

# 冲击压缩——极端条件下研究物质结构的有效方法\*

彭 商 强

(四川大学材料科学系, 成都 610064)

**摘 要** 文章从原理及应用等方面介绍了研究材料在高温高压下物质结构变化的一种实验方法. 借助该方法, 可以比较方便地研究在 100 GPa—1000 GPa 压力下及几个电子伏特温度下材料的特性及内部结构变化情况(1eV—11600 K).

**关键词** 实验技术, 冲击压缩, 极端条件, 物质结构

## 1 冲击压缩实验技术发展的历史回顾

随着科学技术的发展, 人们对物质结构的了解越来越深入. 研究各种极端条件下物质结构的变化及特性, 已成为当今科学研究的主要课题之一. 极端条件包括: 高温、高压、低温、高真空、强磁场、强辐射等. 物质在极端条件下的性状, 一般可归结为力学性质、电学性质、磁学性质、光学性质和化学性质等方面的响应特性. 高压技术的发展, 为高压下物质行为的实验研究提供了重要的前提. 利用油压机产生的静高压技术, 可获得几十—100 GPa 的压力, 但这是远远不够的. 超高压需借助动高压装置, 它可以提供直到 TPa 数量级高压和 $10^4$ — $10^5$  K 高温的实验条件. 在如此高的压力和温度下, 物质将表现出极其奇特的性质. 由此发展了高压物理这门学科.

1940 年以前, 研究高压下物质性态的技术仅限于 10 GPa 以下的静高压技术. 自从冲击波作为一种科学研究工具被引入凝聚态物质在高温高压下响应特性研究以来, 人们先后采用化学炸药、压缩气体、高功率激光或粒子束能量快速沉积以及核炸药等各种形式的能源, 发展了多种强冲击波技术. 目前, 压力高于 10 GPa 和低于 1 TPa 范围的脉冲加载技术已很成熟, 化学炸药和压缩气体炮(包括一级和二级轻气炮)得到了广泛应用<sup>[1]</sup>.

到本世纪 50 年代, 对脉冲载荷作用下凝聚

态物质响应特性的研究, 还局限于从冲击波速度和自由面(或飞片)速度的测量入手, 采用离散式测量技术——闪光隙高速扫描摄影和接触电探针. 进入 60 年代, 上述测量手段经过改进, 提高了测量精度, 时间分辨率小于 1 ns, 空间测量精度达  $2\mu\text{m}$ , 使冲击波速度和波后粒子速度的测定误差分别达到 1% 和 1%<sup>[1]</sup>. 到 70 年代, 研究冲击波作用下凝聚态物质的光学和电、磁学响应特性的测量技术得到了发展, 以适用于任何反射面的速度干涉仪(VISAR)<sup>[2]</sup>和轴对称磁探测器(ASM)<sup>[3]</sup>为代表的分辨测量技术, 开拓了高温高压下冲击波剖面时间分辨测量的新天地. 电子计算机的同期发展, 也为研究高温高压下凝聚态物质的响应特性提供了有利条件.

在如此高的冲击压力下, 物质一般表现出流体(fluid)的性质. 冲击压力下分子流体的物性变化, 其内在原因是分子结构甚至原子结构发生了变化. 因此, 通过对冲击压力下流体的研究, 可在分子间相互作用和分子内部能级甚至分子结构的变化规律方面, 提高人们的认识能力. 此外, 通过对它的研究, 还可在研究冲击波诱导爆轰现象及冲击波测量技术的发展等方面, 起到积极的推动作用. 通过对冲击状态下的冲击波传播速度及冲击温度的测量, 还可推知物质内部的结构变化及所发生的化学反应.

\* 1995 年 11 月 8 日收到初稿, 1996 年 1 月 29 日收到修改稿.

## 2 冲击压缩实验技术的原理

动高压具有瞬时性,不能较长时间存在,一般由冲击碰撞或爆轰实现,即由冲击波或爆轰波瞬时加压.前者可借助一级或二级轻气炮实现,后者则需炸药爆轰提供.下面以轻气炮为例说明动高压的加载原理.

二级轻气炮是一种实验室动高压设备,由火药室、泵管、活塞、高压容器、发射管、碰撞室及靶等部分组成(如图1所示).火药室与泵管是分离的,泵管内充有一定量的轻气(氢气或氦气).实验时,由点火器将火药点燃,火药室形成的高压气体冲破膜片1进入泵管,迅速推动活塞运动而压缩泵管内气体,使其压力和温度骤然上升.随着活塞向右运动,泵管内形成的冲击波在活塞与膜片2间来回反射.冲击波达到一定强度时,膜片2将瞬时破裂,高压气体随之迅速涌入发射管,推动弹丸高速运动,最后平稳地撞击靶板,对靶进行冲击压缩.

图1 二级轻气炮装置示意图

值得指出的是,发射管和靶室约需1.3 Pa的真空度,以消除弹丸和靶板间气体的影响.碰撞表面需精密抛光,光洁度为0.5 μm,碰撞倾角一般不大于0.03°.

通过对弹丸速度及冲击波在样品中的传播速度的多次测量,可以确定出样品中的冲击压力、声速、摩尔体积、波后粒子速度及比内能变化情况,若同时测量样品的冲击温度和电导率,则可推知样品内部的化学反应及原子分子的结构变化情况.

## 3 冲击压缩实验技术的应用实例

应用二级轻气炮,可以研究各种固体和液体材料在瞬时动高压状态下的特性及结构变化

情况,包括各种金属材料和非金属材料,亦包括常态和低温状态.

图2示出了应用二级轻气炮研究透明液体材料在高温高压下结构变化的实验装置,其中弹丸速度由一套电磁感应装置测试<sup>[4]</sup>.冲击波进入样品后,样品被压缩而发光,光信号由装置后面的光缆输送至示波器接收并记录(对固体材料或非透明液体材料,则只能采用电探针法进行测量).图3为冲击波传播波系图.测量出样品厚度及冲击波在样品中的传播时间,便可计算出样品中冲击波的传播速度.由弹丸速度及冲击波速度可计算出样品中波后粒子速度;由粒子速度、冲击波速度及样品密度,并根据Rankine-Hugoniot方程,可计算出样品在冲击压缩状态下的压力、比体积及比内能增加值.Rankine-Hugoniot方程为<sup>[5]</sup>

$$\begin{aligned} P - P_0 &= \rho (u_s - u_{p0})(u_p - u_{p0}), \\ V &= V_0 [1 - (u_p - u_{p0}) / (u_s - u_{p0})], \\ E - E_0 &= 0.5 (P + P_0) (V - V_0), \end{aligned}$$

式中 $P$ ,  $\rho$ ,  $u_s$ ,  $u_p$ ,  $V$ ,  $E$ 分别表示压力、密度、冲击波速度、粒子速度、比体积和比内能,下标“0”表示初始状态下的值,其余表示冲击压缩终态的值.结合冲击温度及电导率的测量,便可推知在各压力下物质的结构变化.

图2 实验装置示意图

图3 冲击波传播波系图

图4示出了三溴甲烷在85 GPa压力下的 $P - (V/V_0)$ 曲线,图5给出了相应压力下的冲击温度,图6为电导率值.

图4 冲击压缩下三溴甲烷的压力 - 相对比体积关系

图5 冲击压缩下三溴甲烷的冲击温度

由这些实验数据,我们可以定性地分析出三溴甲烷随压力升高过程中的结构变化情况:

(1)在 55 ~ 60 GPa 的压力范围内,三溴甲烷发生了相转变,因此时其对应体积跃变高达 12%,故属一级相变,相变的本质是分子的离解.此时冲击温度显示出一瞬时放热反应过程,经分析是由自由基复合放出热量产生的“冲击致热”现象所致,即  $\text{CHBr}_3$  分子离解为 C - H 和 Br 原子,C - H 再进一步离解为 C 原子和 H 原子,而 C 原子之间形成相对稳定的 C = C 键,H 原子之间也形成相对稳定的 H - H 键而放出较大能量,使本来应为吸热过程的离解反应表现为放热过程.(2)冲击状态下,三溴甲烷的导电载流子是电子而不是离子,由三溴甲烷分子整体电离产生,因不到 50 GPa 的压力,还不可能离解产生离子.三溴甲烷分子的电离具有可逆性,因而电导率有一极大值,其电导率比常态上升 9 ~ 10 个数量级.至于 49 GPa 时出现的电导率下降的趋势,则可能是由于因热涨落先期离解的 C - H 键中的 C 原子俘获部分电子,使载流子浓度降低所致.

图6 冲击压缩状态下三溴甲烷的电导率

## 4 结束语

任何现象的发生均有其内在的原因,人们只能通过已有的方法和技术手段获取其部分信息,推测其内部结构的本质.但自然现象牵涉到方方面面的知识,需要各学科知识的综合考虑才能揭示其内在规律.

通过前面对冲击压缩方法原理及应用的分析可以看出,在常规研究物质结构方法的基础上,加入高温高压这一实验条件,无疑使人们对各种条件下物质结构的变化了解得更加全面深入;同时,对人们认识各种高温高压下(如地球及行星内部条件等)物质特性及结构变化也具有现实指导意义.利用冲击压缩方法,除研究液态物质外,还可研究固态及气态物质.目前,该方法已可广泛应用于对各种金属和非金属材料的研究,其研究精度正随测量技术的提高而不

断提高.由此看来,冲击压缩确实不愧为研究物质在高温高压这一极端条件下物质结构变化的有效方法.

**致谢** 文中应用实例的研究工作是在西南流体物理研究所冲击波物理及爆轰物理重点实验室完成的,得到了胡金彪、王金贵、周显明等同志的大力支持与帮助;结果分析是在四川联合大学 清泉教授与中国工程物理研究院经福谦院士的联合指导下进行的.作者在此一并致以衷心的感谢.

## 参 考 文 献

- [1] 金孝刚,科技学报(爆轰学会议专集),2(1983),19.
- [2] L. N. Barker, IUTAM Symposium, Paris, (1967).
- [3] J. N. Fritz, *Rev. sci. Instrum.*, **44**(1973), 2.
- [4] 施尚春、陈攀森、黄跃,高压物理学报, 5(1991), 205.
- [5] 经福谦等,实验物态方程导引,科学出版社, (1986), 80.

# 光折变晶体在全息干涉实验中的应用\*

胡 秀 琴

(山东教育学院数理系, 济南 250013)

**摘 要** 文章介绍了光折变晶体的物理特性,综述了用铌酸锂晶体作为记录介质的各种全息干涉实验.

**关键词** 光折变晶体,全息干涉测量

全息干涉测量的方法可表述为:选定物体某一状态为参考状态,用全息的方法记录参考全息图,然后使置于原光路中处于任意状态的物体光波与参考全息图的衍射波相干涉,由此形成的干涉条纹将变化的物光波与不变的参考全息图的衍射波相比较,从而得到物体状态的变化信息.这种方法可归结为“包含两束或更多束的光波与它们之中的至少一个重建光波相比较的方法.”全息干涉测量精度高,尤其是可对变化的物理量(如热量、声波的变化,空气流或压力梯度的变化)在不影响物体状态的情况下

进行动态的观察和测量,甚至可以得到定量的结果.因此这种方法在空气动力学、热和质量的传导、应力分析以及等离子体动力学等方面有着许多重要的应用,是现代分析测量技术的一个有力的手段.在全息干涉测量中,采用光折变晶体替代感光胶片或干板作为记录介质,是近年来国际上流行的一个新的研究方向,本文介绍光折变晶体的物理性质和采用  $\text{Fe LiNbO}_3$

\* 1995年4月18日收到初稿,1995年6月25日收到修改稿.