DOI: 10.11883/1001-1455(2017)02-0237-06

水平管道煤尘爆炸残留物时空变化特征*

刘贞堂[1,2],林 松[1,2],赵恩来[1,2],张松山[1,2],郭汝林[1,2]
(1.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;
2.中国矿业大学安全工程学院,江苏 徐州 221116)

摘要:为了研究煤尘爆炸气固态残留物成分差异性及其时空分布规律,利用水平管道煤尘爆炸装置进行了煤尘爆炸实验,收集并分析了气固态残留物类别及特征。研究表明:爆炸后煤尘中灰分显著增加,挥发分和固定碳减少;爆炸前后煤尘的微观形貌特征差别明显,爆炸后煤尘颗粒表面光滑,且产生了颗粒破裂现象,部分颗粒中出现孔洞,少数颗粒呈现薄壳状,颗粒之间出现了粘结现象;煤尘爆炸气体残留物成分主要有氧气、氮气、一氧化碳、二氧化碳、甲烷、乙烯、乙烷、乙炔、丙烷等,爆源点处最低氧气浓度仅为 2.52%,一氧化碳浓度达到 0.38%~0.68%,距离爆源点越远,氧气浓度越高,碳氧化物气体与烃类气体浓度越低。

关键词:时空变化特征;残留物分析;煤尘;水平管道
中图分类号:O381 **国标学科代码**:13035 **文献标志码**:A

长期接触粉尘会使煤矿职工罹患尘肺病等多种职业病,对职工的健康造成重大危害,且一旦有瓦斯煤尘爆炸发生,其后果往往惨重[1-2]。前人对于瓦斯煤尘爆炸的传播特性及机理等方面进行了大量的研究,宫广东等[3]在圆形管道中进行实验,对甲烷-空气混合物及甲烷-煤尘-空气混合物的爆炸超压传播规律及爆速进行了研究。曹卫国等[4-5]采用 20 L 球形爆炸装置和半封闭竖直燃烧管对煤尘爆炸过程中的爆炸机理和规律以及煤粉尘爆炸过程中火焰传播特性进行了探讨,并对煤粉进行了抑爆研究。Z. Salamonowicz 等[6]和 R. W. Houim 等[7]对瓦斯煤尘爆炸火焰传播速度、最大爆炸压力和最大压力上升速率等进行了数值模拟。来诚锋等[8]和蒯念生等[9]探讨了煤粉末的爆炸机理及点火能量对粉尘爆炸行为的影响,表明粉尘爆炸的实质是气体爆炸,点火能量对粉尘爆炸行为有极大的影响,并建议采用 5~10 kJ 点火能量考察低挥发性粉尘的爆炸下限及惰性介质对粉尘爆炸的抑制效力。景国勋等[10]研究了煤尘爆炸后毒气的传播伤害规律,计算了沿爆炸传播方向毒气浓度随距离变化的关系,结果表明:毒气传播的峰值点随风流方向移动,其峰值点浓度逐渐变小。贾迎梅等[11]对瓦斯爆炸后的气体成分进行了分析,发现了 CO、CO_2 以及 H_2 等气体生成量与瓦斯体积分数的关系。目前对于不同挥发分煤尘的爆炸气固残留物成分差异性及其时空分布规律研究相对较少,本文中通过在水平管道中进行煤尘爆炸实验,对爆炸后的气固残留物进行了收集,并采用工业分析仪,扫描电镜,气相色谱仪等进行分析。

1 实 验

1.1 实验样品

采用 4 种不同煤质成分的烟煤煤样,根据挥发分含量升高顺序依次进行编号。煤样经破碎后,筛出过 200 目标准筛的煤尘制样(粒径 75 μm 以下),实验前在 50 ℃恒温干燥箱中干燥 12 h 以上。

1.2 实验系统

实验系统由水平管道、喷粉系统、点火装置和气/固体残留物收集系统等组成,具体结构如图 1 所示。水平管道由引爆腔体和传播管道组成,引爆腔体是断面为圆形的管状容器,长度为 0.6 m,内径为 300 mm,传播管道是断面为 80 mm×80 mm,长度为 15 m 的方形钢质管道,一端开口。喷粉系统包括

* **收稿日期**:2015-07-20;**修回日期**:2015-11-06
基金项目:国家自然科学基金项目(51174200);中国矿业大学优秀创新团队建设项目(2014ZY001)
第一作者:刘贞堂(1963—),男,博士,教授;**通信作者**:林 松,linsong1991@126.com。

高压气瓶、电磁阀和煤尘盒，喷粉时电磁阀打开，高压干空气将煤尘吹入引爆腔体。点火装置采用通过电流激发的点火具。气体残留物收集装置包括 DQC-50 气体采样器和 QYD-10 气体取样球胆；固体残留物收集装置采用小型吸尘器。

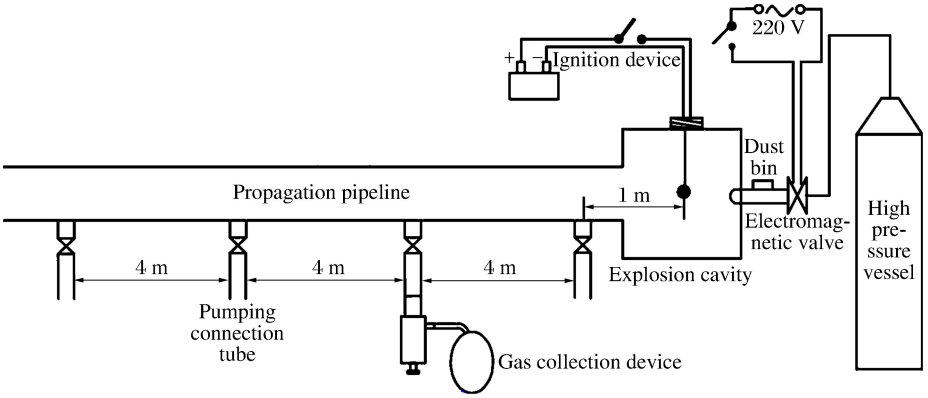


图 1 煤尘爆炸实验系统示意图

Fig. 1 Schematic illustration of experimental setup for coal dust explosion

1.3 实验过程

在点火能量为 10 kJ，煤尘质量浓度为 400 g/m^3 的条件下，进行爆炸实验，4 种不同挥发分的烟煤煤尘各进行 3 次重复实验。进行爆炸实验时，压力为 2 MPa 的高压干燥空气将煤尘喷入管道后点火引爆。爆炸后立即封闭管道，收集气体残留物并通过气相色谱分析仪进行检测，固体残留物收集后装入自封袋，进行工业分析和 SEM 分析。实验室环境温度为 24 ℃，空气中初始氧气体积分数为 20.6%。

2 实验结果及分析

2.1 爆炸反应煤尘变化过程

根据 W. S. Seames[12] 提出的煤燃烧颗粒物的分剖机理，煤尘在爆炸过程中快速地加热、裂解和燃烧，历经热解、蒸发、冷凝、融合和破碎等一系列物理化学变化过程，最后形成了粒径、化学组成及形貌特征等不同的残留物，煤尘变化过程如图 2 所示。经爆炸燃烧，粒径较小的煤尘容易燃烧完全变成飞灰，粒径较大的煤尘则形成煤渣。半焦煤颗粒、煤中矿物质及半焦和矿物碎片在高温条件下汽化，生成的无机物蒸汽一部分成为气态，另一部分经过成核和凝聚作用，呈现亚微米和团聚灰形式。

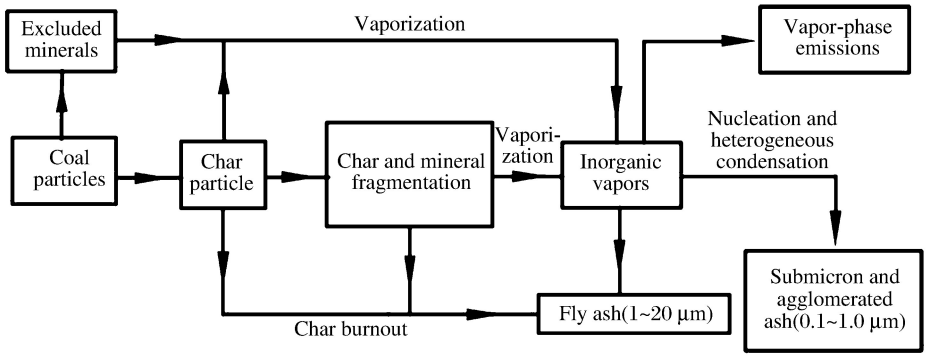


图 2 爆炸反应煤尘变化过程

Fig. 2 Change process of coal dust during explosive reaction

2.2 煤尘爆炸固体残留物分析

2.2.1 工业分析

对爆源点位置收集的残留固体进行工业分析，爆炸前后不同煤尘的工业分析值见表 1。

表 1 不同煤样煤尘爆炸前后工业分析结果

Table 1 Component analysis of different coal dusts before and after explosion

煤样	状态	质量分数/%			
		水分	灰分	挥发分	固定碳
1#	爆前	0.83	15.76	13.89	69.52
1#	爆后	0.99	36.88	10.87	51.26
2#	爆前	1.04	40.70	20.45	37.81
2#	爆后	1.24	55.00	15.85	27.91
3#	爆前	1.56	6.71	39.60	52.14
3#	爆后	2.10	26.75	27.41	43.74
4#	爆前	2.64	1.22	43.82	52.32
4#	爆后	2.18	22.66	31.52	43.64

（1）水分。煤尘爆炸前后水分质量分数的变化非常小，均在零值附近，水分质量分数变化在 0.16%～0.54%区间内。1#，2# 和 3# 煤样水分增加，而 4# 煤样水分减少。煤的工业分析所测定的水分在加热至 105～110 ℃时才能蒸发出来，爆炸产生的高温条件会使煤尘中水分的实际质量分数减少。由于原煤样工业分析中水分质量分数很低，因此爆炸前后煤尘水分质量分数的变化幅度也很小。

（2）灰分。4 种煤尘在爆炸后灰分质量分数均明显增加，其中 1#，3# 和 4# 煤尘灰分增加量较大，分别为 21.12%，20.04%，21.44%，2# 煤尘灰分增加量相对较小，为 14.3%。灰分是煤中矿物质经过一系列复杂反应后的残留物，爆炸前后煤尘灰分的实际质量不会改变，由于煤尘爆炸过程中挥发分析出燃烧以及固定碳燃烧，导致爆炸后测定的灰分质量分数相对增加。灰分增加量与原煤样煤质成分相关，原煤样中灰分含量越低，并且挥发分和固定碳质量分数越高，则爆炸后灰分增加量就越大。

（3）挥发分与固定碳。爆炸后煤尘挥发分质量分数明显降低，自 1# 至 4# 煤尘挥发分减少量分别为 3.02%，4.60%，12.19%，12.30%，分别占原煤工业分析值的 21.7%，22.5%，30.8%，28.1%。原煤样挥发分含量越高，煤尘爆炸后挥发分减少量越大。煤尘爆炸本质上属于以可燃挥发分为主的气相爆炸[8]，煤尘颗粒中固定碳也参与了反应，对于具有爆炸性的低挥发分煤尘，固定碳与氧气反应机会增加，因此参与反应的固定碳的比例与原煤挥发分含量相关。根据实验结果，挥发分最低的 1# 煤尘爆炸后固定碳质量分数减少 18.26%，而 2#，3#，4# 煤尘爆炸后分别减少了 9.90%，8.40%，8.68%。

2.2.2 SEM 图像分析

煤尘爆炸前后扫描电镜图像分别如图 3 和图 4 所示（以 1# 煤尘为例），可以直观地观察到煤尘爆炸前后的微观形貌特征：（1）爆炸前，煤尘颗粒形状不规则，为棱角分明的实体；爆炸后，煤尘颗粒表面明显变光滑，且产生了颗粒破裂现象，部分颗粒中出现孔洞，少数颗粒呈现破裂的薄壳状；（2）爆炸前，煤尘颗粒之间相互独立；爆炸后，煤尘颗粒之间出现了粘结现象，煤颗粒越小，粘结越明显。

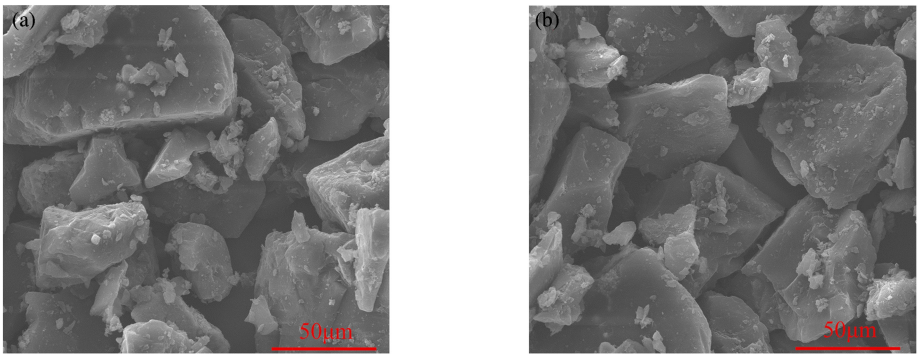


图 3 煤尘爆炸前 SEM 图像

Fig. 3 SEM images of coal dust before explosion

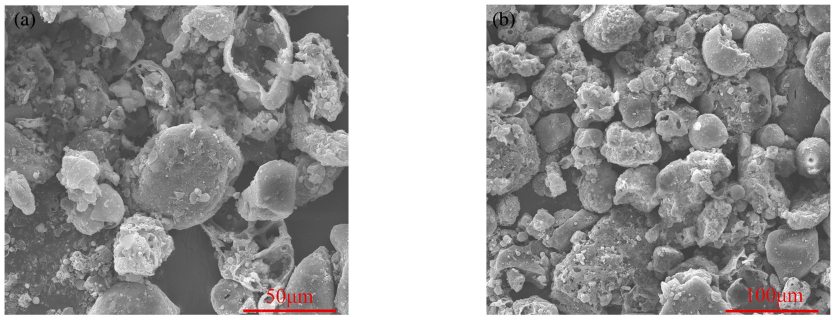


图 4 煤尘爆炸后 SEM 图像

Fig. 4 SEM images of coal dust after explosion

煤尘爆炸主要是挥发分的析出和燃烧[8,13]，SEM 图像中观察到的残留物孔洞证明了煤尘颗粒内部挥发分的析出行为。随着挥发分析出，煤尘颗粒中孔洞不断发展，使得煤尘颗粒的比表面积增大，为煤尘颗粒的着火燃烧提供了良好条件。部分煤尘颗粒的破裂表明，煤尘颗粒在爆炸过程中受到强烈冲击作用。爆炸时煤尘颗粒受热导致表面软化并产生粘性，在爆炸冲击波作用下，煤尘颗粒间碰撞粘结[8]。

2.3 不同煤尘爆炸气体残留物成分特征

通过气相色谱分析仪对爆源点位置收集的爆炸残留气体进行分析，对每种气体的体积分数取平均值，残留气体成分体积分数的检测分析结果如表 2 所示。从表 2 可以看出，实验所用 4 种煤样的煤尘爆炸残留气体中均检测出 O_2，N_2，CO，CO_2，CH_4，C_2H_4，C_2H_6，C_2H_2，C_3H_8 气体：(1) 对于同一种煤尘，爆炸残留气体中氮气体积分数最高，其次是氧气，碳氧化物气体和烃类气体体积分数相对较低，在烃类气体中，甲烷气体体积分数明显高于其他烃类气体，C2，C3 烃类气体中烯烃和炔烃气体体积分数高于烷烃气体；(2) 对于不同煤质成分的煤尘，爆炸气体残留物各成分含量存在差异。与低挥发分煤尘相比，高挥发分煤尘爆炸残留气体中氧气体积分数更低，而一氧化碳、二氧化碳及烃类气体体积分数则更高，其中烃类气体中尤其以甲烷和乙烯气体最为明显。煤尘爆炸过程主要包括煤尘受热分解、挥发分燃烧等过程[13]。煤尘在受热分解过程中，会产生 CO、CO_2、H_2 及高热值的轻质烃类气体等[14]，挥发分和固定碳燃烧等也会产生 CO 和 CO_2 气体。煤尘爆炸残留气体中检测到烃类气体，说明煤尘热解阶段产生的烃类气体并未完全燃烧。

表 2 不同煤尘爆炸气体残留物体积分数

Table 2 Volume fraction of different coal dusts' gas residue from explosion

煤样	无机成分体积分数/%				烃类成分体积分数/(10^{-6})				
	O_2	N_2	CO	CO_2	CH_4	C_2H_4	C_2H_6	C_2H_2	C_3H_8
1#	8.15	48.96	0.38	0.99	333.06	62.28	15.84	38.41	11.08
2#	6.68	49.37	0.52	1.53	866.47	62.50	20.89	31.67	10.21
3#	3.34	49.12	0.66	1.91	3805.99	1014.35	118.70	750.24	120.60
4#	2.52	78.06	0.68	2.67	5171.64	1368.42	182.21	722.06	125.16

除上述气体外，煤尘爆炸残留气体中还可能存在少量氢气、硫氧化物、氮氧化物及稀有气体等，由于实验条件等原因并未对其进行检测分析，其规律有待后续研究。

2.4 煤尘爆炸气体残留物沿管道分布规律

根据实验结果，4 种煤样煤尘爆炸残留气体各成分的体积分数沿管道变化规律相似，因此以 3# 煤尘为例进行说明，管道不同位置处煤尘爆炸残留气体的体积分数如图 5 所示。从图 5 可以看出，距离爆源点越远，氧气体积分数越高且随距离增加几乎呈线性升高，一氧化碳、二氧化碳及烃类气体体积分数则越低：(1) 在爆源点处，几乎所有喷入的煤尘吸收热量发生热解进而燃烧爆炸，氧气消耗量最多；距离爆源点最近的测点处，氧气体积分数仅为 3.52%，距离爆源点越远，氧气体积分数越高，超过 12 m 后，测点处测到的氧气体积分数达到了 19.99%，与实验室环境初始氧气体积分数相近；(2) 煤尘爆炸产生的一氧化碳、二氧化

碳及烃类气体在爆源点处受冲击气流动压作用快速扩散传播，气体体积分数随传播距离增加而不断降低；在 0～10 m 区间一氧化碳和二氧化碳的体积分数降低较小，超过 10 m 后陡然降低；在 0～6 m 区间，烃类气体体积分数降低明显，超过 6 m 后，降低曲线相对平缓。传播阶段并没有新煤尘加入反应，故反应逐渐减弱直至停止，当传播距离超过 12 m 后，碳氧化物气体与烃类气体体积分数降至最低，接近于零。

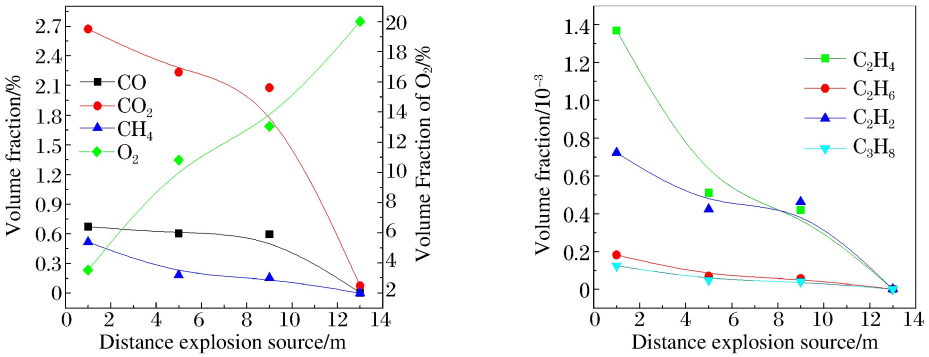


图 5 管道不同位置处气体成分及浓度分布情况

Fig. 5 Gas composition and concentration at different locations in the pipe

3 结　论

（1）根据爆炸前后煤尘的工业分析值，爆炸后煤尘中灰分质量分数增加，挥发分和固定碳质量分数减少，其中灰分质量分数的变化最为显著，增加幅度为 14.30%～21.44%，挥发分减少幅度为 3.02%～12.30%，固定碳减少幅度为 8.40%～18.26%。（2）通过 SEM 图像分析，爆炸后的煤尘颗粒表面变光滑，且出现了颗粒破裂现象，部分颗粒中出现孔洞，少数颗粒呈破裂的薄壳状，爆炸后的煤尘颗粒之间出现了粘结现象。（3）煤尘爆炸后气体残留物成分主要有 O_2，N_2，CO，CO_2，CH_4，C_2H_4，C_2H_6，C_2H_2，C_3H_8 等气体。在爆源点位置处氮气体积分数最高，其次是氧气，碳氧化物和烃类气体相对较低，在烃类气体中，甲烷气体体积分数明显高于其他气体，C2，C3 烃类气体中烯烃和炔烃气体体积分数高于烷烃气体。煤尘挥发分越高，爆炸残留气体中氧气体积分数越低，而一氧化碳、二氧化碳及烃类气体体积分数则越高，烃类气体中以甲烷和乙烯气体最为明显。（4）距离爆源点越远，管道中氧气体积分数越高且随距离增加几乎呈线性升高，而一氧化碳、二氧化碳及烃类气体体积分数则不断降低。距爆源点超过 12 m 后，CO，CO_2 及烃类气体体积分数接近于零，氧气浓度接近于爆炸前空气中氧气浓度。（5）本文中煤尘爆炸实验在特定尺寸的管道内进行，与真实巷道相比，实验管道断面较小，在工程实践中应充分考虑尺寸效应的影响。

参考文献：

[1] 郭红光，王飞，王凯. 煤矿井下粉尘治理的 PM2.5 标准初探[J]. 煤矿安全，2015，46(4)：174-177.
Guo Hongguang, Wang Fei, Wang Kai. Preliminary study on PM2.5 standard for dust control in underground coal mine[J]. Safety in Coal Mines, 2015, 46(4): 174-177.

[2] 张松山，刘贞堂，高勤琼，等. 煤尘爆炸性与挥发分关系研究[J]. 煤炭技术，2015，34(2)：131-133.
Zhang Songshan, Liu Zhentang, Gao Qinqiong, et al. Study on relationship between coal dust explosion and volatile [J]. Coal Technology, 2015, 34(2): 131-133.

[3] 宫广东，刘庆明，胡永利，等. 管道中煤尘爆炸特性实验[J]. 煤炭学报，2010，35(4)：609-612.
Gong Guangdong, Liu Qingming, Hu Yongli, et al. Experimental research on methane and coal dust explosion characteristics in tube[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(4): 609-612.

[4] 曹卫国，徐森，梁济元，等. 煤粉尘爆炸过程中火焰的传播特性[J]. 爆炸与冲击，2014，34(5)：586-593.
Cao Weiguo, Xu Sen, Liang Jiyuan, et al. Characteristics of flame propagation during coal dust cloud explosion[J]. Explosion and Shock Waves, 2014, 34(5): 586-593.

[5] Cao Weiguo, Gao Wei, Peng Yuhuai, et al. Experimental and numerical study on flame propagation behaviors in coal dust explosions[J]. Powder Technology, 2014, 266: 456-462.

[6] Salamonowicz Z, Kotowski M, Polka M, et al. Numerical simulation of dust explosion in the spherical 20 L vessel [J]. Bulletin of the Polish Academy of Sciences-Technical Sciences, 2015,63(1):289-293.
[7] Houim R W, Oran E S. Numerical simulation of dilute and dense layered coal-dust explosions[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2015,35(2):2083-2090.
[8] 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. Explore the mechanism of carbon powder explosion[J]. Explosion and Shock Waves, 2010,30(3):325-328.
[9] 蒯念生,黄卫星,袁旌杰,等.点火能量对粉尘爆炸行为的影响[J].爆炸与冲击,2012,32(4):432-438.
Kuai Niansheng, Huang Weixing, Yuan Jingjie, et al. Influence of ignition energy on dust explosion behavior[J]. Explosion and Shock Waves, 2012,32(4):432-438.
[10] 景国勋,程磊,杨书召.受限空间煤尘爆炸毒害气体传播伤害研究[J].中国安全科学学报,2010,20(4):55-58.
Jing Guoxun, Cheng Lei, Yang Shuzhao. Study on dissemination injury of poisons gas from coal dust explosion in confined space[J]. China Safety Science Journal, 2010,20(4):55-58.
[11] 贾迎梅,刘贞堂,王从银,等.瓦斯爆炸气体成分实验研究[J].煤炭技术,2009,28(12):78-81.
Jia Yingmei, Liu Zhentang, Wang Congyin, et al. Experimental study on gas composition after gas explosion[J]. Coal Technology, 2009,28(12):78-81.
[12] Seames W S. An initial study of the fine fragmentation fly ash particle mode generated during pulverized coal combustion[J]. Fuel Processing Technology, 2003,81(2):109-125.
[13] 冷杰宣,卢甲斌,于鸽,等.矿井煤尘爆炸机理及预防技术[J].采矿技术,2009,9(4):55-57.
Leng Jiexuan, Lu Jiabin, Yu Ge, et al. The mechanism and prevention technology of mine coal dust explosion[J]. Mining Technology, 2009,9(4):55-57.
[14] 崔银萍,秦玲丽,杜娟,等.煤热解产物的组成及其影响因素分析[J].煤化工,2007,35(2):10-15.
Cui Yinping, Qin Lingli, Du Juan, et al. Products distribution and its influencing factors for coal pyrolysis[J]. Coal Chemical Industry, 2007,35(2):10-15.

Characteristics of space-time variations of coal dust residues from explosion in a horizontal pipe

Liu Zhentang[1,2], Lin Song[1,2], Zhao Enlai[1,2], Zhang Songshan[1,2], Guo Rulin[1,2]
(1. *Key Laboratory of Coal Methane and Fire Control, Ministry of Education, China University of Mining and Technology, Xuzhou* 221116, *Jiangsu, China*;
2. *School of Safety Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou* 221116, *Jiangsu, China*)

Abstract: In the present work, to find out the differences in composition and the regularities in space-time distribution for coal dust residues, we carried out a coal dust explosion experiment using a horizontal pipe and analyzed the gas and solid residues of the coal dust. The results show that the content of ashes in the residues increased significantly while that of the volatile and fixed carbon decreased, with a smooth surface of the coal particle residue, accompanied by the particle cracking and bonding occurred. The study also reveals that the major components of the coal dust gas residue from explosion consist of O_2, N_2, CO, CO_2, CH_4, C_2H_4, C_2H_6, C_2H_2, C_3H_8, etc. At the source point of the explosion, the minimum concentration of oxygen was only 2.52% and that of carbon monoxide concentration was 0.38%～0.68%. The greater the distance from the explosive source point, the higher the concentration oxygen but the lower that of carbon oxide gas and hydrocarbon gas.

Keywords: space-time characteristics; residues analysis; coal dust; horizontal pipe

(责任编辑 王小飞)