DOI: 10.11883/bzycj-2017-0244

不同粒径 PMMA 粉尘云火焰温度特性研究*

甘 波[1],高 伟[1],张新燕[1,2],姜海鹏[1],毕明树[1]
(1.大连理工大学化工机械与安全学院,辽宁 大连 116024;
2.山东科技大学矿业与安全工程学院,山东 青岛 271019)

摘要:为揭示粒径分布对聚甲基丙烯酸甲酯(polymethyl methacrylate, PMMA)粉尘云火焰温度的影响,本文分别采用热电偶和高速比色测温法测量了开敞空间不同粒径 PMMA 粉尘云的火焰温度特性。结果表明:相比 30 μm 粉尘粒子,100 nm 粉尘粒子热解/挥发速率较快,燃烧更加充分,粉尘云火焰的最高温度可达 1 551 ℃,而 30 μm 粉尘云火焰最高温度仅为 1 108 ℃;在微米尺度,随着 PMMA 粉尘粒径的增大,火焰最高温度和高温火焰区面积先增大后减小;20 μm 粉尘粒子由于其分散性较好,裂解气化特征时间尺度与燃烧反应特征时间尺度较接近,燃烧反应充分,火焰最高温度和高温火焰区面积均最大。

关键词:PMMA;粉尘爆炸;粒径分布;火焰温度
中图分类号:O383; X932 **国标学科代码**:13035 **文献标志码**:A

由于在化工、轻工和能源等行业广泛使用粉体为原材料或者中间体进行加工生产,粉尘爆炸风险大大增加,而粉尘爆炸一旦发生势必造成大量的人员伤亡和巨大的财产损失。为有效预防粉尘爆炸的发生,降低爆炸灾害后果,国内外学者在粉尘爆炸特性(最大爆炸压力、最大爆炸压力上升速率、最小点火能、爆炸下限等)和粉尘火焰传播特性等方面开展了大量实验研究[1-3],其中火焰传播特性的揭示可为制定粉尘爆炸防控技术提供理论基础。Dobashi 等[4]和 Chen 等[5]通过实验研究揭示十八醇粉尘云火焰形态:中心为形状不规则的黄色发光区域,黄色区域外围的分布大量离散的蓝色发光点火焰。Gao 等[6-10]、高伟等[11]、曹卫国等[12]采用带通滤波高速摄影技术系统的研究了半封闭管道及开敞空间有机粉尘粒子热特性及粒径分布特性对粉尘爆炸火焰传播特性的影响。Wingerden 等[13]研究发现管道内玉米淀粉、石松子和煤粉粉尘云火焰前锋都呈抛物线形状。孙金华[14]通过实验揭示了 PMMA 粉尘云火焰结构和燃烧反应区特征,认为火焰结构可分为未燃区、主反应区和黄色发光区。Zhang 等[15]通过实验研究发现微米和纳米 PMMA 粉尘云火焰传播有明显区别。Zhang 等[16]还研究了不同粒径分布 PMMA 粉尘云火焰传播行为,结果发现火焰传播速度越快,则火焰温度越高。

不难发现,前人的研究主要集中在火焰形态、结构、传播行为及影响因素方面,很少涉及火焰温度分布规律。火焰温度对有效评估粉尘爆炸灾害后果具有重要的作用。因此,本文中采用自制 R 型热电偶和高速比色测温法对开敞空间内不同粒径 PMMA 粉尘云火焰温度进行测量,旨在揭示粉尘云火焰传播过程中的温度分布特性,为评估粉尘爆炸危害提供实验依据。

1 实验系统

图 1 所示为开放式粉尘爆炸火焰传播实验系统。该系统主要由圆柱形燃烧管道、配气及喷粉系统、高压点火系统、热电偶测温系统、高速比色测温系统、数据采集仪和时间控制器等组成。燃烧管道分为上、中、下 3 部分,其中中部管段内径为 90 mm,高为 125 mm,当限位器通电动作时,中部管道向下滑落形成开敞的燃烧空间。时间控制系统可以对喷粉、中部管道滑落、高速摄像机摄录,热电偶气缸的动作精准控制,时间控制如图 2 所示。实验中将一定量的粉尘均匀铺放于实验底座粉尘仓内,然后由

* **收稿日期**:2017-07-10; **修回日期**:2017-10-02
基金项目:国家自然科学基金(51406023,51674059);中央高校基本科研业务费专项(DUT16QY05)
第一作者:甘 波(1994—),男,硕士研究生; **通信作者**:高 伟,gaoweidlut@dlut.edu.cn。

0.5 MPa的空气经过分散帽后携带进入燃烧管道形成粉尘云，气流持续时间 0.5 s，此时高速摄像机开始摄录，数据采集仪由高速摄像机触发同时开始采集数据。在 0.7 s 时限位器动作，中部管道滑落形成开仓空间，1.0 s 时由直径为 1 mm 的钨丝放电产生电火花引燃粉尘，点火电极之间间距约为 4 mm，点火电压 15 kV，电极放电点火时间 10 ms。热电偶测温方法中采用 FASTCAM SA4 型高速摄像机记录火焰传播过程，高速比色测温系统使用型号为 Thermera-HS 高速摄像机拍摄火焰形态，进行后续处理可得到火焰温度分布。

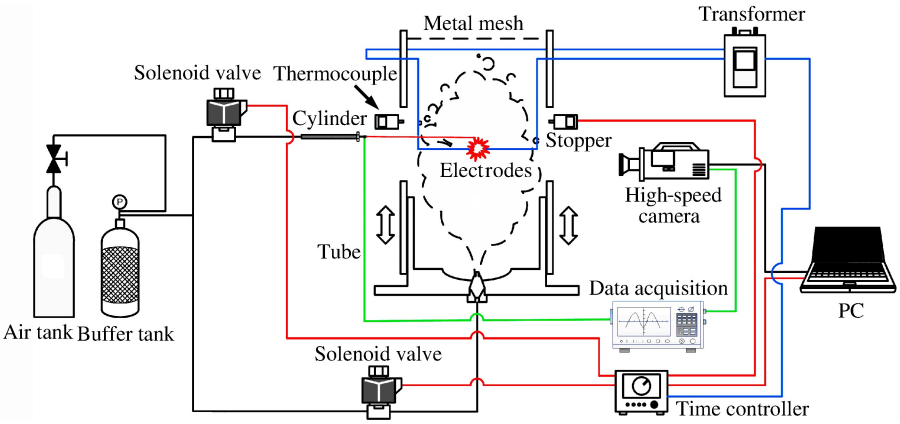


图 1 开放式粉尘爆炸火焰传播实验系统示意图

Fig. 1 Illustration of experimental setup for open-space dust flame propagation

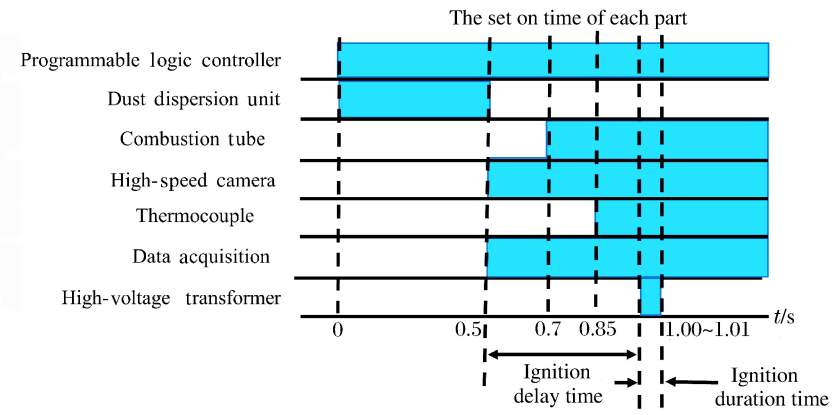


图 2 时序控制示意图

Fig. 2 Schematic diagram of timing control

1.1 热电偶测温系统

采用直径 25 μm 的铂/铑合金丝制作 R 型微细热电偶作为温度测量元件，如图 3 所示。为消除点火时高压电流诱导产生的电磁场对热电偶测温的影响，实验中将 2 根热电偶丝分别穿过内径为1 mm的陶瓷管，同时将热电偶焊点处伸出陶瓷管 2～3 mm。由于热电偶属于接触式测温元件，其本身具有一定的热惯性，为了获得更加准确的火焰温度值，需要对热电偶测量值进行温度修正。因为在热电偶焊点处对流换热远大于辐射换热，故焊点处的热平衡关系可以表示为[17]：

$$\rho c_p V \frac{\mathrm{d}T_\mathrm{m}}{\mathrm{d}t} = hS(T - T_\mathrm{m}) \tag{1}$$

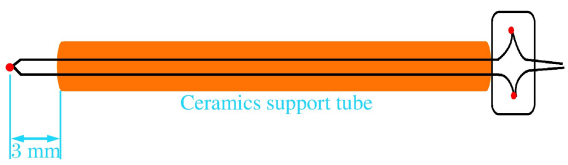


图 3 R 型热电偶示意图

Fig. 3 Type R thermocouple

式中：h 为对流换热系数，T 为接点处气体的温度，ρ、c_p、V、S 和 T_m 分别为热电偶接点密度、质量定压热容、体积、表面积和温度。

假设热电偶焊点为圆球形状，则：

$$V=\frac{\pi}{6}d^3 \tag{2}$$

$$S=\pi d^2 \tag{3}$$

整理以上 3 式可以得到：

$$\frac{\rho c_p \pi d^3}{6h\pi d^2}\frac{\mathrm{d}T_m}{\mathrm{d}t}=T-T_m \tag{4}$$

式中左边第一项即为时间常数 τ：

$$\tau=\frac{\rho c_p \pi d^3}{6\pi d^2}=\frac{\rho c_p d^2}{6hd}=\frac{\rho c_p d^2}{6\left(\frac{hd}{\lambda_f}\right)\lambda_f}=\frac{\rho c_p d^2}{6Nu\lambda_f} \tag{5}$$

式中：Nu 为努塞尔数，根据实验条件取为 2；d 为热电偶接点直径，取 $d=5\times10^{-5}$ m；λ_f 为热电偶周围气体的导热系数，取 $\lambda_f=0.081$ W/(m·K)；$\rho=2.14\times10^4$ kg/m^3，$c_p=159$ J/(kg·K)。计算得到 $\tau=8.75$ ms。因此，采用下式对热电偶测温值进行修正：

$$T=T_m+8.75\times10^{-3}\frac{\mathrm{d}T_m}{\mathrm{d}t} \tag{6}$$

采用自制 R 型微细热电偶测量 100 nm 及 30 μm PMMA 粉尘云火焰传播过程中的温度分布。实验中，将热电偶固定在气动笔形气缸上，开始喷粉后 0.85 s 时刻，0.5 MPa 的高压气流推动笔形气缸将热电偶推入粉尘云流场，保持热电偶的接点位于点火电极正上方 2 cm 处。

1.2　比色测温系统

热电偶测温属于定点接触式测温，只能测得热电偶焊点所在位置处的火焰温度值，为了获得整个燃烧区域火焰的温度分布，采用高速摄像机拍摄火焰图像，图像经过量化处理后送入计算机，计算机根据比色测温原理处理后获得爆炸火焰的温度分布。

由普朗克定律以及维恩位移定律可知：温度愈高，同一波长下的光谱辐射力愈大；并且在一定的温度下，黑体的光谱辐射力在某一波长下具有最大值。因此通过测量黑体辐射出的光谱分布特性曲线可知黑体温度。然而测量整个光谱辐射曲线十分困难，因此在许多实际问题中，通常由两种相邻波长之间的辐射能量比来测量温度。原理为当黑体温度发生变化时，这两种波长的光谱辐射力之比也会随温度发生变化，因此测量这两种波长光谱辐射力的比值可知黑体温度。虽然粉尘火焰不是黑体，但是可以近似的把火焰当成灰体处理，因为火焰的主要辐射成分是辐射光谱连续的固体颗粒[18]。假定这两种相邻波长的发射率 ε 相等[19]，根据图 4 则有：

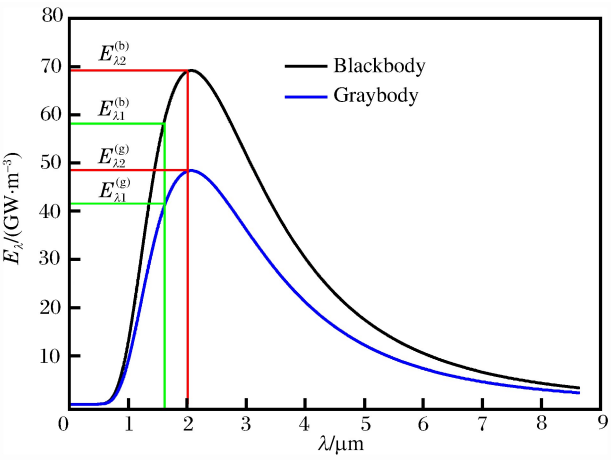


图 4　比色温度测量方法

Fig. 4　Colorime temperature measurement

$$\frac{E_{\lambda1}^{(g)}}{E_{\lambda2}^{(g)}}=\frac{\varepsilon E_{\lambda1}^{(b)}}{\varepsilon E_{\lambda2}^{(b)}}=\frac{E_{\lambda1}^{(b)}}{E_{\lambda2}^{(b)}} \tag{7}$$

式中：ε 为发射率，$E_{\lambda1}^{(g)}$ 和 $E_{\lambda1}^{(b)}$ 为波长 λ_1 时灰体和黑体的光谱辐射力，$E_{\lambda2}^{(g)}$ 和 $E_{\lambda2}^{(b)}$ 为波长 λ_2 时灰体和黑体的光谱辐射力。由此可知，粉尘火焰在这两种波长下的光谱辐射力之比与黑体在对应波长下的光谱辐射力之比相等，因此利用黑体的辐射特性处理火焰图片后能够获得火焰温度。

2　结果与讨论

2.1　热电偶测温结果

图 5 所示为开敞空间内粉尘质量浓度为 364 g/m^{3}的 100 nm 及 30 μm 的 PMMA 粉尘云火焰温度。从图中可以看出，100 nm PMMA 粉尘云火焰的最高温度可达到 1 551 ℃，30 μm PMMA 粉尘云火焰最高温度仅达到 1 108 ℃。纳米粉尘云的热解/挥发速率较快，燃烧反应充分，因而其火焰的温度高于微米粉尘云。由于纳米粉尘云火焰传播速度大于微米粉尘云火焰[11]，因而纳米粉尘云火焰前锋及预热区能更早的传播到热电偶测温接点处。由图可知，纳米粉尘云火焰温度开始上升时刻早于微米粉尘云火焰。对于纳米粉尘云火焰，火焰传播约 10 ms 后火焰温度开始快速上升，在约 70 ms 时刻，火焰温度达到一个极大值，之后火焰温度进入波动增长阶段，在约 270 ms 时刻，火焰温度达到最大值。这一温度波动增长的现象，极有可能是由团聚/结块粒子的热解/挥发与燃烧放热所导致。而对于微米粉尘云火焰，火焰传播约 35 ms 后火焰温度开始快速持续上升，在约 133 ms 时刻，火焰温度达到最大值，之后由于热量损失温度值略有下降，而后又升高到最高火焰温度，这是由于 30 μm 的 PMMA 粉尘云火焰局部预混燃烧的燃烧机理所导致[11]。

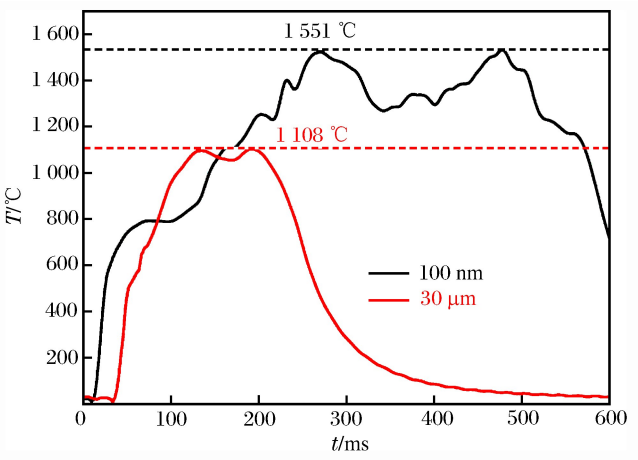


图 5　PMMA 粉尘云火焰温度时程曲线

Fig. 5　Flame temperature histories of PMMA dust cloud

2.2　比色测温法结果

图 6～9 显示了质量粉尘浓度均为 290 g/m^{3}粒径分别为 3、10、20 和 30 μm 的 PMMA 粉尘云在不同时刻火焰形态及火焰温度分布。

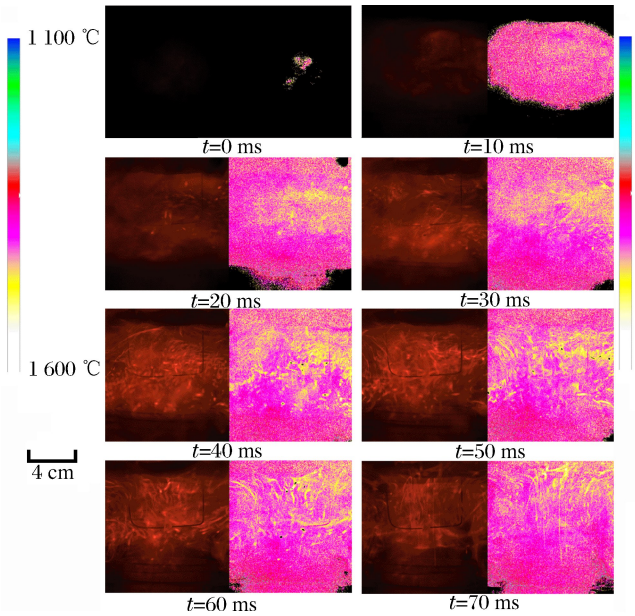


图 6　3 μm 的 PMMA 粉尘云火焰形态和火焰温度分布

Fig. 6　Flame configuration and temperature distribution of 3 μm PMMA dust cloud

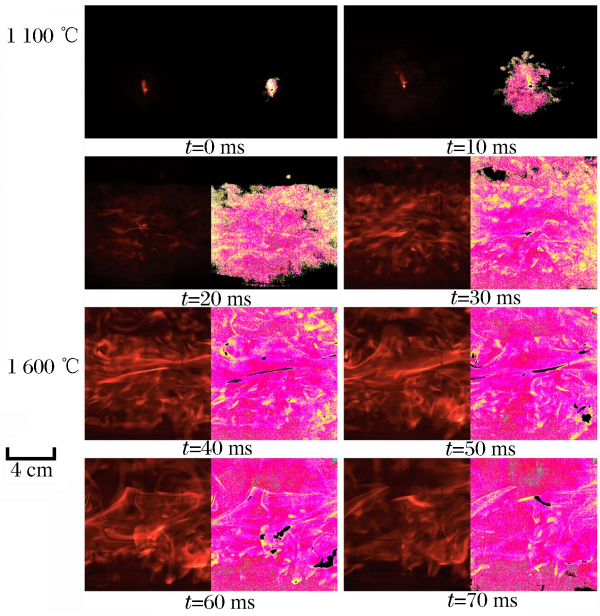


图 7　10 μm 的 PMMA 粉尘云火焰形态和火焰温度分布

Fig. 7　Flame configuration and temperature distribution of 10 μm PMMA dust cloud

由图 6 中可知，3 μm 的粉尘云火焰温度分布比较均匀，火焰面内温度梯度较小，粉尘燃烧可以近似为均相燃烧，粉尘火焰与气体预混火焰类似，说明 3 μm 的 PMMA 粉尘粒子热解/挥发速率快，在预热区内大部分粒子已经热解/挥发完全。在爆炸火焰未传播到上、下两部分燃烧管壁面期间，火焰中心温度较火焰边缘温度略高。当火焰触碰到上下燃烧壁后，温度较高区域逐渐向上移动，这是因为在点火初期，悬浮的粉尘粒子由于重力作用沉降，当火焰充分发展后沉降的粒子在燃烧产物热膨胀的推动作用下向上运动[20]。

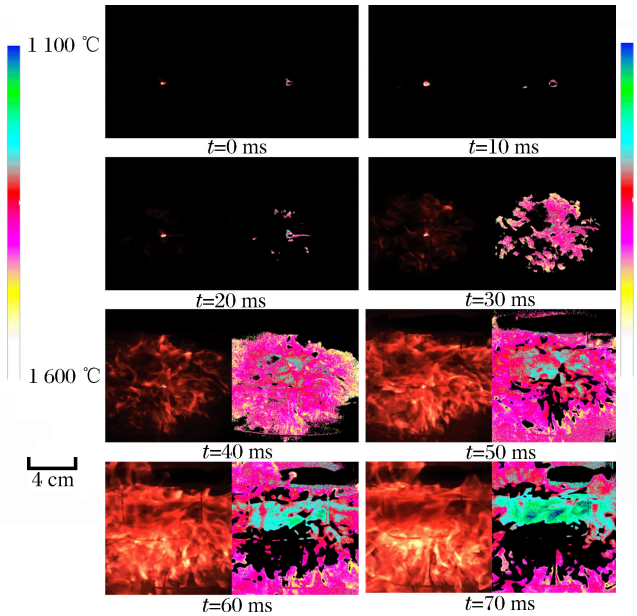


图 8　20 μm 的 PMMA 粉尘云火焰形态和火焰温度分布

Fig. 8　Flame configuration and temperature distribution of 20 μm PMMA dust cloud

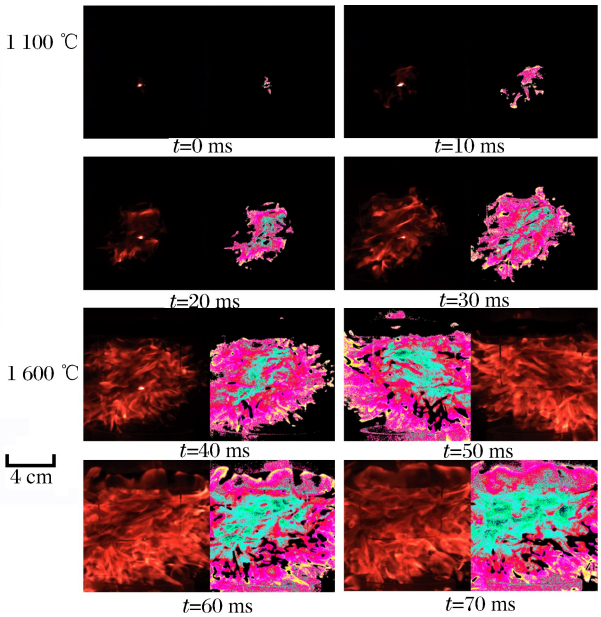


图 9　30 μm 的 PMMA 粉尘云火焰形态和火焰温度分布

Fig. 9　Flame configuration and temperature distribution of 30 μm PMMA dust cloud

当粒径增加到 10 μm 时，火焰温度整体较平均，但是在燃烧中后期出现局部间断高温火焰。当粒径继续增大为 20 μm 时，高温火焰区域随着燃烧的进行逐渐增大并且连成一片，但是高温区域附近同时会形成一片低温火焰区，该温度低于 3 和 10 μm 粉尘云的最低火焰温度，并且低温火焰分布区位于高温区上部，这是由于上部区域内粉尘粒子燃尽导致。当粒径达到 30 μm 时，火焰温度分布并未出现类似 20 μm 粉尘云时的连续高温火焰，只是在点火电极附近形成局部离散的高温火焰区，其余空间内多处为低温火焰区，说明由于粉尘粒径较大，热解/挥发速率较慢，且需要吸收大量的热量，因此导致火焰温度较低。随着粉尘粒子粒径的增大，火焰温度分布越不均匀，火焰最高温度及高温火焰区面积均增大，在粉尘粒径为 20 μm 时达到最大值。随着粉尘粒径的继续增大，火焰最高温度不再增加，高温火焰区面积急剧缩小，同时低温火焰区扩大。

比较不同粒径分布火焰形态和火焰温度分布可知，随着粉尘粒径的增大，火焰传播速度逐渐减小，当粒径增大到 20 μm 后，燃烧初期火焰离散，此时粉尘燃烧表现为异相燃烧。这是由于在大粒径粉尘中也会存在少量的小粒径粒子，小粒径粉尘粒子的热解/挥发速率快，在大粒径粒子受热还未开始热解/挥发之前就已经热解/挥发完毕形成局部预混火焰。同时局部预混火焰也会向大粒径粒子传热加速其热解/挥发过程，因此在燃烧后期火焰传播速度明显增大，并出现高温火焰区。

2.3　两种测温结果分析

由高速比色测温结果可知，随着粉尘粒径增大，粉尘燃烧由均相燃烧逐渐转变为异相燃烧，最高火焰温度和高温火焰区面积先增大后减小，在粉尘粒径 20 μm 时达到最大。由图 10 所示的 PMMA 粉尘粒子扫描电镜图可知，3 μm 粉尘粒子由于团聚/结块效应导致部分粉尘粒子粒径略微增大，导致团聚/结块的粒子热解/挥发速率变慢，其燃烧稍微滞后于未团聚/结块粒子，燃烧空间内主要由未结块粉尘粒

子热解/挥发出的可燃气体维持,故 3 μm 粉尘云火焰温度分布均匀,但高温火焰呈离散点分布。粉尘粒径为 20 μm 时,由于粉尘粒子分散性好,粒子裂解气化特征时间尺度与燃烧反应特征时间尺度较接近,因而燃烧反应更加剧烈,形成高温火焰区。粉尘粒子粒径增大为 30 μm 后,由于粉尘粒子粒径增大导致热解/挥发速率变慢,因而燃烧空间内可燃气体燃烧时强度低于 20 μm 粉尘云,火焰温度和高温火焰区面积均减小。热电偶测温结果表明,100 nm 粉尘云最高火焰温度远大于 30 μm 粉尘云。这是因为即使纳米 PMMA 粉尘粒子存在严重的团聚/结块效应,但 100 nm 粉尘粒子的索特直径为10.49 μm,而 30 μm 粉尘颗粒的索特直径为 24.08 μm。由于 100 nm 粉尘粒子索特粒径较小,热容量与表面积比率较小,粉尘粒子能快速热解/挥发出可燃气体参与反应,燃烧反应更充分,因而其火焰温度更高。

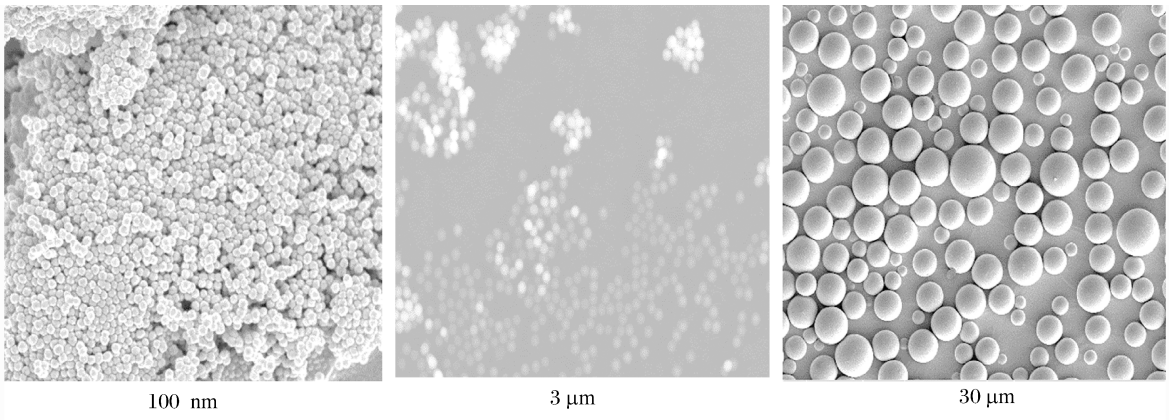


图 10 不同粒径 PMMA 粉尘粒子扫描电镜图

Fig. 10 SEM images of PMMA dust particles of different particle sizes

通常情况下,火焰温度越高,说明粉尘燃烧的放热量越大;火焰温度上升速率越快则说明粉尘燃烧速率越大,对应的火焰传播速度越大。热电偶测温方法的优点在于其可以准确测量火焰最高温度和火焰温度上升速率,因此利用热电偶测温数据可以反应粉尘爆炸的危险程度。然而热电偶只能测得固定点的温度变化情况,并且在测量时必须处在火焰中才能测得火焰温度。比色测温法可以在较远的位置获得整个粉尘火焰温度的演变过程及分布,能够更全面的分析火焰传播行为。但是比色测温法的局限在于只能应用于可视化粉尘爆炸装置,并且无法获得准确的火焰温度值。

3　结　论

本文中通过实验研究了不同粒径 PMMA 粉尘云温度分布特性,利用自制 R 型微细热电偶测量了 100 nm 和 30 μm 粉尘云火焰温度并修正,同时利用高速比色测温系统得到 3、10、20 和 30 μm 粉尘云的火焰形态及对应的火焰温度分布,结论如下:

(1)热电偶测温结果表明,虽然 100 nm PMMA 粉尘粒子严重的团聚/结块效应导致粒子粒径增大,但是其热容量与表面积比率较小,粉尘粒子热解/挥发速率较大,燃烧充分,因而 100 nm PMMA 粉尘云火焰的最高温度可达到 1 551 ℃,而 30 μm PMMA 粉尘云火焰最高温度仅为 1 108 ℃,因此纳米粉尘爆炸的危险程度远大于微米粉尘。

(2)比色测温结果表明,在微米尺度,随着 PMMA 粉尘粒子粒径增大,火焰温度分布越不均匀,粉尘燃烧由均相燃烧向异相燃烧转变,火焰最高温度和高温火焰区面积先增大后减小。由于 20 μm 粉尘粒子分散性好,裂解气化特征时间尺度与燃烧反应特征时间尺度较接近,粉尘粒子燃烧充分,因而在粉尘粒子粒径为 20 μm 时,火焰最大温度和高温火焰区面积达到最大值。

(3)热电偶测温方法和比色测温方法有各自的优缺点,热电偶测温方法精准但局限于单点位置,比色测温方法测温区域广但测温精度差。通过对比分析后发现,在热电偶测温实验系统中的另一个方位加上比色测温系统,则有可能将两种测温方法结合起来全面分析粉尘爆炸火焰温度特性及火焰传播过程。将两种测温方法结合测量粉尘爆炸温度需要开展更多的实验研究。

参考文献：

[1] 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. DOI：10.11883/1001-1455(2012)04-0432-07.
KUAI Niansheng，HUANG Weixing，YUAN Jingjie，et al. Influence of ignition energy on dust explosion behavior [J]. Explosion and Shock Wave，2012，32(4)：432-438. DOI：10.11883/1001-1455(2012)04-0432-07.

[2] 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 Wave，2010，30(2)：164-168. DOI：10.11883/1001-1455(2010)02-0164-05.

[3] 张洪铭，陈先锋，张英，等. 基于 RGB 颜色模型的玉米淀粉爆燃火焰传播速度[J]. 爆炸与冲击，2018，38(1)：133-139.
ZHANG Hongming，CHEN Xianfeng，ZHANG Ying，et al. Flame propagation velocities of cornstarch dust explosion based on RGB color model[J]. Explosion and Shock Wave，2018，38(1)：133-139. DOI：10.11883/bzycj-2016-0278.

[4] DOBASH R，SENDA K. Mechanisms of flame propagation through suspended combustible particles[J]. Journal de Physique Ⅳ，2002，12(7)：459-465. DOI：10.1051/jp4：20020316.

[5] CHEN J L，DOBASH R，HIRANO T. Mechanism of flame propagation through combustible particle clouds[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries，1996，9(3)：225-229. DOI：10.1016/0950-4230(96)00001-0.

[6] GAO W，DOBASH R，MOGI T，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. DOI：10.1016/j.fuel.2013.05.071.

[7] GAO W，YU J L，MOGI T，et al. Effects of particle thermal characteristics on flame microstructures during dust explosions of three long-chain monobasic alcohols in a half-closed chamber[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries，2014，32(11)：127-134. DOI：10.1016/j.jlp.2014.08.005.

[8] GAO W，MOGI T，SUN J H，et al. Effects of particle thermal characteristics on flame structures during dust explosions of three long-chain monobasic alcohols in an open-space chamber[J]. Fuel，2013，113(11)：86-96. DOI：10.1016/j.fuel.2013.05.071.

[9] GAO W，MOGI T，SUN J H，et al. Effects of particle size distributions on flame propagation mechanism during octadecanol dust explosions[J]. Powder Technology，2013，249(11)：168-174. DOI：10.1016/j.powtec.2013.08.007.

[10] GAO W，MOGI T，YU J L，et al. Flame propagation mechanisms in dust explosions[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries，2015，36(7)：186-194. DOI：10.1016/j.jlp.2014.12.021.

[11] 高伟，圆井道也，荣建忠，等. 粒径分布对有机粉尘爆炸中火焰结构的影响[J]. 燃烧科学与技术，2013，19(2)：157-162.
GAO Wei，MARUI Michiya，RONG Jianzhong，et al. Effect of particle size distribution on flame structure in organic dust explosion[J]. 2013，19(2)：157-162.

[12] 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 Wave，2014，34(5)：586-593. DOI：10.11883/1001-1455(2014)05-0586-08.

[13] WINGERDEN K V，STAVSENG L. Measurements of the laminar burning velocities in dust-air mixtures[J]. VDI-Berichte，1996(1272)：553-564.

[14] 孙金华. PMMA 微粒子云中传播火焰的基本结构[J]. 热科学与技术，2004，3(1)：76-80.
SUN Jinhua. The basic structure of propagating flame in PMMA micro-particle clouds[J]. Journal of Thermal Science and Technology，2004，3(1)：76-80.

[15] ZHANG X Y，YU J L，GAO W，et al. Flame propagation behaviors of nano-and micro-scale PMMA dust explosions[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries，2016，40(3)：101-111. DOI：10.1016/j.jlp.2015.12.010.

[16] ZHANG X Y, YU J L, GAO W, et al. Effects of particle size distributions on PMMA dust flame propagation behaviors[J]. Powder Technology, 2017,317(7):197-208. DOI:10.1016/j.powtec.2017.05.001.

[17] BALLANTYNE A, MOSS J B. Fine wire thermocouple measurements of fluctuating temperature[J]. Combustion Science and Technology, 1977,17(1/2):63-72. DOI:10.1080/00102209708946813.

[18] 杨世铭.传热学[M].北京:北京高等教育出版社,1987:331-333.

[19] 姜滦生,孙皆宜,刘爽.基于 CCD 比色原理的熟料温度场测量[J].仪器仪表学报,2006(增刊 1):52-54.
JIANG Luansheng, SUN Jieyi, LIU Shuang. Measurement of clinker temperature field based on CCD colorimetric theory[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006(Suppl 1):52-54.

[20] GAO W, MOGI T, RONG J Z, et al. Motion behaviors of the unburned particles ahead of flame front in hexadecanol dust explosion[J]. Powder Technology, 2015,271(2):125-133. DOI:10.1016/j.powtec.2014.11.003.

Flame temperatures of PMMA dust clouds with different particle size distributions

GAN Bo[1], GAO Wei[1], ZHANG Xinyan[1,2], JIANG Haipeng[1], BI Mingshu[1]

(1. *School of Chemical Machinery and Safety Engineering, Dalian University of Technology, Dalian* 116024, *Liaoning, China*;
2. *School of Mining and Safety Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao* 271019, *Shandong, China*)

Abstract: In the present study, to find out about the effects of particle size distributions on the flame temperatures of polymethyl methacrylate (PMMA) dust clouds, we measured the flame temperatures of PMMA dust clouds with different particle size distributions using the thermocouple and high-speed colorimetric method. The results show that, due to the faster pyrolysis/volatilization rate of 100 nm dust particle, the temperature was able to reach 1 551 ℃ while the maximum temperature of 30 μm dust cloud was only 1 108 ℃. The maximum flame temperature and high temperature flame area increased and then decreased with the increase of PMMA dust particle size for micron-scale. The pyrolysis/volatilization time scale of 20 μm dust particles was close to the combustion reaction time scale because of their good dispersibility. As a result, the maximum temperature and high temperature flame area were the largest among the particles with different particle size distributions.

Keywords: PMMA; dust explosion; particle size distribution; flame temperature

(责任编辑　王易难)