

瓦斯煤尘爆炸火焰温度的测定

李鸿德 廖继卿 夏自柱

(中国科学院力学研究所) (煤炭科学院重庆研究所)

摘要 用自己研制的红外高温辐射计, 在一端开口的直径200cm、长2900cm的大型地面模拟爆炸试验管道上, 在不同的条件下(瓦斯-空气, 瓦斯-空气-煤尘), 对瓦斯煤尘爆炸火焰的光谱特性进行了测量。根据测量的波长 $\lambda = 4.346\mu\text{m}$ 的绝对辐射强度和我们选择的物理模型, 获得了不同状态下瓦斯煤尘爆炸火焰的温度。

一、引 言

在生产矿井里, 为防止意外的煤尘爆炸传播, 需要设置岩粉棚、水棚、岩粉带和洒水带等所谓被动式防隔爆措施和带有喷粉装置的主动式自动隔爆装置; 这时往往把瓦斯煤尘爆炸火焰温度作为这些设施的基准和依据。因此瓦斯煤尘爆炸火焰温度是瓦斯煤尘爆炸火焰特性研究的一个重要物性参数。

瓦斯煤尘爆炸的过程极其迅速, 环境又很复杂, 因此爆炸火焰温度的测量是很困难的。我们根据本课题的性质, 研制了具有自己特点的红外辐射高温计, 在一端开口的直径为200cm、长为2900cm的大型地面模拟爆炸试验管道上, 在不同条件下(瓦斯-空气或瓦斯-空气-煤尘), 对瓦斯煤尘爆炸火焰的光谱特性进行了定量研究, 根据测量波长 $\lambda = 4.346\mu\text{m}$ 的绝对辐射强度和我们选择的物理模型, 获得了不同状态下的瓦斯煤尘爆炸火焰的温度。

二、测量设备和仪器

1. 实验装置

使用一端开口的直径为200cm、长为2900cm的地面模拟爆炸试验管道来模拟不同状态下的瓦斯煤尘爆炸。实验装置见图1。

(1)地面模拟爆炸的试验管道。图1中管道一端用密封膜隔出 18m^3 的配气段, 在常压室温下充入不同比例的瓦斯-空气混合气体。搅拌均匀后, 立即用专门的点火头引燃预混气体混合物, 产生爆炸和火焰。爆炸波和火焰沿管道高温传播。如果模拟煤尘参与的瓦斯爆炸时, 就要用图1中的喷粉装置; 当瓦斯-空气混合均匀时, 打开同步电磁阀, 高压贮气罐中的压缩空气将被研究的煤粉引射到爆炸管道中去, 形成煤尘云, 并立即点火。整个控制时序

文本于1987年9月5日收到, 1988年4月11日修改收到。

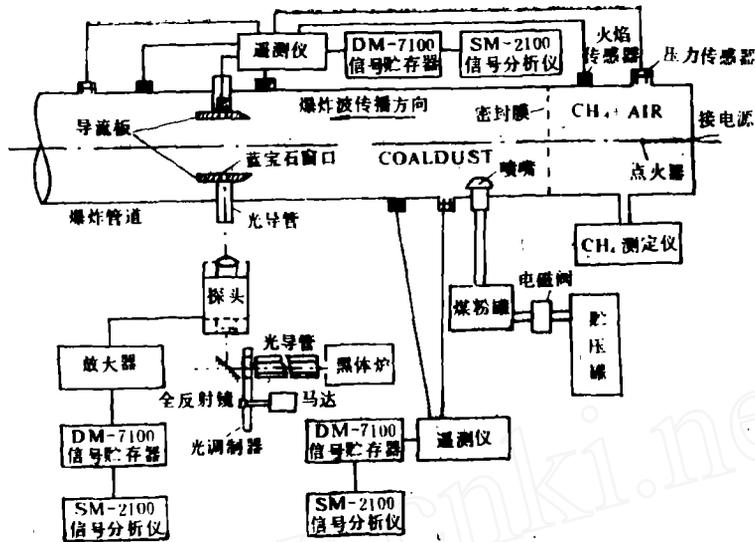


图1 爆炸火焰光谱辐射测量装置

由相应的同步装置自动完成。

(2)火焰传感器和压力传感器。将自己研制的火焰和压力传感器安装在管道的不同位置上,用同步触发系统、遥测仪、DM-7100型信号贮存器和SM-2100型信号分析仪分别测量火焰速度、爆炸波速度和爆炸压力。

(3)导流板。考虑到管道边界层的影响和爆炸波的速度,设计了具有一定前缘角的导流板,目的是使导流板间的高温火焰气体比较均匀,以便更准确地实现光谱和温度测量。

2. 温度测量系统

(1)红外辐射高温计。根据测温目的和瓦斯煤尘爆炸产物的特征光谱及连续辐射分析,我们研制了红外辐射高温计,它由透镜、中心波长为 $4.346\mu\text{m}$ 的干涉滤光片、相应的红外探测器和放大器等组成。

(2)绝对辐射强度的标定系统。红外辐射高温计除在出口孔径 $\phi 50\text{mm}$ 、温度 $T_b = (1073\sim 1773)\text{K}$ 的高温黑体炉上进行标定外,还在现场安置了由CTG-1型黑体炉、光导管、光调制器和全反射镜组成的绝对标定系统,在与测量系统光路相同的条件下,对红外辐射高温计的灵敏度进行校准。

(3)记录系统。本实验采用DM-7100和SM-2100型多通道高速数据采集系统,用于信号的采集、贮存和分析。

三、测量原理和方法

瓦斯煤尘爆炸火焰的化学反应相当复杂,反应机理假设不一,有的学者假设的基本反应高达18个。在空气条件下,反应产物有分子如 CO_2 、 CO 、 CH_4 、 H_2 等,还有原子和自由基等。这些产物在高达2000K左右的高温条件下,分子的振动和转动能级容易被激发,辐射出不同的分子特征光谱,这是爆炸系统光谱辐射的主要部分,这些特征光谱大部分在近红外和中红外区。 CO_2 分子是瓦斯煤尘爆炸火焰的主要产物之一,它的带状光谱辐射是主要的,如

在 $2.7\mu\text{m}$ 和 $4.3\mu\text{m}$ 处的发射带光谱。

根据 Tourin^[2] 对 CO_2 气体在 $\lambda = 4.3\mu\text{m}$ 附近不同条件下的光谱发射率 ϵ_λ 的实验结果: 当温度 $T = 1273\text{K}$ 、压力 $p = 9.331 \times 10^4 \text{Pa}$ 时, $pL = 1.1843 \times 10^4 \text{m} \cdot \text{Pa}$, 这时在波长 $\lambda = (4.18 \sim 4.55)\mu\text{m}$ 范围内的 $\epsilon_\lambda = 1$; 即光程 $L = 127\text{mm}$ 时, 火焰已经为光学厚。对于在一个 9dm^3 的小圆柱容器内进行的 $9.1\% \text{CH}_4 + 90.9\% \text{Air}$ 的爆炸实验^[3], 当 $T = 2000\text{K}$, $pL = (2.533 \times 10^4 \sim 3.039 \times 10^4) \text{m} \cdot \text{Pa}$ 时, 在 $\lambda = 4.4\mu\text{m}$ 附近的实验表明: $\epsilon_\lambda = 1$, 即成为黑体辐射, 故可用黑体模型。

我们测量的瓦斯煤尘爆炸对象是 $L = 100\text{cm}$ 、 $p = (1.2 \sim 1.5) \times 10^5 \text{Pa}$, 这样 $pL = (1.2 \sim 1.5) \times 10^5 \text{m} \cdot \text{Pa}$; 于是在 $\lambda = 4.346\mu\text{m}$ 附近, $\epsilon_\lambda \approx 1$ 是没有问题的。基于上述分析, 可以利用 CO_2 分子在 $\lambda = 4.346\mu\text{m}$ 附近的带状辐射强度来决定瓦斯煤尘火焰的温度。

1. 光谱辐射强度的测量

瓦斯煤尘爆炸火焰光谱辐射绝对强度的测量是利用相同光路条件下辐射能量相比较的原理^[1]。由图 1 的条件得到:

$$I_{e\lambda} = \frac{R_{e\lambda}}{R_{b\lambda}} \cdot I_{b\lambda} \cdot \frac{\tau_b}{\tau_e} \quad (1)$$

式中, $I_{b\lambda}$ 为黑体炉的辐射强度, 它由下式求出:

$$I_{b\lambda}(T_b) = \frac{C_1}{\pi \lambda^5 [\exp(C_2/\lambda T_b) - 1]} \quad (2)$$

这里, $C_1 = 3.742 \times 10^{-16} \text{Wm}^2$; $C_2 = 1.439 \times 10^{-2} \text{m} \cdot \text{K}$; T_b 是黑体炉的真实温度; $R_{e\lambda}$ 和 $R_{b\lambda}$ 分别为相同探测器下爆炸火焰和黑体炉辐射的光电系统读数, 它们由实验和标定得到; τ_b 为黑体炉窗口的透射率; τ_e 为测试光路中蓝宝石窗口的透射率, 两者皆事先测量。这样, 爆炸火焰在波长 λ 处的绝对辐射强度 $I_{e\lambda}$ 可以确定。

2. 绝对标定

瓦斯煤尘爆炸状态温度高达 2000K 以上, 由于现场采用的 CTG-1 型黑体炉温度较低, 与高温火焰光谱辐射强度不匹配, 因此选用 WJL-11 型高温黑体炉进行静标定很有必要。通过高温标定, 可以得到 $\lambda = 4.346\mu\text{m}$ 时的信号与相应的黑体辐射强度的关系, 经过测量数据的相关分析, 求出了 $\lambda = 4.346\mu\text{m}$ 的回归方程:

$$V_\lambda = 0.4437 + 1.5445 I_{b\lambda} \quad (3)$$

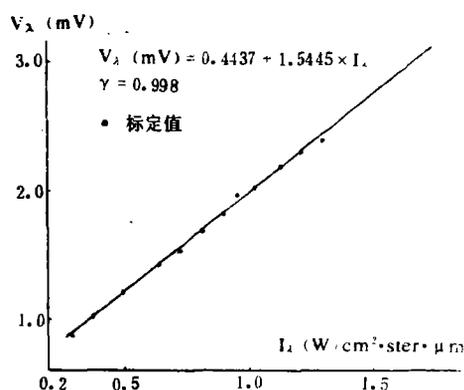


图 2 标定信号 V_λ 与辐射强度 I_λ 的关系

这里的 V_λ 为 TeCdHg 探测器的标定信号 (mV), I_{λ} 是黑体的辐射强度, 式(3)的相关系数 $\gamma=0.998$, 是很理想的方程。

3. 爆炸火焰温度的测定

通过实验得到瓦斯煤尘爆炸火焰在 $\lambda=4.346\mu\text{m}$ 附近的信号 $V(\text{mV})$, 由式(3)或相应的曲线 (见图2) 求出对应的 I_{λ} , 然后利用我们讨论的物理模型, 由式(2)可直接求出对应的爆炸火焰的温度 T_e 。

四、实验结果及其分析

1. 在不同的瓦斯-空气和瓦斯-空气-煤尘条件下, 得到了爆炸波速度 (范围是400~900m/s)、峰值压力 (范围是1.2~1.5atm) 和火焰速度 (范围是40~231m/s)。光谱测定和爆炸火焰温度测量时, 所用标准煤样的水分为2.6%, 灰分为16.2%, 分析基挥发分为39.0%, 可燃基挥发分为48.1%; 粒度为 $0.7\text{mm} > D > 0.15\text{mm}$ 的占1.9%, $D < 0.075\text{mm}$ 的占78.6%。

2. 不同条件下的典型爆炸火焰辐射强度和温度见表1和图3、4。

表1 不同条件下典型的爆炸火焰辐射强度和温度

序号	起爆条件		爆炸火焰温度 (K)	$\lambda = 4.346\mu\text{m}$		$\lambda = 2.801\mu\text{m}$		$\lambda = 1.505\mu\text{m}$	
	CH ₄ (%)	煤尘 (g/m ³)		黑体 I_{λ}	测量 I	黑体 I_{λ}	测量 I	黑体 I_{λ}	测量 I
1	8.0	34.4	1905	1.639	1.639	5.00	5.00	10.27	0.40
2	8.5	68.8	2163	2.122	2.122	7.09	4.60	18.79	1.70
3	8.7	0	2135	2.07	2.07				
4	9.0	0	2200	2.231	2.231	7.58	4.80	21.08	0.37
5	9.3	0	2278	2.344	2.344	8.10	4.20	23.56	1.35
6*	9.3	0	1580		1.07				

* 本实验有消焰剂。

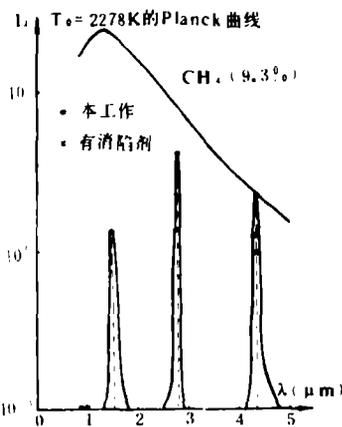


图3 爆炸火焰的绝对光谱辐射强度

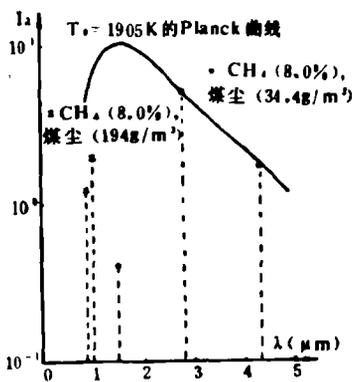


图4 爆炸火焰的绝对光谱辐射强度

实验结果表明：(1)煤尘浓度小时（低于 $70\text{g}/\text{m}^3$ ），对瓦斯-空气条件下的爆炸火焰温度影响小；(2)在管道实验段管壁存在消焰剂时，瓦斯-空气条件下，爆炸火焰的温度明显下降；(3)瓦斯-空气的爆炸火焰的温度随瓦斯含量的增大而增加。

我们测量光谱辐射强度是在一端开口的大直径管道内进行的，而国外八十年代的实验是在小型密封容器内进行的。我们在 $\lambda = 4.346\mu\text{m}$ 的辐射强度值与 Cashdallar^[3]等人的结果符合较好，实验结果是可靠的。由辐射理论可推出下面公式：

$$\delta I/I_{\lambda} \propto \frac{C_{\lambda}}{\lambda T_{\lambda}} \frac{\delta T_{\lambda}}{T_{\lambda}} \quad (4)$$

在 $\lambda = 3.446\mu\text{m}$ 的辐射强度测量的相对误差为10%左右，因此温度的测量相对误差为5%左右。

五、结 论

1. 我们在弱爆炸光谱测量区（ $p = 1.2 \sim 1.5\text{atm}$ ）和红外探测器小视场角（约 1.3° ）条件下，在一端开口的 $\phi 200\text{cm}$ 、长 2900cm 大型管道里，测量了不同条件下 $\lambda = 4.346\mu\text{m}$ 的绝对辐射强度，进而得到了爆炸火焰的温度，测量结果可靠，对于煤矿井下的防爆装置设施提供了可靠的依据。

2. 对于瓦斯煤尘爆炸，由于 $\lambda = 4.346\mu\text{m}$ 波段信号强，我们的红外探头灵敏，响应时间快，性能稳定，可用于矿井等环境条件下自动隔爆装置的光学触发探头；也可用于诊断爆炸火焰的温度。

3. 我们所研制的高速动态红外测温装置不仅可用于诊断爆炸火焰的温度，而且可用于研究瓦斯煤尘爆炸的其它特性和动力学过程。

参加本研究的还有李进湛、刘玉珍、王小渝和蔡周全等同志。

参 考 文 献

- [1] 李鸿德等，光学学报，3，3(1983)，380.
- [2] R. H. Tourin, J. Opt. Soc. Am., 51, 2(1961), 175.
- [3] K. L. Cashdallar and M. Herthberg, "Infrared Temperature Measurements of Gas and Dust Explosion", from "The Sixth Int. Symp. on Temperature", March 15-18, 1982.

Determination of Explosion Flame Temperature of Methane-Coal Dust

Li Hong-de, Liao Ji-qing and Xia Zi-zhu

Abstract—By use of the infra-red high temperature radiometer developed by the authors, in large-scale test ground tube simulating explosion of 200cm diameter and 2900cm length with one opening end, the spectral characteristics of explosion flame of methane-coal dust are measured at different conditions. According to the absolute radiation intensity at wavelength $\lambda = 4.346\mu\text{m}$ measured and the physical models chosen by the authors the temperatures of explosion flame of methane-coal dust are obtained at different conditions.