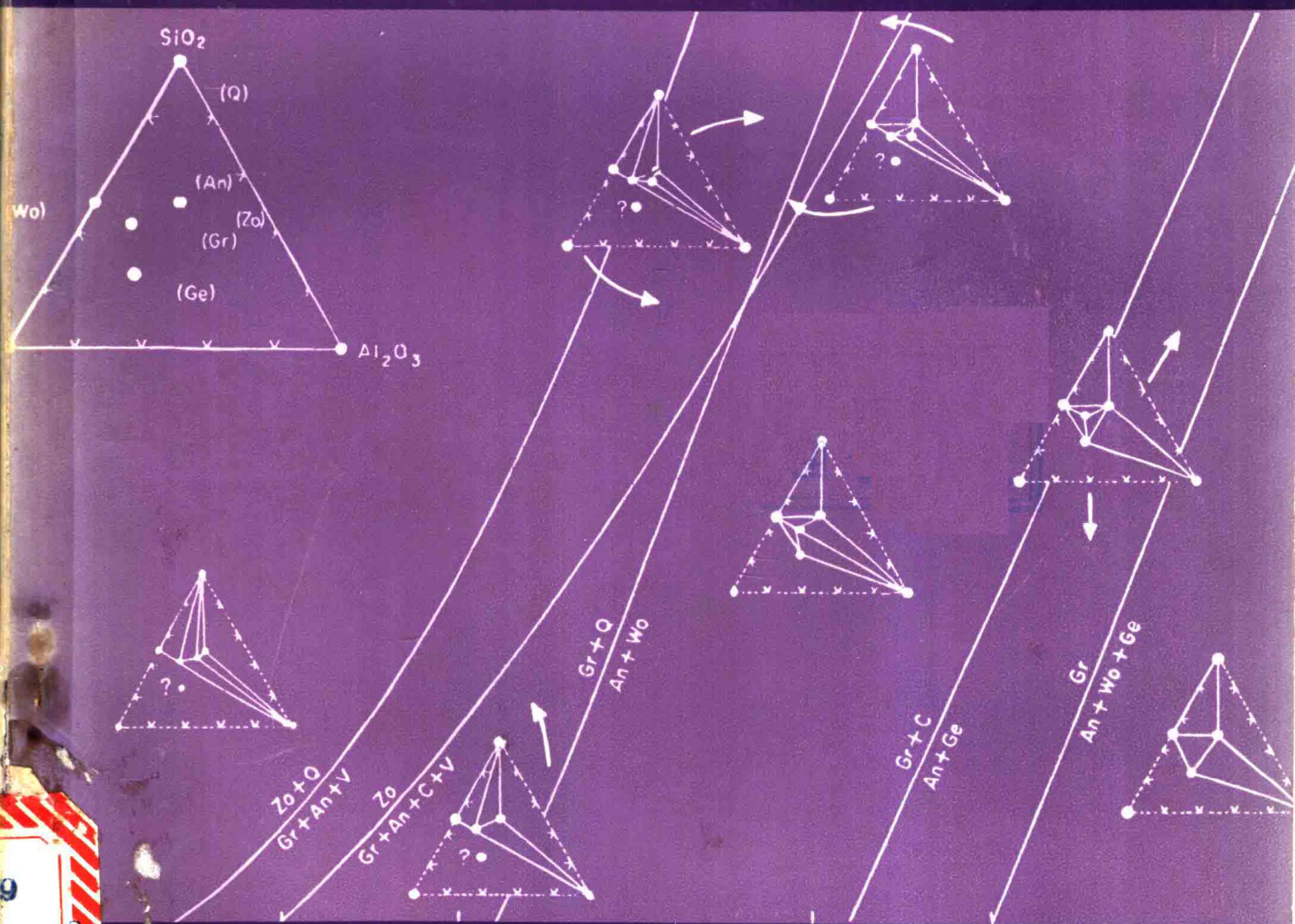


结晶岩演化

D.K. Bailey

R. Macdonald

主编



地质出版社

结 晶 岩 演 化

D. K. BAILEY

主 编

R. MACDONALD

邵 克 忠 译

熊 大 和 校
刘 智 星

地 质 出 版 社

The Evolution of the Crystalline Rocks

Edited by

D. K. BAILEY and R. MACDONALD

ACADEMIC PRESS

结 晶 岩 演 化

D. K. Bailey R. Macdonald 主编

邵克忠 译

熊大和 校
刘智星

责任编辑：马志先

地质出版社出版

(北京西四)

地质出版社印刷厂印刷

(北京海淀区学院路29号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

开本：787×1092¹/₁₆ 印张：18¹/₄ 字数：429,000
1985年8月北京第一版·1985年8月北京第一次印刷

印数：1—2,125册 定价：4.30元

统一书号：15038·新993

著 者

- D. K. Bailey Department of Geology, University of Reading, Whiteknights, Reading RG6 2AB
- W. S. Fyfe Department of Geology, Faculty of Science, University of Western Ontario, London 72
Canada
- H. J. Greenwood Department of Geological Sciences, University of British Columbia, Vancouver 8,
Canada
- W. C. Luth Department of Geology, School of Earth Sciences, Stanford University, California 94305,
U. S. A.
- R. C. Newton Department of the Geophysical Sciences, University of Chicago, 5734, South Ellis Avenue, Chicago, Illinois 60637,
U. S. A.
- W. Schreyer Institut für Mineralogie, Ruhr-Universität Bochum, D-463 Bochum-Querenburg, Universitätsstrasse 150, Postfach 2148,
Germany

前 言

1928年，随着鲍温的“火成岩的演化”一书的发表，在岩石学中出现了一面新的界碑。这一论著的目的很简单，一是叙述在高温下研究硅酸盐的相平衡的技术，二是把获得的结果同岩石学观察研究联系起来，从而提出一幅统一的岩浆演化图象。这个目的取得了很大的成就，可以稳妥地说，其后有关火成岩岩石学的著作，无不带有鲍温的思想色彩。该书展示的实验研究工作的威力，促使实验工作逐步扩展，并导致新技术的发展，特别是在第二次世界大战之后，随着引用适合高压例行研究工作的仪器设备，更是如此。自那时以来，越来越需要一部“火成岩的演化”的续篇，尤其是要注意到高压实验工作的发展及其影响。在理想中，这样一部续篇应该由一个人写成。但是，而今这一领域太广，要完成这样的任务几乎是孤掌难鸣的：这项任务的确足以使人望而生畏，竟致尚无一人作此尝试。同时，鲍温的上述著作与近代实验岩石学发展之间的距离一直在迅速增大。本书就是尽力弥补这种距离的集体成果。本书的编写小组有意地保持精干，俾使每个著者都能够胜任于本着鲍温原著的精神使读者感觉到在本书的广阔范围内原则与风格的统一性。本书不打算全盘论述整个实验岩石学，因为在一部著作内，如果不是对某些重要领域敷衍了事的话，这样作是不可能的。反之，我们将选择一些范围加以深入讨论，而略去另一些在近期著作中似乎已适当论述的范围。在本书的每一篇章内，著者们都是尽量遵照鲍温的原则，论述课题的概要以及已经取得的进展，把实验成果和地质观察研究联系起来，而尽可能回避生僻的术语。我们的共同目标是要为应用实验岩石学提供一部基础论著，从而提供一个通向现代文献的起点。所以，这本书是为大学程度以上的地学科学家们编写的。但是，高温和高压平衡的领域，并非那些致力于研究结晶岩石的形成过程的人们独享的禁地：实则它是陶瓷、玻璃、耐火材料、金属以及矿物工业所共有的场所。所以我们希望材料科学家们通常也可以在本书中找到一些有用的资料。

本书第一部分论述实验岩石学的各种方法。扼要叙述实验设备和实验技术，俾使读者们可以领会一些原理并理解各种限制因素。而主要任务在于论述岩石学家们对不同型式相图的解释和应用。并着重于低可变度的条件，这是现代岩石学的首要课题。

本书的第二部分包括五章，各章著者凭借他们的亲身经验，评述所选定的各类岩石的实验岩石学。在编写之初，编者仅仅约定：共同的主题必须是应用实验结果来说明岩石。但贯穿于这五章之内，基于这一共同主题而衍伸出来的一些变化，则对实验岩石学家们能够（或应当）据以处理资料的各种方法的总则，作了一些辅助的介绍。其中有三章是论述三大变质岩类，因为这是作为鲍温著作的续篇所最为需要的。最后两章论述花岗岩和碱性岩的实验岩石学。这两章还共同对有关长英质火成岩领域中实验的发展作了非常必要的评述。同时，这两章也构成了前面对变质作用的讨论的必然归宿。对强烈不饱和的碱性岩石有所考虑，在地幔内的特殊条件对于形成这些岩石来说可能是必需的，但是基性岩浆作用这一总课题则过于庞大，因而不可能纳入本书的范畴之内。实际上，它将超过在近期文献中已适当发表的材料。本书各章都是自成一体的，可以作为单行本加以阅读。因此，

一些重复是难免的，但这并非毫无意义，因为每位著者的论述手法是独具特色的，这就给一些重要的共同探讨范围增加了份量。

在阐述特定的岩石类型时，讨论的次序可以取决于多种因素。一种为人们乐于采取的途径是仿效鲍温的一般作法，即从最高温写到最低温。但是，因为固态反应及其对变质岩的应用是我们的主要出发点，我们就选择了相反的途径：从低温写到较高温，最终达于火成岩的条件。

无疑，鲍温在传播实验成果方面之所以取得某些很有生命力的成就，在于他对专门术语的应用很有节制。无论我们抱有多大的期望，化学热力学术语和概念，在地质科学家中间并未普遍流行。即使那些熟悉热力学的人们，往往也会为这种熟练性非常短暂而不安。如果不是经常应用，智能很快就会丧失。以理想状态为根据的经典热力学和各种岩石体系的复杂现实之间脱节，也使很多人感到疑虑。加之，实验是大量需要的，因为地质体系不是理想的。因此，我们已尽量回避论述深深依赖于数学热力学论证的原理，以免应用一切专门术语。我们相信，鲍温理解这种貌似错误的说法：回避热力学术语的精确性，实验结果在岩石方面的应用可以写得更有说服力（即更为准确之意）！

自1928年以来，由于实验岩石学曾经探索过愈来愈复杂的体系和条件，以致不少地学家们可能倾向于“当实验岩石学涉及相图时就放弃它”。我们期待本书将鼓励读者们作出积极的反响。理解相平衡可以对一切地质观察研究提出新的概念，并可能比任何其它因素更有助于加深对结晶岩石的理解。

现在，科学的进展很快，以致任何一本精心编写的旨在阐述“当前进展”的书，在出版之前就必定会过时了。我们这部著作的设想是着眼于长期使用。虽然读者将觉察到著者的新认识和独特见解，但本书主要是他们在实验岩石学方面长期经验的精华。手稿的最终校订是在1974—1975年间进行的，不过我们的主要目的是对有实际根据并可长期利用的资料加以核查。如果我们提供了一个使读者能以分享新发展所带来的激情的基础，这个目的就算达到了。令人庆兴的是关于华盛顿地球物理实验室去年在实验技术上取得一项重大突破的报导（参见附录Ⅲ）。在一个新制的金刚石砧子（高压盒）中，压力接近500千巴时，可维持超过2000℃的温度。研究深地幔条件的前景就突然出现了。实验岩石学开始了一个新的时期。

在本书的准备工作中，我们显然得到了很多帮助。我们衷心感谢对我们提出建议和鼓励的所有朋友们，尤其要感谢K. Bailey夫人为我们辛勤编纂索引以及A. Broughton夫人作为一位干练的秘书使编者的工作得以顺利进行。

D. K. Bailey

R. Macdonald

1975年5月

目 录

著 者.....	I
前 言.....	II

第一部分 实验方法和相图的运用

摘要.....	1
实验方法和相图的运用.....	2

第二部分 实验岩石学

第一篇 变质岩

摘要.....	63
第一章 高压变质作用.....	64
第二章 中等温度和压力下的变质作用.....	117
第三章 低压和高温实验变质岩石学.....	161

第二篇 火成岩

摘要.....	205
第一章 花岗质岩石.....	206
第二章 实验应用于碱性岩.....	255

第一部分 实验方法和相图 的 运 用

D.K. Bailey

摘 要

本书第一部分阐述做实验及绘制相图的方法，以及用这些相图解决岩石学问题的途径，分为七节。前四节详细叙述实验岩石学的仪器、试料和技术，以使读者对实验手段容易理解，但省略了那些仅为专业实验工作所需的技术资料。为了让读者理解实验是如何做的，因此紧接着在第五节向读者介绍每种方法的局限性以及在解释各实验产物时存在的一些问题。这就自然而然地引向第六章，这一章对相律作了确切的说明并说明了根据实验结果绘制相图的方法。

第七节是本书第一部分的主体，其目的在于叙述较常用的各种相图，这些相图的根据以及解释这些相图的方法。从对包含有液体的相平衡的传统讨论开始，首先考虑简单化合物所显示的各种熔化方式，理解它们对于理解以后相继出现的更复杂的相图是十分重要的。用放热和结晶顺序来说明固体 $\rightleftharpoons$ 液体关系也是传统的方法，不过这里着重于逆过程，吸热以及熔融的引发和进展，因为紧接着就转到了低变度条件。对利用图解表现多组分体系的困难进行了叙述，并对各种制图方法的特殊性质和潜在的含糊性（如投影和假体系图）加以探讨。对等热切面分别地进行了考虑，试图说明为什么实验工作者感到它们很有用，而外行则常常认为它们是没有意义的。等热切面预示着加热图解的主题，它们不在相平衡的正常范围之内。对于协调内含变量和外延变量相互作用的这种复杂课题，只作简单介绍。其目的在于说明一些重要的实用方面，在其中，等压熔融的进展被看成是熔化方式、总体成分和热量输入的函数。

在以开始熔融为代表的特有边界条件以下的温度时，实验岩石学是研究固体之间的各种反应，在这些反应中势必考虑压力和温度的共同变化。为此，压力——温度相图就成为头等重要的课题，所以对PT图解的特征和应用必须详细加以探讨。特别要注意到由PT图解内不变点所引出的单变曲线的拓扑学分析，藉以强调这种方法在变质岩岩石学中的解释意义。讨论随着研究构成变质作用上限（即熔融的开端）的PT曲线而结束。

最后，探讨蒸气相对固体和固体-液体关系的各种影响，尤其是水、氧和二氧化碳的影响。

实验方法和相图的运用

D. K. Bailey

一 概论	3
(a) 实验岩石学研究的目的是什么?	3
(b) 实验岩石学研究的可能性如何?	3
(c) 实验岩石学研究是怎样进行的?	3
二 设备及物理条件的范围	4
(a) 在大气压下的高温实验	4
(b) 较高压力下的实验	5
三 范围、精密度、准确度	8
四 材料和方法	8
(a) 试样成分	8
(b) 优点和缺点	9
(c) 样品大小	10
(d) 试样容器	10
(e) 实验期限	11
(f) 温度和压力的控制	11
(g) 校准	11
(h) 鉴定炉料	11
五 实验产物和限制因素的解释	12
(a) 原始物料固有的限制因素	12
(b) 实验方法固有的限制	13
(c) 解释相关系中的限制	13
六 绘制相图的基本原理和方法	14
(a) 二元 TX 图解的绘制	16
七 结果的表示和解释	18
(a) 包含液体的 TX 图解	19
(b) 包含液体的 PX 图解	39
(c) 固体 $\rightleftharpoons$ 固体平衡	41
(d) PT 图解的特征	48
(e) 混合气体体系	59
(f) P_{O_2} 的变化	60
(g) PT 图解对变质作用的运用	60

一、概 论

高温高压下相平衡的实验研究是现代地质学不可缺少的部分。不过，对于那些缺乏直接经验的人来说，实验岩石学往往象是被笼罩在神秘的面纱之中。为了着手洞穿这一面纱，一般地质学家所最需要的在于回答下列问题：

(a) 实验岩石研究的目的是什么？

(b) 实验岩石研究的可能性如何？

(c) 实验岩石研究是怎样进行的？

本书第一部分的目的是回答这三个问题，进而探讨各种类型相图及它们在岩石学上的应用。首先只是一般地回答这三个问题，然后将在以后各章内加以详细说明。

(a) 实验岩石研究的目的是什么

大部分结晶岩石由为数不多的相（矿物）组成，而且这些相的组合曾在整个空间和时间不断重复，这是岩石学的普通常识。因为岩石内各种化学变量多而复杂，所以这样一些有限的矿物组合就意味着在岩石结晶期间接近化学平衡。如果确实如此，则对与岩石有关的一些化学体系内的平衡条件进行严密和系统探索，最终必然揭示出结晶岩石形成的物理限制范围。正是对这样一些限制范围的了解，将会使我们洞悉地球内部的物理状态、组成成分以及活动过程。

(b) 实验岩石研究的可能性如何

获得高温和高压并不困难。进行实验的主要问题是涉及到温度和压力的控制和校准。实验岩石学研究大半是可能的，因为各种硅酸盐（以及硅酸盐溶液）间的反应极端迟缓；所以，如果试样迅速移离高温或高压条件，发生退化反应就没有足够的时间，实验的相组合就能保存下来直到常温和常压。这种过程通常叫做淬火实验。淬火是成功的，因为反应速率显著地随温度下降而下降，而且它也得到了下述事实的支持：各种渐进反应（在实验中就象在自然界一样）趋于使晶体粒度增大，因而在温度下降期间就阻碍了再平衡。硅酸盐组合内极端缓慢的反应速率在自然界中表现于地球上保存有最早的前寒武纪的矿物组合，但是或许更引人注目的是月球上玻璃质的残余物竟超过了15亿年之久。

(c) 实验岩石研究是怎样进行的

绝大多数实验是取几分之一克的所要研究的试料，封装在或密封在一种不起反应、但却具有韧性的容器（Pt、Ag、Au）内。把这种试样放在熔炉中，在所需的温度和压力下加热通过一段最适合的时间（通常是几小时或几天）。这是简单的叙述，有很多细节将在下面各章作不同程度的探讨。不过，时间因素却是使很多地质学家感到烦恼的一个因素，特别是对那些研究变质作用的人们，因为他们感觉到时标的严重失真。任何负责任的实验工作者同样会警觉到这个问题（特别是他的一种方法要依赖于一个缓慢的反应速率时！）。但是，忽视了下列事实就很容易夸大时标误差：

(1) 粒度极细因而具有高度反应能力的试料被用做原始组分，并且甚至实验产物通

常也是细粒的，因此在实验期间其反应速率同天然情况相比就大大加快了。实验工作者并不关心生成粗的颗粒；相反，这些粗颗粒只是给他提示出在他的微少试样中存在不平衡的一种警戒性预兆。

(2) 在必要时（例如， Al_2SiO_5 ）可以进行这样一个实验，其中，原始物料含有已知数量的一切可能产物，并且反应的方向可以凭借比例的变化加以识别；即使这样，实验也并未进行完毕。

(3) 实验工作者信赖时标，因为事实上大部分天然组合（即使不呈晶粒大小）都可以在实验室期限内复制出来。

(4) 实验岩石学家应用的最重要的平衡检验方法，是从任何一个方向（即升高温度或降低温度）再造出一种相变化的性能。这种性能称做可逆性，当它被证实时，也有力地表现出实验期限是现实的。

二、设备及物理条件的范围

原则上，实验岩石学需要的方法是简单的。需要的不过是获得、测定并控制温度和压力的各种方法。在某些情况下，可能还需要控制特定的蒸汽压力，比如： P_{O_2} 、 $P_{\text{H}_2\text{O}}$ 和 P_{CO_2} ，不过这些主要是对成分的化学控制，而且是附属于下面要讨论的正常程序的。主要的工艺问题是高压与高温的结合引起的，因为大多数材料在高温下强度严重降低，因此它变得越来越难于保持压力。

最后这个因素，加上需要准确测定、控制并记录温度和压力，可能使实验仪器显得复杂，不过这不需要岩石学家操心。有关设备的一切细节，读者可参考Edgar (1973)；下面着重叙述实验岩石学家们应用的一些较普通的仪器的主要特征。

(a) 在大气压下的高温实验

在敞口熔炉中进行的实验可能最为人们所熟悉，因为直到1940年代晚期，大多数实验工作都属于这种类型，而且正是大量地在地球物理实验室进行的这种工作的成果，奠定了这一课题的基础，并且仍然在大多数岩石学教程内占有主要地位。

实验一般地是用悬置在孔径约1.5厘米的立管电炉的加热区内的样品进行的。(Faust, 1936; Edgar, 1973)，如图1所示。这种装置习称为淬火炉，因为它可使样品即刻移离加热区。样品用一细金属丝悬置在加热区内（图1的内插部位），这种细丝在实验结束时靠强电流的通过而熔融。当金属丝被熔化时，样品立即通过炉底，落入预先准备好的一盘水或水银内而被淬火到室温。利用接在电报上的传感装置（通常是热电偶）测定温度。可以用多种方法控制温度，比如把电炉线圈作为惠斯顿电桥的一个臂并保持固定的电阻，或是利用发自传感装置的信号以调节供给熔炉电流的控制电路。

通过细心操作和不断校准，有可能使实验在 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 范围内进行。在日常工作中，藉间歇性校准，应得出 $\pm 3^\circ\text{C}$ 范围内的成果。通过恰当的密封并在固定压力下（通常为1个大气压）给熔炉供应气体，比如氮、氩等，就有可能在淬火炉内维持受控的气压。

(b) 较高压力下的实验

这里的要求是，除了能使样品加热外，还必须能够在整个实验过程中把已知压力传递给样品。这或者可以利用流体静压力，也就是利用流体压力介质，或挤压固体表面之间的样品来实现。

(1) 流体静压力

(i) 外热压力管

在这种装置中，样品被装在一个压力管。(通常是试管状，见图2)的内部，凭借将流

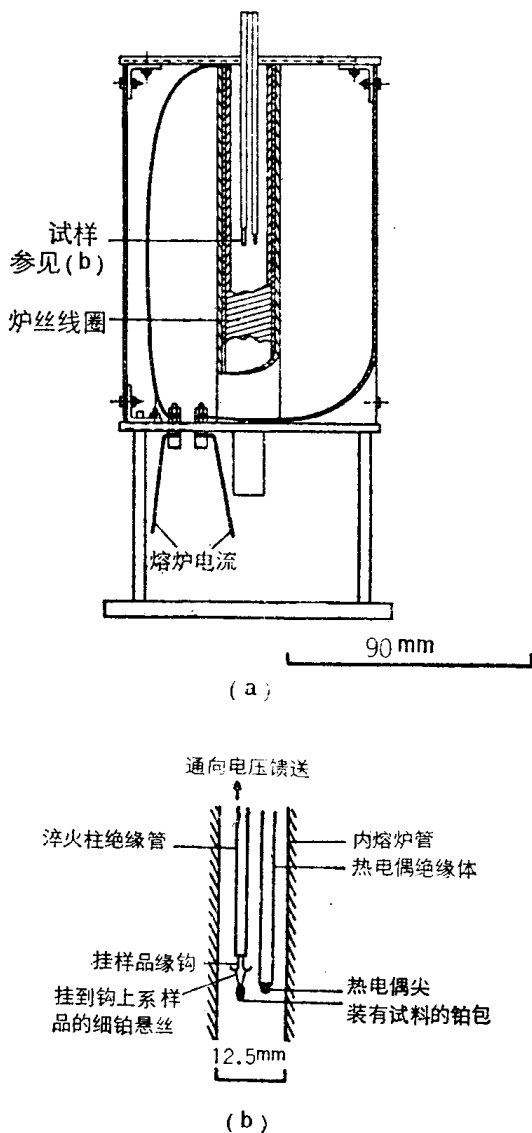


图 1 在大气压力下用的淬火熔炉的断面
(a) 淬火熔炉；(b) 淬火柱详图
(取自 Faust, 1936)

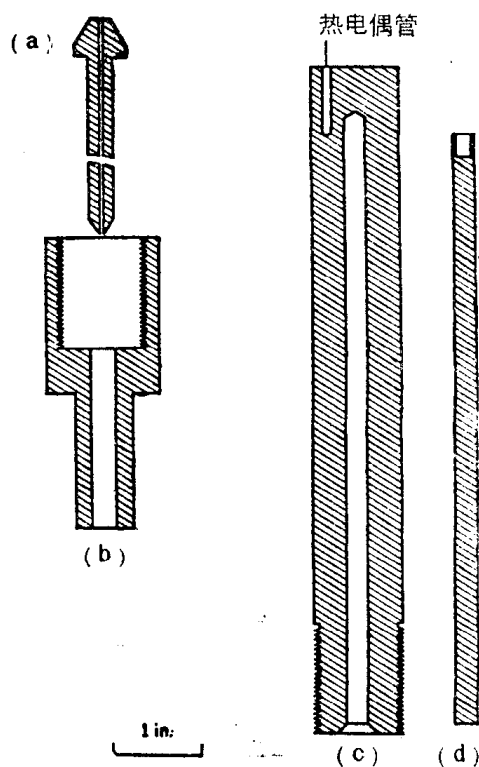


图 2 冷封压力管断面图。(a) 压力管的锥形密封离合器。(b) 使 (a) 密封并和 (c) 相接的闭合螺套。炉料装在支杆 (如 (d)) 的上端，所以炉料中心正对热电偶接头

(取自 Turtle and Bowen, 1958.)

体压力介质（通常是 H_2O 或氩）压入容器内而施加压力，压力一般可以用波登管式压力计直接并持续地进行测定。或者可以用浸在压力介质内的压力敏感电阻线圈来测定压力；利用这种装置，在实验期间能够连续记录压力。对实验样品加热，是把压力管封入一熔炉内，有时是管状熔炉，有时是一种铰链间隙熔炉，熔炉紧接一管子并且紧靠在压力管周围。利用嵌入压力管壁内的热电偶以测定和控制温度，在不损伤压力管内前提下尽可能使热电偶靠近样品。使实验样品淬火通常是将熔炉移开，继而把压力管置入压缩空气和水中；淬火时间要比在1大气压时长得多，可能要持续30—90秒。

从压力源到压力管的连接部件以及密封装置一般都在熔炉的外面，所以是处在比样品低得多的温度下（见图2）。因此，这种设备通常叫做冷封或塔特冷封压力管（Tuttle, 1949）。这就是实验工作者们熟知的“塔特釜（Tuttle bomb）”，只要细心使用就不必为方法的安全性而操心。这是在高压和高温下进行实验的最简单而最省钱的方法，并且已使世界各大学现在能够普遍开展在这一领域内的工作。这一方法的主要限制在于随着温度和压力的增长，压力管的效能有减退趋向；在1千巴压力下有可能使实验样品升温到1000℃，但在10千巴时则其一般的温度上限只是750℃。要想在高达10千巴的压力范围内获得较高温度，就必须应用不同的方法，样品以及熔炉要装置在一个大型压力容器之内，压力容器的外侧用水套加以冷却。

(ii) 内热压力容器

把样品和熔炉封装在一个大型压力容器内的装备，在两次世界大战之间曾应用于华盛顿地球物理实验室，并曾被Goranson在他所做的在水存在的情况下熔化花岗岩的经典试验中加以应用（1931）。但是这种设备很难维护，直到Yoder（1950）提出设计（是现在所用的大多数内热体系的基础，图3）之后，常规的高温静压力实验才成为可能；利用这种型式的设备进行实验工作，温度限度只由熔炉线圈的熔化温度确定，比如用铂丝线圈就可能在上升到1500℃的温度下进行例常工作。压力限度是由压力介质的物理性质确定的；在简单装置中，这种介质通常是氩，氩在室温下在12千巴以上固化。近来在一些实验室内，正通过不同途径获致较高压力，或是在最终压缩之前使氩加热以防止固化，或者把氮用作压力介质。利用这些比较完善的技术，现在可以在10—20千巴范围内进行流体静压力

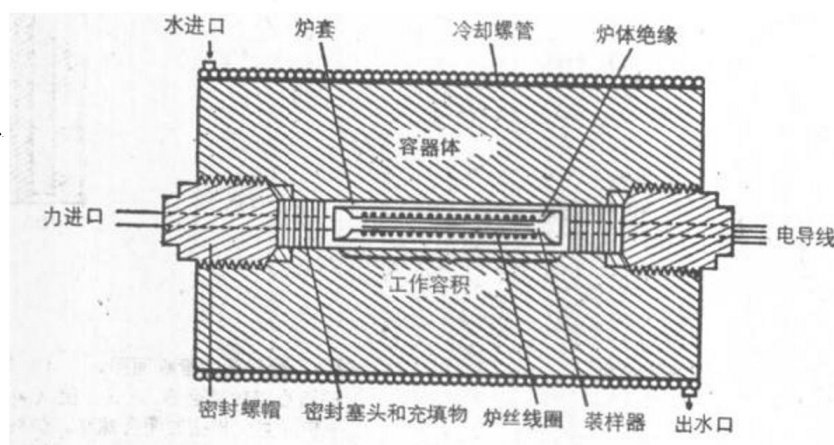


图3 简化内热压力容器示意图*

（取自Edgar, 1973）

* 左端“力进口”为“压力进口”之误

实验，这一压力范围可能并不比这种类型实验中的最终压力限度低多少。

与内热压力容器有关的主要技术问题在于建立有效的压力密封，尤其是在电源和热电偶引线的接入点，它们必须与压力容器绝缘。除此之外，这种实验基本上与 1 大气压实验相似，而淬火也几乎是同样迅速的，因为一旦切断了通向熔炉的电源，整个装置就立即被外部水套迅速冷却。

(2) 固体介质压力装置

对于 20 千巴以上的压力范围，必须通过作用于样品的固体施加压力，也就是说，样品行将被机械作用粉碎，这样显然在测定温度和压力以及尽可能使压力梯度减至最低程度方面就会出现问題，在这些条件下这些问题必然总是可能存在的。一些精湛的方法在设计中已经把这些问題减到最小程度，现时最广泛应用的是经过各种改装的 Boyd 和 England (1963) 的活塞圆筒装置 (图 4)，关于这种设备及其它这类设备的详细情况，可参阅 Edgar 的著述 (1973)，活塞圆筒式装置的要点在于，样品是被封装在一个小型电阻熔炉 (通常是石墨) 内，并整个装入易碎的绝热物质，如叶蜡石中。然后把这一组件连同电源和热

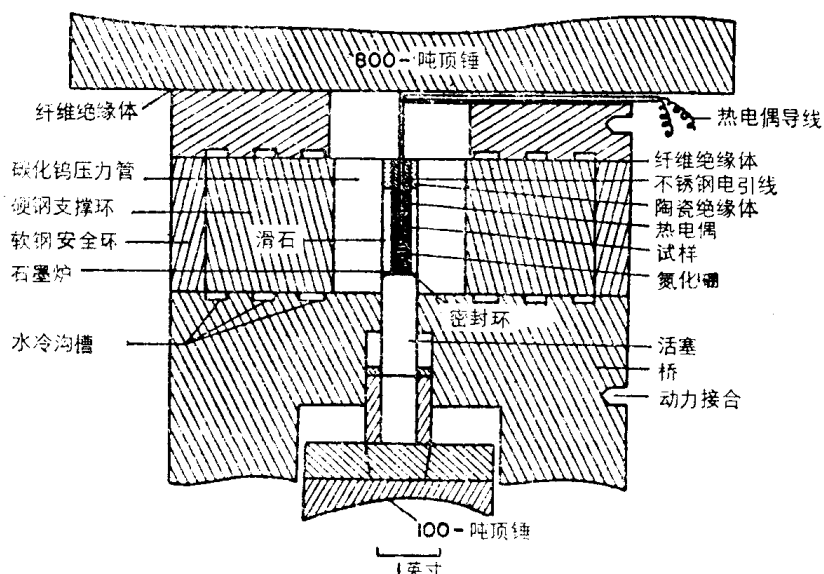


图 4 活塞-圆筒装置 (取自 Boyd England, 1963)

电偶引线用液力压头驱动活塞压入圆筒内。利用给定物质的已知转化点校准液力压头的作用压力，一般就可以获得传递压力。表 1 列举了温度和压力的范围、准确度及精密度。切断通向熔炉的电源，即可迅速淬火。

固态压力装置，虽然说起来很简单，但在维护和使用上却代价很高，而且需要专门车间不断支持。因此，在这个领域内的研究就限制在少数研究中心之内。

(3) 极高压

关于材料在大于 100 千巴压力下的物理性质的资料，是利用爆破或冲击波技术产生所需的压力而获得的。然而，大部分资料基本上是说明在这些条件下材料的物理状态，一般说来并不属于相平衡研究。象单组分体系这样一些简单材料可能属于例外情况，但即使在

这些情况中，也不能应用通常的平衡标准，因为实验的持续时间太短。

三、范围、精密度、准确度

正常的工作范围以及温度和压力测定的精密度综合列于表 1 内。

表 1 一般装置的测定范围和精度

装 置	温 度			压 力		参考文献
	精 密 度			精 密 度		
	范 围	最 佳	一 般	范 围	最 佳	一 般
一大气压	0—1600℃	±0.5℃	±3℃	一大气压	—	— 1
冷 封	0—900℃	±1℃	±5℃	到10千巴	±10巴	±50巴 2
内 热	0—1200℃	±2℃	±5℃	到10千巴	±20巴	±50巴 5
活塞圆筒	0—1750℃	±5℃	±15℃	到60千巴	±100巴	±5% 3,4

1. Schairer, J. F., 1959; Biggar, G. M. and O'Hara, M. J., 1969.

2. Greenwood, H. J., 1961.

3. Boyd, F. R. and England, J. L., 1963.

4. Richardson, S. W., Gilbert, M. C. and Bell, P. M., 1969.

5. Yoder, H. S. and Tilley, C. E., 1962.

测定温度和压力的准确度决定于校准的技术和频度，就温度来说，测量的准确度还明显地取决于熔炉的构形、样品以及热传感器。即使是在一个大气压实验的情况下，为了达到很高的准确度也要对所用的设备进行仔细而彻底的试验（参阅 Biggar 和 O'Hara, 1969）。在用于获致较高压力的更复杂的装置中，相应地更难于获得很高的准确度—即使精密度（或再现性）的等级可能和一个大气压实验中的精密度相近。

四、材料和方法

(a) 试样成分

作为相平衡研究的原始材料，一般是合成玻璃，或凝胶，或分析过的岩石矿物粉末。某些研究是用混合的粉料进行的，例如，几种不同矿物按重量比例混合。不过，在这些情况下，关于混合是否充分以及试样最终是否均一往往是一个潜在的疑问。均一性总是实验工作者首先关心的，在研究没有液体以及甚至没有流体存在的一些反应时尤其如此。最均一的原始材料是玻璃。这些玻璃是用仔细称量的纯化学原料（通常是氧化物或碳酸盐）通过反复熔化和研碎制成的。鉴定放在具相当折射率的浸油内的少量研碎的玻璃，很容易检验其均一性。测定一系列成分的折射率，也可对成分误差提供一种辅助性检查，因为在整个成分范围内应该呈现一种平稳的变化。当玻璃均匀时，通常是在保持逐渐降低温度条件下使之适应这种条件，并且最后尽可能充分地使一部分样品结晶（在一般情况下是10克样品的一半）。凝胶体通常是通过从有机硅氧化合物（例如，四乙基正硅酸盐）和所需阳离

子的硝酸盐及碳酸盐的溶液中沉淀出所要求的成分而制备的。将干的沉淀物研磨并在中等温度下焙烧以产生一种非晶质氧化物混合物。这种产物一般可直接用做实验，但是它本身可被熔融而成为玻璃体。岩石和矿物样品都可直接用做实验材料，而选取磨细并分析了粉末。

(b) 优点和缺点

玻璃体的优点是具有均匀性，因此在实验期间不易于产生持久的亚稳定相，而在有液体参加的实验中，这些玻璃体（当其相当的结晶物也同时经受实验时）为不断检验反应的可逆性提供了一种便利方法。它们的不足之处是在含有碱金属的体系内，当高温熔融期间可能有些损耗；它们在反应中可能很迟钝（虽然这种困难大部已被早先的结晶作用排除）；再者，它们的制备是费时间的并且需要昂贵的设备。作为某些玻璃体反应迟钝的实例，值得提出的是：（流纹岩的最低共结点在大多数描述“成岩残余体系”（ $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ — KAlSi_3O_8 — SiO_2 ，图5）的教科书内都被错误地说成是完全确定的。在原来对这一体系的叙述中，Schairer（1950）十分明确地指出，在合成流纹岩范围内的各成分，在适宜温度下即使经历长达5年以上的期限也不能结晶，因“关于这一领域的淬火资料是完全缺乏的”。

凝胶体的优点，在于它们容易制作而且不需要昂贵的设备。凝胶体的总体成分也是可以准确控制的；不过不易于控制其均匀性。缺乏均匀性，有时十分严重，致使它在适当的

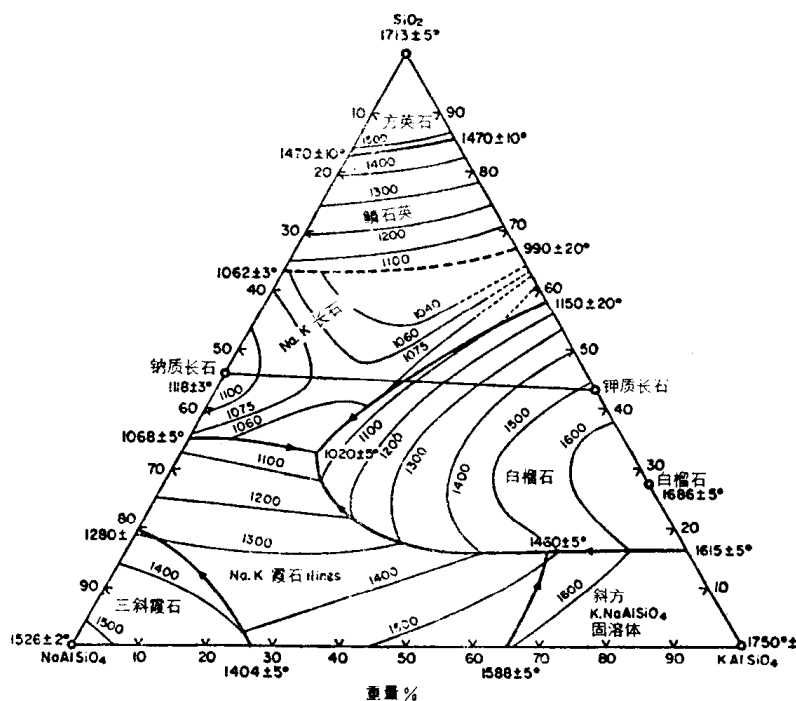


图 5 $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ — KAlSi_3O_8 — SiO_2 体系平衡图解，“成岩残余体系”

（据Schairer, 1950）

实验时间内也不能达到平衡。凝胶体是细分散物，因而具有高度反应能力，不过，因为它们的结构状态远远脱离通常实验条件下所需求的状态，因而它们可能有迅速进入亚稳定相的危险，而这种亚稳定相在随后的实验期间是难于消除的。

分析过的矿物和岩石样品具有这样一些优点：它们能够非常接近所希望研究的成分，

而且也大致上接近于所希望的能量状态 (state) 和相结构。但是对于岩石来说, 也存在这样一些问题: 原始粉样的均匀化程度, 为数繁多的组分, 以及一个始终存在的问题——一种结晶岩石能够在多大程度上代表它由之形成的天然体系的成分。在有关单矿物的实验中最后一个问题或许是最严重的。

原始试料的选择显然取决于多种因素, 不过对实验岩石学家来说, 很普遍的作法是试用不同原始试料以期在同样实验条件下产生出相同的试验产物。这种殊途同归使人们相信这些试验产物能够体现平衡的达成。

(c) 样品大小

大多实验工作者在工作中都利用了非实验工作者认为是过小的试样, 通常是数10毫克。这样小的试样是必要的, 因为: (a) 对于小的样品, 易于在可准确控制并且无温度梯度的熔炉内产生一个热带; (b) 试样越小, 所需压力容器的容积也就越小, 这就使得仪器易于制作和维护, 而且使它易于将压力梯度减至极小程度; (c) 大多数实验试样都是包装在昂贵的贵金属内的。把试样缩减到最小程度, 显然是一大优点。小试样是可行的, 因为在大多实验中原始试料和试验产物都是颗粒极细的, 而由大颗粒晶体导致的不均匀问题是很少遇到的。有关鉴定试验产物的方法将在下面叙述。

(d) 试样容器

试样一般是包装或密封在银、金、铂或银-钯合金容器内。在有可控大气压的实验中,

或是在实验中对炉料同大气间的反应可忽略不计的, 试样容器可不用封闭, 在很多典型的具一个大气压的实验中, 试样是包在铂箔制的一个小套子(大约1厘米见方)内。绝大多数现代的实验中, 都要求把试样与外压介质隔离开, 而在这些情况下, 典型的试样容器是由一个不太长的金属管(长约1.5厘米, 直径约2毫米)制成, 卷折并焊接管头以封闭金属管。这种薄壁管拥有无反应性和具可延性的双重优点, 所以外压很容易传到试样, 否则试样就同外界变化隔绝, 铂和银合金拥有可渗透氢的附加性能, 而这种性能可以应用于氧缓冲技术。在这种缓冲技术中, 试样(假定为 H_2O 所饱和)可以在氢的作用下同外部的水饱和和环境达于平衡。在外部环境内, 氢的作用一般是由在水饱和条件下的氧化平衡作用(例如 $Ni \rightleftharpoons NiO$)确定的。(详见图6及59页)。

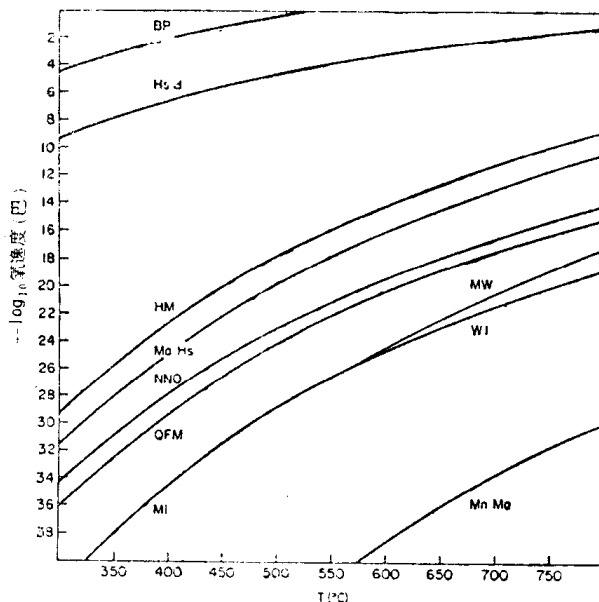


图 6 在一巴总压下各种缓冲组合的氧逸度对温度的曲线
 缩QFI = 石英 + 铁橄榄石 + 铁; WI = 方铁矿 + 铁; MW = 磁铁矿 + 方铁矿; QFM = 石英 + 铁橄榄石 + 磁铁矿; NNQ = 镍 + 氧化镍; HM = 赤铁矿 + 磁铁矿; BP = 方铁锰矿 + 软锰矿; HsB = 黑锰矿 + 方铁锰矿; MI = 磁铁矿 + 铁; MnMa = 锰 + 黑锰矿; MaHs = 方锰矿 + 黑锰矿