



全球变化与地球系统科学系列
Series in Global Change and Earth System Science

地球中的流体

Fluids in the Earth

卢焕章 编著



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS



全球变化与地球系统科学系列
Series in Global Change and Earth System Science

地球中的流体

DIQIU ZHONG DE LIUTI

Fluids in the Earth

卢焕章 编著



高等教育出版社·北京
HIGHER EDUCATION PRESS BEIJING

内容简介

地球与其他已知星球显著不同,是一个有丰富流体的天体。因为有了流体,整个地球就有了生命和生机。地球上的流体,特别是地壳中的流体,不仅涉及人类和动植物的生存、环境保护和健康,而且也关系到地球的演化。传统的地质学主要研究地球的固体部分,即岩石和矿物等,而对形成这些岩石和矿物的流体则关注不够。

地球中的流体研究是当今地球科学和环境科学研究的前沿。本书系统地介绍了地球中各种流体的分类、分布、组成和性质,隶属的热力学相图,阐述了流体的来源、迁移以及在地球演化方面特别是在成矿方面的重要作用。

本书是作者多年来从事地球中流体研究的结果,同时也收集了世界上有关地球中流体研究的最新成果。本书可供从事地球科学、环境科学研究的科研、生产和教学人员及高等学校相关专业的大学生和研究生阅读和参考。

关键词:地质流体 成矿流体 地球中的流体

图书在版编目(CIP)数据

地球中的流体/卢焕章编著. —北京:高等教育出版社,2011.3

ISBN 978-7-04-028511-6

I. ①地… II. ①卢… III. ①地球物理学-流体力学-研究 IV. ①P3

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第017710号

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街4号
邮政编码 100120

经 销 蓝色畅想图书发行有限公司
印 刷 三河市华润印刷有限公司

开 本 787×1092 1/16
印 张 22.5
字 数 430 000

购书热线 010-58581118
咨询电话 400-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landaco.com>
<http://www.landaco.com.cn>
畅想教育 <http://www.widedu.com>

版 次 2011年3月第1版
印 次 2011年3月第1次印刷
定 价 59.00元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 28511-00

序

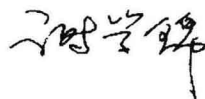
固体的地球可以分为地壳、地幔和地核。地壳中存在着各种各样的流体,除了主要的水以外,还有石油、天然气、二氧化碳及其他气体。流体对地壳的形成、演化及其中的各种地质过程起着极其重要的作用,包括热量的传递、组分的迁移与交换、热液矿床与围岩蚀变的形成、造成岩石的形变、构造作用、诱发地震等。现代社会离不开各种矿产资源,这些矿产资源都取自地壳中,而矿产资源都是由成矿流体形成的。一切成矿过程,包括成矿物质的来源、搬运、沉淀都离不开流体。可以说,没有流体就没有矿床。

在地球上发生的许多剧烈的地质作用,像大规模的玄武岩喷发(例如峨眉山玄武岩)、板块运动、大洋中脊上涌的热流、富含稀土元素的岩浆碳酸盐岩和产金刚石的金伯利岩等,都离不开地幔流体的作用。同时有人认为地核也可能是液态的。

地壳的最上层,地球表层系统由岩石圈、大气圈、水圈、生物圈相互作用而形成。岩石圈上部有残积物、沉积物及土壤等。它是一切生物生存的立足点。大气圈包围着地球,是由气体(气体也是一种流体)和悬浮物质组成的复杂系统,其主要成分是氮和氧,是人类和一切生物活动必不可少的。水圈是地球表层由各种形式存在的水组成的圈层,它更是一切生命的源泉。没有水,就没有生命,就没有生物圈。

总之,流体在地球上是无所不在的。它涉及资源的取得、环境保护和人类的生存。因此,流体的研究已经成了当前地球科学研究中的热点之一。

卢焕章教授从事流体研究工作三十余年,积累了丰富的实际资料,并曾在加拿大魁北克大学、中国科学院研究生院和中国科学院地球化学研究所为研究生讲授流体地球化学课程。本书就是作者这三十多年辛勤劳动所取得的丰硕成果的结晶,同时,书中还搜集了大量国内外有关地质流体研究成果的精华,用以系统阐述流体的来源、迁移以及对成矿作用、环境保护、生命与健康以及在地球演化方面的重要作用。相信本书的出版将会极大地促进我国流体研究,为解决我国的资源与环境问题作出重要贡献。



2010年6月14日于北京

目 录

绪论	1
第一节 地球中流体研究的内容	1
第二节 研究地球中流体的方法	5
第一章 地球中的流体概论	9
第一节 流体的定义	9
第二节 地球中的流体	10
第三节 流体的状态和化学组成	11
第二章 地幔流体	39
第一节 热点和地幔柱	41
第二节 地幔流体	45
第三节 地幔流体的岩浆组成	54
第四节 地幔流体的同位素组成	61
第五节 地幔流体、板块构造与成矿作用	72
第六节 地幔岩中流体包裹体研究	76
第三章 地壳中的流体	87
第一节 概述	87
第二节 地壳中流体的分类	89
第三节 地壳中流体的聚集	110
第四章 流体的相平衡和流体体系	117
第一节 流体相平衡和状态方程	117
第二节 一元流体体系	123
第三节 二元流体体系	134
第四节 三元流体体系	156
第五节 油气的 $p-V-T$ 性质	166
第六节 岩浆的相图	170
第五章 流体的迁移	175
第一节 概述	176
第二节 岩石和土壤的渗透率和地下水动力学	180
第三节 影响盆地流体迁移的因素	197

第四节 流体迁移的影响因素	201
第六章 成矿流体(一)	205
第一节 成矿流体的概念	205
第二节 地壳的去流体作用及流体的形成	212
第三节 矿物的溶解度	224
第四节 盆地卤水及其成矿作用	240
第七章 成矿流体(二)	266
第一节 现代大洋海底热液	266
第二节 岩浆与岩浆热液及其成矿作用	297
第三节 变质流体	330
主要参考文献	343

绪 论

地球按其物理和化学性质可以分为若干圈层:大气圈、生物圈、水圈和岩石圈等。固体的地球又可以分为地壳、地幔和地核。不管如何划分,在地球的各个圈层中均有流体存在。一个干的星球和一个有流体的星球,差别是十分明显的,例如许多星球上没有水这个流体因而不存在生命。简而言之,是流体给地球带来了生机。本书扼要地讨论地球中的流体,并把重点放在地壳中的流体上。

第一节 地球中流体研究的内容

简单地说,流体是能流动的物体,这是基于其流动的性质而言。日常生活中离不开的水、奔腾的河流、浩瀚的大海都是流体的一种。地球中的流体有很多种,如岩浆、气体、岩浆热液、地层水、石油、海水、大气降水、变质水、地热水、地幔流体以及古流体——流体包裹体等。现在的问题是存在于地球中的流体是从哪里来的?是怎么形成的?这些流体分布在什么地方?地球中的流体有哪几类?在地球的表面,海洋占到2/3左右。所以有人说,为什么不把我们生活的地球叫做海洋,而要把它叫成地球呢?

地球上的流体包括存在于大气圈、水圈、生物圈和岩石圈中的流体,并且也包括地幔中的流体。流体按其定义应为能流动的物质,这是对流体的广义定义。从狭义上来说,地球科学中的流体大致包括气体、液体(主要是水)、熔体(主要是硅酸盐熔体)。它们在地表和地下可以流动和迁移。地球中的成岩作用离不开流体。大量的侵入岩、火山岩是从岩浆(各种硅酸盐熔融体)经结晶分异,同化混染等过程产生的。在各种变质岩的形成中,变质水起了关键作用。至于沉积岩,它们主要是在水体中沉积而成,当然就更离不开流体了。“成矿作用,包括成矿物质的来源、搬运、沉淀同样离不开流体。可以毫不夸张地说,没有流体

就没有矿床。另一方面,也应当承认,并非所有流体均能成矿”。这是涂光炽先生 1997 年为拙作《成矿流体》所作的序中所指出的。各种可能的成矿流体:岩浆、岩浆热液、变质热液、建造水、卤水、大气降水、地下水、海水等,它们的化学组成、物理性质、来龙去脉,它们与周围介质(固体岩石)的相互作用,它们对成矿物质的搬运及沉淀机制等是地球中流体研究的内容。流体的研究是当前地球科学研究中的热点。1993 年,在北京香山科学会议上以“地球中的流体”为题,邀请国内外专家进行研讨。研讨会上肯定这一命题是当今固体地球科学发展的前沿。它是涉及人类生存、环境保护和成矿规律的重要问题。

地球是一个有流体的天体,这是与太阳系中其他已知星球显著不同的地方。因为有了流体,整个地球就有了生命和生机。地球上的流体不仅涉及人类和动植物的生存,而且也关系到地球的演化。过去,地质学家对地球中的地质作用的研究一般是着重于其固体部分,即矿物和岩石,而对流体的分布及其在地质过程中的重要性则缺少应有的重视。而对如何形成这些矿物和岩石则注意不够;实际上,如果不考虑流体,对地壳中乃至地球中许多地质过程的描述则往往出现误差,有时甚至不正确。流体尤其对以地球物理的一些方法得出的结果影响较大。相反,水文学家和水库工程师往往只考虑水,而对地壳中的其他流体和固体部分则考虑不多。

本书研究的地幔流体的英文名词为 mantle plume,中文也译为地幔柱。地幔流体是以热点、溢流玄武岩、大规模的碱性侵入岩体、大洋中脊的熔体和流体、裂谷和火山岛链等为代表的。加拿大地质学家 Wilson(1963)在研究夏威夷群岛时发现这些岛屿上的火山岩和火山口规模巨大,最大的达 1 000 km,并且排列成轴,其年代也有先后。Wilson 认为夏威夷火山岛链是由热点形成的。而这些火山岛链是地球上热点的表征之一。热点学说及在热点学说基础上发展起来的地幔柱理论已经成为当今地质学、地球物理学、地球化学乃至生物学、气象学等学科关注的热点和前沿课题。热点的提出与板块构造的提出基本上属于同一时期,但是限于当时的条件,人们对于地幔的认识还是非常有限的,而对于地球的表层构造则由于相对易于研究而得到迅速发展。因此到了板块构造理论建立 40 多年之后的今天,板块构造的研究积累了比热点更为丰富的资料。随着深度探测手段和技术的不断发展,人们对地幔的直接认识有了突破性进展,于是热点理论得到了发展和更新,一个新的地幔柱与热点相联系的构造理论体系逐渐形成。

地球是一个分层的星球,从外到内,可以分为地壳、地幔和地核三部分。地壳的厚度为 0 ~ 33 km。一般洋壳 6 km 左右,而陆壳的最厚处可达到 30 ~ 40 km。地壳下面是一个不连续面,把地壳与地幔分开。地幔可分为三层:上地幔、过渡带和下地幔。其厚度为 33 ~ 2 900 km。地幔和地核之间也有一个不连续面。地核也分三层即外核、过渡带、内核,其厚度为 2 900 ~ 6 370 km。地幔和

地核占了地球总体积的 99%。按地球的平均密度为 5.517 g/cm^3 来计算,地壳,不论其质量或体积都只占地球的 1% 左右。在地球上发生的许多地质作用,例如大规模的玄武岩喷发(如我国的峨眉山玄武岩)、板块运动、洋脊热流和热液的喷出等很难完全用地壳作用来解释,可能许多地质过程是与地幔相关联的,也就是说与地幔流体相关。在地球中,许多现象例如,上升(山脊上升)、三角形的裂谷、陆壳裂开、大陆范围内的推卷、陆地和海洋溢流玄武岩、蛇绿岩套、太古宙绿岩带、大量的放射状的深成脉岩群、岩浆房、一些碳酸盐岩和金伯利岩及热点,这些都可能是地幔流体作用的结果。同时有人认为地核也可能是液态的。

地球在不停地运动,流体存在于地球的地壳和地幔中,并且在不停地运动和迁移。在地质年代中,地壳中流体的流动是由很多机理所控制和驱动的。这些机理包括沉积压实作用、重力梯度(包括地势)、水平方向上流体密度的差异、地震泵和成岩过程、变质过程和岩浆作用,其作用过程中会产生出流体并进行迁移。除了迁移的机理外,流体流动的通道以及能量和动量的传播也是十分重要的。

水循环是指水在地球的水圈、岩石圈、生物圈和大气圈的存在及运动情况。地球中的水处于不停地运动中,并且不停地变换着存在形式,从液体变成水蒸气,再变成冰,然后再循环往复。水循环已经持续了几十亿年,地球上的所有生命都依赖于水循环。如果没有水循环,地球将会是一个毫无生气的地方。水循环没有起点,也没有终点。

在地壳浅部($<6 \text{ km}$)流体的流动是以从中到高的渗透性,以及流体的压力介于静水压力(10 MPa/km)到静岩压力(26 MPa/km)之间为特征的。在这种环境下,地势、压实作用和密度是驱使流体迁移的主要因素。而在中部到下部地壳中($>10 \text{ km}$),流体流动的机理则以较低的渗透率并且接近静岩压力为特征。并且深埋作用的压力超过了岩石的剪切作用限度,在这种情况下流体的流动主要是由挥发分作用、地幔流体和岩浆的去气作用造成的,在这个过程中沿活动的深大断裂的渗透率的改变和地震泵动是流体在这种地质环境下流动的主要机理。在地壳浅部与中部到下部两者之间($6 \sim 10 \text{ km}$)则是一个过渡带,上面述及的控制流体流动的机理在这个过渡带中均可见到,并可能同时存在。当然流体迁移过程中我们亦应考虑其能量、动量、热量及其反馈作用,以及流体与周围岩石和物质的相互作用,这些作用贯穿于整个迁移过程中,并且相互影响。

我们所居住的地球周围,环绕着一层大气。这层大气的主要成分是氮气(78%),其次是氧气(21%)。此外,还有少量的氩、二氧化碳、氦气、沼气、氢气、氖气、氟气和臭氧等。大气中的氧和二氧化碳等气体,是一切有生命的动植物生存所必需的。大气一方面保存太阳的热能,使地球温暖,适合动植物生存,另一方面亦挡住太阳辐射中大部分的紫外线,令动植物不致受伤。大气亦是水循环必经的媒介。包围地球的大气,大致可分为两层。下面一层是对流层,离地面的

高度约为 7 英里^①,容纳大气中约 70% 的空气。绝大部分的污染发生在对流层中。酸雨、温室气体等问题就是在这—层中形成。对流层之上是平流层,离地面的高度扩展至约 70 英里^①。平流层也会受到污染,各种污染气体也会破坏对流层之上的臭氧层。

为了从物理化学的角度定性、定量地来描述流体的性质,流体的状态方程和物理化学相图是十分重要的。本书介绍了流体的一元、二元和多元体系的相图,介绍了硅酸盐熔融体的相图。这些相图包括了地球中主要流体: H_2O 、 CO_2 、 $\text{NaCl}-\text{H}_2\text{O}$ 和岩浆的相图。我们从这些相图中就可以定量地描述出这些流体的特征。

成矿流体是指形成矿床的流体。在自然界中有各种各样的矿床,因此也有各种各样的成矿流体。但不管何种矿床,均是从成矿流体中形成的。成矿流体按其—主要成分,可分为:① 岩浆,即形成岩浆矿床的岩浆,有人称之为矿浆;② 以 H_2O 为主的流体;③ 以 CO_2 为主的成矿流体。地壳中的流体很多,只有含—定金属元素,并且达到—定浓度时才称为成矿流体。所以金属矿床的成矿流体主要述及其中的金属元素含量。并不是地球上所有的流体都能形成矿床,只有当这种流体变为成矿流体时才有可能。那么什么样的过程和反应能使流体变成成矿流体,并且最终形成矿床呢? 这就涉及:来源(包括流体的来源,成矿物质的来源如金属和硫的来源,脉石矿物的来源,热的来源等);迁移(迁移的动力和通道);流体和岩石的相互作用;矿床定位和沉淀(沉淀的机理、物理化学条件、空间的准备和所需的时间等)。对于成矿流体的形成来说,流体与岩石的相互作用是其中最关键的问题。

从—般流体变为成矿流体的关键性—点是流体和岩石的相互作用,水岩相互作用改变了流体的成分,改变了流体的物理化学特征。很多地球上的流体但不是所有的流体都能成为成矿流体。现在的问题是—般流体怎样变成成矿流体。这其中主要的机理是流体和岩石的相互作用,岩石中的金属元素和硫是如何进入到流体中的。例如,在加拿大的太古宙块状硫化物矿床的研究中,特别是在 Ansil 矿床中发现了玄武岩和海水相互作用的证据。Ansil 矿产在太古宙的柱状玄武岩中,是—个块状 $\text{Cu}-\text{Fe}$ 硫化物矿床。这种矿床是在海水环境中形成的。在柱状玄武岩的剖面上,发现了玄武岩和海水相互作用的证据:这个柱的直径为 14 cm,其中心部分未见蚀变,为新鲜的玄武岩,但在其边缘,从外到内 1 ~ 2 cm 的地方见到强烈的蚀变,在边缘带岩石的颜色退色,并且在其中沉淀出黄铜矿和黄铁矿。在柱状的玄武岩之上是块状 $\text{Cu}-\text{Fe}$ 硫化物矿体。在这当中可以看出成矿流体是从下往上经过这些柱状的玄武岩与其发生了相互交代作用。所以水岩相互作用改变了流体的成分,改变了流体的物理化学特征。

① 1 英里 = 1.609 3 km。

第二节 研究地球中流体的方法

一、地球中流体的性质及主要参数

当我们研究流体时,注意流体的下列性质是十分重要的:① 黏度(绝对黏度和动力黏度);② 压力(包括孔隙流体的压力);③ 温度;④ 密度和比容;⑤ 体积弹性模量;⑥ 表面张力;⑦ 成分。在考虑地质过程时,时间和空间对流体性质的影响也是十分重要的。因为地球中的许多流体是漫长地质作用的产物。前人已经做了许多研究工作,例如,计算流体扩散的 Fick 定律、Fourier 的热传导定律、DeDonder 的亲合力定律、Dacy 的流体流动定律等。表 0-1 列出了为了解地球中流体的性质所需考虑的主要参数,表 0-2 则引述如何获得流体各种参数的实验室和野外方法及其重要程度的对比。

表 0-1 地球中流体的性质及主要参数

体系状态	所需参数	所能得出的资料
等温,流体化学成分不变时的压力	(1) 地层和构造的(几何学) (2) 界面条件 (3) 参数:孔隙率、水力传递性、弹性常数 (4) 流体来源和渗透	孔隙流体压力 流速分布
(稳定流和等温条件时)质量和化学成分迁移	(1) 流速分布 (2) 不同化学成分层的条件 (3) 参数:孔隙率、弥散度 (4) 化学反应的类型和化学反应动力学	岩石和流体的 化学成分
热传递 (稳定流和流体化学成分不变)	(1) 流速分布 (2) 不同热区界面条件 (3) 参数:孔隙率、热传导、热扩散、焙	温度
(弹性条件下)应力和应变率	(1) 应力状态 (2) 流体压力 (3) 温度 (4) 弹性常数 (5) 其他参数	应变率和裂隙 (裂开)

表 0-2 有关流体参数的野外和实验室方法的比较

体系和参数	实验室方法	野外方法
地层和构造		× × ×
边界条件		
地势		× × ×
热源		× × ×
构造因素及岩石力学	× ×	× × ×
流体源和渗透		× × ×
渗透率		
孔隙介质	× ×	× × × ×
裂隙介质		× × × × ×
孔隙度	× ×	× ×
流体密度	×	
流速	× ×	
化学反应确定其类型	× ×	× × × ×
动力学	×	× × × ×
弥散度		
质量		× × ×
热量		× ×
热传导	× × ×	×
弹性常数	× × ×	×
塑性	× ×	× ×

注：标 × 的多少是对比野外和实验室方法的重要性和采用性而言，表中所列参数均与时间和空间有关

二、地球中流体的研究方法

研究地球中的流体，主要涉及流体的来源与年代学、流体的成分、流体的迁移、流体与岩石的相互作用和流体的热传导五个方面。表 0-3 列出了研究上述五个方面所用的主要方法。其中流体的成分和同位素及年代学研究非常重要，近年来已确定了地壳中主要流体的氢氧同位素值，但在流体年代学方面却存在许多困难，原因是流体的易混和易溶。但是最近几年对存在于岩石和矿物的古流体——流体包裹体的流体年代学研究却有很大进展。笔者和李华芹曾对加拿大的 Sigma 金矿、Macassa 金矿，我国的玲珑金矿、西华山、大吉山钨矿、柿竹园矽卡岩型钨矿的流体包裹体进行了年代学的研究，并取得了满意的成果。主要是采用 Rb - Sr, Sm - Nd 和 $^{40}\text{Ar} - ^{39}\text{Ar}$ 方法。同时在研究成矿流体的成分方面由于

LA-ICP-MS 等一系列仪器的引进,使得单个流体包裹体的成分测定成为可能。尤其要提及的是可以测出流体中的金属离子以及其他元素的含量。除了表 0-3 所列之外,计算机模拟、遥感和人造卫星也是研究地球中流体的方法。用这些方法可以探测地壳表面流体的分布;现在用遥感和人造卫星的方法可以探测从地表到地下 5 m 左右的深度有没有流体;可以计算海洋中海水的质量;测定海平面的升降;可以测定地下岩浆房的大致位置以及岩浆如何上升形成岩墙和岩脉,最终观测火山的喷发;可以测定冰川的移动、溶化和凝结的过程;可以观测大断裂的位移以及流体在断裂中的移动。另外,人造卫星和地球物理的结合对研究地球中的流体是很有帮助的。

表 0-3 研究地球中流体的一些方法

研究流体来源 及年代的方法	研究流体 成分的方法	研究流体 迁移的方法	研究流体 与岩石相互 作用的方法	研究流体 热传导的 方法
流体的来源: (1) $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (2) $\delta\text{D} - \delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ (3) U - Pb 同位素 (4) Na/Br, Cl/Br 比值 (5) 气体主要是 $\text{N}_2 - \text{Ar} - \text{He}$ (6) 流体包裹体 (7) 地球物理法 流体的年代测定: (1) Rb - Sr 法 (2) Sm - Nd 法 (3) 热液矿床 (4) 单个包裹体 中流体的年 代学	(1) 化学分析 法 (2) 流体包裹 体成分的 测定 (3) 现代地热 系统流体 的分析 (4) 大洋中脊 热流的分 析 (5) 火山喷出 的岩浆和 气体分析	(1) 构造作用(造山运动、 俯冲带和剪切作用 等)所驱使的流动 (2) 岩石或沉积物压实作 用所驱使的流动 (3) 热驱动的对流和扩散 (4) 重力梯度 (5) 盐度或浓度梯度 (6) 流体压力和静岩压力 所驱使的流动 (7) 地势和地层的倾斜度 (8) 岩石的孔隙度和渗透 率的研究 (9) 流体的混溶和不混溶 (10) REE 元素对流体相 混的指示 (11) 流体包裹体对相分 离的研究 (12) 数学模拟及水文地 球化学	(1) 蚀变作用 (2) 海水与玄武岩的相 互作用 (3) 矿区地下 水的研究 (4) 热液矿床 的研究	(1) 温度 (2) 蚀变作 用及烘 烤作用

关于地球中流体的研究已有较长的历史,第一部总结地壳中流体的专著当推 Fyfe 等(1978)出版的《地壳中的流体》。1998 年由 Barnes 主编的《热液矿床的地球化学》(第二版)对热液作了详细的论述。随后又发表了许多论著。特别

是出版了三部有关“水岩相互作用”的专著(2004,2005,2008)。同时还有很多地下水地球化学的专著和论文。1997年笔者出版了成矿流体的专著。1990年美国自然科学基金委员会组织了一批科学家对地壳中流体的研究现状作了评述,总结了取得的进展,并指出了存在的问题及今后发展的趋向和规划。

笔者从事流体的研究三十余年。本书是笔者在加拿大魁北克大学给研究生讲课的内容。这本书的写作始于十年前,期间不断搜集国内外有关地质流体的研究成果进行系统分析、归纳和总结,择其精华,结合自己的研究成果撰写成书。在本书编写过程中参阅了王登红(1998)的《地幔柱及其成矿作用》;刘丛强和黄智龙(2004)的《地幔流体及其成矿作用——以四川冕宁稀土矿床为例》;李佩成(1993)的《地下水动力学》;卢焕章等(2004)的《流体包裹体》等著作。除在书中注明外,特在此一并说明和致谢。

感谢我的老师,中国科学院院士谢学锦先生为本书作序以及多年谆谆的教导。感谢张立生先生的帮助。

感谢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和加拿大魁北克大学的支持和帮助。

本书的出版得到范宏瑞教授和他的学生的帮助。高等教育出版社李冰祥博士和柳丽丽编辑的帮助,特此一并致谢。

笔者虽然从事流体研究多年,但要对如此广泛而深刻的内容进行阐述,仍深感知识不足,故错误与不足似乎在所难免,敬请读者批评指正。

第一章

地球中的流体概论

地球按其物理和化学性质可以分为大气圈、生物圈、水圈和岩石圈等。固体的地球又可以分为地壳、地幔和地核。本书扼要地讨论地球中的流体,并把重点放在地壳中的流体上。这是因为目前对地球详细进行地质研究的部分是地壳,能开采的矿床也集中在地壳,人类也生活在此。

第一节 流体的定义

简单地说,流体是指能流动的物体,这是基于其流动的性质而言。如果按照物质的状态来分,可以分成三态:固态、液态和气态。根据其流动性,物体的气态和液态是流体,而固体则不是。这显然不全面。因为呈固态的物体在受力时也可发生形变,从而产生流动。流体的流动可以是大规模的,例如,大陆范围内的移动,沉积盆地内的移动;也可以是极小范围内的,例如粒间流动和扩散。

本书的目的是讨论地球中的流体,因而对流体的定义要侧重于从地质学的角度来考虑。从地质学上讲流体不是单独存在的,它们是与矿物、岩石在一起的。那么什么是我们所要研究的流体呢?我们采纳 Fyfe 等(1978)的建议,用流变学的术语,并从地质学角度来进行考虑。也就是说看一个物体是不是流体主要根据其流变性质:如果一个体系在应力或外加力的作用下能发生流动或形变,并且与周围物质处于相对平衡,就把它叫做流体。换句话说,当一个应力作用到一个物体上时,这个物体会改变它的大小、形状和组成,它就是流体。但实际上,我们所研究的流体主要是指以液态和气态存在的物质。

按照流变学的定义,流体是由应力和应变率所确定的。对于地球中的物体来说,当一个应力作用到该物体时,根据其应变率的不同可以将其分为牛顿流体和非牛顿流体(图 1-1)。为了对比,在图 1-1 中还列出了固体的特征曲线。

研究流体时,流体的下列性质十分重要:

(1) 黏度(绝对黏度或动力黏度),

$$\nu = \frac{\mu}{\rho};$$

(2) 压力(p ,包括流体的孔隙压力);

(3) 热力学温度(t),摄氏温度(T),

$$t = T + 273.15;$$

(4) 密度和比容(ρ 和 ν , $\frac{1}{\rho} = \nu$);

(5) 体积弹性模量, $\beta_T = d\left(\frac{\partial p}{\partial d}\right)T$;

(6) 表面张力, $S = \frac{F}{2\pi D}$;

(7) 成分浓度(C),摩尔分数(x)或质量分数(w_B)。

上述公式中: D 为流体表面的任一质点的直径; μ 为动力黏度; F 为合力; ρ 为密度。

在考虑地质过程时,时间和空间因素对流体性质的影响也十分重要。因为地壳中的许多岩石是经过漫长的地质作用而发生形变的产物,对于这些岩石来说,时间因素对它们的形变是起决定性作用的。如果把统计力学理论应用到地质上,特别是应用到晶体中,当原子从它们的晶格位置发生位移,并迁移到晶体内部低应力或低能量区时,就可以用数学方程式来阐明结晶物质的流动:

$$\frac{dl}{dt} = \varepsilon = K \cdot \exp[f'(T) \cdot f''(\sigma)]$$

式中: l 为位移的尺度; t 为时间; K 是常数。应变率 ε 是温度 $[f'(T)]$ 和应力 $[f''(\sigma)]$ 的函数,不管应力多么小,只要参加作用,形变一定会发生。若从这点出发,地球上所有的结晶物质,亦可按流体来看待。

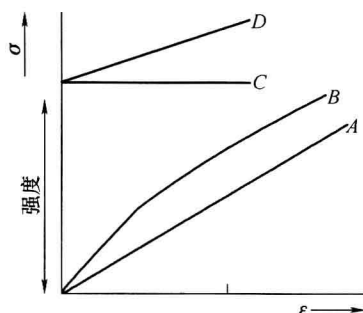


图 1-1 各种“理想”的液体和固体的应力(σ)、强度与应变率(ε)的关系(Fyfe 等,1978)

A. 牛顿流体;B. 非牛顿流体;C. 完全弹性的固体;D. 具有应变硬化率的固体

第二节 地球中的流体

按照定义,地球中的流体有以下几种:

(1) 呈气体状态的流体——大气圈以及存在于矿物、岩石、生物圈中的气体。

(2) 呈液体状态的流体——水圈中的流体(海水、河水、湖水、地下水、雨水、岩浆水、地层卤水等)、岩浆以及存在于流体包裹体中的流体。

(3) 被固定在矿物的晶格中或晶格之间的流体。

地球中的流体分布在大气圈、水圈、生物圈和岩石圈中。在大气圈中流体是以气体形式存在的;在水圈中则呈液态;在生物圈中的状况比较复杂,有呈液体的,也有呈气体的;在岩石圈中的流体以气体、液体和固体状态存在。本书着重阐述岩石圈中以气体和液体存在的部分。已知在上地幔中,流体有岩浆、 H_2O 和 CO_2 ,在地壳中则主要为岩浆和 H_2O 。笔者在研究南极地区的玄武岩时发现,这种来自上地幔的玄武岩中除了存在岩浆外,还有 H_2O 以及 CO_2 流体。在地球各层圈中的流体并不是截然分开的,它们之间每时每刻都在进行着各种相互作用和循环。例如,海气相互作用,岩石和水的相互作用等。

第三节 流体的状态和化学组成

从物理化学和地质学的角度来说,存在于地球中的气体、液体和岩浆(熔融体)是我们研究的主要对象。下面主要介绍液体和气体的主要化学组成和热力学性质,岩浆留待后文中探讨。

一、液体——以水为代表

水是地球上最重要的流体。地球表面大约有 $2/3$ 是被水覆盖的,这种枯燥的统计并没有表达出从空间看地球时对海水产生的那种茫茫无际之感。地质学家们很早就意识到由水组成的海洋和水蒸气组成的云的重要性,因为水滋养了生命并几乎参与了地球表面所发生的每一过程。因此,对水进行研究是十分重要的。

地球中的水主要分布在六个部分:最多的是在海洋,其体积为 $1\,350 \times 10^{15} \text{ m}^3$,占全球水体积的 97%;冰川和极地冰中的水,总体积为 $29 \times 10^{15} \text{ m}^3$,占 2.1%;地下含水层中的水总量为 $8.4 \times 10^{15} \text{ m}^3$,占 0.6%;河流和湖泊中的水为 $0.2 \times 10^{15} \text{ m}^3$,占 0.01%;大气圈中的水总量为 $0.013 \times 10^{15} \text{ m}^3$,只占 0.001%;生物圈中的水总量为 $0.000\,6 \times 10^{15} \text{ m}^3$,是最少的,占 $4 \times 10^{-5}\%$ (图 1-2)。

(一) 水的结构和性质

1. 水的结构和 $p-V-T$ 性质

一般来说,地壳中常见的化学搬运和机械搬运过程均与水溶液有关(图 1-3)。一般矿物在水中的溶解度为 $n \times 10^{-9} \sim n\%$ 的数量级。水的这种性质主要