

DOI: 10.11883/bzycj-2023-0089

一种适用于复杂加载状态下微喷射物质 面密度测量的 Asay 膜方法*

王维荣, 陈书杨, 王学军, 赵信文, 黄世璋, 李欣竹, 吴强

(中国工程物理研究院流体物理研究所冲击波物理与爆炸物理全国重点实验室, 四川 绵阳 621999)

摘要: 为了解决传统 Asay 膜方法不适用于复杂加卸载条件下微喷射物质面密度测量的问题, 采用光子多普勒速度计 (photonic Doppler velocimetry, PDV) 测量微喷射物质速度结合传统 Asay 膜方法的膜速曲线发展了测试复杂加载条件下微喷射面密度的新方法。采用数值实验和轻气炮实验对新方法进行了分析和评估。针对 3 种典型微喷射物质速度分布情况, 利用数值实验分析评估了实际应用场景下因 PDV 给出的微喷射物速度偏离理论值对面密度测量的影响, 通过对 PDV 给出的微喷射物速度线性插值处理, 可确保新方法与传统方法测量偏差小于 20%。通过轻气炮加载预置粉末样品实验对比评估了新方法和传统方法的测量效果, 采用 2 种方法分别处理同一发实验数据, 结果显示, 新方法相较于传统 Asay 膜方法的测量偏差小于 20%。

关键词: 微喷射; Asay 膜; 光子多普勒速度计; 面密度

中图分类号: O384

国标学科代码: 1303530

文献标志码: A

An improved Asay foil method for measuring areal density of ejecta under complex loading conditions

WANG Weirong, CHEN Shuyang, WANG Xuejun, ZHAO Xinwen, HUANG Shizhang, LI Xinzhu, WU Qiang

(National Key Laboratory for Shock Wave and Detonation Physics, Institute of Fluid Physics,

China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, Sichuan, China)

Abstract: The Asay foil has been a widely applied diagnostic in ejecta measurement since its design was first reported in 1976. An Asay foil is a foil of a known mass (or areal density), whose velocity changed when it is impacted by ejecta. The foil velocity is measured using velocimetry and the ejecta velocity is inferred from the initial gap between foil and free surface and the ejecta fly time. The mass of the impacting ejecta can then be inferred from the change in momentum of the foil. In some cases, the ejecta spray out from complex loading conditions such as double shock loading condition, the initial gap and fly time are unable to measure accurately, thus the Asay foil method doesn't work. Therefore, it is necessary to develop an Asay foil method that does not depend on the initial gap and fly time. An improved Asay foil method is then developed based on the traditional Asay foil method. This method uses photonic Doppler velocimetry (PDV) to obtain the ejecta velocity in the testing area of the Asay foil probe, and the Asay foil probe obtains the foil velocity curve after the ejecta collides with the foil. Based on spatial position constraints and precise temporal correlation, the combination of the two velocity curve results can provide the total amount and distribution of ejecta under complex loading conditions. A numerical experimental method was used to generate ejecta particle groups with different distribution states, as well as the PDV velocity curve and Asay foil velocity curve to analyze the applicability of the method. In addition, the numerical experimental analysis results were verified using light gas gun experiments. The numerical experimental analysis results show that this method has good applicability in three typical

* 收稿日期: 2023-03-12; 修回日期: 2024-01-19

第一作者: 王维荣(1988—), 男, 博士, 副研究员, wvr1988@caep.cn

通信作者: 黄世璋(1989—), 男, 博士, 助理研究员, sz_huang@foxmail.com

ejecta distribution cases, with a deviation of less than 20% between the measured value and the theoretical value. The results of the light gas gun tests indicate that the deviation between the improved method and the traditional Asay foil method is less than 20%.

Keywords: ejecta; Asay foil; photonic Doppler velocimetry; areal density

当材料表面机械加工等微缺陷经历冲击波作用后,会产生速度显著高于自由面的微米级颗粒,这就是所谓的微喷射现象^[1]。微喷射物质的质量、速度、空间分布会受到样品表面粗糙度、冲击波强度和加卸载历程、充气条件等一系列因素的影响^[2-6],定量给出微喷射物质分布与影响因素之间的关系是研究微喷射形成机理的重要途径。基于动量守恒原理的 Asay 膜方法^[7-8]在研究微喷射物质方面取得了巨大成功,被广泛应用,并被不断改进^[9-10],相继出现了测量更高密度的 Asay 窗^[8,11-12]和尺寸更小的 Asay 膜^[10]。

传统 Asay 膜方法测量微喷射物质的原理如图 1 所示,高速飞片撞击样品后在样品自由面产生微喷射,放置与样品自由面有确定间距的薄膜 (Asay 膜) 用于收集样品自由面的微喷射物质,微喷射物质与薄膜碰撞后发生动量传递,并一起运动。采用光子多普勒速度计 (photonic Doppler velocimetry, PDV) 精确测量薄膜的运动过程,并按照如下 4 个基本假设,可获得微喷射物质的速度和质量分布。(1) 瞬时喷射假设:当冲击波在自由面卸载时,全部微喷射物质是在足够短时间内产生的,即可近似认为微喷射是瞬时的,由此通过薄膜与样品自由面的距离及微喷射物质穿过该距离的时间,可计算碰撞到薄膜上的微喷射物质的速度。(2) 微喷射物质分布均匀假设:即平板运动可以采用一维运动处理。(3) 完全非弹性碰撞假设:微喷射物质与薄膜碰撞后无反向溅射。(4) 薄膜刚体运动假设:即不考虑冲击波在薄膜中的传播。

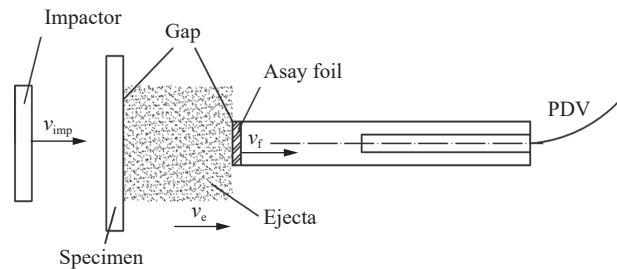


图 1 Asay 膜法微喷射测量原理

Fig. 1 The principle of the traditional Asay foil ejecta diagnostic

基于上述假设,可计算不同时刻到达薄膜的微喷射粒子群的速度 v_e ^[9]:

$$v_e = \left(d_0 + \int_0^t v_f dt \right) / t \tag{1}$$

式中: d_0 为薄膜到样品的初始距离, t 的时间零点为冲击波从自由面卸载的时刻, v_f 为薄膜的运动速度。

再利用动量守恒,可计算任意时刻到达薄膜的微喷射物质的质量 m_e :

$$m_e = \frac{m_f \int_0^{v_f} t dv_f}{d_0 - \int_0^{v_f} t dv_f} \tag{2}$$

式中: m_f 为薄膜的质量。对各个时刻的 m_e 积分,则得到作用于薄膜上的微喷射物质总量分布。前述各质量都为单位面积质量,即面密度。

随着对微喷射理论认识的深入,复杂加卸载条件下的微喷射现象被广泛关注,特别是样品经历连续 2 次冲击加载后的微喷射物质是目前较活跃的研究方向^[4,13-14]。在样品经历 2 次加载的情况下,自由面及微喷射物质的速度随时间变化的典型状态如图 2 所示,首次加载后微喷射物质的分布和 Asay 膜常用场景是一致的。但是经历第 2 次加载后,首次加载后微喷射粒子群速度 v_{e1} 和二次加载后微喷射粒子群速度 v_{e2} 的值存在跳变,

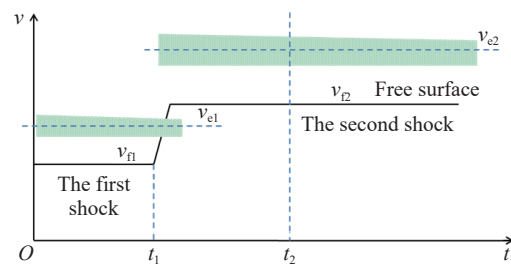


图 2 典型二次加载微喷射速度示意图

Fig. 2 Schematic of ejecta velocity under double shock loading

不再满足瞬时喷射假设和匀速运动假设, 利用空腔距离和作用时间不能准确给出二次加载后某时刻微喷射颗粒速度, 即式 (1) 不成立, 传统方法失效。因此, 针对复杂加载微喷射物质测量, 需要对 Asay 膜方法进行改进。

为了解决前述复杂加载条件下传统 Asay 膜方法应用失效的问题, 本文中, 提出基于 Asay 膜探头相同位置 PDV 测速信号^[15] 给出微喷物速度分布信息的改进 Asay 膜方法(以下简称新方法), 针对 PDV 探头对微喷物质穿透深度有限、微喷物速度上下限提取存在偏差等实际应用中的问题, 采用数值实验对新方法的测量偏差及原因进行分析, 通过轻气炮实验对新方法与传统 Asay 膜方法的测量效果进行对比评估。

1 基本方法

1.1 基于 PDV 测速的 Asay 膜数据处理

如图 3 所示, t_0 时刻微喷射物质开始作用在 Asay 膜上, 此时自由面与 Asay 膜的距离用 l 表示, h 为膜的厚度, \bar{v}_e 为某时刻微喷物质的平均速度; t 为微喷物质作用于膜上的任意时刻, 其中 s_e 为微喷射物质稠密主体区的运动距离, l' 为未作用于膜上的微喷物质的厚度, d 为作用于膜上的微喷物质压缩后的厚度, s_f 为膜的运动距离, v_f 为膜的运动速度。

在 t 时刻, 假设有 n 个颗粒作用于 Asay 膜上, 且质点间完全非弹性碰撞, 根据动量守恒, 微喷物质的速度和质量满足:

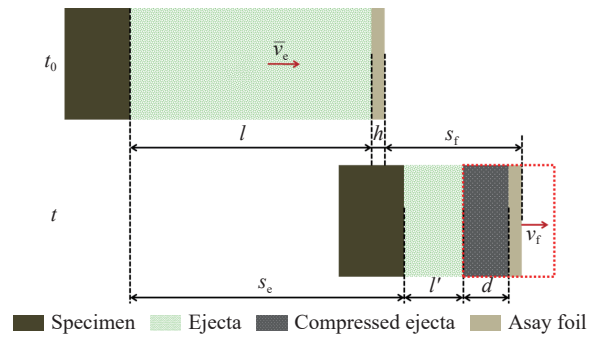


图 3 微喷物质与 Asay 膜作用过程示意图

Fig. 3 Schematic of ejecta impacting the Asay foil

$$\begin{cases} (m_e + m_f)v_f = \sum_{i=1}^n (m_{ei}v_{ei}) \\ m_e = \sum_{i=1}^n m_{ei} \end{cases} \quad (3)$$

测试过程中不可能追踪每个颗粒的速度和质量, 假设 t 时刻微喷射粒子群的速度 v_e 和质量 m_e 满足:

$$\sum_{i=1}^n (m_{ei}v_{ei}) = m_e v_e \quad (4)$$

在单颗粒速度一致的情况下, 式 (4) 严格成立。结合式 (3)~(4) 以及图 3 所示的运动关系:

$$\Delta l = l - l' = s_e + d - s_f \quad (5)$$

并假设作用在 Asay 膜上的微喷射物质被压实, 可以给出微喷物质的总量及分布满足关系:

$$\begin{cases} m_e = \frac{m_f v_f}{v_e - v_f} \\ \Delta l = v_e(t - t_0) + \frac{1}{\rho_0} \frac{m_f v_f}{v_e - v_f} - \int_0^t v_f dt \end{cases} \quad (6)$$

在实际测量过程中, m_f 、 v_f 和 v_e 都可以通过相应测试方法给出, Δl 无需初始空腔距离 l 即可求得, 因此通过式 (6) 便可以获得微喷物质的总量及分布。

1.2 Asay 膜数值实验

为评估上述方法的数据处理不确定度, 基于完全非弹性碰撞及瞬时喷射假定推导了 Asay 膜响应模型, 如图 4 所示。为简化推导过程, 假定单颗粒质量 m_p 相同(可证明颗粒质量有分布, 但不影响结果), 忽

略碰撞产生的动量矩。令喷射产生后 t_0 时刻第 1 个颗粒碰膜, 可获得如下的颗粒速度分布和膜速度的控制方程组分别为:

$$m_p v_{p,i} = (m_p + m_f) v_{f,i}, \quad t_{f,i} = 0, \quad s_{f,i} = 0 \quad i = 1 \quad (7)$$

$$\begin{cases} v_{f,i} = \{ [(i-1)m_p + m_f] v_{f,i-1} + m_p v_{p,i} \} / (im_p + m_f) \\ dt_i = (t_0 + t_{i-1})(v_{p,i-1} - v_{p,i}) / (v_{p,i} - v_{f,i-1}) \\ t_{f,i} = t_{f,i-1} + dt_i \\ s_{f,i} = v_{f,i-1} dt_i + s_{f,i-1} \end{cases} \quad i = 2, 3, \dots, N \quad (8)$$

式中: $v_{p,i}$ 为第 i 个颗粒的速度, $v_{f,i}$ 为第 i 个颗粒碰膜后的膜速, $t_{f,i}$ 为第 i 个颗粒碰膜的时间, $s_{f,i}$ 为第 i 个颗粒碰膜后膜的运动距离。

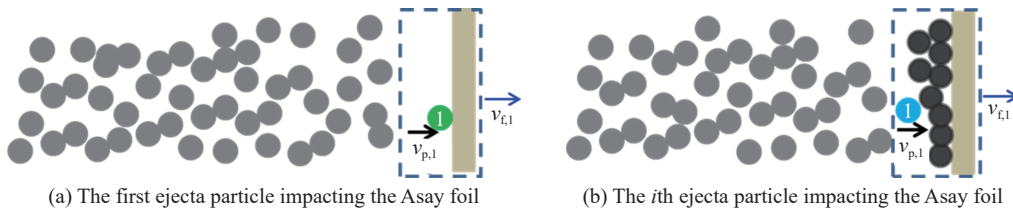


图 4 微喷颗粒冲击 Asay 膜响应示意图

Fig. 4 Schematics of ejecta particles impacting the Asay foil

通过生成有随机速度分布的颗粒群, 基于每个颗粒都符合匀速运动的假设, 则可以获得 t_0 时刻颗粒空间速度位置分布。将其代入式 (4), 则可以获得 v_f-t 曲线, v_e-t , 即 Asay 膜数值实验数据。

1.3 基于气体炮飞片加载对比实验

为验证上述新 Asay 膜方法在实际应用中的效果, 设计了对比实验, 如图 5 所示, 气体炮发射搭载飞片的弹丸, 撞击样品产生微喷射。相较于传统的 Asay 膜方法, 新方法增加了直接测量微喷物速度的 PDV 探头。由此可以获得的实验数据包括 Asay 膜测速结果和 PDV 测微喷射速度结果, 结合样品与 Asay 膜探头的初始距离及 Asay 膜的面密度, 即可分别采用传统 Asay 膜方法和本文中提出的新 Asay 膜方法对微喷物的面密度进行分析, 对比评估新方法的测量效果。

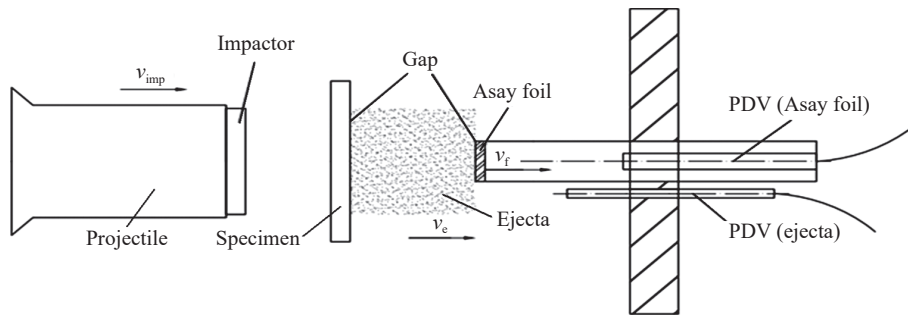


图 5 基于 PDV 测速的 Asay 膜实验示意图

Fig. 5 Schematic of the improved Asay foil experiment based on PDV velocity measurement

2 结果与讨论

2.1 数值实验

采用 Matlab 随机函数, 生成了 3 种具有典型特征的颗粒群速度分布, 颗粒群运动(速度方向为水平向右) t_0 时间后, 其分布如图 6 所示, 其中指数分布(exponential distribution, ED)和反指数分布(anti-exponential distribution, AED)都是利用 Matlab 的指数分布随机函数生成的, 线性分布(linear distribution, LD)则是利用 Matlab 的均匀分布随机函数生成的。ED 分布中颗粒主要集中在低速区, 使用的生成函数

为: $v_{p,i}=2350+\text{random}(\text{'exp'}, 2400, 1, N)/50$; 而 AED 分布中颗粒集中在高速区, 使用的生成函数为: $v_{p,i}=2650+\text{random}(\text{'exp'}, 2400, 1, N)/50$ 。LD 分布中每种速度的颗粒数量基本一致, 使用的生成函数为: $v_{p,i}=2350+300\times\text{rand}(N, 1)$ 。以上生成函数中‘exp’为生成方法, N 为颗粒总数, 在生成过程中 $N=10\ 000$, 总面密度为 $100\ \text{mg}/\text{cm}^2$, 单颗粒等效面密度为 $0.01\ \text{mg}/\text{cm}^2$ 。本文中讨论的碰膜时刻喷射粒子速度分布满足高速粒子在前、低速粒子在后这一基本特征, 忽略了在复杂加载后较短时间内粒子速度分布不满足该特征的特殊情形, 而常见应用场景中都是在距离复杂加载较长时间后进行测量的, 因此本文中暂不对这一特殊情形进行讨论。

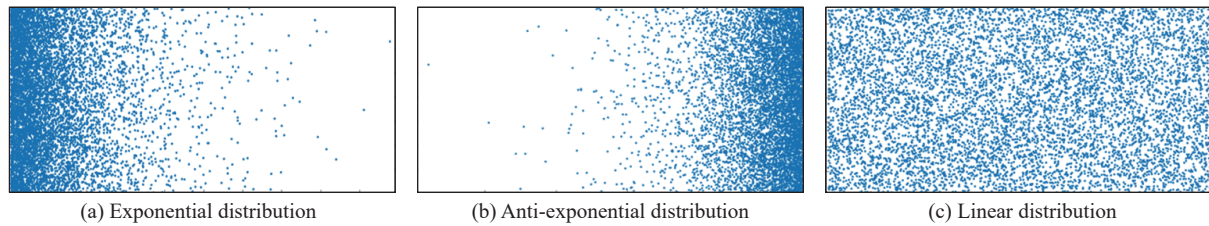


图 6 数值实验获得的微喷射分布

Fig. 6 Ejecta particles distributions obtained from numerical experiments

当设定膜的面密度为 $160\ \text{mg}/\text{cm}^2$ 时, 利用控制方程 (8) 获得的膜速曲线 v_f-t 如图 7(a) 所示。图 7(b)~(c) 则分别展示了理论 v_e-t 、 M_e-t 曲线, M_e 代表各个时刻作用于膜上的微喷物累积面密度。

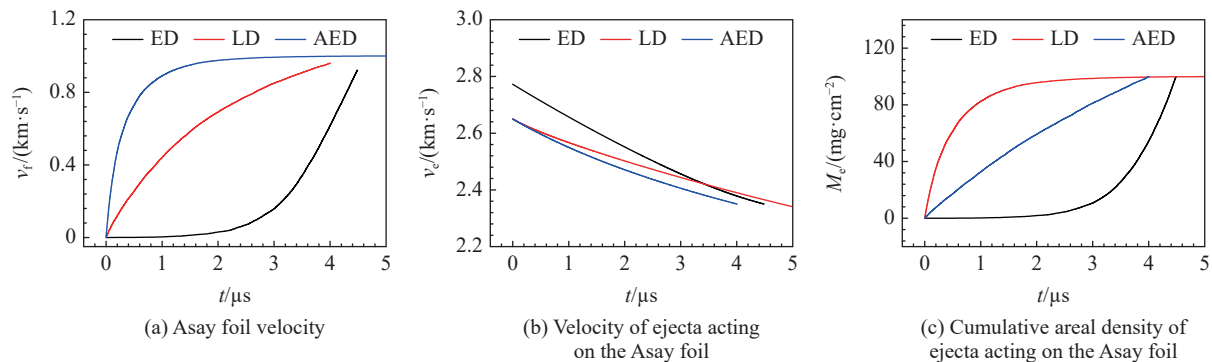


图 7 数值实验数据

Fig. 7 Numerical experiment data

精确反演面密度分布时, 准确的 v_f-t 曲线和 v_e-t 曲线缺一不可, 而在实际复杂加载实验条件下, 几乎不可能获得精确的 v_e-t 曲线。以下将讨论使用近似 v_e-t 曲线的处理方法。

(1) 定值法: 在实验测量中, 直接测量微喷物速度的 PDV 探头至少可以给出微喷物速度分布中的某个速度值 \bar{v}_e , 使用 \bar{v}_e-t 进行数据处理。

(2) 线性插值法: 假定已知速度上限(t_1, v_{e1})和下限(t_2, v_{e2}), 利用两点线性插值给出 v_e-t 曲线。

分别采用 v_e 取定值(2350、2450、2550、2650 m/s)及取速度上限($t_1, 2650\ \text{m/s}$)和下限($t_2, 2350\ \text{m/s}$), 结合 3 种分布下的 t_1, t_2 值, 线性插值给出 v_e-t 曲线。利用式 (6) 对数值实验数据处理分析结果的 M_e-t 曲线及数据处理获得的面密度值 M_e 与理论值 M_{e_t} 的相对偏差如图 8~10 所示, 其中 M_{e_t} 通过累积数值实验中每一时刻碰膜的粒子质量精确给出。

Asay 膜方法常用于较大面密度($10\ \text{mg}/\text{cm}^2$ 以上)微喷物质定量测量, 以下将针对实际使用测量范围对新方法的测量误差进行评估分析。

当微喷颗粒呈指数分布时, 除 v_e 取值为 $2650\ \text{m/s}$ 时最大偏差达到 15% 外, 其余 3 种取值情况下在 $5\sim 100\ \text{mg}/\text{cm}^2$ 面密度范围内的偏差都小于 10%; 当微喷颗粒呈反指数分布时, 当 v_e 取值为 2350 和 $2450\ \text{m/s}$ 时, 偏差大于 10.0%, 分别为 18.5% 和 11%, 其余 2 种取值时在 $5\sim 100\ \text{mg}/\text{cm}^2$ 面密度范围内的偏差都小

于 10%; 当微喷颗粒呈线性分布时, 除 v_e 取值为 2350 m/s 时最大偏差达到 14% 外, 其余 3 种取值情况下在 5~100 mg/cm² 面密度范围内的偏差都小于 10%。

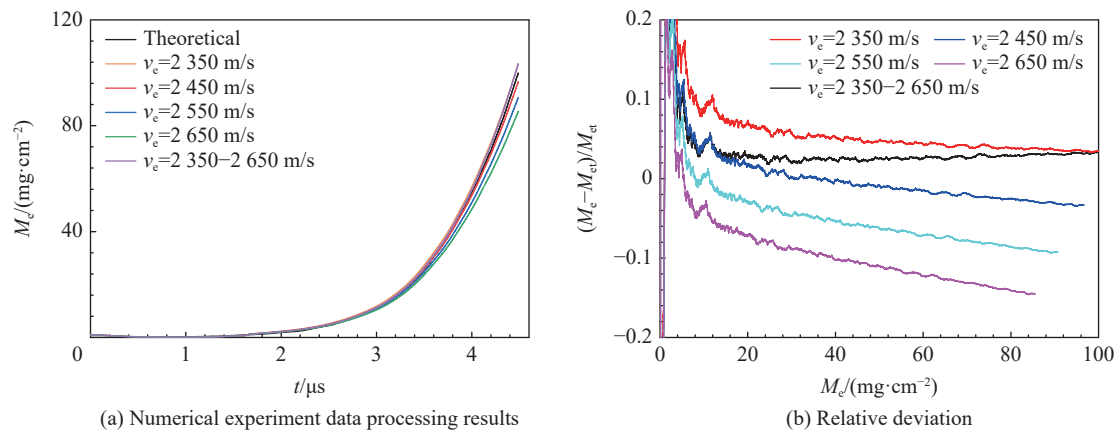


图 8 指数分布条件下 Asay 膜数值实验数据处理结果及相对偏差分析

Fig. 8 Numerical experiment data processing results and deviation analysis using the new Asay foil method for exponential distribution of ejecta

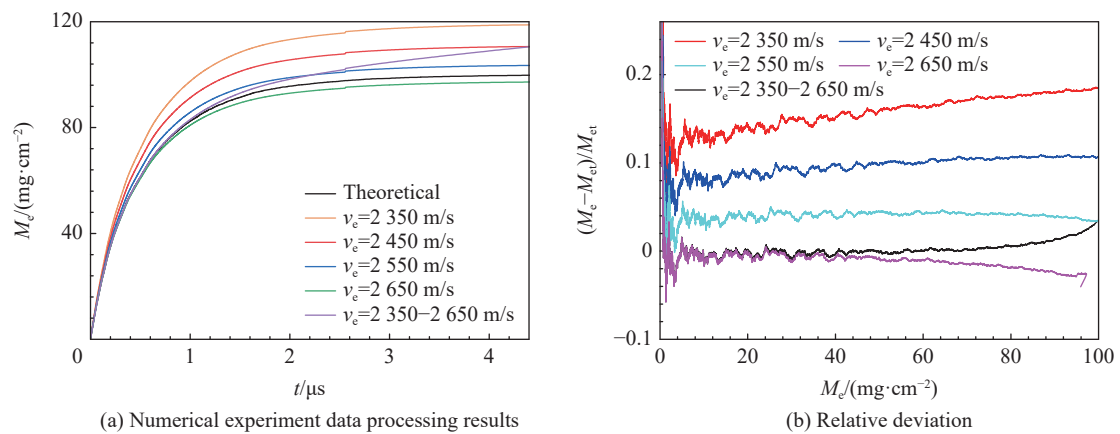


图 9 反指数分布条件下 Asay 膜数值实验数据处理结果及相对偏差分析

Fig. 9 Numerical experiment data processing results and deviation analysis using the new Asay foil method for anti-exponential distribution of ejecta

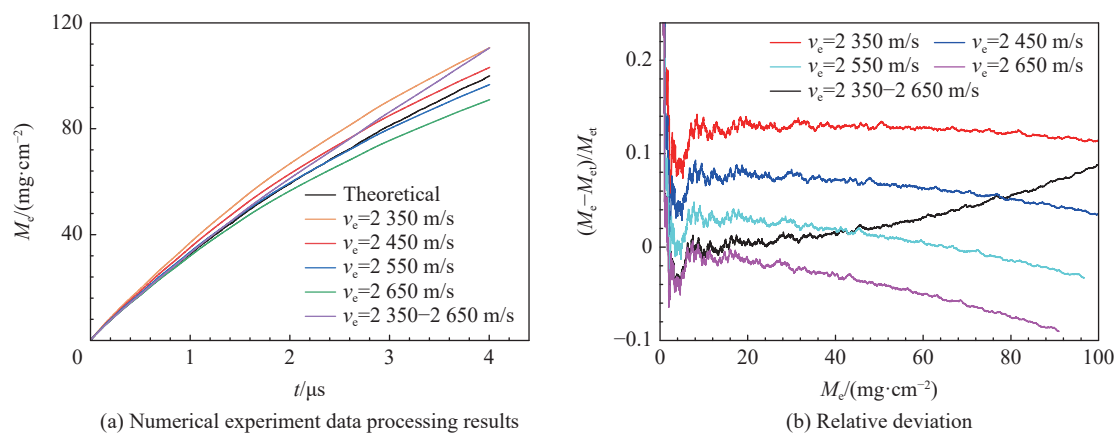


图 10 线性分布条件下 Asay 膜数值实验数据处理结果及偏差分析

Fig. 10 Numerical experiment data processing results and deviation analysis using the new Asay foil method for linear distribution of ejecta

使用线性插值方法对 3 种微喷物质分布的数值实验结果进行分析都能取得较好的效果,即在 $5\sim 70\text{ mg/cm}^2$ 面密度范围内的偏差不超过 5%, 在 $5\sim 100\text{ mg/cm}^2$ 面密度范围内的偏差不超过 10%。

由上述分析可见, 在可以给出微喷物质速度分布的上限和下限的情况下, 无论微喷物质分布如何, 采用 PDV 测速结合 Asay 膜速度进行分析, 可以获得较高精度的微喷物质分布和累积面密度结果。然而, 实验条件下, PDV 测速探头可以给出微喷物质速度上限 (t_1, v_{e1}), 但由于 PDV 测速探头使用的激光对微喷物穿透深度存在极限, 通常无法给出真实的速度下限。

针对 PDV 信号无法给出微喷物质速度下限的情况, 可以先根据定值法给出初步的 M_e-t 分布曲线, 然后根据 PDV 探头穿透深度在 M_e-t 曲线上给出极限穿透面密度 $M_{e,1}$ 时的 t_2 , 并取此时 PDV 测速信号对应的速度下限为 v_{e2} 。根据 PDV 测速探针使用的 1550 nm 激光在典型微喷射物质中穿透深度约 20 mg/cm^2 , 取 $M_{e,1}$ 为 $10, 20$ 和 40 mg/cm^2 , 利用数值实验结果对考虑实验条件下的 PDV 探头穿透深度进行测量偏差分析, 分析使用的 (t_1, v_{e1})、(t_2, v_{e2}) 如表 1 所示。

表 1 不同数值实验条件下的数据处理参数

Table 1 Data processing parameters under different numerical experiment conditions

面密度 分布情况	$t_1/\mu\text{s}$	$t_2/\mu\text{s}$			$v_{e1}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$v_{e2}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$		
		$M_{e,1}=10\text{ mg/cm}^2$	$M_{e,1}=20\text{ mg/cm}^2$	$M_{e,1}=40\text{ mg/cm}^2$		$M_{e,1}=10\text{ mg/cm}^2$	$M_{e,1}=20\text{ mg/cm}^2$	$M_{e,1}=40\text{ mg/cm}^2$
指数	0	2.950	3.355	3.785	2772.70	2460.83	2426.11	2393.23
反指数	0	0.046	0.101	0.240	2649.99	2644.86	2639.21	2625.85
线性	0	0.268	0.587	1.251	2649.99	2620.40	2588.02	2528.43

图 11 给出了假定 PDV 探头穿透深度分别为 $10, 20, 40\text{ mg/cm}^2$ 时数据分析结果与理论值的偏差, 3 种微喷射物质分布情况下, 随着穿透深度的增大, 数据分析结果与理论值的偏差都呈现出减小趋势, 且数据分析结果较理论值都偏大; 经分析, 如图 7(b) 所示, v_e-t 曲线是下凹曲线, 采用曲线靠前部分的两点进行线性插值后, 用于计算碰膜微喷射质量的 v_e 将被低估, 且低估值越来越大, 由式 (6) 可知, v_e 偏小将导致 m_e 偏大。

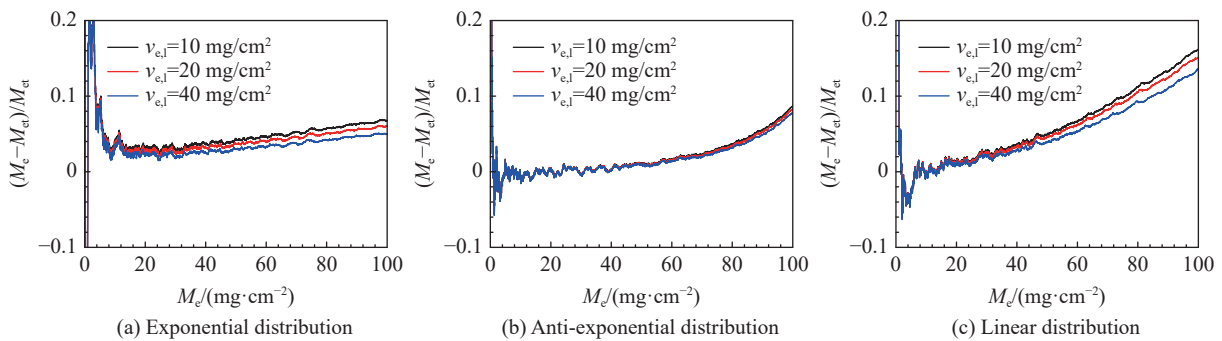


图 11 模拟实际测试条件 Asay 膜数值实验结果与理论偏差分析

Fig. 11 Analysis of numerical experimental results and theoretical deviation of Asay foil under simulated actual test conditions

当微喷物质分布集中靠近 Asay 膜方向 (ED) 或样品方向 (AED) 时, 采用线性插值法数据处理的面密度结果在 $5\sim 100\text{ mg/cm}^2$ 范围内与理论值偏差小于 10%; 而当微喷射物质为均匀分布 (LD) 时, 采用线性插值方法数据处理的面密度结果在 $5\sim 100\text{ mg/cm}^2$ 范围内的与理论偏差小于 20%。针对 LD 分布时偏差较其余 2 种分布大的现象进一步分析, 通过图 7(b) 可知, 处于插值点附近区域的 v_e 与理论值差较小, 而越远离插值区域偏差越大, ED 和 AED 分布中主要微喷射物质与插值区域更靠近, 而 LD 分布中各个区域微喷物都一样, 因此, 新的 Asay 膜方法对均匀分布的微喷射累积面密度测量误差较大。

2.2 轻气炮实验

2.1 节中通过数值实验分析了新 Asay 膜方法进行微喷物面密度测量的偏差及其原因, 为检验新方法在实验中的应用效果, 利用轻气炮开展了验证实验。采用飞片冲击表面预置微米粉末样品开展实验, 如图 5 所示, 飞片为尺寸 $\varnothing 13.2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ 的 304 不锈钢, 飞片速度为 1923.1 m/s, 样品为 $\varnothing 20 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ 不锈钢片表面均匀预置粒径分布为 $3 \sim 6 \mu\text{m}$ 的球形锡颗粒, 粉末初始实测面密度约 44 mg/cm^2 。PDV 探头中心和 Asay 膜探头中心位于同一圆周上。测得的 Asay 膜速度及相应的 PDV 测速数据如图 12 所示。

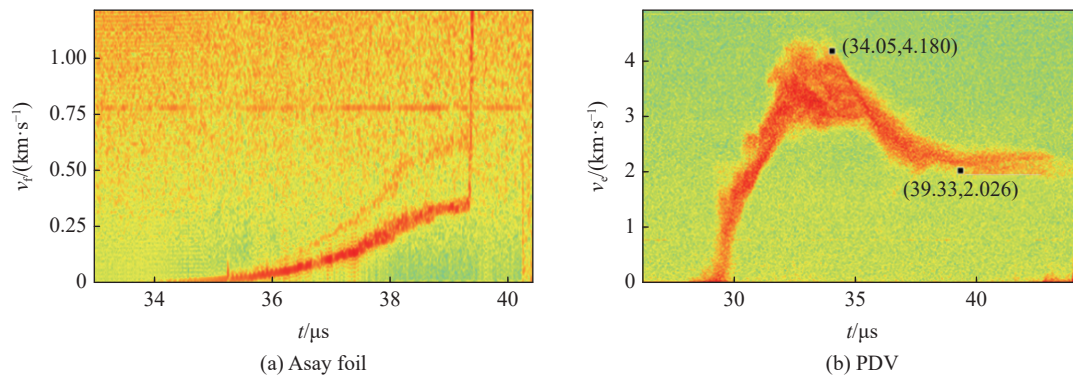


图 12 实验 Asay 膜测速频谱信号和 PDV 测速频谱信号

Fig. 12 Asay foil velocity spectrum signal and PDV velocity spectrum signal in experiment

结合测试结果及已知的初始条件, 分别利用传统的空腔法(传统 Asay 膜法)和本文中提出的新方法(新 Asay 膜法)对实验数据进行了处理, 相应的处理参数如表 2 所示。其中新方法中速度上限 (t_1, v_{e1}) 和 下限 (t_2, v_{e2}) 的选取分别为: 膜有速度响应时刻为 t_1 , 膜速陡升时刻为 t_2 , t_1 时刻对应的频谱速度上限为 v_{e1} , t_2 时刻对应的速度频谱下限为 v_{e2} 。

表 2 两种 Asay 膜数据处理方法使用的参数

Table 2 Parameters used in two different Asay foil data processing methods

方法	l/mm	$t_0/\mu\text{s}$	$m_f/(\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2})$	$t_1/\mu\text{s}$	$t_2/\mu\text{s}$	$v_{e1}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$v_{e2}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$
传统 Asay 膜法	19.5	28.33	156				
新 Asay 膜法 1			156	34.05	39.33	4180	2026
新 Asay 膜法 2			156	34.05	39.33	4380	1826
新 Asay 膜法 3			156	34.05	39.33	3980	2226

表 2 中新方法选取了 3 组数据, 其中新 Asay 膜法 1 是按图 12(b) 中 PDV 频谱对应的 t_1, t_2 时刻分别提取速度上限和下限。考虑到在频谱上提取速度时引入的误差, 新 Asay 膜法 2 和新 Asay 膜法 3 中考虑了 2 种极端情况, 即频谱数据提取速度上下限存在 $\pm 200 \text{ m/s}$ 的误差。图 13(a) 对比了分别采用传统 Asay 膜方法和本文中提出的新 Asay 膜方法的数据处理结果, 在考虑 PDV 频谱速度上下限误差的情况下, 2 种方法给出的微喷物质分布及累积面密度有较好的一致性。需特别说明的是, Asay 膜方法测得的面密度比预置粉末的面密度小的主要原因是粉末未完全从 304 钢样品表面脱落。图 13(b) 分析了 2 种方法的测量结果的相对偏差, 采用新方法测得的累积面密度在初始阶段较传统方法测得的小, 但随着累积面密度的增大, 新 Asay 膜方法与传统 Asay 膜方法的差异逐渐减小, 并且新 Asay 膜法 1 和新 Asay 膜法 2 得到的累积面密度较传统方法的大。综合来看, 在累积面密度大于 5 mg/cm^2 的情况下, 在考虑 PDV 穿透深度、微喷物速度上下限提取偏差等因素后, 使用新 Asay 膜方法得到的面密度空间分布和累积面密度相对传统方法的偏差都小于 20%。

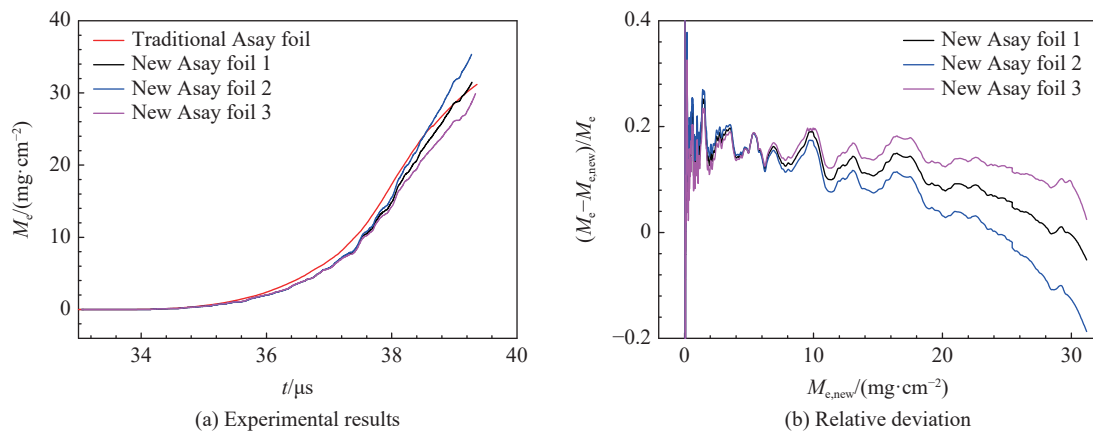


图 13 两种 Asay 膜数据处理方法实验结果及相对偏差

Fig. 13 Comparison of experimental results and relative deviation of two Asay foil data processing methods

3 结 论

针对复杂加载条件下微喷射物质测量这一具体问题,分析了传统 Asay 膜方法存在的不足,特别是在某些多次加载条件下无法给出传统 Asay 膜数据处理方法所必需的初始空腔距离及自由面起跳时间等参数,提出了基于 PDV 测速结合 Asay 膜测速结果进行微喷射物质质量分布分析的新方法。采用传统方法和新方法对数值实验及气炮加载实验数据进行对比分析,验证了新方法的有效性,并分析了测量偏差,获得的主要认识如下。

(1) 基于 PDV 测速结合 Asay 膜测速处理微喷射物质质量分布在无法获得自由面起跳时间及膜与自由面初始空腔距离时有效,扩充了 Asay 膜方法的适用范围;新 Asay 膜方法的测量值在累积面密度大于 5 mg/cm^2 时,相对传统 Asay 膜方法测量偏差小于 20%,即与传统 Asay 膜方法测试精度基本相当。

(2) 在考虑 PDV 探头对微喷射物质穿透深度有限的条件下,新 Asay 膜方法对微喷射物质空间分布具有一定的敏感性,当微喷射物质集中于高速区或低速区时,微喷射物累积面密度测试结果与理论值有较小的偏差;当微喷射物质均匀分布时,结果与参考值偏差较大;对于已知被测对象大致分布的情况,新 Asay 膜方法通过改变对 v_c 的拟合方式,理论上测试精度仍可提升。

(3) 微喷射速度测试 PDV 探头要求与 Asay 膜探头的被测对象具有相同物理状态或处于相同位置,因此,当微喷射状态空间分布极不均匀时,如果无法保证 2 种探头的被测对象基本一致,该方法的测试误差可能被放大,应当慎用。

本文中,仅对针对激光干涉测速信号和 Asay 膜信号的本身特点开展了分析,分析中不包括 Asay 膜探头自身的测量偏差、实际物理过程偏离基本假设等。针对此类因素,后续将开展进一步研究。本文中讨论的喷射粒子碰膜时都具有高速粒子先碰膜、低速粒子后碰膜的特点,针对第 2 次加载强度较低或间隔时间较长时,理论上存在高速粒子先碰膜、低速粒子后碰膜这一特殊情况,后续将进一步开展数值实验分析,拓宽本文方法的应用场景。

参考文献:

- [1] WALSH J M, SHREFFLER R G, WILLIG F J. Limiting conditions for jet formation in high velocity collisions [J]. *Journal of Applied Physics*, 1953, 24(3): 349–359. DOI: 10.1063/1.1721278.
- [2] ZELLNER M B, GROVER M, HAMMERBERG J E, et al. Effects of shock-breakout pressure on ejection of micron-scale material from shocked tin surfaces [J]. *Journal of Applied Physics*, 2007, 102(1): 013522. DOI: 10.1063/1.2752130.
- [3] ZELLNER M B, DIMONTE G, GERMANN T C, et al. Influence of shockwave profile on ejecta [J]. *AIP Conference Proceedings*, 2009, 1195(1): 1047–1050. DOI: 10.1063/1.3294980.

- [4] BUTTLER W T, ORÓ D M, OLSON R T, et al. Second shock ejecta measurements with an explosively driven two-shockwave drive [J]. *Journal of Applied Physics*, 2014, 116(10): 103519. DOI: 10.1063/1.4895053.
- [5] ASAY J R, BERTHOLF L D. Model for estimating the effects of surface roughness on mass ejection from shocked materials: SAND-78-1256 [R]. Albuquerque: Sandia National Laboratory, 1978. DOI: 10.2172/6793637.
- [6] BUTTLER W T, SCHULZE R K, CHARONKO J J, et al. Understanding the transport and break up of reactive ejecta [J]. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 2021, 415: 132787. DOI: 10.1016/j.physd.2020.132787.
- [7] ASAY J R, MIX L P, PERRY F C. Ejection of material from shocked surfaces [J]. *Applied Physics Letters*, 1976, 29(5): 284–287. DOI: 10.1063/1.89066.
- [8] ASAY J R. Thick-plate technique for measuring ejecta from shocked surfaces [J]. *Journal of Applied Physics*, 1978, 49(12): 6173–6175. DOI: 10.1063/1.324545.
- [9] 马云, 汪小松, 李欣竹, 等. ASAY 膜法测量微物质喷射总质量不确定度的初步实验研究 [J]. *高压物理学报*, 2006, 20(2): 207–210. DOI: 10.11858/gywlb.2006.02.016.
MA Y, WANG X S, LI X Z, et al. Study of the uncertainty of the ejected mass measured by ASAY foil method [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2006, 20(2): 207–210. DOI: 10.11858/gywlb.2006.02.016.
- [10] BELL D J, ROUTLEY N R, WHITEMAN G, et al. The development of a smaller Asay foil diagnostic [J]. *AIP Conference Proceedings*, 2018, 1979(1): 080001. DOI: 10.1063/1.5044843.
- [11] MCCLUSKEY C W, WILKE M D, ANDERSON W W, et al. Asay window: a new spall diagnostic [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2006, 77(11): 113902. DOI: 10.1063/1.2336753.
- [12] CHEN Y T, HONG R K, CHEN H Y, et al. An improved Asay window technique for investigating the micro-spall of an explosively-driven tin [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2017, 88(1): 013904. DOI: 10.1063/1.4973699.
- [13] KARKHANIS V, RAMAPRABHU P, BUTTLER W T, et al. Ejecta production from second shock: numerical simulations and experiments [J]. *Journal of Dynamic Behavior of Materials*, 2017, 3(2): 265–279. DOI: 10.1007/s40870-017-0091-9.
- [14] WILLIAMS R J R, GRAPES C C. Simulation of double-shock ejecta production [J]. *Journal of Dynamic Behavior of Materials*, 2017, 3(2): 291–299. DOI: 10.1007/s40870-017-0107-5.
- [15] WENG J D, TAN H, HU S L, et al. New all-fiber velocimeter [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2005, 76(9): 093301. DOI: 10.1063/1.2008989.

(责任编辑 张凌云)