文章编号: 1001-1455(2014)05-0586-08 **DOI**: 10.11883/1001-1455(2014)05-0586-08

煤粉尘爆炸过程中火焰的传播特性*

曹卫国[1],徐 森[1,2],梁济元[1],高 伟[3],潘 峰[1,2],饶国宁[1]
(1.南京理工大学化工学院,江苏 南京 210094;
2.国家民用爆破器材质量监督检验中心,江苏 南京 210094;
3.东京大学工学院,日本 东京 113-8656)

摘要: 为了揭示煤粉尘爆炸过程中火焰传播特征,采用 2 种不同质量分数挥发分的煤粉在半封闭竖直燃烧管中进行实验。分别使用高速摄影装置和红外热成像装置记录火焰传播过程和空间的温度分布情况,并分析 2 种煤粉尘云的火焰传播速度和温度曲线。结果表明:在同等条件下,火焰在挥发分质量分数高的煤粉尘云中的传播速度和火焰温度要高于其在挥发分质量分数较低的煤粉尘云中的。煤粉尘云的体积质量和点火能量也影响着火焰的传播过程,随着煤粉尘云体积质量的增大,火焰的传播速度和火焰温度整体上呈现先增大后减小的趋势,在传播的后半段火焰速度出现震荡现象;随着点火能量的增大,火焰在煤粉尘云中的传播速度和最高温度也相应升高。通过大量的实验数据计算得到特定条件下火焰传播速度和温度的经验公式。

关键词: 爆炸力学;点火能量;火焰温度;煤粉尘云质量分数;粉尘爆炸;火焰传播
中图分类号: O381; X932 **国标学科代码**: 1303510 **文献标志码**: A

粉尘爆炸是煤炭、粮食加工等行业常见的安全隐患,具有极大的破坏力和烧毁程度。随着对生产安全重视程度的加强,学者开始深入研究粉尘爆炸的机理。C. Proust[1]从爆燃、层流火焰、湍流火焰 3 个方面对面粉粉尘爆炸火焰传播进行了研究,结果表明火焰厚度越小,热辐射对火焰传播的影响越小,强调了热辐射在火焰传播中的作用;O. Han 等[2-3]通过高速摄影验证了粉尘的火焰结构是不连续的,阐述了垂直管道内石松子粉火焰的传播机理与气体爆炸火焰传播机理不同;高伟等[4]对 3 种多碳一元醇类粉尘的体积质量和火焰传播速度之间的关系进行了研究,发现粉尘在燃烧过程中出现震荡火焰,且火焰温度随着粉尘体积质量的增大呈现先增大后减小的趋势;丁以斌等[5]对锆粉尘爆炸过程中火焰的微观结构进行了研究,发现火焰的微观结构受粉尘体积质量的影响,火焰传播速度经历加速,减速和稳定的过程;蒯念生等[6-8]从机理上探讨了煤粉的成分与爆炸强度的关系,指出点火能量对挥发分质量分数高的粉尘影响更大。以上学者的研究内容是在特定条件下对样品进行研究,对粉尘爆炸过程中的火焰传播特性及机理研究相对不足。

本文中以 2 种不同质量分数挥发分的煤粉为实验样品,通过高速摄影装置和红外热成像装置对不同条件下煤粉爆炸过程中的火焰传播速度和温度进行系统的研究,分析其传播机理和传播规律,以期研究结果对煤矿粉尘的安全防范有一定的指导意义。

1 实 验

1.1 实验装置

实验装置示意图如图 1 所示,主要是由燃烧管、高压喷粉系统、点火系统、高速摄影装置、红外热成像装置和控制系统等部分组成。燃烧管是一个上端开口的半封闭圆柱形玻璃管,内径为 68 mm、高 300 mm。煤粉均匀地铺放在燃烧管的底部,通过高压喷粉系统将煤粉喷起,在燃烧管内形成煤粉尘云,

* **收稿日期**: 2013-04-01; **修回日期**: 2013-06-29
基金项目: 国家自然科学基金项目(51174047, 11102091);
江苏省普通高校研究生科研创新计划项目(CXZZ13_0216)
作者简介: 曹卫国(1984—),男,博士研究生。

喷粉压力为 0.7 MPa。点火位置距燃烧管底部 1/3 位置处，点火电极间距为 6 mm，高速摄影装置和红外热成像装置分别位于燃烧管的两侧 5m 远处，点火电源为 8000 V，点火能量可采用下式计算：

$$E=\int_0^t I(t)U(t)\mathrm{d}t \tag{1}$$

式中：E 表示电火花能量，$I(t)$ 表示电路放电时电流，$U(t)$ 表示电路放电时电压。

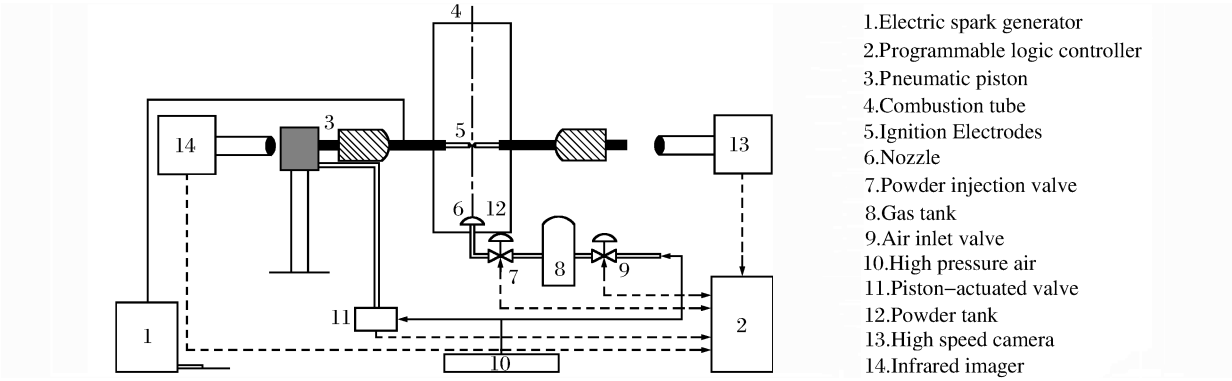


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic of experimental apparatus

在实验开始之前，先用电子天平称量一定质量的煤粉，然后通过压缩空气将煤粉分散在燃烧管于形成煤粉尘云，当煤粉尘云恰好充满燃烧管时用电火花将其点燃，这样既可以保证了每次实验时煤粉的平均体积质量一致，又可以降低喷粉结束后残留的湍流强度对火焰传播过程的影响。煤粉尘云被点燃后，用高速摄影装置和红外热成像装置分别对火焰在管道内的传播过程和燃烧管管口处的温度分布进行实时记录，实验过程中高速摄影装置和红外热成像装置通过控制系统和电极点火同步进行。

1.2　实验材料

实验中选取 2 种不同挥发分质量分数的煤粉（记为 1＃、2＃）来研究煤粉尘爆炸过程中的火焰传播特性。在实验之前，通过通氮干燥法、缓慢灰化法以及 GB/T212-2008《煤的工业分析方法》中的挥发分测定法对 2 种煤粉进行工业分析，结果如表 1 所示。为了尽量减少煤粉粒度对火焰结构的影响，煤粉粉碎后过 200 目筛。粒径分布如图 2 所示，D 为颗粒直径，ϕ 相应粒径的颗粒在煤粉中的分数，2 种煤粉的颗粒尺度在相同范围内。

表 1 煤粉各组分的质量分数

Table 1 Mass fraction of every component in coal dust

煤粉	w(水分)/%	w(灰分)/%	w(挥发分)/%	w(固定碳)/%
1＃	3.54	14.46	41.75	40.25
2＃	3.93	19.72	35.40	40.95

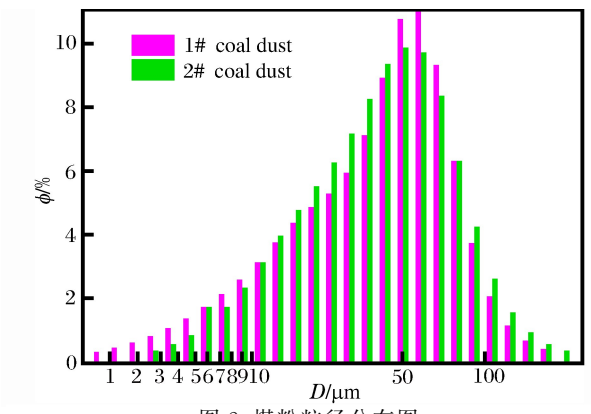


图 2 煤粉粒径分布图

Fig. 2 Diameter distribution of the coal dust particle

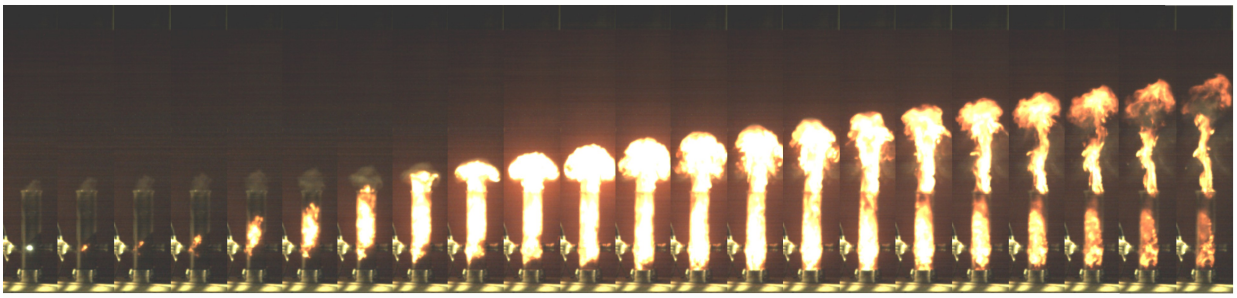
2　煤粉尘云火焰特征

2.1　煤粉尘云火焰传播特征

利用高速摄影装置记录了在垂直的燃烧管内火焰在 2 种煤粉尘云中的传播过程，如图 3 所示。实验中采用的点火能量为 5 J，2 种煤粉尘云的体积质量均为500 g/m^3。煤粉尘云被点然后，随着时间的延续，火焰在管道内迅速传播。在前 40 ms 内火焰在 2 种煤粉尘云中的传播趋势相近，传播速度缓慢，在此阶段主要是煤粉粒子的受热、裂解过程。当火焰到达竖直燃烧管管口处时，火焰开始向周围自由

膨胀，并形成蘑菇云状火球，之后火焰呈现振荡传播，主要是由于在无约束的条件下，煤粉颗粒的存在导致热辐射和热传递之间不匹配造成的[9]。

(a) 1# coal dust



(b) 2# coal dust

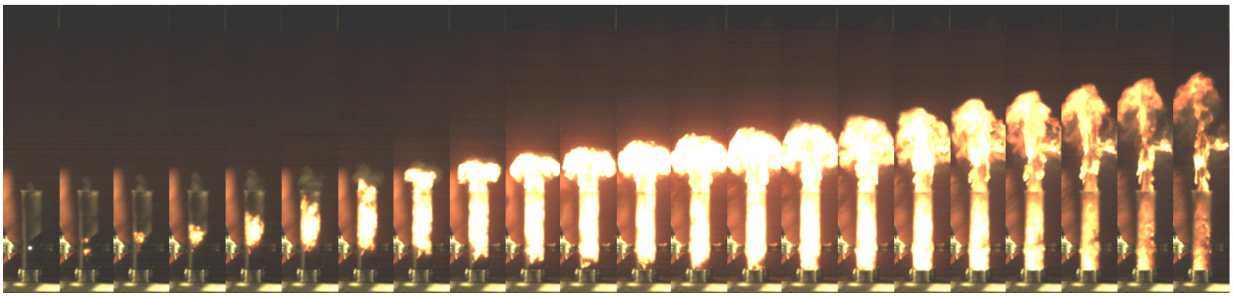


图 3 煤粉尘云火焰高速摄影照片

Fig. 3 High-speed photographs of coal dust cloud flame

1＃煤粉在 0～150 ms 期间火焰呈连续传播状态，此后火焰前锋和火焰底部出现中断现象。而 2＃煤粉在 0～190 ms 期间火焰呈连续传播状态。对于挥发分较大的 1＃煤粉来说，短时间内高温裂解、气化形成的小分子烷烃、烯烃和芳香烃多于 2＃煤粉，燃烧速度快，连续火焰存在的时间也较短，此阶段 2 种煤粉尘均为挥发出的可燃气体混合物的燃烧过程，并不是煤粉尘颗粒自身的燃烧；此后火焰传播为非连续传播，主要是由于煤粉中挥发分燃尽，固定碳开始燃烧导致的。傅维标等[9]用指数 F_z 来描述煤粉的着火特性：

$$F_z = 100\ [w(\text{挥发分}) + w(\text{水分})]^2 w(\text{固定碳}) \tag{2}$$

指数 F_z 值越大，说明该煤种越易于着火。由于 1＃煤粉挥发分的质量分数较大，煤中的固定碳相对较少，燃烧所需要的时间随之减少；而且挥发分燃烧放出更多的热量，这样易于造成燃烧管内高温，从而有助于固定碳的迅速燃烧。在燃烧后期，火焰边缘的颜色呈暗黄色，这是因为火焰在传播的过程中，燃烧区域的热量传递到未燃烧区域，造成未燃烧区域温度不断升高，进而产生的辐射光线[10]。

2.2 煤粉尘云对火焰前锋阵面和火焰传播速度的影响因素

2.2.1 煤粉尘云的体积质量对火焰前锋阵面和火焰传播速度的影响

如图 4～5 所示的是在点火能量为 5 J 的条件下不同体积质量煤粉尘云火焰前锋阵面位移和火焰传播速度随时间的变化关系。由图 4 可知，随着点火时间的延续，火焰沿垂直管向上传播，当煤粉尘云体积质量为 500 g/m^{3}时，火焰前锋阵面上升位置最高。在燃烧管内部，火焰向四周传播，当火焰到达管壁，由于管道的约束效应，火焰只有沿着燃烧管传播，燃烧产物的膨胀使得火焰传播加快。

由图 5 可知，火焰传播速度整体上呈现先增大后减小的趋势，在燃烧后半段火焰到达管口后，火焰速度出现震荡，最终火焰速度趋于稳定。在煤粉尘云的体积质量为 250、500 和 750 g/m^{3}的条件下，1＃煤粉分别在点火后 100、40 和 60 ms 时火焰速度达到最大值，分别为 3.1、5.1 和 4.1 m/s；而 2＃煤粉分别在点火后 140、60 和 90 ms 时火焰速度达到最大值，分别为 2.4、4.2 和 4.1 m/s。2 种煤粉在点火后即 40～140 ms 阶段分别达到火焰传播速度的最大值。但在同等条件下，1＃煤粉火焰燃烧速度较 2＃煤粉大且达到最大速度的时间短。主要是因为煤粉尘云火焰传播过程属于不规则的湍流运动，煤粉尘

的挥发分分解加速周围煤粉颗粒的燃烧，进一步增大了煤粉尘云的湍流强度，火焰的传播速度也随之加快。由于 1＃煤粉挥发分的质量分数高，高温裂解成可燃性小分子气体所需的时间短[11]，在较短的时间内煤粉表面产生的空隙增多，增大了燃烧反应的表面积，使反应速率加快。

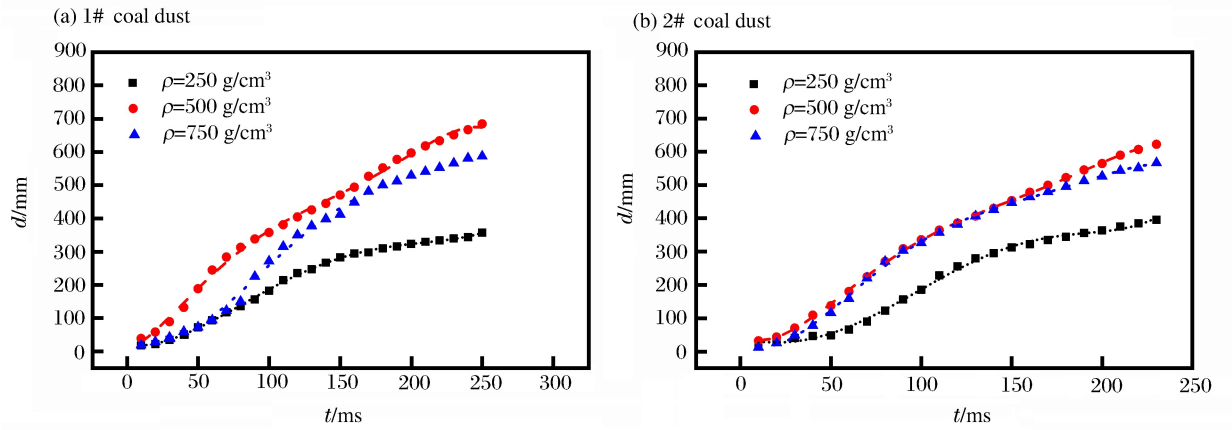


图 4　不同体积质量的煤粉尘云火焰前锋阵面位移时程曲线

Fig. 4　Displacement-time curves for the flame front of coal dust with different volumic masses

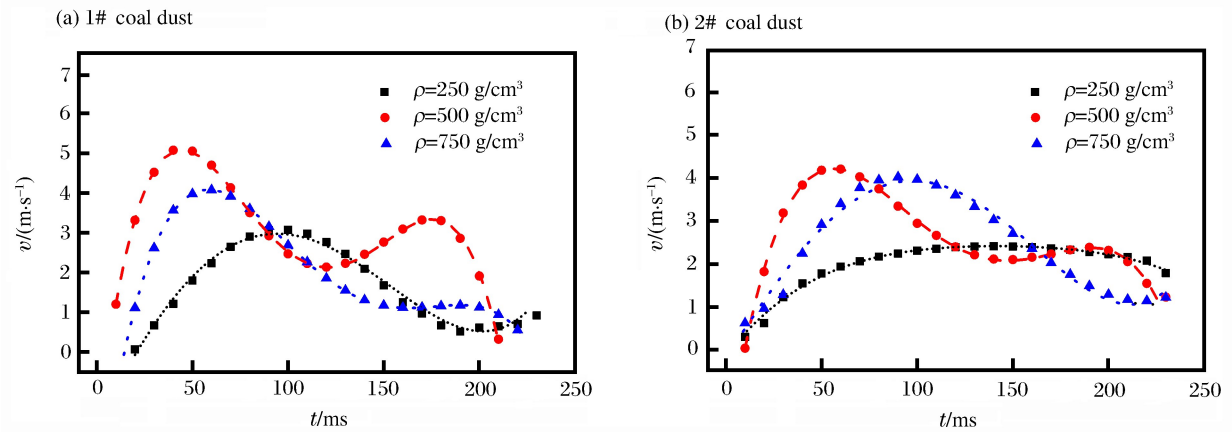


图 5　不同体积质量的煤粉尘云火焰传播速度时程曲线

Fig. 5　Velocity-time curves for the flame front of coal dust with different volumic masses

此外，2 种煤粉的火焰传播速度均在体积质量为 500 g/m³ 的情况下传播速度最快。在较低体积质量时，随着煤粉尘云体积质量的增加，单位体积内着火的煤粉颗粒数增多，煤粉尘云火焰前锋阵面和火焰传播速度增大；在较高体积质量时，随着煤粉尘云的增加，单位体积内煤粉颗粒数进一步增加，使得较多的煤粉颗粒因为供氧不足而不能完全参与反应，且燃烧放出的部分热量被周围未燃烧的煤粉粒子吸收，使得煤粉尘云火焰前锋阵面和火焰传播速度下降[12]。

2.2.2　点火能量对火焰前锋阵面和火焰速度的影响

图 6～7 所示为在不同的点火能量下体积质量为 500 g/m³ 时 2 种煤粉尘云火焰前锋阵面和火焰传播速度随时间的变化关系。点火能量分别为 3、5 和 8 J，相应的点火持续时间分别为 1.3、2.0 和 3.3 ms。随着点火能量的增强，电火花持续的时间也相应增加。由图 6 可知，随着点火能量的增加，火焰前锋阵面上升速度加快，火焰前锋阵面上升的最高距离增大。由图 7 可知，火焰速度传播规律和图 5 相似。在 3、5 和 8 J 的点火能量下，1＃煤粉火焰传播速度分别在点火后 50、40 和 20 ms 时达到最大值，分别为 4.9、5.1 和 6.4 m/s；2＃煤粉火焰传播速度分别在点火后 60、60 和 50 ms 时达到最大值，分别为 3.6、4.2 和 5.4 m/s；随着点火能量的增加，煤粉尘云的火焰速度逐渐增大且达到最大速度的时间缩短。这主要是因为在电火花点火过程中击穿空气，形成局部高温，随着点火能量的增加，电火花持续的时间增加，使得电火花附近高温的持续时间更长，点火源范围增大，煤粉粒子表面可以在更短的时间

内从点火源获得能量，粒子表面温度急剧升高，裂解形成可燃性气体，与周围空气发生氧化反应放出热量，进一步加快煤粉粒子的热分解反应[7]，导致火焰传播速度的增加。

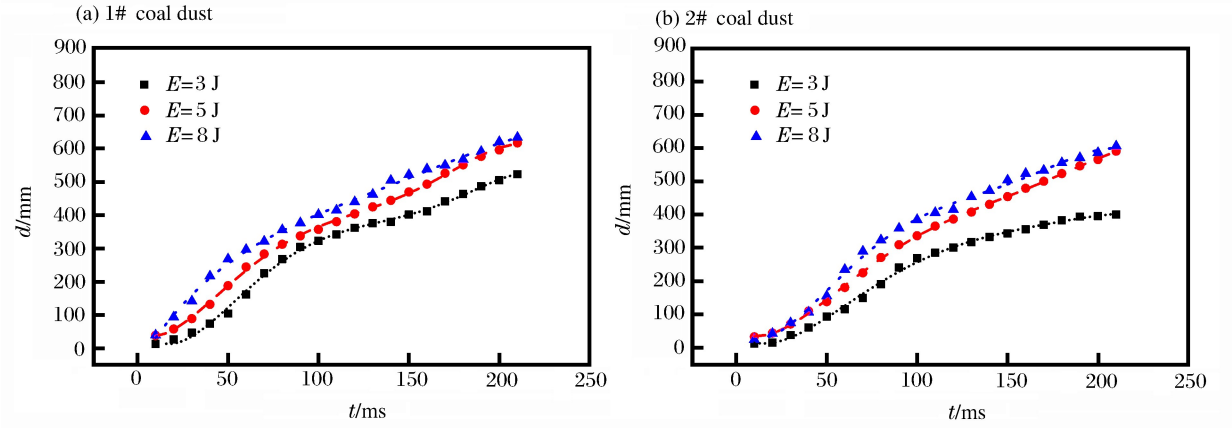


图 6 不同点火能量的煤粉尘云火焰前锋阵面位移时程曲线

Fig. 6 Displacement-time curves for the flame front of coal dust with different ignition energies

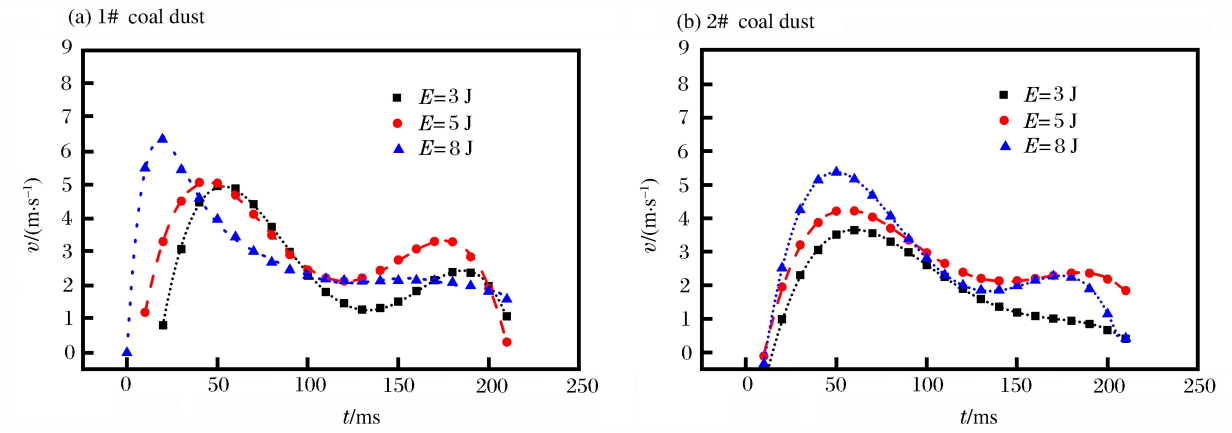


图 7 不同点火能量的煤粉尘云火焰传播速度时程曲线

Fig. 7 Velocity-time curves for the flame front of coal dust with different ignition energies

2.3 煤粉尘云火焰温度特征

图 8～9 是通过红外热像装置测量得到的 2 种煤粉燃烧管管口火焰温度随时间变化的关系，红外热成像装置从捕捉到火焰的瞬间开始计时，如图 8(a)中，3 条曲线分别从 0、100 和 300ms 计时。在点火能量相同的条件下，2 种不同挥发分质量分数的煤粉的最高温度均和煤粉尘云体积质量有关。由图 8 可知，在 250、500 和 750 g/m^3 的体积质量的条件下，1＃煤粉尘云的最高火焰温度分别为 987.4、1 298.1和 1 247.9 ℃；2＃煤粉尘云的最高温度分别为 939.3、1 273.2 和 1 223.3℃。因此，当煤粉尘云体积质量较低时，随煤粉尘云体积质量的增大，煤粉尘云的火焰温度都呈现上升趋势，当火焰温度达到最大值后，继续增加煤粉尘云的体积质量，火焰温度反而降低，这与其火焰速度传播规律类似。

在粉尘云体积质量为 500 g/m^3 条件下，煤粉尘云达到的最高温度随着点火能量的增大而增加，由图 9 可知，在 3、5 和 8 J 的点火能量下，1＃煤粉尘云的最高温度分别为 1 275.3、1 298.1 和 1 314.5 ℃；2＃煤粉尘云的最高温度分别为 1 214.8、1 273.2 和 1 295.3 ℃。

由于煤粉尘在燃烧管内燃烧过程中，燃烧区和预热区中的颗粒数都随火焰的传播而逐渐增加，在煤粉尘体积质量较低时，管道内空气充足，满足煤粉尘的燃烧所需氧气，最大温度随着体积质量的增加而增加；当体积质量超过某一值时，预热区内粒子数增加，造成燃烧管内氧气不足且过量的煤粉尘吸收了燃烧的部分能量，使得煤粉尘不能充分燃烧导致放出热量减少，温度下降[13]。

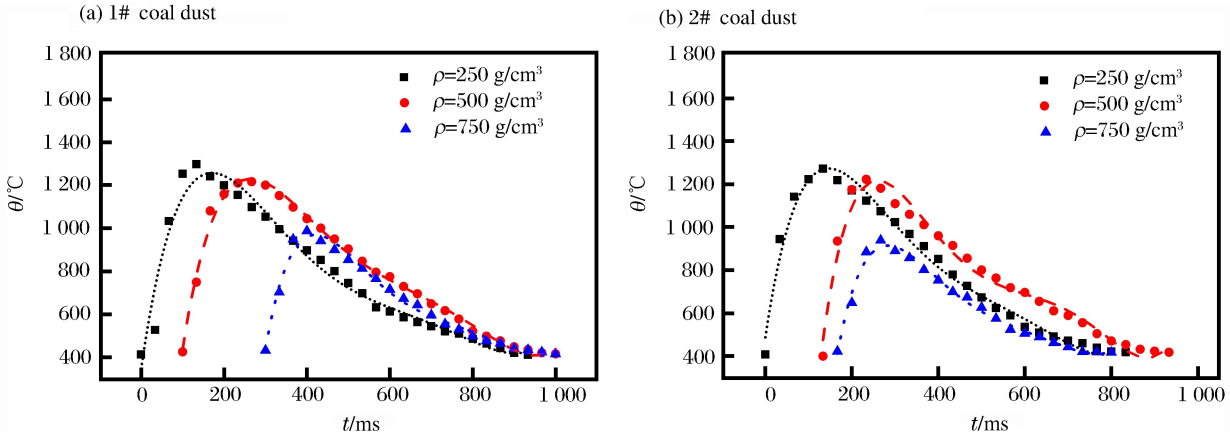


图 8　不同体积质量的煤粉尘云火焰温度时程曲线

Fig. 8　Temperature-time curves for the flame of coal dust with different volumic masses

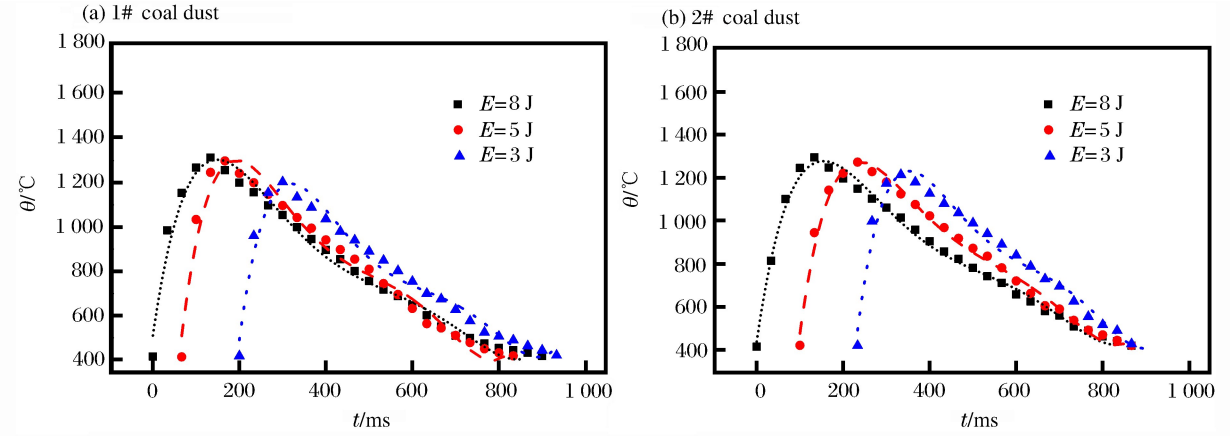


图 9　不同点火能量的煤粉尘云火焰温度时程曲线

Fig. 9　Temperature-time curves for the flame of coal dust with different ignition energies

2.4　实验数据拟合曲线

对煤粉尘云火焰传播速度和火焰温度的实验数据进行趋势线拟合后可以发现，无论在固定点火能量或煤粉尘云体积质量的条件下，煤粉尘云火焰传播速度和火焰温度与时间的关系均可采用拟合出的多项式作为经验公式：

$$f(x)=a+bx+cx^2+dx^3+ex^4+fx^5 \tag{3}$$

在点火能量为 8 J，煤粉尘云体积质量为 500 g/m³ 条件下，对于 1＃煤粉，火焰传播速度的拟合公式为：

$$v(t)=2.34\times10^{-2}+9.25\times10^{-1}\,t-4.86\times10^{-2}\,t^2+1.18\times10^{-3}\,t^3+1.61\times10^{-5}\,t^4+1.29\times10^{-7}\,t^5 \tag{4}$$

适用范围在点火后 20～210 ms；火焰温度的拟合公式为：

$$\theta(t)=5.09\times10^{2}+1.34\times10^{1}\,t-7.69\times10^{-2}\,t^2+1.57\times10^{-4}\,t^3-1.81\times10^{-7}\,t^4+7.04\times10^{-11}\,t^5 \tag{5}$$

适用范围在点火后 20～800 ms。

对于 2＃煤粉，在同等条件下，火焰传播速度的拟合公式为：

$$v(t)=-4.51+4.69\times10^{-1}\,t-8.24\times10^{-3}\,t^2+5.06\times10^{-5}\,t^3-1.05\times10^{-7}\,t^4 \tag{6}$$

适用范围在点火后 20～210 ms；火焰温度的拟合公式为：

$$\theta(t)=4.37\times10^{2}+1.39\times10^{1}\,t-7.84\times10^{-2}\,t^2+1.79\times10^{-4}\,t^3-1.89\times10^{-7}\,t^4+7.47\times10^{-11}\,t^5 \tag{7}$$

适用范围在点火后 20～800 ms。可对拟合公式的有效性进行验证，例如在 1＃煤粉尘云被点火 100 ms

后,火焰传播速度为2.23 m/s,并计算出火焰上升高度为 0.39 m。通过高速摄影装置拍摄的自发光照片对该拟合方程进行了实验验证,同时通过红外热成像装置对火焰温度拟合公式进行了验证,此结果与仲倩等[14]通过红外热成像装置得出的规律相一致。

3 结 论

(1)2 种煤粉尘云的火焰传播规律相似,火焰传播速度整体上均呈现出先增大后减小的趋势,在燃烧后半段火焰传播速度出现震荡现象,挥发分质量分数高的 1#煤粉火焰连续传播的时间比挥发分质量分数较低的 2#煤粉的时间短。

(2)在同等实验条件下,1#煤粉的火焰传播速度和火焰温度高于 2#煤的粉;随着煤粉尘云体积质量的增加,煤粉尘云火焰传播速度和火焰温度先增大后减小,均在 500 g/m^{3}时出现最大值;随着点火能量的增加,煤粉尘云火焰传播速度和火焰温度都相应增加,在煤粉尘云体积质量为 500 g/m^3,点火能量为 8 J 的条件下,1#煤粉和 2#煤粉的火焰传播速度分别为 6.4 和 5.4 m/s,最高火焰温度分别达到 1 314.5 和 1 295.3℃。

(3)在特定的实验条件下,煤粉尘云火焰传播速度和火焰温度均符合相应的经验公式,并通过实验对经验公式进行了验证。

参考文献:

[1] Proust Ch. A few fundamental aspects about ignition and flame propagation in dust clouds[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2006,19(2/3):104-120.

[2] Han O, Masaaki Y, Matsuda T, et al. A study of flame propagation mechanisms in lycopodium dust clouds based on dust particles' behavior[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2001,14(3):153-160.

[3] Han O, Masaaki Y, Matsuda T, et al. Behavior of flames propagating through lycopodium dust clouds in a vertical duct[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2000,13(6):449-457.

[4] Gao W, Dobashi R, Toshio M, et al. Effects of particle characteristics on flame propagation behavior during organic dust explosions in a half-closed chamber[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2012,25(6):993-999.

[5] 丁以斌,孙金华,何学超,等.锆粉尘云的火焰传播特性[J].燃烧科学与技术,2010,16(4):353-358.
Ding Yi-bin, Sun Jin-hua, He Xue-chao, et al. Flame propagation characteristic of zirconium particle cloud[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2010,16(4):353-358.

[6] 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 Nian-sheng, Huang Wei-xing, Yuan Jing-jie, et al. Influence of ignition energy on dust explosion behavior [J]. Explosion and Shock Waves, 2012,32(4):432-438.

[7] 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 Cheng-feng, Duan Zi-hua, Zhang Yong-fa, et al. Explosion mechanism of carbon powder[J]. Explosion and Shock Waves, 2010,30(3):325-328.

[8] 高聪,李化,苏丹,等.密闭空间煤粉的爆炸特性[J].爆炸与冲击,2010,30(2):164-168.
Gao Cong, Li Hua, Su Dan, et al. Explosion characteristics of coal dust in a sealed vessel[J]. Explosion and Shock Waves, 2010,30(2):164-168.

[9] 徐旭常,周力行.燃烧技术手册[M].北京:化学工业出版社,2007.

[10] Ewald K H, Anselmi-Tamburini U, Munir Z A. Combustion of zirconium powders in oxygen[J]. Materials Science and Engineering, 2000, 291(1/2):118-130.

[11] Hanai H, Kobayashi H, Niioka T. A numerical study of pulsating flame propagation in mixtures of gas and particles[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2000,28(1):815-822.

[12] 潘峰,马超,曹卫国,等.玉米淀粉粉尘爆炸危险性研究[J].中国安全科学学报,2011:21(7):46-51.
Pan Feng, Ma Chao, Cao Wei-guo, et al. Research on explosion risk of corn starch dust[J]. China Safety Science

Journal, 2011,21(7):46-51.

[13] Dreizin L, Hoffman K. Constant pressure combustion of aerosol of coarse magnesium panicles in microgravity[J]. Combustion and Flame, 1999,118(1):262-280.

[14] 仲倩,王伯良,黄菊,等.火球动态模型在温压炸药热毁伤效应评估中的应用[J].爆炸与冲击,2011,31(5):528-532.
Zhong Qian, Wang Bo-liang, Huang Ju, et al. Application of a dynamic model to thermal damage estimation of thermobaric explosives[J]. Explosion and Shock Waves, 2011,31(5):528-532.

Characteristics of flame propagation during coal dust cloud explosion *

Cao Wei-guo[1], Xu Sen[1,2], Liang Ji-yuan[1], Gao Wei[3], Pan Feng[1,2], Rao Guo-ning[1]
(1. *School of Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing* 210094, *Jiangsu, China*;
2. *National Quality Supervision and Inspection Center for Industrial Explosive Materials, Nanjing* 210094, *Jiangsu, China*;
3. *School of Engineering, The University of Tokyo, Tokyo* 113-8656, *Japan*)

Abstract: Two kinds of different volatile pulverized coal were tested in a semi-enclosed vertical combustion tube. And a high-speed video camera and an infrared imager were used to record the flame propagation process and the spatial flame temperature distribution, respectively. The changes of the flame propagation velocity and temperature with time were analyzed for the two different coal dust clouds during combustion. Experimental results show that the flame propagation velocity and flame temperature of the high-volatile coal dust cloud are higher than those of the low-volatile coal dust cloud under the same experimental conditions. And the volumic mass of coal dust cloud as well as ignition energy can affect the flame propagation. With increasing the volumic mass of coal dust cloud, the flame propagation velocity and the flame temperature increase at first and then decrease, oscillating phenomena appear in the next process. With increasing the ignition energy, the flame propagation velocity and flame temperature increase. Based on the experimental data, an empirical formula was proposed for calculating the flame propagation velocity and flame temperature under certain conditions.

Key words: mechanics of explosion; ignition energy; flame temperature; coal dust cloud mass fraction; dust explosion; flame propagation

---

* Received 1 April 2013; Revised 29 June 2013
Supported by the National Natural Science Foundation of China (51174047,11102091)
Corresponding author: Xu Sen, 212030019@njust.edu.cn

(责任编辑　王易难)