

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2022.259>



实验岩石学发展现状与趋势

倪怀玮^{1,2}, 王沁霞¹, 王春光³, 张艳飞⁴

1. 中国科学院壳幔物质与环境重点实验室, 中国科学技术大学地球和空间科学学院, 安徽合肥 230026
2. 中国科学院比较行星学卓越创新中心, 安徽合肥 230026
3. 吉林大学地球科学学院, 吉林长春 130061
4. 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

摘要: 实验岩石学通过高温高压实验来模拟地球内部状态, 正演研究矿物、岩石及其组分的物理化学行为, 与天然矿物和岩石样品反演研究相互补充。从 20 世纪初美国卡内基研究所建立地球物理实验室算起, 实验岩石学已经历了 100 多年的发展, 在认识地球内部状态和过程以及矿物和岩石成因方面发挥了重要作用。我国实验岩石学研究开展约 50 年, 进入 21 世纪以来在实验平台和创新性研究成果方面取得了显著进步。在学科发展趋势方面, 实验岩石学表现出以下 6 方面的特点: (1) 新的高温高压实验技术不断涌现; (2) 实验与分析测试技术高度融合; (3) 实验模拟与计算模拟相结合; (4) 从热力学平衡扩展到动力学研究; (5) 从干体系扩展到对挥发分和流体的深入研究; (6) 应用场景从固体地球扩展到类地行星。通过进一步开发或改进高温高压实验技术, 加强与分析测试技术以及计算技术的结合, 实验岩石学有望在破解地球内部流体的性质和作用、地幔演化和岩浆分异、变质反应速率和机制、类地行星形成与演化等重要科学问题方面作出关键贡献。

关键词: 实验岩石学; 高温; 高压; 原位测量。

中图分类号: P589

文章编号: 1000-2383(2022)08-2691-10

收稿日期: 2021-12-08

Experimental Petrology: Status Quo and Prospect

Ni Huaiwei^{1,2}, Wang Qingxia¹, Wang Chunguang³, Zhang Yanfei⁴

1. CAS Key Laboratory of Crust-Mantle Materials and Environments, School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China
2. CAS Center for Excellence in Comparative Planetology, Hefei 230026, China
3. College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, China
4. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: Through simulating the high pressure and high temperature conditions in Earth's interior, experimental petrology investigates the physicochemical behavior of minerals, rocks and the components they contain, which complements "inverse problem" study using natural samples. Since the foundation of the Geophysical Laboratory of the Carnegie institution in the early 20th century, the development of experimental petrology has been taking place for more than 100 years. Experimental petrology has played a crucial role in advancing our knowledge about the conditions and processes in Earth's interior and the genesis of minerals and rocks. In China, experimental petrology has developed for more than five decades, and significant progress has been made in the 21st century with respect to laboratory building and scientific research. We highlight the following characteristics in the

基金项目: 国家自然科学基金项目 (Nos. 41825004, 41721002).

作者简介: 倪怀玮 (1981-), 男, 教授, 熔/流体实验岩石学专业. ORCID: 0000-0002-8648-5007. E-mail: hwni@ustc.edu.cn

引用格式: 倪怀玮, 王沁霞, 王春光, 张艳飞, 2022. 实验岩石学发展现状与趋势. 地球科学, 47(8): 2691-2700.

Citation: Ni Huaiwei, Wang Qingxia, Wang Chunguang, Zhang Yanfei, 2022. Experimental Petrology: Status Quo and Prospect. *Earth Science*, 47(8): 2691-2700.

development of experimental petrology as a discipline: (1) emergence of novel high temperature and high pressure experimental techniques; (2) integration of experimental and analytical techniques; (3) combination of experimental simulation and computational simulation; (4) expansion from thermodynamic equilibrium to kinetics; (5) expansion from dry systems to volatiles-bearing systems including fluids; (6) expansion from the Earth to other terrestrial planets. Through further development in experimental techniques and more intimate combination with analytical and computational methods, experimental petrology is expected to make important contributions in resolving important scientific problems, such as the properties and effects of geofluids, mantle evolution and magma differentiation, rates and mechanisms of metamorphic reactions, and the formation and evolution of terrestrial planets.

Key words: experimental petrology; high temperature; high pressure; in situ measurement.

0 引言

实验岩石学通过实验模拟的方法,产生地球内部的高温高压条件,正演研究矿物、岩石及其组成的物理化学行为。或者说,实验岩石学是通过人工合成岩石的方法来认识岩石形成的物理和化学条件乃至岩石成因的。矿物和岩石体系的物相关系以及相图是实验岩石学最基本的研究内容。

自然界中的矿物和岩石样品是地质过程的产物和记录,可用于开展反演研究。将模拟实验的结果与天然矿物和岩石样品进行比较,正演与反演相互补充,是破解矿物和岩石成因、揭示地球内部状态和过程的有效手段。

与矿物物理学相比,实验岩石学涉及的温度和压力条件相对较低,体系较为复杂,模拟对象一般可以到达地表(成为岩石)。实验地球化学侧重微量元素和同位素研究,而实验岩石学主要针对岩石体系中的主要组分。然而,实验岩石学、矿物物理学、实验地球化学三者之间有时并不容易严格区分。

1 实验岩石学发展简史

1.1 国际实验岩石学发展概况

英国科学家霍尔于十八世纪末期做了最早的玄武岩熔融—结晶和石灰岩变质形成大理岩的实验。1905年,美国卡内基研究所建立了地球物理实验室(该实验室2020年重组为地球与行星实验室),开展了大量的实验岩石学研究。其中,加拿大岩石学家鲍文在1920年代开展的关于岩浆结晶演化的实验研究建立了著名的鲍文反应序列,奠定了实验岩石学和现代岩石学的基础(Bowen, 1928)。进入1950年代后,水热高压釜(Luth and Tuttle, 1963)、内部加热高压釜(Yoder, 1950)、活塞圆筒压机(Boyd and England, 1960)、多面砧压机(Kawai, 1966)、金刚石压腔(Weir *et al.*, 1959; Forman *et*

al., 1972; Bassett *et al.*, 1993)等装置纷纷出现并逐渐成熟(包括实现快速淬火),高温高压实验装置和技术发展取得了长足的进步。与此同时,电子探针技术的发展实现了矿物元素组成的微区分析,使得高温高压实验产物的化学分析更加方便,也更加精确,促进了实验岩石学的发展。

在实验技术快速进步的基础上,针对各种岩浆岩和变质岩体系,实验岩石学家开展了大量的相平衡实验研究,提供了多种多样的地质温压计方法,明确了变质相系对应的温度和压力条件,为准确认识岩石形成的物理化学条件提供了必要依据。关于相平衡和物相热力学参数的实验数据也为构建MELTS (Ghiorso and Sack, 1995)和THERMOCALC (Holland and Powell, 2011)等热力学相平衡预测模型奠定了坚实基础,这些模型在岩石学研究中得到了广泛应用。从1970年代起,开始出现越来越多的关于晶体生长或溶解(如Kirkpatrick, 1975)、熔体—岩石反应(如Sekine and Wyllie 1983)以及元素扩散(如Watson, 1981)等动力学范畴(非平衡态)的实验研究。实验岩石学领域的进展显著推动了岩石学、地球化学热力学和动力学等学科的发展。

国际上多家知名地球科学研究机构都对实验岩石学给予高度重视。欧洲以德国拜耳地质研究所(BGI)为首,其他科研机构包括瑞士苏黎世联邦理工学院(ETH)、德国汉诺威大学、图宾根大学、英国伦敦大学学院、法国帕斯卡大学等。美国以卡内基研究所地球与行星实验室为首,其他科研机构包括密西根大学、明尼苏达大学、加州大学洛杉矶分校等。另外,澳大利亚国立大学、日本冈山大学等地的实验岩石学研究水平也都很高。

1.2 我国的实验岩石学研究

从1970年代起,我国在中国科学院地球化学研究所等单位开始实验岩石学研究的艰辛探索,在自主研发的3 000 t六面顶压机上开展了花岗岩熔融

和矿物生长等方面的研究(谢鸿森, 1997). 相较于面向天然样品的岩石地球化学研究, 实验岩石学在我国的发展一直相对滞后. 进入21世纪以来, 我国实验岩石学研究终于获得了蓬勃发展, 在中国地质大学(武汉)、中国科学院地球化学研究所、中国科学院广州地球化学研究所、北京大学、中国科学技术大学、南京大学、浙江大学等多家单位建成了处于国际先进水平的高温高压实验平台, 在壳源熔体与橄榄岩相互作用(如 Zhang *et al.*, 2012; Wang *et al.*, 2013)、岩浆岩地质温度计标定(Liu *et al.*, 2018)、矿物与流体的相互溶解(Yang *et al.*, 2014; Chen *et al.*, 2018)、硅酸盐熔体中的扩散速率和导电机制(Guo *et al.*, 2016; Zhang *et al.*, 2017)等方面取得了突出的创新性研究进展, 在国内外产生广泛影响.

2 实验岩石学发展趋势

经过上百年的发展, 实验岩石学的设备、技术和理论已基本成熟. 尽管如此, 实验岩石学仍呈现出良好的发展态势, 表现出以下6方面的特点: (1) 新的高温高压实验技术不断涌现; (2) 实验与分析测试技术高度融合; (3) 实验模拟与计算模拟相结合; (4) 从热力学平衡扩展到动力学研究; (5) 从干体系扩展到对挥发分和流体的深入研究; (6) 应用场景从固体地球扩展到行星内部.

2.1 新的高温高压实验技术不断涌现

以多面砧压机和金刚石压腔为原型, 实验岩石学家不断尝试作出新的改进和拓展. 瑞士ETH的科学家研制了摇摆式多面砧压机(图1), 以消除含流体样品内部的化学梯度(Schmidt and Ulmer, 2004). 他们还发明了可产生超重力条件的离心式活塞圆筒压机, 大大提高了物相分离的效率(Ardia *et al.*, 2008). 在国内, 浙江大学也正在推进在“超重力离心模拟与实验装置”国家重大科技基础设施上建设高温高压舱. 中国地质大学(武汉)已完成多功能5 000 t多面砧大压机实验室建设, 以便在更大样品空间开展(动态)高压实验. 金刚石压腔在样品腔设计、温度加载、温压测量、探针布设、物性测量等方面出现多项重要的技术革新(如 Li *et al.*, 2016; Jiang *et al.*, 2021).

2.2 实验与分析测试技术高度融合

高温高压实验技术与分析测试技术的高度融

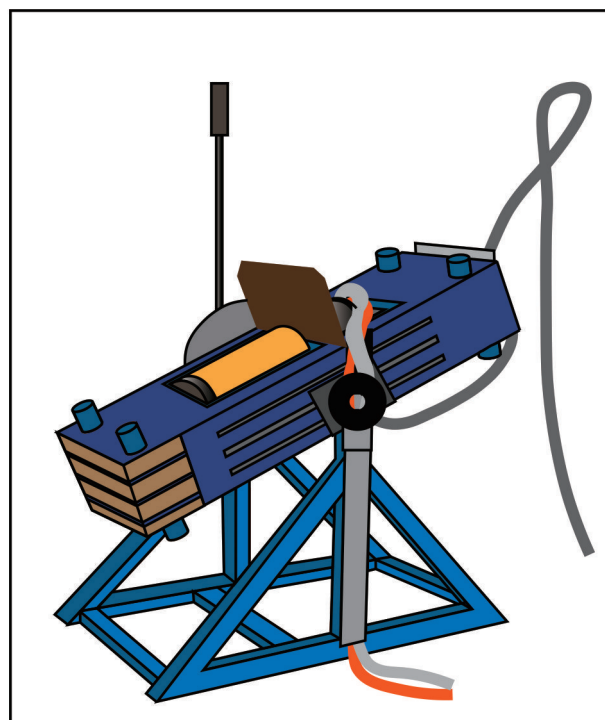


图1 瑞士ETH研制的摇摆式多面砧压机

Fig.1 Rocking multianvil device developed by ETH Zürich, Switzerland

改自 Schmidt and Ulmer(2004)

合是实验岩石学的一项重要发展趋势. 这二者的结合可以实现高温高压下的原位实时观测, 避免淬火过程中物相、元素种型和物性发生变化, 还可以直接观察相变过程, 这对于包含流体的体系十分关键. 经常被使用的原位分析测试技术包括: (1) 光学显微镜, 用于相变过程观察; (2) 分子振动光谱, 包括拉曼光谱和红外光谱, 主要用于挥发分种型和含量分析; (3) 同步辐射技术, 包括成像、衍射、荧光、吸收谱等, 可用于获得体系相态、物质结构、元素含量、价态和配位等信息; (4) 阻抗分析, 用于测量物质的电导率.

由于金刚石的透明性, 金刚石压腔是非常适合进行原位观测的高温高压实验平台(图2a). 以金刚石压腔为原型, 美国科学家开发了莫桑石压腔, 使样品腔体积扩大了近1 000倍(Xu and Mao, 2000). 随后德国BGI的科学家开发了莫桑石高温腔(图2b), 用来观察岩浆结晶和气泡生长过程(Ni *et al.*, 2014). 水热高压釜和多面砧在窗口可视化方面也有新的突破(Testemale *et al.*, 2005; Mibe *et al.*, 2011), 使对大腔体中复杂体系的原位实时观测成为可能.

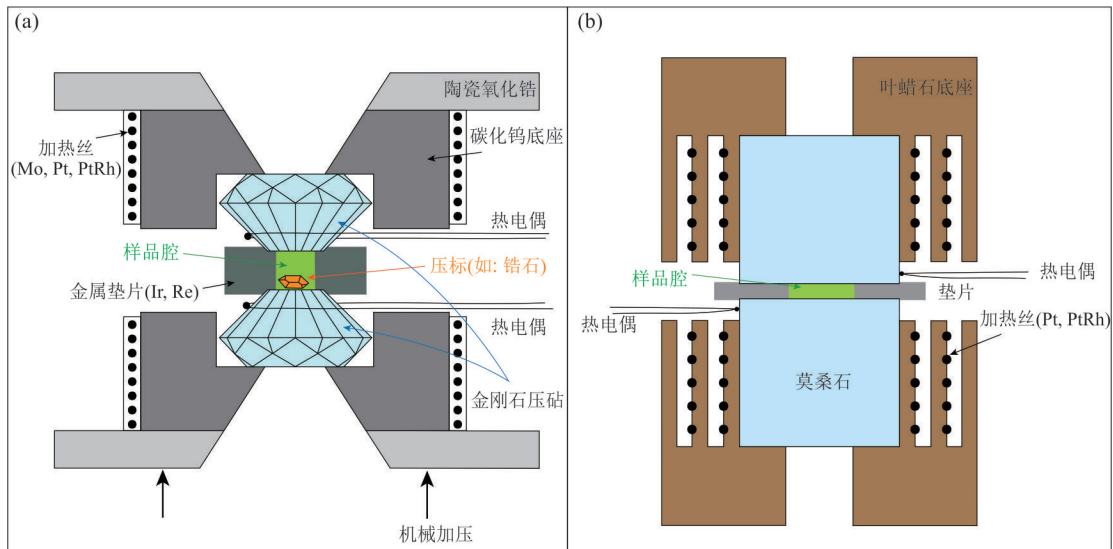


图2 (a) 水热金刚石压腔; (b) 莫桑石高温腔

Fig.2 (a) Hydrothermal diamond anvil cell; (b) Moissanite cell

2.3 实验模拟与计算模拟相结合

实验岩石学在测得物理化学参数后,还需要回归到物理化学等基本原理进行理论分析,以揭示地质活动背后的规律和机制.实验岩石学与理论计算具有天生的相辅相成的关系.如实验岩石学测量可以获得矿物或熔体在一定温压范围内的热力学参数,基于这些参数建立热力学模型后可以计算更高温度压力范围内的相组成情况(Holland and Powell, 1990).同时,这些参数可以用来拟合分子间相互作用力,建立的力场可以通过分子动力学或蒙特卡罗方法获得矿物或熔体的动力学等各项性质(Belonoshko and Saxena, 1992; Duan and Zhang, 2006).随着计算技术和能力的不断发展,通过模拟来计算地球内部物质的物理化学参数已成为高温高压实验测量的重要补充.尤其是过去几十年来,以密度泛函理论求解薛定谔方程取得了巨大的成功,可以在不需要任何实验参数输入的情况下精确求解物质的电子结构和各项物理化学性质.且由于极端温度和压力对理论计算的挑战较小,理论计算现在通常先于实验进行一些探索,可以反向输出对实验进行指导.如PoeBrent *et al.* (1997)测定了高聚合度硅酸盐熔体中Si和O的扩散系数,发现其随压力升高而增大,证实了前人分子动力学计算的结果.再如实验和理论几乎同时证实下地幔钙钛矿发生向后钙钛矿的转变(Murakami *et al.* 2004; Oganov and Ono, 2004).此外,理论计算还可以提供微观视角,从而有助于认识微观结构和宏观物性

之间的构效关系.实验和理论计算的结合通常有助于问题更快地解决,但有时实验和理论会出现偏差甚至矛盾,需要认识到的是理论计算往往考虑单因素的作用,而实验基本都有多因素的纠缠,仔细的分析实验与理论计算的异同可以避免偏见和盲从,这也是实验和理论计算结合的优势.

2.4 从热力学平衡到动力学

传统实验岩石学研究主要关注热力学平衡态,但对动力学过程(包括扩散、均相反应动力学、多相反应动力学)及其机制的研究也越来越受到重视.即便在较高温度下,地质体系也并非总处于完全平衡状态.了解动力学过程的速率和机制对于认识和理解地球内部具有不可或缺的作用.高温高压实验已经积累了许多高质量的矿物和熔体中元素扩散系数数据(Zhang and Cherniak, 2010).对均相化学反应、岩浆结晶以及变质反应动力学的实验研究也已开展一些探索性工作(如Zhang *et al.*, 1995; Ni *et al.*, 2014).研究者也开发出了一些基于扩散或反应动力学的地质速率计方法(如Zhang *et al.*, 1997; Ni *et al.*, 2015).

2.5 从干体系到挥发分和流体

由于技术限制,早期的实验岩石学研究主要研究不含挥发分的干体系.高温高压实验和分析测试技术的进步使H-C-S-N等挥发分和流体成为实验岩石学当下最重要的研究对象.实验岩石学研究对于揭示H-C-S-N在地球内部的赋存状态、循环过程以及地质和地球物理效应(如促进熔融和导致地震波

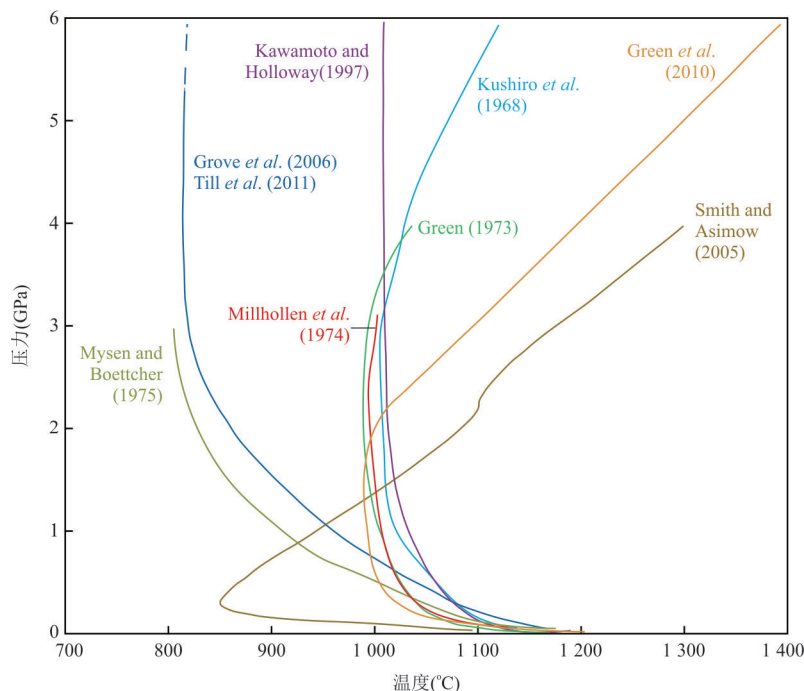


图3 关于地幔橄榄岩湿固相线的巨大争议

Fig.3 Discrepancy in the H_2O -saturated solidus of mantle peridotite改自 Grove *et al.* (2012)

速降低)起到了重要作用(Schmidt and Poli, 2014). 水热金刚石压腔的出现为流体的高温高压原位实验研究提供了有力工具,研究对象已从富水(热液)流体拓展到具有特殊物理化学性质的超临界流体(Shen and Keppler, 1997; Wang *et al.*, 2021). 地球内部挥发分和流体研究已成为国际地球科学的重要前沿领域.

2.6 从固体地球到类地行星

类地行星(以及小行星和月球)的化学组成、氧化还原状态以及温度和压力与地球有别,为高温高压实验模拟提供了更为丰富的应用场景. 类地行星核与幔的分异过程尤其成为实验岩石学重点关注的研究内容(如 Fichtner *et al.*, 2021). 实验研究结果可以为揭示核幔分异过程中的元素分配行为、约束温度、压力和氧逸度等物理化学条件提供必要依据.

3 关键科学问题与解决方案前瞻

实验岩石学的任务是通过高温高压实验模拟,确定地球深部物质的物理化学性质,破解矿物和岩石成因,揭示地球内部状态和过程. 经过百余年的研究积累,已经基本确定了各种矿物和硅酸盐熔体的物理化学性质,基本建立起各类岩浆岩和变质岩

的相图,明确了岩石的成因机制. 尽管如此,目前仍有很多重要的科学问题有待解决,下面简要探讨待解决的关键科学问题,并提出可能的解决方案.

3.1 富水岩石体系的物相关系以及超临界流体的性质和作用

对于干的岩石体系的物相关系,目前已经有很丰富的实验岩石学数据和资料. 然而,水和 CO_2 等挥发分对岩石体系的物理化学行为可产生十分显著的影响. 俯冲带富水环境下岩石体系的物相关系比较复杂,关于岩石在水饱和条件下的熔融温度(图3)以及形成超临界流体(成分介于富水流体与硅酸盐熔体之间)的温压条件还存在很大争议(Grove *et al.*, 2012; Green *et al.*, 2014),这进而导致了洋壳脱水还是洋壳熔融、水致地幔楔直接熔融还是地幔楔受交代和加热后再熔融的争议. 对于超临界流体的各种物理化学性质以及它引发的地质与地球物理效应也缺乏足够了解(刘曦等, 2009; Ni *et al.*, 2017; 倪怀玮, 2020).

实验技术上的挑战主要包括:(1)高温高压下流体和熔体成分和性质趋近,难以从淬火实验产物中清晰判别富水流体、硅酸盐熔体和超临界流体;(2)超临界流体具有复杂的化学组成和超常规的物理化学活性,难以封装和淬火.

可能的解决方案为:(1)在等压升温过程中对富水岩石体系进行电导率实时监控,通过电导率的突变识别岩石熔融,通过电导率突变的消亡识别超临界流体形成,从而克服传统淬火实验的局限性,准确测定岩石体系的湿固相线和第二临界端点;(2)开发基于金刚石压腔以及带窗口多面砧压机/高压釜平台的原位分析测试技术(如同步辐射X射线吸收谱),结合计算模拟,确定超临界流体的密度、扩散系数、电导率、迁移元素能力及元素种型.查明富水岩石体系的物相关系,揭示超临界流体的形成条件、物理化学性质以及地质与地球物理效应.

3.2 熔/流体对地幔的交代作用

熔体或流体对地幔的交代作用是导致地幔不均一性和幔源岩浆差异化的重要机制.岩石学家通过高温高压实验模拟(熔体层与橄榄岩对接,或熔体与橄榄岩互层),来认识深部熔体与地幔橄榄岩反应过程(如 Sekine and Wyllie 1983; Wang *et al.*, 2013).不足之处包括:(1)对超临界流体对地幔的交代作用缺乏研究;(2)现有工作主要集中在大洋地幔和俯冲带,而对大陆内部地幔不均一性的研究较为薄弱;(3)现有工作着重于探究熔体和矿物成

分的变异,而对反应过程和机制的研究不够充分.

可能的解决方案为:(1)改进实验技术,开展超临界流体与橄榄岩的反应实验,确定交代产物及其地球化学特征;(2)针对具有巨厚岩石圈的克拉通地幔,考虑到起源于软流圈的熔体运移至岩石圈地幔与之发生相互作用,在装配自动温-压控制系统的压机上,采用降温减压的技术手段来仿真模拟反应过程;(3)开展橄榄岩组成矿物的溶解实验,测定矿物的溶解速度和新矿物的生成速度,结合地球化学动力学和流变学理论,限定地幔不均一性的形成速度和时间尺度.

3.3 岩浆分异过程以及成岩成矿机制

火成岩石学家认识到,岩浆系统可以起源于地幔、向上经过下地壳、上地壳,一直延伸至近地表(Cashman *et al.*, 2017).在如此大尺度的系统内部,岩浆往往经历了长期、复杂的存储和分异过程,后期可以形成岩浆热液和多种类型的矿床.然而,目前对岩浆分异过程仍缺乏清晰的认识,对火成岩石和矿床的成因也存在很大争议.以俯冲带常见的安山岩为例,其成因模型就包括玄武质岩浆分离结晶、玄武质岩浆与长英质岩浆混合、玄武质下地壳

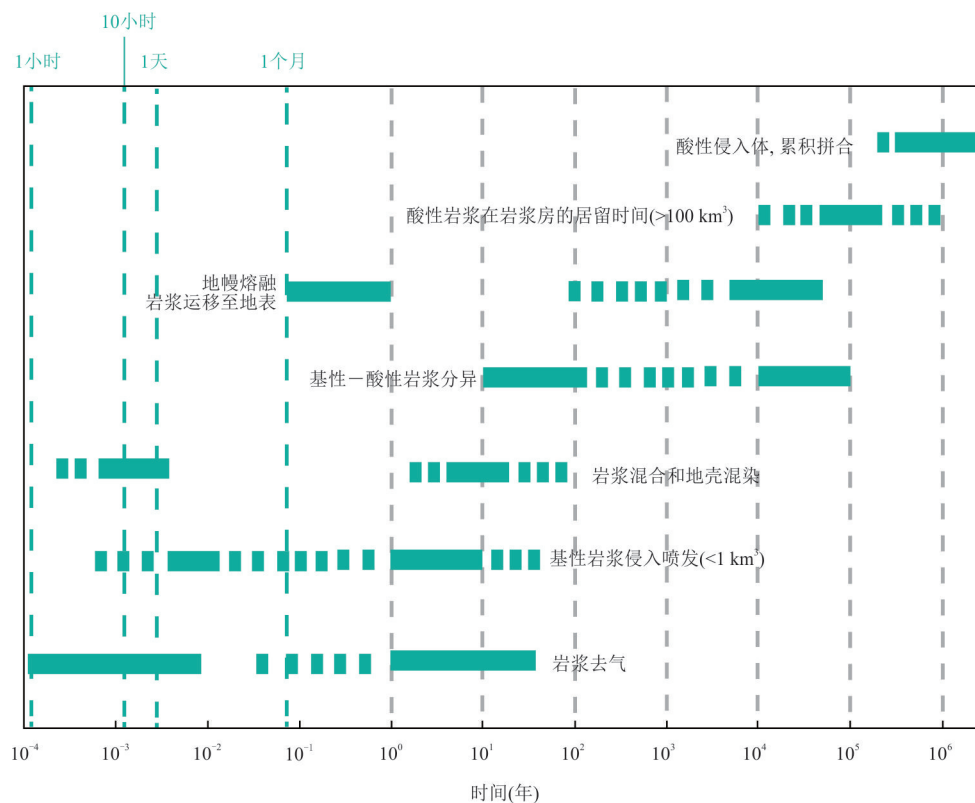


图4 不同岩浆过程的时间尺度

Fig.4 Timescales of a variety of magmatic processes

改自 Costa(2021)

部分熔融、富水地幔橄榄岩部分熔融、洋壳部分熔融并与橄榄岩反应、交代辉石岩部分熔融、混杂岩底辟熔融等。

破解岩浆演化历史和岩石成因的关键阻碍在于:(1)尚未能建立起像变质岩体系那样系统、可靠的地质温压计方法;(2)由于扩散和反应动力学受多重复杂因素控制,对于岩浆过程时间尺度(图4)的约束还存在很大的不确定性,不同方法给出的结果之间经常也存在较大差异(Costa, 2021)。

可能的解决方案为:(1)对岩浆岩体系开展更系统的高温高压实验研究,结合高精度元素和同位素分析测试方法,开发新的单矿物微量元素温度计、副矿物饱和温度计、矿物相平衡温压计、熔/流体包裹体温压计等,为准确约束岩浆过程各阶段的温压条件奠定坚实基础;(2)系统测定温度、压力、水逸度、氧逸度、矿物结构、晶体取向等条件对元素扩散和均相化学反应速率的影响,为准确约束岩浆过程的时间尺度和成岩成矿机制提供可靠依据。

3.4 变质反应的速率和机制

与岩浆中的晶体或气泡生长过程相比,变质反应往往涉及到复杂体系中的多个矿物相以及流体相。目前对纯固相反应、脱挥发分反应、溶解—重结晶等变质反应速率和机制的认识严重不足(Jamtveit, 2010)。

可能的解决方案为:在高温高压下开展不同时间长度的变质反应实验,查明反应进度与温度、压力、时间、挥发分含量等因素之间的依赖关系,明确变质反应速率的关键控制因素,约束变质反应的时间尺度。结合产物的结构和成分特征,解析变质反应的微观机制。

3.5 类地行星形成与演化

太阳系早期星云物质经过碰撞和吸积,经历了高温高压过程,形成了星子、星胚与行星。水星、金星、火星、小行星以及月球的形成与演化既与地球之间具有一定的联系与相似性,又在物理化学条件和化学组成方面有所不同。通过高温高压实验模拟行星分异的工作还处在起步阶段,对温度、压力和氧逸度等物理化学条件的约束还不够精确。

可能的解决方案:开展模拟不同行星分异的熔融和结晶实验,将实验结果与热力学模型相结合,构建相图。考察指标元素的扩散系数和分配系数,结合行星样品的地球化学组成,解析行星分异过程中指标元素的迁移和分配行为,进而对行星分异时

的物理化学条件作出准确推断。

4 结语

实践是检验真理的唯一标准。一切对于岩石成因的解释、对于地球和行星内部状态和过程的推断都必须能经受起高温高压实验结果的检验。在一百多年的发展历程中,实验岩石学为推动地球和行星科学的发展作出了重要贡献。通过几十年的努力奋斗,我国实验岩石学研究已呈现出与国际先进国家齐头并进的良好发展态势。为了满足地球和行星科学进一步定量化、精细化、系统化的学科发展需求,满足国家在矿产资源勘查、地质灾害防控、深空探测等方面的战略需求,实验岩石学未来需要开发或改进高温高压实验技术,加强与分析测试技术以及计算技术的结合,以破解地球内部流体的性质和作用、地幔演化和岩浆分异、变质反应速率和机制、类地行星形成与演化等重要科学问题。

致谢:感谢李云国在计算方面的建议和两位匿名审稿人的评审意见。

References

- Ardia, P., Giordano, D., Schmidt, M. W., 2008. A Model for the Viscosity of Rhyolite as a Function of H₂O-Content and Pressure: a Calibration Based on Centrifuge Piston Cylinder Experiments. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72(24): 6103–6123. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2008.08.025>
- Bassett, W. A., Shen, A. H., Bucknum, M., et al., 1993. A New Diamond Anvil Cell for Hydrothermal Studies to 2.5 GPa and from –190 to 1 200 °C. *Review of Scientific Instruments*, 64(8): 2340–2345. <https://doi.org/10.1063/1.1143931>
- Belonoshko, A. B., Saxena, S. K., 1992. A Unified Equation of State for Fluids of C-H-O-N-S-Ar Composition and Their Mixtures up to very High Temperatures and Pressures. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 56(10): 3611–3626. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(92\)90157-E](https://doi.org/10.1016/0016-7037(92)90157-E)
- Bowen, N. L., 1928. *The Evolution of the Igneous Rocks*. Princeton University Press, Princeton.
- Boyd, F. R., England, J. L., 1960. Apparatus for Phase-Equilibrium Measurements at Pressures up to 50 Kilobars and Temperatures up to 1 750 °C. *Journal of Geophysical Research*, 65(2): 741–748. <https://doi.org/10.1029/jz065i002p00741>
- Cashman, K. V., Sparks, R. S. J., Blundy, J. D., 2017. Ver-

- tically Extensive and Unstable Magmatic Systems: a Unified View of Igneous Processes. *Science*, 355(6331): eaag3055. <https://doi.org/10.1126/science.aag3055>
- Chen, W., Xiong, X. L., Wang, J. T., et al., 2018. TiO₂ Solubility and Nb and Ta Partitioning in Rutile-Silica-Rich Supercritical Fluid Systems: Implications for Subduction Zone Processes. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123(6): 4765–4782.
- Costa, F., 2021. Clocks in Magmatic Rocks. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 49: 231–252. <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-080320-060708>
- Duan, Z. H., Zhang, Z. G., 2006. Equation of State of the H₂O, CO₂, and H₂O-CO₂ Systems up to 10 GPa and 2 573.15 K: Molecular Dynamics Simulations with Ab Initio Potential Surface. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70(9): 2311–2324. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2006.02.009>
- Fichtner, C. E., Schmidt, M. W., Liebske, C., et al., 2021. Carbon Partitioning between Metal and Silicate Melts during Earth Accretion. *Earth and Planetary Science Letters*, 554: 116659. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2020.116659>
- Forman, R. A., Piermarini, G. J., Barnett, J. D., et al., 1972. Pressure Measurement Made by the Utilization of Ruby Sharp-Line Luminescence. *Science*, 176(4032): 284–285. <https://doi.org/10.1126/science.176.4032.284>
- Ghiorso, M. S., Sack, R. O., 1995. Chemical Mass Transfer in Magmatic Processes IV. a Revised and Internally Consistent Thermodynamic Model for the Interpolation and Extrapolation of Liquid-Solid Equilibria in Magmatic Systems at Elevated Temperatures and Pressures. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 119(2/3): 197–212. <https://doi.org/10.1007/BF00307281>
- Green, D. H., Hibberson, W. O., Rosenthal, A., et al., 2014. Experimental Study of the Influence of Water on Melting and Phase Assemblages in the Upper Mantle. *Journal of Petrology*, 55(10): 2067–2096. <https://doi.org/10.1093/petrology/egu050>
- Green, D.H., 1973. Experimental Melting Studies on a Model Upper Mantle Composition at High-Pressure under Water-Saturated and Water-Undersaturated Conditions. *Earth and Planetary Science Letters*, 19: 37–53. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(73\)90091-5](https://doi.org/10.1016/0012-821X(73)90091-5)
- Green, D.H., Hibberson, W.O., Kovacs, I., Rosenthal, A., 2010. Water and Its Influence on the Lithosphere-Asthenosphere Boundary. *Nature*, 467(7314): 448–451. <https://doi.org/10.1038/nature09369>
- Grove, T., Till, C., Krawczynski, M., 2012. The Role of H₂O in Subduction Zone Magmatism. *Annual Review of Earth and Planetary Science*, 40(1): 413–439. doi: 10.1146/annurev-earth-042711-105310
- Grove, T.L., Chatterjee, N., Parman, S.W., Medard, E., 2006. The Influence of H₂O on Mantle Wedge Melting. *Earth and Planetary Science Letters*, 249(1): 74–89. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2006.06.043>
- Guo, X., Zhang, L., Behrens, H., et al., 2016. Probing the Status of Felsic Magma Reservoirs: Constraints from the P-T-H₂O Dependences of Electrical Conductivity of Rhyolitic Melt. *Earth and Planetary Science Letters*, 433: 54–62. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2015.10.036>
- Holland, T. J. B., Powell, R., 1990. An Enlarged and Updated Internally Consistent Thermodynamic Dataset with Uncertainties and Correlations: The System K₂O-Na₂O-CaO-MgO-MnO-FeO-Fe₂O₃-Al₂O₃-TiO₂-SiO₂-C-H₂-O₂. *Journal of Metamorphic Geology*, 8(1): 89–124.
- Holland, T. J. B., Powell, R., 2011. An Improved and Extended Internally Consistent Thermodynamic Dataset for Phases of Petrological Interest, Involving a New Equation of State for Solids. *Journal of Metamorphic Geology*, 29(3): 333–383. <https://doi.org/10.1111/j.1525-1314.2010.00923.x>
- Jamtveit, B., 2010. Metamorphism: From Patterns to Processes. *Elements*, 6(3): 149–152. <https://doi.org/10.2113/gselements.6.3.149>
- Jiang, D. W., Gao, Y., Cao, M., et al., 2021. Diamond Anvil Cell with Double Coaxial Chambers. *Review of Scientific Instruments*, 92(12): 123901. <https://doi.org/10.1063/5.0063573>
- Karki, B. B., 2015. First-Principles Computation of Mantle Materials in Crystalline and Amorphous Phases. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 240: 43–69. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2014.11.004>
- Kawai, N., 1966. A Static High Pressure Apparatus with Tapering Multi-Pistons Forming a Sphere. I. *Proceedings of the Japan Academy*, 42(4): 385–388. <https://doi.org/10.2183/pjab1945.42.385>
- Kawamoto, T., Holloway, J.R., 1997. Melting Temperature and Partial Melt Chemistry of H₂O-Saturated Mantle Peridotite to 11 Gigapascals. *Science*, 276(5310): 240–243. <https://doi.org/10.1126/science.276.5310.240>
- Kirkpatrick, R.J., 1975. Crystal Growth from the Melt: a Review. *American Mineralogist*, 60: 798–814.
- Kushiro, I., Syono, Y., Akimoto, S., 1968. Melting of a Peridotite Nodule at High Pressures and High Water Pressures. *Journal of Geophysical Research*, 73(18): 6023–6029. <https://doi.org/10.1029/JB073i018p06023>
- Li, J. K., Bassett, W. A., Chou, I. M., et al., 2016. An Im-

- proved Hydrothermal Diamond Anvil Cell. *Review of Scientific Instruments*, 87(5): 053108. <https://doi.org/10.1063/1.4947506>
- Liu, L. P., Hu, X. M., Liu, X., 2018. MgO Partition between Olivine and K₂O-Rich Silicate Melt: Geothermometers Applicable to High Potassium Magmas. *Journal of Asian Earth Sciences*, 166: 181–194. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2018.07.036>
- Liu, X., Zhang, L. F., Alistair, H., et al., 2009. Effect of Water on the Partial Melting Process of some Silicate Systems: Important Implication of the Second Critical Endpoint. *Acta Petrologica Sinica*, 25(12): 3407–3421(in Chinese with English abstract).
- Luth, W.C., Tuttle, O.F., 1963. Externally Heated Cold-Seal Pressure Vessels for Use to 10 000 Bars and 750° C. *American Mineralogist*, 48: 1401–1403.
- Mibe, K., Kawamoto, T., Matsukage, K. N., et al., 2011. Slab Melting Versus Slab Dehydration in Subduction-Zone Magmatism. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 108(20): 8177–8182. <https://doi.org/10.1073/pnas.1010968108>
- Millhollen, G.L., Irving, A.J., Wyllie, P.J., 1974. Melting Interval of Peridotite with 5.7% Water to 30 Kilobars. *The Journal of Geology*, 82(5): 575–587. <https://doi.org/10.2307/30059149>
- Murakami, M., Hirose, K., Kawamura, K., et al., 2004. Post-Perovskite Phase Transition in MgSiO₃. *Science*, 304(5672): 855–858. <https://doi.org/10.1126/science.1095932>
- Mysen, B.O., Boettcher, A.L., 1975. Melting of a Hydrous Mantle: I. Phase Relations of Natural Peridotite at High-Pressures and Temperatures with Controlled Activities of Water, Carbon Dioxide, and Hydrogen. *Journal of Petrology*, 16(1): 520–548. <https://doi.org/10.1093/ptrology/16.1.520>
- Ni, H. W., 2015. Oxygen Isotope Thermometry, Speedometry, and Hygrometry: Apparent Equilibrium Temperature Versus Closure Temperature. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 16(1): 27–39. <https://doi.org/10.1002/2014gc005574>
- Ni, H. W., Keppler, H., Walte, N., et al., 2014. In Situ Observation of Crystal Growth in a Basalt Melt and the Development of Crystal Size Distribution in Igneous Rocks. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 167(5): 1003. <https://doi.org/10.1007/s00410-014-1003-9>.
- Ni, H. W., Zhang, L., Xiong, X. L., et al., 2017. Supercritical Fluids at Subduction Zones: Evidence, Formation Condition, and Physicochemical Properties. *Earth - Science Reviews*, 167: 62–71. <https://doi.org/10.1016/j.earsci-rev.2017.02.006>
- Ni, H. W., 2020. Properties and Effects of Supercritical Geofluids. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 39(3): 443–447 (in Chinese with English abstract).
- Oganov, A. R., Ono, S., 2004. Theoretical and Experimental Evidence for a Post-Perovskite Phase of MgSiO₃ in Earth Layer. *Nature*, 430(6998): 445–448. <https://doi.org/10.1038/nature02701>
- Poe, B. T., McMillan, P. F., Rubie, D. C., et al., 1997. Silicon and Oxygen Self-Diffusivities in Silicate Liquids Measured to 15 Gigapascals and 2 800 Kelvin. *Science*, 276(5316): 1245–1248. <https://doi.org/10.1126/science.276.5316.1245>
- Schmidt, M. W., Poli, S., 2014. Devolatilization during Subduction. *Treatise on Geochemistry*. Elsevier, Amsterdam, 669–701. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-095975-7.00321-1>
- Schmidt, M. W., Ulmer, P., 2004. A Rocking Multianvil: Elimination of Chemical Segregation in Fluid-Saturated High-Pressure Experiments. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 68(8): 1889–1899. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2003.10.031>.
- Sekine, T., Wyllie, P. J., 1983. Experimental Simulation of Mantle Hybridization in Subduction Zones. *The Journal of Geology*, 91(5): 511–528. <https://doi.org/10.1086/628802>
- Shen, A. H., Keppler, H., 1997. Direct Observation of Complete Miscibility in the Albite-H₂O System. *Nature*, 385(6618): 710–712. <https://doi.org/10.1038/385710a0>
- Smith, P.M., Asimow, P.D., 2005. Adibat_1ph: a New Public Front-End to the MELTS, pMELTS, and pHMELTS Models. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 6(2): Q02004. <https://doi.org/10.1029/2004GC000816>
- Testemale, D., Argoud, R., Geaymond, O., et al., 2005. High Pressure/High Temperature Cell for X-Ray Absorption and Scattering Techniques. *Review of Scientific Instruments*, 76(4): 043905. <https://doi.org/10.1063/1.1884188>
- Till, C.B., Grove, T.L., Withers, A.C., 2011. The Beginnings of Hydrous Mantle Wedge Melting. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 163: 669–688. <https://doi.org/10.1007/s00410-011-0692-6>
- Wang, C. G., Liang, Y., Xu, W. L., et al., 2013. Effect of Melt Composition on Basalt and Peridotite Interaction: Laboratory Dissolution Experiments with Applications to Mineral Compositional Variations in Mantle Xenoliths from the North China Craton. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 166(5): 1469–1488. <https://doi.org/10.1007/>

- s00410-013-0938-6
- Wang, Q. X., Zhou, D. Y., Li, W. C., et al., 2021. Spinodal Decomposition of Supercritical Fluid Forms Melt Network in a Silicate-H₂O System. *Geochemical Perspectives Letters*, 22–26. <https://doi.org/10.7185/geochemlet.2119>
- Watson, E. B., 1981. Diffusion in Magmas at Depth in the Earth: The Effects of Pressure and Dissolved H₂O. *Earth and Planetary Science Letters*, 52(2): 291–301. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(81\)90184-9](https://doi.org/10.1016/0012-821X(81)90184-9)
- Weir, C. E., Lippincott, E. R., Van Valkenburg, A., et al., 1959. Infrared Studies in the 1- to 15-Micron Region to 30,000 Atmospheres. *Journal of Research of the National Bureau of Standards Section A, Physics and Chemistry*, 63A(1): 55–62. <https://doi.org/10.6028/jres.063A.003>
- Xie, H.S., 1997. An Introduction to Material Science of Deep Earth. Science Press, Beijing (in Chinese).
- Xu, J., Mao, H., 2000. Moissanite: a Window for High-Pressure Experiments. *Science*, 290(5492): 783–785. <https://doi.org/10.1126/science.290.5492.783>
- Yang, X. Z., Liu, D. D., Xia, Q. K., 2014. CO₂-Induced Small Water Solubility in Olivine and Implications for Properties of the Shallow Mantle. *Earth and Planetary Science Letters*, 403: 37–47. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2014.06.025>
- Yoder, H. S. Jr., 1950. High-Low Quartz Inversion up to 10,000 Bars. *Transactions, American Geophysical Union*, 31(6): 827. <https://doi.org/10.1029/tr031i006p00827>
- Zhang, J. F., Wang, C., Wang, Y. F., 2012. Experimental Constraints on the Destruction Mechanism of the North China Craton. *Lithos*, 149: 91–99. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2012.03.015>
- Zhang, L., Guo, X., Wang, Q. X., et al., 2017. Diffusion of Hydrous Species in Model Basaltic Melt. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 215: 377–386. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2017.07.019>
- Zhang, Y. X., Cherniak, D. J., 2010. Diffusion in Minerals and Melts: Introduction. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 72: 1–4.
- Zhang, Y. X., Jenkins, J., Xu, Z. J., 1997. Kinetics of the Reaction H₂O+O→2OH in Rhyolitic Glasses Upon Cooling: Geospeedometry and Comparison with Glass Transition. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 61(11): 2167–2173. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(97\)00054-9](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(97)00054-9)
- Zhang, Y. X., Stolper, E. M., Ihinger, P. D., 1995. Kinetics of the Reaction H₂O+O=2OH in Rhyolitic and Albitic Glasses; Preliminary Results. *American Mineralogist*, 80(5/6): 593–612. <https://doi.org/10.2138/am-1995-5-618>

附中文参考文献

- 刘曦, 张立飞, Hack, C.A., 等, 2009. 水对硅酸盐体系部分熔融行为的影响: 第二临界端点的重要意义. *岩石学报*, 25(12): 3407–3421.
- 倪怀玮, 2020. 超临界地质流体的性质和效应. *矿物岩石地球化学通报*, 39(3): 443–447, 440.
- 谢鸿森, 1997. 地球深部物质科学导论. 北京: 科学出版社.