

瓦斯煤尘爆炸火焰光谱的实验研究

李鸿德

(中国科学院力学研究所)

廖继卿 夏自柱

(煤炭科学院重庆研究所)

提要 本文概述了瓦斯煤尘爆炸火焰光谱实验研究的重要性。我们在弱爆炸和探测器小视场角的条件下,利用自己研制的多波道仪,在一端开口的 $\phi 200\text{cm} \times 2900\text{cm}$ 大型管道里,得到了 CH_4 、空气和煤尘的混合物在不同状态下,特征波长 λ 等于 0.8875、1.000、1.505、2.801 和 4.346 微米(μ)的绝对辐射强度及其有关的变化规律,对结果进行了分析讨论,并与国外实验结果进行了对比。根据测量 $\lambda = 4.346\mu$ 绝对辐射强度和我们选择的黑体辐射模型,获得了爆炸火焰的温度。该项研究不仅在工业中具有重要意义,而且对燃烧和化学动力学的研究也具有参考价值。

关键词 瓦斯煤尘爆炸火焰、自动隔爆装置、多波道光谱探头、特征光谱、火焰温度。

一、引言

瓦斯煤尘爆炸是煤矿井下严重的灾害之一,该灾害的防止已为各国政府、研究人员和工程技术人员所重视,根据不同的具体条件,在分隔爆技术和措施方面做了大量工作。实践证明:瓦斯煤尘爆炸强度很弱时,被动式隔爆措施失效,即不能阻止爆炸火焰的继续传播。针对这个问题,国外从七十年代起开展了自动分隔爆装置的研制,该装置不受爆炸强度弱的条件限制。自动隔爆系统一般由三部份组成:探测装置、微机控制和分隔爆装置。探测器检测信号的准确可靠是至关重要的。国外采用了各种类型的探测器,其中,像红外线探测器,选用的波长在近红外,均小于 2μ ,它易被井下矿灯等光谱辐射所干扰;而紫外线探测器易受电火花等的影响;至于压力传感器也易受各种不同压力波的干扰,总之上述传感器均易导致误诊。针对上面探测器存在的问题,我们根据瓦斯煤尘爆炸火焰光谱特性的实验研究,选取区别于井下照明等干扰光源的爆炸火焰的特征光谱来制造触发光学探头,从而得到既响应快又准确可靠的触发信号,防止误诊,以用于我们研制的自动隔爆装置系统。

瓦斯煤尘爆炸火焰光谱特性实验研究是煤尘爆炸研究的一个重要方面,目前世界上只有个别先进国家对此进行了实验研究。我们用自己研制的多波道仪,在一端开口的 $\phi 200\text{cm} \times 2900\text{cm}$ 大型地面模拟爆炸试验管道里,在不同的实验条件下对瓦斯煤尘爆炸

火焰光谱特性进行了实验研究;同时测量了火焰速度、爆炸压力波速度及其峰值压力,得到了不同波长下的绝对光谱辐射强度,与国外实验结果进行了对比,并做了讨论.根据我们建立的黑体辐射物理模型和测量的 $\lambda = 4.346\mu$ 的绝对辐射强度,得到了爆炸火焰的温度.该项研究对于煤矿井下瓦斯煤尘爆炸灾害的防治,对于井下自动隔爆装置系统中触发光学探头的研制,对于高温火焰状态的诊断都具有较大的应用价值,在燃烧和化学动力学方面也有重要的应用意义.

二、实验装置及其测量系统

1. 实验装置

利用图1中的地面模拟实验管道来模拟煤矿井下不同条件下的瓦斯煤尘爆炸.

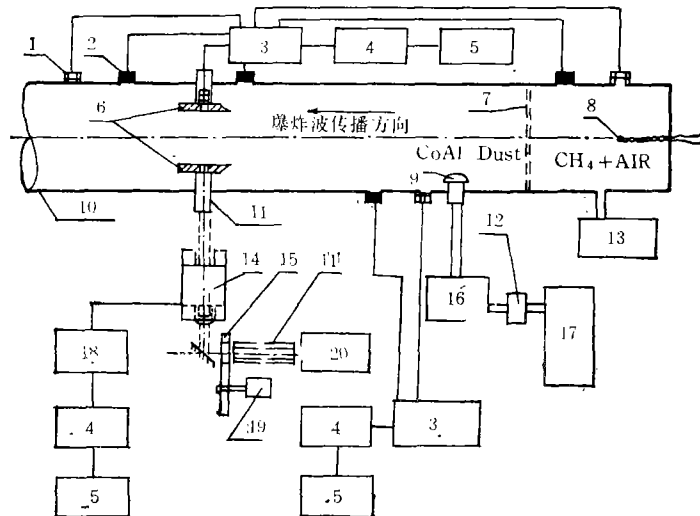


图1 甲烷-煤尘-空气爆炸火焰光谱辐射测量装置

1 压力传感器, 2 火焰传感器, 3 遥测仪, 4 DM-7100 信号存储器, 5 SM-2100 信号分析仪, 6 导流板, 7 密封膜, 8 点火器, 9 喷嘴, 10 爆炸管道, 11 光导管, 12 电磁阀, 13 甲烷测定仪, 14 光谱探头, 15 光调制器, 16 煤粉罐, 17 贮压罐, 18 放大器, 19 马达, 20 黑体炉

1) 地面模拟试验管道 图1中管道闭端用密封膜隔出18米³的配气段,在常压室温下充入不同比例的CH₄和空气的混合气体,搅拌均匀后,立即用专门的点火头点燃预混气体混合物,产生爆燃,爆炸压力波前沿和火焰阵面沿管道高速传播,当做CH₄、空气和煤尘三者混合的爆炸实验时,还要用图1中的喷粉装置;先使CH₄和空气混合均匀,然后打开同步电磁阀,贮气罐中的压缩空气将煤粉引射到爆炸管道中去,形成煤尘云并立即用专门的点火头点火.整个控制时序由相应的同步装置自动完成.

2) 火焰速度和爆炸压力测量系统 将自己研制的火焰和压力传感器装于管道的不同位置,用同步触发系统、遥测仪和数据采集系统测量火焰速度、爆炸压力波前沿的速度和爆炸的峰值压力.

3) 导流板 在模拟管道里,为得到温度比较均匀的高温火焰气体,克服管壁产生的冷边界层的影响,我们设计了具有一定前缘角的导流板(图 1),这样可对导流板间的高温火焰实现准确的光谱测量。

2. 光谱测量系统

1) 多波道仪 根据光谱测量要求和瓦斯煤尘爆炸产物的特征光谱及连续辐射分析,我们研制了多波道仪;它由透镜、中心波长为 4.346、2.801、1.505、1.000 和 0.8875 μ 的干涉滤光片、相应的红外探测器和放大器等组成,该多波道仪用于测量瓦斯煤尘爆炸火焰光谱的绝对辐射强度,进而选择我们需要的特征光谱。

2) 绝对辐射强度的标定系统 多波道仪除在出口孔径 $\phi 50\text{mm}$, 温度 $T_0 = 800\text{—}2500^\circ\text{C}$ 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标定系统,在与测量系统光路相同的条件下,对多波道仪的灵敏度进行校准。

3) 记录系统 用 DM-7100 和 SM-2100 型多通道高速数据采集系统,对信号进行采集、贮存和分析。

三、光谱测量原理和方法

瓦斯煤尘爆炸火焰的化学反应相当复杂,反应产物有分子如 CO_2 、 H_2O 等,也有原子和自由基。这些产物在 2000°C 的条件下,分子的振动能级和转动能级容易被激发,发射出不同的分子特征光谱,这是爆炸火焰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,如 CO_2 发射带在 2.7 μ 和 4.3 μ 处, H_2O 分子发射带在 1.38、1.87 和 2.70 μ 处;爆炸产物中自由基 OH 等虽然在紫外和可见光区有辐射,因温度低,其辐射强度比较小,在煤尘参与爆炸的条件下,由于碳原子(C)及其粒子的增加,其连续辐射显著增加。

1. 光谱辐射强度的测量

利用相同光路条件下,比较爆炸火焰和黑体炉辐射两者的辐射能量的原理,我们得到下面关于火焰光谱辐射绝对强度 $I_{g\lambda}$ 的公式^[1]

$$I_{g\lambda} = R_{g\lambda}/R_{0\lambda} \cdot (\tau_0/\tau_g) \cdot I_{0\lambda}; \quad (1)$$

这里

$$I_{0\lambda}(T_0) = C_1/\lambda^5(e^{c_2/\lambda T_0} - 1), (W/\text{cm}^2 \cdot \text{ster} \cdot \mu); \quad (2)$$

$I_{0\lambda}$ 为黑体辐射强度; λ 是波长; T_0 为黑体的真实温度; 第一辐射系数 $c_1 = 1.191062 \times 10^4$ 瓦 $\cdot \mu^5 \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{ster}^{-1}$; 第二辐射系数 $c_2 = 1.438786 \times 10^4 \mu \cdot \text{K}$; $R_{g\lambda}$ 和 $R_{0\lambda}$ 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,两者单位同,它们分别由实验和标定得到; τ_0 和 τ_g 分别为黑体炉窗口和模拟管道蓝宝石窗口的透过率,实验前皆测量好。这样由标定得到 $R_{0\lambda}$ 和 $I_{0\lambda}$, 由现场实验得到爆炸火焰于波长 λ 处的 $R_{g\lambda}$, 因 τ_0 与 τ_g 已知, 于是由(1)式可求出爆炸火焰的光谱绝对强度 $I_{g\lambda}$ 。

2. 绝对标定

对瓦斯煤尘爆炸,状态温度高达两千摄氏度;由于现场用的 CTG-1 型黑体炉温度较低,与高温火焰光辐射强度不匹配,因此选用 WJL-11 型高温黑体炉进行静标定很有必

要. 通过标定和必要处理, 得到了不同波道探测器的标定信号值 V_{λ} 与相应的辐射强度 I_{λ} 的关系, 例如对波长 $\lambda = 4.346 \mu$ 的探测器, 其回归关系 $V_{\lambda}(mV) \sim I_{\lambda}(W/cm^2 \cdot \text{ster} \cdot \mu)$ 和相关系数 r 均见图 2.

四、爆炸火焰温度的确定

瓦斯煤尘爆炸火焰的主要产物有 CO_2 和 H_2O 分子等, 它们的带光谱辐射是主要

表 1 典型的火焰速度、爆炸波速度和峰值压力

序号	起爆条件		火焰速度 (m/s)			爆炸波速度 (V)m/s, 和峰值压力 P(atm)					备 注	
	CH ₄ %	煤尘 (g/m ³)	ab	bc	ca	CD(V)	C点 (P)	D点 (P)	AD (V)	A点 (P)		D点 (P)
1	8.0	0			45.5		1.254					
2	8.1	208	67.8	231	90.9				(394)	1.427	1.294	喷粉口在配气室内, 火焰先加速后减速
3	8.0	194	64.5	167	90.9				590	1.401	1.254	同上
4	8.5	0	56.3	71.4	74.1				406	1.281	1.167	火焰加速
5	8.5	68.8	45.5	54.5	90.9	(417)	1.254	1.134	407		1.134	喷粉口在配气室外, 火焰加速
6	8.5	80.3	52.6	57.7	87.0		1.414					同上
7	9.0	0	56.3	61.2	90.9		1.214					火焰加速
8	9.0	0	74.1	69.8	90.9							火焰传播中间减速
9	9.3	0	42.6	36.8	108				838	1.315	1.225	同上
10	9.3	0	42.6	50.0	111				634	>1.333	1.347	火焰加速
11	9.3	0	56.3	125	105				703	1.321	1.187	火焰先加速后减速

说明

1. a、b、c、d 四点放置火焰传感器, 分别距起爆室端壁 5, 13, 19 和 23m, 用于测速.
2. A、C、D 点放置压力传感器, 分别距起爆室端壁为 3(或 1), 17 和 27m, 用于测压和测速.
3. 光谱测量窗口与 C 点的测压位置在同一轴线上(见图 1).

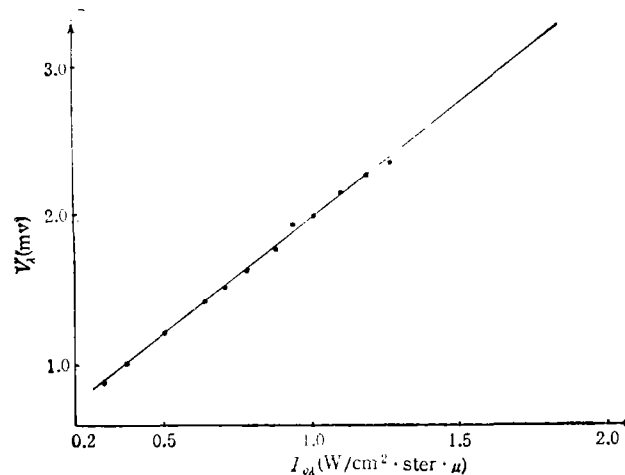


图 2 $\lambda = 4.346 \mu$ (TecdHg) 标定信号 V 与辐射强度 I_{λ} 的关系

● 标定值 $V_{\lambda}(mV) = 0.4437 + 1.5445I_{\lambda}$ $r=0.998$

的;同时也有高温固体碳粒子的连续辐射。根据 Tourin^[2] 对 CO_2 气体在 $\lambda = 4.30\mu$ 附近不同状态下光谱发射率 ϵ_λ 的实验结果,在 $T = 1273\text{K}$ 、压力 $P = 700\text{mmHg}$ 时, $PL = 11.69\text{cm} \cdot \text{atm}$, 这时在波长 $\lambda = 4.18-4.55\mu$ 范围内的 $\epsilon_\lambda = 1$, 即光程 $L = 127\text{mm}$ 时,高温气体已接近光学厚。对于在一个 9dm^3 的小圆柱容器内进行的 $9.1\% \text{CH}_4 + 90.9\%$ 空气的爆炸实验^[3],当 $T = 2000\text{K}$, $PL = (25-30)\text{cm} \cdot \text{atm}$ 时,对 $\lambda = 4.4\mu$ 附近的实验表明: $\epsilon_\lambda = 1$, 即成为黑体辐射。

我们测量的瓦斯煤尘爆炸对象是 $L = 100\text{cm}$, $P = (1.2-1.5)\text{atm}$, 温度在 2000K 左右, $PL = (120-150)\text{cm} \cdot \text{atm}$; 于是在 $\lambda = 4.346\mu$ 附近, $\epsilon_\lambda = 1$ 是没有问题的,即把瓦斯煤尘爆炸对象的辐射看成是黑体模型。据上述分析,可利用 CO_2 分子 $\lambda = 4.346\mu$ 的带辐射强度决定爆炸火焰的温度,即由 $\lambda = 4.346\mu$ 探测器测得的爆炸火焰辐射信号,由图 2 曲线求出相应的辐射强度 $I_{0\lambda}$,再利用方程(2)求出爆炸火焰的温度 T_0 。

五、实验结果及其分析

1) 不同配比的 CH_4 和空气, CH_4 、空气和煤尘条件下的爆炸压力波速度、峰值压力和火焰速度的典型结果见表 1。实验用标准煤样水分占 2.6% 、灰分占 16.2% 。分析基挥发分占 39.0% 、可燃基挥发分占 48.1% ,粒度 $0.7 > D > 0.15\text{mm}$ 的占 1.9% , $D < 0.075\text{mm}$ 的占 78.6% 。表 1 的结果指出:

(1) 管壁 c 和 d 点(图 1) 放置火焰传感器,分别距起爆室端壁 19m 和 23m 。 cd 间火焰速度随 CH_4 含量增加而增大,在本实验范围接近线性关系;当 CH_4 含量相同,加入煤粉量为 $200\text{g}/\text{m}^3$ 时,火焰速度明显增加;而煤粉用量小时,对火焰速度影响不大。

(2) 管壁 A 和 D 点放置压力传感器,分别距起爆室 3m 和 27m , AD 间的爆炸压力波速度皆大于声速。与光谱测量窗口同一横断面上的 c 点(距起爆室端壁 17m) 的实验压力为 $1.2-1.5\text{atm}$, 属于弱爆炸。

2) 在 CH_4 和空气条件下,由图 3 看出,在实验范围及其近域, CH_4 含量与 $\lambda = 4.346\mu$ 的辐射强度成线性关系;这是由于振动激发的 CO_2 分子数量成线性增长的结果。

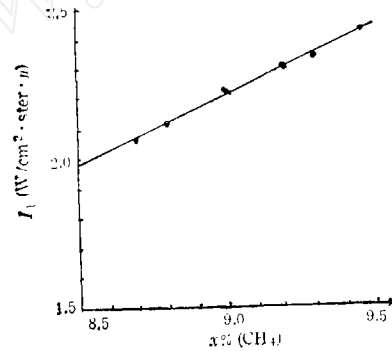
表 2 不同条件下,典型的爆炸火焰辐射强度和温度

序号	起爆条件		爆炸火焰温度 (K)	$\lambda = 4.346\mu$		$\lambda = 2.801\mu$		$\lambda = 1.505\mu$	
	$\text{CH}_4\%$	煤尘 (g/m^3)		黑体 $I_{0\lambda}$	测量 I_λ	黑体 $I_{0\lambda}$	测量 I_λ	黑体 $I_{0\lambda}$	测量 I_λ
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	说明: 本实验序号 6 有消焰剂			

3) 在 CH_4 、空气和煤尘条件下,典型的爆炸火焰光谱辐射强度和温度见表 2、3 和图 4、图 5。实验结果指出:(1)煤尘浓度低于 $100\text{g}/\text{m}^3$ 时,对瓦斯空气下的光谱辐射强

表 3 不同条件下的爆炸火焰辐射强度

序 号	起 爆 条 件		$\lambda = 0.8875\mu$ $I_{\lambda}(W/cm^2 \cdot$ $ster \cdot \mu)$	$\lambda = 1.00\mu$ $I_{\lambda}(W/cm^2 \cdot$ $ster \cdot \mu)$	备 注
	CH ₄ %	煤 尘 (g/m ³)			
1	8.5	0	~0	~0	
2	9.0	0	~0	~0	
3	9.3	0	~0	~0	
4	8.0	194	1.2	1.95	

图 3 CH₄ 含量与 $\lambda = 1.346\mu$ 的 I_{λ} 关系

CH ₄ %	I_{λ}
8.7	2.07
9.0	2.22
9.3	2.34

$$\begin{cases} I_{\lambda} = -1.84 + 45.0 \times x\% \\ r = 0.998 \end{cases}$$

● 实验点

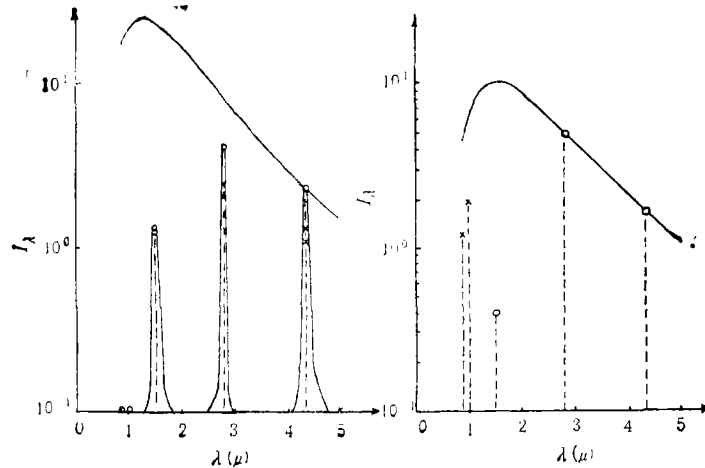


图 4 爆炸火焰的绝对光谱辐射强度

说明: 1. CH₄ (9.3%)
 2. — $T_0 = 2278K$ Planck 曲线
 3. ○ 本文实验点
 × 有消焰剂的实验点

图 5 爆炸火焰的绝对光谱辐射强度

说明: 1. — $T_0 = 1905K$ 的 Planck 曲线
 2. ○ CH₄ (8.0%), 煤尘 (34.4g/cm³)
 3. × CH₄ (8.0%), 煤尘 (194g/cm³)

度影响小;而煤尘浓度接近 $200\text{g}/\text{m}^3$ 时,影响明显增大;(2)在实验段存在消焰剂时, CH_4 和空气条件下的 $\lambda = 4.346\mu$ 辐射强度明显下降,其结果见表 2 和图 4;(3)温度随 CH_4 含量的增大而增加(见表 2)。

国外八十年代的实验是在小型密封容器内进行,与我们的条件不同。我们在 $\lambda = 4.346\mu$ 的辐射强度与 Cashdollar^[3] 等人的结果符合较好,而在 $\lambda = 2.801$ 和 1.505μ 的辐射强度比他们相应的值大,这与我们用的装置、测量条件、波长和带宽等有关。本测量的光谱辐射强度相对误差为 30% 左右。据辐射理论推出下式

$$\delta I_\lambda / I_\lambda \propto c_2 / \lambda T_g \cdot \delta T_g / T_g, \quad (3)$$

T_g 是爆炸火焰温度,据 $\lambda = 4.346\mu$ 的辐射强度测量相对误差为 10% 左右,这样 T_g 测量相对误差为 5% 左右。

六、结 论

1) 我们在弱爆炸光谱测量区和探测器小视场角 ($\sim 1.3^\circ$) 条件下,得到了不同条件下的绝对光谱辐射强度,得到了 CH_4 含量和煤尘含量对爆炸火焰光谱辐射强度影响的规律,实验结果可靠。研究结果可供煤矿井下自动隔爆装置系统工程的设计使用,具有较大的社会效益;

2) 对瓦斯煤尘爆炸,由于 4.346μ 波段的信号强,我们研制的红外探头灵敏、响应快、性能稳定,可用于诊断爆炸火焰的温度;

3) 我们研制的多波道仪既用于测量爆炸火焰的光谱强度,诊断爆炸火焰的温度;也用于研究瓦斯煤尘爆炸的其他特性和动力学过程。

参加该项研究工作的还有李世湛、刘玉珍、王小渝和蔡周全等同志。

参 考 文 献

- [1] 李红德、罗军、李思文,光学学报, 3,3(1983),380.
- [2] Tourin, R. H, *J. Opt. Soc. Am.*, 51, 2 (1961), 175
- [3] Cashdollar, K. L. and Hertzberg, M. "Infrared Temperature measurements of gas and dust explosion" from "The Sixth. Int. Sym. On Temperature", March (1982), 15-18.

EXPERIMENTAL RESEARCH ON EXPLOSION FLAME SPECTRUM OF METHANE WITH COAL DUST

Li Hongde

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences)

Liao Jiqing, Xia Zizhu

(Chongqing Institute, Coal Academy of Sciences)

Abstract This paper summarizes the significance on the experimental research for explosion flame spectrum of methane with coal. At weak explosion and a little angle of field of view, by use of multiwave channel detector of our development in large-scale tube $\phi 200 \text{ cm} \times 2900 \text{ cm}$ of one-end opening we have obtained absolute radiation intensity and related regularity of change for characteristic wavelengths with mixture of methane, air and coal dust at different states. The experimental results have been discussed and compared with foreign ones. According to measured absolute radiation intensity for wavelength 4.346μ and selected radiation model of blackbody, the temperature of explosion flame has been obtained. This research not only is of great importance to industry but also is of reference value for study of flame and chemical dynamics.

Key words explosion flame of methane with coal dust, automatic device for explosion insulation, spectral detector of multiwave channel, characteristic spectrum, flame temperature.