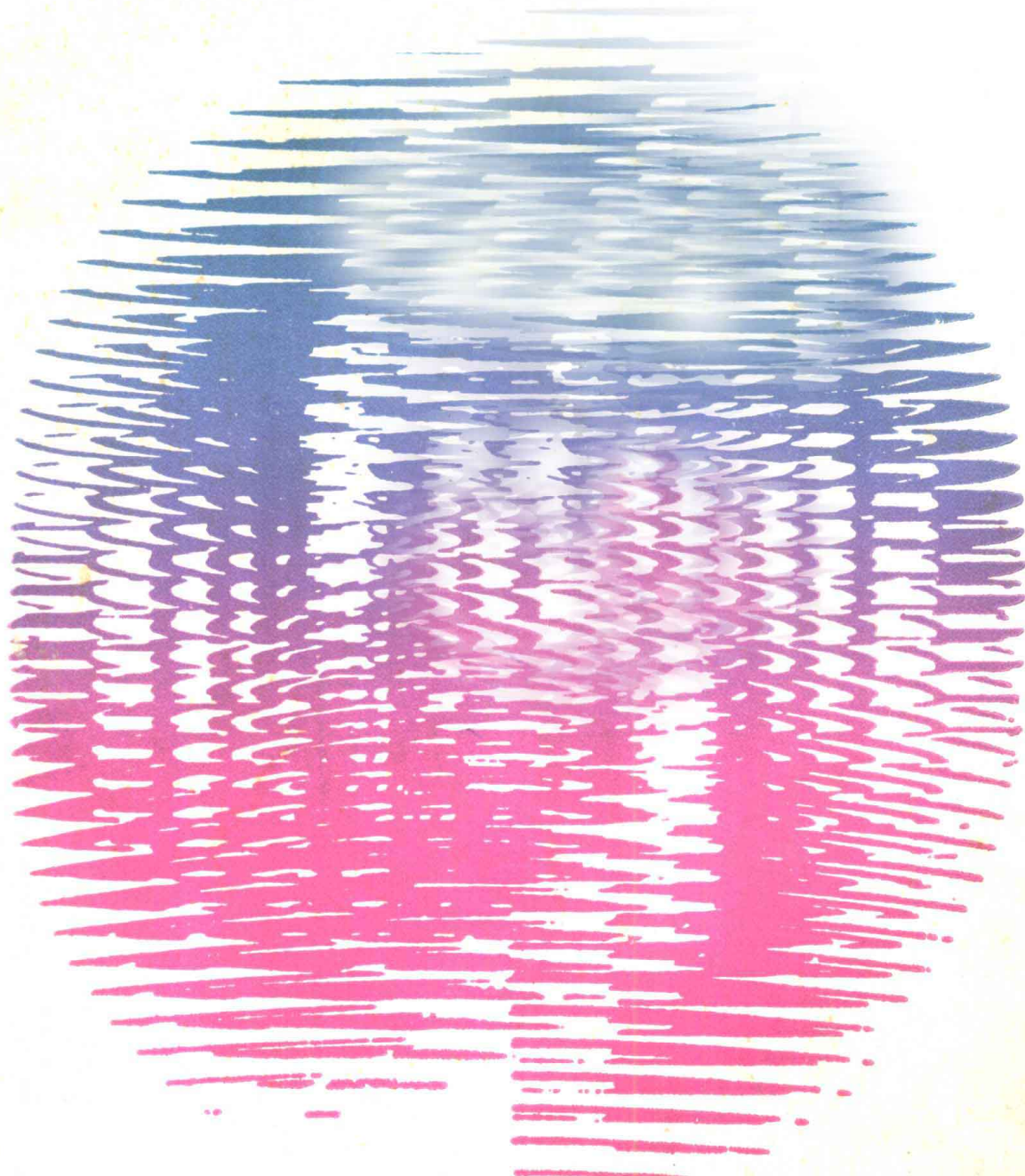


932779

岩石热物理学及其 工程应用

林睦曾 编著



重庆大学出版社

岩石热物理学及其工程应用

林睦曾 编著

重庆大学出版社

内 容 简 介

本书全面、系统地论述了岩石热物理学的基础理论、研究方法及其在岩土工程中的实际应用。全书共分七章，主要论述岩石的热物理性质；岩石热传导的基本理论和基本解法；岩石的热弹性性质；岩土工程中的热应力及岩石热破坏理论；各种岩土工程在周围介质作用下的温度分布及热量传递规律；岩体及地下巷道内流体流动的热力学；流体动力学、热对流的基本理论；超音速火焰射流、激光、电磁波、等离子体等几种热力破岩的理论和方法。

本书可作为高等院校岩土结构工程、矿山工程物理、矿山工程力学及地球物理、采矿、环保等专业的本科生、研究生的教科书或参考书，也可供从事岩石热物理学、地热学、地球物理学、岩土工程学以及其他有关工程研究和应用的科技人员参考。

岩石热物理学及其工程应用

林睦曾 编著

责任编辑 饶邦华

重庆大学出版社出版发行

新华书店经销

重庆印制第一厂印刷



开本：787×1092 1/16 印张：16 字数：399 千

1991年 7 月第 1 版 1991年 7 月第 1 次印刷

印数：1—1500

标准书号： ISBN 7-5624-0362-7 定价：4.20元
P.13

序 言

岩石热物理学的形成虽然已有数十年的历史，但是到目前为止，还没有发现在这方面有一本较为系统、全面地阐述其理论的书。随着矿产资源开采深度的加深以及非金属材料工程、岩土工程等的发展，岩石热物理学的发展和在我国具有广阔前景。作者在十多年前就开始从事这方面的教学和研究工作，为此也编写过一些讲义，但都缺乏系统性。教学实践表明，一本正规的教科书对学生的学习是极其重要的。此外，系统地汇总这方面的研究成果，对发展岩石热物理学也具有重要作用。因此，几年前作者就想汇集国内外现有的资料和本人的研究成果，希望出版一本这方面的书，有幸，重庆大学出版社承担了这项出版任务，使我的上述愿望得以实现。在此特向出版社的诸位编辑致以衷心的感谢。由于岩石热物理学目前还处在发展中，书中存在错误或不完善在所难免。作者期待着各位学者、同仁共同努力，为发展我国的岩石热物理学而携手前进。

林睦曾

1990年5月

7-A16/12

绪 论

岩石热物理学是一门新兴学科。它是研究岩石的热物理性质，温度、热量在岩石和岩体工程中的传导，岩石受热或受冷后的物理力学特性变化等规律的科学。它的产生和发展离不开人类的实践活动。在很早以前人类就已应用岩石热物理学的知识，解决一些实际问题，但真正形成理论，广泛应用岩石热物理学理论解决生产实践中的问题还是近二、三十年来的事。就学科领域而言，岩石热物理学与物理学、地质学、岩石力学、传热学、热力学、流体动力学、弹塑性力学等学科密切相关；就其应用而言，岩石热物理学对于解决和发展岩土工程学、材料学、土壤学、地热学、气象学、采矿学等工程技术领域的理论和实际问题都具有极其重要的作用。

岩土工程是岩石热物理学应用最重要的领域。热应力和热变形影响着岩土工程的稳定，地下硐室和地下巷道内的热状态与岩石的热物理性质及气流流动、热对流的规律等有密切关系；岩石的放热和温度传导方面的参数，对最经济、最有效地选择调节地下热环境的方法和设备都是极其重要的。此外，掌握地下岩体的热状态和岩石的热物理力学性质有助于掌握地下火灾和煤自然发火区的特征、气流变化状态及火灾范围。核废料地下贮存的理论研究已成为岩石力学的重要课题。

在寻求和开发新的能源工作中，岩石热物理学将起重要作用。如地热的开发，太阳能、地面余热、核废料余热等的地下贮存等都需利用岩石热物理学的理论。

岩石作为一种材料已广泛应用于建筑、化工、国防等工业部门。岩石是一种脆性材料。对脆性材料的热破坏理论的研究，虽然已有近百年的历史，但到目前为止，仍有许多复杂的理论和实际问题未能解决。尽管如此，岩石的热破坏技术已成为新技术的一个分支，在岩石破碎和井巷掘进等方面，今后有广阔的发展前景。不仅如此，热破坏的各种方法应用于工业废物的处理以及材料的破碎等将是今后最感兴趣的研究课题之一。

矿床的深部开采温度可达 50°C 以上。在深井和超深井开采石油、天然气和地热时，岩石温度可高达几百度，这种高温岩石对开采技术和开采过程都有重要影响，特别是对凿井工具有特殊要求。为此，需对深部岩石的热物理性质有较清楚的了解。

在现代科学技术迅猛发展的今天，要求技术工作者善于独立地、创造性地应用各种理论和实验手段去解决一些新问题。因此，本书在阐述岩石热物理学基本理论的同时，对其在工程中的一些应用也给予了充分重视，并在每一章后面都附有习题，以达到培养学生综合分析和解决问题的能力。还要特别说明的是本书题为岩石热物理学，实际上除岩石外，还包含了土壤、混凝土等的热物理学问题。因为土壤是岩石风化后的产物，而混凝土则是人造岩石。

岩石热物理学在若干国家已得到了较大的发展，有关岩石热物理学的国际学术交流会已

召开了四届。我国在这方面也开展了一些研究。但总的来说，岩石热物理学目前还处在发展中，许多理论和实践问题尚待解决。随着经济和科学技术的发展，可以期待，岩石热物理学今后会得到更大的发展和更广泛的应用。

目 录

绪论	(1)
第 1 章 岩石热物理性质	(1)
§ 1.1 岩石的导热系数	(1)
§ 1.2 岩石的比热	(9)
§ 1.3 岩石的导温系数	(11)
§ 1.4 岩石与流体的热交换系数	(15)
§ 1.5 岩石在冰点下的导热性	(16)
§ 1.6 土的热学性质	(18)
习题	(20)
第 2 章 岩石热传导基本理论	(22)
§ 2.1 温度场及岩体中的温度场	(22)
§ 2.2 岩体中的热量传递	(25)
§ 2.3 岩体的热传导微分方程	(31)
§ 2.4 热传导的边值条件	(34)
§ 2.5 热源	(38)
§ 2.6 岩体中热量传递的计算方法	(40)
习题	(42)
第 3 章 岩石热传导的基本解法	(44)
§ 3.1 热传导微分方程的分离变量求解法	(44)
§ 3.2 热传导微分方程的积分变换求解法	(46)
§ 3.3 热传导的差分解法	(48)
§ 3.4 热传导的松弛解法	(52)
习题	(56)
第 4 章 岩体及地下工程中的热传导	(57)
§ 4.1 岩体工程中的稳定热传导	(57)
§ 4.2 有限厚度的无限宽岩石平板内部无热源非稳定热传导	(62)
§ 4.3 无热源圆柱形岩石构筑物内部非稳定热传导	(81)
§ 4.4 球形岩体构筑物内的温度分布	(88)
§ 4.5 地壳浅部温度分布	(93)
§ 4.6 地下巷道岩体内的温度分布	(101)
§ 4.7 岩土工程中冻结施工法的温度场	(103)
§ 4.8 岩土层的冻结与融解	(108)
§ 4.9 地热井内外的温度分布	(111)
§ 4.10 地下及岩土工程中有热源作用的热传导	(114)
习题	(125)
第 5 章 岩石热弹性性质及热应力	(128)

§ 5.1	岩石加热后的强度特性	(128)
§ 5.2	岩石加热后弹性模量的变化	(133)
§ 5.3	岩石的线膨胀系数	(138)
§ 5.4	岩石在冰点下的强度特性	(140)
§ 5.5	岩体工程内的热应力与热疲劳	(142)
§ 5.6	无限大矩形水坝内部的热应力	(148)
§ 5.7	圆柱形岩体构筑物内的热应力	(153)
§ 5.8	球形岩体构筑物内的热应力	(158)
§ 5.9	热力破岩的热冲击应力	(161)
§ 5.10	脆性材料的热破坏理论	(169)
	习题	(173)
第 6 章	岩体工程中的热力学及流体动力学基础	(174)
§ 6.1	热力学系统参数	(174)
§ 6.2	热力学基础	(177)
§ 6.3	岩土工程体系中的能量变换	(189)
§ 6.4	地下巷道内气体的一维流动	(194)
§ 6.5	沿变截面巷道的气体的一维流动	(196)
§ 6.6	反压力对喷管与拉伐尔管中一维流动的影响	(201)
§ 6.7	粘性流的重要参数	(203)
§ 6.8	层流边界层的动量方程与能量方程	(207)
§ 6.9	地下巷道内流体流动换热	(209)
§ 6.10	高速气体流动中的换热	(213)
	习题	(215)
第 7 章	热力破岩方法	(217)
§ 7.1	高温下岩石弹模与热破坏性的关系	(217)
§ 7.2	超音速火焰射流破岩方法	(219)
§ 7.3	电磁波破岩方法	(224)
§ 7.4	激光破岩方法	(229)
§ 7.5	等离子体射流钻孔与破岩	(233)
	习题	(237)
附录 I	二阶齐次线性微分方程的解	(239)
附录 II	拉氏变换的逆变换表	(239)
附录 III	正交函数	(240)
附录 IV	高斯误差函数	(241)
附录 V	贝塞尔函数	(242)
	参考文献	(244)

第1章 岩石热物理性质

岩石的热物理性质包括岩石的导热系数、岩石的比热、岩石的导温系数、岩石的线膨胀系数和岩石的热交换系数等。这些参数对岩体及地下工程中温度场的形成、温度场的特征、热量的传递、热应力的计算以及热破坏等都是非常重要的。一般而言，岩石的热参数也不是恒定的，除和温度有关外，它还受岩石的结构、组成、形成过程、温度等许多因素的影响，这是一个非常复杂的问题。因此，这里将主要研究一些常见岩石介质热物理性质的变化规律和目前在现场及实验室里所能得到的岩石热参数的实验资料。

§1.1 岩石的导热系数

在地壳最上部所有岩层中，热交换的主要形式是直接通过岩石的一些电子和分子将热传递给另一些岩石电子和分子。岩石这种传递电子和分子运动热能的性质就是岩石的导热性。岩石的导热性用导热系数 λ 来表示。如一岩石平板两侧存在着温度差，则根据热力学第一定律，能量应该由高温区向低温区转移，这种转移是以热传导的方式传递的。若岩石平板的表面积为 S ，厚度为 L ，其一侧温度为 t_1 K，另一侧温度为 t_2 K (见图1.1)。根据实验证明，通过岩石平板的热量 Q 与面积 S 、温度差 $(t_1 - t_2)$ 及传热所进行的时间 τ 成正比，而与壁厚 L 成反比，即

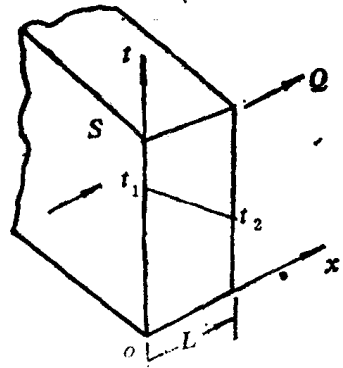


图1.1 岩石平板中的热传导

$$Q = \lambda \frac{(t_1 - t_2)}{L} S \tau \quad (1.1)$$

式中 Q ——在时间 τ 内流过岩石平板的热量(J)；
 λ ——比例系数，称为导热系数[W/(m·K)]。
如果将(1.1)式改写成：

$$\frac{Q}{S \tau} = \lambda \frac{(t_1 - t_2)}{L}$$

则

$$\lambda = \frac{Q}{S \tau} \frac{L}{(t_1 - t_2)} \quad (1.2)$$

因此，岩石的导热系数在数值上就等于当温度沿单位法线长度下降 1K (或温度梯度为 1K/m) 时单位时间内传过单位面积的热量。由此得出导热系数的国际单位为 W/(m·K)。通常把岩石导热系数的倒数称为岩石的热阻率 ξ ，即 $\xi = \frac{1}{\lambda}$ (m·K/W)。

§ 1.1.1 岩石导热系数的各向异性

组成岩石的颗粒形状、颗粒含量、颗粒排列，岩石的层理、片理、断层等对岩石的导热性有很大影响。因此，热流在岩石的各个方向通过时，其导热性能可能不同，通常把这种导热性能的差异称为岩石导热的各向异性，以导热系数的各向异性系数表示。对层状岩体而言，其导热系数的各向异性系数为平行岩层面的导热系数与垂直岩层面的导热系数之比：

$$A = \frac{\lambda_{\parallel}}{\lambda_{\perp}} \quad (1.3)$$

式中 A ——岩石导热系数的各向异性系数；
 λ_{\parallel} ——平行岩层面(或层理面)的导热系数；
 λ_{\perp} ——垂直岩层面(或层理面)的导热系数。

表1.1为某些岩石导热系数的各向异性系数。

为了求得岩石导热系数的各向异性系数，必须知道平行岩层和垂直岩层方向的导热系数，对层状岩体而言，它是由导热系数不同的多层岩石所组成，如图1.2所示。要求得整个岩层垂直方向的平均导热系数，可采用调和平均方法，即

$$\lambda_{\perp} = \frac{L}{\sum (l_n / \lambda_n)} = \frac{l_1 + l_2 + \dots + l_n}{\frac{l_1}{\lambda_1} + \frac{l_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{l_n}{\lambda_n}} \quad (1.4)$$

式中 λ_{\perp} ——垂直岩层方向的导热系数；
 l_1, l_2, \dots, l_n ——各分层岩层的厚度；
 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ ——各分层岩层的导热系数；
 n ——组成岩体的分层数；
 L ——岩体总厚度。

整个岩层平行方向的平均导热系数 λ_{\parallel} 可用几何平均方法得到(图1.3)，

即
$$\lambda_{\parallel} = \frac{\sum \lambda_n l_n}{L} = \frac{\lambda_1 l_1 + \lambda_2 l_2 + \dots + \lambda_n l_n}{l_1 + l_2 + \dots + l_n} \quad (1.5)$$

表1.1 某些岩石导热系数的各向异性系数

岩石名称	各向异性系数 $A = \lambda_{\parallel} / \lambda_{\perp}$
花岗岩、片麻岩	1.49
大理岩	1.03
石英砂岩	1.04
页岩	2.50
砂岩	1.28

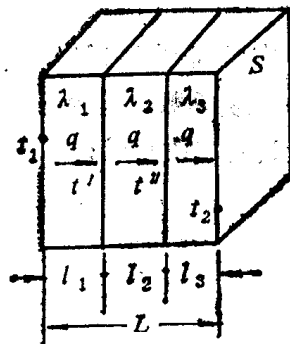


图1.2 垂直岩层面的导热系数

若热流方向与岩层面成 φ 角($\varphi \neq 0$ 和 90°)，则该方向的导热系数为：

$$\lambda_{\varphi} = \sqrt{\lambda_{\parallel}^2 \sin^2 \varphi + \lambda_{\perp}^2 \cos^2 \varphi} \quad (1.6)$$

式中 λ_{φ} —— φ 角方向的导热系数；
 $\lambda_{\perp}, \lambda_{\parallel}$ ——垂直和平行岩层面的导热系数。

对于非层状岩体，由于组成岩石的颗粒形状、含量、颗粒的排列及各组分的导热系数等不同，因此，也将导致岩体导热系数的各向异性。若组成岩石的颗粒为均匀的立方体，其导热系数为 λ_1 ，它定向地分布在导热系数为 λ_2 的岩石胶结物中，则垂直于岩石界面方向的导热系数 λ_{\perp} 为：

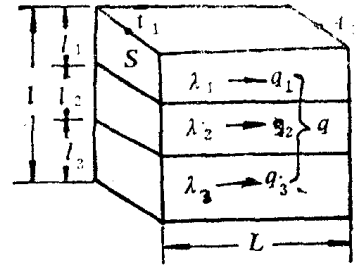


图1.3 平行岩层面的导热系数

$$\lambda_{\perp} = \frac{\eta(1-\eta)(2-\eta)\lambda_1 + [1-\eta(1-\eta)(2-\eta)]\lambda_2}{(1-\eta)\lambda_1 + \eta\lambda_2} \cdot \lambda_1 \quad (1.7)$$

式中 λ_1 ——立方体岩石颗粒的导热系数；
 λ_2 ——岩石胶结物的导热系数；
 η ——岩石中胶结物占总体积的比率；
 $(1-\eta)$ ——岩石中立方体颗粒占总体积的比率。

平行于岩石界面的导热系数 λ_{\parallel} 为：

$$\lambda_{\parallel} = \frac{\eta(1-\eta)\lambda_1 + [1-\eta(1-\sqrt{2}\eta)]\lambda_2}{(1-\eta)\lambda_1 + \sqrt{2}\eta\lambda_2} \cdot \lambda_1 \quad (1.8)$$

当岩石胶结物中的颗粒为延伸旋转椭球体，且定向排列在胶结物中时，则垂直于旋转轴方向的导热系数 λ_{\perp} 为：

$$\lambda_{\perp} = \lambda_1 \cdot \frac{\eta\lambda_1 + (2-\eta)\lambda_2}{(2-\eta)\lambda_1 + \eta\lambda_2} \quad (1.9)$$

平行于旋转轴的导热系数 λ_{\parallel} 为：

$$\lambda_{\parallel} = \eta\lambda_1 + (1-\eta)\lambda_2 \quad (1.10)$$

当岩石颗粒为压扁的片状旋转椭球体，并在胶结物中定向排列时，则垂直于椭球体的导热系数 λ_{\perp} 为：

$$\lambda_{\perp} = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{(1-\eta)\lambda_1 + \eta\lambda_2} \quad (1.11)$$

平行于椭球体的导热系数 λ_{\parallel} 为：

$$\lambda_{\parallel} = \eta\lambda_1 + (1-\eta)\lambda_2 \quad (1.12)$$

当岩石颗粒为球形时，

$$\lambda = \lambda_1 \cdot \frac{-2\eta\lambda_1 + (3+2\eta)\lambda_2}{(3-\eta)\lambda_1 + \eta\lambda_2} \quad (1.13)$$

当岩石为致密岩石，且岩石中的矿物颗粒在胶结物中为不定向排列，则这种岩石的导热系数各向同性。其导热系数可用以下公式计算：

$$\lambda = a\lambda_1 + b\lambda_2 \quad (1.14)$$

式中 a ——岩石中所含矿物的比率； b ——岩石中胶结物的比率；
 λ_1 、 λ_2 ——矿物和胶结物的导热系数。

式(1.14)还可近似应用于求致密混凝土或含有孔隙且被水，石油、天然气等物质完全充填的孔隙状岩石的导热系数。表1.2为某些致密岩石的导热系数。

表1.2 某些致密岩石的导热系数

岩石名称	导热系数[W/(m·k)]	岩石名称	导热系数[W/(m·k)]
凝灰质石英岩	7.62	石灰岩	6.73; 6.81; 7.37
安山玢岩	5.84	白云质灰岩	7.5
辉石岩	6.74; 6.42; 6.91	片麻岩	7.47
白云岩	10.67; 11.99	粗安岩, 正长斑岩	5.31; 5.74
花岗闪长岩	6.60	玄武岩	4.62
大理岩	7.91	细砂岩	5.91
斑状花岗岩	6.59	粗安岩	5.43
白云岩	11.99; 12.27; 10.98	凝灰岩	5.03

§ 1.1.2 岩石导热系数的影响因素

岩石导热系数与岩石密度 一般而言, 岩石导热系数随岩石密度的增加而增大。在不考虑其它影响因素的情况下, 若岩石是由密度为 ρ_1 和 ρ_2 两种组分组成的, 且一种组分为立方体颗粒, 定向地排列在另一种岩石组分中, 则岩石的导热系数在考虑密度的影响时, 可用下式进行计算:

垂直岩石界面

$$\lambda_{\perp} = \lambda_1 \cdot \frac{m(1-m)(2-m)\lambda_2 + [1-m(1-m)](2-m)\lambda_1}{(1-m)\lambda_1 + m\lambda_2} \quad (1.15)$$

平行岩石界面

$$\lambda_{\parallel} = \lambda_1 \cdot \frac{m(1-m)\lambda_1 + [1-m(1-\sqrt{2m})]\lambda_2}{(1-m)\lambda_1 + \sqrt{2m}\lambda_2} \quad (1.16)$$

式中 λ_1, λ_2 ——岩石中组分1和组分2的导热系数;

m ——密度系数, $m = \frac{\rho - \rho_2}{\rho_1 - \rho_2}$;

ρ, ρ_1, ρ_2 ——分别为岩石、岩石中的组分1和组分2的密度。

由式(1.15)、式(1.16)可以看出, 它们与式(1.7)、式(1.8)类似, 只是以系数 m 代替式(1.7)、式(1.8)中的系数 η , 因此, 只需在前面的导热系数公式里用系数 m 代替 η , 就可得到各种结构岩石在不同密度下的导热系数。根据这些表达式可知, 导热系数随岩石组分密度的增大而增大。这一特性从西德 O·卡普迈耶等对地壳中不同地质年代岩石的密度与导热系数的测定中可以看出。表1.3为其测定结果。

表1.3 不同地质年代岩石的密度和导热系数(温度50℃)

地质年代	测定试件数(个)	岩石密度(g·cm ⁻³)	导热系数[W/(m·k)]
第三系	8	2.48±0.06	2.026±0.791
白垩系	5	2.56±0.06	2.160±0.314
侏罗系	42	2.62±0.09	2.738±0.574
三叠系	23	2.38±0.17	2.780±0.444
二叠系	2	2.56	3.450
石炭系	67	2.68±0.10	3.090±0.854

岩石导热系数与温度 岩石的导热系数与岩石所处的温度有密切关系。金属的导热系数大都随温度的增加而增大，有如下关系：

$$\lambda_t = \lambda_0(1 + ct)$$

式中 λ_0 ——基准温度时的导热系数，通常取0℃；

λ_t ——材料温度为 t ℃时的导热系数；

c ——常数； t ——材料所处的温度(℃)。

岩石导热系数与温度的关系较复杂，根据苏联P. u.库塔斯和B. B.戈尔迪恩科的研究表明，沉积岩和火成岩的导热系数与温度的关系有较大差别。在温度为20~300℃时，粘土岩、砂岩、凝灰岩、石灰岩等沉积岩的导热系数与温度之间大体上按以下经验公式变化：

$$\lambda_t = \lambda_{20} - (\lambda_{20} - 1.38) \left[\exp\left(0.725 \frac{t - 293.15}{t + 403.15}\right) - 1 \right] \quad (1.17)$$

式中 λ_t ——温度为 t ℃时的岩石导热系数；

λ_{20} ——温度为20℃时的岩石导热系数；

t ——岩石的温度。

在温度为20~600℃范围内，花岗岩、正长岩、闪长岩、玄武岩、辉绿岩、辉长岩、橄欖岩、片麻岩等火成岩的导热系数与温度的关系如下：

$$\lambda_t = \lambda_{20} - (\lambda_{20} - 2.01) \left[\exp\left(\frac{t - 293.15}{t + 403.15}\right) - 1 \right] \quad (1.18)$$

1940年伯奇和克拉克对岩石在0~600℃之间的实验发现导热系数与温度有如下关系：

$$\lambda_t = 4.18 \left(\frac{600}{300 + t} + 4 \right) \times 10^{-3} [W/(cm \cdot ^\circ C)] \quad (1.19)$$

苏联米尔科别奇在实验室对火成岩、碳酸盐类及硅质类岩石的导热系数与温度之间的关系也进行了测定，所测岩石试件的成分如表1.4所示。所得结果如图1.4、图1.5、图1.6所示。由图可知，岩石导热系数基本上随温度的增高而下降，其中呈直线下降的有硅岩(NO207)、白云石灰岩(NO187)、普通角闪石闪长岩(NO191)等。但也有少量岩石试件出现最小值，如霞石闪长岩(NO188)、斑岩(NO178)在600℃时出现最小值；斜长石(NO193)在400℃左右出现最小值。此外，某些岩石的导热系数随温度升高而增加，如透明的黑曜岩、页岩。某些岩石在不同温度下的导热系数如表1.5所示。

表1.4 岩石试件的成分

岩石种类	试件编号	岩石名称	矿物成分				
			石英	K	Na	Ca	铁苦土等成分*
火成岩类	178	辉长岩	—	12(文象构造)	—	46(An50)	24Aug, 11Hbde, Biot, 7Mag
	188	霞石闪长岩	—	23	52	—	2Mag, 23霞石
	190	流纹岩	23	62	51	—	3Mag
	191	角闪石闪长岩	—	73(带状构造)	17	—	9Hbde, 2Biot, 3Mag
	192	石英闪长岩	9	69(带状构造)	8	—	7Hbde, 2Ang, 1Mag + 赤铁矿
	193	斜长岩	—	1	—	97(An50)	1Aug, 1Mag
	194	花岗岩	34	31	31	—	3Biot

续表

岩石种类	试件编号	岩石名称	矿物成分			铁苦土等成分*
			石英	K	Na Ca	
	208	粗粒花岗玄武岩	21	4	— 51(An50)	12Hbde, 9Biot, 3绿帘石+钛石
	209	花岗岩	33	29	25 —	10Biot
	210	石英二长岩	24	20	— 42(An50)	10Biot, 1白云石
硅质岩类	179	石英岩	100	—	— —	
	199	角闪石-石英片麻岩	35		(含长石7)	70Hbde, 5方解石
	200	铁燧石	60	—	— —	23Graneite, 17Mag
	207	硅石	93	—	— —	7白云母
			石英	方解石	白云石	其它
碳酸盐类	168	白云岩	—	—	98	2角闪石
	184	石灰岩	—	94	4	2粘土, 不纯物
	185	石灰岩	—	88	10	1透辉石, 1石墨
	186	白云母	—	—	80	1硫化物, 氯化物, 19空隙
	187	白云母石灰岩	—	72	27	1暗色不纯物

* Hbde=Homblende(普通角闪石); Biot=Biote(黑云母);
Aug=Augite(辉石); Mag=Magentite(磁铁矿)。

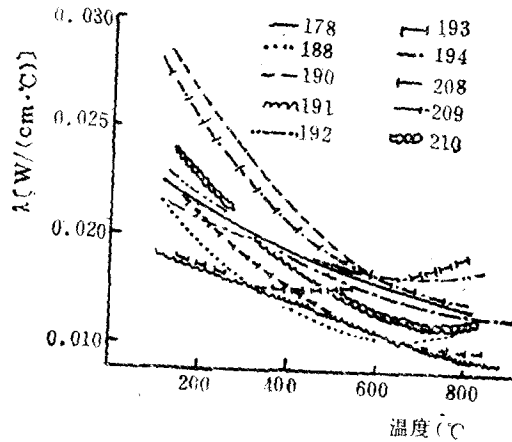


图1.4 火成岩的导热系数与温度的关系

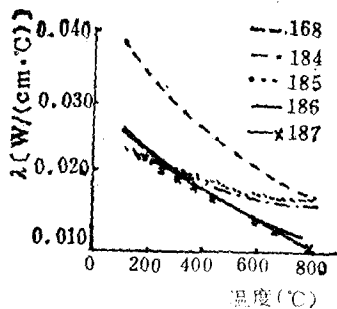


图1.5 碳酸盐类岩石导热系数与温度的关系

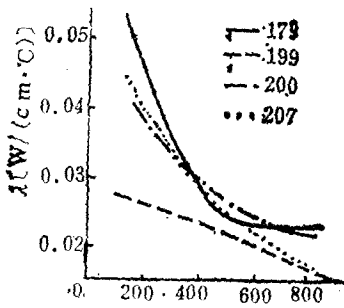


图1.6 硅质类岩石导热系数与温度之间的关系

表1.5 岩石导热系数与温度的关系

岩石名称		导热系数[W/(m·℃)]													
		温 度 (℃)													
		0	50	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200
玄武岩		2.37	2.22	2.09	1.82	1.59	1.47	1.38	1.36	1.34					
闪长岩		2.07	2.01	1.97	1.84	1.76	1.67	1.59	1.57	1.55					
花岗岩			2.00	1.67	1.37	1.19	1.08	0.99	0.92	0.89	0.88	0.84	0.84	0.88	0.89
大理岩 (平行层面)		3.08	2.70	2.49	2.17										
石灰岩	(平行层面)	3.45	3.16	2.95	2.74										
	(垂直层面)	2.55	2.38	2.27											
黑曜岩		1.34	1.40	1.46	1.56	1.67	1.78	1.89							
页岩			0.91	0.94	0.99	1.06	1.12	1.18	1.25	1.28	1.32	1.36	1.39		

岩石导热系数与孔隙中的充填物 岩石孔隙率的大小以及孔隙中充填物的导热性对导热系数有明显影响。一般而言，同一种岩石，孔隙率大的岩石的导热系数小，这实际上和岩石的密度有关。孔隙中如果充填导热系数大的物质，则可使岩石导热系数增加。例如，根据T. 舒蒙和Φ. 福斯的研究，孔隙度为44%的碎煤在用氢气和空气充满其孔隙时，得到的导热系数分别为0.292和0.135[W/(m·K)]。充氢气的煤的导热系数比充空气的导热系数大一倍，这是由于氢气的导热系数比空气大得多。如果岩石内部孔隙中所充填的是水，并且用湿度来表示岩石裂隙中含水分的多少，则岩石的湿度对岩石的导热系数也有影响。含水岩石的导热系数大大高于干燥岩石和水的导热系数。例如，含水砖块的 $\lambda=1.04\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ，而干燥砖块的 $\lambda=0.35\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ，水的 $\lambda=0.58\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ，其原因是岩石中吸附的结晶水的物理性质不同于自由水。此外，裂隙水常含有各种矿物质，含矿物质的水与自由水的导热系数不同。当岩石中存在温度梯度时，水有可能沿热流方向迁移，向温度低的地段运动，使它成为热的传递介质。此外，水在冰点下变为冰，在高温下变为水蒸气。这些因素都使含水岩石导热系数的确定更为复杂。

苏联Г. И. 波克洛夫斯基和B. Г. 布雷切夫研究了由岩石、水、气三组分组成的单元立方体晶格的导热系数，水集中在岩石颗粒接触处，立方体的其它部分被空气充填。热流依次通过颗粒和水而迁移，这种岩石介质的导热系数为：

$$\lambda = \pi \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \ln \left[1 + \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1} - 1 \right) \sqrt{\frac{3}{8} \cdot \frac{\rho_1 W}{\rho_2}} \right] \quad (1.20)$$

式中 λ_1, λ_2 ——水和岩石颗粒的导热系数；

ρ_1, ρ_2 ——水和岩石颗粒的密度；

W ——岩石的湿度。

根据实验资料和以上所引用的公式知，岩石的导热系数与湿度的关系是非线性的。在0℃以上低温时，随岩石湿度增加，受含水蒸气的空气的扩散作用增强以及孔隙表面湿润的影响，导热系数近似于线性增大。湿度进一步增加时，水将使孔隙中饱含水蒸气的空气排出，从而使导热系数增长速度变慢，最后达到渐近值(图1.7)。当岩石温度较高时，在导热系数与湿度的关系曲线上可出现最大值，这是由于水蒸气的扩散作用及水的导热系数增强的

原因，在最大值以后，随湿度增加孔隙被水充满，导热系数将略有下降，且趋于渐近值（图1.8）。

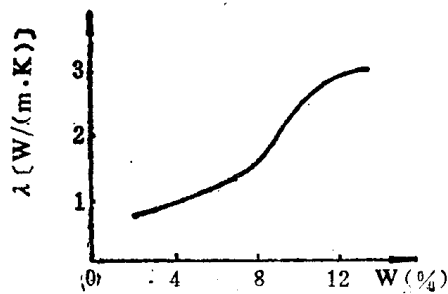


图1.7 低温时，岩石导热系数与湿度的关系

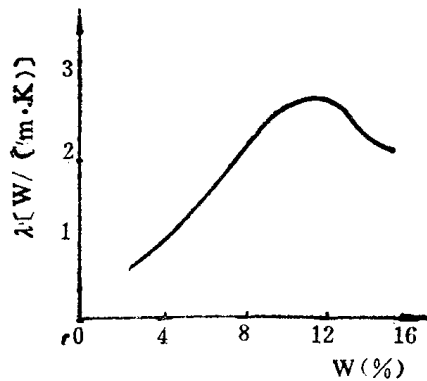


图1.8 较高温度时，岩石导热系数与湿度的关系

§ 1.1.3 岩石导热系数的测定方法

测定岩石导热系数是进行岩石热物理性质研究的一项重要工作。目前采用的测定方法有绝对法和比较法两种。使用较为广泛的是比较测量法。比较测量法是通过与已知导热系数的标准样品进行比较而得。

测定装置如图1.9所示。由热源、受热体、热电偶、热保护装置、热绝缘体、标准试件及外壳等组成。

被测岩石试件放在标准试件之间，标准试件与岩石试件的尺寸相同。热量由热源经过标准试件到达岩石试件，再由岩石试件传导到上部标准试件和上部受热装置。在侧向实行热绝缘，由热源供给标准试件2的热量将全部通过被测岩石试件而到达标准试件4，最后到达受热装置。待整个系统达到热稳定后，根据流入标准试件的热流密度应与被测试件的热流密度相等的原理，即

$$q_1 = q_2 = q_3 \quad (1.21)$$

式中， q_1 、 q_2 、 q_3 分别表示流经标准试件2、被测试件3及标准试件4的热流密度（单位时间内单位面积上通过的热量）。

由傅里叶定律知

$$q_1 = \lambda_1 \frac{\Delta T_1}{\Delta x_1}, \quad q_2 = \lambda_2 \frac{\Delta T_2}{\Delta x_2}, \quad q_3 = \lambda_3 \frac{\Delta T_3}{\Delta x_3}$$

则可得

$$\lambda_1 \frac{\Delta T_1}{\Delta x_1} = \lambda_2 \frac{\Delta T_2}{\Delta x_2} = \lambda_3 \frac{\Delta T_3}{\Delta x_3} \quad (1.22)$$

由于标准试件与被测试件尺寸相同，所以

$$\Delta x_1 = \Delta x_2 = \Delta x_3$$

而

$$\Delta T_1 = t_1 - t_2; \quad \Delta T_2 = t_2 - t_3; \quad \Delta T_3 = t_3 - t_4$$

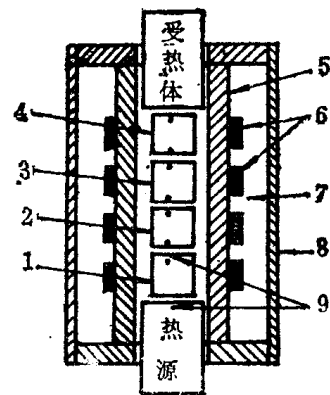


图1.9 导热系数测定原理图

- 1—稳定器；
- 2—标准试件；
- 3—试样；
- 4—标准试件；
- 5—热保护筒；
- 6—保暖装置；
- 7—热绝缘体；
- 8—外壳；
- 9—热电偶

故式 (1.22) 可变为 $\lambda_1 \Delta T_1 = \lambda_2 \Delta T_2 = \lambda_3 \Delta T_3$ (1.23)

式中 λ_1 和 λ_3 为标准试件的导热系数，为已知数。所以，只要通过热电偶测定其温度差 ΔT_1 、 ΔT_3 、 ΔT_2 ，就可以求得岩石试件的导热系数 λ_2 。长沙仪器厂制造的 PB-2 平板导热仪和中国科学院地质所制造的常温下稳定平板热导仪都采用了上述原理。这种方法使用的试件厚度和断面积较大，对于测定岩石的导热系数极为有利。其缺点是如果标准试件的导热系数和待测试件的导热系数相差很小时，则试件两侧面的温度差非常小，这样可能使测定误差增大。因此，应该准备许多不同导热系数的标准试件，并选择与待测试件的导热系数相差较大的标准试件，这样才有可能得到较准确的待测值。此外应尽可能使标准试件与待测试件接触良好，以减少接触面上的热阻。

绝对法是通过热源供给待测试件热量，测定试件两侧的温度差及供给试件的热源电流、电压，求得输入试件的热量，然后按以下公式求得导热系数：

$$Q = \lambda \frac{S(t_2 - t_1)\tau}{L} = \lambda \frac{S(t_2 - t_1)\tau}{(x_2 - x_1)}$$

由此得 $\lambda = \frac{Q}{S\tau} \frac{(x_2 - x_1)}{(t_2 - t_1)} = \frac{QL}{S\tau(t_2 - t_1)}$ (1.24)

式中 Q ——通过岩石试件的热量；
 $x_2 - x_1$ ——所测两点之间的距离；
 $t_2 - t_1$ ——试件两侧或所测两点的温度差；

S ——传热面积；
 L ——试件厚度；
 τ ——传热时间。

这种方法如图 1.10 所示。试件上部为加热板，其上部为热源。加热板的作用是使岩石试件上的温度分布均匀。热绝缘的作用是使热不流入上部或周围。通过测定试件两侧的温度差和电流、电压，求得流入试件中的热量，采用公式 (1.24) 就可以求得岩石试件的导热系数。

以上方法属于实验定测试法，都需从现场采集岩石块加工成试件才能进行。但由于受样品原地赋存条件、结构、构造及采样加工等的影响，常使试件不具代表性。因此，目前正探讨原位测定法。

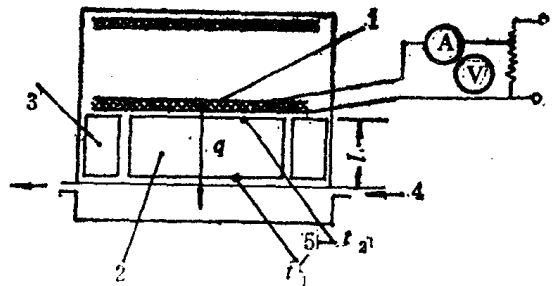


图 1.10 导热系数测定装置 (绝对法)
 1—热源； 2—试件；
 3—热绝缘； 4—冷却水；
 5—热电偶温度计

§ 1.2 岩石的比热

任何物质都有贮存热量的能力，这种贮热能力用比热的大小表示。比热定义为单位质量或单位体积的物质温度升高 1K 时所需供给的热量。

设质量为 m ，或体积为 V 的岩石的温度由 t_1 升高到 t_2 所需的热量为 ΔQ ，则

$$\Delta Q = C_0 V (t_2 - t_1), \quad \text{或} \quad \Delta Q = Cm(t_2 - t_1) \quad (1.25)$$

则 $C_0 = \Delta Q / [V(t_2 - t_1)] \quad [J / (m^3 \cdot K)]$

或 $C = \Delta Q / [m(t_2 - t_1)] \quad [J / (kg \cdot K)]$

式中 C_0 ——单位体积物质的比热， C ——单位质量物质的比热。