

〔苏〕 Г. А. 切列缅斯基著

实用地热学

地 质 出 版 社

实 用 地 热 学

〔苏〕 Г.А.切列缅斯基 著

赵 羿 陈 明 译

吴 昌 华 校

地 质 出 版 社

本书论述了地热学研究的任务、理论基础和方法,探讨了地热学方法在地质学、水文地质学、冻土学及采矿、钻探等方面的应用,扼要地叙述了地热学的历史。运用地热学解决实际问题本书的重点。

本书供地球物理、地质、水文地质、建筑工程、矿山等专业的工程技术人员用,也可以供大专院校相应专业的师生及研究生参考。

Г. А. Челоменский
ПРИКЛАДНАЯ ГЕОТЕРМИЯ
Издательство "Недра".
Ленинградское отделение, 1977.

实用地热学
〔苏〕 Г. А. 切列缅斯基 著
赵羿 陈明 译
吴昌华 校

地质矿产部书刊编辑室编辑

责任编辑:左全农 戴鸿麟

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: $850 \times 1168^{1/32}$ ·印张: $7\frac{1}{2}$ ·字数: 193,000
1982年11月北京第一版·1982年11月北京第一次印刷

印数: 2,703册·定价1.20元

统一书号: 15038·新816

前 言

在提供给读者的本书中，用解决地质、水文地质、工程地质、采矿、环境保护等方面课题的实例，简述了实用地热学的基础。作者在写《实用地热学》时，由于篇幅所限，面对大量、广泛新的著作及资料，曾经遇到了大家可以想象得到的困难，所以不得不简化图表、参考资料和插图。地热场的调查技术和调查结果的基本整理方法，本书未曾述及，因为这方面的知识在一些教科书〔29, 40, 61, 62, 128〕和专门的工作指南中都提到了。

作者很清楚，并非实用地热学的所有问题都能得到充分的阐述。其中，一些尚需更加深入地专门分析，另一些在现阶段来说研究程度还不足。许多问题已在综合性著作中较详细地论述了〔9, 19, 22, 23, 27, 31, 37, 38, 43, 44, 50, 54, 55, 58, 66, 67, 69, 73, 81—85, 99, 101, 105, 108, 114, 110, 116—118, 134, 144—146, 146, 148, 149, 158, 159, 162, 180, 181, 186, 187〕。所有这些引用的著作，不论是实用地热学理论方面的，还是实用方面的，都用图书引文的形式附在所引用的原理后面。这方面著作的数量在最近一段时间内，其增长是如此之快，以至于要全部加以引用是不可能的。书中基本反映了苏联和国外学者在发展地热学方面的成就。

作者认为有必要向通过个人交谈、答询和书评等形式提出建议及批评意见的 A. K. 阿乌津教授、Φ. A. 马卡连柯、B. M. 马卡西莫夫、H. И. 托尔斯基辛表示深切的谢意，并对 A. Γ. 和 B. Γ. 切列姆斯基兄弟在整理出版手稿中的热忱帮助表示感谢。

目 录

绪 论	1
第一章 实用地热学的物理和地质基础	9
第一节 主要的热源、热流和地热梯度	9
第二节 地热场与地壳的结构构造及放热(吸热)	
热源分布间的关系	25
不均匀的地层	26
层状地层	28
宏观各项异性	31
岩层(地层)的尖灭	35
各种形态的岩层	37
褶皱构造和盐丘	39
第三节 地貌因素对近地表岩层热力场的歪曲	41
剥蚀作用	41
沉积堆积作用	43
新构造运动	45
地表形态	46
第二章 液体(气体)的热自由对流	48
第四节 在岩洞、钻孔和粗粒岩石中的自由对流	48
不同横截面的垂直巷道	48
钻孔	51
岩洞	54
大孔隙岩石	55
第三章 液体(气体)在岩石和钻孔中的运动	59
第五节 垂直渗透	59
弱透水岩层中的非稳定渗透	59

稳定渗透	61
第六节 液体在岩层中的渗透	63
水平岩层	63
倾斜岩层	65
第七节 大气降水的非稳定渗透和在垂直平坦断 裂中热水的运动	66
非稳定渗透	66
热水运动	67
第八节 钻孔中液体（气体）的运动	68
来自开采层的液体的运动	69
来自开采层的液体和气体的运动	72
液体向岩层中的压入	73
冲洗液的循环	75
第九节 钻孔周围介质的温度	77
第十节 因钻探而被破坏的热状态的恢复	84
第十一节 多年冻结岩层中钻孔的温度状态	93
第四章 气候对近地表岩层温度的影响	103
第十二节 均质地层中温度的周期性变化	104
第十三节 日恒温层、年恒温层和永久恒温层	107
第十四节 岩石冻结深度的计算	110
第十五节 冰期的影响	123
第十六节 冻结层热的各向异性	124
第十七节 在多年冻土区根据一个钻孔的地热 图确定年恒温层的埋藏深度	127
第十八节 冻结体的形态和热状态的确定	128
第十九节 人类的生产活动对近地表岩层热状 态的影响	131
第二十节 多年冻土层上机场（跑道）路面温 度的计算	133
第二十一节 建筑物下融化盆地深度的确定	134
第五章 岩石的热力学性质	136

第二十二节	热传导性	138
第二十三节	热容量和温度传导性	153
第六章	温度对地壳和钻孔中的物理化学作用的	
	影响	159
第二十四节	岩石的流变性质	159
第二十五节	岩石的物理性质	161
第二十六节	地下水、泥浆的物理性质, 水的 化学成分, 出油量	164
第二十七节	水泥浆结构的形成, 混凝土的 渗透性	165
第二十八节	钻孔中的水压损失	166
第七章	在实际地质问题和工程问题时的	
	地热学方法	168
第二十九节	红外摄影	169
第三十节	地热测量	172
	陆地上的测量	172
	水域下的测量	177
第三十一节	钻孔法	178
	地质剖面的研究	179
	根据单孔资料确定地下水的渗透速度	180
	层间压力差的确定	183
	层间压力高异常带的预测	184
	层间压力、含气层渗透性和岩石温度传导性的确定	185
	导流层流量的确定	190
	山地工程掌子面即将接近充水带的预测	193
	含气层的确定	193
第三十二节	开采石油时对岩层的人为作用	195
	压水时的岩层温度场	196
	压入水蒸汽时的岩层温度场	198
	燃烧源在岩层内移动时的岩层温度场	199
第三十三节	固体矿床开采的热力学方法	202

第三十四节 热水和热汽在国民经济中的利用	203
第八章 钻孔技术状态的研究和工业废液、废气	
地下贮放的控制	207
第三十五节 管外空间水泥上升高度的确定	209
第三十六节 液体涌入和流失的确定	211
抽水法	213
注水法	216
第三十七节 液体不涌入钻孔时管外运动的确定	219
参考文献	222

绪 论

实用地热学是内容较为丰富的科学——作为行星的地球的热动力学的一个分支。这里所进行的相互作用的研究，是靠地球物理学、地质学、天文学和其它有关地球的科学来完成的。就其研究的方法和技术手段来说，实用地热学和物理学、数学以及一系列其他技术科学是密切相关的。为了解决一系列理论和实际问题，实用地热学系以地球物理的方法研究地壳中天然地热场和人工地热场。

地热场以温度、地热梯度、地热流密度以及热源放热（吸热）的强度及其分布表示其特征。地壳热力场参数的测定是在矿山工程、钻孔、海底和洋底、大气和宇宙里进行的。

地壳及其地表的热力场取决于宇宙和地球内部的热源，取决于地质、水文地质、冰岩地质、地球化学、地理、气象等等因素，此外还取决于地表和地球内部进行的动力作用。由于地热场受这么多因素的控制，就使得解决实用地热学的课题更加复杂化了。

地壳热力场的研究，对于解决和发展地质学、水文地质学、冰岩地质学、工程地质学、火山地质学、土壤学、气象学、动力学、余热供暖和矿山开采领域的理论和实际问题，都是很必要的。地热研究的成果有助于阐明地球热状态及热平衡、深部的地质构造、火山作用、岩石的变质作用、石油天然气和其它矿床形成的本质。无论是整个区域，还是某一个地质构造单元，地热观测对于地质学、冰岩地质学和水文地质学的研究都具有重要的意义。

水文地质中的地热调查，可查明钻孔剖面中的含水层和隔水层综合体、层位和夹层，解决地下水动力学的某些问题，划分出补给区、径流区和排泄区，确定一个岩层变为另一岩层的区

段。Φ. A. 马卡连柯、H. A. 奥基勒维、B. A. 波克罗夫斯基、Л. M. 斯列勃罗多利斯基、H. M. 弗罗洛夫和许多其他调查者〔61, 62, 70, 80, 86—93, 111, 112, 124, 129, 159, 173〕都先后研究过这些课题。

热水和蒸气对破坏作用、成岩作用、变质作用 and 在地壳中进行的其它作用均有较大的影响。深入和全面地研究热水分布及其形成条件，有重要的实际意义和理论意义。通过这种研究，能查明水文地热的一般规律，而认识这种规律，在不同的地质调查时对研究地壳中进行的深部作用，特别是成矿作用、油气田的形成和破坏，碘溴水矿床的形成和破坏以及其它作用都是很必要的。

温度是深部地质作用的因素之一，它决定了岩石的综合性质，油、气的形成条件，岩层中油、气和水的物理化学性质和相的状态，以及油、气、水的迁移和聚集。在普查、勘探和开采石油、天然气、热水和其它矿产时，必须了解热力场在纵横方向上的变化规律。在确定石油的密度和粘度、地下水的运移、气体的溶解度，以及寻求解答其它问题时，也要利用天然的和人工的岩石热力状态方面的资料。

地壳上部的热动态，处于与宇宙空间、地球内部热源以及人类活动的能量相互交换之中。这种能量交换影响着土壤和接近地表的岩石的热力状态，同时也影响着气候。

矿物原料的需要逐年在增长。在今后几十年，将要开采距地表几公里以下的矿体和煤层，而用深井和超深井开采石油、天然气和热水则还要深一些。在这样深的地方，温度对开采技术、开采过程以及对钻井的钻探，均有着极为重要的影响。

地热研究的资料对各种用途的钻孔（控制孔、参数孔、普查孔、勘探孔和开采孔）在其存在的各个阶段都有不小的作用。例如，如果不了解岩石的热力状态，钻探时就不能判断影响钻探技术和速率的冲洗液的流变性质的变化。钻探结束后，就要立即测量钻孔的温度，以便获得地质剖面的热力特征，划分地质剖面，分出矿体和含水层，确定层间水的渗透速度，对比钻孔剖面，计

算地热梯度、热流密度以及解决其它有关问题。

在准备往套管外空间灌浆时,为了选择灌浆止水用的水泥,必须先了解钻孔的热力状态,因为温度影响水泥浆的力学性质和固结点。灌浆以后,热力学调查还能检查止水 and 维修工作的质量,确定套管外水泥上升的高度,液体(气体)在套管外运移的地点以及流向孔内的位置。有了钻孔热力状态方面的资料,就能正确选用取土器、穿孔器和井下爆炸器用的炸药,以及确定矿床的开采条件。

当设计深部开采场和地下矿山工程时,必须有岩石的热力学资料,深部的放热(吸热)和温度的资料。没有这些资料,就不能最经济、最有效地选择调节矿山工程热状态的设备。在北方的巷道和矿场里,为了防止巷道周围的岩石冻坏,必须使巷道通风,以保持有固定的数据。为此,预测热状态是极其重要的。露天开采矿床、热力法抽取石油、热力破坏岩石、岩石的解冻和冻结以及地下工业设施和城市经济设施,都需要有岩石热力学性质方面的资料。

了解地壳的热状态和岩石的热力学性质,有助于及时掌握和圈定矿场与巷道失火的范围,并能查明其原因。

把地热作为一种新的能源予以开发,目前已渐渐成为非常重要的实际课题。为此,必须更加深入地研究地热的成因和分布。地热状态的区域制图是部分解决这个问题和其它类似问题的一种手段。这种图件有可能查明国民经济所需要的热储量,解决钻探、山地工程和开采工作的技术及工艺问题。

与工业建设、民用建筑、矿床开采、农业开发有关的苏联广大冻土地区的地热状态的研究,也是实用地热学中非常重要的一个问题。

全面地从理论和实践上研究地壳热状态的规律性,深入探讨岩石热力学性质及热力场参数确定的方法和技术,同样是摆在实用地热学面前的任务。

实用地热学有其自身的历史,它在某种程度上反映在 Г. К.

安东年柯、М. Ф. 别梁柯夫、К. Ф. 波各罗季茨基、В. И. 弗洛达夫茨、В. Н. 达赫诺夫、И. Д. 杰尔杜诺夫、Д. И. 季亚科诺夫、С. А. 克拉斯科夫斯基、Ф. А. 马卡连柯、Н. М. 弗罗洛夫、Б. Ф. 马夫里茨基、Б. Г. 波利亚克、Я. Б. 斯米尔诺夫、Г. А. 切列姆斯基以及许多其它研究者的著作里。包括实用地热学在内的地热学的最完整历史，载于书末文献〔146〕中。

地热研究历史不但与地热的利用密切有关，而且与水文地质、地球物理、普查、勘探以及矿床开采等的发展紧密相连。溢出地表的热水早在青铜器时代就应用于生活和医疗目的。但地热场作为科学研究的对象则是在本世纪初才开始的，经历了2000余年的历程，实用地热学的发展比起更年轻的科学（重力学、地震学等）还要缓慢。

1731年，С. П. 克拉谢尼恩尼科夫首次测量了堪察加泉水温度。1733—1743年，И. Г. 格麦利恩在西伯利亚第一次对多年冻土层进行了地热调查。关于多年冻土的存在早已尽人皆知，因为北方当地居民夏天建造房舍时，在裸露的河岸上都曾遇到过这种岩石，并且为了保存食物还利用它作为天然的“冰箱”。由于要探寻从欧洲通往中国和印度的北部海路，在十六世纪的文献中，首次出现了考察多年冻土层的资料。1757年，М. В. 罗蒙诺索夫从理论上解释了多年冻土岩石的产生，并于1763年在《论地层》一书中特别提到了地热对地质作用的重大影响。

П. С. 帕尔拉斯于1768年根据伏尔加河流域石油源温度测量的成果，确定了地热同岩石成分的关系，并因此而首次证明：根据温度（热谱图）划分地质剖面是可行的。

随着俄国资本主义的发展，地下热水开始得到了更广泛的实际利用。于十八世纪出现了热水应用于医疗的第一个疗养区。

十九世纪的后半叶，开始普遍测定俄国境内钻孔的地热度。Н. А. 柳比莫维在莫斯科，Г. П. 格利麦尔先在彼得堡和雅库茨克，А. К. 维利别尔格和Г. Д. 罗马诺维在爱波尔斯克分别进行了此项工作。1880年Л. 鲍尔采维奇于黑海阿普歇隆半岛对石油

钻孔进行了首次地热调查。

1898年美国地质学家 H. 道尔顿编制了第一张美国达科塔州自流盆地等温图，从而标志着区域水文地热力学的诞生。

Л. А. 亚切夫斯基对地力学的发展有较大的贡献。他在 1893—1914年期间调查了西伯利亚、乌拉尔、顿巴斯和高加索的矿井、巷道和钻孔的温度，并深入研究了钻孔调查的理论、方法和技术；同 Ф. Н. 切尔纳谢维一起加入了国际地力学会，搜集了国外温度观测资料，发表了许多实用地力学方面的著作。根据 Л. А. 亚切夫斯基的提议，1910年组织了隶属于俄国地理协会的常设地力学委员会。

同一时期（1906年），Л. В. 戈卢比亚特尼科夫对阿普歇隆半岛的大量钻孔进行了温度调查。他曾证明，地力学方法在解决最重要的石油工业和地质问题方面是行之有效的。其中，Л. В. 戈卢比亚特尼科夫采用地力学方法，测定液体流向钻孔的位置、划分含油层和研究油田水的成因；他并正确地解释了石油里的天然气体致冷的作用。目前，这种方法已被苏联和国外广泛地采用。

在俄国和其它国家的许多石油天然气地区和煤盆地，深部温度和地温梯度有较高的异常显示。对此，А. Л. 斯托普涅维奇、Y. 克尼斯克别尔格、G. 格费尔提出了普查找矿可以采用地力学方法。А. Н. 奥基利维奇于1906年首次采用地力学方法普查和勘探了矿水。

伟大的十月社会主义革命之后，由于地质勘探工作范围的扩大及矿山工业的发展，地温调查开始广泛地用来解决各种有关问题，从而促使成立了隶属于地质总局的、以后转成中央科学调查地质勘探研究所的地温处和隶属于苏联科学院的地温协会，同时还成立了研究多年冻土层的协会，后来变成研究所。在这一时期，苏联科学院所属的研究所，以及有关的地质和水文地质生产单位都进行了广泛的地温调查。

石油天然气地区钻井的地温研究是由石油地质勘探学院开始的，现在由地质和地球物理托拉斯、科学研究所和大专院校继续

进行。И. М. 古勃金(1932年)关于温度影响石油形成的著作,及В. И. 维尔纳茨基关于地球内热在地质作用中的意义的著作,使得钻井研究的地热学方法得以巩固下来。

1935—1937年间,П. Ф. 罗季奥罗夫和Н. И. 索夫罗诺夫在乌拉尔地区进行了野外地热调查,使得硫化矿的理论基础和普查方法更加臻于完善。

1939年,Л. 布拉德与А. 本费尔德在南非和英吉利首次完成了地热流密度的测定。1947—1948年,首次对太平洋底岩石的温度进行了测量。1950年,Р. 诺维厄和А. 马克斯韦尔计算了洋底的热流密度值。随着这些成果的出现,开始了对太平洋和大西洋底以及海、湖底的地热流进行系统的大规模的测量,对大陆和岛屿地热流也开始了系统的大规模的测量。

二十世纪的上半叶,苏联及国外均发表了许多探讨实用地热学的理论基础、地热调查的方法与技术,以及解决不同问题时资料解释等方面的著作。В. Н. 达赫诺夫、Д. И. 季亚科诺夫和С. Г. 科马罗夫的著作对地热法调查钻孔的发展和广泛采用,以及对工程-地球物理的出现都有重大的影响。

Ф. А. 马卡连柯根据高加索矿水区北部的下白垩统顶板温度资料,编制了1941年的等温线图,证实了地热场同大地构造的联系,并使其可能揭示出热水的泄流地段。Ф. А. 马卡连柯还曾采用过独创的方法,测定由埋藏在年恒温层深度上的热水溢出所引起热异常。正因为他提出了“地下热水圈”这一重大科学问题,从此地热调查才开始有了明确的目的和范围。六十年代,苏联科学院地质研究所在科学指导Ф. А. 马卡连柯的领导下,编制了苏联境内基底顶板温度图。随后,对各个地区和全国分别编制出了温度图、地热梯度图和热流密度图。

П. Ф. 什维采夫工作的特点是在研究冰岩地质、水文地质、星际地质和石油天然气问题时,广泛地利用了地热资料。

1948—1968年间出版的Г. М. 苏哈列夫的著作,是多年系统调查捷尔斯克—达格斯坦省的总结。Г. М. 苏哈列夫为了解决石油

工业的水文地质问题，卓有成效地利用了地热的综合资料。

1953—1955年，H. И. 托尔斯季欣的著作第一次极为明确地提出，潜水和自流水的形成条件取决于气候分带。H. M. 弗罗洛夫在其文章中讨论了太阳辐射对地热状态的影响及水文地质学问题，进一步发展了H. И. 托尔斯季欣的思想。

1964年，Л. З. 波津详尽地叙述了理论基础并描述了微分测温法所用的仪器设备。他用具体的例子令人信服地证实了在解决采矿地质问题和油气田开采控制时采用微分温度计的优点。

1965年出版了Э. Б. 切卡柳克关于油层热动力学的著作，书中探讨了孔隙介质的热现象、油气层中温度场和压力场的相互联系、生产钻井的温度状态及地壳中的热流，并规定了钻井调查和油气田开采时为了得出规律而实际采用的方法。

1966—1968年，Я. Б. 斯米尔诺夫的一系列著作问世。书中探讨了地球热能的研究，讨论了热力场同大陆、地壳及上地幔构造的关系。

七十年代初期，Э. Б. 切卡柳克、И. М. 费多尔采夫、B. Г. 奥萨德奇深入研究了地热测量的理论、方法和技术。

随着地热调查规模的扩大和测量地热状态技术的完善，苏联和国外愈来愈注意通过钻井确定符合于该区实际利用的、稳定地热状态温度的方法〔29, 54, 55, 65, 89, 141, 144〕。已出版的有各个地区的和全国的地热状态的综合报告，以及热敏温度计结构方面的文章〔10, 20, 21, 37, 86, 91, 94, 126, 128, 145, 146, 149, 164〕。

为按远景规划组织工作，先前成立的苏联科学院地质科学分院的水文地质和地热委员会（1954—1964年），在解决各种地热问题时起了不小的作用。这个委员会于1964年改为隶属于苏联科学院地球科学分院的地热调查科学委员会，A. H. 季霍诺夫院士任主席（Ф. А. 马卡连柯任副主席）。

苏联境内地壳的地质、地球物理和水文地质调查以及深部的控制钻、普查钻和勘探钻孔，有助于许多地区和国家积累地热资料。因此，系统地整理地热资料，协调理论和实用地热学方面的

研究，认识地球热的历史和状态，解决与成矿作用有关的热液作用的问题，解答与热水、石油、煤和其它矿床有关的成因问题，以及解决地热实际应用方面的问题等，都十分必要。

为了有计划地发展和协调地热调查，根据苏联科学院的建议，召开了全苏地热调查和地热利用大会。这次会议促进了地热研究的发展，推动了许多综合性著作的问世[144—146, 148, 419]，在国际地热会议和国际地球物理年会上引起了极大的注意。所有这一切都有助于实用地热学的各个分支系统地、有计划地高速发展。

第一章

实用地热学的物理和地质基础

地壳的热力场是由放热和吸热热源的强度和分布、地层的热力学性质及其变化规律、以及地表的温度决定的。热源的强度及分布影响着地壳中发生的构造变动、火山作用和地质年代范围内的其它变幻无常的作用。因此，阐明地壳和上地幔地热场，在揭示地球的这些作用和热平衡机制方面具有重要的意义。

第一节 主要的热源、热流和地热梯度

地壳和地球的热力场，总的来说，系来源于内部的（行星）和外部的（宇宙）作用。放射性元素的衰变、潮汐的摩擦、弹性应力的松弛、重力分异、结晶作用和多形转化、电子层的重新排列、相转换、化学反应，都属于放热的内部作用。在内部作用中链锁反应是不存在的，因为地球深部的密度和压力低于保证进行这种反应的临界值。宇宙辐射（太阳辐射，太阳、星体及银河系的微粒辐射和其它辐射）属于外部热源。

为了确定地球的热状态，最重要的是要掌握地球深部各种作用所释放出来的热能的标准数值，以及地球丧失能量的多少。大多数人认为：地壳和地幔层所含放射性元素的衰变，是整个内部热源的最主要来源[31、71、75、83、139、150]。这些放射性元素的含量和分布，系根据测量处在地壳最上部的岩石和陨石的资料，以及根据计算地球内部所释放出来的热量来估计的。

根据行星中发散的总热量的计算和许多研究者的实验资料，地球深部放射性元素的含量随深度的增加而减少。有关放射性元