

• 专题 28: 高温高压实验装置、技术和方法 •

矿物岩石热导率原位精确、快速测量

郭新转^{1*}, 颜鑫鑫¹, 周云¹

1. 中国科学院地球化学研究所 地球内部物质高温高压院重点实验室, 贵阳 550081

原位测量硅酸盐矿物的热导率(κ)和热扩散系数(D), 经过近 40 年的发展, 逐渐出现稳态热流法、热光栅法、周期热流法、脉冲加热法、时域热反射法等热导率原位测量方法。基于大腔体压机的热导测量主要采用脉冲加热法, 其优点包括: (1) 能够同时获得高温高压下的 κ 和 D ; (2) 大压机的温度和压力测量相对金刚石对顶砧技术更准确且样品的尺寸更大; (3) 可以获得高压下的热容(C_p)值。因此, 大腔体压机联用脉冲加热法逐渐成为重要且可靠的热导测量技术。我们经过近四年努力, 在国内率先开发了大腔体压机二级压砧联合脉冲加热的热导测量技术。我们新开发的热导测量仪获得的数据具有极低的背景

噪声(μV 级)、超低信号延迟(μs 级)、高效率(采用自编软件, 可以直接测量、计算各热物理参数)、高拟合精度(≥ 0.97)等特点。即便与日本 Osako 等开发的热导测量平台相比, 我们的新平台也具有更高测量效率的优势。我们已经使用 18/11 组装测试了橄榄石最高 10 GPa、1600 K 条件下的热物理性质(目前国内使用脉冲加热法开展的最高温压条件的测试), 测量结果不受脉冲时长、脉冲电压的影响, 展现高度的可重复性。

关键词: 热导率; 热扩散系数; 大体积压机; 高温高压实验

• 专题 28: 高温高压实验装置、技术和方法 •

深地幔压力下稳定的原位变形组装设计

徐放³, 谢龙剑^{1*}, David P Dobson²

1. 北京高压科学研究中心, 上海 201203;

2. Department of Earth Sciences, University College London, London WC1E6BS, UK 000000;

3. 浙江大学 地球科学学院, 杭州 310058

D111 型大腔体压机作为近年来研发的深地幔变形模拟关键设备, 其与同步辐射 X 射线技术的联用已成为研究转换带及下地幔矿物/岩石流变特性的重要手段。然而, 传统装置中采用的碳化钨(WC)二级压砧因 X 射线不透明特性, 需通过加工锥形狭缝构建 X 射线衍射光路, 此结构缺陷导致实验组装在转换带底部(>20 GPa)深度以上极易发生组装失稳放炮, 实验成功率长期很低。本研究通过采用 7-3 的组装, 在衍射光路窗口位置采用国产高温高压烧结金刚石替代传统

WC 压砧, 并创新性将地锥形狭缝后置于高压变形后的密封边之后。实验验证表明, 该优化组装可以实现 22 GPa, 1800 °C 的原位稳定变形, 且 10 次以上高压变形测试均未出现组装失稳放炮现象。目前, 该组装已成功应用于 CF 相和斯石英的流变率测量实验。该组装为今后深部地幔流变学研究提供了可靠的技术支撑。

关键词: D111 流变仪; 深地幔; 流变学; 高温高压; 烧结金刚石

第一作者简介: 徐放(1990-), 研究员, 研究方向: 地球深部流变学, E-mail: fang_xu@zju.edu.cn

通信作者简介: 谢龙剑(1988-), 研究员, 研究方向: 地球内部结构起源与高压技术, E-mail: longjian.xie@hpstar.ac.cn

• 专题 28: 高温高压实验装置、技术和方法 •

大腔体压机中掺硼金刚石加热器的技术研发与应用

谢龙剑^{1*}

1. 北京高压科学研究中心, 上海 201203

掺硼金刚石 (BDD) 加热器因其卓越的耐火性和优异的 X 射线透射性能, 已成为 10 GPa 以上大腔体压机高压实验中的关键加热器。近年来, 该领域取得了显著进展, 先后开发出掺硼石墨 (Yoneda et al., 2014; Xie et al., 2016; Shatskiy et al., 2009; Yamada et al., 2008)、高压合成 BDD (HP-BDD) (Xie et al., 2017)、化学气相沉积 BDD (CVD-BDD) (Xie et al., 2020) 以及可加工 BDD 块体 (MBDD) (Xie and Instrum., 2017) 等系列技术。这些技术的突破不仅提升了 BDD 加热器的加温性能, 还显著改善了其使用便捷性。目前, BDD 加热器已能够实现高达约 4000 K 的极端温度 (Xie et al., 2017)。通

过与烧结金刚石压砧技术的结合 (Xie et al., 2021), 研究人员已成功在大腔体压机中同步实现超过 50 GPa 的超高压和超过 3300 K 的超高温环境。BDD 加热器在高压熔体物性测量等领域的成功应用 (Xie et al., 2020; Xie et al., 2021), 进一步证明了其在实际实验中的可靠性和广泛适用性。本文将系统梳理各类 BDD 加热器的技术特点, 并根据不同实验需求提供加热器选型与操作指南, 以期为相关领域的研究人员提供参考。

关键词: 掺硼金刚石; 大腔体压机; 高温; 高压; X 射线透过性

• 专题 28: 高温高压实验装置、技术和方法 •

高温高压缺陷化学与矿物稳定性及储水能力实验研究方法

刘锦^{1*}

1. 燕山大学 高压科学中心, 河北秦皇岛 066004

高压矿物的热力学稳定性与水赋存状态研究是地球科学领域的重大前沿课题。作为地表水通过俯冲带进入地球内部的主要载体, 含水物质的相变行为主导着深部水循环过程。最新高温高压实验表明, 俯冲带中的含水矿物相可将水体输运至核幔边界。矿物脱水过程对地幔物理化学性质具有多重调控作用: 不仅显著改变地幔流变特性—特别是控制地幔对流的关键参数地幔黏度; 同时通过影响矿物相平衡制约深部物质组成。更为重要的是, 该过程与岩浆生成及深源

地震活动密切相关, 对地表地质过程和人类生存环境具有深远影响。值得注意的是, 主要地幔矿物的水溶解度存在显著约束, 尤其是受高温高压缺陷演变规律的制约, 这使得高压含水矿物在地幔极端温压条件下的稳定性成为决定深部储水能力和物质通量的关键因素, 为探索深部水循环提供新思路。

关键词: 高温高压; 含水物质; 缺陷演化; 热力学稳定性

基金项目: 国家自然科学基金项目 (9247921)

*第一/通信作者简介: 刘锦 (1984-), 教授, 研究方向: 高温高压物质科学. Email: jinliu@ysu.edu.cn

• 专题 28: 高温高压实验装置、技术和方法 •

激光加热 DAC 高压电学技术和方法探究

徐良旭², 刘锦^{1*}

1. 燕山大学 高压科学中心, 河北秦皇岛 066004;

2. 北京大学 地球与空间科学学院, 北京 100871

随着对地球深物质的物理化学属性研究的深入和大地电磁测深地球物理数据的日益丰富, 高温高压原位电学性质测试技术和方法逐渐成为限定地球内部电性结构异常体成因机制以及水、碳等挥发份分布与效应的不可或缺的研究手段和重要途径。基于金刚石对顶压砧 (DAC) 与激光加热技术, 已发展出二电极法、四电极法、范德堡法、阻抗谱法等, 用于研究矿物岩石样品的电导率和电化学性质, 为深入理解地球深部的物理化学现象与物质性质之间的关联提供了关键矿物学证据 (Okada et al., 2014; Ryzhkin et al.,

2020; Yoshino, 2010; Ohta et al., 2007; Zhao, 2024; Su et al., 2023)。然而, 当前基于激光加热 DAC 高压电学技术和方法仍存在诸多挑战, 致使下地幔及地核深部物质的电学性质实验数据相对匮乏。鉴于此, 本工作尝试对范德堡法和阻抗谱法进行改进和完善, 期望借此可以深入系统地探究地球超深部的物理化学性质及动力学演化机制, 为深地科学研究提供新的思路。

关键词: 高温高压电学; 激光加温; 范德堡法; 阻抗谱法; 金刚石对顶压砧

国家自然科学基金委“地球宜居性的深部驱动机制”重大研究计划的重点支持项目 (9247921)

第一作者简介: 徐良旭 (1998-), 博士研究生, 研究方向: 地球化学. Email: liangxu.xu@hpstar.ac.cn

*通信作者简介: 刘锦 (1984-), 教授, 研究方向: 高温高压合成/矿物物理. 地球化学. Email: jinliu@ysu.edu.cn

• 专题 28: 高温高压实验装置、技术和方法 •

高温高压条件下电导率测定实验的氧逸度控制方法

刘汉永^{1*}

1. 南京大学 关键地球物质循环与成矿全国重点实验室, 地球科学与工程学院, 南京 210023

氧逸度是地球内部重要的热力学参数, 可以通过改变变价元素的价态影响物质的多种物理、化学性质, 因此需要在高温高压实验中控制体系的氧逸度。对于地学硅酸盐矿物而言, 导电机制主要有质子导电、离子导电和小极化子导电, 而熔体主要通过离子的扩散而导电。不同的导电机

制对氧逸度的响应不同。本研究主要介绍在电导率的高温高压测定实验中氧逸度的控制方法, 并根据实例, 介绍氧逸度对不同导电机制和物质电导率的影响。

关键词: 电导率; 氧逸度; 高温高压

• 专题 28: 高温高压实验装置、技术和方法 •

上地幔矿物溶解度的准确测量——大腔体水热实验技术

孙鹏辉¹, 孙凤霞^{2*}, 刘锦¹

1. 燕山大学 高压科学中心, 河北秦皇岛 066004;

2. 中国地震局地震预测研究所, 北京 100036

高温高压溶解实验对于探究地球深部物质及元素的迁移具有重要意义。目前, 在高温高压下溶解度实验通常局限于地壳温度-压力范围, 俯冲带(上地幔)更高温度-压力条件下的溶解度通常采用金刚石对顶砧装置(DAC)半定量实验。基于前人经验, 本课题组改进了一种基于金属子母扣的实验组装, 最多可以盛放 200 μL 以上体积的液体, 通过回收单矿物及流体, 实

现对 ~ 5 GPa 及 1000 $^{\circ}\text{C}$ 以内较高温-压条件下溶解度及流体的准确测量; 通过使用不同材质的子母扣, 以实现实验体系氧逸度的控制。该组装可以应用于地球内部矿物的溶解度测量以及材料在高压下的水热合成。

关键词: 高温高压; 溶解度; 大腔体; 水热实验技术

基金项目: 国家自然科学基金交叉学部“地球宜居性的深部驱动机制”重大研究计划的重点支持项目(9247921)

第一作者简介: 孙鹏辉(2000-), 硕士研究生, 研究方向: 实验岩石学. Email: sunpenghui@stumail.ysu.edu.cn

通信作者简介: 孙凤霞(1990-), 助理研究员, 研究方向: 实验岩石学. Email: sunfx@ief.ac.cn

• 专题 28: 高温高压实验装置、技术和方法 •

纳米分辨率玻璃中水含量和分布分析技术

龙涛^{1*}, 杨亚楠¹

1. 中国地质科学院地质研究所, 北京 102206

水是地球与行星演化过程中最为重要的挥发份组成, 是驱动地质与化学过程的“催化剂”, 影响着从微观的矿物形成到宏观的板块俯冲和地幔对流等板块运动。近年来, 得益于现代分析技术和深地样品模拟研究的发展, 地球深部水的研究取得了巨大的进展。团队采用原子探针和纳米离子探针技术, 开展了含水玻璃中纳米尺度水含量、赋存状态与分布的探索研究。结果表明, 两种超高分辨率

的分析技术能够有效定量评估玻璃中羟基水的含量与三维分布特征。利用原子探针实现了玻璃中水含量的检测限好于 0.02%, 并发现玻璃中存在纳米富羟基水包裹体。上述方法为未来开展高温高压合成复杂样品中挥发份含量与赋存状态的研究奠定了技术基础。

关键词: 原子探针; 水; 纳米探针

• 专题 28: 高温高压实验装置、技术和方法 •

超高动态高温高压下矿物波速的测量与地球深部研究

张友君^{1*}

1. 四川大学 原子与分子物理研究所, 成都 610065

高速撞击可以产生高温高压状态并可模拟地球超深部的温压环境。精确测量地球超深部矿物在相应温压环境下的波速物性对于了解地球内部成分与动力学过程具有重要意义。我们利用高速撞击产生高温高压, 在 0~300 GPa 以及 300~5000 K 温压范围内

获得了不同矿物的波速。本报告将介绍在极端高温高压下对铁和铁化合物波速的测量以及在深地中的应用。

关键词: 波速; 动高压; 地球超深部

基金项目: 国家自然科学基金 (42422201)

张友君 (1986-), 研究员, 研究方向: 高压矿物物理学, Email: zhangyoujun@scu.edu.cn

• 专题 28: 高温高压实验装置、技术和方法 •

高温高压中子衍射技术的新型压砧与组装设计

房雷鸣^{1*}

1. 中国工程物理研究院核物理与化学研究所, 四川绵阳 621900

中子衍射原位高压加载技术自上世纪 90 年代开始发展以来, 在新材料、地学、化学、物理等各领域发挥了越来越重要的作用。中国绵阳研究堆 (CMRR) 中子科学平台的高压中子衍射 (凤凰) 谱仪是国内首台可进行高压环境加载的中子衍射谱仪, 由中子聚焦系统、探测器系统、高压加载与集成系统等部分组成, 可进行常规、高/低温、高压环境下的中子衍射实验。巴黎-爱丁堡压机 (Paris-Edinburgh press) 因具有大体积样品、便携、结构简单等优点, 被广泛应用于中子源进行高压原位中子衍射实验。但因单轴加压而导致封垫和组装不断沿径向向外流动的特点, 限制了其加载的最高压力, 并且使高压下的温度加载也非常具有挑战性。本工作根据高压下组装受力和形变特点, 通过在压砧边缘处增加小平台, 形成类似多面顶压机组装的

密封边, 实现了对组装侧向支撑能力的大幅提高。由于组装在较高的压力下仍然保持较小的形变, 使单 Toroidal 金刚石压砧和组装的压力范围由原来的不到 10 GPa, 提高到了 14 GPa 以上, 并大大提高了压砧和组装的稳定性。同时, 优化设计的高温高压组装可以稳定加载温度到 1500 K 以上, 将加热管直径由 3.5 毫米减小到 3 毫米, 温度可以提高到 2000 K 以上。原位高温高压中子衍射实验结果显示, 压力 8.7 GPa、温度 1380 K 的条件下可以获得高质量的样品的中子衍射谱, 并且组装展现出优异的稳定性。本工作对研究材料在高压下的相变及揭示相变的微观机制具有重要意义。

关键词: 高压中子衍射; 巴黎-爱丁堡压机; 金刚石压砧; 高温高压组装; 封垫

基金项目: 国家自然科学基金 (12075215, 11427810)

通信作者: 房雷鸣 (1980-), 男, 博士, 研究员, 主要从事高压材料及高压中子衍射研究. E-mail: flmyaya2008@163.com

• 专题 28: 高温高压实验装置、技术和方法 •

上海光源大压机线站及应用介绍

杨科^{1*}

1. 中国科学院上海高等研究院 上海光源, 上海 201204

上海同步辐射装置（上海光源）的大压机专用实验站于 2024 年 1 月正式对用户开放。上海光源共有两个大压机专用实验站, 分别配备了 200 吨和 2000 吨的大腔体压机。其中, 2000 吨压机是国际上第一个在同步辐射采用的双模具大压机, 可以支持 DDIA 模具和 KAWAI 模具, 两个模具可以通过电动切换。200 吨压机提供 DDIA 模具。开放一年来, 已支持用户时间超过 1500 小时。2000 吨压机最高压机已经达

到 45 GPa 左右。大压机实验站可以提供能散衍射、XRD 和高分辨成像实验方法。上海光源大压机实验站的建成开放, 填补了国内大压机原位实验研究的空白, 为高温高压下的材料原位结构探测提供了一个重要的实验平台。

关键词: 同步辐射; 大腔体压机; 衍射; 成像; 原位

• 专题 28: 高温高压实验装置、技术和方法 •

高温高温高压条件下基于大压机平台的弹性和滞弹性测量新技术的开发

刘超¹, 刘永刚^{1*}, 张飞武¹

1. 中国科学院地球化学研究所 关键矿产成矿与预测全国重点实验室, 贵阳 550081

地震波波速的反演依赖于高温高压条件下对地球内部矿物的弹性和滞弹性特性的定性与定量测量。多面体大压机是实现高温高压环境的重要手段。与金刚石对顶砧相比, 尽管多面体大压机的最高压力有限(在碳化钨砧块下, 最高约 50 GPa, 常用压力范围小于 20 GPa)(Ishii 等, 2019), 但其具有较大的样品腔体(可达到毫米级甚至厘米级), 能够保证样品温度梯度的可控性, 并在各种物性测量中提供更多优势。因此, 我们在多面体大压机平台的基础上, 创新性地开发出弹性和滞弹性测量的新技术, 旨在没有同步辐射条件下实现滞弹性和弹

性的同步稳定测量。与传统的超声波波速测量弹性技术相比(Li 和 Liebermann, 2014), 该技术增加了多个换能器, 使得在不需要同步辐射光源的情况下, 能够实现样品长度与超声波速的同步测量; 而传统的滞弹性测量方法相比(Liu 等, 2021; Yoshino 等, 2016), 该技术同样摆脱了同步辐射光源的限制, 并有望在更宽的频率范围内实现更精确的衰减系数测量。

关键词: 多面体大压机; 弹性; 滞弹性; 地震波波速

基金项目: 国际自然科学基金项目(42174225)

第一作者简介: 刘超, 助理研究员, 研究方向: 实验地球物理学. Email: liuchao@mail.gyig.ac.cn

*通讯作者简介: 刘永刚, 研究员, 研究方向: 高温高压矿物学. Email: liuyonggang@mail.gyig.ac.cn

• 专题 28: 高温高压实验装置、技术和方法 •

高温高压同位素分馏实验技术与方法进展

王天阳^{2,3}, 刘锦^{2*}

1. 北京大学, 北京 100871;

2. 燕山大学, 河北秦皇岛 066004;

3. 北京高压科学研究中心, 北京 100193

20 世纪末, 多接收电感耦合等离子体质谱仪 (MC-ICPMS, multi-collector inductively coupled plasma mass spectrometry) 的发展实现了非传统稳定同位素的高精度测定 (Belshaw et al., 2000), 推动了高温地质过程中稳定同位素分馏效应的精细化研究。相较于传统基于地质样品测试结果反演式推导, 大腔体压机高温高压实验技术 (300~2000 K 和 0~30 GPa) 为极端温压条件下地质过程引发的同位素分馏提供了正演证据的约束 (Williams et al., 2012)。金刚石压砧 (DAC) 与核共振非弹性

X 射线散射 (NRIXS, Nuclear Resonant Inelastic X-ray Scattering) 技术结合 (Sturhahn, 2004), 可精确测定矿物高达数百 GPa 压力条件下的简约配分函数 β , 从而获取同位素分馏的绝对数值 (Liu et al., 2017)。高温高压实验模拟与同位素测试相结合, 为揭示早期行星演化、核幔分异、岩浆洋结晶分异及部分熔融等关键地质过程提供了突破性的研究手段。

关键词: 高温高压; 同位素; 分馏

基金项目: 国家自然科学基金委“地球宜居性的深部驱动机制”重大研究计划的重点支持项目 (9247921)

第一作者简介: 王天阳 (1999-), 博士研究生, 研究方向: 同位素地球化学. Email: tianyang.wang@stu.pku.edu.cn

*通信作者简介: 刘锦 (1984-), 教授, 研究方向: 高温高压合成/矿物物理. Email: jinliu@ysu.edu.cn

• 专题 28: 高温高压实验装置、技术和方法 •

大腔体压机高温高压腔体温度场的数值模拟

李诗音¹, 刘兆东^{1*}

1. 吉林大学, 长春 130012

大腔体压机 (LVP) 被广泛应用于复制地球内部所存在的条件, 或用于产生高温高压条件进一步合成和研究材料。样品腔中的温度分布会对实验产生十分重要的影响。高压腔体中实际存在的温度梯度分布可能会影响到实验的温度分辨率, 而且还可能导致样品发生异常的化学反应。

我们基于大腔体压机 (LVP), 让铼片作为加热器去计算其腔体内的温度值及腔体内温度梯度的分布情况, 以有限元法作为分析手段, 采用 Abaqus 软件进行计算, 利用压缩后各组件的实际尺寸进行构建模型, 考虑了二维和三维两种模型构建方式, 对八面体, 压砧砧座等组件在构建模型时进行了适当的简化, 并考虑了其

边界条件和载荷类型。载荷分别考虑了交流, 直流两种交流方式进行加热, 对模型进行网格划分, 通过求解热电偶和公式进而得到各节点上的电压值和温度值, 由此可知腔体内的温度梯度分布情况。目前模拟了实验条件为 23 GPa, 温度 2300 °C 时以及 25 GPa 1200 °C 时的结果, 发现计算出的结果与实验数据尚有些差距, 后续会不断改进网格尺寸的划分, 材料参数, 对模型的简化等方面的影响, 使得计算结果与实验数据相符合, 进而对其温度梯度进行下一步的分析。

关键词: 数值模拟; 大腔体压机; 高温高压; 温度梯度

第一作者简介: 李诗音, 硕士研究生, 研究方向: 大腔体压机高温高压腔体温度场的数值模拟. Email: 2484502912@qq.com

*通信作者简介: 刘兆东, 教授, 研究方向: 地球深部科学. Email: liu_zhaodong@jlu.edu.cn

• 专题 28: 高温高压实验装置、技术和方法 •

Acoustic emissions detection of micro-cracks under high pressure and high temperature in a deformation large-volume apparatus

马帅领^{1*}

1. 宁波大学 物理科学与技术学院, 浙江宁波 315211

We successfully developed an in-situ Acoustic Emission (AE) detection setup that allows recording of AE waveforms (triggered and streaming) and simultaneous X-ray diffraction and imaging on samples deformed at high pressure and high temperature (HPHT) conditions in the Aster-15 LVP at the synchrotron beamline station P61B. This high-pressure AE detection system is a powerful tool to investigate AE phenomena from the HPHT chamber. Six commercial acoustic sensors, protected by a tungsten carbide support ring on each anvil of the same material, have excellent survivability throughout each successive experiment. By pulsing each sensor in succession, the average wave velocity through the anvils and cell assembly can be determined at any press load. The distance between the sensors is obtained by X-ray radiography and by logging the positions of each hydraulic ram. This provides a basis for accurately

locating AE events in the sample. The feasibility of this AE detection setup was confirmed by compression and deformation test runs using several different self-designed AE sources in specialized assemblies. The present setup proves to be extremely efficient and accurate in measuring brittle processes in samples under HPHT. It is now available for applications for beam time and experiments without X-rays at P61B. Combined with synchrotron X-rays, in-situ pressure, temperature, strain rate and stress, and phase changes can be monitored, while recording AE activity. We provide a powerful tool to investigate the origin of earthquakes, for example causing AE emissions due to brittle dehydration reactions or phase transformations in the Earth.

关键词: Extreme conditions; Acoustic Emissions; High-pressure; Earthquakes

• 专题 28: 高温高压实验装置、技术和方法 •

一种提高大腔体压机合成样品效率的方法

许金贵^{1*}, 范大伟¹, 周宏斌¹, 周文戈¹

1. 中国科学院地球化学研究所, 贵阳 550081

实验地球科学研究需要大量矿物样品。天然矿物样品通常含有多种杂质和缺陷, 且多为成分复杂的固溶体, 不适宜用来约束成分变化对矿物物理化学性质的影响。因此, 人工合成固定组分的矿物样品成为研究的重要手段。矿物样品的人工合成方法主要分为两类: 第一类为常压条件下的晶体生长, 其显著缺点在于耗时较长; 第二类为高温高压合成法, 尽管合成的晶体尺寸较小, 但具有成分纯净且合成速率方面的优势。在我们以往针对地幔矿物(如斜方辉石和单斜辉石相变)的研究中, 我们采用了很多的人工合成样

品, 这些样品均基于大腔体压机的高温高压实验制备。然而, 我们之前的实验装置仅能每次合成单个样品, 产量有限, 难以满足大样品需求量的实验研究(如矿物热力学性质, 包括比热容、熵等的实验测试, 通常需几十毫克样品)。为克服这一限制, 我们通过对实验装置进行改进, 可在单次高温高压实验中合成多达 8 个样品。该方法显著提升了大腔体压机合成样品的效率, 为相关研究所需样品提供了有力支撑。

关键词: 高温高压; 大腔体压机; 样品合成

• 专题 28: 高温高压实验装置、技术和方法 •

高压变温热导率的测量方法及应用

岳冬辉¹, 刘锦^{1*}

1. 燕山大学 亚稳态国家重点实验室, 河北秦皇岛 066000

变温热导率的实验测量是高压科学领域公认的技术难题。课题组基于金刚石对顶砧 (DACs) 装置自主研发稳态内加温 (1200~4000 K) 热导率测量方法及装置, 可用于高压地球科学领域; 此外, 课题组将时域热反射技术 (TDTR) 与低温装置结合, 可实

现 4~500 K 高压热导率的测量, 为高压超导材料及理论的研究提供新时域。

关键词: 高温高压; 金刚石对顶砧; 热导率; 时域热反射

第一作者简介: 岳冬辉 (1991-), 讲师, 研究方向: 高压热输运. Email: 15104409336@163.com

*通信作者简介: 刘锦 (1985-), 教授, 研究方向: 高压地球科学. Email: jinliu@ysu.edu.cn

• 专题 28: 高温高压实验装置、技术和方法 •

综合极端条件实验装置—高温高压大体积材料研究系统

刘兆东^{1*}, 胡阔¹, 朱品文¹, 周强¹, 杨新一¹

1. 吉林大学 综合极端条件高压科学中心, 长春 130012

吉林大学国家重大科技基础设施“综合极端条件实验装置—高温高压大体积材料研究系统”是国家重大科技基础设施“十二五”期间重点建设项目, 投资规模 1.9 亿元, 建筑面积 6000 平方米, 负责建设与开放运行具有世界先进水平的高温高压大体积材料研究系统。设施系统由三大子系统构成, 包括固体环境高温高压、液体环境高温高压、非平衡高温高压子系统, 设施将研制先进大腔体压机以及相关关键核心技术, 发展大腔体压机超高压高温关键技术, 建立大腔体压机原位光谱、电学、波速等测试, 可开展高温高压极端条件下新材料合成、化学反应过程、地球深部物质属性等以前无法完成

的研究; 可以实现大腔体液体物质的原位化学反应、超临界流体及其与物质相互作用、高温高压流体的液-液相变及相平衡、深海极端环境模拟和水热与溶剂热晶体生长等研究; 目前设施正在建设中, 设施建成后将解决了国家对材料高压合成的实验装置的需求, 为大尺寸超硬材料和其他功能材料的高压制备提供了关键技术支撑与切实可行的制备路径; 更好地解决材料、物理、化学、地球科学等自然科学领域的关键科学问题。

关键词: 综合极端条件实验装置; 大腔体压机; 高压技术

• 专题 28: 高温高压实验装置、技术和方法 •

利用 Paterson 流变仪研究水对透辉石多晶集合体流变性质的影响

李建峰^{1*}

1. 中国科学院广州地球化学研究所 深地过程与战略矿产资源全国重点实验室, 广州 510640

水广泛存在于地球内部且具有分布不均一性, 且可以明显影响矿物岩石的流变行为。Paterson 流变仪以高的差应力测量精度特点而被用来测定矿物岩石流变方程中的水逸度指数。然而在水饱和状态下测定的水逸度指数, 由于过量颗粒边界水的存在很可能高估了水对矿物岩石流变的影响。近期, 我们以含有一定量结构水的天然透辉石晶体颗粒为初始材料, 合成了水不饱和初始样品并在 Paterson 流变仪上开展轴向压缩变形实验; 通过利

用红外光谱分析变形前后样品的水含量建立变形过程中水丢失模型, 进而测定在水不饱和状态下透辉石多晶集合体的位错蠕变流变律, 并获得水含量指数 $r=1.2\pm0.2$ 。该方法有效的降低了颗粒边界水的影响, 为我们准确研究结构水对矿物岩石流变影响提供了新思路。

关键词: Paterson 流变仪; 水不饱和; 透辉石多晶集合体; 流变性质

• 专题 28: 高温高压实验装置、技术和方法 •

间震期至同震期断层滑动的实验模拟：旋转剪切高温高压摩擦实验设备与方法

姚路^{1*}, 嶋本利彦¹, 马胜利¹, 冯炜², 宋刚¹, 覃伟峰¹

1. 中国地震局地质研究所 地震动力学与强震预测国家重点实验室, 北京 100029;

2. 意大利帕多瓦大学, 帕多瓦 635131

孕震断层在一个地震循环内不同阶段的滑动速率跨度可达 9~10 个数量级 (间震期: $\sim\text{mm/yr}$; 同震阶段: $\sim\text{m/s}$)。旋转剪切设备是实现这一较宽速率范围内断层摩擦滑动实验模拟的可靠实验装置。尽管水热条件下的低速率 ($< \mu\text{m/s}$) 旋转剪切摩擦实验设备相对较为成熟, 但开展高温高压孔隙水条件下的断层高速 ($\sim\text{m/s}$) 摩擦实验存在较高的技术难度。本报告以中国地震局地质研究所的旋转剪切低速-高速摩擦设备为例,

总结了研究团队为该设备配备外加温高温高压容器的设计研发与改造升级过程, 简要阐述了针对主要技术难点的解决方案; 此外, 还展示了利用该设备开展的断层低速率大位移摩擦性质和高速摩擦性质研究进展, 并简要讨论了对地震物理机制的重要新认识。

关键词: 旋转剪切设备; 水热条件; 断层低速至高速摩擦; 地震物理机制

• 专题 28: 高温高压实验装置、技术和方法 •

利用大腔体压机结合声发射与同步辐射技术模拟 深部地震的成因

许满^{1,2*}, Tim Officer³, Tony Yu³, Yanbin Wang³

1. 上海前瞻物质科学研究院, 上海 201203;

2. 北京高压科学研究中心, 上海 201203;

3. 芝加哥大学 先进放射源中心, 美国芝加哥 060637

尽管在大约一个世纪前就已明确探测到地球深部(>50~700 km)地震的发生, 然而由于震源较深, 直接观察此类地震事件很困难, 因此控制深部地震发生的物理机制至今仍不明确。在地球内部由于高温高压条件的存在, 岩石应该呈塑性变形或蠕变而很难发生脆性断裂及摩擦滑移, 因此这种深部地震事件的断层机制和地球动力学解释仍然是地球科学中的未解之谜。近年来, 大腔体压机, 尤其是可对岩石进行可控变形的 DDIA 型压机, 结合先进的声发射监测技术

和同步辐射 X 射线成像及衍射技术, 已经能以前所未有的细节描绘岩石样品在高温高压条件下的断裂过程, 为实验室模拟深部地震提供了有效手段。本报告将回顾 DDIA 变形实验+声发射技术的发展历程, 重点阐述近年来运用 DDIA-30 在大样品(~cm 级)高温高压变形+声发射实验所取得的进展。

关键词: 大腔体压机; 声发射; 高温高压; 深部地震

• 专题 28: 高温高压实验装置、技术和方法 •

极端动态压缩实验技术及其在地球化学中的应用

李治国^{1*}

1. 中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川绵阳 621900

针对极端冲击压缩下的材料物性研究, 发展了基于阻抗梯度飞片的三级炮超高速发射技术以及流体多次反射冲击压缩实验技术。这些技术可以在稠密气体和固体中分别产生数百 GPa 和 TPa 的冲击压力。对低 Z 气体(如氢、氦、氘-氦混合物)和高 Z 金属(如金和铂)进行了多次反射压缩和超高速冲击实验。对于低 Z 气体, 获得了高达约 200 GPa 和 50000 K 的状态方程(EOS)数据, 并对极端冲击下的化学分解与电离进行了研究。对于高 Z

金属, 获得的 Hugoniot 数据达到了 1.1 TPa 的最大压力, 并且我们发现了在约 0.6 TPa 以上的 Hugoniot 中由金的 5 d 电子在极端冲击压缩下的热激发(电离)引起的“软化”行为。这些结果将极大地促进对温密物质(WDM)的理解, 以及 WDM 领域中理论模型的构建和验证。

关键词: 三级炮超高速发射技术; 多次反射压缩技术; 极端冲击下的化学分解与电离

基金项目: 国家自然科学基金项目(41971108)

第一作者简介: 李治国(1987-), 副研究员, 研究方向: 冲击波物理. Email: zhiguo_li@foxmail.com

*通信作者简介: 胡建波(1980-), 研究员, 研究方向: 爆炸与冲击动力学. Email: jianbo.hu@caep.cn

• 专题 28: 高温高压实验装置、技术和方法 •

高温高压反应釜的研发和改进

姚永盛¹, 郭海浩^{1*}, 孙文泽¹, 李金龙¹, 巫翔¹, 章军锋¹

1. 中国地质大学, 武汉 430074

高温高压水热反应装置在深地研究中具有重要作用, 可用于模拟水岩反应和元素迁移等关键地质过程。针对国外同等设备造价昂贵、进口限制和后期维护困难等问题, 我们自主研发和改进了可变形袋式热液反应装置和快速淬火冷封式高压釜两种实验装置。(1) 可变形袋式热液反应装置在恒温恒压下通过内部柔性反应容器的形变可以做到随时取样, 以金罐为内部反应容器时其工作温压条件在 250~550 °C 和 200~550 bar 之间。常规的金质反应容器具有良好的惰性和延展性, 可在高温高压下保持化学性质稳定和制成各种实验容器设计形状。金罐通过钛盖密封, 钛盖在确保化学惰性的同时利于容器的拆卸和组装, 与反应容器直接相连的取样管同样由钛金属制成, 确保不会和实验产生的热液流体相互反应。我们对取样管进行了改进, 将取样管设计成内外管结构, 外管较短取容器上部气体样品, 内管较长取容器下部液体样品, 做到气液相分离取样。(2) 快速淬火冷封式高压釜主要由温压控制系统和高压釜组成。高压釜通过外

侧环形电炉加热, 以水为介质提供压力, 温度上限为 900 °C, 精度为 ± 2 °C, 压力上限为 4000 bar, 精度为 ± 10 bar。具有温压独立控制及数字化显示功能。我们还设计了一种新的高压釜温度校准装置及方法, 有效地解决了由于高压釜内外温度变化和高压釜内高度差引起的温度梯度问题。利用该装置测量了 500~900 °C (间隔 50 °C) 快速淬火冷封式高压釜的温度梯度, 结果表明反应釜内部 (4 cm 高度差) 温度梯度小于 10 °C。此外, 在 800、850、900 °C 超高温条件下, 冷封式高压釜内温度梯度进一步改善, 分别小于 5、3、2 °C。建立了釜体温度与样品温度的拟合曲线, 消除了釜内外温度差异对实验的影响。该方法明显提高了实验过程中的温度精度, 对于需要精确控温的实验具有重要意义。

关键词: 高温高压反应釜; 可变形袋式水热反应装置; 快速淬火冷封式高压釜; 金-钛反应容器; 温度校正

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42373038)

第一作者简介: 姚永盛 (1999-), 博士研究生, 研究方向: 高温高压实验地球化学. Email: yaoyongsheng2021@163.com

*通讯作者简介: 郭海浩 (1988-), 教授, 研究方向: 高温高压实验地球化学. Email: haihao.guo@cug.edu.cn

• 专题 28: 高温高压实验装置、技术和方法 •

低温气体围压压机的设计与改良

綦超^{1*}

1. 北京高压科学研究中心, 北京 100193

六方晶系水冰是太阳系中广泛分布的造岩矿物, 组成了地球的冰原与冰川、火星的冰盖、矮行星和冰卫星的冰壳。这些冰体的运动不但与地球的气候变化和宜居环境演化息息相关, 也在行星内部演化中扮演重要作用。因此, 冰的实验研究也是流变学的重点发展方向。尽管冰的变形温度很低 (大部分 $> -30\text{ }^{\circ}\text{C}$), 但是相比于冰的熔点, 这个温度是接近 90%熔点温度。因此, 冰的流变

学实验也是在高温高压下展开。我们正在搭建一台冰流变仪。该设备在宾夕法尼亚大学的冰流变仪基础上改良而来。温度范围为 $-100\sim 0\text{ }^{\circ}\text{C}$, 围压由氮气提供, 可达 100 MPa, 可以进行轴向压缩变形实验。借此会议机会向同行汇报一下我们的设计和改良。

关键词: 实验流变学; 冰; 高温变形; 流变仪

• 专题 28: 高温高压实验装置、技术和方法 •

Slip-weakening and Unstable Friction of Antigorite under High Fluid Pressure: Implications for Slow Slip

张雷^{1*}, 何昌荣¹

1. 中国地震局地质研究所, 北京 100029

蛇纹石矿物广泛分布于俯冲带地幔楔区域。鉴于其独特的物理化学特性, 这类矿物可能对俯冲断层带的摩擦性质和稳定性产生重要影响。本研究以叶蛇纹石断层泥为研究对象, 在有效正应力 30、50 和 100 MPa、孔隙流体压力 100 MPa、温度 100~500 °C 的热液条件下, 系统考察了其摩擦特性。通过采用 0.008~1.0 $\mu\text{m/s}$ 的加载速率变化, 深入探究了摩擦强度的速率依赖性。实验结果表明, 断层泥的摩擦系数随温度升高呈系统性降低趋势, 从 0.75 降至 0.36。叶蛇纹石主要表现为稳定的速度强化特征。但在 300 °C 和 400 °C 条

件下以及较低的有效正压力条件下, 当加载速率降至 0.04 $\mu\text{m/s}$ 时, 叶蛇纹石表现出以缓慢应力降为特征的速度弱化行为。在高孔隙流体压力和接近俯冲带地幔楔温度条件下, 地幔楔附近的富叶蛇纹石滑脱层在低速剪切时会孕育不稳定成核, 随之随着逐渐加速而进入高速的速度强化阶段进而地震的破裂过程逐渐减缓, 最终以慢地震的形式终止。这些发现为深入理解俯冲带慢滑移事件的形成机制提供了新的实验依据。

关键词: 俯冲带; 叶蛇纹石; 慢滑移

• 专题 28: 高温高压实验装置、技术和方法 •

时域布里渊散射及其在高压科学中的应用

徐丰^{1*}, 黄海军¹

1. 武汉理工大学 物理与力学学院, 武汉 430070

时域布里渊散射 (Time-domain Brillouin scattering - TDBS) 是一种光学泵浦探测技术, 其利用飞秒脉冲光源在物质内部激发 GHz 频段的超声波, 并利用相同的光源探测声波导致的物质内部的瞬态光学响应。相较于传统的超声测量方法, TDBS 具有高时空分辨优势, 能够跟踪分析物质内部亚微米尺度的局部信息。我们将 TDBS 与金刚石压砧 (DAC) 相结合测量了两种立方相矿物 MgO 和 NaCl 的弹性性质。对于单晶 MgO, 测量了其不同晶向的声速, 再结合已知的状态方程, 获得了完整的弹性数据。结

果显示, 在下地幔顶部压强条件下, MgO 的各向异性随压强的升高持续增强。对于多晶 NaCl, 利用 PU 技术特有的高时空分辨优势, 同样获得了其单晶弹性数据, 数据跨越了 NaCl 由低压 B1 相到高压 B2 相的转变, 揭示了 NaCl 的各向异性在相变前后的变化趋势。该工作证明了 TDBS 技术在研究矿物的高压相时具备的独特优势, 尤其在经历了相变之后单晶样品无法继续保持的情况下, 依然能够研究其单晶弹性性质。

关键词: 瞬态探测; 声速; 弹性; 高压

第一作者简介: 徐丰 (1984-), 副教授, 研究方向: 高压矿物物理. Email: xufeng@whut.edu.cn

第二作者简介: 黄海军 (1976-), 教授, 研究方向: 高压物理. Email: hjhuang@whut.edu.cn

• 专题 28: 高温高压实验装置、技术和方法 •

六轴大腔体压机微米级动态加载技术

邓奥¹, 刘锦^{1*}

1. 燕山大学, 河北秦皇岛 066000

为模拟地壳-地幔的温度压力环境, 深化岩石矿物多场耦合力学行为研究, 燕山大学高压科学中心搭建了 LPQ6 六轴大腔体压机静高压装置。该压机装配 6 个可独立控制的工作油缸, 分别控制锤头从 XYZ 三个方向对样品施加压力, 结合辅助加热系统构建极端物态环境。各锤头执行机构具备 1 μm 的定位精度, 配合多轴同步控制算法, 可实现腔体内

压力场的梯度调制与三维应力对称性优化, 突破传统压机轴对称加载的局限性。系统在达到设定压力后仍能执行锤头位移, 实现样品压缩-拉伸循环加载, 有效模拟俯冲带岩层在地幔对流作用下的非稳态应力演化过程。

关键词: 极端条件; 高温高压; 大腔体变形压机

• 专题 28: 高温高压实验装置、技术和方法 •

上海光源 BL12SW 线站大压机实验站介绍及其在高压地球科学中的应用

周春银^{1*}, 杨科¹

1. 中国科学院上海高等研究院 上海同步辐射光源, 上海 201204

上海光源超硬多功能线站 BL12SW, 是上海光源二期线站工程中专用于高能 X 射线衍射和成像实验的线站, 其中大压机实验站主要聚焦于行星地球内部物质和新型材料在极端高温高压条件下的原位实验研究, 是国内第一个同步辐射大压机综合性实验站。大压机实验站 LVP1 和 LVP2 分别配置 200 吨 DDIA 压机和 2000 吨双模 (DDIA 和 Kawai) 大压机, 结合同步辐射 X 光可以开展高温高压下的相变、状态方程、流变、物性测量和超高压原位实验, 是国内

第一个同步辐射原位大压机综合性实验站。自 2024 年开始面向用户正式开放运行以来, 国内大压机用户利用上海光源 BL12SW 线站大压机实验站, 开展了广泛的高压实验, 并取得了初步的成果。随着线站软硬件的不断优化, 将为国内大压机用户提供更好的实验条件, 逐步达到国际先进水平。

关键词: 上海光源; 同步辐射; 大压机; 高温高压

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42274121)

第一作者简介: 周春银 (1985-), 助理研究员, 研究方向: 高压矿物物理、同步辐射大压机技术应用。Email: zhouchunyin@sari.ac.cn

• 专题 28: 高温高压实验装置、技术和方法 •

Kawai 型大腔体压机实现 50 GPa 以上的超高压力

赵鑫宇¹, 刘兆东^{1,2*}

1. 吉林大学 高压与超硬材料全国重点实验室, 长春 130000;

2. 吉林大学 综合极端条件高压科学中心, 长春 130000

高压技术在地球和行星科学、物理学、化学中具有重要应用, 尤其是在探索极端条件下物质的性质和行为方面。Kawai 型大腔体压机 (KLVP) 作为一种广泛使用的高压装置, 能够实现超过 10 GPa 的压力, 并且在精确控制的压力和温度条件下, 提供从毫米到厘米量级的较大样品体积 (Kawai, N. 1966; Kawai, N. 1970)。然而, 传统 KLVP 的压力上限通常限制在 25 GPa 左右 (Keppler, H. 2005; Irifune, T. 2014), 这仅对应于地球下地幔顶部区域。尽管近年来通过改进碳化钨压砧的材质和构型, KLVP 的压力上限已有很大提高 (Yu-Chen, S. 2020; Hou, X. 2024), 但使用传统 KLVP 配合碳化钨压砧在高温条

件下实现超过 50 GPa 的压力仍然是一个挑战。

本研究通过在八面体传压介质内引入导电的硼掺杂多晶金刚石和硬质氧化铝等材料, 并结合常规 WC 压砧, 设计了一种新型的 KLVP 内部组装。利用 GaP, Fe₂O₃ 等作为压力标定材料, 通过电阻变化监测压缩过程中的压力变化, 以及在超高压高温下通过合成含铝的布里奇曼石, 并结合电子探针微分析, 确定了我们在室温和 1900 K 高温条件下, 分别实现了约 60 GPa 和 50 GPa 的超高压。

关键词: 超高压; 高温; 大体积压机; 碳化钨压砧

基金项目: 国家重点研发计划 (2023YFA1406200), 国家自然科学基金 (42272041、52302043、U23A20561), 吉林大学高水平创新团队基金 (2021TD-05), 以及上海同步辐射光源 (2024-SSRF-PT-510031、505511)

第一作者简介: 赵鑫宇 (1997-), 博士研究生, 研究方向: 高压技术、高压物理与地球深部科学. Email: xinyuz23@mails.jlu.edu.cn

*通信作者简介: 刘兆东 (1986-), 教授, 研究方向: 高压技术、高压物理与地球深部科学. Email: liu_zhaodong@jlu.edu.cn

• 专题 28: 高温高压实验装置、技术和方法 •

岩石流变学实验在深部地震物理机制研究中的应用

史锋^{1*}

1. 中国地质大学(武汉)地质过程与成矿预测全国重点实验室, 武汉 430074

地球内部物质流变学性质是解决地球内部动力学过程的关键所在(例如: 板块运动的启动、地震的物理机制等动力学问题)。岩石流变学是通过研究岩石变形和流变规律的物理-化学过程, 定量的建立其流变强度随温度、压力、应变速率、水逸度等影响因素的变化。岩石变形不仅制约着地球不同时空尺度的演化, 也通过地震、资源的形成及其分布影响着人类社会的发展。岩石流变性质的主要研究手段是通过高温高压流变学实验, 建立其力学本构方程。以往的研究主要

集中在上地幔深度范围内(<100 km)的流变学实验, 主要的实验仪器包括气体介质的 Paterson 流变仪和 5 GPa 固体介质 Griggs 流变仪。随着同步辐射技术在 D-DIA 流变仪上的应用, 使得对于地幔转换带深度范围内的流变学实验成为可能。本研究主要介绍岩石流变学实验在中深源地震物理机制研究中的应用。

关键词: 岩石流变学; 高温高压实验; 中深源地震; 地震物理机制

史锋(1984-), 教授, 研究方向: 岩石流变学实验, 中深源地震物理机制, Email: shifeng@cug.edu.cn

• 专题 28: 高温高压实验装置、技术和方法 •

热液金刚石压腔 (HDAC) 新型冷冻系统介绍及应用

高杰¹, 李建康^{1*}

1. 中国地质科学院 矿产资源研究所, 北京 100037

热液金刚石压腔 (HDAC) 是一种为模拟地壳温压条件的地质作用而设计的实验设备, 可对 $-190\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $0\sim 10\text{ GPa}$ 的热液体系进行实验 (Bassett et al., 1993; Chou, 2003; Li et al., 2016)。Li et al. (2020) 介绍了一种新型的热液金刚石压腔 (HDAC-VII) 及其配套冷冻系统, 此次介绍的新型冷冻系统是其基础上进行升级改造的。新型冷却系统主要包括液氮罐、高纯氮气瓶、温度控制器、气冷控制器、HDAC 温度控制软件等。前后两种冷却系统的主要工作原理相似: 利用减压阀和内径为 1/8 英寸的不锈钢管连接高纯氮气瓶和内部有盘管的液氮罐, 高纯氮气从氮气瓶内通过液氮罐内的液氮进行快速冷却后, 从液氮罐的另一头外接的橡胶软管通往 HDAC 样品腔处, 对样品腔进行冷冻。Li et al. (2020) 的冷冻系统通过气量控制阀调节气流大小以及 XYZ 控制杆调节冷冻后的氮气吹出位置, 来控制 HDAC 上下压腔的温度, 这非常考验操作人员对气流和冷气位置的控制, 并极其耗费精力。因此新型冷却系统进行

以下升级: 在高纯氮气罐和液氮罐中间添加气冷控制器; 去掉 XYZ 控制杆; 将温度控制器与气冷控制器相连接; 升级 HDAC 温度控制软件, 使其在低于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度条件下也可以控制 HDAC 的上下压腔内的电阻丝工作。升级后的 HDAC 温度控制软件根据所设置降温或升温速率的大小, 同时控制温度控制器和气冷控制器, 即控制上下压腔电阻丝工作功率及氮气气流大小。这使得上下金刚石砧的温差在 $\pm 0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$, 并且操作更为便捷、升降温速率更加精确 ($0.1\sim 100\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$), 大大提高了冷冻实验的效率及准确性。因其效率及准确性的提高, 热液金刚石压腔 (HDAC) 新型冷冻系统的应用范围也更加广泛, 例如可以利用冰点 ($0\text{ }^{\circ}\text{C}$) 对 HDAC 的热电偶进行校准、进行盐度测定、等容线测定 (Li et al. 2024)、样品腔内水的密度 ($>1\text{ g/cm}^3$ 时) 测定 (Haselton et al., 1995; Chou et al., 1998)。

关键词: 冷冻系统; 热液金刚石压腔

基金项目: 国家自然科学基金项目 (U2444204)

第一作者简介: 高杰 (1999-), 硕士研究生, 研究方向: 高温高压模拟实验. Email: 1249639049@qq.com

*通讯作者简介: 李建康 (1976-), 二级研究员, 博士生导师, 研究方向: 稀有金属成矿与高温高压模拟实验. Email: Li9968@126.com

• 专题 28: 高温高压实验装置、技术和方法 •

鲜水河断裂带断层岩在水热条件下的摩擦滑动特征实验研究

苏晓婉¹, 周永胜^{1*}

1. 中国地震局地质研究所, 地震动力学与强震预测全国重点实验室 构造物理室, 北京 100029

鲜水河断裂是一条强震频发的大型走滑断裂, 但形变测量观测到某些段落存在蠕滑。这些蠕滑区段大量出露的富含黏土矿物的板岩、黑色碳质泥岩和千枚岩, 代表了鲜水河断裂上地壳的主要岩石组成。为研究鲜水河断裂的无震蠕滑和粘滑(地震)机制、转化条件与物理机制, 我们采用气体介质三轴高温高压岩石力学实验装置, 在围压 50、100、170 和 200 MPa, 孔隙水压 30、100 MPa, 和实验温度 25~370 °C 条件下, 开展了板岩、黑色碳质泥岩断层泥和千枚岩的高温高压摩擦实验研究。为获得实验样品摩擦稳定性的速度依赖性参数(a-b), 实验中的轴向加载速率在 5.0、1.0、0.2、

0.04 $\mu\text{m/s}$ 之间进行切换。实验结果显示, 板岩、黑色碳质泥岩和千枚岩在实验条件下的摩擦强度分别为 0.54~0.64、0.54~0.70 和 0.50~0.58。并且三种实验样品的摩擦稳定性均表现出随温度的升高由速度强化转变为速度弱化, 其中板岩和黑色碳质泥岩断层泥的转化温度为 250~300 °C, 而千枚岩的转化温度为 300~350 °C。结合地温梯度, 鲜水河断裂带在 10 公里以上呈现为速度强化型蠕滑, 在 10~20 公里深度具备地震成核条件。

关键词: 鲜水河断裂带; 板岩; 黑色碳质泥岩断层泥; 千枚岩; 摩擦滑动稳定性

基金项目: 国家自然科学基金地震联合基金(U2139202)

第一作者简介: 苏晓婉(1992-), 助理研究员, 研究方向: 实验岩石学. Email: suxiaowan@ies.ac.cn

通讯作者简介: 周永胜(1969-), 研究员, 研究方向: 高温高压岩石流变学实验研究. Email: zhouyush@ies.ac.cn

• 专题 28: 高温高压实验装置、技术和方法 •

高温高压下地幔矿物的波速测量

赵超帅¹, 毛竹^{1*}, 于英鑫¹, 张馨月¹

1. 中国科学技术大学, 合肥 230026

波速是地幔矿物最为重要的物理性质之一。实验测量高温高压条件下地幔矿物的波速与地震学观测结果的对比, 是反演地球内部物质组成和比例, 揭示地球内部物质分布不均一性成因最为直接和重要的手段(毛竹等 2022)。因此, 实验模拟地幔矿物在极端条件下的波速测量变得尤为重要且关键。其中, 电阻外加热和布里渊散射技术的联用实现了高温高压下原位测量波速参数的精确获取。相比于传统的超声干涉测量的方法, 电阻外加热和布里渊散射技术的结合具有所需样品小(几十微米级), 测量压力高(100

GPa 以上), 温度稳定(误差正负 2 度), 精准获取矿物各种弹性和各项异性等众多优点。该联用技术已成功用于地幔矿物(如橄榄石、布里奇曼石、方镁铁矿等)和含碳含水重要挥发份(如碳酸盐, 含水矿物等)的波速测量(Kurnosov et al., 2017; Li et al., 2022; Mao et al., 2015; Su et al., 2021; Yang et al., 2016; Zhao et al., 2019), 为反演地幔矿物组成和分布提供了关键且可靠的实验约束。

关键词: 高温; 高压; 地幔矿物; 波速; 挥发分

基金项目: 国家重点研发计划项目(2024YFF0807500)

第一作者简介: 赵超帅(1989-), 副研究员, 研究方向: 高压矿物物理。Email. cszhao@ustc.edu.cn

通讯作者简介: 毛竹(1982-), 教授, 研究方向: 高压矿物物理。Email. zhumao@ustc.edu.cn

• 专题 28: 高温高压实验装置、技术和方法 •

金刚石对顶砧超高压技术发展及其在探索巨行星中的应用

吕超甲¹, 刘锦^{1*}

1. 燕山大学 亚稳材料制备技术与科学国家重点实验室, 河北秦皇岛 066004

过去十余年来, 金刚石对顶砧 (diamond anvil cell, DAC) 超高压技术在压力和温度极限的突破上取得了重要进展, 极大推动了固体物理及行星科学研究。二级金刚石对顶砧 (double-stage anvil) 和环形压砧 (toroidal anvil) 技术的提出, 使静高压实验突破了 400 GPa 压力瓶颈, 为研究超高压条件下的巨行星内部物质提供了新方法 (Dubrovinsky et al., 2022; Dewaele et al., 2018; Jenei et al., 2018)。近期, 环形压砧 DAC 的发展进一步提高了极限压力下的砧面尺寸, 并有效扩展了超高压实验的样品体积 (Zurkowski et al., 2024)。在温度控制方面, 脉冲激光加热技术提升了超高压实验的温度上限, 并降低了金刚石压砧因受热导致的破裂风险。同

时, 一系列结合聚焦离子束 FIB 技术设计加工的样品腔布局为透明样品的激光加热成为可能 (Weck et al., 2022)。这些静高压实验技术和方法上的进步使得对巨行星内部超离子相、铁合金在极端条件下的相变及挥发性元素的高温高压行为等关键科学问题的实验研究成为可能 (Millet et al., 2018)。随着 DAC 超高压技术的不断发展, 其在行星科学中的应用将进一步深化, 为理解巨行星的矿物组成、内部结构及热力学演化提供更精确的实验约束。

关键词: 金刚石对顶砧; 超高压; 巨行星; 超级地球

基金项目: 国家自然科学基金委“地球宜居性的深部驱动机制”重大研究计划的重点支持项目 (9247921)

第一作者简介: 吕超甲 (1993-), 博士后, 研究方向: 高压矿物物理. Email: lvchaojia@ysu.edu.cn

*通信作者简介: 刘锦 (1984-), 教授, 研究方向: 高温高压合成/矿物物理. Email: jinliu@ysu.edu.cn

• 专题 28: 高温高压实验装置、技术和方法 •

基于同步辐射 X 射线谱学的水热大腔体高温高压装置

宋海鹏¹, 巫翔^{1*}

1. 中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室, 武汉 430074

报告将介绍了一种专用于同步辐射 X 射线吸收光谱学的高温高压水热装置, 温度可达 600 °C, 压力可达 200 MPa, 且温度和压力参数可以独立控制。该装置采用内陷式釜体密封模式, 以确保装置的密封性以及安全性, 具有三个铍窗口, 满足实验线站的多种测试模式。该装置已在上海光源 11 B 和 14 W 线站进行调试运行, 用于探究高温高压条件下 Au 在含氯流体中的络合形式。实验结果表明, 在低温低压条件下, Au 主要以[AuCl₄]络合物稳定存在, 而在温度和

压力升高至 200 °C、72.1 MPa, 其络合形式转变为[AuCl₂]形式, 并能在高达 500 °C、92.4 MPa 的条件下稳定存在。该实验结果与前人的研究成果相一致, 进一步验证了我们的研究方法和设备的可靠性。该装置可有效的应用在模拟地质流体中金属元素在高压和高温条件下的演变、种类以及物理和化学性质。

关键词: 同步辐射; 高温高压实验技术; 水热大腔体装置; 热液成矿

基金项目: 国家重大科研仪器研制项目(41827802) 国家杰出青年科学基金项目(42225202)

第一作者: 宋海鹏(1995-), 博士研究生, 研究方向: 矿物学、岩石学、矿床学。Email: songhaipeng@cug.edu.cn

通讯作者: 巫翔(1978-), 教授, 研究方向: 高压矿物学。Email: wuxiang@cug.edu.cn