

# 光散射法实时测量蒸汽湿度

周佐平 周立 何杰

(华南理工大学应用物理系, 广东, 广州, 510641)

**摘要:** 对光散射测量蒸汽湿度作了较大的改进. 根据米氏理论计算了球形粒子的消光系数, 针对蒸汽中水滴的分布计算了水滴的平均消光系数, 并修正了前向散射误差. 建立的测量系统可同时测出湿度和水滴平均直径.

**关键词:** 蒸汽湿度, 光散射, 实时测量.

## 引言

目前蒸汽湿度测量主要是化学法和热力学法<sup>[1]</sup>, 这些方法均为取样测量, 测量周期长, 准确度差, 使用不方便. 自70年代起研究了利用蒸汽中液滴对光的散射的光学测量方法. 文献[2~4]报导了根据光散射导出光衰减与湿度、液滴直径关系, 但一般均假定水滴直径相同或设定一个直径然后测量计算湿度. 上述研究仅限于测量湿度在10%以上的发电厂汽轮机末级的蒸汽湿度.

本文计算了平均消光系数和前向散射误差, 简化了全散射法, 只用三个波长的准单色光进行测量, 建立了一个测量系统, 根据平均消光系数处理测量结果, 使得测量范围大大增加, 满足了中小锅炉测量低于10%湿度的需求, 模拟实验及对饱和蒸汽实测结果表明理论和测量系统是可靠的.

## 1 理论基础

根据米氏散射理论, 因粒子散射光产生的消光系数为<sup>[5]</sup>

$$K_s = \frac{2}{x^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1)(|a_n|^2 + |b_n|^2), \quad (1)$$

式(1)中  $a_n$ 、 $b_n$  为散射系数,  $x = \pi d/\lambda$  ( $d$  为散射粒子直径,  $\lambda$  为单色波长). 对于非偏振光入射, 在  $(r, \theta, \varphi)$  处的散射光强为

$$I_s(\theta, \varphi) = \frac{\lambda^2}{(2\pi r)^2} \frac{i_1 + i_2}{2} I_0. \quad (2)$$

式中  $I_0$  为入射光强, 其中

$$\left. \begin{aligned} i_1 &= \left| \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} (a_n \tau_n + b_n \pi_n) \right|^2, \\ i_2 &= \left| \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} (a_n \pi_n + b_n \tau_n) \right|^2. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

微分散射截面为

$$q_s(\theta, \varphi) = \frac{\lambda^2}{8\pi^2} (i_1 + i_2). \quad (4)$$

散射截面的解是一个比较复杂的级数解, 计算十分繁琐, 我们根据实用情况用计算机计算了消光系数  $K_s$  和微分散射截面  $q_s$ .

## 2 测量原理

在蒸汽中液态水滴很小, 平均直径不超过  $2\mu\text{m}$ <sup>[6]</sup>, 一般每立方厘米在  $10^6$  个以上. 当光束通过时, 这些水滴引起光的散射使透过率下降. 水和蒸汽对于可见光和近红外光的吸收可以忽略, 所以, 造成光衰减的唯一原因是水滴对光的散射.

假设水滴直径为  $D$ , 相对于周围介质的折射率为  $m$ , 光强为  $I_0$ . 水滴之间的距离远大于水滴的直径, 只发生单次散射, 则总散射应为所有散射粒子的散射光的总和. 若粒子密度为  $N$ , 光经  $L$  路程的透过率为

$$\tau = \exp\left[-\frac{1}{4}\pi D^2 N K_s(\lambda, D)L\right], \quad (5)$$

这是假定水滴直径相同而得到的. 在实际情况下, 水滴直径不同, 设水滴按直径分布的密度函数为  $N(D)$ , 那么透过率应改写为

$$\tau = \exp\left[-\frac{1}{4}\pi L \int_0^{D_m} D^2 N(D) K_s(\lambda, D) dD\right], \quad (6)$$

$D_m$  是分布中最大直径. 定义平均直径为

$$D_s = \frac{\int_0^{D_m} D^3 N(D) dD}{\int_0^{D_m} D^2 N(D) dD}. \quad (7)$$

平均消光系数定义为

$$\bar{K}_s(\lambda, D_s) = \frac{\int_0^{D_m} D^2 N(D) K_s(\lambda, D) dD}{\int_0^{D_m} D^2 N(D) dD}. \quad (8)$$

单位容积中水滴的体积为

$$C_v = \frac{1}{6}\pi \int_0^{D_m} D^3 N(D) dD. \quad (9)$$

它与质量浓度的关系是

$$C_m = \rho C_v, \quad (10)$$

式(10)中  $\rho$  是水的比重. 由式(7)、(8)、(9)可将式(6)改写为

$$\tau = \exp\left[-\frac{3LC_v \bar{K}_s(\lambda, D_s)}{2D_s}\right]. \quad (11)$$

文献[7]得出饱和蒸汽中水滴的直径分布是按上限分布规律的. 当参数  $\alpha = 1.260$ 、 $\delta = 1.130$  时, 分布曲线与实验数据吻合得最好. 利用这一结论可计算平均消光系数, 其上限分布函数为

$$N(D) \propto \frac{\exp\left\{-\left[\delta \ln\left(\frac{\alpha D}{D_m - D}\right)\right]^2\right\}}{D^4(D_m - D)}. \quad (12)$$

根据式(12), 利用式(8)计算平均消光系数, 结果如图1, 虚线为单个水滴的消光系数. 从图1可见, 当  $x_s = \frac{\pi}{\lambda} D_s < 3$  时, 平均消光系数与单个水滴的消光系数接近, 此时只需单个水滴的消光系数代替平均消光系数  $\bar{K}_s$ . 透射率的计算比较简单, 但此时适用范围有限. 如使用可见光, 此时  $D_s < 0.7 \mu\text{m}$ , 而实际蒸汽水滴的平均直径范围在  $0 \sim 2 \mu\text{m}$ .

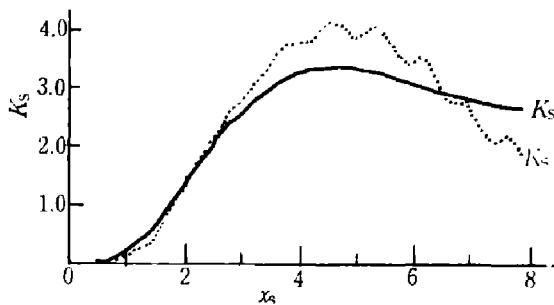


图1 平均消光系数与消光系数

Fig. 1 Average extinction coefficient and extinction coefficient

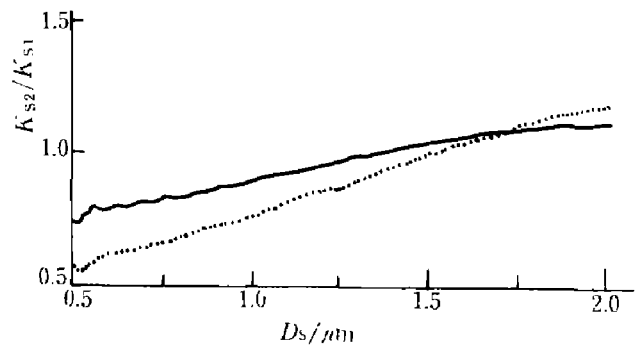


图2 平均消光系数比值与平均直径关系

Fig. 2 Dependence of ratio of the average extinction coefficient on average diameter

当  $x_s > 3$  时, 应利用式(11)进行测量. 因为  $D_s$  和  $C_v$  都是未知量, 所以需用两个波长对同一蒸汽进行测量, 两个波长的透过率分别为

$$\tau_1 = \exp\left[-\frac{3LC_v \bar{K}_{s1}(D_s)}{2D_s}\right], \quad (13)$$

$$\tau_2 = \exp\left[-\frac{3LC_v \bar{K}_{s2}(D_s)}{2D_s}\right]. \quad (14)$$

将式(13)、(14)取对数后相除, 得

$$\frac{\bar{K}_{s2}(D_s)}{\bar{K}_{s1}(D_s)} = \frac{\ln(\tau_2)}{\ln(\tau_1)}. \quad (15)$$

式(15)左边是  $D_s$  的函数, 数值计算结果如图2, 式(15)等号右边是可测的. 若其真值为

C, 由图查出对应  $K = \frac{\bar{K}_{s2}}{K_{s1}}$  的  $D_s$ , 可求出水滴的平均直径.

将已知的  $D_s$  值代入式 (13) 或 (14), 可求得浓度

$$C_v = \frac{2D_s}{3LK_{s1}} \ln\left(\frac{1}{\tau_1}\right) = \frac{2D_s}{3LK_{s2}} \ln\left(\frac{1}{\tau_2}\right). \quad (16)$$

浓度  $C_v$  和湿度  $Y$  的关系为

$$Y = \frac{\rho_f C_v}{\rho_g(1 - C_v) + \rho_f C_v}, \quad (17)$$

$\rho_g$  和  $\rho_f$  分别是蒸汽和液态水密度. 这样, 只需测量两个波长的水蒸汽透过率, 即可由式 (15)~(17) 计算、查表得出水蒸汽的湿度  $Y$  和水滴的平均直径.

由于前向散射的影响, 在一个小角度范围的前向散射光随透射光一起被探测器接收, 在我们的实验装置中这个小角度范围大约为  $1^\circ$ . 用  $\eta$  表示这个范围内前向散射光与总散射造成的误差, 这一误差相当于使散射截面变小, 对这个误差进行修正, 则式 (6) 应改为

$$\tau = \exp\left[-\frac{1}{4}\pi L \int_0^{D_m} D^2 N(D) K_s(\lambda, D)(1 - \eta) dD\right]. \quad (18)$$

式 (18) 中  $\eta$  是  $D$  的函数, 可由下式计算:

$$\eta = \frac{\int_0^{1^\circ} q_s(\theta, \varphi) \sin\theta d\theta}{\int_0^{180^\circ} q_s(\theta, \varphi) \sin\theta d\theta}. \quad (19)$$

计算平均消光系数的式 (8) 也应修改为

$$\bar{K}_s = \frac{\int_0^{D_m} D^2 N(D) K_s(\lambda, D)(1 - \eta) dD}{\int_0^{D_m} D^2 N(D) dD}. \quad (20)$$

根据式 (20), 为了对从红光到红外辐射的多种波长进行验证, 我们计算了三个波长分别是  $\lambda_1 = 0.7434 \mu\text{m}$ 、 $\lambda_2 = 0.8475 \mu\text{m}$ 、 $\lambda_3 = 0.9524 \mu\text{m}$  的  $K_s$  值及其比值以供测量用.

### 3 实验及结果分析

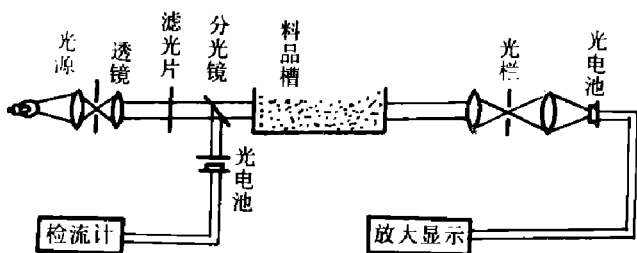


图3 实验装置

Fig. 3 Experimental arrangement

我们用硫磺悬浮液模拟湿蒸汽进行实验验证. 用硫酸溶液与蒸馏水混合, 再用注射器注入硫代硫酸钠, 反应生成许多非常细微而透明的硫磺颗粒, 它们均匀散布在溶液中, 颗粒的大小随反应时间的增加不断长大. 为了与光学测量结果对比, 用化学方法滴定硫磺的浓度. 测量光路见图 3.

对悬浮液的两波长透过率进行测量, 结果表明: 一方面设置不同的反应时间进行测量计算, 所得数据符合硫磺颗粒直径随时间长大的规律; 另一方面按一定比例将溶液稀释后再测量, 并用化学滴定法测浓度, 测量结果能很好地反映浓度变化的规律, 说明了理论和方法的正确性. 表 1 给出反应时间为 6 h 和 20 h 的测试结果. 每次测量后, 按一定的比例将溶液稀释, 再进行下次测量,  $\tau_1$ 、 $\tau_2$ 、 $\tau_3$  分别对应上述三种波长.

表 1 硫磺悬浮液光散射实验

Table 1 Light scattering experiment with sulphur suspension

(a) 反应时间 6 小时					
(a) Reaction time was six hours					
次序	$\tau_1$ (%)	$\tau_2$ (%)	$\tau_3$ (%)	$\bar{D}$ ( $\mu\text{m}$ )	$\bar{C}_v$
1	46.8	48.4	51.9	1.09	$1.27 \times 10^{-6}$
2	76.3	77.7	80.1	1.07	$4.27 \times 10^{-7}$
3	90.9	91.1	91.5	1.15	$1.65 \times 10^{-7}$
(b) 反应时间 20 小时					
(b) Reaction time was twenty hours					
次序	$\tau_1$ (%)	$\tau_2$ (%)	$\tau_3$ (%)	$\bar{D}$ ( $\mu\text{m}$ )	$\bar{C}_v$
1	40.4	34.6	32.6	1.49	$2.55 \times 10^{-6}$
2	63.4	58.8	56.5	1.49	$1.29 \times 10^{-6}$
3	79.1	77.0	74.0	1.47	$6.55 \times 10^{-7}$

我们将这套实验装置安装在蒸汽管道上对蒸汽进行测量. 实验用 45 kW 的电热蒸汽发生器产生蒸汽, 最高压力达 8 kg, 蒸汽量可达 60 kg/h, 锅炉中的蒸汽经节流进入测量管道, 测量管道较长, 可使蒸汽流动平稳、均匀. 测量管道两侧各装有一石英窗口, 测量光束由此进出. 窗口伸入管道内部让高速流动的气流将窗口表面冲刷干净, 管壁表面用石棉保温, 这样就避免了蒸汽在窗口凝结水. 测量区长度为  $L = 66 \text{ mm}$ , 炉内压力为 5 kg, 测量点处的压力为 1 kg, 蒸汽流量恒定为 80 m<sup>3</sup>/h (已知  $\rho_f = 958.1 \text{ kg/m}^3$ ,  $\rho_g = 0.5977 \text{ kg/m}^3$ ). 测量结果见表 2.

表 2 蒸汽测量结果

Table 2 Measured results of steam

次序	滤光片中心波长						$\bar{D}_s$ ( $\mu\text{m}$ )	$\bar{C}_v$
	$\lambda = 0.7434 \mu\text{m}$		$\lambda = 0.8475 \mu\text{m}$		$\lambda = 0.9524 \mu\text{m}$			
	透射光	参考光	透射光	参考光	透射光	参考光		
1	81.0	38.0	93.0	55.5	79.0	55.0	1.28	$1.25 \times 10^{-6}$
2	81.0	38.0	92.0	55.0	77.0	54.0		
未通蒸汽	106.0	37.5	119.0	54.0	100.0	54.5		

将浓度  $C_v$  换算成湿度  $Y = 0.2\%$ , 查水蒸汽焓熵图, 得到锅炉出口湿度为 3.6%.

由此可见, 利用近红外光的散射能对蒸汽进行有效的测量, 但要达到实用还需找出一个较好的湿度标准进行校准, 以选择最佳参数, 并对水滴分布进一步研究, 以计算更为接近实际的平均消光系数. 在实际测量中如将测量区长度做成可变的, 就可以对较大湿度范

围的蒸汽进行测量. 与微机联机还可扩展到实时测量应用.

### 参考文献

- 1 戴自祝等. 热流测量与热流计, 北京: 计量出版社, 1986, 4-10
- 2 Wyler J. *Journal of Engineering for Power*, 1978, **100**(10): 25-32
- 3 Tatrano K. *Journal of Heat Transfer*, 1986, **108**(11): 15-20
- 4 Holve Don. *Applied Optics*, 1979, **18**(10): 540
- 5 Bohrn C et al. *Absorption and Scattering of Light by Small Particles*, New York: Wiley, 1983, 1-50
- 6 蔡颐年等. 湿蒸汽两相流, 西安: 西安交通大学出版社, 1985, 2-20
- 7 Dobbins R. *Journal of the Optical Society of America*, 1966, **56**(1): 65

## REAL-TIME MEASUREMENT OF STEAM HUMIDITY BY MEANS OF LIGHT SCATTERING

Zhou Zuoping, Zhou Li, He Jie

(*Applied Physics Department, South China University of Technology,  
Guangzhou, Guangdong 510641, China*)

**Abstract:** Some important improvements of measurements for steam humidity by means of light scattering are proposed. Extinction coefficient of spherical particles is calculated with Mie's theory and, in accordance with the distribution of water droplets, the average extinction coefficient is calculated. The error is modified for forward scattering. The established measurement system can measure steam humidity and average diameter of water droplets simultaneously.

**Key words:** steam humidity, light scattering, real-time measurement.