

一种新的光子多普勒速度频谱分析方法

孙海权 王裴 陈大伟 马东军

A new method to analyze the velocity spectrograms of photonic Doppler velocimetry

Sun Hai-Quan Wang Pei Chen Da-Wei Ma Dong-Jun

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 104702 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.104702

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.104702>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I10>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

行波驱动下空泡在可压缩流场中的运动特性研究

[Cavitation bubble in compressible fluid subjected to traveling wave](#)

物理学报.2013, 62(24): 244701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.244701>

疏水表面减阻环带实验研究

[Investigation about drag reduction annulus experiment of hydrophobic surface](#)

物理学报.2013, 62(15): 154701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.154701>

可压缩涡流场中空泡运动规律及声辐射特性研究

[The motion and acoustic radiation characteristics for cavitation in the compressible vortex fluid](#)

物理学报.2013, 62(11): 114702 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.114702>

不同压力下介质阻挡放电等离子体诱导流场演化的实验研究

[Experimental investigation on the evolution of dielectric barrier discharge plasma induced flow at different operating pressures](#)

物理学报.2013, 62(10): 104702 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.104702>

具有密度跃层分层流体中回转体激发内波特性实验

[The characteristics of internal waves generated by a revolution body in a stratified fluid with a pycnocline](#)

物理学报.2012, 61(7): 074701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.074701>

一种新的光子多普勒速度频谱分析方法*

孙海权¹⁾²⁾ 王裴^{1)2)†} 陈大伟¹⁾ 马东军¹⁾

1) (北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100094)

2) (北京应用物理与计算数学研究所, 计算物理实验室, 北京 100088)

(2015年12月14日收到; 2016年2月2日收到修改稿)

光子多普勒速度计可给出飞层表面某一速度带内颗粒群速度随时间演化的频谱数据, 在冲击动力学实验尤其是微喷射及其混合研究中得到广泛应用. 本文提出一种新的光子多普勒频谱数据分析方法, 可推断出混合区厚度变化和前端等效颗粒尺度. 利用该方法, 对一些典型状态下喷射混合速度频谱开展分析, 获得了不同冲击压力、气体条件下颗粒度数据, 证实了气体环境下喷射颗粒的气动破碎现象, 以及破碎后尺度与初始条件的依赖性, 为喷射混合物理规律研究提供了重要依据.

关键词: 喷射混合, 光子多普勒速度计, 速度频谱, 等效颗粒度

PACS: 47.40.-x, 47.54.De, 47.55.Ca, 47.61.Jd

DOI: 10.7498/aps.65.104702

1 引言

强冲击载荷下, 金属表面喷射颗粒与界面气体的混合对流场压缩状态和装置性能有重要影响, 为诸多强冲击、高速碰撞及内爆压缩等领域研究广泛关注的课题. 至今, 人们对喷射混合过程已开展大量实验和理论研究工作^[1-5], 发展了多种实验测试技术, 如 Asay 膜、高速摄影^[6]、全息照相^[7]等, 获取了混合层物质分布和形貌特征.

光子多普勒速度计 (photonic Doppler velocimetry, PDV) 是近些年发展的一种新型激光干涉测速技术, 可提供金属表面喷射颗粒丰富的速度信息, 在微喷射及其混合实验研究中得到了广泛应用^[8-10]. PDV 速度频谱给出的是速度带内颗粒群速度随时间变化情况, 从中难以获取某一具体拉格朗日颗粒的运动历程, 这为频谱数据的分析与使用带来了很大困难. Mercier 等^[11], Prudhomme 等^[12], 以及 Fedorov 等^[13] 采用 PDV 技术获取了不同冲击强度、气体条件下金属喷射颗粒与界面气体混合的速度频谱, 并将频谱内某一数据点作为喷

射颗粒起始速度, 给出不同粒径颗粒的速度衰减曲线, 由落在速度带内的速度曲线大体推断喷射颗粒状态. 该方法通常需多次数值试验获取与频谱数据匹配的颗粒状态, 处理过程比较繁琐, 且难以给出最佳结果. 而喷射混合问题机理复杂, 通过 PDV 频谱数据分析获取更多的定量信息对进一步认识喷射颗粒与气体两相混合的物理规律有着重要意义.

本文基于颗粒在流场中运动特征的解析分析, 提出了一种新的解读喷射混合实验中 PDV 频谱数据的方法, 可推断给出混合区厚度随时间演化历程和前沿等效颗粒尺度. 利用上述方法对不同冲击压力、气体条件下喷射混合速度频谱进行了解读, 分析了颗粒状态对初始条件的依赖性, 为喷射混合物理规律研究提供重要依据.

2 颗粒在流场中的运动特征

2.1 单颗粒运动方程

对于刚体颗粒在匀速、等温、不可压缩及无限大流场中的运动, 由于流体有黏性, 在颗粒表面有

* 中国工程物理研究院科学技术发展基金 (批准号: 2015B0101021, 2015B0201043)、计算物理重点实验室基金 (批准号: 9140C690103150C69302) 和国家自然科学基金 (批准号: U1530261) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: wangpei@iapcm.ac.cn

一黏性附面层, 因此流体作用于球体上的阻力由压差阻力和摩擦阻力组成. 习惯上把阻力 F_d 的表达式写成^[14]

$$F_d = C_D \frac{1}{2} \rho_c |u_c - u_p| (u_c - u_p) S, \quad (1)$$

式中, u_c , ρ_c 分别为流体速度、密度; u_p 为颗粒速度; S 为颗粒迎风面积; C_D 为阻力系数.

此外, 颗粒还受到重力、压强梯度力、附加质量力、Basset 力、升力、Magnus 力、Saffman 力等. 本文忽略重力、Basset 力等, 考虑气动阻力、压强梯度力和附加质量力建立颗粒运动方程:

$$\begin{aligned} \frac{du_p}{dt} = & -\frac{1}{\rho_p} \frac{dp}{dx} + \frac{1}{2} \frac{\rho_c}{\rho_p} \frac{d}{dt} (u_c - u_p) \\ & + \frac{3}{4} \frac{C_D}{d} \frac{\rho_c}{\rho_p} |u_c - u_p| (u_c - u_p), \end{aligned} \quad (2)$$

将阻力(1)式和流体运动方程代入(2)式, 化简可得:

$$\frac{du_p}{dt} = \frac{(u_c - u_p)}{\zeta_2 \tau} + \frac{\zeta_2 - \zeta_1}{\zeta_2} \frac{du_c}{dt}, \quad (3)$$

式中, $\zeta_1 \equiv 1 - \rho_c/\rho_p$, $\zeta_2 \equiv 1 + 0.5\rho_c/\rho_p$. τ 为速度弛豫时间

$$\tau = \frac{\rho_p d^2}{18\mu} \cdot \frac{1}{f(Re)}, \quad (4)$$

μ 为流体黏性系数, Re 为颗粒雷诺数, 当取标准阻力曲线时, $f(Re) = 1 + 1/6Re^{2/3}$.

2.2 颗粒运动解析分析

当冲击波经过金属-气体界面时, 会向气体中透射一个冲击波, 本文假定微喷颗粒主要在气体波后的流场中运动, 相应的简化模型如图 1(a) 所示, 图中右边为气体, 活塞速度为 $u_c = u_{c0} + a_c t$, 在气体中产生向右传播的冲击波 D , 活塞壁面附近的气体流场为始终具有与活塞相同速度的气体波后流场, 在活塞壁面引入初速度 u_{p0} ($u_{c0} < u_{p0} < D$) 的颗粒, 则颗粒可以认为在流场速度为活塞速度的流场中运动. 本文考虑两种典型流场: 恒定流场 ($a_c = 0$) 和匀加速流场 ($a_c = \text{const}$).

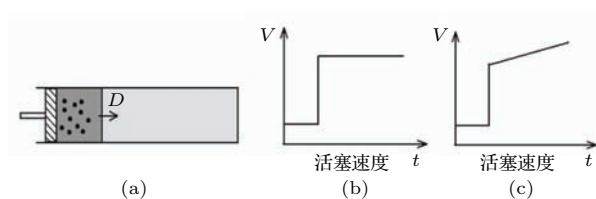


图1 活塞推气体简化模型

Fig. 1. Schematics of piston pushing gas.

对于微喷混合问题, $\rho_c/\rho_p \ll 1$, 求解颗粒运动方程, 推导并简化给出颗粒速度和位移的变化公式:

$$\frac{u_p - u_c}{u_{p,0} - u_{c,0}} = -\delta + (1 + \delta) e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (5)$$

$$\frac{x_p - x_c}{(u_{p,0} - u_{c,0}) \tau} = -\delta \left(\frac{t}{\tau} \right) + (1 + \delta) \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right), \quad (6)$$

$$\text{式中, } \delta = \frac{a_c \tau}{u_{p,0} - u_{c,0}}, \quad x_c = u_{c,0} t + \frac{1}{2} a_c t^2.$$

基于上述公式, 本文对恒定 ($a_c = 0$) 和匀加速 ($a_c = \text{const}$) 流场条件下颗粒的运动特性进行解析分析. 颗粒与活塞的相对速度和相对位置曲线如图 2 所示.

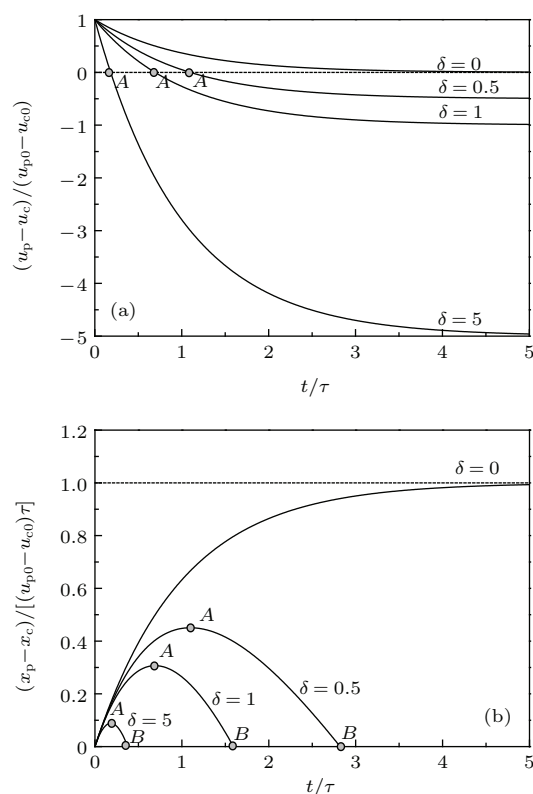


图2 颗粒与活塞相对速度和相对位置变化曲线 (a) 速度; (b) 位置

Fig. 2. Velocity and position of particle relative to piston: (a) Velocity; (b) position.

从图 2 可以看出, 在恒定流场 ($\delta = 0$) 条件下, 颗粒速度变化规律是以 e 指数形式衰减到流场速度; 颗粒与活塞间距离是 e 指数形式增加到恒定距离; 经过约 3 倍弛豫时间, 颗粒与气体接近速度平衡 (相对速度差 $< 5\%$). 在匀加速流场条件下, 颗粒先减速, 当与流场速度相同时, 在流场带动下再加速, 但始终滞后于流场速度; 颗粒与壁面距离先增大, 当颗粒速度衰减至与流场相同时, 与壁面距离

最大(如图中 A 点), 此后距离逐渐减小, 最终会被壁面追上(如图中 B 点).

弛豫时间 τ 是反映颗粒流场跟随性的重要特征量, 弛豫时间越短, 流场跟随性越好. 当取标准阻力曲线时, $f(Re) = 1 + Re^{2/3}/6$, 弛豫时间表达式为

$$\tau \approx \frac{(\rho \cdot d^{4/3})_p}{3(\mu \cdot \Delta u^2 \cdot \rho^2)_f^{1/3}}. \quad (7)$$

从(7)式可以看出, 在其他条件相同的情况下, 颗粒速度弛豫时间与直径的 $4/3$ 次方成正比, 颗粒尺度越小, 颗粒速度弛豫时间越短, 颗粒减速越快, 流场跟随性越好.

3 PDV 速度频谱分析方法

喷射混合实验中 PDV 速度频谱提供了飞层表面某一速度带内颗粒群丰富的速度信息. 如何从这些信息中获取对喷射混合物理规律研究有用的定量结果, 是我们所关心的问题. 本文基于上述颗粒运动特征的解析分析, 对 PDV 速度频谱进行了解读.

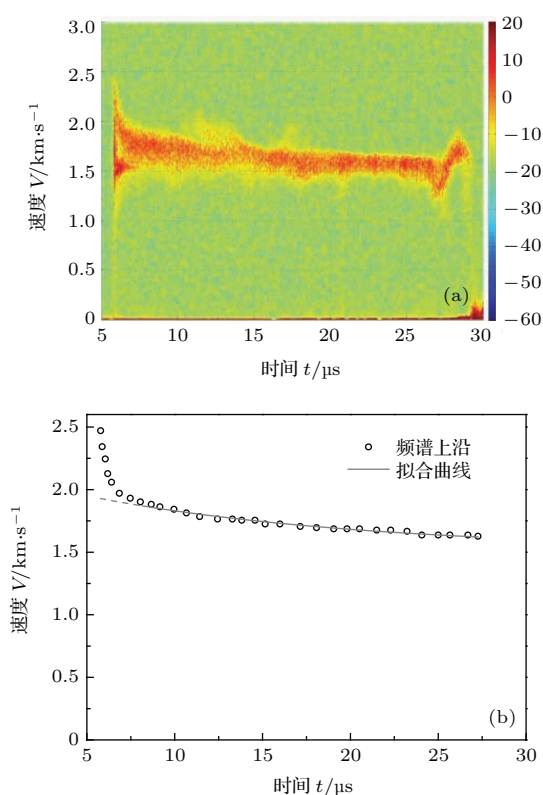


图3 (网刊彩色)(a) PDV 速度频谱^[13]; (b) 频谱上沿及其 e 指数拟合曲线

Fig. 3. (color online) (a) PDV spectrogram; (b) the upper part of spectrogram and the fitting curve.

图3(a)为冲击载荷下, 铅喷射颗粒与二氧化碳气体混合的 PDV 速度频谱^[13], 图3(b)为速度频谱上沿提取结果及其依据(5)式的 e 指数拟合曲线. 文献^[13]给出的铅飞层自由面速度约为 1.52 km/s , 飞层表面气体流场可近似为气体波后恒定流场, 因此, (5)式中 δ 取值为零, 流场速度近似为飞层自由面速度 $u_{c,0}$. 由于混合早期约 $1 \mu\text{s}$ 时间内频谱上沿衰减速率远高于后续结果, 本文将 $1 \mu\text{s}$ 后数据作为拟合数据的起点. 从拟合结果看, 速度频谱上沿较好地满足 e 指数衰减规律, 表明这种拟合方式是合理的; 拟合得到的颗粒初始速度 $u_{p,0}$ 和颗粒速度弛豫时间 τ 分别为 1.87 km/s 和 $15.45 \mu\text{s}$.

其他条件相同情况下, 颗粒速度弛豫时间与颗粒直径的 $4/3$ 次方成正比. 依据速度弛豫时间(7)式, 代入流场与颗粒状态, 可进一步推断给出颗粒尺度. 气体波后流场密度 ρ_f 约为 0.0128 g/cm^3 , 流场黏性 μ_f 约为 $6.6 \times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$, 铅颗粒密度为 11.34 g/cm^3 , 由此推断得到的颗粒尺度 d 约为 $3.1 \mu\text{m}$.

颗粒尺度 d 反映了混合区前沿大量颗粒的运动, 本文将之称为混合区前沿等效颗粒度. 从推断

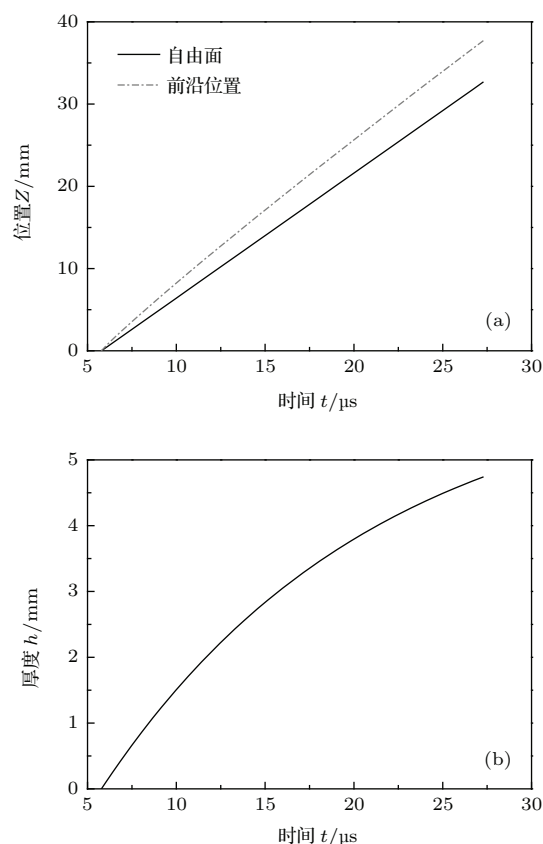


图4 混合区前沿位置及厚度随时间变化 (a) 位置; (b) 厚度

Fig. 4. Head position and thickness curves of mixing zone: (a) Position; (b) thickness.

结果看, 等效颗粒度明显小于真空条件下喷射颗粒尺度^[15], 表明气体环境下金属颗粒发生了破碎. 对应自由面速度为 1.52 km/s 的铅飞层冲击加载压力约为 27 GPa, 飞层表面发生了冲击卸载熔化, 喷射颗粒应为熔化金属液滴. 高速运动液滴在气动阻力作用下将发生破碎, 导致尺度明显变小, 因此, 本文推断结果是合理的.

PDV 速度频谱上沿表征的是各个时刻的最快粒子速度, 将其作时间积分, 可近似推断混合区前沿位置, 结合飞层自由面可近似给出混合区厚度, 如图 4 所示. 由图 4 可见, 混合区厚度在早期增加较快, 随时间持续增长速率变缓, 混合区厚度逐步趋于稳定厚度.

4 喷射混合实验中 PDV 频谱的解读分析

利用上述数据分析方法, 本文对不同喷射混合实验的 PDV 速度频谱进行解读, 获取一些典型状态下混合区前沿等效颗粒度和混合区厚度随时间

演化历程, 认识颗粒破碎后尺度对初始条件的依赖性.

4.1 不同冲击压力下 PDV 速度频谱分析

图 5 为不同冲击载荷下, 铅喷射颗粒与标准状态空气混合的 PDV 速度频谱^[13], 铅飞层自由面速度分别约为 2.95, 1.6 km/s, 对应冲击加载压力分别约为 76, 29 GPa, 铅飞层表面发生了熔化, 喷射颗粒为熔化状态的铅液滴.

图 6 给出了图 5 中 PDV 频谱上沿提取结果及其 e 指数拟合曲线, 拟合参数见表 1, 高低压加载下拟合得到的速度弛豫时间分别约为 4.84 和 11.21 μs . 根据速度弛豫时间公式, 代入气体波后流场状态 (高低压加载下气体波后密度分别约为 0.0096 和 0.0073 g/cm^3), 推断得到混合区前沿等效颗粒度分别约为 1.35 和 2.49 μm , 高冲击载荷下的颗粒尺度小于低冲击载荷下颗粒尺度. 这是因为, 冲击压力越高, 飞层自由面速度越大, 飞层表面附近气体波后流场密度越大, 颗粒越容易发生破碎, 且破碎后尺度更小.

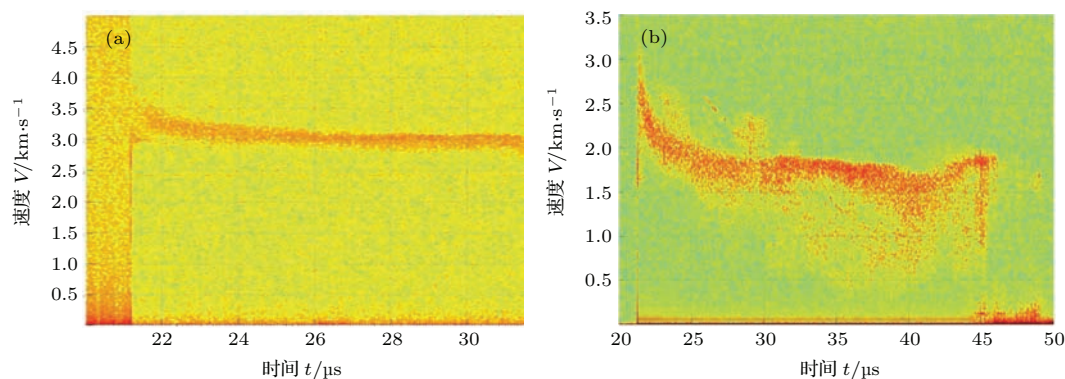


图 5 (网刊彩色) 铅颗粒与空气混合的 PDV 频谱^[13] (a) 76 GPa; (b) 29 GPa

Fig. 5. (color online) PDV spectrogram of lead particles in air: (a) 76 GPa; (b) 29 GPa.

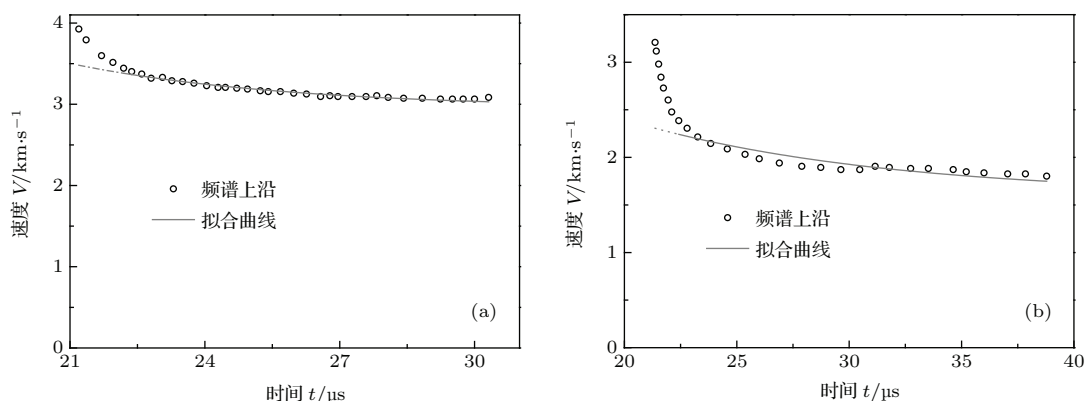


图 6 速度频谱上沿及其拟合曲线 (a) 76 GPa; (b) 29 GPa

Fig. 6. The upper part of spectrogram and the fitting curve: (a) 76 GPa; (b) 29 GPa.

表1 图6拟合参数
Table 1. Fitting parameters of Fig. 6.

	无量纲参数	起始时间	流场速度	颗粒速度	弛豫时间
	δ	$t_0/\mu\text{s}$	$u_{c0}/\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$	$u_{p0}/\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$	$\tau/\mu\text{s}$
76 GPa	0	22.2	2.95	3.38	4.84
29 GPa	0	22.42	1.6	2.24	11.21

图7给出了不同冲击载荷下混合区前沿位置及厚度随时间变化曲线. 从图7可见, 高冲击载荷下混合区厚度小于低冲击载荷, 这是因为高冲击载荷下颗粒破碎尺度小, 且气体波后流场密度高, 气体对颗粒阻滞作用更加明显.

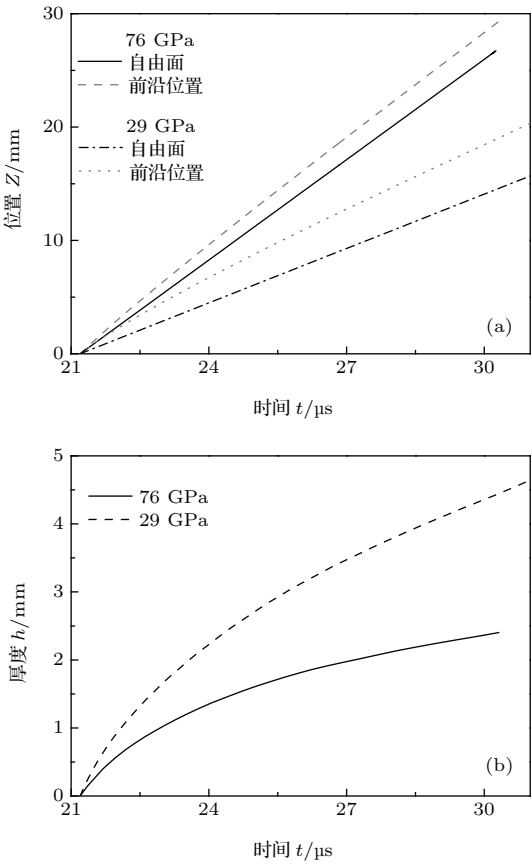


图7 混合区前沿位置及厚度随时间变化曲线 (a) 位置; (b) 厚度
Fig. 7. Head position and thickness of mixing zone: (a) Position; (b) thickness.

4.2 金粉颗粒与空气混合的PDV频谱分析

图8为平面冲击载荷下, 初始平均尺度 $9\text{ }\mu\text{m}$ 金粉与标准状态空气混合的PDV速度频谱^[12]及其频谱上沿e指数拟合曲线. 拟合数据起始时间为 $15.8\text{ }\mu\text{s}$, 拟合得到的颗粒速度约为 2.41 km/s ,

速度弛豫时间约为 $6.47\text{ }\mu\text{s}$. 飞层自由面速度约为 1.5 km/s , 气体波后密度约为 0.006 g/cm^3 , 黏性系数约为 $6.33\times 10^{-5}\text{ Pa}\cdot\text{s}$, 代入速度弛豫时间公式, 推断得到的混合区前沿等效颗粒度约为 $1.18\text{ }\mu\text{m}$. 等效颗粒尺度明显小于金粉颗粒初始尺度, 表明颗粒发生了破碎. 当标准状态空气受到 1.5 km/s 速度冲击时, 气体波后流场温度约为 2000 K , 而金熔点约为 1330 K , 当金粉颗粒在气体波后高温流场运动时, 由于气体与颗粒间的热量传递, 金粉将熔化为金液滴, 金液滴在气动阻力作用下将发生气动破碎现象.

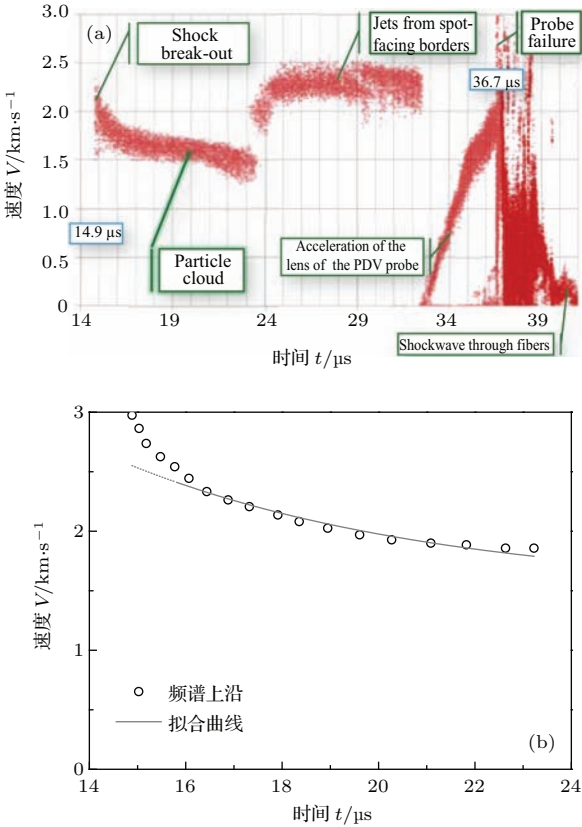


图8 (a) PDV速度频谱^[12]; (b) 频谱上沿及其e指数拟合曲线
Fig. 8. (a) PDV spectrogram; (b) the upper part of spectrogram and the fitting curve.

图9给出了频谱上沿时间积分近似得到的混合区前沿位置及厚度随时间演化历程.

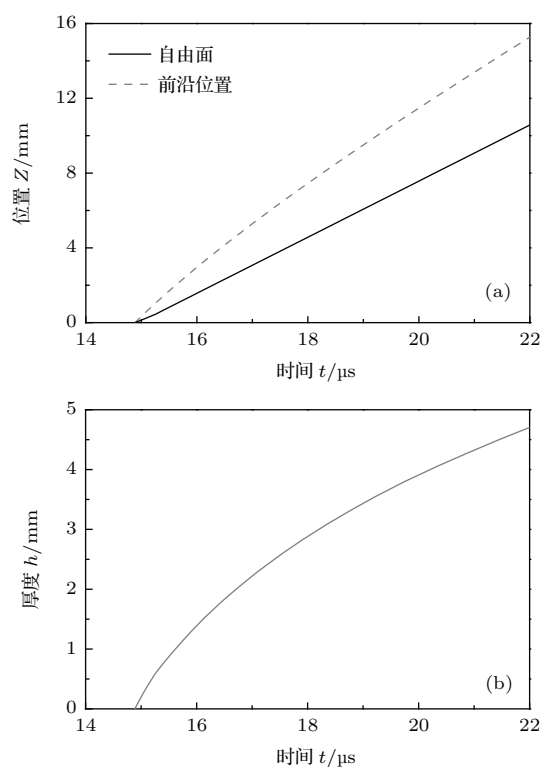


图9 混合区前沿位置及厚度随时间变化曲线 (a) 位置; (b) 厚度

Fig. 9. Head position and thickness of mixing zone: (a) Position; (b) thickness.

5 结 论

本文基于流场中颗粒运动特征的解析分析,提出了一种新的PDV速度频谱分析方法.通过对频谱数据的拟合处理,发现混合区前沿速度近似满足 e 指数衰减规律,结合速度弛豫时间公式可推断给出混合区前沿等效颗粒尺度;频谱数据上沿给出了各个时刻最快粒子速度,对其时间积分可近似给出混合区前沿位置,结合飞层自由面运动可获取混合区厚度随时间演化历程.应用频谱数据分析方法,对不同冲击压力、气体条件下金属喷射颗粒与界面气体混合的PDV速度频谱进行了解读,推算得到的混合区前沿等效颗粒尺度明显小于真空条件下喷射颗粒尺度,证实了气体环境下液态金属颗粒发生了气动破碎现象.

参考文献

[1] Ogorodnikov V A, Mikhailov A L, Burtsev V V, Lobastov S A, Erunov S V, Romanov A V, Rudnev A V, Ku-

lakov E V, Bazarov Y B, Glushikhin V V, Kalashnik I A, Tsyganov V A, Tkachenko B I 2009 *J. Exp. Theor. Phys.* **109** 530

[2] Oró D M, Hammerberg J M, Buttler W T, Mariam F G, Morris C, Rousculp C, Stone J B 2012 *AIP Conf. Proc.* **1426** 1351

[3] Fung J, Harrison A K, Chitanvis S, Margulies J 2013 *Comput. Fluids* **83** 177

[4] He A M, Wang P, Shao J L, Duan S Q 2014 *Chin. Phys. B* **23** 047102

[5] Wang P, Sun H Q, Shao J L, Qin C S, Li X Z 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 234703 (in Chinese) [王裴, 孙海权, 邵建立, 秦承森, 李欣竹 2012 物理学报 **61** 234703]

[6] Elias P, Chapron P, Mondot M 1989 *Shock Compression of Condensed Matter* Albuquerque, New Mexico, August 14–17, 1989 p783

[7] Buttler W T, Oró D M, Preston D L, Mikaelian K O, Cherne F J, Hixson R S, Mariam F G, Morris C, Stone J B, Terrones G, Tupa D 2012 *J. Fluid Mech.* **703** 60

[8] Prudhomme G, Mercier P, Berthe L, Bénier J, Frugier P A 2014 *J. Phys. Conf. Ser.* **500** 142022

[9] Buttler W T, Oró D M, Dimonte G, Morris C, Terrones G, Bainbridge J R, Hogan G E, Hollander B, Holtkamp D, Kwiatkowski K, Marr-Lyon M, Mariam F, Merrill F E, Nedrow P, Saunders A, Schwartz C L, Stone B, Tupa D, Vogan-Mcneil W S 2009 *Report LA-UR-10-00739*

[10] Zhao X W, Li X Z, Wang X J, Song P, Zhang H Z, Wu Q 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 124701 (in Chinese) [赵信文, 李欣竹, 王学军, 宋萍, 张汉钊, 吴强 2015 物理学报 **64** 124701]

[11] Mercier P, Bénier J, Frugier P A, Contencin G, Veaux J, Lauriot-Basseuil S, Debruyne M 2009 *Proc. SPIE* **7126** 7126O

[12] Prudhomme G, Mercier P, Berthe L 2014 *J. Phys. Conf. Ser.* **500** 142027

[13] Fedorov A V, Mikhailov A L, Finyushin S A, Nazarov D V, Chudakov E A, Kalashnikov D A, Butusov E I 2013 *Report "Study of lead behavior features at shock loading and further unloading", Biennial Intl. Conference of the APS Topical Group on Shock Compression of Condensed Mater-2013*

[14] Fang D Y 1988 *Two Phase Flow Mechanics* (Changsha: Science and Technology of National Defense Publisher) pp82–84 (in Chinese) [方丁酉 1988 两相流动力学 (长沙: 国防科技大学出版社) 第82—84页]

[15] Sorenson D S, Pazuchanics P, Johnson R P, Malone R M, Kaufman M I, Tibbitts A, Tunnell T, Marks D, Capelle G A, Grover M, Marshall B, Stevens G D, Turley W D, Lalone B 2014 *Report LA-UR-14-24722*

A new method to analyze the velocity spectrograms of photonic Doppler velocimetry*

Sun Hai-Quan¹⁾²⁾ Wang Pei^{1)2)†} Chen Da-Wei¹⁾ Ma Dong-Jun¹⁾

1) (Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100094, China)

2) (Laboratory of Computational Physics, Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100088, China)

(Received 14 December 2015; revised manuscript received 2 February 2016)

Abstract

Ejecta mixing takes place at the interface between metal and gas under shock loading, i.e., the transport process of ejecta from metal surface happens in gas. Ejecta production and transport processes in gas are the focuses and key problems of shock wave physics at present. So far, extensive investigations have been devoted mainly to the ejecta formation from metal surface under shock-loaded conditions, and many experimental measurement techniques have been developed, such as the Asay foil, high-speed camera and holography technique. As a newly developed instrument, photon Doppler velocimetry (PDV) which allows the simultaneous detection of velocities of multiple particles has been widely used in the dynamic impact areas, especially in micro-jetting and ejecta mixing experiments. Although PDV spectrogram includes abundant information about ejecta particles, it seems to be too hard to obtain the particle velocity history, which embarrasses the analysis and application of PDV spectrogram. In this paper, the equation of particle motion including the effects of aerodynamic damping force, pressure gradient force, and additional mass force is established, and the analytical solutions of the particle position and velocity are derived in the conditions of planar constant flow, constant flow, and constant acceleration flow. According to the analytical solutions, the characteristics of particle movement are analyzed. A simplified formulation of the relaxation time of the particle velocity, which reflects the particle decelerated speed, is given. And it is found that the relaxation time is proportional to the four-thirds power of particle diameter. Based on the characteristics of particle motion in the planar constant flow, a new method is proposed to analyze the spectrogram of PDV. The fastest velocity of particle in the mixing zone is obtained by extracting the upper part of PDV spectrogram. By integrating the fastest velocity, the time evolution of the head of mixing zone is deduced approximately. The thickness of the mixing zone can be obtained by subtracting the free surface position from the head of mixing zone. The relaxation time of particle velocity is inferred by the exponential fitting of the fastest velocity based on the motion equation of the particle in the planar constant flow. Furthermore, the equivalent diameter of the mixing zone head can also be obtained through the relaxation time. Based on the above methods, the spectrograms of various ejection mixing experiments under different shock-loaded conditions and gas environments are analyzed. The time evolutions of the mixing zone and equivalent diameter are presented, and the effects of shock loading strength and post-shock gas temperature on the mixing zone are analyzed. It is found that the deduced equivalent diameter in gas is smaller than that in vacuum, validating the pneumatic breakup of liquid metal particles in gas.

Keywords: ejection mixing, photonic Doppler velocimetry, velocity spectrogram, equivalent diameter

PACS: 47.40.-x, 47.54.De, 47.55.Ca, 47.61.Jd

DOI: 10.7498/aps.65.104702

* Project supported by the Science and Technology Development Foundation of China Academy of Engineering Physics (Grant Nos. 2015B0101021, 2015B0201043), the Foundation of State Key Laboratory of Computational Physics, China (Grant No. 9140C690103150C69302), and the National Natural Science Foundation of China (Grant No. U1530261).

† Corresponding author. E-mail: wangpei@iapcm.ac.cn