

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2022.300>



高温高压装置研制和技术创新的发展现状与趋势

巫翔¹, 高春晓², 王超¹

1. 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 湖北武汉 430074
2. 吉林大学超硬材料国家重点实验室, 吉林长春 130061

摘要: 现代化的高温高压实验装置与表征技术是研究地球深部物质的赋存状态、属性及效应的关键手段。近 20 年, 国内很多科研单位先后建立了高水平高温高压实验平台, 具有覆盖地表至地心温压环境的各类装置以及多种可进行原位/非原位观测的技术, 在高压矿物物理、实验岩石学和地球化学等领域取得重要进展。装置和技术创新发展是当前我国“三深一系统(深地深海深空、地球系统科学)”科技战略领域中基础理论创新的驱动力之一。简要综述了高温高压装置研制、技术发展和面临的主要挑战, 在此基础上展望了未来的发展方向。

关键词: 高温高压装置; 金刚石压腔; 多面砧压机; 同步辐射; 地球化学。

中图分类号: P599

文章编号: 1000-2383(2022)08-2757-08

收稿日期: 2022-06-22

Progress and Outlook of State-of-Art High-Temperature-Pressure Apparatus and Characterization Technology

Wu Xiang¹, Gao Chunxiao², Wang Chao¹

1. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China
2. State Key Laboratory of Superhard Materials, Jilin University, Changchun 130061, China

Abstract: State-of-art high-temperature-pressure apparatus and characterization technology are the key way to know the occurrence state of deep earth materials and their effects on geological processes. In the past twenty years, lots of high-level high temperature and high pressure experimental platforms were set up in domestic universities and institutes of Earth sciences, which have diverse apparatus covering the temperature-pressure conditions of the Earth's surface to the core and various in-situ/ex-situ characterization techniques. The important progresses of experimental geosciences have been obtained in high-pressure mineral physics, experimental petrology and geochemistry etc. Innovative development of devices and technologies is one of key drivers for the basic theory innovations in the country's biggest strategic needs (such as deep earth, deep sea, deep space and Earth system science). Here we review the developed high-temperature-pressure apparatus and technologies, their challenges, and look into future perspectives.

Key words: high-temperature-pressure apparatus; diamond anvil cell; multi-anvil press; synchrotron radiation; geochemistry.

高温高压实验技术在地球科学中的运用已有 挥了关键的支撑作用。固体地球科学的各类前沿问
近二百年的历史, 对于地球科学整体的学科发展发 题对高温高压装置及表征技术提出更高需求, 同时

基金项目: 国家自然科学基金(No. 41827802)。

作者简介: 巫翔(1978—), 男, 教授, 高压矿物学相关专业。E-mail: wuxiang@cug.edu.cn

引用格式: 巫翔, 高春晓, 王超, 2022. 高温高压装置研制和技术创新的发展现状与趋势. 地球科学, 47(8): 2757-2764.

Citation: Wu Xiang, Gao Chunxiao, Wang Chao, 2022. Progress and Outlook of State-of-Art High-Temperature-Pressure Apparatus and Characterization Technology. *Earth Science*, 47(8): 2757-2764.

实验装置的创新也进一步推动学科迈向更深层次。最初,英国学者 Sir James Hall(1761~1832)通过一套密封的炮管对矿物岩石进行了一系列的高温高压实验,成为高温高压地学研究之父(Eyles, 1961)。高温高压实验装置和测试技术经过几代人的努力,使得相关实验研究更加定量化和自动化。20世纪60~70年代以来高温高压实验技术快速被引入地球科学,在岩石学基础问题、板块运动的驱动力、地球深部物质组成等研究中发挥了重要作用。随着高温高压装置研制不断创新和原位微区分析技术的迅速发展,已经实现从地表到地心和从过去到现在整个尺度范围内温度、压强等条件的模拟,以及对实验产物中极少量样品结构、组成和物理化学性质等方面的表征。因此现代高温高压实验技术相当于深入地球及行星内部的“放大镜”和“显微镜”,是当前我们了解地球及行星深部物质组成、结构、构造和动力学过程的重要窗口和手段(周春银和金振民, 2014)。当前国家战略需求(矿产资源、地质灾害、宜居星球等)需要系统对认识地球深部物质过程、地球内外物质循环及地表现象的响应、行星早期演化等、获得地球及行星科学前沿领域的理论、观点和概念。而高温高压实验装置与技术的发展是这些理论创新的驱动力,也是衡量我国“三深一系统(深地深海深空、地球系统科学)”领域基础研究水平的重要标志。

根据物质在高温高压条件下物理参量的变化,可划分为静态压缩(等温压缩)和动态压缩(等熵压缩和绝热压缩)(图 1a)。当前国际上应用于地球科学研究中的高压设备主要有:水热高压装置、活塞圆筒、多面砧压机和金刚石压腔等静态高压装置;气炮、火药、激光、磁驱动等加载的动态高压装置。这些装置可以覆盖整个地球内部,甚至巨行星内部的温压范围(图 1b)。但每种设备都有独特优势和不足之处,应用于特定的地球/行星深部科学问题研究中(周春银和金振民, 2014;杨晓志, 2015)。日本、美国和欧洲在高温高压实验平台和原位测量技术领域,如金刚石压腔、大腔体压机和斜坡压缩装置,热导和波速测量等技术,具有很强的优势。目前高温高压实验技术的发展趋势:实验装置实现更高更准的温度和压强以及更大的样品尺寸;高温高压实验技术与原位分析测试技术的进一步融合;高温高压环境下原位样品成分表征;高温高压装置与其他物理环境(超重、强磁场等)耦合;时间分辨的动力学测试技术等等。

我国的高温高压实验技术发展及其在地学研究中应用相对较晚。上世纪70年代中国科学院地球化学研究所自主研发、建成了两台高压设备(600×6 铰链式六面顶压机、YJ-3000t 六面顶压机),建立了相关物性测试方法,如电导率、热导率和波速等(谢鸿森, 2015)。近年来,国内相关科研单位和学者

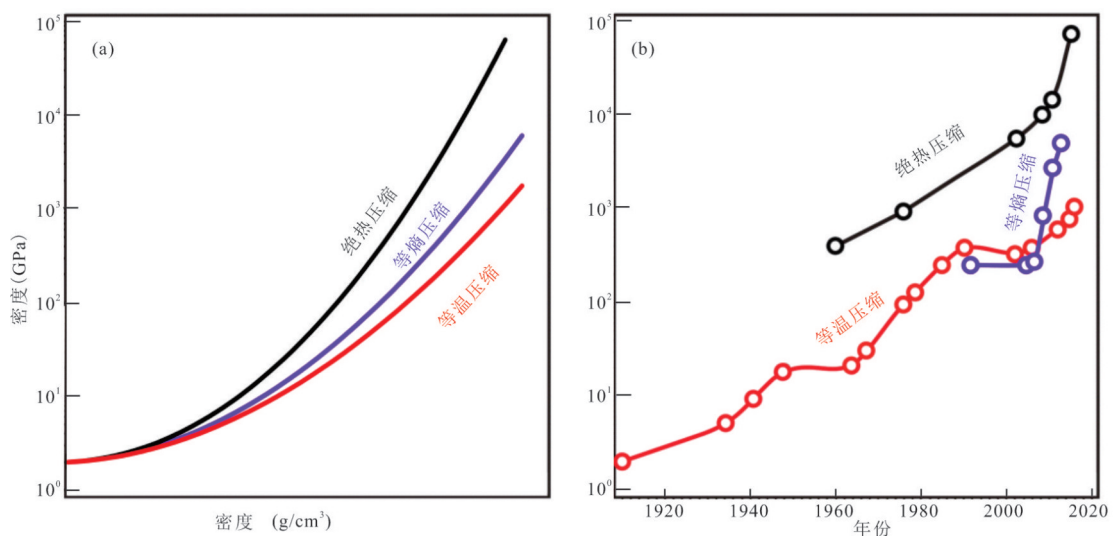


图 1 (a)不同压缩模式下物质的密度与压强的关系示意图;(b)不同压缩模式获得压强峰值纪录与年份关系

Fig.1 (a) Schematic diagram of the relationship between the density and pressure of substances under different compression modes; (b) Relationship between peak pressure records obtained by different compression modes and years

修改自 Duffy and Smith(2019);等温压缩主要采用多面砧压机与金刚石压腔;绝热压缩主要采用轻气炮和激光加载的动高压装置;等熵压缩主要采用磁驱动压缩技术和斜坡发生器

也在装置和实验技术方面进行研制和创新,取得了重要进展,如基于水热装置的原位氧逸度控制和测量(Chou *et al.*, 2021);自主研发的5 GPa流变仪(尚付成, 2010);基于国产铰链式六面顶压机实现了10 GPa和4 000 K温压环境(Zhou *et al.*, 2020);设计研制了单缸6万t压机和多功能5 000 t多面砧压机;基于金刚石压腔的温度、压强、电导率和热导率的精确测量(Yue *et al.*, 2018, 2019; Jiang *et al.*, 2021);实现常规金刚石压腔技术达到400 GPa(Li *et al.*, 2018);国产超硬材料(烧结碳化钨、烧结金刚石、纳米多晶金刚石)性能的提升及应用等等(Shang *et al.*, 2020). 这些使得我国在高温高压实验技术领域有了自己的特色和专利,在国际上处于并跑或部分引领的状态. 下面简要介绍近10年来在高温高压装置研制和技术创新的发展现状与趋势.

1 高温高压装置的研制

金刚石压腔(DAC)是由一对金刚石压砧平行对置,中间放置密封垫片及外部机械装置组成. 由于金刚石的“透明性”能与许多表征技术相结合实现原位测试,且装置体积小而轻便、携带性强、已广泛地应用于地球科学的各个研究领域,使得我们对地球深部物质组成及其性质与状态有更深理解(Liu *et al.*, 2017; Mao *et al.*, 2017; Wu *et al.*, 2017). 目前DAC技术是模拟下地幔及地核温压条件最常用和有效的技术. 在如何实现极高的压强方面,国际上主要聚焦在金刚石压砧的几何结构与材料性能. O'Bannon *et al.*(2018)对金刚石的几何结构(压砧面直径、倒角的直径与角度)与获得的最大压强进行统计分析,推断压砧面的直径为1 μm 可实现1 800 GPa;倒角的金刚石压砧面直径为20 μm ,倒角角度为8.5°,倒角与压砧面直径比为14~18之间,可实现400 GPa;要常规实现大于300 GPa条件则需要采用其他几何结构金刚石压砧. 德国拜罗伊特大学地质研究所利用人工合成高质量的纳米金刚石作为二级压砧,设计一种二级金刚石压腔(*d*-DAC),获得了640 GPa和1 065 GPa的实验记录(Dubrovinsky *et al.*, 2012; Dubrovinskaia *et al.*, 2016). 美国劳伦斯利物莫国家实验室设计了一种全新的螺旋状金刚石压砧,相对容易地实现500 GPa实验(Dewaele *et al.*, 2018; Jenei *et al.*, 2018). 北京高压科学研究中心采用常规的二级倒角的金刚石压砧,常态化实现大于400 GPa的环境,并进行

系统分析与揭示各种因素的影响(Li *et al.*, 2018). 然而,当温度和压力同时加载时,DAC技术面临一系列严峻挑战. 采用传统的外加温技术获得的温度一般局限在1 300 K以下. 北京高压科学研究中心采用新型环状电阻丝内加热技术,实现金刚石压腔内部大于3 000 K高温环境. 采用激光加温技术虽然可以获得更高温度,但过大的温度梯度严重影响物性及结构的表征精度. 广州地化所杜治学研究员通过改变激光光斑大小减小小样品横向上的温度梯度,双面加热减少样品纵向上的温度梯度,激光垂直入射的形式结合4色多波长分光法能够提供DAC压腔中高质量的二维温度分布图. 这些超高温与压强的技术发展,不仅为模拟地球深部,还为超大型行星的深部物质状态研究提供了可能.

多面砧压机是从多个方向施压的高压装置,含有4面砧、6面砧及8面砧,通常采用碳化钨(WC)和烧结金刚石(SD)作为二级压砧. 目前国内外主流的多面砧压机为Kawai型、Walker型、D-DIA型、铰链式等. 为了实现更高的压强和温度,更大尺寸的样品,该类型装置的发展趋势增大油压加载系统与提高二级压砧的抗压强度. 德国拜罗伊特大学地质研究所采用带一定倾斜角度WC作为压砧,在2 000 K的高温下,将压力提高到45 GPa,达到下地幔1 200 km深度的温压条件(Ishii *et al.*, 2016). 日本爱媛大学地球动力学研究中心采用烧结金刚石作为二级压砧,将大腔体压机在2 000 K的高温下将压力突破60 GPa,达到下地幔1 500 km深度的温压条件(Liu *et al.*, 2016);采用纳米多晶金刚石作为三级加压,实现了核幔边界的压力但温度低于1 000 K(Kunimoto and Irifune, 2010). 目前国内学者采用国产烧结碳化钨(河源正信),进行1°锥形设计加工,作为二级压砧,实现最高压力为35 GPa和1 700 K温压环境(Shang *et al.*, 2020);采用国产1英寸烧结金刚石(河南精钻)作为二级压砧,实现最高压力为60 GPa(翟双猛提供资料,未发表). 德国拜罗伊特大学地质研究所采用含B的金刚石作为加热器、烧结金刚石作为二级压砧,同时实现了50 GPa和3 300 K的极端环境(Xie *et al.*, 2021). 南方科技大学王善民课题组对国产铰链式六面顶压机的高压腔体组装进行优化设计,采用石墨加热器,实现了10 GPa和4 000 K超高温的环境(Zhou *et al.*, 2020).

近10年来,国内相关地学研究单位从国外购置

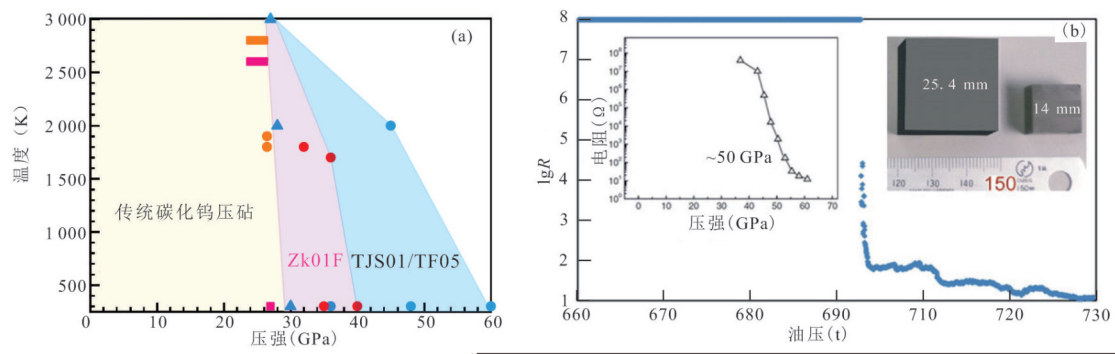


图2 (a)多面砧压机中碳化钨作为二级压砧已达到最大温压范围;(b)河南精钻1英寸烧结金刚石作为二级压砧实现最高压力
Fig.2 (a) Tungsten carbide has reached the maximum temperature and pressure range as a two-stage anvil in the multi anvil press;(b)

Henan precision drilling 1-inch sintered diamond as a two-stage anvil to achieve the highest pressure

Zk01F是中国河源正信的产品,TJS01和TF05是日本Fujiloy产品,它们都采用了锥形化压砧设计,修改自Shang *et al.* (2020);图b据中科院地化所翟双猛提供未发表的资料



图3 (a)吉林大学6万吨单缸液压机;(b)中国地质大学(武汉)5 000 t多功能大压机;(c)中国地质大学(武汉)改造Kawai型1 000 t多面砧压机

Fig.3 (a) 60 000 ton single cylinder hydraulic press of Jilin University; (b) China University of Geosciences (Wuhan) 5 000 ton multi-functional press; (c) China University of Geosciences (Wuhan) transformed Kawai type 1 000 ton multi anvil press

了多台不同类型的1 000~2 500 t多面砧压机(章军锋等,2021)。同时,在大吨位压机改造和研制方面,国内相关单位也取的重要的进展。吉林大学主持的国家重大科研仪器研制项目“新一代大型超高压产生装置”,在大直径液压系统长行程自找平技术、分瓣式高压腔体与预应力钢带缠绕技术、压力梯度材料设计与三级密封组装技术三项创新性技术突破,完成了计划设计指标,通过国家项目验收。这是目前国际上最高吨位(6万t)的单缸液压机(图3a)。中国地质大学(武汉)与中国地质科学院联合共建了国际首台5 000 t多功能大压机。该压机是由中国地质大学(武汉)与德国Voggenreiter公司共同研发并共同拥有知识产权,是目前世界上第一台同时具有准静水压和可控差异应力的5 000 t高温高压装置,

主要由5 000 t主机、控制系统、Kawai模块和D-DIA模块等4个部分组成(图3b)。中国地质大学(武汉)对加利福尼亚大学河滨分校Harry Green教授捐赠Rockland Research公司生产的单轴1 000 t流变仪进行升级改造,涉及传压模块系统、油压系统、电路与控制系统等,成功地升级转变为Kawai型1 000 t多面砧压机(图3c)。这些装置的研制不仅为我国实现自主设计与制造大腔体超高压装置的奠定基础,对提升我国静高压研究水平和国际地位有重要意义。

动态高压技术用脉冲加载原理产生超高压的一种技术,以波的形式在介质中传播,产生一维压缩。动高压实验技术可分为冲击压缩方法(绝热压缩)和等熵压缩方法,产生动态压缩的方法有气体

炮技术、化爆技术、核爆技术、磁压缩技术以及激光加载技术。冲击压缩过程,受压物体的温度伴随压强增加而急剧上升;等熵压缩过程即受压物体内的压缩波还没有演化成具有陡峭波阵面的受压过程,一次实验可提供一条从低压到高压完整的等熵参考线。这些技术主要运用于国防的相关研究,也是当代适用于研究地球和行星物质科学一种重要的高压技术。中国工程物理研究院流体物理研究所、四川大学、武汉理工等单位具有各类动高压装置,在揭示极端物理环境下(高温、高压和高密度)物质的快速演化及效应方面取得系列重要进展。尽管我国采用动高压技术开展地球深部物质研究的队伍不大,也取得了亮点性成果,如运用于外地核轻元素的限定(Huang *et al.*, 2011; Zhang *et al.*, 2020)。

2 原位表征技术发展

水热高压装置主要运用于模拟各种元素在流体和熔体中的演化过程,解析元素的赋存形式(含量、局域结构和电子结构等)与流体属性(组分、 f_{O_2} 、pH、盐度等)的关系。然而,非原位或“准原位”的实验研究,在淬火过程中可能发生逆反应并造成了元素的配分及赋存形式改变、流体性质的变化,出现真实信息部分缺失的风险(Borchert *et al.*, 2010)。此外,这些因素造成了地球深部元素演化机制的解析存在多解性、不确定性。因此,水热高压装置技术发展的趋势和关键之处与现代表征测试方法相结合,实现实时、原位测定物质的化学组成及结构变化(Borchert *et al.*, 2010; 黄圣轩等, 2016)。中国科学院深海科学与工程研究所周义明、地球化学研究所李和平、南京大学王小林、中国地质大学(武汉)吕万军、中国地质科学院李建康等研究团队应用熔融毛细硅管透明腔、水热金刚石压腔、水热高压釜等装置与拉曼光谱分析技术相结合,开发水热体系中挥发分体系、固体和熔体等结构的原位定量分析技术。

活塞圆筒和多面砧大压机装置主要与电学、声学和热力学的表征技术相联用,原位获得物质的电导率、热导率、波速、流变等性质。这些原位技术在国内地学高温高压实验平台得到广泛应用,详见本专刊相关内容。金刚石压腔与激光加温技术相结合,并耦合各种原位表征技术,主要应用于高压矿物物理的研究,获得结构、相变、流变、电导、热导、波速等,详见本专刊相关内容。在此,不再一一赘述。

同步辐射光源能提供能量范围广阔的光子:从X射线、紫外一直到红外光,在一台同步辐射大科学装置上可以建设几十个光束线站并发展相应的研究方法。同步辐射装置因其独特的性能优势和面向全球用户高度开放的特点,成为先进科技发展的前沿阵地、高端科研人才的聚集基地、众多先进理论和技术的发源地。高温高压装置与同步辐射相结合,更好地从原位、实时、动态的角度开展复杂体系在极端环境下物理化学属性及其演化研究,是高温高压实验地球科学原位表征技术的重要组成部分(徐济安和毕延, 2012; 束今赋, 2020)。

3 面临的问题与展望

现代高温高压装置及技术的发展是突破科学前沿、原始创新研究的重要驱动力。国内在平台建设与技术创新存在关键问题有:

(1)重要方向的实验装置布局不足,甚至空白。国际上,高温高压装置与先进光源表征技术深度相结合,全面提升地球深部科学认知程度和水平,取得许多原创性成果。近年来,国家大力发展各类大科学装置(如同步辐射、自由电子激光、中子散裂源、强磁场、超重力等)。但国内高温高压装置与大科学装置的相结合,主要是由物理、材料领域学者推动。他们更多关注高压低温环境,这与地球/行星内部高温高压环境不一致。因此,目前国内运行/在建的高压线站,与地球科学相关基础研究需求有一定差距。上地幔底部至地核温压环境下矿物岩石的热导率、流变性质研究是当前国际研究的重点和难点。目前国内实验平台在这两方面的布局几乎空白。

(2)新思想、新原理、新技术(“三新”)装置的创新与研发薄弱。高温高压实验研究,由于实验装置局限性,大部分研究对象与实际地质过程相比过于理想、单一,产出数据稀少。而当前跨学科领域的合作,激发了许多新思想、新原理、新技术的创新,产生一些超前设计的理论、为爆炸式知识增长提供重要支撑。高温高压实验地球/行星科学发展,也急需与物理、材料、化学、工程等领域深度合作,研发出具有原创性、引领性的装置和技术。

高温高压实验平台的建设需要投入大量的经费。在有限资源下,建议国内相关平台协调发展,侧重自身的优势研究方向发展相关实验装置及技术,合理布局,共同促进国内高温高压实验地球科学的

发展,在国际上占据一席之地,增强国际话语权. 主要布局和重点发展如下:

(1) 水热高压装置及技术. 建议重点发展 HDAC 实验装置,实现温度压力的独立控制,使温压范围能够覆盖超临界地质流体的条件(5 GPa, 800 °C),且实现样品腔中氧逸度的原位测量;水热大腔体高温高压装置,设计多种“窗口”能与同步辐射多种谱学表征技术(如 X 射线吸收谱、红外光谱)相结合;基于水热装置的流体“固结”技术,如矿物或玻璃“固定”流体技术、液氮和半导体制冷技术以及原位制冷技术,以实现高温高压条件下流体成分原位测试. 这些装置技术的发展可大幅提高我国在热液成矿过程的模拟能力,对推动矿产资源形成、地球深部(特别是俯冲带和地幔柱)流体运移、演化与与壳幔相互作用等研究具有重要意义.

(2) 大腔体高压装置及技术. 建议重点发展 D-DIA 平台和技术,原位测量矿物和岩石在高温高压和不同差异应力和应变速率下的变形、流变和脆性破裂行为,模拟软流圈至地幔过渡带的高压变形和探测高压下岩石脆性破裂的物理机制,为深源地震成因机制和软流圈岩石圈演化物理过程提供实验约束;基于国内研发出了 25.4 mm 边长的烧结金刚石,应用于多面砧大腔体压机,实现压力和温度达到 80 GPa 和 3 000 K,推动下地幔实验岩石学研究的进展;基于纳米孪晶金刚石(Huang *et al.*, 2014)的超高压大腔体压机技术,大幅提高大腔体压机的压力,也可扩大实验样品仓的体积一个数量级,实现百万大气压条件;实现多面砧大压机与同步辐射光源、常规高能量高功率 X 射线相结合、用于原位矿物岩石化学组成及其弹性、输运性等性质测试. 支持研发单位与企业深度合作,实现二级加压大腔体高温高压装置的国产化. 使我国在大腔体压机平台高压技术领域进入世界先进甚至领跑行列,实现 0 到 1 突破. 目前上海光源正在建设二期线站工作中的超硬多功能线站(BL12SW)配备有大体积压腔的高温高压装置(杨科等, 2020). 此外,要积极推动国内在建的北京高能同步辐射光源,及拟筹建的其他第四代同步辐射光源建设大体积高温高压装置专用线站.

(3) 金刚石压腔及技术. 目前国内在 DAC 装置与技术方面与国际同行并行,在某些方面处于领先的地位(Li *et al.*, 2018; Yue *et al.*, 2018, 2019; Jiang *et al.*, 2021). 针对地球深部研究的需要,重点

发展适合高温高压下原位物质属性探测的系统,推动与正在建设的高能同步辐射光源高压线站(怀柔)(李晓东等, 2020),与微区、微量的表征测试技术相结合,开展地球深部岩石学、地球化学、地球物理学等研究;创建和发展基于 DAC 的高温高压原位测温测压新技术,特别是非内标的测温测压新技术.

(4) 动高压装置及技术. 随着等熵压缩技术的发展与表征技术的进一步融合,成功地应用在高密度物质、地球及行星深部物质等领域研究,如金刚石、水、铁、方镁铁矿等(Duffy and Smith, 2019),成为冲击压缩(绝热压缩)和静态等温压缩之间的重要桥梁,开辟动态高压技术应用的新领域. 目前国内等熵压缩技术仅限于国防科学研究,建议推动该技术在行星科学领域应用,培养相关的科学人员.

References

- Borchert, M., Wilke, M., Schmidt, C., et al., 2010. Partitioning of Ba, La, Yb and Y between Haplogranitic Melts and Aqueous Solutions: an Experimental Study. *Chemical Geology*, 276(3/4): 225–240. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2010.06.009>
- Chou, I. M., Wang, R. H., Fang, J., 2021. In Situ Redox Control and Raman Spectroscopic Characterization of Solutions below 300 °C. *Geochemical Perspectives Letters*, 20: 1–5.
- Dewaele, A., Loubeyre, P., Occelli, F., et al., 2018. Toroidal Diamond Anvil Cell for Detailed Measurements under Extreme Static Pressures. *Nature Communications*, 9: 2913. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-05294-2>
- Dubrovinskaia, N., Dubrovinsky, L., Solopova, N. A., et al., 2016. Terapascal Static Pressure Generation with Ultrahigh Yield Strength Nanodiamond. *Science Advances*, 2(7): e1600341. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1600341>
- Dubrovinsky, L., Dubrovinskaia, N., Prakapenka, V. B., et al., 2012. Implementation of Micro-Ball Nanodiamond Anvils for High-Pressure Studies above 6 Mbar. *Nature Communications*, 3: 1163. <https://doi.org/10.1038/ncomms2160>
- Duffy, T. S., Smith, R. F., 2019. Ultra-High Pressure Dynamic Compression of Geological Materials. *Frontiers in Earth Science*, 7: 23.
- Eyles, V. A., 1961. Sir James Hall (1761–1832). *Endeavour*, 20: 210–213.
- Huang, H. J., Fei, Y. W., Cai, L. C., et al., 2011. Evidence for an Oxygen-Depleted Liquid Outer Core of the Earth.

- Nature*, 479(7374): 513–516. <https://doi.org/10.1038/nature10621>
- Huang, Q., Yu, D. L., Xu, B., et al., 2014. Nanotwinned Diamond with Unprecedented Hardness and Stability. *Nature*, 510(7504): 250–253. <https://doi.org/10.1038/nature13381>
- Huang, S.X., Wu, X., Qin, S., 2016. Research Progress on in Situ Experimental and Theoretical Simulations of Element Partitioning under High Temperature and High Pressure. *Rock and Mineral Analysis*, 35(2): 117–126(in Chinese with English abstract).
- Ishii, T., Shi, L., Huang, R., et al., 2016. Generation of Pressures over 40 GPa Using Kawai-Type Multi-Anvil Press with Tungsten Carbide Anvils. *The Review of Scientific Instruments*, 87(2): 024501. <https://doi.org/10.1063/1.4941716>
- Jenei, Z., O'Bannon, E. F., Weir, S. T., et al., 2018. Single Crystal Toroidal Diamond Anvils for High Pressure Experiments beyond 5 Megabar. *Nature Communications*, 9: 3563. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-06071-x>
- Jiang, D., Gao, Y., Cao, M., et al., 2021. Diamond anvil cell with Double Coaxial Chambers. *Review of Scientific Instruments*, 92: 123901.
- Kunimoto, T. and Irifune, T., 2010. Pressure Generation to 125 GPa Using a 6-8-2 Type Multianvil Apparatus with nano-Polycrystalline diamond anvils. *Journal of Physics: Conference Series*, 215: 012190.
- Li, B., Ji, C., Yang, W. G., et al., 2018. Diamond Anvil Cell Behavior up to 4 Mbar. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 115(8): 1713–1717. <https://doi.org/10.1073/pnas.1721425115>
- Li, X.D., Yuan, Q.x., Xu, W., et al., 2020. Introduction of Fourth-Generation High Energy Photon Source HEPS and the Beamlines for High-Pressure Research. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 34(5): 1–13(in Chinese).
- Liu, J., Hu, Q. Y., Young Kim, D., et al., 2017. Hydrogen-Bearing Iron Peroxide and the Origin of Ultralow-Velocity Zones. *Nature*, 551(7681): 494–497. <https://doi.org/10.1038/nature24461>
- Liu, Z. D., Irifune, T., Nishi, M., et al., 2016. Phase Relations in the System $\text{MgSiO}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$ up to 52 GPa and 2 000 K. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 257: 18–27. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2016.05.006>
- Mao, H. K., Hu, Q. Y., Yang, L. X., et al., 2017. When Water Meets Iron at Earth's Core-Mantle Boundary. *National Science Review*, 4(6): 870–878. <https://doi.org/10.1093/nsr/nwx109>
- O'Bannon, E. F., Jenei, Z., Cynn, H., et al., 2018. Contributed Review: Culet Diameter and the Achievable Pressure of a Diamond Anvil Cell: Implications for the Upper Pressure Limit of a Diamond Anvil Cell. *The Review of Scientific Instruments*, 89(11): 111501. <https://doi.org/10.1063/1.5049720>
- Shang, F.C., 2010. Research on Ultra High Pressure Hydraulic System of 5 GPa High Temperature and High Pressure Rheometer(Dissertation). China University of Geosciences, Wuhan(in Chinese with English abstract).
- Shang, Y.C., Shen, F.R., Hou, X.Y., et al., 2020. Pressure Generation above 35 GPa in a Walker-Type Large-Volume Press. *Chinese Physics Letters*, 37(8): 30–35.
- Shu, J.F., 2020. Space, Earth, Ocean: Mineralogical Studies under Extreme Conditions. *Earth Science Frontiers*, 27(3): 133–153.(in Chinese with English abstract).
- Wu, X., Lin, J. F., Kaercher, P., et al., 2017. Seismic Anisotropy of the D'' Layer Induced by (001) Deformation of Post-Perovskite. *Nature Communications*, 8: 14669. <https://doi.org/10.1038/ncomms14669>
- Xie, H.S., 2015. Explore the Way to the Deep Part of the Earth. Seismological Press, Beijing(in Chinese).
- Xie, L., Chanyshv, A., Ishii, T., et al., 2021. Simultaneous Generation of Ultrahigh Pressure and Temperature to 50 GPa and 3 300 K in Multi-Anvil Apparatus. *Review of Scientific Instruments*, 92: 103902.
- Xu, J., Bi, Y., 2012. Application of Synchrotron Radiation X-Ray Sources in High Pressure Research. *Physics*, 41(4): 218–226 (in Chinese with English abstract).
- Yang, K., Jiang, S., Yan, S., et al., 2020. Application of Shanghai Synchrotron Radiation Source in High Pressure Research. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 34(5): 16–28(in Chinese with English abstract).
- Yang, X.Z., 2015. A Brief Introduction of High Temperature and High Pressure Experimental Geosciences: Methods and Advances. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 34(3): 509–525(in Chinese with English abstract).
- Yue, D., Gao, Y., Zhao, L., et al., 2019. In Situ Thermal Conductivity Measurement in Diamond Anvil Cell. *Japanese Journal of Applied Physics*, 58: 040906.
- Yue, D., Ji, T., Qin, T., et al., 2018. Accurate Temperature Measurement by Temperature Field Analysis in Diamond Anvil Cell for Thermal Transport Study of Matter under High Pressure. *Applied Physics Letters*, 112: 081901.
- Zhang, J.F., Ni, H.W., Yang, X.Z., et al., 2021. Progress and Perspective of Experimental Geoscience in China (2011–2020). *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 40(3): 597–609, 777(in Chinese with English ab-

stract).

Zhang, Y. J., Hou, M. Q., Liu, G. T., et al., 2020. Reconciliation of Experiments and Theory on Transport Properties of Iron and the Geodynamo. *Physical Review Letters*, 125(7): 078501. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.125.078501>

Zhou, C.Y., Jin, Z.M., 2014. The “Bright Lamp” into the Deep Earth: Experiments at High Pressure and High Temperature. *Chinese Journal of Nature*, 36(2): 79–88(in Chinese with English abstract).

Zhou, X. F., Ma, D. J., Wang, L. F., et al., 2020. Large-Volume Cubic Press Produces High Temperatures above 4 000 Kelvin for Study of the Refractory Materials at Pressures. *The Review of Scientific Instruments*, 91(1): 015118. <https://doi.org/10.1063/1.5128190>

附中文参考文献

黄圣轩, 巫翔, 秦善, 2016. 高温高压下元素配分的原位实验与计算模拟研究进展. *岩矿测试*, 35(2): 117–126.

李晓东, 袁清习, 徐伟, 等, 2020. 第四代高能同步辐射光源 HEPS 及高压相关线站建设. *高压物理学报*, 34(5): 1–13.

尚付成, 2010. 5 GPa 高温高压流变仪超高压液压系统的研究 (硕士学位论文). 武汉: 中国地质大学(武汉).

束今赋, 2020. 上天、入地、下海: 极端条件下矿物学研究. *地学前缘*, 27(3): 133–153.

谢鸿森, 2015. 探索地球深部之路. 北京: 地震出版社.

徐济安, 毕延, 2012. 同步辐射 X 射线光源在高压科学研究中的应用. *物理*, 41(4): 218–226.

杨科, 蒋升, 闫帅, 等, 2020. 上海同步辐射光源高压相关线站概述. *高压物理学报*, 34(5): 16–28.

杨晓志, 2015. 浅谈高温高压实验地球科学: 方法和应用. *矿物岩石地球化学通报*, 34(3): 509–525.

章军锋, 倪怀玮, 杨晓志, 等, 2021. 中国实验地球科学研究进展与展望(2011~2020). *矿物岩石地球化学通报*, 40(3): 597–609, 777.

周春银, 金振民, 2014. 照亮地球深部的“明灯”: 高温高压实验. *自然杂志*, 36(2): 79–88.