 2 Coal dust dispersion explosion results

m/g	h/mm	Coal dust central temperatures / $^{\circ}\text{C}$									
		260	280	300	320	340	360	380	400	420	440
5	8	N	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	N	N
6	8	N	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	N	N
7	10	N	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	N
8	10	N	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	N

由表 2 可知，自燃煤尘中心温度范围为 280 $^{\circ}\text{C}$ ~420 $^{\circ}\text{C}$ 时卷扬后可发生燃爆，当自燃程度较低时，高温煤尘颗粒数量少，释放的热量不足以引燃可燃气体和固定炭颗粒，反之自燃煤尘中活性物质被大量消耗，形成煤尘云难以被引燃。此外，煤尘厚度越大，相同温度时内部的煤尘颗粒活性物质越多，因此厚度 10mm 煤尘发生燃爆的中心温度上限增加至 420 $^{\circ}\text{C}$ 。

基于以上分析，本文以中心温度为 280 $^{\circ}\text{C}$ ~420 $^{\circ}\text{C}$ 的自燃煤尘层为对象研究卷扬后的燃爆特性，共设置 36 组实验，实验工况如表 3。

表 3 实验工况

Table 3 Experimental conditions

Condition	Mass/m/g	Thickness/h/mm	Central temperature of coal dust / $^{\circ}\text{C}$
1-9	5.0	8	无卷扬、

10-18	6.0	8	280、300、320、340、360、380、400、420
19-27	7.0	10	
28-36	8.0	10	

2 结果和讨论

2.1 沉积煤尘自燃演化过程

煤尘内部温度是自燃程度的重要指标和卷扬后燃爆发生的关键因素，图 4 显示了厚度为 8 mm 和 10 mm 煤尘层内部温度随时间的变化。

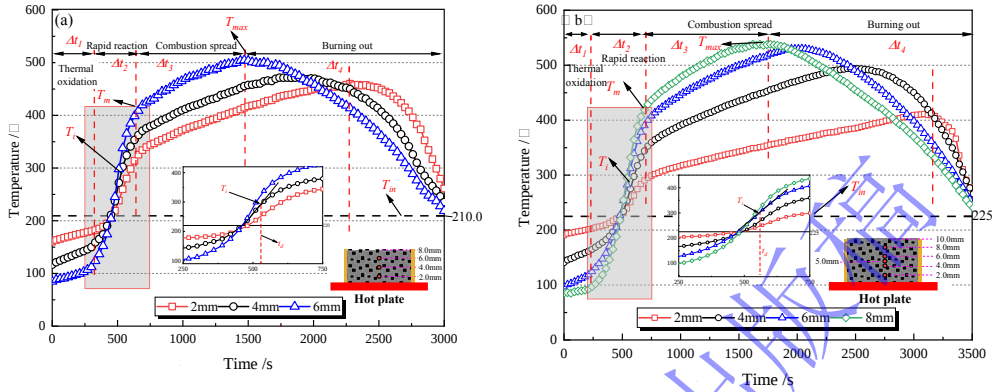


图 4 不同堆积厚度下煤粉自燃内部温度变化。(a) $h=8\text{ mm}$, $m=6.0\text{ g}$; (b) $h=10\text{ mm}$, $m=7.0\text{ g}$

Fig.4 Evolution temperature of coal dust at different thicknesses. (a) $h=8\text{ mm}$, $m=6.0\text{ g}$; (b) $h=10\text{ mm}$, $m=7.0\text{ g}$

由图 4 可知，两种厚度条件下内部温度变化趋势相近，可分为受热氧化、快速反应、燃烧蔓延、衰减熄灭四个阶段。在受热氧化阶段，煤尘层温度低于环境和热板温度，在环境对流传热和热板的导热作用下内部温度逐渐上升，高温点从煤尘层底部向上传递，距离热表面越远温度越低；快速反应阶段氧气从煤尘层上表面进入，与碳颗粒发生氧化反应放出热量，高度越大的颗粒氧化反应越剧烈，温度上升越快，两种厚度煤尘的最大温度分别为 410 °C 和 430 °C。此时氧化放热强度高于热板导热，煤尘层温度继续上升，测点位置越高温度越高；随着煤尘层上表面碳颗粒的消耗，燃烧进入衰减熄灭阶段，剧烈氧化区域和高温点向煤尘层内部移动^[40]，放热量减少、最高温度逐渐降低。

监测煤尘层自燃过程特征参数如燃点、快速反应阶段最高温度、燃烧蔓延阶段最大温度以及各阶段持续时间，得到不同质量和厚度条件下自燃特征参数如表 4 所示。

表 4 不同质量自燃过程特征参数

Table 4 Main parameters of spontaneous combustion process of different masses

m/g	h/mm	$\Delta t_1/s$	$\Delta t_2/s$	$\Delta t_3/s$	$T_{in}/^\circ\text{C}$	$T_f/^\circ\text{C}$	$T_m/^\circ\text{C}$	$T_{max}/^\circ\text{C}$
5	8	230	380	820	215	286	420	506
6	8	270	360	840	210	290	410	510
7	10	210	450	1050	225	294	430	538
8	10	250	465	1100	220	292	428	530

根据表 4 可知，煤尘燃点 (T_f) 受堆积厚度、质量影响较小，处于 286-294 °C。随煤尘质量的增加，蓄热量能力越强，受热氧化阶段持续时间越长，相同厚度下 Δt_1 约增加 40 s。快速反应阶段的持续时间 (Δt_2)、快速反应结束时温度 (T_m)、最高温度 (T_{max}) 受煤尘层厚度的影响显著，厚度为 8 mm、质量 5.0 g、6.0 g 条件下三个特征参数分别为 380 s 和 360 s、215 和 210 °C、506 和 510 °C。主要由于较厚的煤尘层限制了氧气向内部的渗透，减缓了整体反应速度和放热速度，同时厚度增加后快速反应和燃烧蔓延阶段持续时间显著延长，也增加了进行氧化的颗粒数量，释放热量和最高温度 (T_{max}) 增加。10 mm 厚度最高温度达到了 530~538 °C，比 8 mm 厚度的高 20~30 °C，以 6.0 g 和 7.0 g 为例， T_m 和 T_{max} 分别高出 20 °C、28 °C， Δt_2 和 Δt_3 分别增加 90 s、210 s。

2.2 煤尘卷扬燃爆过程

煤尘层自燃后在燃爆室中分散，碳颗粒与氧气接触面积增加，氧化燃烧反应加剧，以 6.0 g 粉尘为例，采用高速摄像机观察卷扬后颗粒点火和燃爆过程

如图 5 所示。

由图 5 可知，分散后 90 ms 时，颗粒与氧气充分接触后氧化反应速度增加，由于自燃过程部分颗粒温度较高，出现明亮光点；100 ms 时，亮点数量继续增加，且出现了一些较大的亮斑，火焰呈明亮色；在 110 ~120 ms 时间内，燃烧范围扩大，热量不断积累，其中一个亮斑面积扩大、亮度增加；130 ms 时，火焰面积继续扩大，燃烧强度达到高峰，高温区域扩大，但强度开始降低，随着颗粒的运动，仅一处着火点扩大形成连续火焰。

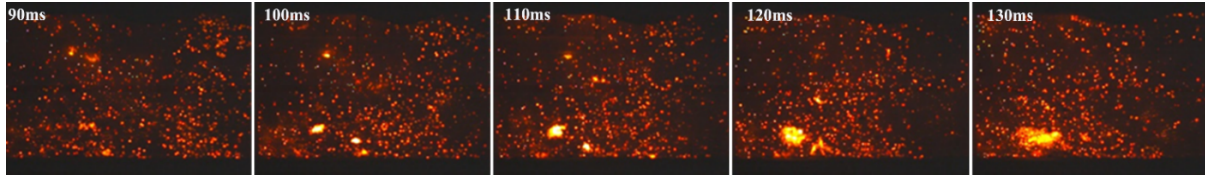


图 5 煤尘颗粒点火过程

Fig. 5 Dust particle ignition process

质量 7.0 g、中心温度为 360 °C 的煤尘层被卷扬后的分散、燃爆、熄灭过程如图 6 所示。

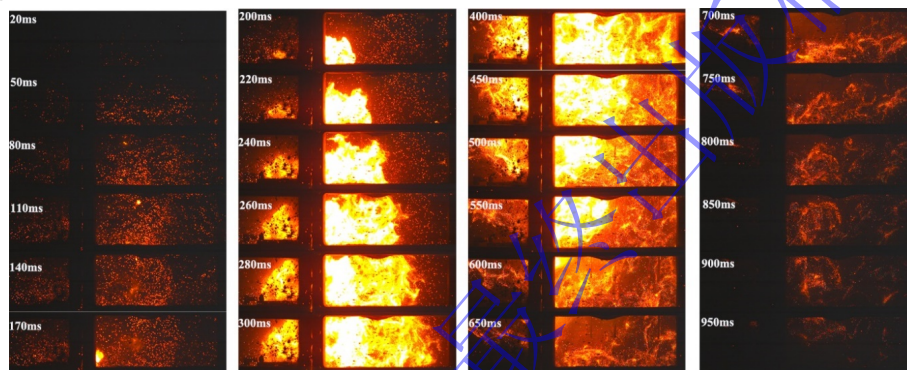


图 6 自燃煤尘分散燃爆过程

Fig. 6 Coal dust dispersion and explosion process

由图 6 可知，燃爆过程可分为颗粒分散、喷射传播、自由传播、熄灭四个阶段。分散阶段（0~170 ms）：高压气体水平方向冲击煤尘层，碳颗粒向前运动并撞向反射板，气流速度、高温颗粒压差及反射板反弹作用共同导致煤尘向上回旋运动，80 ms 时出现离散火焰，170 ms 时亮点更加密集形成离散火焰。喷射传播阶段（200~300 ms）：随着被卷扬的煤尘增加，热量和可燃气体释放量增加，离散火焰在喷射气体水平驱动和热浮力作用下向右上侧方向传播。高温进一步加快煤尘颗粒的热解和脱挥发分，气相燃烧加剧，火焰面积显著增加。自由传播阶段（300~650 ms）：高压气体喷射结束，高温颗粒在燃烧室内旋转运动，形成“∞”型运动路线，450 ms 时燃烧速度无法保持火焰传播，火焰强度开始减弱、面积减小。熄灭阶段（大于 700 ms）：未消耗完的炭颗粒无法形成有效传播火焰，火焰消失煤尘颗粒逐渐下沉。

煤尘不同自燃程度条件下分散后的活性物质不同导致燃爆强度不同。图 7 显示了不同中心温度的卷扬燃爆过程。

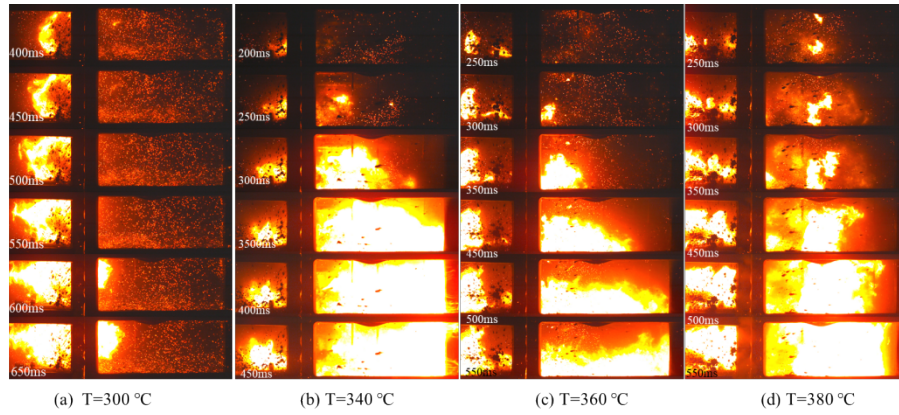


图 7 不同中心温度下煤尘燃爆过程. (a) T=300 °C; (b) T=340 °C; (c) T=360 °C; (d) T=380 °C

Fig. 7 Coal dust explosion at different central temperatures. (a) T=300 °C; (b) T=340 °C; (c) T=360 °C; (d) T=380 °C

根据图 7 可知，当煤尘层中心温度为 300 °C 时，卷扬后 400 ms 才出现连续火焰，锋面呈现锯齿状，高温颗粒分散在燃烧室右侧形成未被引燃的粒子云；随着中心温度升高，火焰面积和传播速度呈现先增后降的趋势；在中心温度达到 340 °C 时，煤尘卷扬后仅 100 ms 内，火焰面积、传播速度和亮度快速增加，火焰空间结构更加饱满；然而，当中心温度为 360 °C 时，火焰结构开始呈现离散状，出现两处不连续的着火区域；当中心温度升至 380 °C 时，火焰聚集在燃烧室下侧，剧烈程度降低。这一系列变化表明煤尘自燃程度对燃爆特性影响显著。

2.3 煤尘云燃爆特性

2.3.1 火焰结构

煤尘气流湍流燃烧过程按照火焰长度方向可分为预热区、反应区和燃尽区^[41-42]，反应区是火焰的核心，主要进行颗粒和可燃气体燃烧，火焰明亮，释放热量促进预热区颗粒热解和着火，预热区紧邻燃烧区，发生煤粉颗粒的预热、着火和燃烧等现象，部分未燃尽可燃物质在燃尽区继续燃烧^[43]。

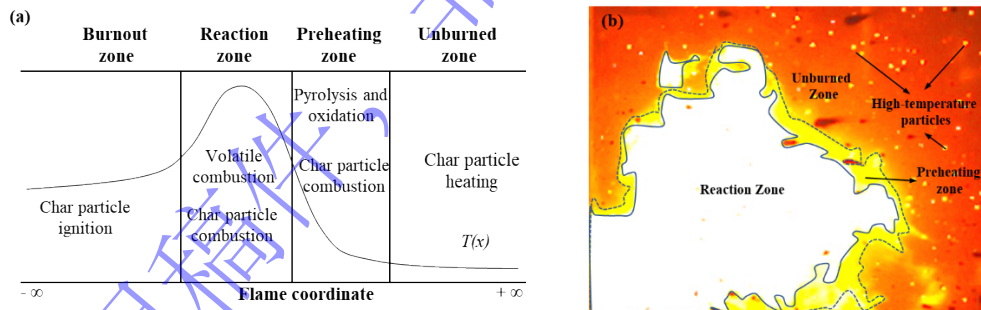


图 8 煤尘着火过程及火焰结构划分.(a)着火过程;(b)火焰结构

Fig.8 Ignition process and flame structure of pulverized coal. (a) Ignition process;(b) Flame structure

图 8 展示了着火过程及火焰外围的分层结构，可燃气体和少量高温颗粒在反应区内剧烈反应，火焰边缘褶皱较大，颜色明亮；预热区包围在反应区周围，火焰颜色未黄色，与未燃区高温颗粒颜色相近，爆炸火焰向沿四周向外传播；未燃区由未燃颗粒和高温颗粒组成，为火焰传播提供可燃物和点火源。

火焰锋面和传播速度是燃爆的剧烈程度的重要表征，图 9 为中心温度 320 °C 时不同质量煤尘卷扬燃爆过程，采用 Matlab 对不同时刻的火焰长度和面积进行计算，结果如图 10 所示。

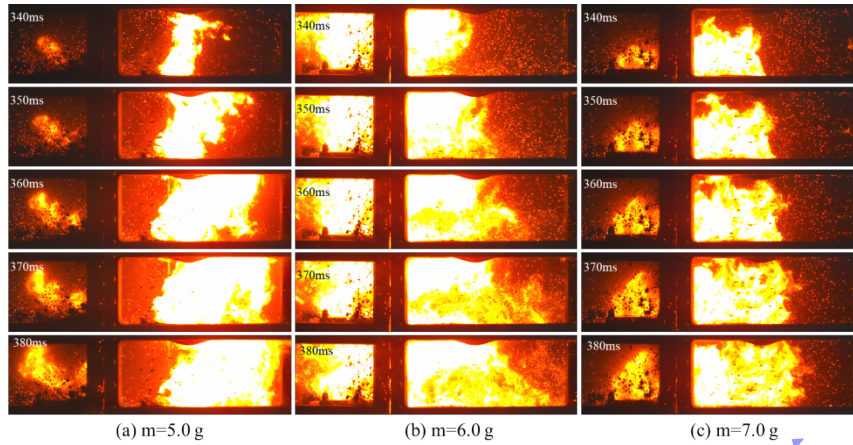


图9 不同质量高温煤粉颗粒燃烧火焰锋面. (a) $m=5.0\text{ g}$; (b) $m=6.0\text{ g}$; (c) $m=7.0\text{ g}$

Fig.9 Flame front of dust particles. (a) $m=5.0\text{ g}$; (b) $m=6.0\text{ g}$; (c) $m=7.0\text{ g}$

从图9可知,煤尘颗粒燃烧时间相同时,质量对火焰特征有显著影响。当煤尘质量为 5.0 g 时,分散后火焰锋面尖锐、亮度最强; 6.0 g 时在相同时间内火焰长度和面积最大,预热区和未燃区边界清晰; 7.0 g 煤尘火焰锋面更为饱满,火焰传播速度最慢。图9中火焰长度和面积计算结果如图10所示,在 $340\text{ms}\sim 380\text{ms}$ 内, 5.0g 煤尘火焰长度从 9.55cm 增加到 21.8cm ,火焰面积从 63.44cm^2 增加到 226.5cm^2 。质量为 6.0g 时燃爆最为剧烈,火焰长度和面积最大, 340ms 时分别为 26.81cm 、 301.4cm^2 。 7.0g 时火焰长度和面积增长幅度缓慢,燃爆强度下降。煤尘与空气比例对燃烧效率的影响是以上现象的主要原因,煤尘浓度越低,可燃颗粒不足,导致燃烧释放的热量较少、火焰传播减慢;煤尘浓度增加时,氧气供给不足导致局部燃烧不完全,火焰传播受到限制。

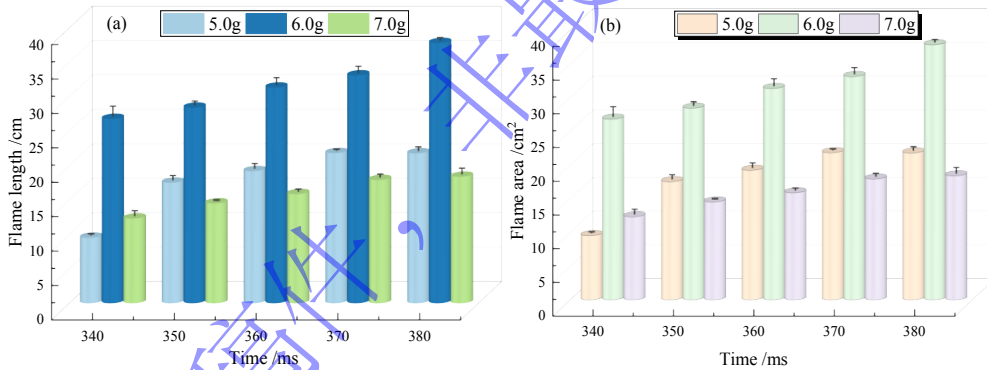


图10 不同质量煤粉燃爆后的火焰长度和面积.(a) 火焰长度; (b) 火焰面积

Fig.10 Flame lengths and areas of coal dust explosions with varying mass. (a) Flame length; (b) Flame area

2.3.2 火焰面积与传播速度

采用 Matlab 对 8.0 g 、中心温度 320°C 煤尘燃爆火焰的长度和面积进行提取计算,结果如图11所示,得到不同质量的火焰传播速度如图12所示。

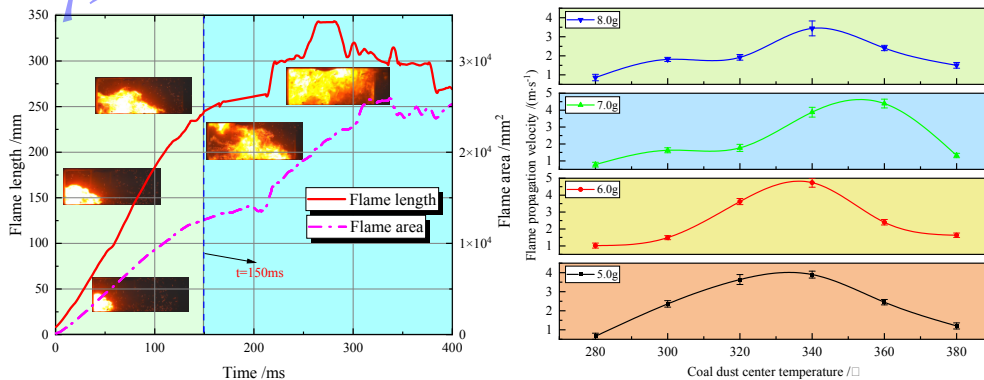


图 11 火焰长度和面积变化曲线

图 12 火焰传播速度

Fig. 11 Flame length and area variation curve Fig. 12 Flame propagation speed

根据图 11 可知, 初始 150ms 内, 火焰在燃烧室右侧出现并沿水平方向稳定传播, 面积逐渐增加。150ms 时火焰长度和面积分别为 245mm、12.7cm²。这一稳定阶段的火焰长度微分, 得出平均蔓延速度为 1.8m/s。150ms 至 210ms 间, 火焰长度和面积大小相对稳定。在 210ms 时出现突变, 这是由于未燃高温颗粒突然被点燃, 导致火焰向多方向迅速扩展、长度和面积急剧增加。

由图 12 可知, 随着中心温度的增加, 火焰传播速度先增加后减小。煤尘质量为 6.0 g、中心温度 340 °C 条件下燃爆火焰传播速度最大, 为 4.76m/s。当中心温度较低时, 煤尘颗粒的热量无法引燃挥发分气体形成离散火焰, 中心温度过高导致未燃颗粒减少, 导致火焰速度降低。

2.3.3 燃爆温度和燃爆产物

燃爆温度是重要的燃爆特征参数之一。质量为 6.0 g 和 7.0 g 煤尘在中心温度为 340 °C 时燃爆后空间温度变化如图 13 所示。

由图 13 可知, 煤尘分散后 160 ms 内, 颗粒和氧气充分接触, 氧化反应强度增加, 释放的热量使空间温度升至 200°C。在扩散燃烧阶段, 火焰依次经过 P1、P2、P3 位置, 质量为 6.0 g 和 7.0 g 时, P1 测点的最高温度分别在 240 ms、280 ms 出现, 大小为分别为 1000 °C、1156 °C。两种质量燃爆持续时间分别为 820 ms、880 ms, 并出现二次燃烧导致温度出现小幅度回升, 最大增加约 124 °C。可燃气体的均相燃烧引燃煤尘颗粒, 进一步促进煤尘热解和燃烧, 产生更多可燃气体, 加强燃爆过程, 但释放的气体分布不均时, 会导致二次引燃和多处引火的现象。

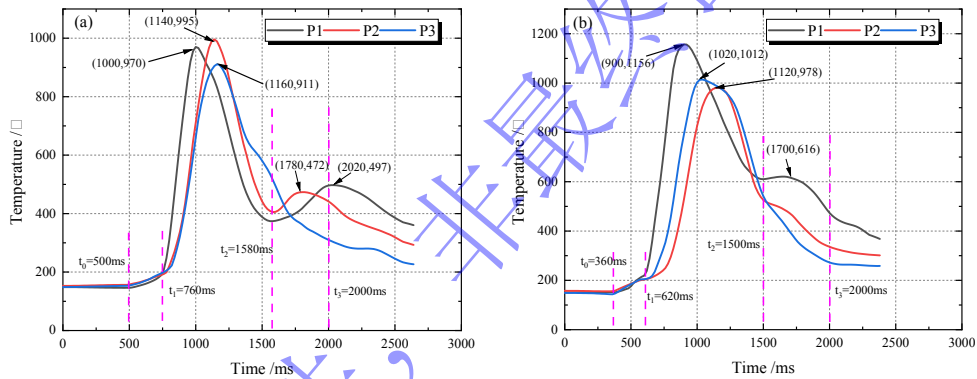


图 13 不同质量煤尘云燃烧温度过程. (a) m=6.0 g; (b) m=7.0 g

Fig. 13 Explosion temperature of coal dust of different masses. (a) m=6.0 g; (b) m=7.0 g

图 14 对比了 6.0 g 煤尘在不同自燃程度下的燃爆最大温度以及不同煤尘质量的火焰传播时间。

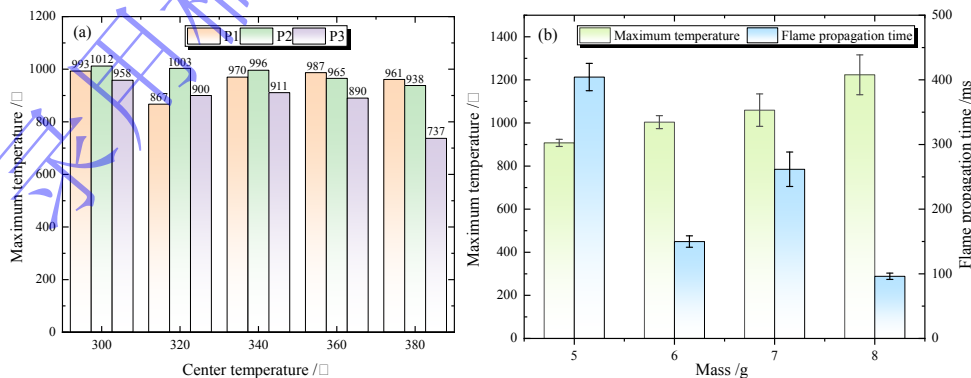


图 14 煤尘燃爆温度和火焰传播时间. (a) 中心温度与最大燃爆温度; (b) 质量与最大燃爆温度、火焰传播时间

Fig. 14 Coal dust explosion temperature and flame propagation time.(a) Relationship between central temperature and combustion temperature;(b) Relationship between mass, explosion temperature, and flame propagation time.

根据图 14(a)可知, 中心温度对分散燃爆的最大燃爆温度差异影响相对较小, 最大为 1012 °C,

最低为 961 °C，温差仅 51 °C。主要原因为中心温度越高，参与氧化反应的活性物质减少，导致最大温度略有降低。当中心温度小于 340 °C时，最大温度在 P2 点出现，中心温度为 360 和 380 °C 时，最大温度出现在 P1 点位置，主要因为煤尘自燃程度越高，分散后发生着火的时间更短，反之需要更长时间进行氧化升温和解热气体被高压气流冲击下发生燃爆位置更远。图 14(b)可知，随着质量的增加，煤尘云最大燃爆温度逐渐上升，最大值为 1214 °C，最低为 926 °C。

采用气相色谱仪监测煤尘自燃及卷扬燃爆过程的可燃性气体，其动态变化如图 15~图 17 所示。

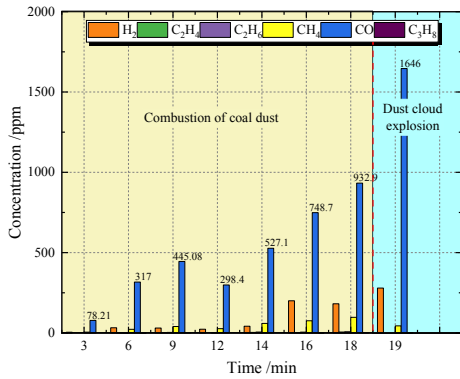


图 15 煤粉爆炸前后可燃气体产物

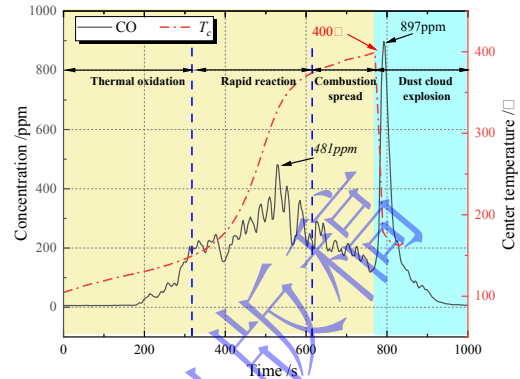


图 16 自燃煤粉扬起前后的 CO 浓度、温度变化

Fig. 15 Combustible gas in the experimental process Fig. 16 Temperature and CO curve in the experimental process

根据图 15 可知，H₂、CO、CH₄ 是煤尘层自燃和卷扬燃爆产物中的主要可燃性气体，CO 气体浓度显著高于其他气体。CO、H₂ 分别在煤尘放置热板上后 3.5 min、5.0 min 开始释放，煤尘卷扬前可燃性气体总浓度达 1225 ppm，CO 占 932.9 ppm。CO 来源包括煤尘热解和氧化燃烧两个部分 [23,44]，图 15 中 CO 浓度在分散煤尘燃烧后急剧上升至 1646ppm，其余可燃气体浓度变化不显著，因此 CO 可作为煤尘自燃和燃爆特征的指示气体。图 16 显示了 CO 浓度随时间的变化，其大量产生发生在受热氧化阶段（中心温度<350 °C），受热解脱挥发分和低温氧化共同影响，最高值达 456 ppm。600 ms 后，进入燃烧蔓延阶段，CO₂ 成为主要产物，CO 产生速率降低，同时部分 CO 逸出导致浓度降至 195ppm。当煤尘在中心温度为 400 °C 时进行分散，燃爆后 CO 浓度上升至 965 ppm，表明煤尘分散燃爆时氧化反应不充分。图 17 为 7.0 g 煤尘在不同中心温度扬起前后的 CO 变化。自燃阶段燃烧室内的 CO 浓度为 200~450 ppm，燃爆后 CO 浓度快速上升至为 1000~1250 ppm，由此可知中心温度对燃爆后的 CO 的产生量影响不显著，颗粒的非均相燃烧是 CO 剧烈增加的原因。

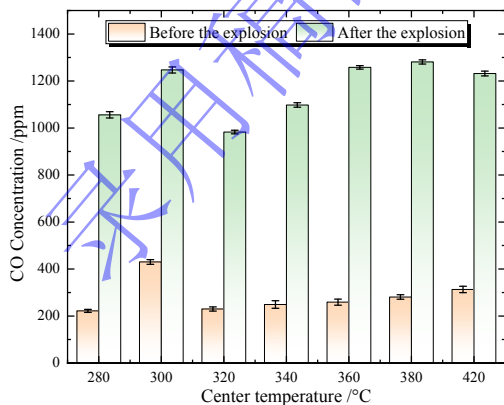


图 17 不同自燃程度下扬起后的 CO 浓度

Fig. 17 CO gas after explosion at different central temperatures

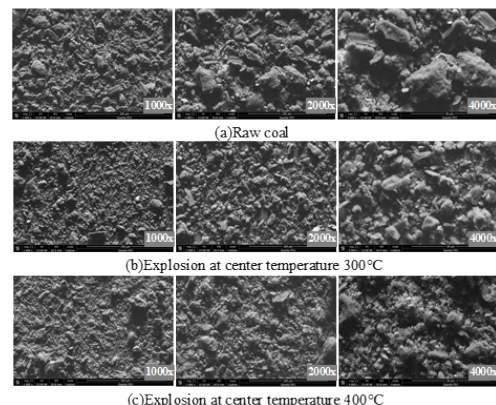


图 18 煤尘燃爆前后 SEM 结构

Fig. 18 SEM structure of coal dust

图 18 显示了在不同中心温度燃爆后的燃爆残留物结构。当沉积煤尘在 300 °C 中心温度下经历卷扬燃爆后，观察到固体颗粒粒径明显减小，但大多数仍保持颗粒的形式存在。中心温度为 400 °C 进行分散时，产物颗粒进一步减小，表面有灰分附着，说明自燃程度越高的煤尘分散后燃烧越充分。

燃爆火焰并未导致煤尘颗粒完全反应，导致燃爆后 CO 浓度会急剧增加。采用比表面积测得两种煤尘残留物的比表面积分别为 7.35 m²/g、9.21 m²/g。

2.4 煤尘卷扬诱发爆炸的动力学过程

基于半封闭式煤尘燃爆实验装置内煤尘自燃、分散、燃爆过程及特性分析，本文提出了自燃煤尘卷扬诱发爆炸动力学机制如图 19 所示，包含了煤尘自燃、煤尘云爆炸两种氧化燃烧过程。

当煤尘在高温环境中热表面沉积，热传导和热辐射向煤尘传递能量，煤尘温度上升至发生热失控，释放 CO、CH₄、H₂ 等可燃气。自燃过程氧化反应强度取决于渗入煤尘层的氧气含量，温度积累至内部温度突然上升（如图 4 所示）。当自燃煤尘在外界气流作用下被卷扬后，高温着火颗粒、未燃颗粒与氧气发生爆炸并释放大量热量，同时促进更多的煤尘颗粒参与热解和燃烧^[45]。煤尘扬起后着火颗粒先点燃周围可燃气体形成离散型火焰（如图 5）将煤颗粒包裹，进一步引发未燃的煤尘云颗粒热解、脱挥发分以及燃烧（如图 6），形成由炭颗粒非均相燃烧和炭颗粒周围气体的均相燃烧共同作用的爆炸机制。有学者提出在低浓度煤尘下，爆炸由非均相燃烧主导，高浓度煤尘时则均相燃烧发挥主要作用^[46]。由图 15~图 17 可知，燃爆后的 CO 浓度显著增加、CH₄ 浓度降低，根据表 5 中典型的爆炸机理^[47]，反应（1）、反应（2）、反应（4）均发生。结合燃爆火焰和表 5 中反应热也发现，由于碳颗粒燃烧释放的总能量小于气相燃烧，非均相燃烧占主导时会导致煤尘燃烧不充分，爆炸强度低（如图 9c）；气体均相燃烧释放热量多，可加强周围未燃烧颗粒的热解和燃烧速度，火焰温度上升、亮度增加（如图 9a、图 9b）。因此，质量浓度降低（5g、6g）时，煤尘爆炸中均相燃烧占主导，在图 9（a）中可观察到反应区和预热区之间的温差导致挥发性气体在煤颗粒间隙形成填充层，进一步促进局部火焰的传播。同理，根据燃烧火焰发展过程，当中心温度为 340~380℃ 时（如图 7），燃爆点火过程由均相燃烧主导形成明亮火焰，燃爆后期氧气的消耗限制了燃烧导致 CO 上升（如图 14~图 17）并有炭颗粒残留（如图 18）。

综上所述，煤尘燃爆伴随均相燃烧和非均相燃烧两种模式及相互转化，质量、自燃程度均对着火燃烧机制影响明显。当中心温度为 340~380℃、质量小于 7g 时，煤尘爆炸由均相燃烧主导；当自燃程度更高或者更低时，挥发分释放量降低从而导致非均相燃烧作用更明显。

表 5 爆炸过程中的典型化学反应

Table 5 Typical chemical reaction involved in the explosion

Types	Typical chemical reaction involved in the explosion	反应热 $\Delta H(\text{kJ/mol})$	Reaction
非均相燃烧	$\text{C} + \text{O}_2 = \text{CO}_2$	-393.51	(1)
	$\text{C} + 1/2\text{O}_2 = \text{CO}$	-110.52	(2)
	$\text{CO} + 1/2\text{O}_2 = \text{CO}_2$	-283	(3)
均相燃烧	$\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 = \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$	-890.3	(4)
	$2\text{H}_2 + \text{O}_2 = 2\text{H}_2\text{O}$	-241.8	(5)
	$2\text{C}_2\text{H}_2 + 5\text{O}_2 = 4\text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$	-1411	(6)

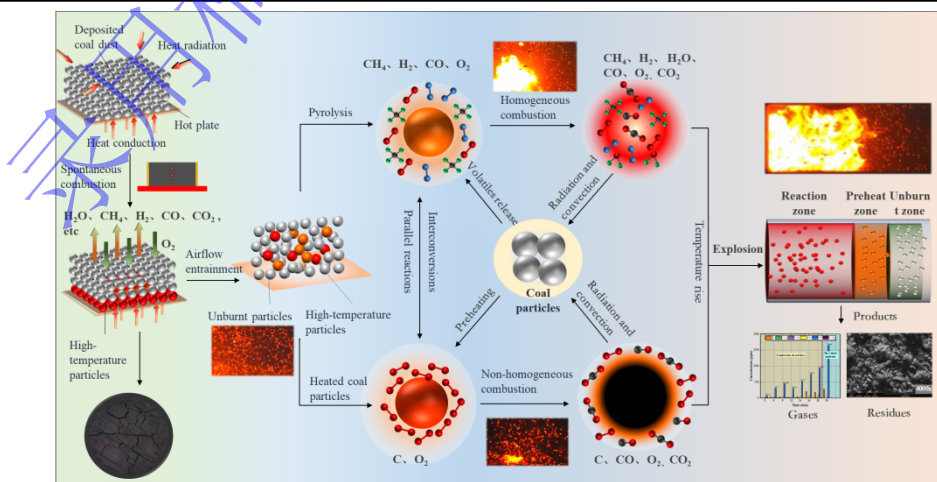


图 19 自燃煤尘卷扬诱发爆炸的动力学过程示意图

Fig. 19 Schematic diagram of the kinetic mechanism of explosion induced by spontaneous coal dust lifting

3 结论

(1) 沉积煤尘自燃发生前温度由热表面导热控制, 高温点由热表面向上迁移, 快速反应后由氧化放热速率控制, 高温点移动方向相反。随着沉积厚度增加, 自燃最高温度和燃烧时间越长, 10 mm 和 8 mm 厚煤尘燃烧蔓延时间分别为 810s、1520s。

(2) 煤尘中心温度对煤尘云燃爆发生和剧烈程度影响显著, 诱发燃爆临界范围为 280 °C~420 °C。随着中心温度的升高, 火焰传播速度先增加后减小, 最大值为 4.76m/s, 固体残余物粒径减小, 比表面积最大增加约 1 倍。煤尘质量对燃爆温度和 CO 浓度影响显著, 燃爆温度最高值为 1214 °C, CO 最大浓度为 1250ppm。

(3) 沉积煤尘自燃阶段产生高温颗粒和 CO、H₂ 可燃气体为卷扬燃爆提供了可燃物和点火源, 燃爆过程中均相、非均相两种燃烧模式同时存在且可相互转化, 当低浓度、低自燃程度下, 爆炸燃烧以非均相燃烧为主。

参考文献:

- [1] Chang S, Zhuo J, Meng S, et al. Clean coal technologies in China: current status and future perspectives[J]. *Engineering*, 2016, 2(4): 447-459.
- [2] Yan D, Li M, Zou L, et al. A study on fragmentation and emissions characteristics during combustion of injected pulverized coal[J]. *Fuel*, 2022, 309: 122152.
- [3] Yadav S, Mondal S S. A complete review based on various aspects of pulverized coal combustion[J]. *Int J Energy Res*, 2019, 43(8): 3134-3165.
- [4] PEI B, ZHANG Z Y, PAN R K, et al. Flame propagation characteristics of deposited coal dust explosion induced by shock waves of different intensities[J]. *J China Coal Soc*, 2021, 46(02): 498-506.
(裴蓓, 张子阳, 潘荣锟, 等. 不同强度冲击波诱导沉积煤尘爆炸火焰传播特性[J]. 煤炭学报, 2021, 46(02): 498-506.)
- [5] Khan A M, Ray S K, Mohalik N K, et al. Experimental and CFD Simulation Techniques for Coal Dust Explosibility: A Review[J]. *Min Metall Explor*, 2022, 39(4): 1445-1463.
- [6] LIANG Y T, WANG L F, YUAN C M, et al. Study of ignition of coal dust deposit by hot plate and its capability to ignite coal dust clouds[J]. *J China Univ Min Technol*, 2022, 51(05): 894-900.
(梁运涛, 王冷峰, 苑春苗, 等. 热板上煤尘着火及引燃煤粉尘云特性试验研究[J]. 中国矿业大学学报, 2022, 51(05): 894-900.)
- [7] YANG Q Y, SHI B M, ZHANG L L, et al. Study on laws of explosion propagation for coal dust with different moisture contents induced by gas explosion[J]. *J Saf Sci Technol*, 2019, 15(03): 25-29.
(杨前意, 石必明, 张雷林, 等. 不同含水率煤尘在瓦斯爆炸诱导下爆炸传播规律研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2019, 15(03): 25-29.)
- [8] JIANG B Y, HONG H, SU M Q, et al. Characterization of explosion propagation of coal dust deposited by gas explosion convolutions in closed pipelines[J]. *J China Coal Soc*, 2024, 49(04): 1941-1951.
(江丙友, 洪汉, 苏明清, 等. 密闭管道内瓦斯爆炸卷扬沉积煤尘爆炸传播特性[J]. 煤炭学报, 2024, 49(04): 1941-1951.)
- [9] HE J, CHENG K, ZHANG J. Explosion Characteristics and variation of oxidized coal dust[J]. *Saf Coal Mines*, 2023, 54(03): 67-72.
(贺杰, 程凯, 张金. 氧化煤尘的爆炸特性及其变化规律[J]. 煤矿安全, 2023, 54(03): 67-72.)
- [10] PEI B, XU M J, WEI S M, et al. Comparison of explosion characteristics of methane/graphite powder and methane/pulverized coal[J]. *CIESC Journal*, 2022, 73(10): 4769-4779.
(裴蓓, 徐梦娇, 韦双明, 等. 甲烷/石墨粉与甲烷/煤粉爆炸特性对比研究[J]. 化工学报, 2022, 73(10): 4769-4779.)
- [11] Hou Z H, Wang D M, Zhu Y F, et al. Experimental study on pressure wave-induced explosion of different types of

- deposited coal dust[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2023, 172: 825-835.
- [12] LI H T, CHEN X K, DENG J, et al. Numerical simulation on formation mechanism of pulverized coal cloud and flame dynamic behaviors during the explosion process in an open vessel[J]. *J China Coal Soc*, 2021, 46(08): 2600-2613.
(李海涛, 陈晓坤, 邓军, 等. 开放管道内煤粉云形成机制及爆炸过程火焰动态行为数值模拟[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(08): 2600-2613.)
- [13] NIE B S, ZHANG H, GONG J, et al. Macro and micro four-stage reaction mechanism of pulverized coal explosion[J]. *J China Univ Min Technol*, 2023, 52(06): 1129-1145.
(聂百胜, 张豪, 宫婕, 等. 煤粉爆炸宏观四阶段反应机理[J]. *中国矿业大学学报*, 2023, 52(06): 1129-1145.)
- [14] Hou Z H, Wang D M, Luo S Y, et al. Study on flame propagation characteristics of deposited coal dust explosion induced by pressure waves of different intensities[J]. *Fire Mater*, 2023, 47(8): 1043-1052.
- [15] Jia J Z, Tian X Y. Propagation and attenuation characteristics of shock waves in a gas-coal dust explosion in a diagonal pipeline network[J]. *Sci Rep*, 2022, 12.
- [16] Cheng C L, Si R J, Wang Lei, et al. Explosion and explosion suppression of gas/deposited coal dust in a realistic environment[J]. *Fuel*, 2024, 357: 129710.
- [17] LI R Z. Simulation Study on Propagation Law of Different-amount Deposited Coal Dust Explosion Induced by Gas Explosion[J]. *Min Saf Environ Prot*, 2013, 40(01): 17-20+25.
(李润之. 不同总量沉积煤尘在瓦斯爆炸诱导下的传播规律模拟研究[J]. *矿业安全与环保*, 2013, 40(01): 17-20+25.)
- [18] Song Y F, Zhang Qi. Multiple explosions induced by the deposited dust layer in enclosed pipeline[J]. *J Hazard Mater*, 2019, 371: 423-432.
- [19] Song Yifan, Zhang Qi. Criterion and propagation process of spark-induced dust layer explosion[J]. *Fuel*, 2020, 267: 117205.
- [20] LI Y C, LIU T Q, ZHOU X H, et al. Flame characteristics of deposited coal powder explosion induced by high-pressure airflow carrying coal dust[J]. *China Saf Sci J*, 2017, 27(05): 58-63.
(李雨成, 刘天奇, 周西华, 等. 携煤尘高压气流诱导沉积煤粉爆炸火焰特性研究[J]. *中国安全科学学报*, 2017, 27(05): 58-63.)
- [21] HUANG W S, WU Y X, ZHANG Hai, et al. Research progress of moderate or intense low-oxygen dilution (MILD) combustion of pulverized coal in high-speed jet[J]. *J China Coal Soc*, 2023, 48(8), 1-13.
(黄文仕, 吴玉新, 张海, 等. 高速射流煤粉 MILD 燃烧的研究进展[J]. *煤炭学报*, 2023, 48(8), 1-13.)
- [22] LIU J P, YANG Z X, ZHAO Y M, et al. Study on Flame Propagation Characteristics and Combustion Pyrolysis Mechanism of Lignite Dust Explosion[J]. *Explos Mater*, 2022, 51(06): 16-21.
(刘静平, 杨振欣, 赵懿明, 等. 褐煤煤尘爆炸火焰传播特性及燃烧热分解机理研究[J]. *爆破器材*, 2022, 51(06): 16-21.)
- [23] Qian J F, Liu Z T, Lin Song, et al. Re-explosion hazard potential of solid residues and gaseous products of coal dust explosion[J]. *Adv Powder Technol*, 2023.
- [24] Sahu A, Mishra D P. Investigation of lag on ignition of coal dust clouds under varied experimental conditions[J]. *Adv Powder Technol*, 2022.
- [25] Niu Y H, Zhang L L, Shi B M. Experimental study on the explosion-propagation law of coal dust with different moisture contents induced by methane explosion[J]. *Powder Technol*, 2020, 361: 507-511.
- [26] Liu T Q, Cai Z X, Sun R C, et al. Flame Propagation Characteristics of Deposited Coal Dust Explosion Driven by Airflow Carrying Coal Dust[J]. *J Chem Eng Jpn*, 2021.
- [27] Li S S. Study on Flame Propagation and Thermodynamic Properties of Non-stick Coal Pulverized Coal[Dissertation]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2018.
(李山山. 不粘煤煤粉火焰传播及热动力特性研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2018.)
- [28] Liu T Q, Tian W Y, Sun R C, et al. Experimental and numerical study on coal dust ignition temperature characteristics and explosion propagation characteristics in confined space[J]. *Combust Sci Technol*, 2021, 195: 2150 - 2164.

- [29] Ray S K, Mohalik N K, Khan A M, et al. CFD modeling to study the effect of particle size on dispersion in 20l explosion chamber: An overview[J]. *Int J Min Sci Technol*, 2020, 30: 321-327.
- [30] Rao Y Z, Huang T S., Tian C S, et al. Investigation on the Explosion Process and Chemical Activity of Pyrite Dust[J]. *Russ J Phys Chem A*, 2023, 97: 894 - 901.
- [31] Standard test method for hot-surface ignition of dust layers [M]. ASTM E 2021, 2015.
- [32] Standard Test Method for Minimum Autoignition Temperature of Dust Clouds [M]. ASTM E 1491-06, 2019.
- [33] Li B, Li M J, Gao W, et al. Effects of particle size on the self-ignition behaviour of a coal dust layer on a hot plate[J]. *Fuel*, 2020, 260.
- [34] Li B, Lv H P, Deng J, et al. Effect of calcium chloride on the self-ignition behaviours of coal using hot-plate test[J]. *Fuel*, 2021, 304.
- [35] Kozić M, Ristić S, Katavić B, et al. Numerical and experimental study of temperature distribution on thermal plant coal mill walls[J]. *Environ Prog Sustainable Energy*, 2017, 36(5): 1517-1527.
- [36] Wang D, Ji T C, Jing Q, et al. Experimental study and mechanism model on the ignition sensitivity of typical organic dust clouds in O₂/N₂, O₂/Ar and O₂/CO₂ atmospheres[J]. *J Hazard Mater*, 2021, 412.
- [37] Park H, Rangwala A S, Dembsey N A. A means to estimate thermal and kinetic parameters of coal dust layer from hot surface ignition tests[J]. *J Hazard Mater*, 2009, 168(1): 145-155.
- [38] Ajrash M J, Zanganeh J, Moghtaderi B. Experimental investigation of the minimum auto-ignition temperature (MAIT) of the coal dust layer in a hot and humid environment[J]. *Fire Saf J*, 2016, 82: 12-22.
- [39] Li B, Liu G, Bi M S, et al. Self-ignition risk classification for coal dust layers of three coal types on a hot surface[J]. *Energy*, 2021, 216.
- [40] Shi X Q, Chen X K, Zhang Y T, et al. Numerical simulation of coal dust self-ignition and combustion under inclination conditions[J]. *Energy*, 2022, 239.
- [41] Smoot L D, Horton M D. Propagation of laminar pulverized coal-air flames[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 1977, 3(4): 235-258.
- [42] Vázquez-Espí C. Laminar Flame Propagation in a Premixed Particle Cloud: Effect of Vaporization Rate[J]. *Combustion Science and Technology*, 2020, 192(5): 804-831.
- [43] Weng X L. Ignition Mechanism of Pulverized Coal Flow and Analysis of Optimal Pulverized Coal Concentration[J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2022, 28(06): 639-651.
(魏小林.煤粉气流着火机理及最佳煤粉浓度的分析[J].燃烧科学与技术,2022,28(06):639-651.)
- [44] Glushkov D O, Kuznetsov G V, Strizhak P A. Experimental and numerical study of coal dust ignition by a hot particle[J]. *Appl Therm Eng*, 2018, 133: 774-784.
- [45] Zhang X, Yu J, Yan X, et al. Flame propagation behaviors of nano-and micro-scale PMMA dust explosions[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2016, 40: 101-111.
- [46] Qian J, Liu Z, Liu H, et al. Characterization of the products of explosions of varying concentrations of coal dust[J]. *Combustion Science and Technology*, 2019, 191(7): 1236-1255.
- [47] Kundu S K, Zanganeh J, Eschebach D, et al. Explosion severity of methane-coal dust hybrid mixtures in a ducted spherical vessel[J]. *Powder Technology*, 2018, 323: 95-102.