

爆炸力学实验技术新进展

高举贤

中国科学院力学研究所, 北京 (邮政编码100080)

提要 本文综述了爆炸力学实验和测试技术的最新进展。

关键词 压力-剪切加载; 准等熵压缩技术; 超高速发射器; 激光和粒子束冲击; 压力测量; 速度测量; 位移测量; 瞬态温度测量; 压阻技术; 压电技术; 光学干涉仪; 纤维光学; 激光干涉技术; 光学高温测量; 光纤探针; 动态云纹干涉; 热偶箔

1987年5月18—22日在西德 Bremen 召开国际冲击载荷和材料动态行为学术会议^[1]。同年7月20—23日由美国物理学会主办, 在美国 Monterey 召开国际密实介质中激波专题讨论会^[2]。1988年9月19—23日在法国 Ajaccio 召开国际动载荷下材料的力学和物理行为学术会议^[3]。三个会议共宣读 474 篇论文, 反映了爆炸力学最近两三年内的最新进展。所涉及内容包括: 高速发射器; 激光和高能粒子束冲击; 物理、力学量测试技术; 激波光谱学; 激波化学; 状态方程; 相变; 高应变率变形和屈服; 本构关系和模型; 绝热剪切; 微观变形机理; 激波压实、烧结和合成; 激波效应; 激波作用下材料的电磁性质; 高速成型以及烈性炸药, 等等。这三个会议的文章数量空前, 不少论文具有突破性进展, 反映出爆炸力学蓬勃发展的新局面。其中实验技术方面文章占相当大比重, 从内容和趋势看也是发展最快的。

为了了解爆炸力学近年来实质性的进展, 可以从密实介质中激波研究的最基本问题谈起^[4]。图1示出激波经典研究的最基本形式。假设: 简单材料的半空间; 没有弹性前驱波; 没有相变; 没有滞后现象; 不考虑材料性质对时间或速率的依赖性(除非对波前给出一些类似粘性力的形式); 没有内部变量; 没有侧面的稀疏波。在这些条件下, 在表面 AA 处 $t=0$ 时以阶跃形式作用一参数

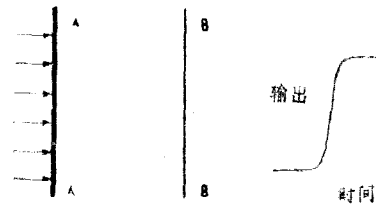


图1 经典激波研究的最基本形式

(可以是压力、速度或任何其他适当的量), 且此后也保持不变。一个理想的平面传感器 BB 插在与 AA 平行, 且相距已知距离处, 与所在处介质既无间隙, 也不引起系统的扰动。由于没有背面, 也就没有反射。随着波的运行, 力学变量如质点速度、压力或密度都可测出。若记录下激波到达的时间, 就能得到激波速度。再测得任一参数, 将其代入阶跃方程,

就可确定其他三个激波参数。但这样的实验结果与事实现象有很多矛盾。例如最早就未发现铁的相变。上述简化是必要的，没有这种高度的简化，很难掌握冲击波过程的主要参数。正是这种简化的研究成果，给激波物理或爆炸力学打下了基础。但也正是由于做了大量简化，所得到的实验结果可能掩盖了一些真实现象。例如 Fowles^[6]对当时有极大兴趣的一维应变激波后残留剪切变形问题加以研究，证明剪应变的确存在于塑性波后。以后的大量研究工作表明，甚至在通常均匀的材料中，激波引起的过程基本上也是不均匀的。

1 加载实验方法

近年来为了改善状态方程的研究以适应实际情况，并考虑状态方程数据应用的广泛性，开展了状态方程实验方法的研究，如压力-剪切加载，准等熵压缩技术等。适应实验装置的改革，相应的测试方法也得到发展。

1.1 压力-剪切加载 它能在材料中产生动态压力和剪切加载条件^[6-12]。这个突破性的发展，使我们可以在更一般的条件下研究材料的性质，特别是可以直接从这些实验确定冲击状态下材料的屈服行为和剪切模量对应力的依赖关系。

在材料中产生压力-剪切加载条件的技术很多，其中有两种技术，在试件中波的传播是一维的，且运动仅决定于时间及与加载表面的距离。这两种技术所以能被接受，是因为特别方便，并适合于本构模型所使用的分析和数值方法。一种技术是 Y 切割各向异性晶体，特别是 Y 切割石英晶体^[10]；另一种技术是等倾斜面冲击法。

1.1.1 Y 切割晶体 由于石英晶体的各向异性，不能沿它的 y 轴传播单一的纵向波而产生两个波结构。在晶体 y 轴方向（纵向）和 z 轴方向（横向）有质点速度变化的两个波。较快者定义为准纵向波（QL），它主要在纵向有质点速度变化；较慢者定义为准横向波（QT），它主要在横向有质点速度变化。控制 Y 切割石英厚度就能改变 QT 波相对于 QL 波的到达时间。试件同时受压缩和剪切加载（图 2），其优点是能使用垂直平面冲击技术设

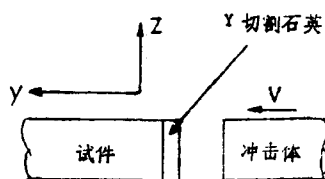


图2 压力-剪切加载，Y切割石英

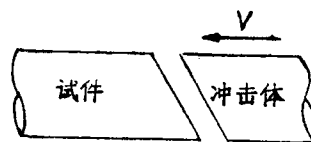


图3 压力-剪切加载，等斜面冲击

备，用单级轻气炮得到材料的压力-剪切加载。但有两个限制：一是目前生长的最大 Y 切割石英晶体直径仅约 50mm，限制了在试验中维持一维状态的试件厚度；二是纵向应力与剪应力之比是不变值，约等于 2（不过不同的各向异性晶体或不同取向的晶体能改变纵向加载与切向加载的比值）。

1.1.2 等斜面冲击^[6,9,11,12] 冲击体的冲击面相对于其轴成某一角度，且冲击具有相同倾斜面的靶板。由冲击特性知道，靶内的质点速度有平行和垂直于冲击平面的两个分量。用改变冲击斜面的角度以改变纵向质点速度与剪切质点速度之比。为了保持平面加载条件，绝不允许子弹有任何旋转。因而在炮膛内有导槽，弹体也有相应的导向装置。它的优点是允许在一个很宽的压力-剪切状态的范围内研究材料。特别是改变冲击速度和冲击角度，在材

料内能够达到固定的纵向应力与不同的剪应力相结合的应力状态。

1.2 准等熵压缩技术 轻气炮加载技术, 炸药驱动板或烈性炸药, 都可提供在材料内产生陡峭激波的方法。当冲击状态确定时, 随着压力的提高, 材料内温度也有显著的提高, 为了获得比相应的 Hugoniot 状态低的温度, 可以使用一种准等熵加载技术。目的在于获得近似冷压缩曲线。为此用熔融的硅石或玻璃陶瓷作缓冲材料^[13-16]。缓冲材料将把输入的陡峭激波变为斜波, 然而由于熔融硅石和玻璃陶瓷的应力应变行为, 它们的应用分别限制到 3 和 20 GPa。如果缓冲材料是一种激波阻抗很低的材料(替代玻璃陶瓷), 在试件中产生的激波将破碎成一系列回荡弱激波^[17]; 缓冲材料的激波阻抗愈小, 则进入试件的初始激波幅值愈小和回荡次数愈多。因此这接近于准等熵加载条件。液态氢的激波阻抗比聚合物塑料低一个数量级, 一些研究者^[18]把它用于使铜试件产生从 12 GPa 到 55 GPa 的准等熵压缩波。然而这个方法只限于研究液态氢的温度。苏联也发展和使用了这种技术^[19]。他们在靶试件的前面放一系列层状材料。层状材料一般由高阻抗-低阻抗-高阻抗材料组成^[20]。在材料中激波和卸载波交互作用产生准等熵加载, 即进入靶试件中的是一系列弱激波。苏联已应用这种技术研究聚合物丙烯酰胺(acrylamide)的活性, 压力达到 50 GPa。上述技术稍加改变的一种方案, 是将一系列层状材料加在冲击体上以产生一个斜坡加载进入靶板试样中^[19]。这一系列材料的安排使冲击体最前面的阻抗最低, 而最后边阻抗最高。组成冲击体层状系统的材料, 例如可以是有机玻璃(PMMA)-聚四氟乙烯(teflon)-铝-铜。为了保证斜坡加载条件, 每层厚度必须是最佳的。苏联已用这种技术研究聚合作用的化学反应, 并研究使石墨状氮化硼向密实的纤锌矿(wurtzite)类型结构转变的动力学, 实验压力达到 50 GPa。作为这种技术的推广, 已经提出用多层系统冲击另一个以靶板材料装配的多层系统^[21], 靶板的前面是低阻抗层。然而这种技术至今虽然完成了数值模拟, 但实验上仍未完成。最近一种称作垫块的冲击盘(pillow)^[22]已制造成功, 它可用来产生几百万大气压力(10^2 GPa)^[23]的准等熵加载条件。采用粉末冶金和沉淀技术^[24]制造垫块, 以使材料的激波阻抗沿它的厚度光滑变化。激波阻抗是沿厚度的位置函数。这样当垫块用作冲击体时, 就对靶板界面给出有限加载速率, 在这些研究工作中, 垫块的冲击表面是一种有机塑料聚烯烃。垫块的背面是铜之类的材料。垫块粘牢在铜飞片上, 以使进入靶板的峰值压力持续足够长的时间。改变冲击速度, 在试样中准等熵应力(由于聚烯烃具有弱的初始激波)可以达到 100 GPa。在垫块和靶界面处应力随时间的变化可用应力传感器(如锰铜丝或 PVDF 聚合物片)测量。垫块技术的发展已有可能使铝准等熵压缩到 9 GPa^[22], 使钨达到 78 GPa。以上提到的所有准等熵加载技术, 在试件中都产生平面压缩波。然而有些技术应用于圆柱几何形状时, 用炸药或强磁场能在圆柱体内得到高压^[23-26]。在这些技术中所得到的非常高的压力, 可从假定的状态方程计算。用闪光 X 射线照相技术测量密度至少有 10% 到 40% 的误差。Mcade^[27]等发展一种新测量技术, 用于测量固体在高压下的准静态屈服强度, 压力可以超过 60 GPa。用 NaCl 和 MgO 研究的结果表明, 随压力的增高, 屈服强度比剪切模量提高得更快。

1.3 高速发射器 高速发射装置有好多种, 如二级轻气炮^[27,28], 轨道炮^[29-31], 电炮^[32]和炸药驱动^[32-34]等, 它们都有一个共同的目标, 即提高弹速超过 10 km/s^[28,29,33,34]。Glenn 发展了随机的 Lagrange-Euler (ALE) 编码详细研究二级轻气炮的各种参数, 认为弹速超过 11 km/s 是可行的。美国目前已有几个研究组从事轨道炮的研究^[30], 集中解决炮

管壁的烧蚀,烧蚀产物的等离子体电极(plasma armature)的污染,寄生二次电弧的形成,以及炮管的精度要求和炮管接合处的设计^[29]等。美国 Idaho 国家工程实验室研制成一种平面冲击实验装置,用炸药驱动,把板厚为20—50mm,边长为180mm的正方形铜板加速到超过1 km/s,且不产生崩落。此装置对研究激波压实烧结意义很大,可代替大口径的轻气炮,花钱很少。它用数值模拟进行实验设计和分析实验结果。测量结果表明,飞板的最终速度和平行度与设计完全一致。

1.4 激光和粒子束冲击 这是近年来爆炸物理学界很热门的课题^[35-38]。利用高能激光打靶产生空前的超高压,已成为高压研究的有用工具。利用激波阻抗不匹配和不同厚度的多层靶,可使5TPa的入射压力在某一层中达到50TPa以上的超高压^[71]。辐射条件为 2×10^{14} — 1.5×10^{15} W/cm²,波长0.26 μ m,脉冲持续时间0.6ns,靶板厚几个 μ m到几十 μ m^[37]。Ng^[35]做了两个实验,一是激光照射铝膜,研究背面反射卸载波的膨胀状态;另一以熔融石英做靶,发现建立强激波的过程非常缓慢,这是一个反常现象,且随后激波波前为瞬时非稳态传播。为了研究材料中离子沉积和离子束驱动激波传播,以0.8TW Hydramite-II脉冲器为基础,研制了一种混合电路串联场感应线圈萃取离子二极管,把Al,Ni,W和Pb的薄试件暴露在聚焦强度为590J/cm²和 3×10^{10} W/cm的MeV质子束下,用微型石英应力传感器测量应力波形。在厚0.05cm的Ni试件中背表面峰值压力达12GPa,激波上升时间是5ns^[39]。用强电子束可将不敏感的炸药引爆^[40]。

2 测试技术

测试技术在压电技术,压阻技术,光学技术和电磁技术等方面均有很大的发展;在测量瞬态固体内部温度方面也有突破性进展。

2.1 压电技术 首先用于应力脉冲测量,时间分辨率和精确度都是最好的。但石英传感器限于低于或等于4GPa峰值压力,铌酸锂晶体传感器限于约1.8GPa^[41]峰值压力。由于压电晶体传感器不能满足更高峰值压力和更大测试面积(大的晶片)的要求,这使它的应用受到了限制。最近已证明,适当取向的铌酸锂晶体切片可用作高压冲击载荷下剪切波的探测器。最近研制出一种新的压电聚合物薄膜,有希望突破上述压电晶体传感器的应用范围^[43]。

聚偏二氟乙烯(PVF₂或PVDF)拉伸薄膜在外电场作用下极化后显示出压电性质,早在1969年Kawaii^[44]就观察到此现象。1978年Kepler^[45]研究表明,PVF₂聚合物具有铁电性质的极化结晶相。1982年以后Bauer等^[46-53,60]广泛研究PVF₂膜的应用,发现它在激波加载下性质有显著变化。为了提供可重复性的材料,Bauer^[43](1986)创立了Bauer极化方法。他将这种膜制造的传感器在一系列正、负周期作用的电场下进行处理,发现双轴拉伸膜比单轴拉伸膜有更优良的性质,这是因为拉伸过程对具有压电行为的极化晶体生长有重要影响。实践证明,Bauer极化方法可提供高度可重复性的压电状态和达到这种材料铁电性极化的最高记录^[40]。目前PVF₂膜的厚度已能做到26 μ m。波通过它的时间是12ns^[47,48]。应力脉冲上升的时间比这个时间长,产生的压电电流正比于应力对时间的变化率。如果进入低阻抗线路,可表示成

$$d\sigma/dt = K_i(\sigma) i(t), \quad t \gg t_0$$

其中 $K_i(\sigma)$ 由测量电流脉冲确定,是依赖于应力的电流系数, t_0 是波在传感器内通过的时

间。为了确定应力脉冲波形，对被测的电流脉冲进行积分

$$\delta(t) = K(\sigma) \int i(t) dt$$

其中 $K(\sigma)$ 由积分电流脉冲确定，是依赖于应力的电荷系数。

与其他传感器相比，PVF₂ 传感器提供一个更高阶导数，这是一个非常重要的新性能^[50]。这种传感器非常薄，尺寸可以非常小，便于埋在试件中测量应力脉冲。通常测量的应力脉冲范围可以从很低的值到 20GPa 左右。综上所述，可见 PVF₂ 压电聚合物传感器有希望在整个应力脉冲测量方面得到很大的改善^[56,57]。Samara 和 Bauer^[51] 研究了频率、温度、静水压与介电性质的关系。最近，Lee, Graham & Bauer^[52] 研制的 PVF₂ 传感器，其最大测量应力

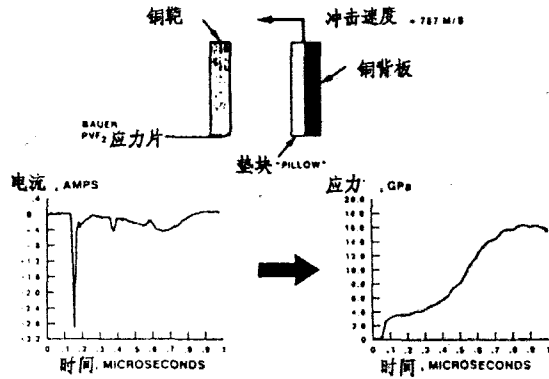


图4 用PVF₂ 传感器测量等焓加载的波形(左边是传感器测出的电流脉冲-时间的关系曲线;右边是积分后的应力脉冲)

达到 35GPa，精确度很高。把这种传感器用于激光和离子束加载条件，同样得到高的分辨率，且重复性很好。Setchell^[53] 研究了将 PVF₂ 传感器用于结构波形的测量。用它测量由熔融硅石产生的 3GPa 斜坡波-6GPa 激波-弱稀疏斜坡波-稀疏波组成的结构波，研究它的反应。并同时用 VISAR (速度干涉仪系统) 记录所测点的质点速度历史，经过计算得到轴向应力历史与 PVF₂ 的电荷历史，于是可得电荷-应力关系。并把斜坡波加载的连续电荷-应力关系与单个激波实验的结果进行了比较。Bauer & Moulard^[54] 用 PVF₂ 传感器测量粒状泰安 (PETN) 和黑索金 (RDX) 爆轰区域的应力-时间关系，给出了定量的测量结果。Bauer 用 PVF₂ 传感器在 Hopkinson 杆上测量应力-时间关系，得出定量的结果。上述情况表明，PVF₂ 传感器有很广泛的应用范围。Fogelson, Graham & Read^[55] 介绍了 Ktech 公司

和美国 Sandia 国家实验室合作研制 PVF₂ 传感器的生产技术。在 PVF₂ 膜的白金膜上镀一层金或铝以改善性能。并研制出一种计算机控制 PVF₂ 极化的仪器。

2.2 压阻技术 许多材料的电阻是随压力和温度变化的，锰铜的电阻变化对压力远比对温度敏感。因此它是测量动态压力传感器中的一个良好的候选者。然而在较低的压力范围可以用碳^[58] 或镱^[49] 制作传感器。

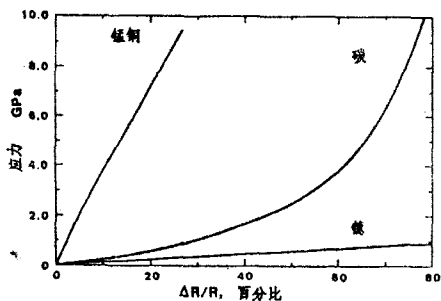


图5 激波引起锰铜、碳和镱电阻变化

如图 5 所示，对于激波加载到同一应力状态，碳和镱的电阻变化比锰铜大。实验证明应力一直到 2GPa 值，碳的电阻随应力而变化的函数都是可重复的^[59]。但在整个低应力范围内使用它，精确性有限。镱限于使用应力低于 4GPa，因为在此应力时它将近发生相变。然而已经证明锰铜可有效地用于测量 100 GPa 以上的应力值^[49]，它是在高应力时有最宽应用范围的压阻传感器。因此这里将着重介绍锰铜压阻传感器的发展。

通常采用严格控制的一维应变作实验, 标定传感器, 其电阻值与应力变化的关系如下:

$$\Delta R/R = K(\sigma)\sigma$$

这里 $K(\sigma)$ 是压阻系数。一般来说, K 决定于应力 σ ^[60], 材料的成分^[41] 和传感器的形状, 即箔膜传感器或丝传感器^[61]。箔形 (50 Ω) 传感器通常埋在材料中垂直于应力波传播的方向上。它与母体绝缘。绝缘材料可采用 Kaplon, 云母或聚四氟乙烯。可惜在较高的应力下, 大多数传感器绝缘材料的绝缘性会明显降低^[62], 从而妨碍在较高应力下传感器的标定工作。但聚四氟乙烯可在非常高的压力下保持良好的绝缘性。绝缘材料的漏电性可以通过使用低阻抗传感器减小到一定程度。在这种情况下要求锰铜传感器的初始电阻值低到 50m Ω ^[63,64]。最近, 锰铜^[65-67] 和镱^[68-70] 传感器已经用于测量一维应变加载条件下的侧向应力 (传感器放于平行冲击波的传播方向上)。锰铜传感器也已初步用于测定压缩材料中的剪切波^[72]。理论上研究锰铜和镱传感器的动态反应^[73,74] 的工作一直在进行。Partom^[75] 和 Gupta^[69] 在理论模型中提出, 传感器电阻值的变化是压阻效应和传感器塑性变形影响的结果。这些理论研究证明, 传感器的塑性变形使传感器中的应力应变状态不能反映母体材料的真实应力应变状态^[75]。这个理论分析非常重要, 因为它作侧向应力传感器, 可以了解压阻传感器的反应^[66,70]。丝传感器与箔传感器有不同的标定系数^[41,81], 锰铜传感器在卸载时观察到磁滞现象^[76], 同样可用弹塑性理论给以解释^[77]。传感器材料 (例如锰铜) 的有限屈服强度在传感器中可能引起应力释放的途径与加载途径不同, 这将引起传感器的磁滞行为^[69,78]。Rosenberg 研究了“跨越现象”, 即在一定的应力范围内横向传感器的响应可能高于纵向传感器。并证明, 当传感器的屈服强度高于母体材料的屈服强度时, 没有跨越现象^[79]。基于静态变形, 提出对冷轧锰铜箔可忽略由于塑性变形引起的电阻变化^[80]。

康铜几乎是唯一可忽略电阻值随激波应力变化的材料^[81]。然而在压应变或拉应变下, 应变片的系数约为 2^[80]。应变片系数的定义是电阻变化与传感器长度变化的比值。因此, 康铜是用作应变传感器 (片) 的材料。最近试用锰铜传感器确定材料中产生轴对称发散的应力流动时的轴应力历史^[80]。这种测量的基础是当锰铜片 (或任一压阻传感器) 放在发散的流动中, 传感器的电阻值变化是轴应力变化和应变变化 (拉伸) 二者的共同结果。为了确定拉应变值, 将康铜应变传感器安置在与压阻锰铜传感器对称的同样位置, 用以修正因应变而带来的误差, 准确地得到轴应力变化的历史。这是一个有趣的想法, 虽然需要进一步研究。这样做的一个基本假定, 是康铜片所测量的应变与母体材料在锰铜片处的应变是同样的。虽然这个假定似乎是真实的, 仍然需要进一步研究此测量的可靠性和精确度。

2.3 电磁技术 电磁质点速度传感器技术是基于法拉第感应定律。长为 l 的导体在磁场强度为 B 的磁场中运动将产生一电动势 E , 它正比于运动速度 u :

$$E = l \cdot (u \times B)$$

在一维应变条件下, 即在平面波冲击的材料中, 如果传感器元件、质点速度方向和磁场向量相垂直, 那么通过测量感应电压 $E(t)$, 并由关系式 $u(t) = E(t)/lB$, 就可直接给出质点速度 $u(t)$ 。这种技术的精确度取决于它们相互垂直度的精度, 以及局部磁场强度的测量精度和传感器的有效长度。如果母体材料在高应力下不变成导体, 则传感器适于埋在试件内。实际上应考虑传感器元件的厚度和磁场边缘的影响, 以及传感器元件、磁场和质点速度流场三者之间完全达到相互垂直的困难所带来的影响。这种技术的一个重要特点是传感器可放置于

试件中的不同位置, 允许用 Lagrange 波分析以确定相关的应力-比容行为。把 $35\mu\text{m}$ 厚的普通传感器埋在蓝宝石中冲击加载到 60GPa , 响应时间估计是 30ns ^[82]。这种传感器已成功地

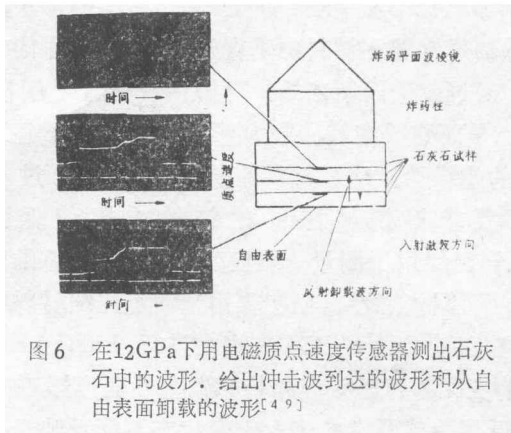


图6 在 12GPa 下用电磁质点速度传感器测出石灰石中的波形. 给出冲击波到达的波形和从自由表面卸载的波形^[49]

用于某些材料以确定加载和卸载状态, 例如用于熔融硅石可测量压力高达 22GPa ^[83], 对岩石和矿物则可达 40GPa ^[84]。这些研究报告指出, 确定高应力下质点速度时约有 2% 的误差。

这种技术也同样有效地用于研究烈性炸药的起爆^[85]。在 Tarver 等^[86]的工作中电磁质点速度传感器与锰铜片传感器结合起来使用。Vorthman^[87]等则把电磁质点速度传感器与电磁脉冲传感器结合起来使用, 后者的电动势是测量到的应力对时间的积

分^[88,89]。把这种传感器埋在绝缘材料中测量双轴应变加载特别具有吸引力^[8], 特别是在一维压力-剪切加载的条件下^[90], 电磁质点速度传感器可用于确定与压力-剪切波相联系的纵向质点速度和剪切质点速度, Gupta^[91]和 Swegle^[92]已经详细地描述了这种技术。在压力-剪切加载中把垂直于冲击表面的方向定义为 x 轴, 把剪切波质点速度的方向定义为 y 轴, 然后把传感器元件放在冲击平面中 (yz 平面), 并垂直于 x 和 y 轴, 即沿 z 轴 (这不是必要的, 如此做是为了简化)。如果磁场取向是平行于 xy 平面, 它有分量 B_x 和 B_y , 则电动势 E 为

$$E = l(u_x B_y - u_y B_x)$$

式中 u_x 和 u_y 分别是质点速度的纵向分量和剪切分量, 它们可由具有相同冲击结构图但有不同 B 分量的两个实验结果的联立解来确定。特别是如果磁场选为平行或垂直于冲击界面, 那么每个实验将相应地产生 u_x 和 u_y 。这种传感器用来探测有机玻璃 PMMA^[93] 和多晶三氧化二铝中的压力-剪切波^[63]。

2.4 光学技术

2.4.1 光学干涉仪

对于在冲击波作用下确定材料表面运动来说, 激光器的出现使光学干涉仪成了很有吸引力的技术。在用于激波研究的所有干涉仪系统中最常用的两种干涉仪是 VISAR 和 Fabry-Perot 速度干涉仪^[94-98]。这两种系统既有区别又有相似之处。它们都使用 Doppler 频移光从一个具有反射表面的靶板反射或漫射。漫射时两个系统对表面的倾斜度都不敏感。在两种情形中干涉条纹的灵敏度都决定于延迟时间。对于 VISAR 系统, 是在 Michelson 干涉系统的一个光路内使用玻璃标准器或组合棱镜来达到延迟时间。而一套距离为 L 的 Fabry-Perot 板为 Fabry-Perot 系统提供了必要的延迟。VISAR 的时间分辨率由延迟光路系统使用的延迟时间决定, 然而 Fabry-Perot 板的时间分辨率由光子充填时间来决定^[48]。

在标准的 VISAR 系统中, 漫射靶反射光束等分成两条光束, 形成宽角 Michelson 干涉仪的两个不同的光路, 其中一路相对于另一路时间延迟一个周期 τ 。玻璃校准器或棱镜系统用在干涉仪的延迟光路中产生一个瞬时的延迟。而且保持两个光路有相同的视路长度。当两个光

束叠加时, 干涉仪中产生条纹 $F(t)$, 它与反射表面的速度变化有一定关系^[13,106]如下:

$$u\left(t - \frac{1}{2}\tau\right) = \frac{\lambda}{2\tau} \frac{F(t)}{(1+\delta)(1+\Delta\nu/\nu)}$$

λ 是使用的波长, δ 是与波长有关的校准器折射指数的相关项 (使用熔融硅石校准器时, 波长为 514.5nm, 完成必要的延迟时其 $\delta = 0.034$, 而用组合棱镜时 $\delta = 0$)。 $\Delta\nu/\nu$ 是光学修正项, 修正的原因是因为窗口材料的折射指数随冲击应力而变化^[13]。如果测量是在自由表面进行, $\Delta\nu/\nu$ 为 0。对各种窗口材料 $\Delta\nu/\nu$ 值列于表 1。关于激光干涉仪窗口材料的使用在后面将讨论。在 VISAR^[96] 中为了消除加速信号的模糊度和提高条纹分辨率, 已采用 90° 相位差编码。加一个四分之一波光程差板和一个偏振光分离器使之分开成两个条纹信号, 其

表 1

| 窗口材料 | $\Delta\nu/\nu$ | 应力范围 (GPa) | 参考文献 |
|----------|-----------------|------------|------|
| 自由表面 | 0 | — | — |
| PMMA | 0.002—0.012 | 0.1—1.2 | 13 |
| PMMA | 0.003—0.005 | 5.3 | — |
| PMMA | 0 | 9.4—12.3 | 47 |
| PMMA | 0 | 22 | 102 |
| 熔融硅石 | 0.06—0.03 | 0—8.7 | 13 |
| Z 切蓝宝石 | 0.78—0.75 | 0—15 | 13 |
| 氟化锂 | 0.25—0.27 | 1.5—10 | 104 |
| 氟化锂 | 0.281±0.009 | 10—115 | 104 |
| 氯化锌 (溶液) | 0.03—0.08 | 2.0—24 | 103 |

相位差为 90°。这些条纹信号是借助于光电倍增管记录的。此外也可用扫描照相机记录条纹^[106]。VISAR 的峰值表面速度近似为 0.1km/s 时, 其精度是 2%。速度越高, 得的干涉条纹就越多, 因此精度也越高。Amery 研制了一种空气延迟光路棱镜干涉仪, 允许有更长的延迟时间, 因而在测量速度低于 0.02km/s 时可提高灵敏度。分析 VISAR 的数据是非常复杂的, 一般为了得到较高的精确度需要用计算机处理。由于在实验中产生非相干光源, 所以减小光束强度信号对时间的依赖, 增加条纹信号幅值是对原始的 VISAR^[96] 的一个重要改进^[106]。为了计算激波压缩中镜面的反射变化 (条纹信号), 在 VISAR 系统中分别监测光束强度。

Fabry-Perot 速度干涉仪。离开运动表面的多普勒频移光通过一组距离为 L 的平行平板

(Fabry-Perot 板), 然后使用球形棱镜成象, 成圆形干涉花纹, 或通过电子扫描照相机的狭缝形成一些点的轨迹。条纹直径可通过改变棱镜焦距或调节 Fabry-Perot 板之间距离来控制。当离开运动靶板的光频率变化时, 干涉条纹直径将从静态值 D_1 变化到一个新值 D_1' , 由下述关系式可以计算运动表面的速度:

$$v = \frac{c\lambda}{4L} \left(\frac{(D_1'^2 - D_1^2)}{(D_2^2 - D_1^2)} + m \right)$$

其中 λ 是光的波长, D_2 是下一个干涉图象的静态干涉直径, c 是光速, m 是一个整数。当激波加载时干涉条纹突增的数目可以通过 m 控制 (通过预先对 v 的了解), 或通过调节条纹常数 $c\lambda/4L$ 得到具有最少条纹突增数目的速度。系统的精度在 0.1% 到 2% 的范围内变化。它取决于板的间隙、条纹突增数和使用棱镜的焦距。数据处理是简单的。估计速度波形仅需估计作为时间函数的 D_1 。这种干涉仪系统的应用, 曾在 1983 年英国 Paisley SPIE 会议上进行过综述^[49]。

2.4.2 窗口材料 原则上使用激光速度干涉仪进行测量, 被测的质点速度 (或应力) 没有上限。实际上由于自由表面不稳定, 如激波波前到达自由表面引起喷溅^[107], 则被测自由表面速度是有限的。为此, 通常将光学透明材料粘到试样上, 测量质点速度是在试件和窗口材料界面上完成的。只要窗口材料的激波阻抗与试件材料的近似, 那就可模拟所在点的条件。窗口材料必需是光学透明的, 并且随激波应力的变化其折射指数的变化是能定量确定的。目前经过光学标定的固体窗口材料有有机玻璃 (PMMA), 熔融硅石, Z 切向蓝宝石^[13,108] 和氟化锂^[104]。此外, 一种含水的氯化铯溶液也已用作窗口材料^[103]。

对 PMMA 窗口材料的应力上限已确定为 22GPa^[102], 在此以上透明度有降低。虽然没有报道熔融硅石中透明度有降低, 但将它用于弹性极限 8.7GPa 以上^[108], 干涉条纹的对比度有相当大的降低^[116]。Z 切向蓝宝石光学标定达到它的弹性极限 15GPa^[13], Z 切向蓝宝石激波压缩实验达到 43GPa^[49]。而当应力超过 90 到 170GPa 时干涉条纹对比度都大大降低^[111]。最近同样证实 Z 切向蓝宝石应力大于 30GPa, 即使斜坡加载其条纹对比度也降低。显然蓝宝石不适用于在 30GPa 应力以上用作激光干涉仪的窗口材料, 应当指出, 在激光发

光研究中激波应力达到 80GPa, 蓝宝石仍被用作透明窗口砧^[118]。对这种透明度明显降低的物理机理尚需澄清, 以分辨这两种不同类型实验的矛盾结果。单晶氟化锂窗口材料用作激光干涉仪窗口, 其透明度在应力达到 160GPa 时仍很满意^[40], 对它从 1.6 到 115GPa 的应力范围内的光学性质已进行了描述^[104]。氟化锂似乎是最通用的窗口材料, 在很高的应力下可与激光干涉仪一起使

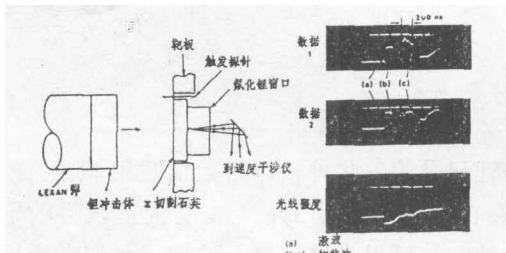


图 7 石英/氟化锂窗口界面在 123GPa 时 VISAR 干涉条纹纪录。图中 a 为激波到达处, b 和 c 是稀疏波反射, 冲击体是钨^[112]

用 (见图 7)。当与高阻抗材料如钨一起使用时能完成应力高于 600GPa 的状态方程的研究。

LiF 作为激光干涉仪窗口材料, 其使用的应力上限尚未确定。事实上, LiF 在强激波压力和温度下同样是透明的, 这表明它应当是绝缘体。在这种条件下希望保持电绝缘性质, LiF 显然是最好的候选者。氟化锂窗口材料和激光干涉仪相配合, 可以研究应力到百万巴的材料性能, 如研究铝的强度^[114], 研究超石英到低密度相的可逆相变动力学^[111], 应力达到 80GPa 的钨的等熵压缩,

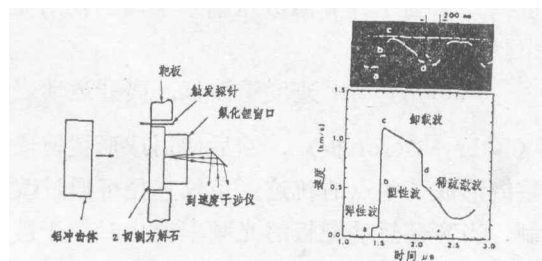


图 8 方解石/氟化锂窗口界面在 18GPa 时 VISAR 干涉条纹纪录和速度波形, 干涉仪的时间分辨率非常高, 可在方解石中单值确定稀疏波^[113]。

Z 切向方解石在18GPa时的稀疏激波 (图8) [113], 等等。

2.4.3 纤维光学干涉仪 随着纤维光学技术的发展, 可通过使用多模态硅石/硅类型的光纤传输激光和接受来自运动靶板的光 [115,116]。纤维直径为0.2—0.6mm。棱镜放在纤维的两端, 相隔距离等于棱镜焦距。使用这种布置方案, 当纤维放在离开运动靶板 40mm 处时, 靶板上一个较大的空间范围被照明 [116]。可以并排放两根纤维, 一根传输光信号, 另一根从靶板接收光信号, 反射光通向Fabry-Perot 干涉仪。研究结果已证明, 信号通过光学纤维传输, 比通过空气传输有更好更清晰的干涉图象 (图9)。此外, 一个静态干涉条纹图形可以叠加在动态干涉图形上 (作为从纤维前端反射的结果)。光学纤维电缆传输光有很多优点: 操作安全, 在电磁干扰的环境下和遥控条件下 (如爆炸产物或电磁脉冲引起的干扰), 可不受干扰地传输信号。

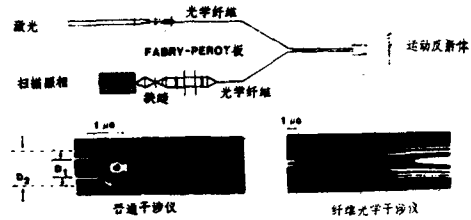


图9 运动反射体的 Fabry-Perot 干涉记录. 两个不同记录表明, 用光学纤维传输信号, 可得高质量的干涉条纹图象 [116]

2.4.4 激光干涉技术用于测试 横向运动

近 10 年来多种技术已用于研究材料的动态压力-剪切加载 [6,9,10,11]。随之也研究出了许多干涉技术用于确定压力-剪切加载引起的横向运动 [6,117,118]。下面简要介绍横向位移干涉仪 [117] 和剪切波速干涉仪 [118]。它们的干涉条纹灵敏度高, 且能用一条入射激光束在同一位置同时测出纵向和横向运动, 因而能得到更普遍的使用。

横向位移干涉仪 是将一个垂直于横波传播平面的衍射光栅放置在试件的自由表面上。这通常使用光刻胶技术来完成。当一条激光束垂直入射在这个衍射光栅上时, 产生一条垂直于这个衍射光栅的反射光束和一条按 $n\lambda = d \sin \theta_n$ 给定的成 θ_n 角的衍射光束。 d 是衍射光栅的间隙, n 是衍射的顺序, 取正或负的整数值。当与入射光束对称配置的两条衍射光束重新合并时, 由横向位移 y 引起的相位变化 $\Delta\phi$ 为

$$\Delta\phi = 4\pi ny(t)/d$$

并且条纹灵敏度 (即每一条纹的横向位移) 由 $d/2n$ 给出。典型的条纹灵敏度是每一条纹低于 $1\mu\text{m}$ 。干涉条纹的灵敏度可用改变 d 和/或 n , 以及监测横向位移衍射光束的次序来控制。用以上所述激光干涉技术可直接监测垂直反射光束以得到压力-剪切加载引起的纵向运动参数。使用这种技术确定的横向位移是完全与纵向运动分开的。因此可以在大的垂直位移下增高发现剪切运动的灵敏度。

剪切速度干涉仪 在实验上很类似于横向位移干涉仪。一条激光束垂直入射在一个衍射光栅上或一个表面上预先刻线的镜面上以得到垂直反射光束和衍射光束, 与上面所介绍的一样。所不同的是用VISAR监测每一个有角度 $\pm\theta$ 的单独光束。在干涉仪内产生的 $F_{\theta\pm}$ 干涉条纹正比于自由表面速度的纵向分量 $U(t)$ 和剪切分量 $V(t)$ 的线性和 [118], 并由下列关系式给出:

$$\frac{\lambda}{2\tau} \frac{F_{\theta\pm}(t)}{(1+\delta)} = \frac{1}{2} U(t)(1+\cos\theta) \pm \frac{1}{2} V(t)\sin\theta$$

如使用二台VISAR在 $\pm\theta$ 角监测两条光束, 则纵向速度和剪切速度就可用上述两个方程同时确定, 用具有空气延迟光路的 VISAR, 确定 $V(t)$ 的精度接近2%, 图 10 给出在铝中得到的

纵向和横向质点速度波形。

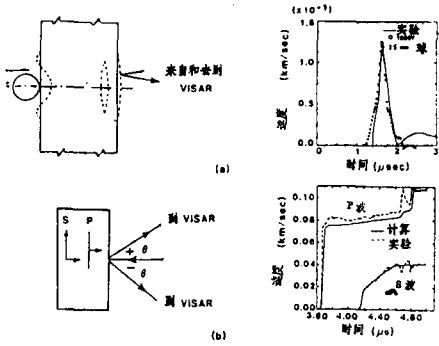


图 10 实验图形和速度波形 (a) 超高速冲击产生散流流动的条件下, 用VISAR干涉技术得到速度波形^[119]; (b) 在压力-剪切加载条件下确定平面内的运动^[10]

2.4.5 激波发光: 光学高温测量 以上讨论的光学技术是基于用外光源的激光干涉仪原理用于测定与应力波传播相关的质点速度。除动态压缩引起应力-体积变化外, 同样引起材料的内能变化。本小节提到的技术是利用材料被冲击到高压时, 有大量辐射的有利条件, 来推断被冲击材料的温度。测量这种温度, 有可能对状态方程的参数进行关键性的测定, 并确定冲击状态下材料熔化的界限。Kormor等^[120]在1965年最早提出这种技术测定碱金属的卤化物被冲击到高压所产生的温度。但经过很长时间以后, 由于仪器的时间分辨率和光谱技术得到进一步发展,

才使这种技术有可能应用^[121-123]。Lyzenga & Ahrens^[121,143]将发射的辐射经滤波进入波长范围从450nm到800nm的六个通道, 用硅光电二极管进行纪录(如图11所示)。并用标准钨丝灯来标定被测的辐射以确定光谱辐射强度 N_λ 。使用Plank辐射函数

$$N_\lambda = \epsilon C_1 \lambda^{-5} [\exp(C_2/\lambda T) - 1]^{-1}$$

用最小二乘法拟合 N_λ 作为波长 λ 的函数的测量值。得到辐射系数 ϵ 和辐射体的温度 T (C_1 和 C_2 是常数)。McQueen & Fritz^[122]

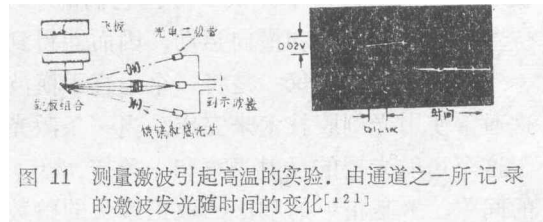


图 11 测量激波引起高温的实验。由通道之一所记录的激波发光随时间的变化^[121]

使用超高速扫描照相机, 以硝基甲烷中的爆轰波作为标准, 基于发射的辐射是一个黑体源(即 $\epsilon = 1$)的假设, 确定发射体的温度。测量温度的误差为2%到5%。这种技术用于测定高应力辐射体温度, 且在2000K到6000K温度范围是有效的。由于6000K以上可见光谱对温度不敏感, 所以这种方法不很准确。最近, 这种技术已用于测定激波在透明材料中引起的温度^[124-128], 被压缩材料的热辐射可以通过透明材料未受激波作用的部分观察到。然而在低应力范围, 由于明显的非均匀变形^[129]、摩擦发光和崩落破坏^[130,129], 辐射光谱不再是黑体的激波发光。作为这种技术的延拓, 红外测温方法已得到发展^[141,142]。例如, 通过透明窗口(KBr)在相对低的应力下观察炸药热点温度以确定爆轰反应带的结构^[131]。然而, 观测到的红外辐射光谱一般难以解释, 需要补充表面的分帧照相以确认是否同一辐射源。

2.4.6 激波发光: 光学分析仪 基于激波发光原理使用光学分析仪的技术, 可以测定稀疏波到达的时间^[122], 激波引起的发光强度对应力幅值是敏感的, 因为发光正比于温度的4次幂。在平板冲击实验中, 激波同时进入靶体和冲击体中, 如果冲击板是以低激波阻抗材料做背面, 在冲击板中的激波将反射稀疏波。稀疏波前沿将以材料的弹性波速行进, 它远快于进入靶板内激波行进的速度, 若试样靶板是薄的, 在试样/光学分析仪界面处激波保持压力的时间将比较长。若冲击体的厚度不变, 则随试样厚度的增加, 在界面上激波保持压力的时间将缩短, 存在靶厚的一个临界尺寸, 在此尺寸时, 激波和由冲击体背表面反射的稀疏波

同时到达试样和光学分析仪的界面，即在此界面上保持压力的时间为零。如果 x_c 是靶的临界尺寸， x_1 是冲击体的厚度，则可证明稀疏波前沿 Lagrange 波速 C_L 由下式决定

$$C_L = U_S (R + 1) / (R - 1)$$

这里 U_S 是激波波速， $R = x_c/x_1$ 。为了简化，假定为对称的冲击加载条件。实验上使用爆炸加载技术^[122]，在10个不同的试样/分析仪界面位置上记录激波辐射的强度以测定激波保压时间 Δt ，可以很精确地推断（0.5%）临界靶板尺寸。使用光学纤维传输辐射信号到光电倍增管，它的输出用示波器记录。由确定被冲击材料中的声速，可确定熔化边界或相边界。这很难在激波速度-质点速度关系，即激波 Hugoniot 曲线上观察到。这种技术已用来在铁^[132]、钽^[133]和2024铝合金^[134]中探测熔化边界。溴仿、熔融石英和高密度玻璃通常在上述研究中用于光学分析。要求分析仪是光学透明的。要求在感兴趣的应力范围内象黑体一样发射辐射。Al'tshuler 等采用同样技术，即用测量靶板的自由表面速度和测定主激波衰减的靶板厚度，以确定冲击状态下弹性稀疏波速和剪应力。速度干涉仪技术^[101]，轴对称传感器^[136]和埋入传感器^[137]同样是测定激波状态下的声速，并由此推断冲击状态下材料的熔化边界的适合方法。

2.4.7 激波发光：光纤探针 光纤探针用作测量波到达时间的指示器得到了有效的发展。光纤探针种类很多，其中一种形式是在光纤的一端粘一个直径 0.25mm 的充满惰性气体（如氩或氪）的小球，一个强激波压力脉冲加热小球内的气体而产生闪光，并借助于光纤送到记录系统。记录系统可以是光电二极管，光电倍增管或高速扫描照相机，整个装置用金属外壳屏蔽保护小球和减少光信号散射。如冲击实验中，一个平头弹丸以速度 0.2km/s 冲击探针，用光电倍增管测出的闪光信号上升时间是 80ns，则冲击速度愈高，可设想上升时间会愈短，闪光信号会愈强。这种探针已用于在炸药中测定爆轰速度^[138]，同样用于可产生 20MJ 电能和超过 50MA 电流（图12）的磁流压缩发生器^[139]。这种探针的一些有效特点是：①它是被动式的，即不象电探针那样需要自己的外电源；②它对电和磁是惰性的，因此当将它用于象轨道炮那样有很强电磁脉冲的环境下时，它对电噪声的干扰是不敏感的。

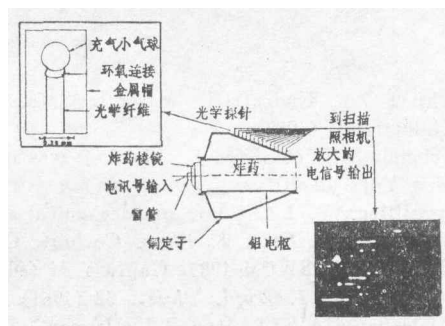


图 12 用于诊断磁流压缩发生器的光纤探针

2.5 动态云纹干涉 这是一种较新的实验技术，从 1980 年实际应用以来，它的应用已指数式地增加。静态的云纹干涉能以连续的形式同时在 $x, y, x-y$ (剪切) 方向对平表面上的位移采样。在空间点其灵敏度可到 $10\mu\text{m}$ 以下。3 年前 Idaho 国家工程实验室把云纹干涉技术推广到瞬态变形的情况，在弱激波加载条件下（由 0.3—3kbar）测量结果与静态情况一样好。Deason^[140] 讨论了静态和动态云纹干涉的理论以及在瞬态条件下采样的限制。并给出在石墨/环氧复合材料中测量弱激波所引起的界面位移场，以及在 1018 钢中裂纹尖端的弹性波衍射的位移图象。

2.6 热偶箔或金属箔测量固体内部温度 冲击载荷下测量固体内部温度，要求传感器在毫秒以至几十毫微秒的时间间隔内测出真实温度，时间间隔大小取决于载荷持续时间。这个

课题很重要, 因为研究固体材料的状态方程需要了解热参数——温度。如果能测出温度, 则可以完全从实验上确定状态方程^[144]。Duvall^[4]指出, 在状态方程的研究中, 在实验上当前所面临的重大任务就是测温。对研究靶板破坏机理来说温度也是必不可少的重要参数之一^[145]。测量固体内部瞬态温度的困难在于如何减小感受元件的热惯性(即提高其反应灵敏度), 降低或消除噪声干扰和定量确定压力效应。Yuan^[146]设计一种特殊热偶以减小感受元件的热惯性。他们以金属靶板作为热偶的一极, 再配以其他金属丝作为另一极。两极接触点为热点。这种方法由于需钻孔以插入另一极丝, 所以影响测点周围的应力、应变场, 并且在变形过程中很难确定热点处的状态, 因而未得到广泛使用。Bloomquist^[147-151]等用热偶箔的方法研究测量固体内部温度。他们用的热偶箔厚 $5\mu\text{m}$ 。Rosenberg^[152,153]等把热偶箔的厚度改为 $0.5\mu\text{m}$ 以减小感受元件的热惯性。此外, 利用金属箔电阻值随温度变化的特性, 研究了镍箔^[164]、铜箔^[155]和银箔用于测量固体中的瞬态温度, 其厚度范围从 $1\mu\text{m}$ 到 $5\mu\text{m}$, 但这些感受元件都仅适于在加载速度低, 载荷维持时间很长的条件下, 而在状态方程和侵彻力学的研究中, 往往需要在微秒或微秒以下的短时间测出固体中的瞬态温度。笔者和同事们^[156]在严格理论分析的基础上, 采用真空镀膜方法研究出 $100-500\text{\AA}$ 厚的热偶箔, 能在微秒时间内测出固体中的瞬态温度, 成功地测出聚能射流侵彻钢板或复合材料板时, 弹坑附近靶板中的温度分布, 并对 PMMA 有机玻璃进行了激波压缩温度测量。实验结果与按 McQueen 方法^[144]计算出的温度一致。

高速摄影和脉冲 X 光照相技术在爆弹力学的研究领域中的应用近年来更加普及和巧妙。研究工作多集中于提高测试精度和照片的清晰度, 以及改善仪器本身的结构, 以提高使用灵活性和轻便性, 并降低成本。但就其功能来说没有引人注目的新突破。

参 考 文 献

- 1 Chiem C Y, Kunze H D, Meyer L W (eds). Int. Conf. on Impact Loading and Dynamic Behavior of Materials (1987)
- 2 Schmidt S C, et al (eds). Shock Waves in Condensed Matter-1987 (SWCM-1987), North-Holland, New York (1988)
- 3 Remillieux Y. Int. Conf. on Mechanical and Physical Behavior of Materials under Dynamic Loading (DAMAT 88), *J. Phys. Colloq.*, C3 Suppl. to No. 9 (1988): 126
- 4 Duvall G E. SWCM-1985, Gupta Y M (eds) (1985): 1-12
- 5 Fowles G R. *J. Appl. Phys.*, **32** (1961): 1475
- 6 Abou-Sayed A S, Clifton R J, Herman L. *Exp. Mech.*, **16** (1976): 127-132
- 7 Young C, Dubugnon O. *Exp. Mech.*, **17** (1977): 470-477
- 8 Koller L R, Fowles G R. High Pressure Science and Technology. Plenum Publishing, New York, **2** (1979): 927-934
- 9 Gupta Y M, Keough D D, Henley D, Walter D F. *Appl. Phys. Letters*, **37** (1980): 395-397
- 10 Chhabildas L C, Swegle J W. *J. Appl. Phys.*, **51** (1980): 4799-4807
- 11 Mashimo T, Ozaki S, Nagayama K. *Rev. Sci. Instrum.*, **55** (1984): 226-230
- 12 Chartaquac P F, Jimenez B. *Revue Phys. Appl.*, **19** (1984): 609-618
- 13 Barker L M, Hollenbach R E. *J. Appl. Phys.*, **41** (1970): 4208-4226
- 14 Asay J R, Chhabildas L C. *High Pressure and Technology*, **2** (1980): 958-964
- 15 Setchell-Iacour M, et al. SWCM-1981 (1981): 481
- 16 Setchell R E. *Combust. and Flame*, **54** (1983): 171-182
- 17 Chhabildas L C, Hills C R. Metallurgical Applications of Shock Wave and High Strain Rate Phenomena (1985, Marcell Decker, Inc) (Murr L E, Staudhammer K P, Meyers M A, eds) (MASWHSP-1985) (1986): 429-448

- 18 Bordzilovskii S A, Gershkov N N. *Combust. Explos. and Shock Waves*, **13** (1977) : 375—379
- 19 Adadurov G A, Goldanskii V I. The Condensed Matter Transformation Under the Shock Wave Induced Compression at Different Extent of Approach to the Isoentropic Conditions, In Backman C M, Johannisson T, Teger L. VI, Arkitektkopia Sweden (1982) : 18—32
- 20 Adadurov G A, et al. *Combust. Explos. and Shock Waves*, **9** (1973) : 499—501
- 21 Lyzenga G A, Ahrens T J. SWCM-1981 (1982) : 231—235
- 22 Barker L M. SWCM-1983 (1984) : 217—224
- 23 Grigorov F V, et al. *JETP Letters*, **16** (1972) : 201
- 24 Hawke R S, et al. *J. Appl. Phys.*, **43** (1972) : 2734—2741
- 25 Pavloskii A I, et al. *JETP Letters*, **27** (1978) : 264
- 26 Matveev V V, Prut V V, Khrabrov K K. *Soviet Tech. Phys. Lett.*, **4** (1978) : 221—222
- 27 Meade C, Jeanloz R. *Bull. Am. Phys. Soc.*, **32** (1987) : 1395
- 28 Glenn L A. SWCM-1987 (1988) : 653—656
- 29 Hawke R S. SWCM-1987 (1988) : 643—648
- 30 Hawke R S, et al. *IEEE Trans. on Magnetics*, MAG-22, **6** (1986) : 1830—1832
- 31 Hawke R S, Nellis W J, Newman G H, Rego J, Suseoff A R. *IEEE Trans. on Magnetics*, MAG-22, **6** (1986) : 1510—1515
- 32 Korth G E, Williamson R L. SWCM-1987 (1988) : 669—672
- 33 Steele R D, Tan T H. *Bull. Am. Phys. Soc.*, **32**, **6** (1987) : 1389
- 34 Tan T H, Fritz J N, Marsh S P, Mcqueen R G, Steel R D. SWCM-1987 (1988) : 665—668
- 35 Ng A. SWCM-1987 (1988) : 767—772
- 36 Wark J S. SWCM-1987 (1988) : 781—786
- 37 Cottet F, Marty L, Romain J P, Hillouin M, Fabbro R, Fabal B. *Bull. Am. Phys. Soc.*, **32**, **6** (1987) : 1377
- 38 Kulkarny V A, Kendall D R. *ibid*: 1377
- 39 Hanson D L, Matzon M K. SWCM 1987 (1988) : 777—780
- 40 Demske D, Brazell N, et al. SWCM-1987 (1988) : 773—776
- 41 Graham R A, Asay J R. *High Temper. High Press.*, **10** (1978) : 355—390
- 42 Gupta Y M, Murri W J. SWCM-1981 (1982) : 525
- 43 Bauer F. U.S. Patent 4611260, Sep. 9 (1986)
- 44 Kawaii H J. *J. Appl. Phys.*, **8** (1969) : 975
- 45 Broadhurst M G. *J. Appl. Phys.*, **49** (1978) : 4992—4997
- 46 Bauer F. SWCM-1983 (1984) : 225—228
- 47 Lee L M, Williams W D, Graham R A, Bauer F. SWCM-1985 (1986) : 497—502
- 48 Graham R A, Lee L M, Bauer F. *Bull. Am. Phys. Soc.*, **31** (1986) : 823
- 49 Chhabildas L C, Graham R A. Tech. and Theory of Stress Measurements for Shock Wave Applications, Stout R B (eds) (1987) : 1—18
- 50 Perez M, Tougne D. *J. Phys. Colloq. C5*, **46**, Suppl. to No. 8 (1985) : 655—660
- 51 Samara G A, Bauer F. SWCM-1987 (1988) : 611—614
- 52 Lee L M, Graham G A, Bauer F. SWCM-1987 (1988) : 619—622
- 53 Setchell R E. SWCM-1987 (1988) : 623—626
- 54 Bauer F, Moulard H. SWCM-1987 (1988) : 627—630
- 55 Fogelson D J, et al. *ibid*: 615—618
- 56 Bauer F. Techniques and Theory of Stress Measurements for Shock Wave Application, Stout R B, Norwood F R, Fournay M E (eds), AMD-Vol. 83 (1987) : 19—28
- 57 Urtiew F A, Erckson L M. *ibid*: 29—36
- 58 Horning R R, Isbell W M. *Rev. Sci. Instrum.*, **46** (1975) : 1374—1379
- 59 Perez M, Chartagnac P. *Rev. Sci. Instrum.*, **51** (1980) : 921—925
- 60 Keough D D, Wong J I. *J. Appl. Phys.*, **41** (1970) : 3508—3515
- 61 Rosenberg Z, Yaziv D, Partom Y. *J. Appl. Phys.*, **51** (1980) : 3702—3705
- 62 Graham R A. *J. Phys. Chem.*, **83** (1979) : 3048—3056
- 63 Vantine H, Chan J, Erickson L, Janzen J, Weingart R. *Rev. Sci. Instrum.*, **51**(1980): 116—122
- 64 Grady D E, Murri W J, Fowles G R. *J. Geophys. Res.*, **79** (1974) : 332—338
- 65 Kaned G E, Vakhitova G E, Dremin A N. *Combust., Explos. and Shock Waves*, **14** (1978): 244—248
- 66 Rosenberg Z, Partom Y. *J. Appl. Phys.*, **58** (1985) : 3072—3076

- 67 Chartagnac P F, *J. Appl. Phys.*, **53** (1982) : 948—953
- 68 Gupta Y M, *J. Appl. Phys.*, **54** (1983) : 6256—6266
- 69 Gupta Y M, *J. Geophys. Res.*, **88** (1983) : 4304—4312
- 70 Gupta S C, Gupta Y M, *J. Appl. Phys.*, **57** (1987) : 2464—2473
- 71 Faral B, Fabbro R, Virmont J, Cettot F, Romain J P, SWCM-1987 (1988) : 761—765
- 72 Rosenberg Z, Bless S Y, *J. Appl. Phys.*, **59** (1986) : 3926—3930
- 73 Barsis E, Williams E, Skoog C, *J. Appl. Phys.*, **41** (1970) : 5155—5162
- 74 Grady D E, Ginsberg M J, *J. Appl. Phys.*, **48** (1977) : 2179—2181
- 75 Partom Y, Yajiv D, Rosenberg Z, *J. Appl. Phys.*, **52** (1981) : 4610—4616
- 76 Yajiv D, Resenberg Z, Partom Y, *J. Appl. Phys.*, **51** (1980) : 6055—6057
- 77 Rosenberg Z, Partom Y, *J. Appl. Phys.*, **58** (1985) : 1814—1818
- 78 Rosenberg Z, Partom Y, *J. Appl. Phys.*, **58** (1985) : 5084—5086
- 79 Nellis W J, SWCM-1987 (1988) : 43
- 80 Chen D, Gupta Y M, Miles M H, *J. Appl. Phys.*, **55** (1984) : 3984—3993
- 81 Rosenberg Z, Partom Y, Mayselless M, Folcovitz J, *J. Appl. Phys.*, **56** (1984) : 1434—1439
- 82 Mashimo T, Sawaoka A, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **20** (1981) : 963—970
- 83 Sugiura H, Kondo K, Sawaoka A, *Rev. Sci. Instrum.*, **52** (1981) : 3375—3382
- 84 Grady D E, High Pressure Research, Applications in Geophysics, Akimoto S, Manghnani M H (eds) . Academic Press (1977) : 389—438
- 85 Cowperthwaite M, Rosenberg J. T. Eighth Symposium (International) on Detonation, Short J M, Deal W E (eds) (1985) : 987—998
- 86 Tarver C M, Hallquist J O, Erickson L M, *ibid*: 884—892
- 87 Vorthman J, Andrews G, Wackerle J, *ibid*: 976—986
- 88 Fowles G R, Dynamic Response of Material to Intense Impulsive Loading, Chou P C, Hopkins A K (eds) (1972) : 405—480
- 89 Marri W J, Curran D R, Pelersen C F, Crewdson R C, Advances in High Pressure Research, V, 4, Academic Press, NY (1974) : 1—163
- 90 Gupta Y M, Keough D D, Walter D F, et al, *Rev. Sci. Instrum.*, **51** (1980) : 183—194
- 91 Gupta, Y M, *Appl. Phys. Lett.*, **29** (1976) : 694—697
- 92 Swegle J W, *J. Appl. Phys.*, **49** (1979) : 4280—4281
- 93 Gupta Y M, *J. Appl. Phys.*, **51** (1980) : 5352—5361
- 94 Barker L M, High Speed Photography, Videography and Photonics, Proc. SPIE, Paisley D L (eds) (1983) : 116—126
- 95 Goosman D R, Frameck A M, Chan H H, Parker N L, *ibid*: 127—135
- 96 Barker L M, Hillenbach R E, *J. Appl. Phys.*, **43** (1972) : 4669—4675
- 97 Johnson P M, Burgess T J, *Rev. Sci. Instrum.*, **39** (1968) : 1100—1103
- 98 Durand M, Laharriague P, Lalle P, Lebihan A, Morvan J, Pujois H, *Rev. Sci. Instrum.*, **48** (1977) : 275—278
- 99 Bauer F, MASWISL-1985 (1986) : 1071—1082
- 100 Barker L M, Schuler K W, *J. Appl. Phys.*, **45** (1974) : 3692—3693
- 101 Asay J R, Hayes D B, *J. Appl. Phys.*, **46** (1975) : 4789—4800
- 102 Chhabildas L C, Asay J R, *J. Appl. Phys.*, **50** (1979) : 2749—2756
- 103 Wise J L, SWCM-1983 (1984) : 317—320
- 104 Wise J L, Chhabildas L C, SWCM-1985 (1986) : 441—454
- 105 Bloomquist D D, Sheffield S A, 15th High Speed Photography Proc. SPIE, Endelman L (ed) (1982) : 523—528
- 106 Hemsing W F, *Rev. Sci. Instrum.*, **50** (1979) : 73—78
- 107 Asay J R, Mix L P, Perry F C, *Appl. Phys. Letters*, **29** (1976) : 284—286
- 108 Setchell R E, *J. Appl. Phys.*, **50** (1979) : 8186—8192
- 109 Chhabildas L C, Grady D E, SWCM-1983 (1984) : 175—178
- 110 Setchell R E, *Combust. Flame*, **43** (1981) : 255—264
- 111 Chhabildas L C, SWCM-1985 (1986) : 601—605
- 112 Urtiew P A, *J. Appl. Phys.*, **45** (1974) : 3490—3493
- 113 Grady D E, SWCM-1985 (1986) : 589—594
- 114 Asay J R, Chhabildas L C, Trucano T G, Kerley G I, SWCM-1985 (1986) : 145—149
- 115 Durand M, High Speed Photography and Photonics, Proc. SPIE, Andre M, Hugenschmidt M,

- (eds) (1984) : 650—656
- 116 Gidon S, Garcin G, Behar H. *ibid*: 894—898
- 117 Kim K S, Clifton R J, Kumar P. *J. Appl. Phys.*, **48** (1977) : 4132—4139
- 118 Chhabildas L C, Sutherland H J, Asay J R. *J. Appl. Phys.*, **50** (1979) : 5196—5201
- 119 Lipkin J, Kipp M E. *J. Appl. Phys.*, **47** (1976) : 1979—1986
- 120 Kormer S B, et al. *Sov. Phys. JETP*, **21** (1965) : 689—700
- 121 Lyzenga G A, Ahrens T J. *Rev. Sci. Instrum.*, **50** (1979) : 1421—1424
- 122 McQueen R G, Hopson J W, Fritz J N. *Rev. Sci. Instrum.*, **53** (1982) : 245
- 123 McQueen R G, Fritz J N. SWCM-1981 (1982) : 193—207
- 124 Lyzenga G A, Ahrens T J, Nellis W J, Mitchell A C. *J. Chem. Phys.*, **76** (1982) : 6282—6286
- 125 Lyzenga G A, Ahrens T J, Mitchell A C. *J. Geophys. Res.*, **88** (1983) : 2431—2444
- 126 Nellis W J, Mitchell A C. *J. Chem. Phys.*, **73** (1980) : 6137—6145
- 127 Nellis W J, Ree F H, Trainor R J, Mitchell A C, Boslough M B. *J. Chem. Phys.*, **80** (1984) : 2798—2799
- 128 Boslough M B, Ahrens T J, Mitchell A C. *J. Geophys. Res.*, **89** (1984) : 7845—7851
- 129 Brannon P J, Morris R W, Konrad C H, Asay J R. SWCM-1983 (1984) : 303—306
- 130 Graham R A, Brooks W P. *J. Phys. Chem. Solids*, **32** (1971) : 2311
- 131 Von Holle W G. SWCM-1983 (1984) : 283—291
- 132 Brown J M, McQueen R G. *Geophys. Res. Letters*, **7** (1980) : 324
- 133 Brown J M, Shaner J W. SWCM-1983 (1984) : 91—94
- 134 McQueen R G, Fritze J N, Mooris C E. SWCM-1983 (1984) : 95—98
- 135 Al'tshuler L V, Brazhnick M I, Telegin G S. *J. Appl. Mech. Tech. Phys.*, **12** (1971) : 921—926
- 136 Fritz J N, Morgan J A. *Rev. Sci. Instrum.*, **44** (1973) : 215—221
- 137 Grady D E, Murri W J, Decarli P. *J. Geophys. Res.*, **80** (1975) : 4857—4861
- 138 Benjamin R F, Mayer F J, Maynard R L. *Fiber Optics in Adverse Environments* 11, Proc. SPIE (1984) : 116—121
- 139 Carid R S, Benjamin R F, McQueen R G, Erickson D J. *ibid*: 122—126
- 140 Eqstein J S, Deason V A. SWCM-1987 (1988) : 707—710
- 141 Perez M, Costeraste J. SWCM-1987 (1988) : 703—706
- 142 Miller P J. *Bull. Am. Phys. Soc.*, **32**, 6 (1987) : 1395
- 143 Svendsen B, Ahrens T J, Bass J D. *ibid*: 1383
- 144 McQueen R G, et al. High Velocity Impact Phenomena (1970) : 294—419
- 145 Cheng Chemin, Tan Qingming, Gao Juxian, Ye Dongying, Wu Yuyan. Proc. of the Intern. Sym. On Intense Dynamic Loading and Its Effects, Cheng Chemin, Ding Jing (eds), Science Press, Beijing (1986) : 347—351
- 146 Yuan S W, Billingsley J P. *Appl. Sci. Res.*, **24** (1071) : 32—37
- 147 Bloomquist D D, Sheffield S A. *Bull. Amer. Phys. Soc.*, **24** (1979) : 714—719
- 148 Lmaoka K, Kondo K, Sawaoka A. *Jpn. J. Appl. Phys.*, **19** (1980) : 1011—1014
- 149 Mishimo Tsutomu, Hanaoka Yasuharu, et al. *J. Appl. Phys.*, **52** (1981) : 5176—5181
- 150 Bloomquist D D, Duvall G E. *J. Appl. Phys.*, **50** (1979) : 4830—4834
- 151 Bloomquist D D, Sheffield S A. *J. Appl. Phys.*, **51** (1980) : 5260—5268
- 152 Rosenberg Z, Partom Y. *J. Appl. Phys.*, **55** (1984) : 3999—4005
- 153 Rosenberg Z, Partom Y. *J. Appl. Phys.*, **56** (1984) : 1921—1926
- 154 Rosenberg Z, Partom Y. *J. Appl. Phys.*, **52** (1981) : 6133—6136
- 155 Bloomquist D D, Sheffield S A. *Bull. Am. Phys. Soc.*, **26** (1981) BB 7
- 156 Gao Juxian, Bai Rongshang, Cheng Chemin. SWCM-1987 (1988) : 639—642

RECENT DEVELOPMENT OF EXPERIMENTAL TECHNIQUE ON EXPLOSIVE MECHANICS

Gao Ju-xian

Institute of Mechanics, Academia Sinica

Abstract Recent developments of experimental and measuring technique on explosive mechanics are summarized in this paper.

Keywords *pressure-shear loading; quasi-isentropic compression technique; hypervelocity launcher; laser and particle beam-shock interaction; pressure measurement; velocity measurement; displacement measurement; instantaneous temperature measurement; piezo-resistant technique; piezoelectric technique; optical interferometry; fiber optics; laser interferometric technique; optical pyrometry; fiber-optic probe; dynamic moire interferometry; foil thermo-couple*

《力学词典》将于1990年出版

为适应科学技术发展和教学、科研、生产、科技交流的需要,中国大百科全书出版社继1985年出版《中国大百科全书·力学》卷后,应广大读者建议,组织中国力学界著名专家、学者、教授编撰了具有权威性的科技工具书《力学词典》,并将于1990年上半年出版发行。

《力学词典》编撰工作是在以钱伟长、钱令希、郑哲敏、林同骥、朱照宣为首的中国大百科全书力学编辑委员会指导下进行的,是中国力学界集体智慧的结晶。

《力学词典》全面系统地收集了教材、专著、文献、情报资料以及科技交流和工程技术中常见的各种力学名词、术语近3000条,给出了确切定义,叙述了实质内容,介绍了实际应用,言简意赅,深浅适度。

《力学词典》词目按汉语拼音字母顺序排列,并附有词条分类目录、词目汉字笔画索引以及英汉、汉英词目对照索引。还编有包括物理、力学重要常数、参数、单位换算、张量运算等内容专业性附录。总字数约100万。

《力学词典》资料翔实,便于检索,是大中专理工农医等方面学科师生必备的案头工具书,也是各大中学校图书馆和厂矿企业、研究机构、情报编辑部门资料室必备的工具书。它的编辑出版将为传播力学知识,繁荣基础和应用科学,促进教学、科研、生产、科技交流发挥重要作用。

《力学词典》征订工作将于年内进行,届时将通过各种渠道征订。单位和个人也可来函(北京阜成门北大街17号中国大百科全书出版社力学组 邮政编码100037)索取订单。

卢鼎震 供稿