

# 光学组件参数对热喷涂粒子参数测量的影响

武 涛<sup>1</sup>, 李长久<sup>2</sup>

(1. 西安交通大学建筑工程与力学学院, 710049, 西安; 2. 西安交通大学材料科学与工程学院, 710049, 西安)

**摘要:** 为保证热辐射法测量热喷涂粒子参数的精度, 分析了主要光学参数对信号强度和特征的影响, 并通过用等离子喷涂纯 Mo 粉末进行了实测验证. 结果发现: 信号强度主要由孔径光阑直径和瞄准距离决定, 而信号特征则随粒子空间分布、孔径光阑直径及调制窗口尺寸的变化而改变; 试验证实实测信号的相对强度和信号特征与预测规律基本吻合. 大直径孔径光阑在提高信号强度和信噪比的同时导致信号特征恶化, 小直径孔径光阑有利于获得特征良好的信号, 但也会导致信号强度、信噪比和测量结果集中程度的降低. 因此, 在系统设计过程中, 应在采用直径尽可能小的孔径光阑保证粒子信号特征的前提下, 引入雪崩光电二极管等高灵敏度器件来提高系统的光电灵敏度, 确保信号强度和信噪比, 进一步提高测量精度.

**关键词:** 热辐射; 粒子参数; 系统设计; 信号特征; 测量精度

**中图分类号:** TG174 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253 - 987X(2004)11 - 1191 - 05

## Effect of Optical Component Parameters on Signal Characteristics and Measured Parameters of Thermal Spray Particles

Wu Tao<sup>1</sup>, Li Changjiu<sup>2</sup>

(1. School of Architectural Engineering and Mechanics, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. School of Material Science and Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** The effect of the optical components on the voltage level and the characteristics of thermal radiation signals was analyzed to ensure the accurate measurement of the parameters of the thermal spray particles. An experiment was carried out with air plasma sprayed Mo powder. It is found that the voltage level of signal pulses is determined by the aperture diameter and the aiming distance for the specific materials. The radiant signal characteristics vary with the spatial position of particles, the aperture diameter, and the dimension of the modulating window. The relative theoretical voltage level and the theoretical signal characteristics agree well with the experimental results. It is clear that the large aperture leads to increasing signal to noise (S/N) ratio and worsens signal characteristics. While the small aperture contributes to the formation of well-shaped signals and results in decreasing S/N ratio and larger deviation of measurement data. Consequently, the aperture diameter ought to be selected as small as possible in the system design to ensure the generation of pulse signal with fine characteristic pattern, and the optoelectronic sensitivity of the system be adjusted high enough to ensure sufficient amplitude and S/N ratio of signals. Thus, it is necessary to introduce the photo sensor with higher sensitivity, such as avalanche photo diode (APD), to increase the measurement accuracy.

**Keywords:** thermal radiation; particle parameter; system design; signal characteristics; measurement precision

收稿日期: 2004 - 03 - 04. 作者简介: 武 涛(1970~), 男, 博士后; 李长久(联系人), 男, 教授, 博士生导师.

热喷涂过程中粒子状态参数的测量和控制对于优化涂层性能和阐明涂层形成机理具有重要意义。基于热辐射检测技术测量粒子状态参数的方法在20世纪80年代中期出现后,因其有可能实现对喷涂粒子的速度、温度与直径等多参数的同时测量而倍受重视;基于C. Moreau等的研究结果,商品化的DPV2000系统已于20世纪90年代中期进入市场<sup>[1]</sup>。我校焊接所从1996年也开始了类似原型系统的研发,并于1999年开发成功了可同时实现喷涂粒子速度、温度、直径和空间分布测量的原型系统,具体硬件构成和测量原理见文献[2,3]。为进一步提高粒子参数的测量精度,本文针对自行研制的原型系统,采用单窗口调制光阑,对影响粒子信号强度和特征的主要因素进行了理论分析和试验研究。

### 1 理论分析

#### 1.1 粒子的相对入射能量因子

由于喷涂粒子的粒径一般小于200 μm,进入测量区域的单个飞行粒子相对镜头可看作一个点光源,因此该粒子向空间辐射的能量可认为均匀分布于一系列同心的球面上。如图1所示,能够为光学探头L<sub>1</sub>所接收的辐射能量只是分布在大球球面上的粒子总辐射能量的一小部分,如果定义能为镜头接收的能量为E<sub>c</sub>,粒子总辐射能量为E<sub>t</sub>,则可定义粒子相对入射能量因子

$$R_e = \frac{E_c}{E_t} = \frac{S_c}{S_s} = 0.15 \cdot L_a(4L_a^2 + D_a^2)^{-1/2} \quad (1)$$

式中:S<sub>c</sub>、S<sub>s</sub>、L<sub>a</sub>、D<sub>a</sub>分别表示图1中的入射球冠面积、大球面积、瞄准距离和孔径光阑直径。

假定粒子都满足理想成像条件,则在可能的参数设计范围内,L<sub>a</sub>和D<sub>a</sub>对R<sub>e</sub>的影响如图2所示。因此,能够为光学敏感元件探测到的粒子有效入射能量E<sub>eff</sub>可以表示为

$$E_{eff} = \eta_e E_e = \eta_e R_e d_p^2 T_p^4 \quad (2)$$

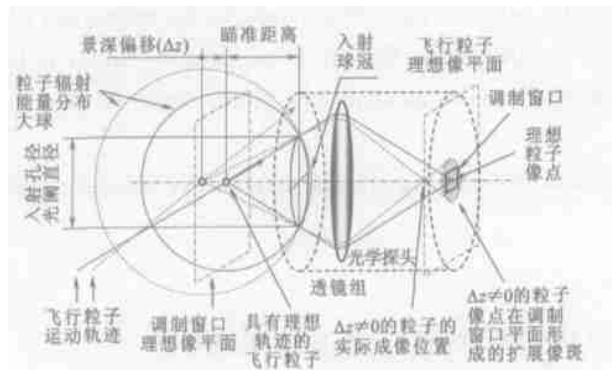


图1 粒子有效入射能量示意图

式中:η<sub>e</sub>、d<sub>p</sub>和T<sub>p</sub>分别表示光学系统的传输效率、粒子等效直径和粒子表面温度。R<sub>e</sub>由L<sub>a</sub>和D<sub>a</sub>决定,与η<sub>e</sub>类似,仅取决于光学设计参数,而d<sub>p</sub>则取决于喷涂材料。如果光学系统的η<sub>e</sub>不变,E<sub>eff</sub>就只受R<sub>e</sub>、粒子自身的粒径和温度的影响。

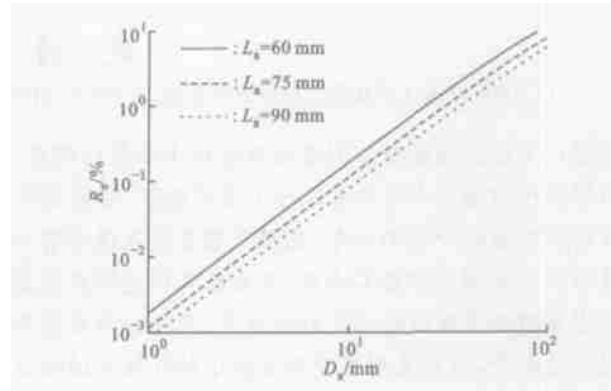


图2 L<sub>a</sub>和D<sub>a</sub>对R<sub>e</sub>的影响

#### 1.2 扩展像斑的形成和理论信号特征

前期研究发现<sup>[3]</sup>,由于实际测量中飞行粒子的轨迹一般与调制窗口的理想像平面和透镜组主光轴所在水平面间的交线有一定程度的交错,因此粒子在景深方向上偏离调制窗口理想像平面时,在调制窗口平面就会形成由粒子成像光束与该平面交截而成的粒子扩展像斑,其直径D<sub>s</sub>主要由D<sub>a</sub>和粒子在景深方向上相对调制窗口理想像平面的偏移量z决定

$$D_s = D_a / z / z_0^{-1} f (z_0 + z + f)^{-1}, \quad z > 0 \quad (3)$$

式中:z<sub>0</sub>和f分别为透镜组的理想物距和焦距。图3给出了z<sub>0</sub>=70 mm、f=35 mm时,z和D<sub>a</sub>对D<sub>s</sub>影响的等高线图。

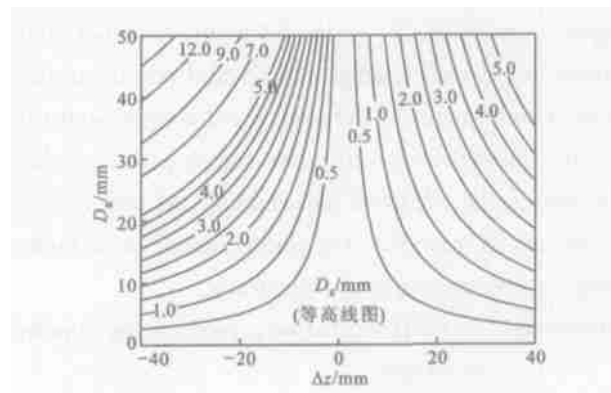


图3 z和D<sub>a</sub>对D<sub>s</sub>的影响

进一步研究还发现<sup>[4]</sup>,粒子脉冲信号特征可由

调制窗口尺寸  $B_w$  与  $D_s$  的相对大小关系确定,并可分为 4 种类型: 型为平顶曲边梯形,在  $D_s < B_w$  时得到; 型为尖顶曲边三角形,在  $D_s = B_w$  时得到,可认为是 型的特殊形式,出现的几率很小; 型为直边圆顶三角形,在  $B_w < D_s < 2^{1/2} B_w$  时得到; 型为直边平顶梯形,在  $D_s > 2^{1/2} B_w$  时得到.

4 类不同特征的信号脉冲对应于不同的粒子扩展像斑 - 调制窗口交互作用过程: 、 型是粒子像斑直径小于等于窗口尺寸时得到的具有饱和阶段或饱和点的脉冲,其饱和段对应于粒子像斑完全进入调制窗口区域的运动阶段,此时信号的强度与粒子的绝对辐射强度存在比例关系,因而可通过其半高宽和绝对强度准确测得粒子速度、温度和直径. 型或 型信号是粒子像斑大于或远大于调制窗口尺寸时得到的脉冲,其中尽管 型也有饱和和平直段特征,但这种饱和是由于像斑完全覆盖调制窗口而非像斑完全进入调制窗口区域所导致,粒子信号的强度与粒子的绝对辐射强度之间不再成立比例关系,同时粒子脉冲信号的半高宽与窗口宽度也不存在空间对应关系,因而不能用来测量粒子速度、温度等参数. 由于处理数据时将各种脉冲都假设为 型信号,如果不在系统设计时杜绝非 型信号的出现,则实际测量中非 型信号的出现几率越高,因为信号特征不良所导致的测量误差就越大.

## 2 试验结果和讨论

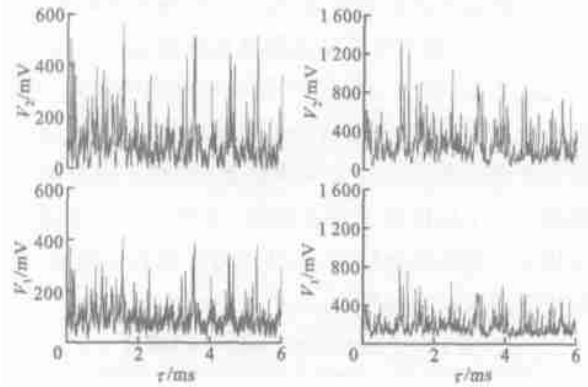
### 2.1 试验材料和方法

喷涂设备采用江西九江等离子设备厂出品的 GP-80 型等离子喷涂系统,喷涂材料采用 Sulzer Metco 公司生产的粒度为  $38 \sim 44 \mu\text{m}$  的纯 Mo 粉末.工作气采用 Ar 和  $\text{H}_2$ ,流量分别为 70 和  $516 \text{ L/min}$ ,工作电压和工作电流分别为 65 V 和 650 A,送粉气则采用流量为  $515 \text{ L/min}$  的高纯  $\text{N}_2$ .所有数据均在距离喷枪出口 150 mm 处以标准瞄准距离 ( $L_a = 75 \text{ mm}$ ) 测得.在 2 个单色滤色通道,分别采用  $(650 \pm 5) \text{ nm}$  和  $(770 \pm 5) \text{ nm}$  的干涉滤光片进行滤色.

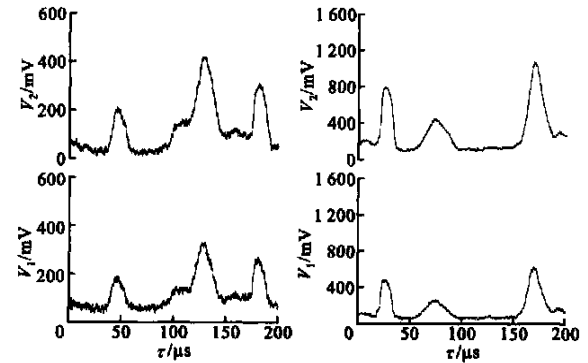
### 2.2 实测脉冲信号的表现特征

图 4 是  $D_a$  分别为 10 mm 和 20 mm 时测得的原始采样信号及其局部放大效果.可以看到,采用直径 10 mm 的孔径光阑时测得的脉冲信号峰值电压水平只有采用直径 20 mm 的孔径光阑时的一半左右.观察图 4c 和 4d 所示的典型单脉冲特征可以看到,采用 10 mm 直径的孔径光阑所得到的大多数脉

冲具有 型平顶曲边梯形特征,而采用 20 mm 直径的孔径光阑时,非 型特征脉冲出现得更为频繁.对典型单次采样数据的统计结果表明,采用 10 mm 直径的孔径光阑时,非 型脉冲的出现几率小于 20%,而在采用 20 mm 直径的孔径光阑时,该几率在 40% 以上.



(a)  $D_a = 10 \text{ mm}$ ,宏观特征 (b)  $D_a = 20 \text{ mm}$ ,宏观特征



(c)  $D_a = 10 \text{ mm}$ ,局部特征 (d)  $D_a = 20 \text{ mm}$ ,局部特征

图 4 不同  $D_a$  下实测信号的表现特征

### 2.3 脉冲信号平均强度的比较

表 1 给出了采用 2 种直径的孔径光阑时,连续采样 260 ms 所得测量数据中包含的可分辨脉冲信号强度的平均值.求取均值和方差时,采用了简单算术平均处理和先求取分布直方图、然后对直方图进行高斯分布拟合 2 种方法.可以看到,算术平均值比高斯拟合值稍大.如图 2 所示,在不考虑粒子信号特征变化对信号强度的影响并采用  $L_a = 75 \text{ mm}$  的标准瞄准距离时,对于 20 mm 直径和 10 mm 直径的孔径光阑,同一通道的信号强度理论比值应为 3196,但由表 1 所示的实测数据可知,无论是采用算术平均还是高斯拟合处理,该比值的实测结果均小于 3196.采用算术平均时,通道 1 和 2 的比值分别

是 213 和 217,采用高斯拟合时,通道 1 和 2 的比值分别是 215 和 219,与理论值有一定出入.结合图 4 中信号特征的变化规律可以推测,采用 10 mm 直径光阑时,大多数信号属于 型信号,而采用 20 mm 直径光阑时,有较大比例的信号是非 型信号,形状特征的恶化导致了信号强度的降低,从而使同一通道信号强度的比值偏离理论值 3196 而呈下降趋势.这说明,只有在信号特征无明显恶化的前提下,才可在光电系统设计时利用图 2 结果估计实测信号的平均强度.将孔径光阑设计为可更换部件,同时将后续放大电路的增益设计为可调整系统,对于保证测试系统工作于最佳状态很有必要,这样可以在保证信号特征不恶化的前提下,提高信号强度和信噪比,有效提高测量结果的精度.

表 1 实测脉冲信号的平均强度

$D_a/\text{mm}$	通道	平均峰值电压水平/mV	
		算术平均	高斯拟合
10	1	118 ±74	90 ±53
	2	168 ±107	127 ±83
20	1	270 ±136	224 ±97
	2	450 ±221	371 ±148

#### 2.4 $D_a$ 对两通道信号强度比值的影响

图 5 给出了采用不同直径孔径光阑时,粒子脉冲信号在 2 个单色通道内的强度分布散点图及线性拟合结果.根据比色测温原理<sup>[5]</sup>,如果通过测量区域内的粒子与射流达到局部热平衡,其表面温度应较为接近,而对应信号的绝对强度虽然会因粒子的粒径不同而不同,但其在 2 个单色通道内的比值也较为接近.

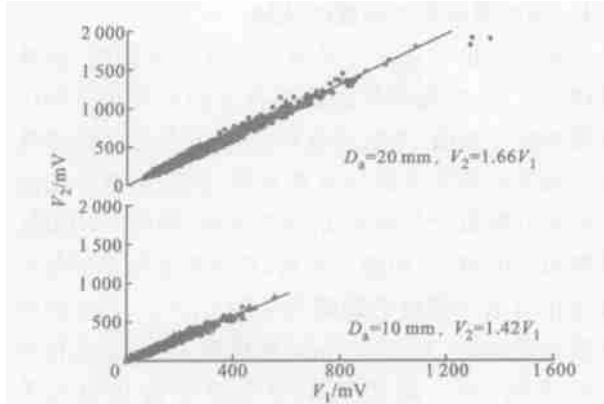


图 5 不同  $D_a$  下 2 个单色通道内的信号强度分布

从图 5 所示的实测结果来看,采用 2 种直径的

孔径光阑时,2 个通道的信号强度均显示了良好的线性分布特征,但其斜率则有一定程度的出入.这说明,使用不同直径的孔径光阑时,温度测量结果有一定程度的出入,这种出入既与大直径孔径光阑引起的信号特征恶化有关,也与小直径光阑导致的信号强度下降有关.

#### 2.5 $D_a$ 对速度和温度测量结果的影响

表 2 分别给出了采用 10 mm 和 20 mm 直径的孔径光阑时,实测的平均粒子速度和表面温度,平均值与方差的计算方法与 2.3 节中的类似.可以看到,不同的数据处理方法给测量结果带来的差异基本一致,当  $D_a$  不同时,速度和温度测量结果的差异较为显著,从而证实了 1.2 节中有关信号特征变化影响粒子参数测量精度的结论,说明只有 型信号的半高宽和强度可用来准确测量粒子速度和表面温度,进而推算出粒子直径及其空间位置,而 型信号的出现导致了显著的测量误差.

表 2  $D_a$  对粒子速度和温度实测结果的影响

$D_a/\text{mm}$	平均粒子速度/ $\text{m s}^{-1}$		平均粒子温度/	
	算术平均	高斯拟合	算术平均	高斯拟合
10	172 ±55	181 ±58	2 662 ±335	2 611 ±289
20	123 ±49	118 ±61	2 261 ±130	2 266 ±132

从图 3 可看到,当使用 20 mm 直径的光阑时,要保证  $D_s$  小于调制窗口宽度 ( $B_w = 114 \text{ mm}$ ),粒子的  $z$  不应超过  $\pm 15 \text{ mm}$ ,而在实测过程中,喷涂粒子束流在距离枪口 150 mm 处的发散半径可达 20~30 mm,这导致了如图 4d 中所示的非 型信号的大量出现.在使用 10 mm 直径的光阑时,这个可容忍偏移量放大到  $\pm 25 \text{ mm}$ ,多数飞行粒子可以产生如图 4c 所示的具有良好 型特征的信号,其测量结果更为可信.观察表 2 的结果还可以发现,使用 10 mm 直径的光阑时,粒子速度和表面温度测量结果的方差都比采用 20 mm 直径光阑时的大,特别是表面温度,这说明使用 10 mm 直径的光阑时,尽管可得到形状特征更好的信号和理论上更为可信的测量结果,但  $D_a$  的下降导致信号强度下降,当系统噪声水平不变时,信号的信噪比随之下降,这使得数据统计结果的分散度变大.

#### 2.6 系统设计的基本矛盾和改进思路

基于上述理论分析和实测数据可以看到,在此类基于窗口调制和比色测温技术的粒子状态参数测量系统中,基本设计原则可以归纳为: 必须保证

粒子脉冲信号具有 型曲边梯形特征; 脉冲信号强度应显著高于背底噪声水平,具有可接受的信噪比. 保证粒子脉冲信号 型特征和提高脉冲信号强度与信噪比是一对矛盾(该矛盾主要表现为对  $D_a$  互相矛盾的要求,前者要求尽可能降低  $D_a$ ,后者则相反),解决该矛盾的可行途径是在提高光电元件灵敏度的基础上降低  $D_a$ . 在光电元件灵敏度不足时,片面追求良好的信号特征或较高的信号强度都会造成测量精度的降低. 对于本文涉及的原型系统,可以肯定的是,系统中使用的 Si2PIN 光电二极管已不能满足弱辐射粒子测量的要求,改进的方向是采用雪崩光电二极管(APD)等具有更高光电灵敏度的器件.

### 3 结 论

(1)对于基于热辐射法的粒子状态参数测量系统,信号强度主要由相对入射能量因子和非 型信号的出现几率决定,相对入射能量因子与孔径光阑直径和瞄准距离有关,非 型信号的出现几率则与孔径光阑直径和粒子景深偏移量有关.

(2)实测信号的强度和特征与理论分析结果基本一致,当采用不同直径的孔径光阑时,实测信号特征和强度差异显著,进而影响了粒子速度和温度的测量结果. 当孔径光阑直径较小时,粒子信号特征改善,其测量结果较为可信,但由于信号强度和信噪比也同时降低,测量结果特别是粒子表面温度的分散

度也变大.

(3)保证粒子信号 型特征和提高信号强度与信噪比,对孔径光阑直径存在相互矛盾的要求,应当在提高光电元件灵敏度的基础上降低孔径光阑直径,以保证测量结果的精度. 因此,必须引入更高灵敏度的 APD 光敏元件,同时采用较小直径的孔径光阑.

### 参考文献:

- [1] Moreau C, Cielo P, Lamontagne M, et al. Impacting particle temperature monitoring during plasma spray de2 position [J]. Meas Sci Technol, 1990, 1(8): 807 - 814.
- [2] Wu T, Li C X, Li C J. Simultaneous measurement of surface temperature and velocity of in2flight particles un2 der HVOF condition by thermal radiation method [J]. Materials Protection, 1999, 32(10B): 124 - 127.
- [3] Li C J, Wu T, Li C X, et al. Effect of particle trajectory on the characteristics of signal for the measurement of spray particle parameters based on thermal radiation[J]. J Therm Spray Technol, 2003, 12(1): 80 - 94.
- [4] 武 涛,李长久. 热辐射信号特征对热喷涂粒子参数测量的影响[J]. 西安交通大学学报, 2003, 37(5): 479 - 482.
- [5] DeWitt D P, Nutter G D. Theory and practice of radia2 tion thermometry [M]. New York: John Wiley & Sons, 1988. 21 - 63.

(编辑 葛赵青)

### [文摘预登]

## 冰箱试验包传热过程的仿真计算

王 石, 田怀璋, 陈林辉, 易佳婷

(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

建立了一个用于描述试验包传热过程的三维非稳态数学模型,模型中考虑了试验包降温过程的物性变化,通过引入一个试验包边界导热系数折算因子来考虑由于其体积变化而造成的接触热阻. 试验包的降温试验结果与预测值的比较表明:采用 Morgan 关联式计算试验包表面传热系数精度较高,其值约为  $5 \sim 7 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ;试验包边界导热折算因子在  $10 \times 10 \times 10$  的网格划分下,其值约为 0.11;试验包的温度预测值与实测值吻合较好,模型可靠,可用于相变蓄能等类似问题的仿真计算.