

近十年来我国实验矿物岩石地球化学 研究进展和展望

熊小林¹, 章军锋², 郑海飞³, 许文良⁴, 周永胜⁵

1. 中国科学院 广州地球化学研究所 同位素地球化学国家重点实验室, 广州 510640; 2. 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; 3. 北京大学 地球与空间科学学院, 北京 100871;
4. 吉林大学 地球科学学院, 长春 130061; 5. 中国地震局 地质研究所 地震动力学国家重点实验室, 北京 100029

摘要: 21世纪前十年,我国实验矿物岩石地球化学研究取得了长足进展,不仅表现在实验研究设备与技术的更新和快速进步,而且表现在研究队伍的国际化 and 研究水平与国际接轨。同时,在地幔和下地壳岩石流变学、冲击动高压研究外核物质组成、高温高压下矿物和岩石的物性测量和相变研究、上地幔部分熔融、变质玄武岩体系相平衡、矿物/熔体微量元素分配等领域取得了有显示度或国际影响的成果,为我国实验矿物岩石地球化学研究的全面发展奠定了良好的基础。

关键词: 高温高压实验; 进展; 展望

中图分类号: P579; P589; P599 文献标识码: A 文章编号: 1007-2802(2013)04-0402-06

The Research and Expectation of Experimental Mineralogy, Petrology and Geochemistry Nearly Ten Years

XIONG Xiao-lin¹, ZHANG Jun-feng², ZHENG Hai-fei³, XU Wen-liang⁴, ZHOU Yong-sheng⁵

1. State Key Laboratory of Isotope Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, Guangzhou 510640, China;
2. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 3. School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China;
4. College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, China; 5. State Key Laboratory of Earthquake Dynamics, Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing 100029, China

Abstract: In the last ten years, experimental mineralogy-petrology-geochemistry fields in China have obtained rapid progresses, not only in the experimental equipment and technology, but also in the research team and research level. Main achievements include studies on the crust and mantle rheology, the composition of the outer core, measurements of physical properties of rocks and minerals under high temperature and high pressure, partial melting of the upper mantle, phase equilibrium in the metamorphic basalt system, and mineral/melt trace elements distribution. These achievements lay a solid foundation for our experimental mineralogy-petrology-geochemistry research in the coming years.

Key words: high-*t* and high-*p* experiment; progress; outlook

1 实验矿物岩石地球化学学科特点

实验矿物岩石地球化学又称为实验地球科学或高温高压实验,包括高压矿物学和矿物物理、实验岩石学、实验地球化学和岩石流变学等,是高温高压实

验技术与物理化学和地球科学的交叉学科。实验矿物岩石地球化学主要研究地表以下高温高压条件下的地球科学问题,如地球深部物质的结构相变、物理性质(密度、弹性、电导率、流变性质等);矿物岩石地球化学体系(矿物-熔体-流体)的相平衡、元素分配

收稿日期: 2011-12-06 收到, 2013-05-07 改回

第一作者简介: 熊小林(1963-), 男, 研究员, 博士生导师, 研究方向: 实验岩石学与实验地球化学. E-mail: xiongxl@gig.ac.cn.

和分异、成矿元素的迁移和富集、同位素分馏等；它为现代矿物学、岩石学、矿床学和地球化学等地球科学的理论发展做出了重要贡献。近二十多年来，随着人类对地球深部认知要求和高温高压技术的发展，实验矿物岩石地球化学注入了新的研究内容和活力，成为地球深部物质科学和地球深部过程研究的重要组成部分，极大地推进了人类对地球深部物质组成、状态、存在形式、化学演化和运动规律的认识。

高温高压实验的特点之一是能够定量研究地球物质体系矿物、熔体和流体的形成或稳定条件以及元素地球化学行为及其在构造变形环境中的变化规律，从而为矿物学、岩石学、矿床学、地球化学和构造地质学研究提供详细解释和理论支持。另一个突出特点是它在地球深部物质科学研究中的不可替代性：地球是一个复杂的系统，地球深部的物理化学过程驱动板块运动和地幔柱活动，触发构造—岩浆—流体活动和成矿作用以及浅表变化。现今人们对地球深部（地幔和地核）物质组成、状态、存在形式和物理化学过程的认识主要立足于三个途径：①深部地球物理探测；②深源地幔岩、地幔包体和高压超高压变质岩矿物学、岩石学和地球化学研究；③高温高压实验和理论计算模拟。由于地球深部直接取样的困难性和地球内部高温高压条件下物质状态、存在形式以及物理化学性质和过程的复杂性，基于前两个途径进行研究有很大的局限性，深部地球物理探测如地震学仅提供地球物质密度和弹性随深度变化的信息，无法评估深部物质的结构和化学存在形式，而通过深源地幔岩、地幔包体和高压超高压变质岩进行矿物学、岩石学和地球化学研究获得的地球深部信息也十分有限，因此要求高温高压实验和理论计算模拟配合进行交叉研究。实验地球科学以高温高压技术为依托，能够在限定的压力（深度）、温度、氧逸度和挥发分等条件下研究地球物质体系的物理化学性质、状态、存在形式和变化规律。其结果不仅可以对地球物理观察资料进行反演和物质成分解释，而且提供了浅部矿物学、岩石学和地球化学资料向深部外推的关键依据，弥补了深源地幔岩、地幔包体和高压超高压变质岩无法获得的地球更深层次信息的局限性。

2 我国高温高压实验技术的发展

国际上高温高压实验技术的发展经历了从大气压力下硅酸盐体系相平衡高温实验到地壳、地幔乃至地核压力下地球物质体系高温高压实验发展过

程。早期的冷封式高压釜(cold seal)实验技术仅仅能够研究压力在 0.5 GPa 以下(<20 公里, 1 GPa=10000 大气压)矿物、熔体和流体物理化学性质和元素地球化学行为；大约从 20 世纪 50 年代中期开始，压力更高的实验技术得到发展，活塞圆筒(piston cylinder)、大腔体压机(large volume press)以及金刚石压腔(diamond anvil cell)技术分别能开展压力在 0.5~4.0 GPa, 2.0~30 GPa 和几十到 300 GPa 下静态高温高压实验，这些技术的进步大大促进了实验地球科学的发展。

我国实验矿物岩石地球化学起步于 20 世纪 70 年代，20 世纪 80 年代曾一度比较繁荣，中国科学院地球化学研究所做出了重要贡献。当时的主要实验技术集中在水热体系，针对的是压力较低(<0.5 GPa, <20 km)条件下的元素地球化学行为和成岩成矿地球化学研究。在动态高温高压实验(即流变学实验)技术方面，20 世纪 80 年代初期国家地震局地质研究所成功研制气体围压介质(0.4 GPa, 600℃)和固体围压介质三轴仪(2 GPa, 1000℃)^[1~3]；中国科学院地球物理研究所在上世纪 80 年代末成功研制出了 800 吨大型伺服控制高温高压流变仪和 3 GPa 固体围压介质三轴流变仪^[4]，这在当时国际上也是先进的。20 世纪 90 年代，由于实验技术、研究手段和研究经费等原因，高温高压实验随后有所萎缩，从事实验地球科学研究的人员减少，与国际该领域的迅速发展差距拉大，但通过国际合作仍然取得一些原创性成果^[5~9]。

近十年来，随着经济崛起和国力增强，我国高温高压实验技术和研究落后的局面已引起科学家们的高度关注，在科学问题和迫切的国家需求引领下，一些高校和科研单位都在加快高温高压实验技术平台建设。如吉林大学、燕山大学和中国地质大学(武汉)引进和装备了国际上先进的压力能达到 25 GPa 的 6-8 型多顶砧压机(multianvil)；北京大学装备了压力能达到 10 GPa 的六面顶压机；中国科学院广州地球化学所引进和安装了气体介质 Paterson 流变仪；中国地质大学(武汉)、北京大学和中国科学院广州地球化学研究所引进压力能达到 4 GPa 的活塞圆筒压机；中国地震局地质研究所和中国地质大学(武汉)正在各自独立研发新的研究地壳岩石的 3 GPa 和 5 GPa 熔融盐介质高温高压流变仪；中国地震局地质研究所通过气体介质三轴高温高压设备的研制和改造，基本掌握了气体介质高温高压实验系统的复杂技术，同时，通过多通道弹性波速、声发射等测量系统的研制，拓宽了高温高压实验中的测量

手段,提高了自主研发高温高压设备与测量系统的能力,目前实验室拥有8台不同类型的高温高压实验设备和相对应的观察系统,研究条件涵盖了从地表到100 km深度的温度、压力范围,研究领域包含了实验岩石学、岩石破裂和摩擦与流变、矿物相变、岩石波速、电导率、孔隙度与渗透率、热导率、岩石变形中的应力-应变场、温度场、电磁场、声发射等,最新从日本引进的高速摩擦实验设备,可以模拟地震过程中的断层高速摩擦及其引起的部分熔融(假玄武岩)与矿物成分、结构等的变化;中国科学院地球化学研究所正在开展高温高压原位测量技术的开发,包括高温高压下固体和熔体超低频电性就位测量、流体体系组成的就位精确测定和氧逸度的就位控制、地球物质弹性波速反射-透射联合精密测量、导电性矿物腐蚀电化学就位测量系统等等。

应当承认,虽然近十年来我国在高温高压实验设备研制和实验成果等方面取得了突破性的进展,但我国目前在高温高压实验技术、仪器设备精度等方面与国际先进水平相比仍然有相当大的差距,特别是拥有高温高压实验设备的研究单位比较少,研究队伍的规模偏小,研究力量与技术支持等方面还很薄弱。因此,加快实验技术平台建设和人才培养,壮大高温高压实验研究的队伍与能力,将我国高温高压实验技术和研究水平推向国际前沿已迫在眉睫。

3 我国高温高压实验研究的进展

近十年来,在我国高温高压实验和实验矿物岩石地球化学研究领域,一方面通过国际合作,学习国外的先进技术和理念的基础上,自主研发实验设备和自己培养人才;另一方面通过引进先进的高温高压实验设备和引入具有国际视野的研究人才,高温高压实验已经有了可喜进步和起色。在地幔和下地壳岩石流变学、冲击动高压外地核物质组成研究、高温高压下矿物和岩石的物性测量、上地幔部分熔融、变质玄武岩体系相平衡、矿物/熔体微量元素分配等领域取得了一些有显示度或国际影响的成果。具体表现在以下几个方面:

(1)地幔和下地壳岩石流变学实验取得重大进展。金振民院士的研究团队在上地幔熔融动力学、超高压榴辉岩流变本构方程建立,中国东部地幔岩石超显微构造和橄榄石矿物流变学高温高压实验方面,取得了被国内外同行认可的成果,使我国这领域在国际上占有一席之地^[6];章军锋教授^[10~12]通过系统的高温高压流变学实验结合发表他本人在*Nature*上的成果,探讨了榴辉岩的流变强度、显微构造

演化和高压脱水致裂对解释深俯冲带中等深度地震活动的意义^[10~12],研究成果发表在*Nature*、*Earth and Planetary Science Letters*等国际主流地学期刊杂志上。作为高山教授领导的中国东部壳幔演化研究团队成果的一部分,他们的研究成果获得2007年度国家自然科学二等奖。

(2)冲击动高压在外地核物质组成方面取得了重大科研成果。根据地球化学、宇宙化学、地震学和地球转动惯量以及高温高压实验等方面的研究表明,液态外核包含10%左右的轻元素。虽然轻元素在外地核中的含量相对较少,但液态外地核中轻元素的种类和含量,对研究外地核的成分对流、地核的冷却速率、固态内地核的生长以及地球磁流体发电机的演化机理等方面,具有非常重要的科学意义,影响着地核的动力学行为以及热力学特征。近年来Huang等^[13,14]研究了富氧的Fe-O-S体系($Fe_{90}O_8S_2$)和富硫的Fe-O-S体系($Fe_{92.5}O_{2.2}S_{5.3}$)在高温高压下的状态方程、声速和熔化温度,发现在外地核的温度和压强环境下富氧体系的密度要明显比外地核的密度小,其体波声速要比外地核的声速高;而富硫体系的密度与外地核的密度比较一致,但是在外地核的底部,富硫体系的体波声速要明显高于外地核的声速,这说明外地核中氧元素的含量最大不能超过2.5%(wt,下同)。上述结果已经发表于2011年的*Nature*杂志上^[14]。“液态外地核贫氧的证明”文章发表后,受到了国际同行专家的高度评价。国际著名地球物理学家Thomas S. Duffy教授在*Nature*上撰写了评论文章“Probing the core's light elements”,认为这一原创性成果,将解决六十年来关于外地核中化学成分的争论^[15]。

(3)实验地球化学取得重要进展。熊小林研究组瞄准大陆壳形成和演化等重大科学问题,通过变质玄武岩体系的相平衡、 TiO_2 溶解度,矿物/熔体微量元素分配等高温高压实验^[16~19],限定了金红石稳定的组分、温度和压力条件以及变质玄武岩部分熔融产生的熔体微量元素特征,由金红石稳定的压力揭示大陆壳TTG岩浆产生深度大于50 km,为地球早期大陆壳形成条件和古地壳增厚事件(如华北克拉通破坏过程)提供了关键制约,拓展了大陆壳TTG/埃达克岩成因理论。这一成果已广泛应用于俯冲带TTG/埃达克岩成因、大陆下地壳拆沉和物质再循环等研究,他们发表于地学主流刊物*Chemical Geology*(2005)一文成为地球科学领域高引用率论文,SCI他人引用130余次。相关成果获2011年广东省科学技术一等奖。

(4)地幔钙钛矿型化合物相变研究取得突破性进展,发现等结构相变。肖万生等^[20]使用金刚石压腔同步辐射 X 射线衍射技术对下地幔钙钛矿型化合物 PbCrO_3 进行了系统探索,首次发现立方钙钛矿结构化合物的等结构相变现象。这一等结构转变导致 9.8% 的体积差,异常大的体积变化及其蕴含的奇特物理机制,向传统的钙钛矿相变理论研究提出了挑战,丰富了钙钛矿相变理论,对地球内部物质科学研究将产生重大影响,该成果发表在美国科学院院报。

(5)高压矿物物理取得系列进展。金刚石压砧技术与激光加温系统相结合,可达压力范围 0~200 GPa,温度范围 0~4000 K,用于模拟地球内部不同深度的温压环境。北京大学刘曦研究员、巫翔研究员、翟双猛副教授等课题组利用同步辐射先进光源表征技术,结合金刚石压砧技术和激光加温系统,对许多地球上重要的矿物在地幔温压条件下开展了原位的测试实验,获得物质的晶体化学和物理性质,为地球深部的物质组成及其状态提供了矿物物理学的依据^[21~34]。如巫翔研究员课题组在 53 GPa 和 2000 K 条件下原位地观察到钙钛矿型的 FeTiO_3 分解过程,其结果已被用于讨论 MgSiO_3 钙钛矿的结构稳定性^[28]。又如刘曦^[35]研究员等课题组对蓝晶石等矿物的状态方程研究结果已被用于大陆地壳物质深俯冲的地球动力学过程研究。

(6)地壳重要矿物长石的高压物理-化学行为取得系列进展;长石是地壳的重要组成矿物,其在高温高压条件下的相变化、物理-化学性质对了解地球内部相关结构、地球化学过程、地球动力学影响非常重要。近十年来,北京大学刘曦研究员、中国科学院地球化学研究所李和平研究员、中国地震局地震预测研究所杜建国研究员等课题组就长石展开了高温高压研究,取得了一系列成果^[35~42]。如刘曦研究员课题组针对钙长石组份观察到了一系列新的高压相组合,并探讨了其在地球深部地球动力学过程中的重要性^[35]。李和平研究员课题组实验测量了钾-钠长石系列在高压下的电阻变化,相关成果进而成功地应用到了花岗岩等自然岩石的电阻研究上^[41]。

(7)高温高压条件下不同性质熔体-地幔橄榄岩反应与岩石圈深部作用过程研究取得初步成果。以中国地质大学(武汉)和吉林大学为代表的研究小组,近年来开展了静态和差应力条件下、不同性质熔体(富硅熔体、贫硅熔体、含水熔体等)与地幔橄榄岩反应的高温高压实验研究^[43,44],这对揭示了岩石圈地幔发生的深部作用过程与机制具有重要意义,同

时对陆内背景下大陆地壳物质的再循环和不同性质玄武岩的成因给予了很好的制约。

(8)大陆中下地壳物理力学性质与影响因素实验研究取得进展。中国地震局地质研究所通过对基性岩开展摩擦、脆塑性转化、塑性流变实验,得到了大陆中、下地壳的摩擦强度、摩擦滑动稳定性与地震成核机制^[45,46],水、熔体和变质反应对下地壳流变的影响等^[47],发表的实验数据被哈佛大学 Jim Rice 教授领导的课题组用来模拟板块俯冲与大陆构造变形,模拟结果与观察结果比较吻合;通过差应力条件下的石英-柯石英相变实验,提出差应力对超高压变质岩的形成具有影响^[48];通过高温高压部分熔融实验与弹性波速实验得出,成分和变形引起的各向异性非常有效,熔体强化各向异性是造成青藏高原地壳各向异性的主要原因。

4 展 望

尽管我国高温高压实验技术和研究已经有了可喜进步和起色,但目前无论是实验技术条件、研究队伍、还是研究水平都与北美、日本和欧洲等西方发达国家差距较大,即总体上各方面均落后于国际先进水平。基于我国高温高压实验技术发展现状和国际该领域的迅速发展趋势,未来我国实验矿物岩石地球化学发展应当遵循实验技术平台建设、人才培养和国际前沿研究并重的原则,不断积累基础数据,提高我国实验矿物岩石地球化学的研究水平;并通过与地质地球物理、矿物学、岩石学和地球化学等学科的交叉研究,为我国有优势和影响的国际前沿领域如克拉通破坏、大陆板块俯冲、地幔柱、碰撞造山、青藏高原隆升动力学等研究中的关键科学问题以及我国优势矿产和紧缺矿产的形成条件、地震孕育机理与强震预测研究等提供实验约束,通过高温高压实验探讨这些重大地质和成矿事件与地震发生的深部触发机制和过程,发展实验矿物岩石地球化学。

致 谢:本文是作者们尽自己所能收集资料写成的,肯定很不全面,感谢为我们提供资料的同仁。

参考文献 (References):

- [1] 傅芳才. 高温高压三轴试验机的现状及今后发展趋势[J]. 地质力学所刊, 1986, 8: 143-151.
- [2] 王绳祖. 高温高压岩石力学-历史、现状与展望[J]. 地球物理学进展, 1995, 10(4): 1-31.
- [3] 金振民. 我国高温高压实验研究进展和展望[J]. 地球物理学报, 1997, 40: 70-80.
- [4] 石泽全, 于智海. 800t 高温高压伺服三轴流变仪的研制[A].

- 第一届高温高压岩石力学学术讨论会论文集[C]. 北京: 学术期刊出版社, 1988: 111—116.
- [5] Jin Z, Green H W, Zhou Y. Melt topology in partially molten peridotite during ductile deformation[J]. *Nature*, 1994, 372: 164—167.
- [6] Jin Z, Zhang J, Green H W, Jin S. Eclogite rheology: Implications for subducted lithosphere[J]. *Geology*, 2001, 29: 667—670.
- [7] 谢鸿森. 地球深部物质科学导论[M]. 北京: 科学出版社, 1997.
- [8] 杜建国, 谢鸿森. 从原子到地球—高压地球科学研究进展[M]. 北京: 地震出版社, 2007.
- [9] 杜建国, 李营, 王传远, 刘雷. 高压地球科学[M]. 北京: 地震出版社, 2010.
- [10] Zhang J, Green H W. Experimental investigation of eclogite rheology and its fabrics at high temperature and pressure[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 2007, 25: 97—115.
- [11] Zhang J, Green H W, Bozhilov K N. Rheology of omphacite at high temperature and pressure and significance of its lattice preferred orientations[J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2006, 246: 432—443.
- [12] Zhang J, Green H W, Bozhilov K, Jin Z M. Faulting induced by precipitation of water at grain boundaries in hot subducting oceanic crust[J]. *Nature*, 2004, 428: 633—636.
- [13] Huang H, Hu X, Jing F, Cai L, Shen Q, Gong Z, Liu H. Melting behavior of Fe-O-S at high pressure; A discussion on the melting depression induced by O and S[J]. *J. Geophys. Res.*, 2010, 115: B05207, 1—9.
- [14] Huang H, Fei Y, Cai L, Jing F, Hu X, Xie H, Zhang L, Gong Z. Evidence for an oxygen-depleted liquid outer core of the Earth[J]. *Nature*, 2011, 479: 513—516.
- [15] Duffy T S. Earth science: Probing the core's light elements[J]. *Nature*, 2011, 479: 480—481.
- [16] Xiong X L, Keppler H, Audétat A, Ni H W, Sun W D, Li Y. Partitioning of Nb and Ta between rutile and felsic melt and the fractionation of Nb/Ta during partial melting of hydrous metabasalt[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 2011, 75: 1673—1692.
- [17] Xiong X L, Keppler H, Audétat, Gudfinnsson G, Sun W D, Song M S, Xiao W S, Li Y. Experimental constraints on rutile saturation during partial melting of metabasalt at the amphibolite to eclogite transition, with applications to TTG genesis[J]. *American Mineralogist*, 2009, 94: 1175—1186.
- [18] Xiong X L. Trace element evidence for the growth of early continental crust by melting of rutile-bearing hydrous eclogite[J]. *Geology*, 2006, 34: 945—948.
- [19] Xiong X L, Adam J, Green T H. Rutile stability and rutile/melt HFSE partitioning during partial melting of hydrous basalt; Implications for TTG genesis[J]. *Chemical Geology*, 2005, 218: 339—359.
- [20] Xiao W S, Tan D Y, Xiong X L, Liu J, Xu J A. Large volume collapse observed in the phase transition in cubic PbCrO_3 perovskite[J]. *PNAS*, 2010, 107: 14026—14029.
- [21] Gu T, Wu X, Qin S, Dubrovinsky L. In situ high-pressure study of FeP; Implications for planetary cores[J]. *Physics of Earth and Planetary Interiors*, 2011, 184: 154—159.
- [22] Gu T, Wu X, Qin S, Liu J, Li Y, Zhang Y. High-pressure and high-temperature in situ X-ray diffraction study of FeP2 up to 70 GPa[J]. *Chinese Physical Letters*, 2012, 29, 026102: 1—3.
- [23] He Q, Liu X, Hu X, Deng L, Chen Z, Li B, Fei Y. Solid solutions between lead fluorapatite and lead fluorovanadate apatite; Compressibility determined by using a diamond-anvil cell coupled with synchrotron X-ray diffraction[J]. *Physics and Chemistry of Minerals*, 2012, 39: 219—226.
- [24] Liu X, Shieh S R, Fleet M E, Zhang L. The compressibility of a natural kyanite at 300 K[J]. *Progress in Natural Science*, 2009, 19: 1281—1286.
- [25] Liu X, Shieh S R, Fleet M E, Zhang L, He Q. Equation of state of carbonated hydroxylapatite at ambient temperature; Significance of carbonate[J]. *American Mineralogist*, 2011, 96: 74—80.
- [26] Liu X, Fleet M E, Shieh S R, He Q. Synthetic lead bromapatite; X-ray structure at ambient pressure and compressibility up to about 20 GPa[J]. *Physics and Chemistry of Minerals*, 2011, 38: 397—406.
- [27] Liu X, He Q, Deng L, Zhai S, Hu X, Li B, Zhang L, Chen Z, Liu Q (c). Equation of state of CAS phase to pressure of the uppermost lower mantle at ambient temperature[J]. *Science China (D)*, 2011, 54: 1394—1399.
- [28] Wu X, Steinle-Neumann G, Narygina O, Kantor I, McCammon C, Prakapenka V, Swamy V, Dubrovinsky L. High-pressure behavior of perovskite; FeTiO_3 dissociation into $(\text{Fe}_{1-\delta}, \text{Ti}_\delta)\text{O}$ and $\text{Fe}_{1+\delta}\text{Ti}_{2-\delta}\text{O}_5$ [J]. *Physical Review Letters*, 2009, 103: 065503.
- [29] Wu X, Steinle-Neumann G, Narygina O, Kantor I, McCammon C, Pascarelli S, Aquilanti G, Prakapenka V, Dubrovinsky L. Iron oxidation state of FeTiO_3 under high pressure[J]. *Physical Review B*, 2009, 79: 094106.
- [30] Wu X, Mookherjee M, Gu T, Qin S. Elasticity and anisotropy of iron-nickel phosphides at high pressures[J]. *Geoph. Res. Lett.*, 2011, 38: L20301.
- [31] Wu Y, Wu X, Qin S. Pressure-induced phase transition of Fe_2TiO_4 ; X-ray diffraction and Mössbauer spectroscopy[J]. *Journal of Solid State Chemistry*, 2012, 185: 72—75.
- [32] Zhai S, Liu X, Shieh S R, Zhang L, Ito E. Equation of state of tricalcium phosphate, $\gamma\text{-Ca}_3(\text{PO}_4)_2$, to lower mantle pressures[J]. *American Mineralogist*, 2009, 94: 1388—1391.
- [33] Zhai S, Wu X, Ito E. High-pressure Raman spectra of tuite, $\gamma\text{-Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ [J]. *J. Raman Spectrosc.*, 2010, 41: 1011—1013.
- [34] Zhai S, Xue W, Yamazaki D, Shan S, Ito E, Tomioka N, Shimojuku A, Funakoshi K. Compressibility of strontium orthophosphate $\text{Sr}_3(\text{PO}_4)_2$ at high pressure[J]. *Physics and Chemistry of Minerals*, 2011, 38: 357—361.
- [35] Liu X, Ohfuji H, Nishiyama N, He Q, Sanehira T, Irifune

- T. High- p behavior of anorthite composition and some phase relations of the CaO-Al₂O₃-SiO₂ system to the lower mantle of the Earth, and their geophysical implications[J]. *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, 2012, 117: B09205.
- [36] Chang L, Chen Z, Liu X, Wang H. Expansivity and compressibility of wadeite-type K₂Si₄O₉ determined by in situ high T/P experiments, and their implication[J]. *Physics and Chemistry of Minerals*, 2013. doi:10.1007/s00269-012-0543-7.
- [37] Deng L, Liu X, Liu H, Dong J. High-pressure phase relations in the composition of albite NaAlSi₃O₈ constrained by an ab initio and quasi-harmonic Debye model, and their implications[J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2010, 298: 427–433.
- [38] Deng L, Liu X, Liu H, Zhang Y. A first-principles study of the phase transition from HolI to HolII in the composition KAlSi₃O₈[J]. *American Mineralogist*, 2011, 96: 974–982.
- [39] Liu X, Hu Z, Deng L. Feldspars under conditions of high temperature-high pressure [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2010, 26: 3641–3650.
- [40] Hu H, Li H, Dai L. Electrical conductivity of albite at high temperatures and high pressures[J]. *American Mineralogist*, 2011, 96: 1821–1827.
- [41] Hu H, Li H, Dai L, Shan S, Zhu C. Electrical conductivity of alkali feldspar solid solutions at high temperatures and high pressures[J]. *Physics and Chemistry of Minerals*, 2013, doi: 10.1007/s00269-012-0546-4.
- [42] Xie C, Du J, Cui Y, Chen Z, Zhang W, Yi L, Deng L. Variation of Raman spectra of oligoclase under 1.0–4.4 GPa[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2012, 32: 691–694.
- [43] 于洋, 许文良, 刘晓暘, 杨斌. 高温高压条件下角闪石榴辉石岩-橄榄岩反应:初步实验结果及其地质意义[J]. *地球科学进展*, 2009, 19(6):644–651.
- [44] 王超, 金振民, 高山, 章军锋, 郑曙. 华北克拉通岩石圈破坏的榴辉岩熔体-橄榄岩反应机制:实验约束[J]. *中国科学:地球科学*, 2010, 40(5):541–555.
- [45] He C, Yao W, Wang Z, Zhou Y. Strength and stability of frictional sliding of gabbro gouge at elevated temperatures [J]. *Tectonophysics*, 2006, 427: 217–229.
- [46] He C, Wang Z, Yao W. Frictional sliding of gabbro gouge under hydrothermal conditions[J]. *Tectonophysics*, 2007, 445:353–362.
- [47] Zhou Y, Rybacki E, Wirth R, He C, Dresen G. Creep of partially molten fine-grained gabbro under dry condition[J]. *Journal of Geophysical Research* (submitted).
- [48] 周永胜, 何昌荣, 宋娟, 马胜利, 马瑾. 在差应力条件下石英-柯石英转化的实验研究[J]. *科学通报*, 2005, 50(6):565–570.