

# 同步辐射在高压研究中的应用<sup>1)</sup>

修立松

(中国科学院高能物理研究所, 北京 100039)

**摘要** 简述了高压研究的科学意义和同步辐射在高压研究中的作用, 介绍了国内外同步辐射在高压研究中的应用情况及研究方法。

**关键词** 同步辐射, 高压研究, 应用

## 1 高压研究的科学意义

压力、温度和成分是物质存在的三个基本状态参数。改变温度或成分是研究物质性质、改善物质的性能的常用手段。同样研究物质在高压下的状态也可以得到常压下难以制备的新材料。在人类的生存空间里, 物质一般处于常压(即~1大气压)。高压下的物质状态只有通过特殊的手段才能获得, 所以直至本世纪50年代金刚石对顶砧技术发明之后, 高压科学才得到很大的发展<sup>[1,2]</sup>。如今, 可研究的压力范围已达到百万大气压以上<sup>[3]</sup>。

压力的增加, 使物质的原子间距缩小, 原子结构和电子壳层状态发生变化, 从而使它们的光、电、磁等物理性质改变。高压作为一种典型的极端物理条件, 可以使人们了解高压下的物理现象和性质, 发现一些只有在高压环境下才能揭示的新现象、新规律、新物质、新性能, 并为深入研究常态下的物性提供了新的途径。因而, 研究高压下的物质状态是凝聚态物理学中的一个重要的分支, 并渗透到大多数凝聚态物理学的前沿课题中。

高压研究的科学意义不仅体现在物理学基础研究中, 而且还在于它在材料、能源乃至国防等方面的应用背景。通过高压淬火, 可获得有用的亚稳相, 这是材料研究的常用方法, 用这种方法可以获取其他方法(如高温淬火)所不能或很难得到的新相。石墨在高温高压时可转变成

金刚石已为人们熟知。高压淬火与温度控制相结合是直接制备块状纳米晶合金的有效途径。绝缘体的金属化是高压研究的前沿课题, 有人从理论上预言: 极高压下分子氢将形成亚稳相——致密的金属氢, 它还可能是室温超导体, 若用它来替代目前的液态氢做火箭的助推器, 可使比冲提高七倍。

高压研究与我们生活的地球也有密切的关系。地球的内部就是一个处于高温高压条件下的物质体系。弄清楚下地壳、地幔乃至地核物质的存在状态和状态方程, 可以帮助我们了解地球内部各层圈的化学成分、矿物组成元素的存在形式和富集、迁移的规律, 以及更准确地解释地震波探测的资料, 从而丰富人们关于地球内部结构、各层圈(尤其是层圈界面)的性质、地震成因和地球演化过程的知识。

## 2 同步辐射在高压研究中的作用

物质结构是物理性质的基础, X射线衍射是研究物质结构的有效方法。高压环境下的X射线衍射与普通X射线衍射的不同之处在于: (1)高压下X射线须经过高压腔体的吸收; (2)高压下样品体积小。受压力腔体材料强度的限制, 为维持的压力越高, 高压腔体所能容纳的样品体积就越小。用普通X射线光源在几十万大气压的高压下进行的X射线衍射, 其分辨率和

1) 1995年6月25日收到。

实验时间都不能满足实际的需要。即使在压力较低的范围,用普通光源也难以进行动态反应的研究。对于百万大气压下的结构研究,普通光源就更无能为力了。

同步辐射光源具有高亮度、低发散度等优点,它能产生能量高达数十keV的连续X射线光谱。自1979年人们开始尝试用同步辐射X射线进行高压实验以来,高压下的结构研究就与同步辐射紧密地联系在一起。同步辐射光源的实现为高压研究提供了理想的光源,使得高压下结构的测量更精确,使研究的压力范围拓展至百万大气压以上,还使得研究高压下的物质结构变化的动态过程成为可能。同步辐射为国际上高压研究的发展起到了关键的作用。目前,世界上主要的同步辐射光源上都开展了高压研究工作。西欧国家联合在法国建造的第三代光源 ESRF 和日本的第三代光源 SPring-8 的科学规划中,高压研究也都占有重要的地位。

在同步辐射上进行的高压研究方兴未艾,其内容包括凝聚态物理、天体物理、材料科学、地球科学、化学等学科的许多前沿课题。在高压下物质的相变研究中,用同步辐射光源定出了一些以前无法解释的同质异构体。在几十到上百万大气压下的物质高压行为的研究,使人们对物质高压下的性质有了进一步的了解,为高压下物质的能带、电子结构、相变等的理论提供了依据。这成为同步辐射上进行高压研究的热点。在金属化相变的研究方面,美国科学家已观察到惰性气体氙(Xe)的金属化相变,氢金属化研究也不断取得进展,据报道在250万大气压时氢已变得不透明了,进而使研究氢的原子结构非同步辐射光莫属<sup>[4]</sup>。日本科学家在日本的光子工厂原位观测了石墨在高压高温下转化成金刚石的相变过程,帮助人们从理论上理解和预言相变过程。半导体材料在高压下的电学、光学性能都有跳跃性变化,它与材料在高压下的结构变化分不开。目前对硅高压下行为的同步辐射X射线衍射研究所用压力已达248万大气压<sup>[5]</sup>。英国科学家还对一些III-V族和II-VI族半导体的高压结构进行了研究,测定

了一系列的高压相<sup>[6]</sup>。

同步辐射X射线高压下的结构研究相对而言是较新的方法。高压是改变物质存在状态的一种重要的手段,同步辐射为人们观察这一特殊状态提供了一个有力的方法。两者的结合,必将带来新的发现,因而得到了国际上各国科学家的普遍重视。欧洲联合建设的第三代光源 ESRF 去年第一条束线出光后,高压下的物质结构研究是首选的实验内容。高压作为改变物质三个存在状态之一的压力的手段,现有的研究深度远不及温度与成分,高压下物质状态的研究随时可能出现突破性的进展。

我国的高压研究起步于60年代。70年代后期,吉林大学、中国科学院物理研究所和地质研究所等单位也开展了金刚石对顶砧(DAC)高压装置的研究。1989年,中国科学院物理研究所的DAC装置压力达到了136GPa(136万大气压),其峰值压力达178GPa,在压力手段上进入了世界先进水平。与此同时,我国的高压研究在凝聚态物理学、稀土材料、超硬材料等方面作出了有特色的工作。但由于光源的限制,相应的高压结构研究及原位测量高压反应的工作难以开展。自1989年北京同步辐射装置(BSRF)建成并运行后,中国科学院物理研究所等单位与高能物理研究所合作初步建立了同步辐射高压X射线能量色散方法<sup>[7]</sup>,并开展了一些研究工作,如C<sub>60</sub>高压非晶化、CsCl的状态方程、高T<sub>c</sub>氧化物超导体的高压研究、下地幔矿物的状态方程等研究项目,得到的结果已经是普通光源所无法达到的。

### 3 同步辐射高压实验方法和对光源的要求

同步辐射上的高压装置有DAC和多压砧型大压机设备两种。前者辅以高温(电阻丝加热和红外激光加热)和低温(液氮、液氦)实验设施,可进行极端条件下的物质结构研究。后者的压力范围较低(~十几万大气压),适应各种高温高压合成材料的动态结构研究。

从X射线衍射实验方法来讲,在高压实验中可用白光能量色散法和单色光角分辨衍射。对应的探测手段需用能量分辨探测器和灵敏度高、分辨率好、动态范围大的探测器,如成像板技术<sup>[8,9]</sup>。由于极端压力条件下的样品量少及压力容器限制的原因,衍射实验较多采用能量色散的方法,但该方法分辨率受探测器的限制,而且散射背底复杂。单色光角分辨衍射实验分辨率高,数据的分析方法比较成熟,但该方法对光源的要求高,成像板系统的价格较贵。

同步辐射光源高亮度、低发散度、高稳定性等优点,为高压研究提供了良好的光源。为满足高压实验的要求,除要求光源的高亮度外,对高压实验站的X射线有以下特殊要求:(1)有能量上可达60keV以上的连续X射线,使能量色散方法有足够的测量范围;(2)能量高于20keV的高亮度单色光,用于单色光实验;(3)光斑能限制到10 $\mu$ m的尺度。

#### 4 第三代同步辐射光源上高压研究的科学目标

我国目前只能在BSRF上进行高压下衍射实验。但BSRF是第一代同步辐射光源,其光源质量和用光时间远不能达到研究工作的需要。目前的状况在实验质量上和时间上都难以使我们的高压研究工作参与国际竞争。

第三代同步辐射光源对高压科学的研究有巨大的推动作用,具体表现在:(1)拓宽研究的

压力范围(百万大气压以上);(2)丰富高压下的研究手段,如单色光衍射、高压下单晶衍射、X射线吸收边、X射线荧光等实验方法;(3)提高分辨率,用全谱拟合的方法从实验曲线上计算高压下的结构;(4)可以进行动态结构变化的研究。这些研究方法的实现,将使高压学科的研究进入一个更高的层次,并带动相关学科的发展。

总之,一个性能优越的第三代同步辐射装置对我国的高压科学以及相关的凝聚态物理学、材料科学、地球科学以及其他应用学科的推动作用将是巨大的,也是这些学科参与国际竞争的必要条件。在我国早日建成第三代同步辐射光源必将使我国的高压科学的研究在21世纪进入一个新的阶段。

#### 参 考 文 献

- [1] A. Jayaraman, *Rev. Modern Phys.*, **55**(1993), 65.
- [2] D. J. Dunstan and I. L. Spain, *J. Phys. E:Sci. Instrum.*, **22**(1989), 913.
- [3] Arthur L. Ruoff et al., *Rev. Sci. Instrum.*, **61**(1990), 3830.
- [4] Ho-kwang Mao and Russell J. Hemley, *Rev. Modern Phys.*, **66**(1994), 671.
- [5] Steven J. Duclos et al., *Phys. Rev.*, **B41**(1990), 12021.
- [6] A. San-Miguel et al., *Phys. Rev. B*, **51**(1995), 8731.
- [7] 车荣征等,科学通报,**39**(1994),1471.
- [8] O. Shinomura et al., *Rev. Sci. Instrum.*, **63**(1992), 976.
- [9] R. J. Nelmes et al., *Rev. Sci. Instrum.*, **63**(1992), 1039.