

岩石热物理性质及其测试

沈显杰 杨淑贞 张文仁 著

科学出版社

岩石热物理性质及其测试

82106/21
沈显杰 杨淑贞 张文仁 著

科学出版社

1988

内 容 简 介

岩石的热物理性质,特别是岩石的热导率,在地热理论和应用研究以及煤、石油、天然气的成因研究等领域得到了广泛的应用,并且越来越显示其重要性。

本书以热传导的物理机制为基础,重点论述了岩石热导率的测试原理、测试方法、测试技术和测试系统的选型及设计原理,详细介绍了三种测试仪器的结构和性能,并对测试条件和测量数据的精度进行了评价。书后所附的三个程序可为科研人员进行热导率测试提供方便。

本书可供地热学、石油地质学、煤地质学的科研人员和高等院校有关专业的师生以及从事热传导研究和测试仪器研制的工程技术人员参考。

岩石热物理性质及其测试

沈显杰 杨淑贞 张文仁 著

责任编辑 周明鉴 吴寅泰

科学出版社出版

北京朝阳门内大街 137 号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经营

*

1988年5月第一版 开本:787×1092 1/16

1988年5月第一次印刷 印张:12 3/4

印数:0001—1,200 字数:290,000

ISBN 7-03-000311-X/P·49

定价: 4.40 元

前 言

地热学是一个新兴的地球科学分支，它包括理论地热学、应用地热学和测量地热学（或实验地热学）三个研究领域，构成完整的学科体系。本书即是国内有关岩石热物理性质及其测试的理论、方法和仪器的第一本实验地热学方面的专著。

测量地热学是通过对热量在岩石中的传递方式和影响因素的理论研究、建立实验测试系统和提供岩石热物理参数等途径为理论地热学和应用地热学服务的；同时为定性的深部地质研究逐渐向定量的地球物理研究过渡创造必要的数据和装备等物质基础。事实上，通过地层温度测量，岩石热导率、比热、放射性生热率的测定，既可获得大地热流数据——表征地壳深部热状态和热演化历史的地球物理参数，从而探讨区域地温场形成、深部构造热作用机制和演化等理论地热学问题，也可以解决地热资源的生成、类型和分布，矿井深部温度预测，油气资源的预测和评价，乃至矿井巷道中围岩热交换等一系列应用地热学课题。可见，实验地热学在地热研究中起着十分重要的作用。

地热研究中应用到的岩石热物理性质包括热导率、比热、密度、热扩散率和放射性生热率等。在概略介绍岩石各项热物理性质及其基本测试原理的基础上，本书论述的重点是最重要的热物理性质——岩石热导率，对热传导机制，热导率的影响因素、测量方法和技术的分类，测试仪器的设计原理等，进行全面讨论。

全书分理论、方法和仪器三部分（三篇）共九章。第一篇的三章偏重理论，主要讨论岩石热传导的物理机制和影响因素；第二篇共两章，论述岩石热导率测试方法的分类、仪器的设计原理和步骤、测量技术和误差控制等；第三篇共四章，在简略回顾常用的稳态和非稳态岩石热导率测试方法的基础上，重点介绍中国科学院地质研究所地热实验室已建成的四种具有典型代表意义的热导率测试方法：稳态的平板法和分棒法，非稳态的环源法和探针法。书后还附了地热-II型和HY-1型热导仪上使用的三个微机程序。

编写本书的目的是为了适应国内地热工作迅速发展对岩石热物理性质研究和测量的迫切需要，同时也是多年实验地热学研究的初步总结，期望能为我国热物理实验的理论发展和技术进步有所贡献，并为尽早建立我国热物理性质计量测试中心起到推动作用。

本书的第一、三、四、七章和附录II和III由沈显杰编写；第二章由杨淑贞和沈显杰共同编写；第六、九章和附录I由杨淑贞和张文仁合作编写；第五章和第八章由沈显杰、杨淑贞和张文仁三人合作完成。书中所列数据，部分是由作者测得的，另外相当部分数据是由地热实验室张容燕和沈继英二位同志测得的，她们为本书的撰写也作出了相应的贡献。四室地热研究组的全体同志在地热实验室建设、仪器的研制和本书的撰写过程中，始终给予很大的鼓励和支持，是本书得以完成的重要促进因素。中国科学院地质研究所制图组的同志在图件清绘过程中付出了辛勤的劳动，在此一并表示衷心的感谢。

由于作者水平有限，书中错漏在所难免，敬希读者指正。

目 录

第一篇 岩石的热物理性质

第一章 绪论	1
第一节 岩石热物理性质测试在地热研究中的位置.....	1
第二节 实验地热学的研究水平、发展概况及展望.....	3
第二章 岩石热物理性质概述	6
第一节 概念.....	6
第二节 岩石比热的测定方法.....	8
一、量热法.....	8
二、简易电加热法.....	10
三、激光脉冲等额加热法.....	12
四、利用差热仪及其配件测量比热.....	14
第三节 岩石密度的测定方法.....	16
一、坚硬岩石密度的测定方法.....	16
二、松散岩石密度的测定方法.....	18
第四节 岩石放射性生热率的测试方法及实验系统.....	18
一、 γ 能谱法的物理基础和实验装置.....	18
二、测量条件的选择和系数的测定.....	19
三、样品的测量.....	21
第三章 岩石的传热机制	23
第一节 致密岩石的传热机制.....	24
第二节 岩石的矿物热导率构成.....	27
第三节 孔隙岩石的热导率.....	28
一、多相介质热传导的理论概述.....	29
二、孔隙岩石的饱水试验研究.....	37
第四节 温度和压力对岩石热导率的影响.....	43
一、岩石晶格热导率与温度的相关性.....	43
二、高温时辐射热导率和发射率对温度的依从关系.....	47
三、压力对岩石热导率的影响.....	49
第五节 岩石热导率的各向异性.....	50

第二篇 岩石热导率的测量方法和技术

第四章 岩石热导率的测试方法及测量系统的设计原理	53
---------------------------------------	----

第一节 岩石热导率测试方法的分类	53
第二节 岩石热导率测试系统的选型和设计原理	59
一、实验方案的选型	59
二、测试系统的设计原理	64
第五章 岩石热导率的测试技术和误差控制	68
第一节 岩石热导率的测试技术	68
一、主要测试项目	68
二、量热方法和技术	72
三、测温方法和技术	76
第二节 岩石热导率测定的误差因子及其控制	80
一、误差(或精度)的类别	80
二、主要误差因子	81
三、漏热的防止	84
四、界面接触热阻抗的控制	86

第三篇 测量岩石热导率的仪器和装置

第六章 岩石热导率测试中常用的方法和仪器	91
第一节 稳态的方法和仪器	91
一、一维平板电热法及仪器	91
二、二元复合法及其测量装置	92
三、一维分棒法的仪器和装置	94
四、岩石热导率的碎块测试法及仪器	96
第二节 非稳态的方法和仪器	100
一、中心线热源法的测试原理	101
二、海底探针	102
三、孔底原位探针	105
四、微分线源法亚型	105
五、综合线源法亚型	107
六、侧壁线源法亚型	107
第七章 地热-I型稳定平板式岩石热导仪	109
第一节 仪器的原理、结构和测量技术	109
一、方法原理	109
二、仪器结构和特点	110
三、测量技术要点	114
第二节 垫片法的原理、标定和应用	115
一、铜片法	116
二、镶嵌法	117
三、垫片法	120
第三节 测量精度估计	123
第四节 与美国地质调查所分棒装置测量结果的比较	125

第八章 地热-II型稳定分棒式岩石热导仪	129
第一节 仪器的原理结构和测量技术	130
一、方法原理	130
二、仪器结构	131
三、测量技术	133
第二节 程控数字处理式测量和控制系统	134
第三节 测量条件试验	137
第四节 标准样的结构参数及其评定方法	140
一、标准样的结构参数	140
二、结构参数的评定方法	140
第五节 测量精度评价和仪器的互检	144
一、左右等值性	145
二、测量结果的重复率	146
三、仪器的绝对精度	147
四、仪器的稳定性	148
五、不同方法和仪器之间的互检和内检	149
第九章 HY-1型非稳态环形热源-微型探针岩石热导仪	153
第一节 仪器的原理和结构	153
一、方法原理	153
二、仪器结构	157
第二节 程控数字处理式测量和控制系统	161
第三节 测量条件试验	162
第四节 测量精度评价和仪器的内检	165
一、测量结果的重复率	165
二、仪器的绝对精度	167
三、不同测试装置间的内检	168
四、仪器的性能指标	169
第五节 兼容式的微型探针	170
一、微型探针的结构和测量系统	170
二、程控数据处理的方法和技术	172
三、测量结果和精度评价	177
四、微型探针热导仪的主要技术指标	179
附录I HY-1型非稳态环形热源-微型探针岩石热导仪的 BASIC 联合程序	180
附录II 地热-II型稳态分棒法-非稳态微型探针热导仪的 HP 联合程序	185
附录III 地热-II型热导仪的标定程序	191
参考文献	194

第一篇 岩石的热物理性质

第一章 绪 论

第一节 岩石热物理性质测试在地热研究中的位置

作为地质学和地球物理学相结合的地热学是近年来新兴的一个地学边缘学科分支。它的主要研究领域是地球的热场及其它与之相关的理论和应用课题。作为深部地质学的学科分支,地热学研究地质体在形成演化中一切与热相关的地质过程,诸如地球的(热)起源和热演化历史,以及当今的深部热状态和温度随深度的分布;作为地球物理学的一个学科分支,地热学通过定量的地球物理数据——大地热流的测量,推演地壳上地幔的热场分布,以及各种深部地质演化过程在现今地球物理场中的综合场效应,包括天然和人工地震波速场,反映地球物质密度和热状态的重力场,反映壳幔物质温度和物质相的地球磁场,反映地质体在特定温压条件下感应天然和激发信号的电磁场,以及表征地质体深部热状态和构造热作用活动性的温度场和热场等等。上面列举的各种地球物理场及相应的地球物理数据,各自在不同程度上都是温度和介质热物理性质的函数。因此,地热研究必然要涉及作为介质的壳幔物质的热物理性质和热状态及其与地球物理数据之间的相关关系。概言之,以大地热流测量为中心内容的地热研究,对阐明地球的形成、起源、发展和演化等地球科学中的理论课题起着重要的作用,并逐渐形成地热学中的一个重要的学科领域——理论地热学。

大地热流 q 可表达为(中国科学院地质研究所地热组, 1978)

$$q = -K \frac{dT}{dZ} \quad (1.1)$$

式中, K 为岩石的热导率,单位: $W/(m \cdot K)$; T 为随深度递增的温度, K ; Z 为深度, km 。式中的负号表示热流的方向与温度递增的方向相反。热流 q 可定义为单位时间内由地壳深部垂直向上通过单位面积地球表面向太空发散的热量,单位为 mW/m^2 。由此可见, q 基于两项基本测量: 一是实地的温度测量, 二是在温度测量段采集地质样品进行热导率测量。在绝大多数情况下,这类测试是在实验室条件下完成的。显然,热导率是岩石热物理性质中最重要的一项,也是本书的重点所在。然而,地表测得的热流值由两部分组成: 一部分来自上地幔顶部,通常称为地幔热流分量,记为 q_r ; 另一部分由壳内岩石所含放射性生热元素(主要为铀、钍、钾)在衰变过程中原地生热组成的地壳热流分量。即

$$q = q_r + DA \quad (1.2)$$

式中, D 为表征放射性生热元素分布的参数,相当于某假想的均匀分布生热层的厚度; A 是岩石的放射性生热率,是单位时间内单位体积岩石的衰变生热量,单位为 $10^{-9}W/m^3$ 。 A 是地热研究中十分重要的岩石热物理性质之一,它也是在专用的实验室中测定的。

岩石热物理性质测试在理论地热学中的另一项应用是热流校正时介质的热属性定域,包括稳态的地形、折射校正,非稳态的沉积和气候校正等。在进行稳态校正时,需已知扰动介质的热导率;在进行非稳态校正时,除 K 外尚需知道所涉及区内介质传导温度变化的能力,即热扩散率 a ,它既可以通过实验直接测定,也可用下式计算

$$a = \frac{K}{c\rho} \quad (1.3)$$

式中, c 和 ρ 分别为岩石的比热和密度。

综上所述,岩石的 K , a , $c\rho$ (又称为容积比热)和 A 虽远未概括岩石的所有热物理性质,但确是地热研究中至关重要的一些性质,它们构成地热学的一个专门研究领域——实验地热学的主要研究内容:

- (1) 岩石各项热物理性质的定义,它们的相互关系及其物理机制的探讨;
- (2) 影响岩石热物理性质的各种因素的研究;
- (3) 测量岩石热物理性质的原理和方法及其理论基础;
- (4) 体现上述原理和方法的岩石热物理性质测量仪器和装置的设计研制原理和准则;
- (5) 岩石热物理性质的测量技术;
- (6) 影响岩石热物理性质测试精度的各项误差因子分析以及实验误差控制的理论与实践。

由此可见,实验地热学与理论地热学之间的关系是理论科学与实验科学间的互为表里、相互依从的关系。

然而,地热学的研究领域并不限于上述地学理论问题。近十余年来国内地热学科发展的简短历史充分证明,地热学同时也是一门具有广阔应用前景的应用基础学科,多分支的应用地热学随即逐步形成。在煤炭、冶金、核工业等采掘部门,地热研究着重解决深矿井的地温预测问题,此处特定地质构造环境下,不同热物理性质岩层的空间配置是决定地温场分布的关键因素(杨淑贞、陆秀文,1985);在阐明深矿井致热成因类型的基础上,热矿井的通风和降温设计中要用到大量的围岩热导率、热容量、热扩散率,甚至热交换系数等数据,由此发展了应用地热学中的矿山地热学分支(中国科学院地质研究所地热室,1981)。在石油部门,通过古地温古地热等研究手段,将现今的地温场追溯反演到油气形成时代的古地温古地热条件,从而探讨生油岩系所经历的生油门限温度、油气成熟度,进而在时空规模上圈闭油气生成运移以及勘探开发的有利时段和区段,在此过程中,生油岩系及围岩的热物理性质仍是探讨上述过程的基本物理参数;近代涌现的注汽热驱动采油等纯工程性问题,更需要多种岩石的热物理性质参数,由此发展而逐步形成应用地热学中的另一个分支——油田地热学(汪缉安等,1985)。至于以中高温或中低温地热资源的勘查、开发及资源评价等为中心研究内容的这一地热能科学的应用地热学分支,与岩石热物理性质的评定和测量的关系也是十分密切的。此外,随着我国核工业、航天工业的飞速发展,随着工艺岩石学、工艺矿物学和其它以天然岩石为原料的材料科学的逐渐兴起,地质体(通过岩石标本)热物理性质研究的应用范围日益扩大,需求也与日俱增。

上述各个领域中,应用地热学的形成和发展都是以理论地热学作为学科的指导基础,以实验地热学为主要研究手段的。大至地质区,如油气分布区、矿区或地热资源赋存区,

小至某个地质工程体,如矿井、油井、地热井或某个工程基地,都必须弄清其天然温度场的形成和分布。在这一点上,应用地热学和理论地热学的研究内容是密不可分的;同时,作为温度或热量传播主要媒介的地质体的热物理性质的研究,始终起着中心环节的作用。概言之,面向国民经济生产实际,积极开展应用地热学研究,充实和促进理论地热学的学科发展和提高,同时推动实验地热学的建立和完善,是中国地热学形成和发展的显著特色。实验地热学起到了提供基础实验手段和大量实验数据等重要的作用,它是地热学的一个实质性的组成部分,是任何类别地热研究中不可缺少的内容之一。

第二节 实验地热学的研究水平、发展概况及展望

岩石热物理性质的研究可追溯到上世纪末本世纪初,发展至今大致可分为三个阶段。

第一个阶段为1939年前的承袭和借鉴阶段,主要集中于岩石热物理性质的物理机理的研究,借鉴和移植很多固体热传导方面的理论和结果,发现热导率随温度而呈有规则的变化,进而对热量的传导、辐射和对流机制有了更系统的认识。这一阶段独立的岩石热物理性质测量仪器虽未问世,但根据岩石中矿物组分的分配估算岩石热导率的方法已经提出并获得初步应用。

第二阶段由1939年至70年代末。1939年 Benfield 建立专用于测量岩石热导率的原型分棒仪,标志了第二阶段的开始。1959年微型探针应用于海底热流测量(Von Herzen & Maxwell, 1959)的成功,将热物理测量工作扩展到松散的洋壳沉积物,测试方法和原理由稳态分棒法辅之以非稳态的线源法。1956—1958年 Beck 将电热型分棒仪的绝对测量方法改型为定温水套型分棒仪的相对测量方法,大大缩短了达到系统平衡所需的时间。与此同时,用于松散沉积物热导率测量的探针技术也日臻完善,并有了定型生产(指探针部分,而非整个热导率仪器),在海洋和湖泊淤泥沉积物以及陆上松散沉积物的热物理性质测量方面获得日益广泛的应用。在70年代中期,美国地质调查所(USGS, Menlo Park)进一步将微型探针技术成功地应用于致密坚硬岩石的热导率测量(Sass *et al.*, 1984),拓展了基于线热源原理的探针技术的应用前景。同时,日本大和株式会社(Sowo Denko)基于线热源原理,研制成功商品化的主要适用于测量建筑和保温材料热导率的 QTM 型快速热导仪,在国内外岩石热物理性质测试领域得到了一定的应用。由于其探头为长方形,要求样品尺寸不小于 $30 \times 60 \times 100\text{mm}$,因此钻孔岩心样品较难满足,限制了其在地热研究部门的广泛应用。在此阶段,围绕“分棒”和“探针”虽有一系列局部的仪器结构改进和技术更新,但并未有突破性的进展。

第三阶段是以70年代末和80年代初世界范围内的科技飞速进步为标志的。实验地热学比之其它测量科学虽然仍处于相对较低的发展阶段,但随着信息时代的到来和高技术领域的不断涌现,地热学中实验装备的技术水准也渐趋改观。虽然实验装置的原理和方法并没有实质性的创新,但在探测技术优化、测量仪表数字化、过程控制自动化以及数据处理计算机化方面,已经不可避免地体现了近代高技术发展的成果。相邻的材料科学、陶瓷工业和固体热物理性质测试方面的巨大技术进步浪潮必将或早或晚地冲击岩石热物性测试领域落后的技术基础。例如,美国地质调查所地热实验室已卓有成效地建立

了一套由台式计算机控制的微型探针测量固结或松散岩石热导率的装置,从加热、计时、测量过程控制、数据的采集运算和存取,到数字和图形输出等功能,实现了全盘自动化。在海洋热流测量中的船用或原位热导率测量技术中,也已广泛应用无线电传输和程控信息处理等先进技术。

地热学在我国的发展始于 50 年代末,直至 60 年代末,发展的速度相当慢,仅有中国科学院地质研究所和地质科学院地质力学研究所等少量研究单位,结合大地构造研究,在东北和北京郊区等地进行过数量有限的地热测量工作,与之相应而建立的岩石热导率测量装备也较为简陋,无论是方法还是仪器均未完善和配套。

70 年代初期至中期,尤其是 1973 年世界能源危机显露以来,以地热资源开发利用为中心内容的我国地热研究工作在全国范围有一个突破性的进展,在国内科研、生产和高教部门形成了一支相对稳定的地热研究队伍,包括中国科学院的地质研究所和地球物理研究所,高教部的北京大学和天津大学,地质科学院的地质力学研究所和人文地质工程地质研究所,以及地质矿产部下属的北京水文地质工程地质公司和各省局的水文队下属的地热研究队伍。与此同时,煤炭、冶金、石油、核工业部等产业部门中相当一部分工程技术人员,也因各自为解决与地热相关的应用性课题而逐渐被吸引到地热工作中来,总人数估计超过千人。在一些科研和教学部门,曾作过多种尝试,以建立测量岩石热物理性质的专用装置。

中国科学院地质研究所在地热研究室的编制下,稳定地保证了有 5 至 8 名中初级科技人员的专属性很强的地热实验室,专门从事岩石热物理性质测试,从参观学习、文献调研、仪器的设计加工、安装调试,到检验鉴定等进行了一系列研制开发工作。从 70 年代初至今,通过自行设计研制,先后建立了多套岩石热导率测试装置,岩石放射性生热率测量系统,岩石样品比热和密度的测试装备,以及岩样磨制、真空饱水和称重测厚等一系列必要的辅助装备,初步建成了一个方法齐全、设备配套和技术先进的综合性地热实验室,为确立我国实验地热学这一地热学科分支奠定了坚实的物质基础。尤其是该实验室于 80 年代头五年研制成功的两套多功能程控数字化岩石热导率测试系统(杨淑贞、张文仁, 1982; 杨淑贞等, 1987; 沈显杰等, 1986, 1987), 于 1986 年 3 月通过了国内同行专家的评审鉴定,认为这两台仪器的研制成功,标志着我国实验地热学的研究水平达到了 80 年代的国际水平。

以技术更新为标志的实验地热学发展的第三阶段尚刚刚开始,本世纪末该领域的发展趋势概括为以下几方面。

1. 计算机技术的广泛和多方面的应用

虽然至本世纪末很难预期会创立固体热物理性质测试的新理论和新方法,但计算机的广泛多层次应用是完全可以预见的,并且已经形成了一定的势头(Brown & Porovic, 1972; Brown & Shirliffe, 1976),这不仅意味着习用至今的手工操作测量方式将被计算机程控测量所代替这一简单的置换过程,同时计算机的应用将渗入到实验系统的优化设计,试验条件的全优化自动调节控制;在物理模拟和数学模拟相结合的前提下,有可能在克服固体热物性测试中两大难题——漏热和界面接触热阻抗方面取得突破性的进展,从而显著地提高热物理测试精度;通过有限单元和有限差分数字模拟等技术,有可能对非规

则几何形状的热流模型进行深入的剖析,在此基础上,将某些至今仍未有分析解的热流模型,开发为具有实际应用价值的新测试原理也是完全可能的;此外可以预期,固体(包括岩石)热物理参数数据库将逐步建立,并初具规模。

2. 国际通用型标准化系统的确立

目前在世界范围内各研究单位和高等院校各建各的装置,各出各的数据,数据之间存在巨大差异的现象仍将持续一个时期;但在本世纪末将在测试标准化领域取得以下多方面的进展:

(1) 国际通用计量单位的启用。这个过程始于70年代初,并取得了相当的进展,但远未完善。

(2) 国际通用型岩石热物理性质测量系统的普遍认可。在本世纪的十余年内,尚无可能也无必要建立国际通用并定型生产的标准型仪器,但很有可能确立国际公认的、至少为计算大地热流数据用的测量岩石热导率所通用的实验装置原理和方法,它将在目前国际上初步通用的改型分棒装置的基础上加以改进,将对测试条件和所使用的参比材料作某些严格的规定,以资国际对比。就国内而言,岩石的热物理性质(主要为热导率和比热)测量将纳入国家级计量部门的测试项目(至今国内热物性计量测试系统尚未建立)。

(3) 国际通用标准材料系列的建立。这是国际标准化工作中一项至关重要而又易于达到的步骤。至今应用最广泛的参比标准为高纯度的熔融石英,某些情况下也应用一定切割方向的结晶石英。权威性标准材料系列的确立有赖于世界级权威性实验室测试装备的建立。在这方面应跨出实验地热学的范围,而侧重于各国的标准计量部门或国家实验室,如美国的国家标准局、普度大学的热物理性质研究中心,英国的国家物理实验室,苏联的国家标准计量局等。同时还应发布标准材料的成分、结构、纯度及生产工艺条件等数据。有了多种标准材料系列,可在一定程度上弥补缺乏通用型标准仪器之不足,使数据的绝对精度和互比性有所提高。

(4) 国际实验室间互检制度的建立。在金属、建材和保温材料和陶瓷等固体材料部门,早已建立了国际实验室间的互检网络,在岩石热物性测试领域也亟待建立类似的互检网络,只有这样,各国所发布的热流数据才能具备相似的精度,从而具有互比性。我国的地热实验室应积极地争取参与上述国际互检网络(沈显杰,1983),使地热测量工作及早日跨上国际通用化和标准化的道路,并且在国内各实验室之间逐步建立以计量科学院为中心的计量测试互检制度。

3. 全性能多功能测试系统的建立

全性能测试系统指多台测试装置的联合运行或并行使用,使岩石热物理性质的测试工作能扩及不同性状和大小岩石类型。而多功能测试系统指的是该仪器系列能应用于范围相当宽的温压条件范围,它们不仅是常规的测量装备,同时也是进行条件试验研究的科学仪器。这样一来,将岩石热物理性质的测试和研究工作,从实验装置的配套上保证能有机地结合起来。可以预期在本世纪剩余的十余年内,在模拟壳幔温压条件下岩石的热物理性质变化的研究方面,将会取得一批有价值的研究成果和测试数据。

第二章 岩石热物理性质概述

第一节 概 念

岩石诸项热物理性质中,最主要者为岩石热导率、比热和热扩散率。它们对大地热流和地壳温度场的分布有重大的影响,是研究地壳和上地幔热结构、地球深部热状态以及各种工程岩体(如隧道、矿井等)内空气与围岩之间热交换的重要参数。近年来,由于对地球热演化和热历史研究的逐步深入,人们对岩石放射性生热率也愈益关注。

1. 岩石热导率 K

岩石传递分子运动热能的性质即谓岩石的导热性。此性质用热导率 K 值来表示,其物理意义为:沿热传导方向单位厚度岩石,当两壁温差为 1°C (或用开氏温标表示为 1K) 时,单位时间内所通过的热量。根据傅里叶定律,其计算公式如下

$$K = \frac{QD}{F(T_2 - T_1)t} \quad (2.1)$$

式中, Q 表示厚度为 D 的岩样两壁温差为 $(T_2 - T_1)$ 时, t 时间内通过截面积 F 的热量。 K 值的国际通用单位为 $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。此外尚常用两种单位,工程单位为 $\text{kcal}/(\text{m} \cdot \text{h} \cdot ^{\circ}\text{C})^1$, CGS 制单位为 $\text{mcal}/(\text{cm} \cdot \text{s} \cdot ^{\circ}\text{C})$, 或称为 1 个热导率单位 (Thermal Conductivity Unit, 简称为 TCU), 这三种单位的换算关系如下

$$1\text{TCU} = 1\text{mcal}/(\text{cm} \cdot \text{s} \cdot ^{\circ}\text{C}) = 0.4187\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$$

$$1\text{kcal}/(\text{m} \cdot \text{h} \cdot ^{\circ}\text{C}) = 2.778\text{mcal}/(\text{cm} \cdot \text{s} \cdot ^{\circ}\text{C}) = 1.163\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$$

就华北地区所测岩样而言,岩石热导率的变化范围约波动于 $0.2-10\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 之间。在沉积岩系中,页岩和泥岩的热导率较低,砂岩和砾岩的热导率变化甚大,石英岩、盐岩和菱镁岩的热导率最高。岩浆岩、变质岩和火山岩的热导率一般界于 $1.5-4.0$ 之间。总体上,岩石属于低热导的固体。

影响岩石热导率的因素很多,但主要取决于岩石的矿物组成和结构特点。在致密的岩石中,造岩矿物的热性质对岩石热导率起主要的控制作用;在孔隙质岩石中,除固体基质外,孔隙度、孔隙充填介质及含水量等对岩石热导率有较大的影响。总体上,温度对岩石热导率的影响远大于压力的影响。由于影响因素的多变,因此在实际工作中,无论是大地热流计算,还是空气和围岩的热交换计算,均需在现场采集代表性岩样作热导率的实验测定。

2. 岩石热扩散率 α

岩石热扩散率又称导温系数,是反映岩石热惯性特征的一个综合性参数。它表示岩

1) $1\text{cal} = 4.1868\text{J}$ 。

石在加热或冷却时各部分温度趋于一致的能力，其物理本质是物质内部温度传播的速度（科勃兰诺娃，1957）。在研究非稳态温度场时需了解岩石的热扩散率，它可表示为

$$a = \frac{K}{c\rho} \quad (2.2)$$

式中， K 为岩石热导率； c 为岩石比热； ρ 为岩石密度。 a 的单位为 cm^2/s ，或 m^2/h ，两者可按下式换算： $1\text{m}^2/\text{h} = 2.778\text{cm}^2/\text{s}$ 或 $1\text{cm}^2/\text{s} = 0.36\text{m}^2/\text{h}$ 。

岩石比热的变化范围较窄，对热扩散率的影响不大，因此岩石热扩散率主要与岩石的热导率和密度有关。一般而言，当岩石的热导率变化10倍时，热扩散率仅变化2至3倍。岩石热扩散率约变化于 $0.001\text{—}0.050\text{ cm}^2/\text{s}$ 的范围内，泥岩的 a 值较低，磁铁矿、盐岩的最高。

3. 岩石的比热 c

单位重量的岩石当温度升高(或降低) 1K 时所吸收(或放出)的热量，称为该岩石的比热，它可表示为

$$c = \frac{Q}{m\Delta T} \quad (2.3)$$

式中， m 为岩石的重量， g ； ΔT 为升温(或降温)值， $^{\circ}\text{C}$ ； Q 为加热(或冷却) $m\text{g}$ 岩石增(降)温 $\Delta T^{\circ}\text{C}$ 所需的热量， J 。岩石比热 c 的国际通用单位为 $\text{J}/(\text{g}\cdot^{\circ}\text{C})$ ，但迄今最常用的比热单位为 $\text{cal}/(\text{g}\cdot^{\circ}\text{C})$ 。

岩石比热的变化幅度不大，约为 $0.2\pm 15\% \text{ cal}/(\text{g}\cdot^{\circ}\text{C})$ ，或 $0.84\pm 15\% \text{ J}/(\text{g}\cdot^{\circ}\text{C})$ 。它随温度的升高和岩石孔隙含水量的增加而增大。含水的孔隙岩石具有较高的比热值，这是由于水的比热 [15°C 时为 $1\text{cal}/(\text{g}\cdot^{\circ}\text{C})$ 或 $4.184 \text{ J}/(\text{g}\cdot^{\circ}\text{C})$] 比岩石固体基质的比热高得多的缘故。

4. 岩石的热容量 $c\rho$

岩石的热容量定义为岩石的比热和密度的乘积，故又称为容积比热。它表示单位体积的岩石当温度升高(或降低) 1°C 时所吸收(或放出)的热量，其单位为 $\text{J}/(\text{cm}^3\cdot^{\circ}\text{C})$ 或 $\text{cal}/(\text{cm}^3\cdot^{\circ}\text{C})$ 。岩石的容积比热变化也不大，约波动于 $1.67\text{—}2.09 \text{ J}/(\text{cm}^3\cdot^{\circ}\text{C})$ 或 $0.4\text{—}0.5 \text{ cal}/(\text{cm}^3\cdot^{\circ}\text{C})$ 之间。

5. 岩石的放射性生热率 A

岩石的放射性生热率 A 可定义为单位重量岩石中所含的放射性元素，在单位时间内由衰变所释放的能量(或热量)，单位为 $10^{-14}\text{J}/(\text{g}\cdot\text{s})$ 或 $\text{J}/(\text{g}\cdot\text{a})$ 。

岩石中所含的天然放射性元素虽然很多，但只有铀、钍、钾三项元素与地球内部热源有关。因为它们具有足够的丰度，放射性生热量大，且其半衰期与地球的年龄相当。上述三项元素的半衰期、衰变常数和生热率见表 2.1。

放射性元素 U ， Th ， ^{40}K 在地球分异演化过程中集中于地壳及上地幔顶部，以大陆地壳上部的酸性岩浆岩如花岗岩中最为富集，而基性岩如玄武岩或超基性岩如橄榄岩、榴辉岩中含量最低(中国科学院地质研究所地热室，1981)。

表 2.1 U, Th, ⁴⁰K 的半衰期、衰变常数及生热率

放射性元素	半衰期 10 ² Ma	衰变常数 (a ⁻¹)	存在比(%)	放射性生热率	
				J/(g·a)	J/(g·s)
²³⁸ U	45.0	1.54×10 ⁻¹⁰	99.27	2.97	9.41×10 ⁻⁹
²³⁵ U	7.1	9.72×10 ⁻¹⁰	0.72	18.00	56.90×10 ⁻⁹
²³² Th	139.0	4.99×10 ⁻¹¹	100	0.84	2.64×10 ⁻⁹
⁴⁰ K	118.0	5.85×10 ⁻¹¹	0.0119		
	14.7	4.72×10 ⁻¹⁰			
	13.1			0.92	2.93×10 ⁻⁹
普通钾				113×10 ⁻⁶	3.60×10 ⁻¹²
普通铀				3.05	9.62×10 ⁻⁹

在岩石热物理性质测试中,最复杂和最困难的是岩石热导率的测试,这也是本书的重点。岩石热扩散率的测试方法也是十分浩繁的,其内容足以够成一部专著。我们通常的做法是:通过直接测定热导率 K , 比热 c 和密度 ρ , 应用式 2.2 计算岩石的热扩散率 α , 即热扩散率的间接测定法。受本书性质和篇幅所限,对热扩散率的直接测量法就不叙述了。

在讨论岩石热导率之前,先简略介绍岩石的比热、密度和放射性生热率的测定方法和装置。

第二节 岩石比热的测定方法

就原理而论,目前国内外测试岩石比热的方法有量热法、冷却加热法和绝热量热法等多种,现介绍几种常见的测定岩石比热的方法。

一、量热法

1. 方法原理

温度较周围介质为高的岩石样品,由于热量向周围介质的扩散,岩石将会冷却,介质的温度将会增高,最终达到温度平衡。在保温条件较好的情况下,岩石所放出的热量与介质吸收的热量应大致相等。若介质的比热为已知,则可测定岩石的比热。

在变化不太大的温度范围内,物体由于其温度变化而吸收或放出的热量 Q , 与其末温 T_B 和初温 T_A 之间的差值成正比,即

$$Q = c\rho(T_B - T_A) \quad (2.4)$$

根据以上原理,采用水为已知比热的介质,将所测岩样加热后迅速放入一定体积的水中,根据水温的升高值,求出岩样所放出的热量,然后用下列公式计算所测岩石的比热

$$c = \frac{M_w c_w + M_0 c_0 + M_t c_t}{M} (T_B - T_A) \quad (2.5)$$

式中, c 为岩石的比热, J/(g·°C); c_w 为水的比热, $c_w = 1\text{cal}/(\text{g}\cdot^\circ\text{C}) = 4.184\text{J}/(\text{g}\cdot^\circ\text{C})$; c_0 为量热筒的比热, J/(g·°C); c_t 为水银温度计头的比热, J/(g·°C); T_A 为水的初始温度, °C; T_r 为岩样的加热温度, °C; T_B 为加热岩样和水混合后趋于平衡的

温度, $^{\circ}\text{C}$; M , M_w , M_0 , M_t 分别为岩石、水、量热筒和温度计头的重量, g 。

2. 实验设备

整套实验设备由岩石加热筒、量热筒、千分之一精密天平和二支精度为 0.1°C 的温度计组成(图 2.1)。岩石加热筒为一个带排气孔和加盖的双层保温筒,内装岩石加热管和一

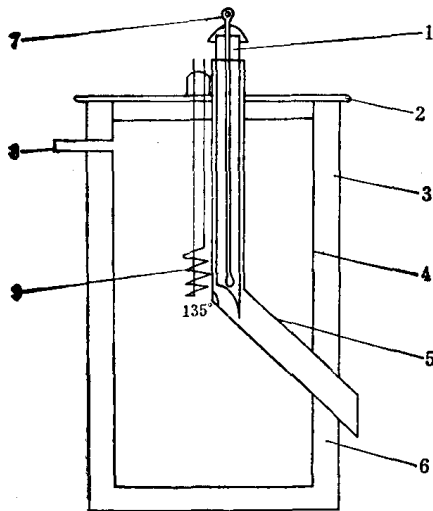


图 2.1 测量比热用的岩石加热筒示意图
1. 挡板 2. 加热筒上盖 3. 保温筒外壁 4. 保温筒内壁 5. 岩石加热管 6. 保温石棉粉 7. 温度计 8. 排气孔 9. 加热器

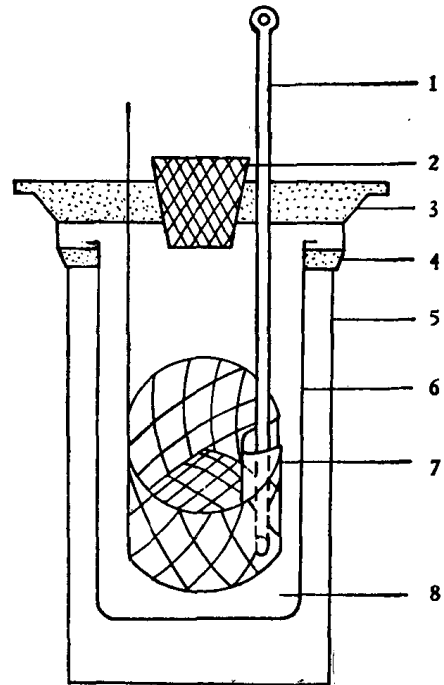


图 2.2 量热筒剖面图
1. 温度计 2. 装样孔塞 3. 密封盖 4. 橡皮环 5. 外筒 6. 内筒 7. 铝制搅拌网 8. 水

个 1000 W 的加热器,岩石加热管内有一个挡板。量热筒由铝制的相对独立的内筒和外筒构成,内筒内放一个铝制的、可以上下搅拌的网;外筒上面有一个带三个孔的密封盖。外筒只起保温作用,而内筒和网的重量和比热应参与计算(图 2.2)。

3. 操作步骤

(1) 将岩石粉碎成直径约 0.5 cm 左右的碎块,除去粉末后取 100 g 左右,倒入岩石加热管中。在倒入一半时插入温度计,然后将剩余的岩石碎块小心地倒入岩石加热管中;
(2) 将岩石加热管上端密封后开始加热;(3) 用天平称出量热筒之重量 M_0 ;(4) 当岩石加热管中的温度约为 95°C 左右时,向量热筒加入冷水,并称出量热筒加水的总重量,通过计算得出水的重量 M_w ;(5) 当岩石加热到 $96-98^{\circ}\text{C}$ 时,同时读出量热筒中水的温度 T_A 和加热管中岩石的温度 T_i ;(6) 将加热的岩石迅速倒入量热筒内的网中,务必注意不使水溅出;(7) 将内量热筒放在外量热筒内,封好盖,插好温度计,然后用网将岩石与水上下搅拌,待混合均匀后读出终温 T_B ;(8) 将量热筒、水和岩石一起称重,并经过计算后得出岩石的重量 M ;(9) 按公式 2.5 计算岩石的比热;(10) 将岩石样品烘干后再

重复测量 2—3 次, 然后计算平均值及均方差, 将所有测试结果和记录列入类似表 2.2 和表 2.3 的格式中。

表 2.2 岩石比热测量记录表

项 目	量 筒	水	岩 石
重 量	M_0	M_W	M
初 温		T_A	T_r
终 温		T_B	T_B
温 差		$T_B - T_A$	$T_r - T_B$
比 热	c_0	c_W	c
热 容 量	$M_0 c_0$	$M_W c_W$	Mc

表 2.3 岩石比热测定结果表

岩样编号	岩石名称	岩 石 比 热 [J/(g·°C)]				均方差(%)
		第 一 次	第 二 次	第 三 次	平 均 值	

二、简易电加热法

电加热测量岩石比热的方法主要基于热损相消的原理。电加热法简易卡计¹⁾测定比热的物理模型见图 2.3。

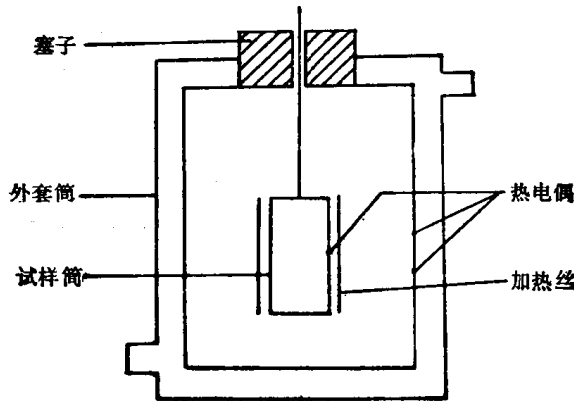


图 2.3 测量比热的简易卡计示意图

据陈则韶等, 1984

试样筒的壁面焊有铜-康铜热电偶, 壁间夹层绕有电加热丝, 外套筒夹层内流过循环水, 由恒温水浴保持在某一恒定温度 T_0 。装有待测样品的试样筒吊在套筒内, 在通电加热前, 其温度被调节到比 T_0 约低 2°C 左右, 记作 T_1 。随即通电加热, 在测试的前半段, 即

1) 陈则韶等, 1984, 一种可以精确测定固体和液体真比热的电加热法简易卡计。