

高技术

高压——现代科学的一门新技术

High-Pressure —— A New Technique in Modern Science

陈晋阳 郑海飞 曾贻善

(北京大学地质学系 北京 100871)

高压技术破土而出

高压技术是最近 20 多年来才发展起来的一门新技术,它的出现立即在物理学、化学、材料科学、地球科学等学科领域中获得了极大的应用与发展。目前已经设计出了高达 550 GPa 的高压设备,并且建立起来一系列物性的研究方法。

原子间距是决定物质凝聚态的最基本参数之一。压强的最基本效应是改变原子间距而引起物质性质的变化。因此,压强是物质性质研究的一个重要组成部分,高压是控制物质的物理和化学性质的变化以及它们之间相互联系的一种愈来愈重要的手段,是现代科学研究中的一个决定性的变量。

出于理论和实际的需要,高压实验技术出现了双向发展的趋势。

一方面,为了满足工业生产的需要,以利于合成新型材料等等,设计建造了具有较大腔体积的大吨位压机,如年轮式和多顶砧式高压装置等。此类装置的最高压力一般不超过 30 GPa,但是高压腔体积可以达到几个立方毫米至 10^6 立方毫米。这类装置称为高压大腔体实验设备。

另一方面,在获得更高压力的同时为了进行各种物性的原位测量,正向小型化方向发展,在此类装置中设计了各种测量“窗口”,配合各种现代化的精密仪器对高压下物质的光学、力学、电学,以及磁学等性质进行测量。其中具有代表性的对顶砧金刚石压腔装置的最高压力已达到了 550 GPa,而腔体体积仅为 $10^{-1} \sim 10^{-4} \text{ mm}^3$ [1]。

高压的发展和应用大大地扩展了人们的视野。由于可得压力的不断提高,再加上各种先进的测试手段(光与中子衍射、快速光谱以及回旋加速器等),使得人们进行高压下精密的物性测量成为可能,这些高压理论与实验方面的一些新进展,正逐渐改变着人们的观念,使得人们能够考虑和从事某些具有深远意义的课题的研究。

高压研究方法

高压下的物质表现出许多新的效应,诸如新相的出现、新物质的产生、电子和离子新的有序态的形成等等,通过利用现代化的实验研究方法,可以对高压下物质所出现的种种新特性进行详细研究。

1. 高压下物质电阻率的测定

物质的电学性质,尤其是电阻率在高压下发生突变的特性,不仅是用来进行高压标定的一个重要的次级方法,同时也是确定物质发生相变的重要依据之一。与其它的研究方法配合使用,便可确定物质发生相变过程的诸多信息。另外,在目前比较活跃的压致超导的研究中,高压电阻率就更是一个必不可少的测量变量。电阻值的测量目前一般是使用高阻计或者是精密电位差计来进行的,其中测量电路的设计是一个关键部分。

2. 高压谱学的研究方法

物质的各种光谱学性质与物质微粒的结构和电荷分布状态密切相关,通过测量物质在高压下的各种光谱学数据,给人们认识高压下物质的特性提供了许多很有用的信息,特别是在高压功能材料的研究中各种谱学的应用更是必不可少。由于谱学是利用物质与各种光的作用关系来进行研究的,因此,这些方法都要求腔体材料对光有良好的透过性,目前它们主要是用于金刚石压腔的高压装置中。

(1) 高压布里渊散射的测量方法

入射光进入样品后,由于与样品中声学声子的相互作用,使得入射光发生频率的位移,此种现象即布里渊散射。进行高压布里渊散射的测量,可以获得高压下物质的声速,从而求得压力与样品的弹性模量等的关系。这种方法在地球科学中有着重要的应用,为认识地球内部的弹性特征与地震波的关系提供了重要的依据。目前多数采用毛河光等设计的金刚石压腔的布里渊散射高压装置。

(2) 高压傅立叶转换红外光谱法

由于金刚石压腔的体积小、样品量少,再加上金刚石本身对光的部分吸收,使得采用一般棱镜—光栅的红外光谱仪的灵敏度很低。傅立叶红外光谱仪中使用了一个迈克尔干涉仪代替棱镜—光栅系统,不用光栅和狭缝,从而使光的损失减少、信噪比提高,所获得的红外光谱的强度也就得以大大地提高;同时傅立叶红外光谱仪能够进行连续扫描,可以得到每个时间点上所有波长的光,从而缩短测量的时间。目前在金刚石压腔中都是使用傅立叶红外光谱仪来进行红外光谱测量,以取得高灵敏度和快速的测量效果。这些装置可以获得较大的压力和温度范围内的近红外以至远红外的光谱线,所得的测量结果对于了解高压下物质的结构以及弹性特征和热力学参数的推导都具有重要的意义。

(3) 高压激光拉曼光谱法

在对顶砧金刚石压腔中,由于压机的制约,拉曼光谱的散射光只能按压砧的锥口或活塞的锥口出射,所以光谱仪与压机一般只能采取 0 和 180 的几何配置方式。激光经过一个小棱镜后入射到试样上,样品发出的光与入射光成 180 的方向散射到单色仪的狭缝上,从而得到拉曼光谱线。在实际应用中,目前通常是把一台显微镜和一台激光拉曼光谱仪结合起来使用,以提高灵敏度和精确度。在此装置中,入射光经过显微镜的反射镜改变一个 90 的方向后,再射向样品,散射光经过显微镜的物镜收集后,再反射到拉曼光谱仪上。

(4) 高压穆斯堡尔谱法

铁离子具有较好的穆斯堡尔效应,测出高压下含铁物质的穆斯堡尔效应,可以获得物质中铁的磁性、自旋性,以及价态的重要信息,从而可能推断出物质的压力—感应关系。高压穆斯堡尔光谱法设计的关键性因素是调节 γ 射线流的强度和准直性,以使最高度集中的和尽可能最强的 γ 射线流与样品发生作用。

3. 高压 X—射线衍射法

高压 X—射线衍射法主要是用于金刚石压腔的高压装置中,可以用来进行压致相变、状态方程、晶体结构等方面的研究。其优点是小巧灵活,可以与多种 X—射线源相配合,弱点是样品小、衍射线收集的时间长。照相法是最传统也是最早采用的方法,目前已逐渐被以下两种方法所代替。

(1) 带有位敏探测器的 X—射线衍射法

为了缩短测量时间以及提高信噪比,Y. Fujii 等设计出了一种高效的 X—射线探测技术——位置灵敏探测器,其探头能够一次同时测量一定角度范围内的衍射线的正比计数四型探头。样品衍射的 X—射线光入射到探头中后,引起其中气体的电离,于是便在阳极上形成一个电脉冲。衍射线的位置就由

电脉冲到达带有延迟线的阴极端的时间差来确定。此种方法较照相法省时,但是设备非常复杂,应用不广泛。

(2) 同步辐射 X—射线源探测技术

由于金刚石腔体小,样品量少,X—射线衍射线都比较弱小,使用一般的 X—射线源难以达到较为理想的结果。因此目前人们就将同步辐射 X—射线源来作为高压金刚石腔的入射线^[2]。由于这种 X—射线源具有强度高、准直性好、能进行连续辐射的特点,因而能够使样品的衍射线强度大大提高,这样就不仅能够提高测定的精确度,而且大大地缩短了实验的时间。

4. 高压热学性质的测定

高压物质热力学性质的测量总体上可以分为两大类,第一类是直接测量它们在高压下的热物理参数,第二类是根据物质的高压相变来进行推导。现在最主要用到的实验方法是高压差热分析法。这种方法是在一定压力和温度下,测量出样品与参比物的温度差,获得样品在此过程中的热效应,从而得出物质的各种高压热学性质参数。目前已经设计出了适合于高压下使用的扫描量热计。

高压的应用与发展

现代的高压研究与应用,已经成为物理学、化学、地球科学、生物学、材料科学等诸多学科中的一个活跃的研究领域,并且预示着众多交叉学科的出现。高压超导、高压物质新特性的探寻、超硬材料的合成、地球内部作用过程的探讨等方面已经在高压的应用下获得了许多重大的突破性进展。

高压下原子和分子间相互作用与状态方程的研究正引起注意,目前,对于轻物质、固化气体、稀土和锕系元素等化合物的高压状态方程的研究日益受到重视。金属氢曾经被预言是高温超导体,但是目前的研究中,压力直到 342 GPa 的高压下,依然未发现固体氢向金属氢的转变^[3],故还有待于进一步的探索。高压冰的研究,已经获得了许多高压下物质的结构和新相生成过程的信息^[4~6]。深部地质的研究可以说在高压技术的应用下而获得了极大的丰收,高压不仅使人们能够探讨地幔的物质作用过程,而且已深入到了地核之中,目前已经获得了一大批矿物岩石的高压物性资料,为认识地球内部物质的组成和作用提供了大量理论上的依据,大大地推进了地球科学的发展。可以说,高压技术在基础研究领域的应用给人们带来了认识上的一个大的革命。

在基础应用研究领域,高压技术给许多重要的应用研究提供了一种重要的思路和重要的手段。
(下转第 34 页)

度上限制或阻碍了节水事业的发展。需从资源有价、持续利用的角度出发,研究制订兼顾所有者、投资者、管理者、使用者四方利益的水价政策。

(2) 完善节水农业发展规划

在制订水资源成本核算体系和价格政策的基础上建立不同类型区(如旱地农业区)节水技术标准体系,制订近期和中长期节水农业发展规划,提高水资源的整体效益。

(3) 促进支持节水农业的新生行业的发展

目前我国节水农业设备的生产虽具有一定的规模,但产品的品种规格、质量及其稳定性等方面,尤其是服务方面与我国节水事业发展的潜在市场相比,差距很大。因此要建立多种形式的产业发展体制,促进产品生产、销售、设计安装、维修服务等新生行业的发展。

(4) 建立规范化的投资融资渠道

任何事业的发展必须以一定的经济投入为条件,而我国节水农业的主体——农民,恰恰在用水节水上的投入甚少,因此必须建立服务于农户的、多元化的、规范的投融资渠道(如贴息贷款、低息贷款、分期付款等)。

(5) 建立农民参与的水管理组织

没有农民的积极参与,节水事业就不可能持续发展,因此必须借鉴国外的先进经验和国内一些灌区的成功作法,逐步建立起农民参与的、适合当地情况的基层水管理组织。

(6) 强化节水生产的技术培训与推广

加强对农民,特别是基层技术人员的培训,普及节水技术知识,提高全社会的节水意识。强化节水农业技术的应用与推广,将墒情、农情监测纳入农业技术推广网络。

5. 加强食物生产高效用水的科学技术研究与国际合作

目前急需的科学技术研究项目包括:水资源短缺与食物安全;作物与水分、养分的关系;以农田水为核心的工程节水与农艺节水的有机集成;高效用水与环境保护;节水灌溉设备、材料与制造;保护性耕作和旱地农业机械;管理决策专家支持系统等。

在我国这样一个人口多、水资源短缺的农业大国,提高粮食生产用水效率,说到底关系到21世纪中国和世界的食物安全的大问题、大课题。因此一定要面向国际、面向全球,争取更多、更有效的国际合作。这需要各级各层高屋建瓴的眼光和决策。

(责任编辑 蔡德诚)

(上接第14页)

段。高压合成与高压物质新特性的出现,为人们寻找新材料打开了一扇广阔的大门,一般的物质在经历1GPa的高压过程中,平均有五种不同的相变出现,这就意味着通过高压,可能会获得许许多多的新性能材料。压致相变和高压新材料的研究已经受到了极大的关注,到目前为止,人们对元素周期表中的几乎所有元素都进行了高压研究,只有极少数的元素未出现高压相。典型的离子晶体、半导体化合物、铁电体等相变的系统研究已经获得了一些规律性的认识。非晶态物质、层状二维化合物、稀土化合物、有机化合物、氧化物、氮化物、硼化物,以及硫化物等的高压研究也颇受重视,目前的兴趣主要是寻找高温超导体、高性能储氢材料、高热导率材料、增韧高强度工程陶瓷、高功率半导体,以及压致可调谐激光晶体等具有优异性能的新材料。

高压能谱的研究也相当活跃,过渡金属离子和稀土金属离子发射谱的研究对于固体发光机制的理解和新型发光材料的探索十分重要,通过对压力与固体的电子谱、声子谱,以及激子谱的关系的研究,可以了解高压下电子的状态以及晶体的结构与相变。今后应当进一步加强压致相变与金属中s-d和f-d的电子结构相关性的研究,从而为实际应用提供理论依据。

现在所能达到的最高压力已基本可以满足现

代科学技术的需要,着力于压力继续提高的研究近期内不会成为重点,今后一段时期内高压技术的发展趋势将主要是研制和改进高压下物质特性的研究方法,以实现实验过程的快速化和自动化,提高实验分析的准确性和可重复性;同时更进一步地大力推进高压技术在现代科学技术各个领域中的应用,使高压技术发挥出最大的效用。总之,随着高压这种一维新技术被愈来愈多的人们所认识和应用,现代科学技术必将被大大地向前推进。

参考文献

- [1] The President's Report, 1987, Carnegie Institution of Washington Yearb, V86: pp 79-88
- [2] 郑海飞, 黄宇营, 马配学, 巨新. 科学通报, 1999(8): 878-880
- [3] Chandrabhas Narayana, Huan Luo, Jon Orloff et al., Solid Hydrogen at 342 GPa: No Evidence For an Alkali Metal, Nature, V393, 1998. 5. 7: pp 46-49
- [4] Magali Benoit, Dominik Marx, Michele Parrinello, Tunneling and Zero-Point motion in High-Pressure Ice, Nature, V392, 1998. 3. 19: pp 258-261
- [5] C. Lobban, J.L. Finney, W. F. Kuhs, The Structure of a New Phase of Ice, Nature, V391, 1998. 1. 15: pp 268-270
- [6] F.Ming Chou, Jennifer G. Blank, Alexander F. Goncharov et al., In situ Observations of a High-Pressure Phase of H₂O Ice Science, V281, 1998. 8. 7: pp 809

(责任编辑 王宏章)