文章编号：1000-5773(2005)02-0113-07

Hugoniot实验的粒子速度测量不确定度分析*

戴诚达，王 翔，谭 华

（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：不确定度评定是Hugoniot实验的一项重要工作，针对飞片撞击法和对比法两类主要Hugoniot实验进行了粒子速度的测量不确定度分析。根据直接测量量和间接输入量及其不确定度，用不确定度传递律表述了粒子速度的不确定度，并给出了冲击压强(p)、压缩密度(ρ)和压缩比容(v)的评定方法。对于样品和基板为不同材料的非对称碰撞及对比法实验，不确定度评定除A类评定外还应包括B类评定，应考虑用Hugoniot镜像线近似二次冲击绝热线或卸载线而导入的不确定度。在Hugoniot实验中应尽量避免涉及B类评定的其它因素，如同种材料初始密度的显著差异、飞片击靶前的温升等情况。

关键词：Hugoniot；阻抗匹配；粒子速度；不确定度

中图分类号：O241.1 **文献标识码**：A

1 引 言

Hugoniot数据是研究材料状态方程、弹塑性本构关系和动态断裂的基础性数据。一些材料的状态方程尽管可以通过理论方法或理论方法与经验方法相结合的方法计算得到，但理论计算得到的状态方程的可靠性需要与实验数据进行比对，而且不依赖于实验而获得的理论状态方程所涉及的材料是非常有限的。因此，就目前状况而言，状态方程研究离不开实验研究，包括Hugoniot测量。Hugoniot是材料冲击压缩状态点的轨迹。平面正冲击波阵面前后的物质状态可用Rankine-Hugoniot关系[1,2]得到，即

$$\rho_0 D=\rho(D-u) \tag{1}$$

$$p=\rho_0 Du \tag{2}$$

$$e-e_0=\frac{1}{2}p\left(\frac{1}{\rho_0}-\frac{1}{\rho}\right) \tag{3}$$

式中：ρ、u、D、p和e分别为冲击波阵面后的密度、粒子速度、冲击波速度、冲击压强和比内能，下标“0”表示已知的初始状态量。只要测出对应于同一初始状态下不同压力点上的这些参数值，就可以得到与之相应的冲击压缩线。在方程(1)～方程(3)中，共有5个未知量：ρ、u、D、p和e，而方程只有3个，因此，还需有一个方程才能使冲击波后状态封闭。对于大多数凝聚介质，D-u在较宽广的压力范围内具有线性关系[1,2]

$$D=C_0+\lambda u \tag{4}$$

式中：C_0和λ为常数，即Hugoniot状态方程参数，它由一定数量的(D,u)实验数据点通过最小二乘法(加权或等权)拟合得到。

Hugoniot实验通常是进行D和u的测量，其中D是通过测量冲击波在一定厚度样品中的走时得

* **收稿日期**：2004-02-12；**修回日期**：2004-06-12

作者简介：戴诚达(1966—)，男，博士，副研究员，主要研究方向：冲击波物理及高压状态方程. E-mail：daichengda@263.net

到,而 u 通常不能直接测量,必须通过相关量的间接测量获得。作为一个完整的实验数据,必须给出其测量不确定度[3]。Mitchell 和 Nellis(1981)曾对飞片撞击法 Hugoniot 实验的测量误差(当时还没有引入不确定度概念)进行过较为系统的分析[4]。马民勋和顾援(1991) 对相对法 Hugoniot 实验测量的误差分析方法进行过讨论[5]。由于当时使用误差概念,误差评定采用统计分析方法,大致相当于现行的测量不确定度评定中的 A 类评定[3],而现行的测量不确定度评定中除 A 类评定外,还应包括 B 类评定(不同于 A 类的其它方法)。本文主要针对飞片撞击法和相对法这两类 Hugoniot 实验,采用现行的不确定度评定规范进行粒子速度的测量不确定度分析;为了完整,还给出了 Hugoniot 的其它表征量,如冲击压强、压缩密度和压缩比容的评定方法;讨论了镜像近似所引入的不确定度,为避免该类不确定度的导入或尽量减小该类不确定度,对 Hugoniot 实验的阻抗匹配节等设计提出了建议。

2 粒子速度的测量不确定度分析

粒子速度 u 是 Hugoniot 的关键表征量之一。在 Hugoniot 实验中,粒子速度 u 不是直接测量的,而是通过测量相关量并根据阻抗匹配原理计算得到的。无论是飞片撞击法还是对比法测量,冲击波速度 D 是必须测量的量,其表达式为

$$D=h/\Delta t \tag{5}$$

式中:h 为实验样品厚度,是静态测量的长度量;Δt 是冲击波在样品中的走时。由(5)式和不确定度传递律[3],得到冲击波速度 D 的合成标准不确定度 $u_c(D)$ 为

$$u_c(D)=\sqrt{\left(\frac{\partial D}{\partial h}\right)^2u^2(h)+\left(\frac{\partial D}{\partial \Delta t}\right)^2u^2(\Delta t)+2\left(\frac{\partial D}{\partial h}\right)\left(\frac{\partial D}{\partial \Delta t}\right)u(h,\Delta t)} \tag{6}$$

式中:$u(h)$、$u(\Delta t)$分别为 h 和 Δt 的标准不确定度,$u(h,\Delta t)$为 h 和 Δt 的协方差。由于 Δt 与 h 是独立测量的,因此(6)式可简化成

$$u_c(D)=\sqrt{\left(\frac{\partial D}{\partial h}\right)^2u^2(h)+\left(\frac{\partial D}{\partial \Delta t}\right)^2u^2(\Delta t)} \tag{7}$$

冲击波速度 D 的扩展不确定度 $U_C(D)$为

$$U_C(D)=ku_c(D) \tag{8}$$

式中:k 为包含因子。工程应用中,取 $k=2$,其置信水平约 95%[3]。

冲击波速度 D 的相对扩展不确定度为

$$U_C(D)/D=ku_c(D)/D \tag{9}$$

将$\partial D/\partial h=1/\Delta t$ 和$\partial D/\partial \Delta t=-h/(\Delta t)^2$ 代入(9)式,并利用(5)式,得到

$$\frac{U_C(D)}{D}=k\sqrt{\left[\frac{u(h)}{h}\right]^2+\left[\frac{u(\Delta t)}{\Delta t}\right]^2} \tag{10}$$

对于飞片撞击法实验,除需要测量冲击波速度 D 外,还需要测量飞片速度 W。当飞片、靶板和样品为同种材料,即对称碰撞时,其粒子速度 u 为飞片速度 W 的一半[2],即

$$u=W/2 \tag{11}$$

这样,粒子速度 u 的标准不确定度 $u(u)$可表示为

$$u(u)=u(W)/2 \tag{12}$$

式中 $u(W)$为飞片速度测量的标准不确定度。利用(11)和(12)式得到 u 的相对标准不确定度

$$u(u)/u=u(W)/W \tag{13}$$

u 的相对扩展不确定度 $U(u)$可表示成

$$U(u)/u=ku(W)/W \tag{14}$$

由于初始密度 ρ_0、冲击波速度 D 和飞片速度 W 是独立测量的,因此根据不确定度传递律[3],压强 p 的合成标准不确定度 $u_c(p)$应表示为

$$u_c(p)=\sqrt{\left(\frac{\partial p}{\partial \rho_0}\right)^2u^2(\rho_0)+\left(\frac{\partial p}{\partial D}\right)^2u^2(D)+\left(\frac{\partial p}{\partial u}\right)^2u^2(u)} \tag{15}$$

式中:$u(\rho_0)$、$u(D)$和 $u(u)$分别为 ρ_0、D 和 u 的测量标准不确定度。由(2)式得到 $\partial p/\partial\rho_0=Du$,$\partial p/\partial D=\rho_0 u$,$\partial p/\partial u=\rho_0 D$。$p$ 的相对合成标准不确定度 $u_c(p)/p$ 由下式得到

$$\frac{u_c(p)}{p}=\sqrt{\left[\frac{u(\rho_0)}{\rho_0}\right]^2+\left[\frac{u(D)}{D}\right]^2+\left[\frac{u(u)}{u}\right]^2} \tag{16}$$

进而得到 p 的相对扩展不确定度 $U_C(p)/p=ku_c(p)/p$。

根据冲击波后密度 $\rho=\rho_0 D/(D-u)$,ρ 的合成标准不确定度 $u_c(\rho)$ 可表示成

$$u_c(\rho)=\sqrt{\left(\frac{\partial\rho}{\partial\rho_0}\right)^2u^2(\rho_0)+\left(\frac{\partial\rho}{\partial D}\right)^2u^2(D)+\left(\frac{\partial\rho}{\partial u}\right)^2u^2(u)} \tag{17}$$

式中:$\partial\rho/\partial\rho_0=D/(D-u)$,$\partial\rho/\partial D=-\rho_0 u/(D-u)^2$,$\partial\rho/\partial u=\rho_0 D/(D-u)^2$。冲击波后密度的扩展不确定度 $U_C(\rho)=ku_c(\rho)$,相对扩展不确定度 $U_C(\rho)/\rho=ku_c(\rho)/\rho$。

根据压缩比容 $v=1/\rho$,v 的合成标准不确定度 $u_c(v)$ 可表示成

$$u_c(v)=(\partial v/\partial\rho)u_c(\rho) \tag{18}$$

式中 $\partial v/\partial\rho=-1/\rho^2$。压缩比容 v 的扩展合成不确定度 $U_C(v)=ku_c(v)$,相对扩展不确定度 $U_C(v)/v=ku_c(v)/v$。

对于非对称碰撞,粒子速度的合成标准不确定度 $u_c(u)$可表示成

$$u_c(u)=\sqrt{u_A^2(u)+u_B^2(u)} \tag{19}$$

其中 $u_A(u)$和 $u_B(u)$分别表示 u 的 A 类不确定度和 B 类不确定度。$u_A(u)$可由各实验测量量及相关输入量的随机合成不确定度来表征,$u_B(u)$是指用不同于 A 类评定的其它方法而得到的不确定度,其来源主要包括用 Hugoniot 镜像线近似二次冲击线或卸载线求解冲击状态而引入的不确定度。如图 1 所示,实线 OH 为飞片材料的已知 Hugoniot 线,实线 HW 为飞片材料标准 Hugoniot 线的镜像线,两者的交点 H 是飞片击靶(板)的初始冲击状态,虚线 OR 为待测材料的 Hugoniot 线。若待测样品的冲击阻抗与基板一致(同种材料),则镜像线 HW 与实验得到的样品 $p=\rho_{0S}D_S u$ 线的交点 H'即为待测 Hugoniot 线上的点,$u_B(u)=0$,(19)式就简化成 $u_c(u)=u_A(u)$。若待测样品的冲击阻抗低于基板阻抗,则从 H 为始点的卸载线 S 与 $p=\rho_{0S}D_S u$ 线的交点 R 为待测 Hugoniot 线上的点。由于卸载过程可能出现的卸载熔化影响以及高压下 Grüneisen 参数难于精确定值,其卸载线一般采用飞片材料 Hugoniot 线的镜像线来近似,由此引入的不确定度采用 B 类评定。对于待测样品的冲击阻抗高于基板阻抗的二次冲击现象,情况类似。

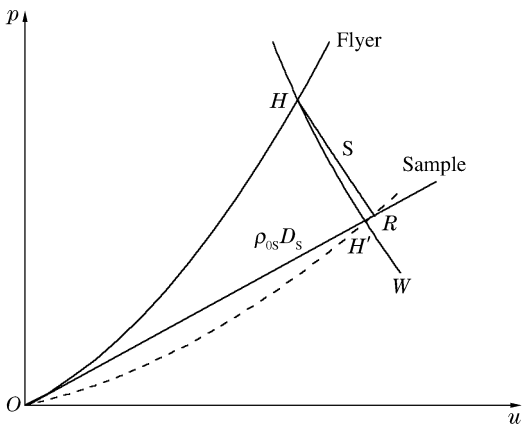


图 1　飞片撞击法 Hugoniot 测量原理示意图

Fig. 1　Schematic of Hugoniot measurements using the flyerplate-impact approach

阻抗匹配法计算粒子速度 u 的输入量除飞片速度和样品冲击波速度外,还包括了飞片和样品的初始密度、飞片(标准材料)的 Hugoniot 参数。若用 D、W、ρ_{0t}、ρ_{0f}、C_{0f}和 λ_f 分别表示待测样品中的冲击波速度、飞片速度、样品和飞片的初始密度、飞片的 Hugoniot 参数,则样品中的波后粒子速度 u 从下式得到

$$\rho_{0f}\lambda_f u^2-(\rho_{0t}D+\rho_{0f}C_{0f}+2\rho_{0f}\lambda_f W)u+\rho_{0f}W(C_{0f}+\lambda_f W)=0 \tag{20}$$

$$u=(-b-\sqrt{b^2-4ac})/2a \tag{21}$$

式中:$a=\rho_{0f}\lambda_f$,$b=-(\rho_{0t}D+\rho_{0f}C_{0f}+2\rho_{0f}\lambda_f W)$,$c=\rho_{0f}W(C_{0f}+\lambda_f W)$。

由于 u 不是直接测量的,$u_A(u)$实际上是各输入量标准不确定度导入的合成标准不确定度。实验中,D、W、ρ_{0t}、ρ_{0f}是独立测量的,测量不确定度是随机的,但 C_{0f} 和 λ_f 是强相关的,应考虑两者的交叉项。若用 $u(D)$、$u(W)$、$u(\rho_{0t})$、$u(\rho_{0f})$、$u(C_{0f})$ 和 $u(\lambda_f)$ 来表示 D、W、ρ_{0t}、ρ_{0f}、C_{0f} 和 λ_f 的标准不确定度,则根据不确定度传递律[3],$u_A(u)$ 可表示为

$$u_{\mathrm{A}}(u)=\sqrt{\left(\frac{\partial u}{\partial D}\right)^2u^2(D)+\left(\frac{\partial u}{\partial W}\right)^2u^2(W)+\left(\frac{\partial u}{\partial\rho_{0\mathrm{t}}}\right)^2u^2(\rho_{0\mathrm{t}})+\left(\frac{\partial u}{\partial\rho_{0\mathrm{f}}}\right)^2u^2(\rho_{0\mathrm{f}})+\left[\left(\frac{\partial u}{\partial C_{0\mathrm{f}}}\right)u(C_{0\mathrm{f}})+\left(\frac{\partial u}{\partial\lambda_{\mathrm{f}}}\right)u(\lambda_{\mathrm{f}})\right]^2}\tag{22}$$

上式假定相关系数 $r(C_{0\mathrm{f}},\lambda_{\mathrm{f}})=1$。(22)式中：$\partial u/\partial D$、$\partial u/\partial W$、$\partial u/\partial\rho_{0\mathrm{t}}$、$\partial u/\partial\rho_{0\mathrm{f}}$、$\partial u/\partial C_{0\mathrm{f}}$ 和 $\partial u/\partial\lambda_{\mathrm{f}}$ 为 u 对各相应量的敏感系数，可从(20)式得到，即

$$\frac{\partial u}{\partial D}=\frac{\rho_{0\mathrm{t}}u}{2\rho_{0\mathrm{f}}\lambda_{\mathrm{f}}u-\rho_{0\mathrm{t}}D-\rho_{0\mathrm{f}}C_{0\mathrm{f}}-2\rho_{0\mathrm{f}}\lambda_{\mathrm{f}}W}\tag{23a}$$

$$\frac{\partial u}{\partial W}=\frac{2\rho_{0\mathrm{f}}\lambda_{\mathrm{f}}u-\rho_{0\mathrm{f}}C_{0\mathrm{f}}-2\rho_{0\mathrm{f}}\lambda_{\mathrm{f}}W}{2\rho_{0\mathrm{f}}\lambda_{\mathrm{f}}u-\rho_{0\mathrm{t}}D-\rho_{0\mathrm{f}}C_{0\mathrm{f}}-2\rho_{0\mathrm{f}}\lambda_{\mathrm{f}}W}\tag{23b}$$

$$\frac{\partial u}{\partial\rho_{0\mathrm{t}}}=\frac{D_{\mathrm{t}}u}{2\rho_{0\mathrm{f}}\lambda_{\mathrm{f}}u-\rho_{0\mathrm{t}}D-\rho_{0\mathrm{f}}C_{0\mathrm{f}}-2\rho_{0\mathrm{f}}\lambda_{\mathrm{f}}W}\tag{23c}$$

$$\frac{\partial u}{\partial\rho_{0\mathrm{f}}}=\frac{-\lambda_{\mathrm{f}}u^2+C_{0\mathrm{f}}u+2\lambda_{\mathrm{f}}Wu-C_{0\mathrm{f}}W-\lambda_{\mathrm{f}}W^2}{2\rho_{0\mathrm{f}}\lambda_{\mathrm{f}}u-\rho_{0\mathrm{t}}D-\rho_{0\mathrm{f}}C_{0\mathrm{f}}-2\rho_{0\mathrm{f}}\lambda_{\mathrm{f}}W}\tag{23d}$$

$$\frac{\partial u}{\partial C_{0\mathrm{f}}}=\frac{\rho_{0\mathrm{f}}u-\rho_{0\mathrm{f}}W}{2\rho_{0\mathrm{f}}\lambda_{\mathrm{f}}u-\rho_{0\mathrm{t}}D-\rho_{0\mathrm{f}}C_{0\mathrm{f}}-2\rho_{0\mathrm{f}}\lambda_{\mathrm{f}}W}\tag{23e}$$

$$\frac{\partial u}{\partial\lambda_{\mathrm{f}}}=\frac{2\rho_{0\mathrm{f}}Wu-\rho_{0\mathrm{f}}u^2-\rho_{0\mathrm{f}}W^2}{2\rho_{0\mathrm{f}}\lambda_{\mathrm{f}}u-\rho_{0\mathrm{t}}D-\rho_{0\mathrm{f}}C_{0\mathrm{f}}-2\rho_{0\mathrm{f}}\lambda_{\mathrm{f}}W}\tag{23f}$$

对于对比法 Hugoniot 实验，需要测量 Hugoniot 已知的参考样品(R)和待测样品(S)中的冲击波速度 D_{R} 和 D_{S}，通过阻抗匹配原理[1,2]计算获得粒子速度 u。如图 2 所示二次冲击情形，曲线 OH 为参考材料的标准 Hugoniot 线，参考样品的 $p=\rho_{0\mathrm{R}}D_{\mathrm{R}}u$ 线与其标准 Hugoniot 线的交点 H 就是参考样品的初始冲击状态，从 H 出发的二次冲击绝热线 HH''与实验得到的待测样品的 $p=\rho_{0\mathrm{S}}D_{\mathrm{S}}u$ 直线的交点 H'' 就是待测样品 Hugoniot 线上的点。H' 点是参考材料 Hugoniot线的镜像线 HH' 与实验得到的待测样品的 $p=\rho_{0\mathrm{S}}D_{\mathrm{S}}u$ 直线的交点。$u_{\mathrm{B}}(u)$ 可用 $\delta u=|u_{H''}-u_{H'}|$ 来表示。由于二次冲击绝热线同样涉及高压下 Grüneisen 参数定值难题，二次冲击绝热线一般用参考材料 Hugoniot 线的镜像线来近似。对于待测样品的冲击阻抗低于基板与参考样品冲击阻抗的卸载情形，情况类似。

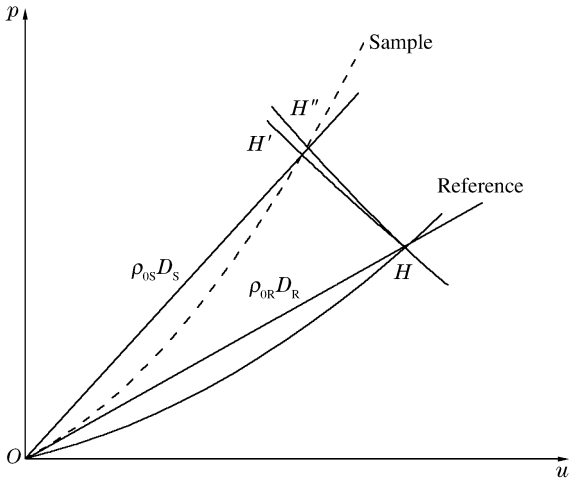


图 2 对比法 Hugoniot 测量原理示意图

Fig. 2 Schematic of Hugoniot measurements using the relative approach

若用 $\rho_{0\mathrm{R}}$、$C_{0\mathrm{R}}$、λ_{R}、D_{R}、$\rho_{0\mathrm{S}}$和 D_{S} 分别表示参考样品的初始密度、Hugoniot 参数、冲击波速度测量值以及待测样品的初始密度和冲击波速度测量值，则由镜像线近似计算得到的待测样品粒子速度 u 满足下式

$$\rho_{0\mathrm{R}}\lambda_{\mathrm{R}}^2u^2-\lambda_{\mathrm{R}}[\rho_{0\mathrm{S}}D_{\mathrm{S}}+\rho_{0\mathrm{R}}C_{0\mathrm{R}}+4\rho_{0\mathrm{R}}(D_{\mathrm{R}}-C_{0\mathrm{R}})]u+2\rho_{0\mathrm{R}}(D_{\mathrm{R}}-C_{0\mathrm{R}})(2D_{\mathrm{R}}-C_{0\mathrm{R}})=0\tag{24}$$

类似地，用 $u(\rho_{0\mathrm{R}})$、$u(C_{0\mathrm{R}})$、$u(\lambda_{\mathrm{R}})$、$u(D_{\mathrm{R}})$、$u(\rho_{0\mathrm{S}})$和 $u(D_{\mathrm{S}})$分别表示参考样品的初始密度、Hugoniot 参数、冲击波速度测量值以及待测样品的初始密度和冲击波速度测量值的标准不确定度，则粒子速度的 A 类标准不确定度 $u_{\mathrm{A}}(u)$可表示为

$$u_{\mathrm{A}}(u)=\sqrt{\left(\frac{\partial u}{\partial\rho_{0\mathrm{R}}}\right)^2u^2(\rho_{0\mathrm{R}})+\left[\left(\frac{\partial u}{\partial C_{0\mathrm{R}}}\right)u(C_{0\mathrm{R}})+\left(\frac{\partial u}{\partial\lambda_{\mathrm{R}}}\right)u(\lambda_{\mathrm{R}})\right]^2+\left(\frac{\partial u}{\partial D_{\mathrm{R}}}\right)^2u^2(D_{\mathrm{R}})+\left(\frac{\partial u}{\partial\rho_{0\mathrm{S}}}\right)^2u^2(\rho_{0\mathrm{S}})+\left(\frac{\partial u}{\partial D_{\mathrm{S}}}\right)^2u^2(D_{\mathrm{S}})}\tag{25}$$

式中：$\partial u/\partial\rho_{0\mathrm{R}}$、$\partial u/\partial C_{0\mathrm{R}}$、$\partial u/\partial\lambda_{\mathrm{R}}$、$\partial u/\partial D_{\mathrm{R}}$、$\partial u/\partial\rho_{0\mathrm{S}}$和 $\partial u/\partial D_{\mathrm{S}}$ 为 u 对各相应量的敏感系数，可从(24)式得到，即

$$\frac{\partial u}{\partial\rho_{0\mathrm{R}}}=-\frac{\lambda_{\mathrm{R}}^2u^2-\lambda_{\mathrm{R}}(4D_{\mathrm{R}}-3C_{0\mathrm{R}})u+2(D_{\mathrm{R}}-C_{0\mathrm{R}})(2D_{\mathrm{R}}-C_{0\mathrm{R}})}{2\rho_{0\mathrm{R}}\lambda_{\mathrm{R}}^2u-\lambda_{\mathrm{R}}[\rho_{0\mathrm{s}}D_{\mathrm{S}}+\rho_{0\mathrm{R}}C_{0\mathrm{R}}+4\rho_{0\mathrm{R}}(D_{\mathrm{R}}-C_{0\mathrm{R}})]}\tag{26a}$$

$$\frac{\partial u}{\partial C_{0\mathrm{R}}}=-\frac{3\rho_{0\mathrm{R}}\lambda_{\mathrm{R}}u-2\rho_{0\mathrm{R}}(3D_{\mathrm{R}}-2C_{0\mathrm{R}})}{2\rho_{0\mathrm{R}}\lambda_{\mathrm{R}}^{2}u-\lambda_{\mathrm{R}}[\rho_{0\mathrm{s}}D_{\mathrm{S}}+\rho_{0\mathrm{R}}C_{0\mathrm{R}}+4\rho_{0\mathrm{R}}(D_{\mathrm{R}}-C_{0\mathrm{R}})]} \tag{26b}$$

$$\frac{\partial u}{\partial \lambda_{\mathrm{R}}}=-\frac{2\rho_{0\mathrm{R}}\lambda_{\mathrm{R}}u^{2}-[\rho_{0\mathrm{s}}D_{\mathrm{S}}+\rho_{0\mathrm{R}}C_{0\mathrm{R}}+4\rho_{0\mathrm{R}}(D_{\mathrm{R}}-C_{0\mathrm{R}})]u}{2\rho_{0\mathrm{R}}\lambda_{\mathrm{R}}^{2}u-\lambda_{\mathrm{R}}[\rho_{0\mathrm{s}}D_{\mathrm{S}}+\rho_{0\mathrm{R}}C_{0\mathrm{R}}+4\rho_{0\mathrm{R}}(D_{\mathrm{R}}-C_{0\mathrm{R}})]} \tag{26c}$$

$$\frac{\partial u}{\partial D_{\mathrm{R}}}=-\frac{-4\rho_{0\mathrm{R}}\lambda_{\mathrm{R}}u+2\rho_{0\mathrm{R}}(4D_{\mathrm{R}}-3C_{0\mathrm{R}})}{2\rho_{0\mathrm{R}}\lambda_{\mathrm{R}}^{2}u-\lambda_{\mathrm{R}}[\rho_{0\mathrm{s}}D_{\mathrm{S}}+\rho_{0\mathrm{R}}C_{0\mathrm{R}}+4\rho_{0\mathrm{R}}(D_{\mathrm{R}}-C_{0\mathrm{R}})]} \tag{26d}$$

$$\frac{\partial u}{\partial \rho_{0\mathrm{S}}}=-\frac{-\lambda_{\mathrm{R}}D_{\mathrm{S}}u}{2\rho_{0\mathrm{R}}\lambda_{\mathrm{R}}^{2}u-\lambda_{\mathrm{R}}[\rho_{0\mathrm{s}}D_{\mathrm{S}}+\rho_{0\mathrm{R}}C_{0\mathrm{R}}+4\rho_{0\mathrm{R}}(D_{\mathrm{R}}-C_{0\mathrm{R}})]} \tag{26e}$$

$$\frac{\partial u}{\partial D_{\mathrm{S}}}=-\frac{-\lambda_{\mathrm{R}}\rho_{0\mathrm{S}}u}{2\rho_{0\mathrm{R}}\lambda_{\mathrm{R}}^{2}u-\lambda_{\mathrm{R}}[\rho_{0\mathrm{s}}D_{\mathrm{S}}+\rho_{0\mathrm{R}}C_{0\mathrm{R}}+4\rho_{0\mathrm{R}}(D_{\mathrm{R}}-C_{0\mathrm{R}})]} \tag{26f}$$

$u_{\mathrm{B}}(u)$的分析必须针对所研究的具体材料,设计相应的二次冲击线或卸载线测量进行 u 的修正和 $u_{\mathrm{B}}(u)$的评定。目前普遍认为,对于飞片和样品阻抗相差不十分悬殊的情况下,$u_{\mathrm{B}}(u)$ 这一项大致可以忽略,因此就有了 $u_{\mathrm{c}}(u)\approx u_{\mathrm{A}}(u)$和 $U_{\mathrm{c}}(u)=ku_{\mathrm{c}}(u)\approx ku_{\mathrm{A}}(u)$。冲击压强($p$)、压缩密度($\rho$)和压缩比容($v$)的合成标准不确定度也可表示成(19)式的形式,其 $u_{\mathrm{A}}(p)$、$u_{\mathrm{A}}(\rho)$、$u_{\mathrm{A}}(v)$的不确定度可按照(15)、(17)和(18)式进行评估,而 $u_{\mathrm{B}}(p)$、$u_{\mathrm{B}}(\rho)$、$u_{\mathrm{B}}(v)$的分析与 $u_{\mathrm{B}}(u)$类似。

为考察上述不确定度评定方法,用它对文献[6]中铂 Hugoniot 实验数据的导出量及其不确定度进行了重新计算和评定,并与文献给出的不确定度进行了比对(表 1)。由于文献[6]中没有给出 Ta 飞片和 Pt 样品初始密度的不确定度,我们用表中 Ta 和 Pt 试件密度统计的标准差来表征 $\rho_{0\mathrm{f}}$和 $\rho_{0\mathrm{t}}$的标准不确定度,其余输入量与文献[6]相同。由于实验中样品和基板是同种材料,因此可以只作不确定度的 A 类评定。从表 1 可以看出,导出量 u、p 和 ρ 值是一致的,微小的差异只是小数点后的有效位数不同而已。对于 u 的扩展不确定度,文献[6]与本文给出的值是一致的。采用本文的评定方法后,p 的扩展不确定度有一定程度的扩大,而 ρ 的扩展不确定度有细小的差异。

表 1　两种评定方法给出的铂 Hugoniot 实验数据的扩展($k=2$)不确定度比较

Table 1　Comparison of platinum Hugoniot expended uncertainties ($k=2$) from two evaluations

Shot name	$\rho_{0\mathrm{t}}$ /(g/cm³)	$\rho_{0\mathrm{t}}$ /(g/cm³)	W /(km/s)	D /(km/s)	u /(km/s)	p /(GPa)	ρ /(g/cm³)	Evaluation framework
TaPt1	21.41	16.65	7.784	8.920±0.134	3.422±0.034	653.4± 7.64	34.728±0.535	Ref.[6]
					3.443±0.031	653±11	34.734±0.369	This work
TaPt 3	21.42	16.65	7.829	8.937±0.063	3.444±0.024	659.3±5.16	34.853±0.298	Ref.[6]
					3.443±0.021	659±9	34.853±0.298	This work
TaPt 4	21.42	16.68	6.006	7.682±0.030	2.633±0.011	433.4±1.97	32.597±0.135	Ref.[6]
					2.633±0.011	433±3	32.597±0.135	This work
TaPt 5	21.37	16.68	4.492	6.675±0.035	1.958±0.008	279.3±1.31	30.239±0.121	Ref.[6]
					1.958±0.009	279±2	30.239±0.121	This work
TaPt 6	21.40	16.68	4.324	6.535±0.118	1.885±0.019	263.6±2.98	30.072±0.343	Ref.[6]
					1.885±0.017	264±5	30.076±0.252	This work
TaPt 7	21.40	16.67	6.850	8.291±0.032	3.005±0.014	533.3±2.68	33.570±0.159	Ref.[6]
					3.005±0.013	533±3	33.568±0.123	This work
TaPt 8	21.41	16.68	3.803	6.189±0.035	1.652±0.007	218.9±1.06	29.208±0.110	Ref.[6]
					1.652±0.007	219±2	29.208±0.092	This work

3　讨　论

在对称碰撞实验中,如果同种材料的飞片和样品的初始密度略有差异,则(11)式应修正成[4]

$$u=\frac{W}{2}\cdot\left[1-\frac{C_{0}}{2(C_{0}+\lambda W)}\left(\frac{\rho_{0\mathrm{t}}-\rho_{0\mathrm{f}}}{\rho_{0\mathrm{f}}}\right)\right] \tag{27}$$

显然,这是一种自恰的修正方法。u 的实验定值与常数 C_0 和 λ 的定值关联在一起。这样,在分析 u 的不确定度时必须考虑其交叉项,使不确定度分析变得十分复杂。这种情况应尽量避免。同种材料的飞片和样品之间的初始密度差最大不应超出其平均(统计)密度的2倍标准差,且两者的密度越接近平均密度越好。

在基板和样品为非同种材料的飞片撞击实验和对比法 Hugoniot 实验中,由于样品和基板冲击阻抗的差异,出现了二次冲击或卸载。用 Hugoniot 线的镜像线来代替二次冲击 Hugoniot 线或卸载线存在一定程度的近似,由此而引入的 u 的不确定度应予以考虑,甚至需要进行 u 的修正。由于二次冲击 Hugoniot 线和卸载线的描述涉及到冲击压缩下材料的 Grüneisen 系数 γ,而 γ 的精确定值十分困难。因此很难评定由于镜像线近似所导致的、对 u 和 $u_c(u)$ 的影响。不过,通过差分方法和状态方程方法计算表明,用 Hugoniot 线的镜像线来近似二次冲击 Hugoniot 线和卸载线对 u 值的影响是不显著的。对于典型金属材料,即使阻抗相差3倍左右,镜像线近似对粒子速度 u 的影响在实验测量的不确定度范围内也是难以分辨的[7]。相关实验也表明,即使在阻抗相差1个量级、冲击加载压力接近 0.5 TPa 的实验条件下,镜像线近似对 u 值的影响也只有 2%~3% [8]。另外,对于飞片撞击法 Hugoniot 实验,即使是非对称碰撞,若基板采用与待测样品相同的材料,二次冲击和卸载的现象也可避免。这样,从 Hugoniot 的测量不确定度评定而言,二次冲击和(等熵)卸载研究的重要性会有所降低。但对于对比法实验以及气/固、液/固界面波系作用的问题,二次冲击和(等熵)卸载研究又是极其重要的。

由于实验加载技术的特点,在某些 Hugoniot 实验中飞片被加热,出现了一定程度的温升,其初始状态偏离了主 Hugoniot 线的初始状态。对于这样的 Hugoniot 实验数据的不确定度评定,应考虑温升对标准材料主 Hugoniot 线的影响[9,10]。目前还没有能精确描述这种影响的有效方法,但通过理论预估与实验验证的方法是可以认识其影响程度的。

4 小 结

采用现行的不确定度评定规范对粒子速度及其它 Hugoniot 表征量的测量不确定度进行了较为系统的分析,并给出了相应的不确定度评定方法。该方法与以前的 Hugoniot 测量误差评定方法相比更为合理、清晰。根据不确定度分析结果,得到以下认识:(1) 对于飞片撞击法 Hugoniot 测量,应尽量采用对称碰撞或基板和样品为同种材料的阻抗匹配节设计,以避免涉及二次冲击或卸载问题的不确定度B类评定。对于对比法 Hugoniot 测量,基板和参考样品(标准材料)应采用同种材料,参考样品应采用阻抗与待测样品尽量接近的材料,以尽量减小镜像近似所导入的不确定度。(2) 在 Hugoniot 实验中,同种材料的试件必须具有一致的初始密度和初始温度,以避免由于密度和温度的不一致而导致的 Hugoniot 的修正问题。

References:

[1] McQueen R G, Marsh S P, Taylor J W, et al. The Equation of State of Solids from Shock Wave Studies [A]. Kinslow R. High-Velocity Impact Phenomena (Chapter Ⅶ) [C]. New York and London: Academic Press, 1970.

[2] Jing F Q. Introduction to Experimental Equation of State(2nd ed) [M]. Beijing: Science Press, 1999. (in Chinese)
经福谦. 实验物态方程导引(第二版) [M]. 北京:科学出版社, 1999.

[3] Department of Measure, State Bureau of Quality and Technology Supervision. Guide to the Evaluation and Expression of Uncertainty in Measurement [M]. Beijing: China Metrology Press, 2000. (in Chinese)
国家质量技术监督局计量司组. 测量不确定度评定与表示指南 [M]. 北京:中国计量出版社, 2000.

[4] Mitchell A C, Nellis W J. Shock Compression of Aluminum, Copper, and Tantalum [J]. J Appl Phys, 1981, 52(5): 3363-3374.

[5] Ma M X, Gu Y. Problem about Error in Impedance-Match Experiment [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 1991, 5(2): 149-153. (in Chinese)
马民勋, 顾 援. 阻抗匹配实验中的误差问题 [J]. 高压物理学报, 1991, 5(2): 149-153.

[6] Holmes N C,Moriarty J A, Gathers G R,et al. The Equation of State of Platinum to 660 GPa (6.6 Mbar) [J]. J Appl Phys,1989,66(7):2962－2967.

[7] Nellis W J,Mitchell A C,Young D A. Equation-of-State Measurements for Aluminum,Copper,and Tantalum in the Pressure Range 80～440 GPa (0.8～4.4 Mbar) [J]. J Appl Phys,2003,93(1):304－310.

[8] Knudson M D,Hanson D L,Bailey J E,et al. Equation of the State Measurements in Liquid Deuterium to 70 GPa [J]. Phy Rev Lett,2001,87(22):225501.

[9] Knudson M D,Lemke R W,Hayes D B,et al. Near-Absolute Hugoniot Measurements in Aluminum to 500 GPa Using a Magnetically Accelerated Flyer Plate Technique [J]. J Appl Phys,2003,94(7):4420－4431.

[10] Winfree N A,Chhabildas L C,Reinhart W D,et al. EOS Data of Ti-6Al-4V to Impact Velocities of 10.4 km/s on a Three-Stage Gun [A]. Furnish M D,Thadhani N N,Horie Y. Shock Compression of Condensed Matter-2001 [C]. New York:AIP,2002.75－78.

Evaluation for Uncertainty of Particle Velocity in Hugoniot Measurements

DAI Cheng-Da,WANG Xiang,TAN Hua

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

Abstract: Uncertainty of particle velocity (u) was systemically analyzed in terms of the general guide to uncertainty evaluation, focusing on two principal types of Hugoniot measurements—flyerplate-impact experiment and relative measurement. The uncertainties of the shock velocity (D), shock pressure (p), compressional density (ρ) and compressional specific volume (v) were also formulated in detail based on the law of propagation of uncertainty. For both asymmetric impact (different kinds of sample and driver) and relative measurement, the uncertainty resulted from the approximation of double-shock Hugoniot or release to the mirror reflection of the principal Hugoniot should be taken into account as Type B evaluation of uncertainty. The situations, such as the obvious difference of the same kind of materials, the temperature rise of the flyer prior to impact and so on, should be avoided in Hugoniot experiments.

Key words: Hugoniot; impedance-match principle; particle velocity; uncertainty