文章编号：1000-5773(2006)02-0207-04

ASAY 膜法测量微物质喷射总质量不确定度的初步实验研究*

马 云，汪小松，李欣竹，张汉钊，胡绍楼，李加波，陈 宏，翁继东
（中国工程物理研究院流体物理研究所冲击波物理与爆轰物理实验室，四川绵阳 621900）

摘要：采用在不锈钢样品上用油脂粘贴给定质量的铝粉作为模拟喷射体的方法，对 ASAY 膜法测量微物质喷射总质量的不确定度进行了初步实验检验。实验结果表明，对于 mg/cm^2 量级的微物质喷射总质量，目前 ASAY 膜法测量的不确定度可以小于 50%。

关键词：微物质喷射；ASAY 膜法；VISAR
中图分类号：O521.3 **文献标识码**：A

1 引 言

当强冲击波从样品自由面反射时，可引起样品自由面的微物质喷射[1]。研究这种现象形成的物理机制，对了解材料在冲击加载下表面的损伤情况非常重要[2]。

目前用来研究微物质喷射的诊断手段有光学阴影照相法、X 射线照相法、多普勒激光干涉薄膜法（俗称 ASAY 膜法）[3]和压电晶体传感器法[4]。其中 ASAY 膜法可以给出喷射物质质量按其速度的分布和总的喷射质量，是微物质喷射研究中的一种重要的常规测试方法[5]。

从 ASAY 膜法测试的原理来看，因为引用了较多的假设，被普遍认为是一种近似的测试方法。但是，ASAY 膜法测量微物质喷射质量时到底有多大的不确定度，这在使用 ASAY 膜法测量的数据时是必须首先确认的一个问题。本研究采用一种模拟喷射体[6]对 ASAY 膜法测量微物质喷射总量的不确定度进行实验检验，并介绍了实验的过程和初步的实验结果。

2 实验原理

2.1 ASAY 膜法测微喷原理

ASAY 膜法测微喷的基本原理如图 1 所示。样品在飞片的高速撞击下产生冲击波，当冲击波达到样品的后自由面时，此表面将产生微物质喷射。一薄膜（以下称 ASAY 膜）放置在离样品后自由表面一定距离处，用于收集样品后自由面喷射的物质。当喷射物质高速碰撞薄膜时，薄膜会捕获喷射粒子，并一起向前运动。用高分辨力的激光干涉测速技术精确测量薄膜的运动过程，并按完全非弹性碰撞物理模型处理，就可推演喷射物的速度和质量。

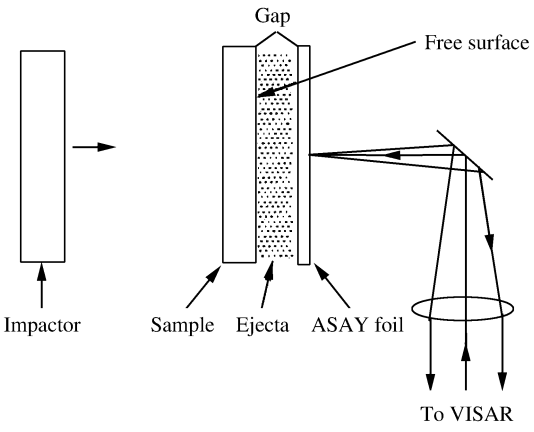


图 1 ASAY 膜法测微喷原理图

Fig. 1 Schematic diagram of ejecta measured by ASAY foil method

在计算喷射物质质量和速度的分布时，用到了几点基本假设：(1) 当冲击波在自由面反射时，全部喷射质量是在足够短的时间内产生的，从而可以近似地认为这种喷射是瞬时的。根据这个假设，由所测喷射

* 收稿日期：2005-05-12；修回日期：2006-02-05
作者简介：马 云（1975—），男，助理研究员，主要从事冲击波物理测试技术研究. E-mail：myun102@21cn.com

物质到达薄膜的时间可计算穿过间隙的质量增量的速度;(2) 薄膜的运动是一维的;(3) 喷射物质与薄膜的碰撞是完全非弹性的,在撞击过程中薄膜没有穿透或飞溅现象;(4) 薄膜的运动可视为刚体运动。

在上述假设条件下,根据质量和动量守恒条件,可以得到不同时刻达到薄膜的喷射粒子速度 v_e

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

任意时刻达到薄膜的喷射粒子总质量 m_e

$$m_e(v_e) = \frac{m_0 \int_0^{v_f} t \,\mathrm{d}v_f}{d_0 - \int_0^{v_f} t \,\mathrm{d}v_f} \tag{2}$$

式中:v_e 为喷射质量增量的速度,v_f 为薄膜的运动速度,m_e 为喷射粒子总质量,m_0 为薄膜的质量,d_0 为薄膜到样品表面的初始距离,时间 t 的零点为样品开始运动时刻。上面所用到的质量都是指单位面积上的质量。

2.2 模拟喷射体检验 ASAY 膜法测量不确定度原理

为检验 ASAY 膜法测量微物质喷射总量的不确定度,Andriot 等人[7]提出了一种“模拟喷射体”的方法。其原理是:在抛光的铜样品表面涂上薄薄的一层环氧树脂胶层,由于环氧树脂胶层的冲击阻抗低于铜样品的冲击阻抗,冲击波在环氧树脂胶层反射时,将导致环氧树脂胶层的完全脱落,脱落的环氧树脂胶层将在铜样品前面形成一团同时喷射的粒子云团,此云团就是 ASAY 膜法测量的微物质。事先精密称量环氧树脂胶层的总质量,就获得了 ASAY 膜法测量的微物质总质量,再以此质量与 ASAY 膜法实际测量结果相比较,就可大致对 ASAY 膜法的测量不确定度进行评估。在 Andriot 等人思想的基础上,李欣竹等人[6]提出了另一种“模拟喷射体”以检验石英晶体传感器法测量微物质喷射质量的不确定度。他们在抛光的不锈钢样品(实验表明样品本身喷射几可忽略)上用油脂粘上一层薄薄的金属铝粉,油脂和铝粉的总质量经过精密测量后作为待测喷射总质量。铝粉的粒径大约几微米,这与真实样品喷射的微粒大小相当。由于采用了金属粉末,李欣竹等人的“模拟喷射体”更接近真实样品的喷射情况。本研究采用李欣竹等人的“模拟喷射体”来检验 ASAY 膜法测量微物质喷射总质量的不确定度。

3 实 验

实验装置如图 2 所示。采用接触爆轰加载方式,样品为粘铝粉的不锈钢,铝粉和油脂的总质量在 mg/cm^2 量级。不锈钢样品内的加载脉冲载荷幅度在 25 GPa 左右,不锈钢样品本身的微物质喷射可以忽略[6]。平面波发生器产生的波形差在基板 ∅60 mm 内小于 60 ns。ASAY 膜材料为工业用钢箔,厚度约 70 μm,距离样品自由面(也即喷射间距)2 mm。喷射空腔内抽真空,实验时真空度约为 10 Pa。

用中国工程物理研究院流体物理研究所自主研发的高灵敏度 VISAR 精确测量 ASAY 膜的运动过程,VISAR 具有 16.5、33.8、99.7 和 230 m/(s·Fr)等 4 种可调条纹常数,为得到较高的测量不确定度,根据 ASAY 膜的运动速度大小,实验中主要选用 99.7 和 230 m/(s·Fr)两种条纹常数进行测量。为保证 VISAR 测试信号的质量,钢箔的一面被处理成均匀的漫反射面。顶在基板上的电探针为整个测试系统提供

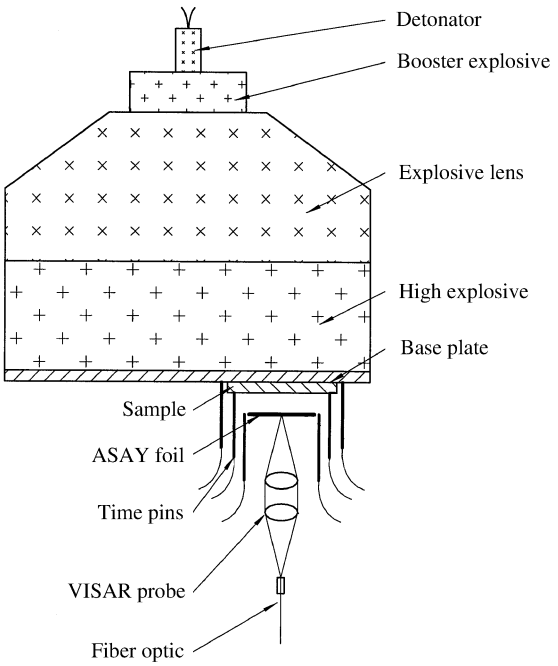


图 2 ASAY 膜法测微喷的实验装置

Fig. 2 Schematic diagram of experimental arrangement

同步触发信号,而顶在样品上和与 ASAY 膜平面齐平的电探针,则提供冲击波达到样品自由面("零点时刻")和样品自由面达到 ASAY 膜("止喷时刻")的时间信号。

4　实验结果和分析

设计不同质量的模拟喷射体,一共进行了 3 次实验。图 3 是其中一实验(AF0301)典型的 VISAR 四通道干涉信号。其中 1、4 通道信号位相相差 180°,2、3 通道信号位相相差 180°,1、2 通道信号位相相差 90°,3、4 通道信号位相相差 90°。180°的位相差可以使 1、4 通道和 2、3 通道信号分别相减后,提高 VISAR 信号信噪比,90°的位相差可以使 VISAR 判别所测运动过程的加速、减速过程。

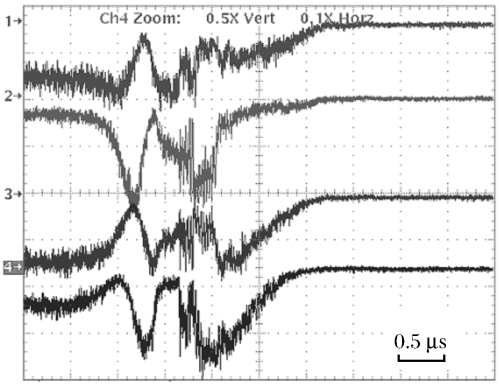


图 3　典型的 VISAR 信号

Fig. 3　Model VISAR signal

图 4 是实验 AF0301 用 VISAR 测量的 ASAY 膜速度剖面。此速度剖面清晰地显示了微物质运动的物理过程。当冲击波到达不锈钢样品表面时(即图 4 中 t_0 时刻),迅即发生喷射现象,粘接的铝粉、油脂甚至不锈钢表面微粒一起喷射出来,并以快于不锈钢样品自由面运动的速度向前运动。最快的喷射粒子(大约为不锈钢样品自由面运动速度的 2.3 倍)首先通过喷射间距到达 ASAY 膜(即图 4 中 t_1 时刻),并将动量传递给 ASAY 膜,使 ASAY 膜开始运动。随着不同速度的粒子相继到达 ASAY 膜,ASAY 膜的运动速度逐渐增大。当不锈钢样品自由面到达 ASAY 膜时(即图 4 中 t_2 时刻),ASAY 膜接收到不锈钢样品传来的一个瞬时的巨大动量,从而产生一个突然的巨大加速过程。图 4 的结果表明,采用刷粉的模拟喷射体可以为喷射微物质与 ASAY 膜的作用过程提供一个清晰的物理图像,这对微物质喷射发生、发展过程的研究是很有启发意义的。

表 1 是三次实验的主要参数以及喷射总质量的实验测量结果。将模拟喷射总质量(m_{e0})和实验测量的喷射总质量(m_e)绘于图 5。从图 5 可以看出,实验测量的喷射总质量与事先确定的模拟喷射总质量最大相差为 31%(实验 AF0302),这表明用对于 mg/cm^2 量级的微物质喷射总质量,目前 ASAY 膜法测量的不确定度小于 50%,这与目前石英晶体传感器法的测量不确定度相当[6]。

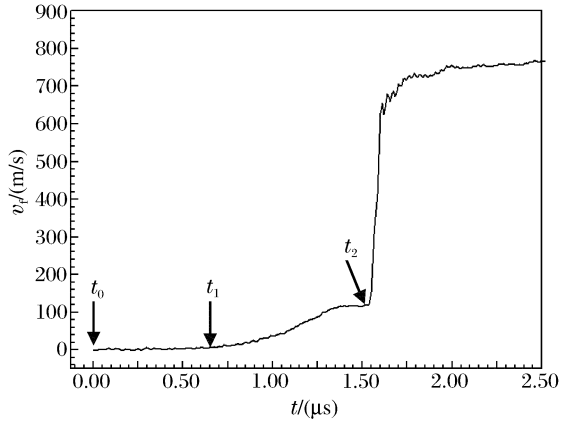


图 4　典型的 ASAY 膜运动速度剖面

Fig. 4　Model velocity profile of ASAY foil

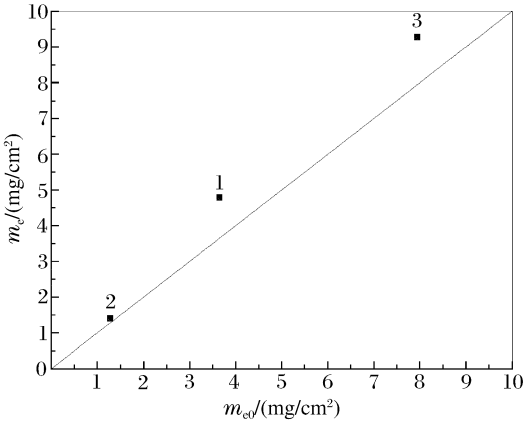


图 5　实验测量的喷射总质量与给定模拟喷射总质量的比较

Fig. 5　Comparison of the input with experimental results of total ejected mass

表 1 实验参数及喷射总质量测量结果

Table 1 Experimental parameters and the result of ejected mass measured by ASAY foil method

Exp No.	Input total ejected mass/(mg/cm^2)	ASAY foil dimension /(mm×mm)	ASAY foil mass /(mg/cm^2)	Gap /(mm)	Total ejected mass measured by ASAY foil method/(mg/cm^2)
AF0301	3.650	∅18×0.07	73.485	2.11	4.790
AF0302	1.279	∅18×0.07	72.047	2.14	1.400
AF0303	7.954	∅18×0.07	72.667	2.00	9.267

5 结 论

采用在不锈钢样品上用油脂粘贴给定质量的铝粉作为模拟喷射体的方法，对 ASAY 膜法测量微物质喷射总质量的不确定度进行初步实验检验，实验结果表明，对于 mg/cm^2 量级的微物质喷射总质量，目前 ASAY 膜法测量的不确定度小于 50%。

References:

[1] Walsh J M, Shreffler R G, Willig F J, et al. Limiting Conditions for Jet Formation in High Velocity Collisions [J]. J Appl Phys, 1953, 24: 349-359.

[2] Asay J R, Mix L P, Perry F C, et al. Ejection of Material from Shocked Surfaces [J]. Appl Phys Lett, 1976, 29(5): 284-287.

[3] Elias P, Chapron P. Experimental Technique for Measuring Mass Ejection from Shock-Loaded Metallic Sample [A]. //Gupta Y M. Shock Waves in Condensed Matter-1985 [C]. New York: Plenum Press, 1986: 645-650.

[4] Zeng J R. Micro Material Ejection from the Surface of Metal Plate under Shock Load [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 1987, 1(1): 88-92. (in Chinese)
曾鉴荣. 动载荷下金属板表面的微物质喷射 [J]. 高压物理学报, 1987, 1(1): 88-92.

[5] Asay J R. Material Ejection from Shocked-Loaded Free Surfaces of Aluminum and Lead [R]. SAND 76-0542, 1976.

[6] Li X Z, Zhang H Z, Wang X M. The Uncertainty of the Ejection Experiment [R]. Chinese National Defence Science and Technology Report, 2003. (in Chinese)
李欣竹，张汉钊，王雪敏. 微物质喷射实验的测量不确定度 [R]. 中国国防科学技术报告, 2003.

[7] Andriot P, Chapron P, Olive F, et al. Ejection of Material from Shocked Surfaces of Tin, Tantalum and Lead-Alloys [A]. //Nellis W J, Seaman L, Graham R A. Shock Waves in Condensed Matter-1981 [C]. New York: AIP Conference Proceedings, 1982: 505-509.

Study of the Uncertainty of the Ejected Mass Measured by ASAY Foil Method

MA Yun, WANG Xiao-Song, LI Xin-Zhu, HU Shao-Lou,
LI Jia-Bo, CHEN Hong, WENG Ji-Dong

(*Laboratory for Shock Wave and Detonation Physics Research, Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang* 621900, *China*)

Abstract: The thin foil Doppler laser interferometry named "ASAY foil method" that can measure the mass of the ejection was described. The measurement accuracy of ASAY foil method had been tested on a predetermined ejection called "Simulated Standard Ejection" that a well defined thin layer of aluminium powder was bond on a polished stainless steel plate by vacuum grease. The experimental results show that the relative uncertainty of mass measured by ASAY foil method is less than 50%.

Key words: ejection; ASAY foil method; VISAR