

瞄准距离对热喷涂粒子脉冲信号强度的影响

武涛¹, 李长久², 沈亚鹏¹

(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: 针对基于窗口调制和比色测温技术的热喷涂粒子参数测量系统, 从理论上分析了瞄准距离变化对脉冲信号强度的影响, 发现入射能量水平和信号特征的变化是影响实测脉冲信号强度的主要因素, 二者的影响作用在小于理想瞄准距离时相反从而在一定程度上相互抵消, 在大于理想瞄准距离时相同从而叠加, 使得实测脉冲信号强度随瞄准距离的变化呈现不对称倒V形变化规律. 实验验证与理论分析结果吻合良好, 证实了用上述双机制复合作用解释瞄准距离变化时粒子脉冲信号强度变化规律的合理性.

关键词: 热喷涂; 入射能量; 信号特征; 信号强度

中图分类号: TG174 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-987X(2005)09-0917-04

Effect of Aiming Distance on Voltage Level of Signal Pulses Generated by Thermal Spray Particles

Wu Tao¹, Li Changjiu², Shen Yapeng¹

(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 aiming distance on voltage level of effective signal pulses was theoretically analyzed for the measurement system based on window-modulating velocimetry and 2-color pyrometry to diagnose multiple parameters of thermal spray particles. It reveals that the incident energy level and the variances of signal characteristics are the two main factors affecting the voltage level of signal pulses. The two factors have a superimposed effect on the voltage level when the aiming distance is larger than standard 75 mm, or a neutralized effect when the aiming distance is smaller than 75 mm. Consequently, when the aiming distance varies from 45 mm to 120 mm, the voltage level demonstrates an asymmetrical inverted "V" shape variation. The experimental results are well coincident with the simulated ones to confirm the reasonability of the proposed mechanism.

Keywords: thermal spray; incident energy; signal characteristics; voltage level

作者曾基于窗口调制和比色测温技术, 针对所开发的喷涂粒子参数测量系统^[1], 建立了粒子信号特征形成和演进理论模型, 并进行了实验验证, 澄清了采用不同类型调制光阑时信号脉冲的分类和对应的特征, 阐明了系统设计的基本矛盾和原则, 给出了完整的数据处理方法^[2-7]. 然而, 在分析实测信号时发现, 其特征虽然与模型^[5]基本吻合, 但在非标准瞄准距离下, 脉冲信号的平均半高宽和强度与上述理

论模型确定的范围差异较大. 为澄清瞄准距离 L_a 变化对脉冲信号强度的影响机制, 建立适当的校正方法以保证与脉冲信号强度相关的粒子参数的准确测量, 本文通过改变孔径光阑直径 D_a 和 L_a , 就二者对于粒子形成脉冲信号时的入射能量水平和粒子像斑-调制窗口间遮挡关系的影响进行了理论分析和实验研究, 提出了脉冲信号强度的双重影响机制和对应的校正方法, 并进行了必要的实验验证.

1 实验设备和方法

本文所涉及的测量系统的构成和基本测量原理可参考文献[1,4-6],此处不再赘述.系统中正方形单窗调制光阑窗口的宽、高均为1.4 mm,孔径光阑直径为10 mm或20 mm,在距喷枪出口约160 mm处进行测量,采样频率、重复采样次数和每通道单次采样点数分别为10 MHz、40次和65 280点.采用10 mm直径的孔径光阑时, L_a 分别设为45 mm、60 mm、75 mm、90 mm和105 mm;采用20 mm直径的孔径光阑时, L_a 则分别设为60 mm、75 mm、90 mm、105 mm和120 mm.采用本校自行研发的CH-2000型HVOF喷涂系统和Sulzer Metco公司生产的粒度为63~76 μm 的Mo粉进行喷涂.燃气、助燃气和送粉气分别为压力0.35 MPa、流量35 L/min的 C_3H_8 ,0.55 MPa、440 L/min的 O_2 和0.35 MPa、10 L/min的 N_2 .

2 L_a 对粒子入射能量水平的影响

如图1所示, L_a 和 D_a 的变化会改变粒子光源的最大入射角(α)和入射能量分布大球半径,从而引起粒子入射能量水平的变化

$$E_m = 0.5E_t(1 - (L_a + \Delta z) \cdot ((L_a + \Delta z)^2 + 0.25D_a^2)^{-0.5}) \quad (1)$$

式中: E_m 、 E_t 和 Δz 分别是粒子的有效入射能量、总辐射能量和景深偏移.当粒子光源特性不变时,粒子入射能量是 D_a 、 L_a 和 Δz 的函数.本文假设在 L_a 变化时粒子光源特性不变,以 $L_a = 75$ mm、 $D_a = 10$ mm时沿束流中心线运动粒子的入射能量 E_0 为基准,考察 L_a 和粒子散布范围(Δz)对粒子脉冲信号产生过程中粒子相对入射能量水平的影响.为此,定义相对入射能量因子 r_i 为不同 D_a 、 L_a 和 Δz 下粒子入射能量 E_m 与 E_0 的比值

$$r_i = E_m/E_0 \quad (2)$$

基于CH-2000型喷涂系统的射流特性,本文假设粒子束流在距离喷枪出口约160 mm的测量距离处,其最大散布范围满足 $-15 \text{ mm} < \Delta z < 15 \text{ mm}$.

图2给出了 D_a 分别为10 mm和20 mm时, L_a 对束流中心线和两侧边界上运动粒子的 r_i 的影响. L_a 增加时, r_i 呈单调下降趋势,同时 Δz 导致每一 L_a 下 r_i 出现带状分布,散布在靠近镜头和远离镜头侧的粒子的 r_i 值分别高于和低于束流中心线处粒子的 r_i 值. D_a 增加时, r_i 的分布带显著上移,在相同 L_a 下, $D_a = 20$ mm时束流中心线上运动粒子

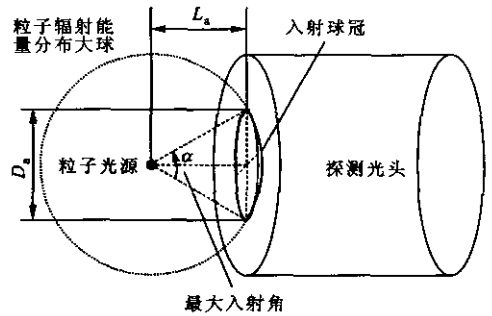
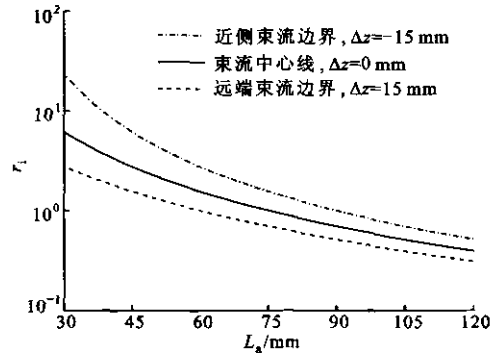
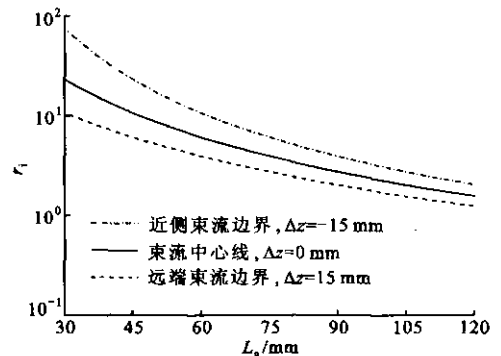


图1 L_a 和 D_a 对粒子入射能量水平的影响示意图



(a) $D_a = 10$ mm



(b) $D_a = 20$ mm

图2 D_a 、 L_a 和 Δz 对 r_i 的影响

的 r_i 值水平约为 $D_a = 10$ mm时的4倍,显示增大 D_a 有利于提高粒子入射能量水平,与前期研究结果一致[6].

3 L_a 对信号特征和强度的影响

由已建立的粒子脉冲信号特征模型[4,5]可知, Δz 和 D_a 决定粒子扩展像斑的直径 D_s ,而 D_s 与调制窗口宽度 B 的相对大小决定了粒子的脉冲信号特征,当 $D_s > B$ 时,脉冲信号表现出宽矮化尖峰或平顶梯形等非I型特征,其强度远低于像斑完全进入调制窗口区域形成的饱和I型信号.采用文献[4]介绍的方法和思路,可得到 L_a 对归一化信号强度 \hat{S}_{eff} 的影响规律.本文直接定义脉冲信号强度的信号特征校正系数为

$$r_c = \hat{S}_{\text{eff}} \quad (3)$$

图3给出了 D_a 分别取10 mm和20 mm时, L_a 和 Δz 对 r_c 的影响。可以看到,当 L_a 变化时,由于脉冲信号特征变化对脉冲信号强度的影响趋势与图2中粒子入射能量水平变化对脉冲信号强度的影响趋势在 $L_a > 75$ mm时相同,都有降低脉冲信号强度的作用,而在 $L_a < 75$ mm时影响趋势则相反,粒子入射能量水平的变化倾向于提高脉冲信号强度,此时脉冲信号的非I型化则有降低脉冲信号强度的作用。当 D_a 较小时,脉冲信号特征在标准瞄准距离附近较宽的范围内无变化,对信号强度基本无影响,在 $L_a < 70$ mm或 $L_a > 100$ mm时,脉冲信号特征的非I型化开始对脉冲信号强度起作用;当 D_a 增大至20 mm时,考虑到 Δz 的影响,脉冲信号特征无变化的区间很窄,脉冲信号特征的变化几乎在各个瞄准距离上均对脉冲信号强度施加影响,说明降低 D_a 对排除 L_a 对脉冲信号特征变化的影响有利。

4 双重机制的共同影响和实验验证

上述分析表明, L_a 通过改变粒子入射能量水平和脉冲信号特征两方面的作用影响粒子的脉冲信号强度,只有综合这两种作用才能对粒子脉冲信号强度的变化进行准确的估计和校正。为此,本文定义脉

冲信号强度的校正系数 r_v 为前述校正系数 r_i 和 r_c 的乘积

$$r_v = r_i r_c \quad (4)$$

以统一考察和校正脉冲信号强度随 L_a 的变化。以 $L_a = 75$ mm和 $D_a = 10$ mm条件下,实测脉冲信号在通道1和通道2内的平均粒子脉冲信号强度为基准,以在其他 L_a 和 D_a 下测得的粒子脉冲信号在通道1和通道2内的平均强度与该基准的比值作为实测脉冲信号的 r_v 值,所有方差也依此基准换算为相对值。

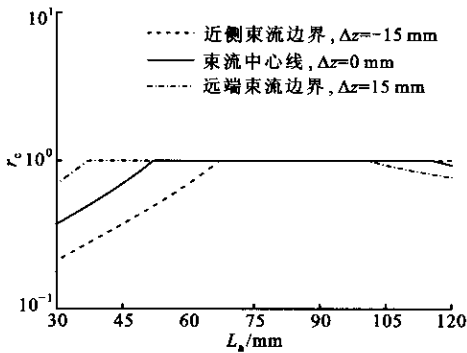
图4给出了 D_a 为10 mm和20 mm时, L_a 和 Δz 对 r_v 影响的理论计算曲线和实测数值对比,其中图4a、4b分别检验了 $D_a = 10$ mm时理论曲线与实测信号在通道1和通道2内的平均 r_v 值的吻合程度,图4c、4d分别检验了 $D_a = 20$ mm时理论曲线与实测平均 r_v 值的吻合程度。图中的模拟曲线显示,在粒子入射能量水平和脉冲信号特征变化的双重作用下, r_v 在 $L_a = 60$ mm附近区域出现了一个倒V形转折,但在 Δz 的影响下,该转折趋势并不显著。 r_v 理论曲线随 L_a 增大基本呈现单调下降趋势,同时 Δz 引起的 r_v 变化幅度减小,实测数据点的方差分布也基本体现出了这种 r_v 变化幅度变小的现象。对比实测数据和理论曲线发现,实测数据与理论曲线基本吻合,较好地表现出了 r_v 的变化走势,其中在 $D_a = 10$ mm时,实验点与理论曲线的符合程度更好。

由于单次采样测得的粒子数也受到脉冲信号强度的影响,故在此一并考察 L_a 变化时单次采样测得的粒子数与 r_v 的相关性。为此,采用 $L_a = 75$ mm和 $D_a = 10$ mm条件下平均单次采样测得的粒子数 n_0 作为基准,以其他 L_a 和 D_a 下平均单次采样测得的粒子数 n 与 n_0 的比值 r_n 来考察其与 r_v 的相关性

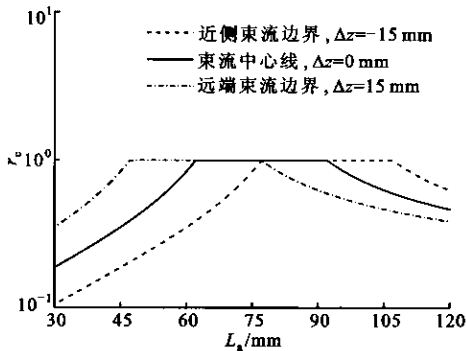
$$r_n = n/n_0 \quad (5)$$

图5给出了根据实测数据计算得到的 r_n 散点与 r_v 理论曲线的比较。可以看到,根据平均单次采样测得的粒子数折算得到的 r_n 与 r_v 理论曲线基本吻合,表现出了较强的相关性。

上述理论分析和实验验证结果表明,当 L_a 变化时,以粒子入射能量水平和脉冲信号特征变化对脉冲信号强度的复合影响作用来解释实测粒子脉冲信号强度的变化是合理的,实测数据与理论分析结果基本吻合,从理论上澄清了影响粒子脉冲信号强度的基本因素,将所提出的校正方法应用于粒子直径测量,有助于提高 L_a 变化时粒子直径测量的精度。



(a) $D_a = 10$ mm



(b) $D_a = 20$ mm

图3 D_a 、 L_a 和 Δz 对 r_c 的影响

5 结论

与 L_a 对脉冲信号半高宽的双重影响机制类似,

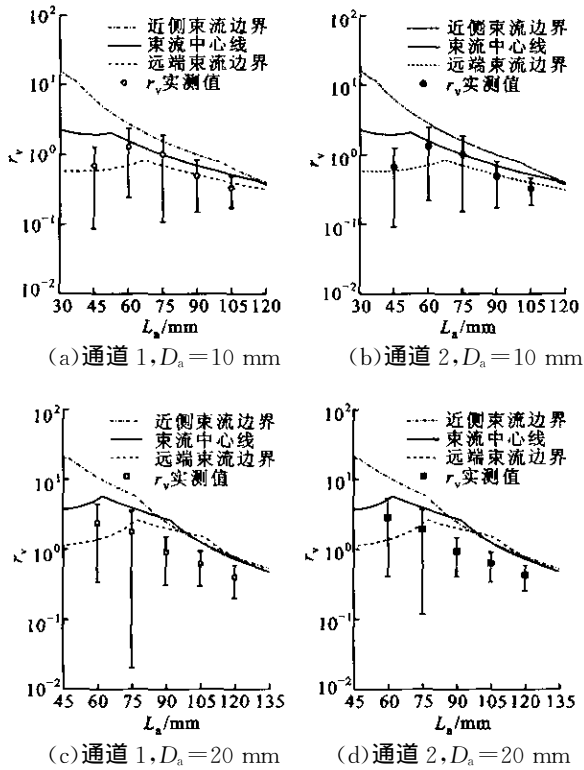


图 4 L_a 、 D_a 和 Δz 对 r_v 理论曲线和实测值的影响

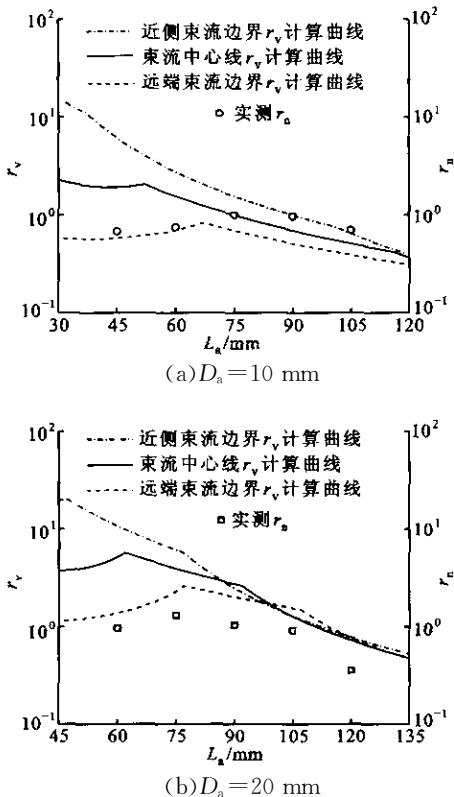


图 5 实测 r_n 值与 r_v 理论曲线的相关性比较

当 L_a 变化时,存在粒子入射能量水平变化和信号特征变化对脉冲信号强度的双重影响机制:当 L_a 减小时,粒子入射能量水平的变化倾向于提高脉冲信号强度;当 L_a 较大程度地偏离理想值时,在大于或小于标准瞄准距离两个方向上都引起非 I 形特征脉冲信号的大量出现,造成粒子脉冲信号强度的下降.在 $L_a < 75$ mm 时,两种机制的影响效果相反从而在一定程度上相互抵消,而在 $L_a > 75$ mm 时,二者的影响趋势类似因而叠加,使得脉冲信号强度随 L_a 的变化呈现不对称倒 V 形变化规律,转折点在 $L_a = 60$ mm 附近区域,但与 L_a 变化时脉冲信号半高宽的 U 形变化规律相比,脉冲信号强度的转折趋势不明显,当 $L_a > 60$ mm 后,基本呈现单调下降趋势.相关的验证实验表明,脉冲信号相对强度的实测值与理论预测规律吻合良好,平均单次采样测得的粒子数与理论预测的 r_v 值之间有较强的相关性.

参考文献:

- [1] Wu T, Li C X, Li C J. Simultaneous measurement of surface temperature and velocity of in-flight particles under HVOF condition by thermal radiation method [J]. Materials Protection, 1999, 32(10B): 124-127.
- [2] Li C J, Wu T, Li C X. Effect of system design on the characteristics of thermal radiation signals in the simultaneous measurement of spray particle parameters [A]. Proc of Int Thermal Spray Conf 2002 [C]. Essen; German Welding Society, 2002. 994-1 000.
- [3] Wu T, Li C X, Li C J. Effect of optical system design on the signal characteristics and measurement precision in the simultaneous measurement of particle parameters based on thermal radiation [A]. Zhang S W. Proceedings of 3rd International Conference of Surface Engineering [C]. Chengdu, China: Southwest Jiaotong University Press, 2002. 182-187.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 武涛,李长久.光学组件参数对热喷涂粒子参数测量的影响[J].西安交通大学学报,2004,38(11):1 191-1 195.
- [7] 武涛,李长久.热辐射检测系统测量热喷涂粒子参数时的数据处理[J].西安交通大学学报,2005,39(1):70-74.

(编辑 葛赵青)