

# 江苏东海超高压榴辉岩的热导率及对大陆科学钻探研究的意义

欧新功, 金振民, 金淑燕, 徐海军

(中国地质大学地球科学学院, 湖北武汉 430074)

**摘要:** 对采自江苏东海毛北地区(中国大陆科学钻探先导孔附近)的新鲜榴辉岩样品进行了岩石热导率的测定,初步查明了该区榴辉岩热导率随矿物组成的变化关系,探讨了岩石结构特征和温度变化对热导率的影响.本次所测东海超高压榴辉岩的热导率介于 $3.222\sim 3.716\text{ Wm}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ 之间并随岩石中2种主要矿物的相对含量比而变化,随着榴辉岩中石榴石对绿辉石体积比( $V_{\text{Grt}}/V_{\text{Omp}}$ )的增加而降低,近似的函数关系满足 $K=3.767-0.18\times(V_{\text{Grt}}/V_{\text{Omp}})$ .岩石中矿物分布的不均匀性和面状构造的发育对榴辉岩热导率的影响较大,由此产生的热导率各向异性可达近10%.温度是影响热导率的另外一个重要因素.结合本次的实测资料和相应的热导率—温度关系,建立了东海地区榴辉岩热导率随温度的变化关系方程 $K(T)=1/(7.85\times 10^{-2}+6.95\times 10^{-4}\times T)$ ,根据这一方程并结合东海地区的地热梯度资料推算了榴辉岩热导率随5000 m 钻孔深度的变化关系,推测东海地区科学钻探施工至5000 m 深度时,榴辉岩的热导率将比地表平均降低24%.该成果为钻探测井资料的解释以及该区地热结构模型的建立提供了重要依据和约束资料.

**关键词:** 超高压榴辉岩;热导率;稳态半环型热导仪;大陆科学钻探;江苏东海.

**中图分类号:** P54;P62 **文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-2383(2003)02-0129-08

**作者简介:** 欧新功(1974—),男,中国地质大学在读博士生,主要研究方向为岩石物理性质及大陆深部构造. E-mail: xgou@cug.edu.cn

热导率是表征物质导热能力的物理量,它定义为单位时间内单位长度上温度升高或降低 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时单位面积所通过的热量.岩石热导率是岩石的重要物理性质之一,是研究地壳和上地幔热结构、地球深部热状态的重要参数.精密测定岩石的热导率在解决基础地质问题(如大陆科学钻探、俯冲带热结构、地幔的热扩散等)、岩体工程问题以及石油开发和热能利用等方面都有重要的意义.地球内部的热量主要以3种形式向地表传递:辐射、对流和传导.而在岩石圈内,传导是岩石间热传递的主要方式.岩石圈内的各种地质过程,包括岩石的流变状态、热结构、大地热流等都不同岩石的热导率紧密相关.所以对热导率的研究近年来逐渐受到岩石物理学家的广泛关注,地幔岩的热导率<sup>[1,2]</sup>、与超基性岩有关的热扩散率及其各向异性<sup>[3]</sup>、岩石圈热状态<sup>[4]</sup>、不同岩石类

型的热导率变化特征<sup>[5]</sup>、影响岩石热导率的因素<sup>[6,7]</sup>等关键问题都已成为热点问题.国内的研究人员也围绕大地热流特征等对不同岩石的热导率<sup>[8]</sup>、相应的测量方法<sup>[9,10]</sup>等进行了探讨.但总体来看,热导率的研究还不系统,对俯冲带和超高压变质带岩石热导率的研究还刚开始,尤其是对近十年来倍受关注的超高压榴辉岩,相关的热导率资料很少.另外在对热导率各向异性的研究上,目前所做的工作还非常有限,其原因一方面是由于天然岩石热导率的精密测量具有一定难度,影响和制约测量结果的因素很多;另一方面是由于测量仪器和测量技术本身的限制等原因.本次研究的主要目的是在引进国外热导率最新测试仪器和方法技术的基础上,查明东海毛北地区超高压榴辉岩的热导率与岩石中矿物组成和结构之间的相互关系,并试图探讨温度、岩石不均一性(各向异性)对榴辉岩热导率的影响,从而为研究本区的岩石物理性质、岩石热结构以及科学钻探的相关问题提供约束资料.

收稿日期: 2003-01-17

基金项目: 国家“九五”重大科学工程中国大陆科学钻探工程项目资助.

表 1 实验样品的矿物组成和结构特征

Table 1 Mineralogical components and texture of starting material in experiments

样品号	岩石名称	结构特征	主要矿物含量	$V_{\text{Grt}}/V_{\text{Omp}}$
01MB24	含金红石蓝晶石石榴辉岩	中粗粒、石榴石团块状	Omp80, Grt10, Cy6, Ru3, Ms1	0.13
ZMb059	含黄铁矿金红石榴辉岩	中粗粒结构、弱面理化	Omp60, Grt30, Ru5, Py3, Hb2	0.50
01MB20	榴辉岩	细粒结构、含角闪石脉体	Omp50, Grt46, Hb3, Ru1	0.92
01MB21	含多硅白云母榴辉岩	粗粒、石榴石见裂纹	Omp40, Grt55, Ph3, Hb2	1.38
ZMb051	含金红石榴辉岩	中粗粒、绿辉石条带状	Omp32, Grt60, Ru5, Hb3	1.88
ZMb044	含角闪石脉榴辉岩	中粗粒结构、弱面理化	Omp28, Grt65, Hb5, Cal2	2.32
01MB19	含角闪石脉榴辉岩	中细粒结构、面理发育	Omp25, Grt71, Hb3, Ms1	2.84

矿物代号:Omp. 绿辉石;Grt. 石榴石;Ru. 金红石;Hb. 角闪石;Ph. 多硅白云母;Py. 黄铁矿;Ms. 白云母;Cal. 方解石; $V_{\text{Grt}}/V_{\text{Omp}}$ 表示样品中石榴石和绿辉石的体积比。

## 1 地质背景与实验样品

自从具有超高压意义的柯石英和金刚石在横贯中国近千 km 的秦岭—大别—苏鲁造山带相继被发现以来,中国中央造山带已成为研究超高压和深部地质作用的理想场所。本文研究的造山带超高压岩石是扬子和华北板块在碰撞过程中从地表俯冲到至少 100 km 的深度然后又快速折返到地表的产物。苏鲁高压超高压变质带是秦岭—大别造山带的东延部分,夹于北部的五莲—烟台断裂和南部的嘉山—响水断裂之间,是被郯庐大型断裂带错开并向北移动近 500 km 的结果。江苏东海地区位于南苏鲁超高压变质带内,南苏鲁超高压变质地体由角闪岩相区域变质的片麻岩、角闪岩、片岩、大理岩及蓝晶石英岩组成,并包含大量榴辉岩层或透镜体及超基性岩体<sup>[11,12]</sup>。大量的地质和地球物理资料显示东海毛北地区最有利于实现大陆科学钻探的科学目标,目前已成为中国大陆科学钻探工程的施工地区。了解该区超高压榴辉岩的热导率特征,有助于了解碰撞造山带的动力学过程及俯冲带折返的动力学过程。

实验样品来自江苏东海毛北地区(科钻—井钻孔南约 1 km 的地表露头)。毛北地区出露各种类型的榴辉岩,其中绿辉石和石榴石以不同的含量和粒度形成不同结构构造的榴辉岩。为了研究榴辉岩的成分和结构对岩石热导率的影响,分别选取不同类型的榴辉岩作为实验样品,具体样品特征如表 1 所示。所有样品均以石榴石和绿辉石 2 种矿物成分为主,由于石英对热导率的影响很大,样品中均不含石英。

根据测量仪器的需要,把以上所有样品均切出一个直径大约 90 mm 的平面,并单面抛光以备测量。为了探讨热导率的各向异性,对面理发育的样品则沿平行和垂直面理的方向分别定向切制,所有测

试均是在室温常压下进行。

## 2 测量原理与仪器

由于影响岩石热导率的因素比较复杂,测量过程中又容易受到环境扰动的影响,加之对样品尺寸的要求大,所以精密测量岩石的热导率一直是一项技术难题,这也是目前单矿物热导率数据偏少,各向异性研究难以深入的原因。目前世界上用来测量岩石热导率的仪器大致分 2 种类型:稳态型和非稳态型。前者要求热流线必须垂直于试样的横面积,整个系统要求稳定的热平衡状态,测量误差很小,但对试样的尺寸要求偏大;后者是利用测量岩石的热扩散率,进而计算出岩石的热导率,适用于小样品,但测量精度比稳态法偏低。目前很多国家都有用来测量热导率的先进仪器,其中德国 Te—Ka 公司生产的半环面线状(half-space line)热导率仪以其精度高、数据误差评估先进等优点,近年来发表了很多数据和相应的成果<sup>[13~15]</sup>。该仪器属于稳态绝对测量法范畴,测量精度高,精确度 $\pm 2\%$ ,可重复性 $\pm 1.5\%$ ,对样品的尺寸要求为直径 9 cm、厚度 3 cm 的单面抛光块体。

本研究用实验仪器为德国 Te—Ka 公司的高精度热导率测定仪,仪器的基本结构如图 1 所示,其

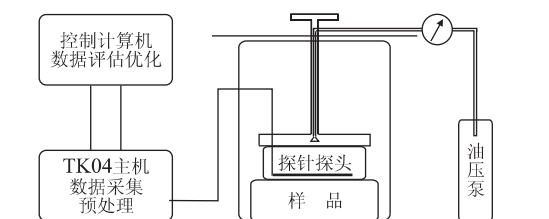


图 1 TK04 半环型热导率测定仪结构简图

Fig. 1 Configuration sketch of TK04 half-space line thermal conductivity meter

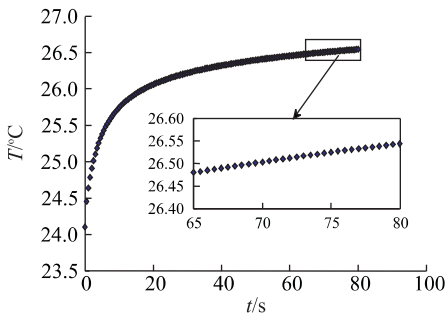


图 2 东海榴辉岩(01MB24)热导率测试的加温曲线  
Fig. 2 A heating-curve of measured thermal conductivity of eclogite (No. 01MB24) from Donghai area

(功率大小视不同的岩石类型而定),样品加热后温度上升,根据实验样品的升温曲线(图 2),取不同的时间段( $t_1, t_2$ )代入(1)式就能得到不同的视热导率值.当取到一定的时间段时,如果视热导率保持不变,且满足下面叙述的 SAM 标准,此时的视热导率值就是真热导率值(详细分析下述).整个测量过程中的数据选取与评估均有相应的软件自动完成.该仪器的主要特点是测量精度高,能对单个数据的质量进行评估,最大限度地避免了环境影响和系统误差.

### 3 数据的精度和可信度

如前所述,该仪器的一个最大优点就是对单个测量数据的优化和评估,所使用的 SAM (sample

工作原理是基于一个无限长的圆柱体热源,假定该热源具有一定的半径和无限大的热导率,那么该热源的温度分布就只与径向距离有关(在轴向上是等

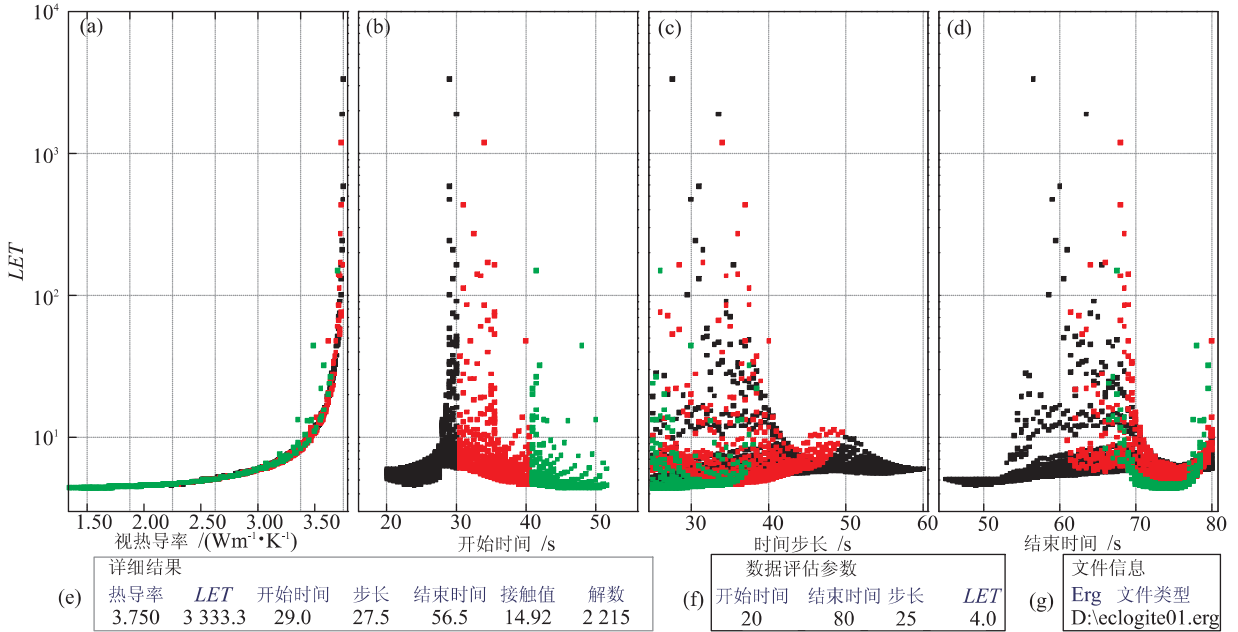


图 3 单个测量数据(01MB24-01)的热导率计算及 SAM 数据评估图解

Fig. 3 Diagrams of thermal conductivity calculating on single measurement (No. 01MB24-01) and SAM evaluation method

温的).在这种假设下,热导率的测量就变成一个二维的问题.对该热源加热,测量与热源垂直的平面上温度的变化,就可以依据(1)式计算出一个视热导率(apparent thermal conductivity)  $Ka^\text{①}$ .

$$Ka(t) = \frac{q \ln(t_2) - \ln(t_1)}{4\pi T(t_2) - T(t_1)} \quad (1)$$

(1)式中: $q$ 为加热功率, $(t_1, t_2)$ 构成一个时间段.在测量开始时,通过探头给样品一个固定的加热功率

approximate method) 法是基于这样的工作原理:如图 2 所示的加温曲线往往容易受到扰动而影响测量质量,因此必须选择一段未经扰动的曲线计算岩石的热导率.图 3 是利用 SAM 法对一个榴辉岩热导率数据的详细评估(具体说明见图件注解),从图 3a 可以看出,函数  $Ka(t)$  越接近真实值  $K$ ,  $Ka(t_{\max})$  在曲线上的时间就越大,为了便于表达,这里定义一个变量  $LET^\text{①}$  (最大时间导数, logarithm of extreme time).

① User's manual of TK04 thermal conductivity meter, Te-Ka Company, Berlin, Germany, 2001.

表 2 利用矿物成分推算的热导率与实测值的对比

Table 2 Comparison between measured value and calculated thermal conductivity from mineralogical components

样品号	01MB24	ZMb059	01MB20	01MB21	ZMb051	ZMb044	01MB19	平均值
$V_{\text{Grt}}/V_{\text{Omp}}$	0.125	0.500	0.920	1.375	1.875	2.320	2.840	1.420
实测平均值	3.716	3.648	3.643	3.578	3.421	3.350	3.222	3.511
数据个数	5	5	6	5	5	5	3	
成分估算值	3.740	3.606	3.753	3.650	3.490	3.498	3.585	3.617
偏差 $\alpha/\%$	0.640	1.160	2.920	1.970	1.970	4.240	10.130	3.290

热导率单位:  $\text{Wm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ;  $V_{\text{Grt}}/V_{\text{Omp}}$  的含义同表 1; 偏差  $\alpha = (1 - \text{实测值}/\text{计算值}) \times 100$ .

$$LET = \ln(\text{extreme time}) = \ln t_{\text{max}}. \quad (2)$$

根据上面的关系表达式, SAM 评估法要求任何一段曲线上的视热导率只有满足下列条件时才被系统采取: (1)  $Ka(t)$  的估算值必须有一个最大值, 并且位于该时间段任意给定的  $LET$  值之上; (2)  $Ka(t)$  的误差必须在给定的误差范围内; (3)  $Ka(t)$  在最大值处的导数是连续的. 如果在整条加温曲线上满足上述条件, 这时的  $Ka(t)$  就是本次测量的热导率. 另外, 为了尽可能消除环境温差、样品边界效应等因素的影响, 规定样品的加温时间为 80 s, 但只取 20~80 s 之间的数值参与计算, 因为在此之外的曲线容易受到干扰. 每一段所取的测量时间步长至少为 25 s, 这样才能获得稳态的参考系数. 根据笔者的测量经验, 在满足上述条件时基本能获得理想的  $LET$  值, 测量精度大部分控制在 1% 以内. 环境温度的波动能使  $LET$  降低很多, 测量时应予以注意. SAM 数据评估法就是这样保证单个数据的精读和可信度. 而对于连续测量到的一系列值则使用误差极限的方法进行评估, 实际测量中限定一次测量的一系列值偏差不得超过 2%.

## 4 结果与讨论

### 4.1 矿物组成对热导率的影响

利用介绍的仪器及数据评估方法, 对江苏东海超高压榴辉岩进行测试. 对采取的每一样品测试 5 个以上的值并求算术平均值, 然后以榴辉岩中石榴石和绿辉石的含量比 ( $V_{\text{Grt}}/V_{\text{Omp}}$ ) 为横坐标进行投图, 测试结果见表 2. 热导率与矿物组成之间的关系见图 4. 所测榴辉岩样品的热导率介于  $3.222 \sim 3.716 \text{ Wm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  之间, 平均热导率  $3.511 \text{ Wm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ . 热导率随岩石成分和结构的差异而变化. 就本区而言, 随着石榴石和绿辉石相对含量比的增加, 榴辉岩的热导率逐渐降低, 从以石榴石为主的榴辉岩

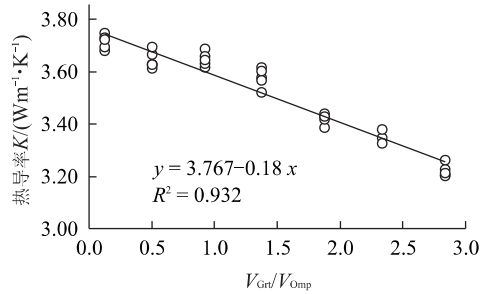


图 4 榴辉岩热导率与矿物组成之间的关系

Fig. 4 Correlation between thermal conductivity and component of eclogite

到以绿辉石为主的榴辉岩, 热导率降低了约 13%. 进一步分析, 新鲜榴辉岩的主要矿物组成为绿辉石和石榴石, 二者所占的比例一般在 85% 以上, 所以这 2 种单矿物的热导率直接影响着榴辉岩的热导率. 为了进一步认识成分对岩石热导率的影响, 根据已经发表的单矿物资料<sup>[16]</sup>, 选用矿物成分与本区接近的铁铝榴石 (Almandine,  $K = 3.56 \text{ Wm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ) 和透辉石 (Diopside,  $K = 4.23 \text{ Wm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ) 的热导率资料来推算本区榴辉岩的热导率. 在不考虑孔隙度、矿物定向排列、次要矿物含量等因素的前提下, 利用绿辉石和石榴石的比例加权平均, 推算出的样品热导率见表 2.

从表 2 中可以看出, 利用矿物组成模拟的热导率与实测热导率非常接近, 平均值  $3.617 \text{ Wm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ , 略高于实测值, 这主要是因为成分模拟状态下所考虑的模型是一种理想化的情况, 矿物颗粒均匀排列且颗粒间最紧密堆积, 此时的热导率具最大值. 天然岩石一般具有微裂隙, 颗粒间具有不同的孔隙度, 次要矿物的影响等这些因素可以降低岩石的热导率. 为了便于讨论, 这里定义一个偏差因子  $\alpha$ :

$$\alpha = (1 - K_m/K_c) \times 100. \quad (3)$$

(3) 式中:  $\alpha$  被定义为非成分偏差因子;  $K_m$  为一定条件下的测量值;  $K_c$  为理想状态下的计算值.  $\alpha$  值的地

质意义在于:  $\alpha$  值越小, 表明岩石的孔隙度、裂隙等非成分因素对热导率的影响越小, 这类岩石一般较致密、新鲜无蚀变。较大的  $\alpha$  值可能对应较大的孔隙度、裂隙发育或者各向异性比较明显等。笔者认为该因子的地质意义可以推广至岩石的其他物理性质(如孔隙度、超声波速度、密度、电导率等)。本实验中所测榴辉岩的热导率偏差  $\alpha$  值在 0~10 之间, 表明非成分因素对东海榴辉岩热导率的影响为 10% 左右。样品 01MB19 面理发育并含有很多角闪石细脉, 因而具有较大的偏差  $\alpha$  值。

#### 4.2 岩石结构和不均匀性对热导率的影响

从测量的过程来看, 矿物粒度对热导率的结果及测量精度都有影响。颗粒均匀且细小的岩石热导率容易测定且偏差较小, 因此岩石的结构对热导率的影响也很大。热导率不仅与组成岩石各矿物的热导率有关, 也与矿物之间的组合和优选排列有关。另外, 岩石热导率各向异性也是影响岩石热状态的一个关键因素。本研究中对面理和线理比较发育的榴辉岩 01MB19 切制了定向样品, 沿着平行和垂直面理分别测试不同方向的热导率, 并利用公式:

$$A = 2(K_{\max} - K_{\min}) / (K_{\max} + K_{\min}),$$

计算出的各向异性值介于 0.9%~2.3% 之间, 平均为 1.29%(图 5)。样品 01MB21 矿物颗粒较大且分布不均匀, 在不同方向上分别测量并计算出的各向异性可达 10%, 平均值 9.32%, 尽管目前对超高压岩石热导率各向异性的研究刚开始, 但岩石的各向异性(包括晶格优选方位、地震波速、岩石热导率、热扩散率等的各向异性)是认识和了解许多地质过程和热事件中应该考虑的重要因素。

#### 4.3 温度对热导率的影响

由于热导率对温度的变化比较敏感, 因此温度

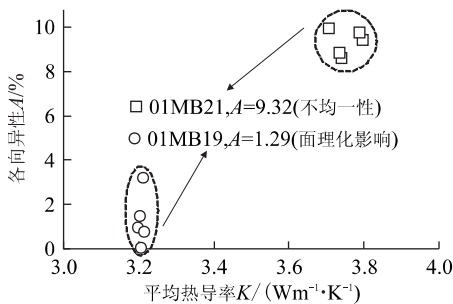


图 5 结构不均一性导致的榴辉岩热导率各向异性

Fig. 5 Anisotropy of thermal conductivity associated with inhomogeneous texture of eclogite

是导致地下岩石热导率变化的主要因素之一。目前国际上已经积累了相应的温度对热导率影响的资料。本次实验虽然在常温常压下进行, 但可以利用这些资料分析本地区岩石热导率随温度的变化关系。

目前比较成功地总结热导率与温度关系的资料不多, 主要见于 Zoth 等<sup>[17]</sup>、Burkhardt 等<sup>[18]</sup>、Sass 等<sup>[19]</sup>和 Seipold<sup>[20]</sup>等有关文献。Seipold<sup>[20]</sup>在总结和分析前人研究资料的基础上给出了适用于结晶岩系的经验公式。他的研究表明, 对大多数结晶岩来说, 热导率是温度的函数关系:

$$K(T) = 1 / (A + B \times T), \quad (4)$$

(4)式中:  $T$  为绝对温度, 参数  $A$  与  $B$  之间满足下面的线性关系:

$$A = -(532 \pm 45) \times B + (0.448 \pm 0.014), \quad (5)$$

把(5)式代入(4)式消去参数  $A$  可得:

$$K(T) = 1 / (B \times (T - 532) + 0.448), \quad (6)$$

把本次在室温下测得的榴辉岩热导率值  $K$  代入(6)式, 可以求得参数  $B$ , 然后把  $B$  代入(5)式即可求得参数  $A$ , 这样就确定了本区榴辉岩热导率随温度的变化关系。以 100 °C 和 200 °C 为例, 详细计算结果见表 3。

表 3 利用热导率—温度关系推测的高温下的热导率  
Table 3 Thermal conductivity under high temperature inferred from published correlation of  $K-T$   
( $Wm^{-1} \cdot K^{-1}$ )

实验样品号	25 °C 实测值	系数 A/ 10 <sup>-2</sup>	系数 B/ 10 <sup>-4</sup>	100 °C 计算值	200 °C 计算值	25 °C 校正值
01MB24	3.716	4.13	7.65	3.063	2.482	3.716
ZMb059	3.648	5.27	7.43	3.032	2.474	3.648
01MB20	3.643	5.35	7.41	3.029	2.474	3.643
01MB21	3.578	6.49	7.20	2.999	2.466	3.578
ZMb051	3.421	9.40	6.65	2.922	2.447	3.421
ZMb044	3.350	10.80	6.39	2.887	2.437	3.350
01MB19	3.222	13.50	5.88	2.821	2.420	3.222
平均值	3.511	7.85	6.95	2.965	2.457	3.501

分别取参数  $A$  与  $B$  的平均值, 代入(4)式可得东海地区榴辉岩热导率随温度的变化关系:

$$K(T) = 1 / (7.85 \times 10^{-2} + 6.95 \times 10^{-4} \times T), \quad (7)$$

把室温 25 °C 代入(7)式得到  $K(25 °C) = 3.501 Wm^{-1} \cdot K^{-1}$ , 与室温下的实测平均值  $3.511 Wm^{-1} \cdot K^{-1}$  非常接近, 说明该方程在本区适用并具有实际意义。另外, 根据中国大陆科学钻探前期地热资料的调查结果<sup>[21,22]</sup>, 科学钻探至 5 000 m 的设计目标时, 地温将增至 150 °C。按照 25 °C/km 的地温梯度计算

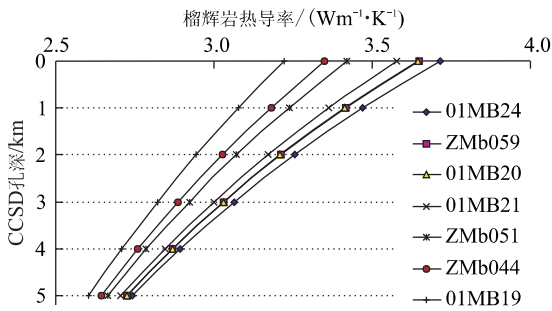


图 6 推算的超高压榴辉岩热导率随 CCSD 钻孔深度的变化关系

Fig. 6 Correlation between calculated thermal conductivity of UHP-eclogite and depth of CCSD deep hole

出的榴辉岩热导率—深度关系曲线如图 6 所示, 5 km 深度榴辉岩的热导率将降至  $2.70 \text{ Wm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 。地温(深度)增加使榴辉岩的热导率降低约 24%, 这是建立该区地壳动力学模型和地热结构时应该考虑的因素。

## 5 结论

江苏东海毛北地区超高压榴辉岩的热导率介于  $3.222 \sim 3.716 \text{ Wm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  之间, 平均热导率  $3.511 \text{ Wm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 。热导率的大小与岩石中绿辉石、石榴石的相对含量关系密切。随石榴石/绿辉石体积比值的增加而降低, 变化关系满足方程:  $K = 3.767 - 0.18 \times (V_{\text{Grt}}/V_{\text{Omp}})$ 。岩石中矿物分布的不均匀性或面状构造的发育可以导致榴辉岩热导率的各向异性, 根据样品及矿物含量的不同各向异性介于 1%~10%。根据本区实测的榴辉岩热导率资料, 结合前人研究成果建立热导率随温度的变化关系式为:  $K(T) = 1 / (7.85 \times 10^{-2} + 6.95 \times 10^{-4} \times T)$ , 并根据本区的地温梯度资料计算了榴辉岩在 CCSD 5 000 m 钻孔垂向上的变化特征, 榴辉岩热导率由地表平均  $3.511 \text{ Wm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  降至 5 000 m 深度时平均  $2.687 \text{ Wm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ , 降低约 24%, 这为钻探测井资料的解释以及建立该区的地质结构模型提供了重要依据和约束资料。

需要指出的是, 榴辉岩是一种在结构构造和成分特征上变化较大的一类岩石, 其热导率特征也较为复杂。为了简化问题并探讨一般规律, 本研究选取的均为不含石英(石英具有异常高的热导率)、无蚀变、相对新鲜、矿物组成以石榴石和绿辉石为主(其他矿物含量 < 10%)的榴辉岩样品。如果榴辉岩中的

石英含量较高或角闪石化比较强烈, 热导率的值及其变化特征可能会在一定的范围内浮动。此外, 在查明与本区超高压榴辉岩关系密切的片麻岩、角闪岩的热导率特征之后, 对进一步了解榴辉岩的热性质乃至对科学钻探岩石物性和相关地质问题都有非常重要的意义。

感谢中国大陆科学钻探项目首席科学家许志琴院士的悉心指导。在德国国家地学研究中心(GFZ)期间, 与 B Lotz 和 K Erbas 博士进行了有益的讨论, 柏林 Te-Ka 公司的 H Honarmand 博士在仪器和实验方面给予了很多帮助, 在此一并致谢。

## 参考文献:

- [1] Hofmeister A M. Mantle values of thermal conductivity and the geotherm from phonon lifetimes [J]. *Science*, 1999, 283: 1699—1706.
- [2] Dubuffet F, Yuen D A, Rabinowicz M. Effects of a realistic mantle thermal conductivity on the patterns of 3-D convection [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1999, 171(3): 401—409.
- [3] Tommasi A, Gibert B, Seipold U, et al. Anisotropy of thermal diffusivity in the upper mantle [J]. *Nature*, 2001, 411: 783—786.
- [4] Jokinen J, Kukkonen I T. Inverse simulation of the lithospheric thermal regime using the Monte Carlo method [J]. *Tectonophysics*, 1999, 306(3—4): 293—310.
- [5] Seipold U, Huenges E. Thermal properties of gneisses and amphibolites—high pressure and high temperature investigations of KTB-rock samples [J]. *Tectonophysics*, 1998, 291(1—4): 173—178.
- [6] Arndt J, Bartel T, Scheuber E, et al. Thermal and rheological properties of granodioritic rocks from the Central Andes, North Chile [J]. *Tectonophysics*, 1997, 271(1—2): 75—88.
- [7] Vasseur G, Brigaud F, Demongodin L. Thermal conductivity estimation in sedimentary basins [J]. *Tectonophysics*, 1995, 244(1—3): 167—174.
- [8] 熊亮萍, 胡圣标, 汪缉安. 中国东南地区岩石热导率值的分析 [J]. *岩石学报*, 1994, 10(3): 323—329.
- [9] XIONG L P, HU S B, WANG J A. Analysis on the thermal conductivity of rocks from SE China [J]. *Acta Petro Sinica*, 1994, 10(3): 323—329.
- [9] 沈显杰, 张文仁, 陆秀文, 等. 地热—II 型稳定分棒式热导仪——岩石热导率精密测量装置 [J]. *岩石学报*, 1987, 1: 86—95.
- [9] SHEN X J, ZHANG W R, LU X W, et al. Geotherm-

- II model thermal conductivity meter of steady-stage divided bar type — a precise rock thermal conductivity measuring device [J]. *Acta Petro Sinica*, 1987, 1: 86—95.
- [10] 赵永信, 杨淑贞, 张文仁, 等. 岩石热导率的温压实验及分析[J]. *地球物理学进展*, 1995, 10(1): 104—113.  
ZHAO Y X, YANG S Z, ZHANG W R, et al. An experimental study of rock thermal conductivity under different temperature and pressure [J]. *Progress in Geophysics*, 1995, 10(1): 104—113.
- [11] Xu Z, Yang W, Zhang Z, et al. Scientific significance and site-selection researches of the first Chinese scientific deep drillhole [J]. *Continental Dynamics*, 1998, 3: 1—13.
- [12] Xu Z, Yang W, Yang J, et al. Chinese continental scientific drilling program in the Sulu ultrahigh pressure metamorphic belt [J]. *ICDP Newsletter*, 2000, 2: 13—16.
- [13] Rauen A, Winter H. Petrophysical properties [A]. In: Emmermann R, Althaus E, Giese P, et al, eds. *KTB Report 95—2* [C]. Hannover: Hannover Press, 1995. 24—28.
- [14] Clauser C, Huenges E. Thermal conductivity of rocks and minerals [A]. In: Ahrens T, ed. *AGU Handbook of physical constant Am Geophys* [C]. Union, Washington, NY, 1995, Section 3. 9, 105—126.
- [15] Buntebarth G. Thermal properties of KTB Oberpfalz VB core samples at elevated temperature and pressure [J]. *Sci Drilling*, 1991, 2: 73—80.
- [16] Diment W H, Pratt H R. Thermal conductivity of some rock-forming minerals: a tabulation [R]. USGS open file report 88—690, US Geol Survey, Denver Co, 1988. 15.
- [17] Zoth G, Hänel R. Appendix of thermal conductivity [A]. In: Hänel R, Rybach L, Stegena L, eds. *Handbook of Terrestrial heat flow density determination* [C]. Dordrecht: Kluwer Press, 1988. 449—466.
- [18] Burkhardt H, Honarmand H, Pribnow D. Test measurements with a new thermal conductivity borehole tool [J]. *Tectonophysics*, 1995, 244(1—3): 161—165.
- [19] Sass J H, Lachenbruch A H, Moses T H. Heat flow from a scientific research well at Cajon Pass, California [J]. *J Geophys Res*, 1992, 97(B4): 5017—5030.
- [20] Seipold U. Temperature dependence of thermal transport properties of crystalline rocks — a general law [J]. *Tectonophysics*, 1998, 291(1—4): 161—171.
- [21] 汪集暘, 胡圣标, 程本合, 等. 中国大陆科学钻探靶区深部温度预测[J]. *地球物理学报*, 2001, 44(6): 774—782.  
WANG J Y, HU S B, CHENG B H, et al. Prediction of deep temperature in the target area of Chinese continental scientific drilling [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2001, 44(6): 774—782.
- [22] Wang J, Hu S, Yang W, et al. Geothermal measurements in the pilot-boreholes of the China continental scientific drilling [J]. *Chinese Sci Bull*, 2001, 46(20): 1745—1748.

## Thermal Conductivity of Donghai UHP Eclogite and Its Significance for Studying Continental Scientific Drilling

OU Xin-gong, JIN Zhen-min, JIN Shu-yan, XU Hai-jun

(Faculty of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** UHP eclogite samples were collected from surface exposures around Chinese Continental Scientific Drilling (CCSD) drill-site in Donghai area have been measured on thermal conductivity to investigate the effect of mineral components and texture on thermal conductivity (TC) of eclogite. Measured thermal conductivities vary from 3.222 to 3.716  $\text{Wm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  with average value 3.511  $\text{Wm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ , which depend on the volume ratio of garnet and omphacite ( $V_{\text{Grt}}/V_{\text{Omp}}$ ) in the rocks. This correlation was fitted to the function  $K=3.767-0.18 \times (V_{\text{Grt}}/V_{\text{Omp}})$ , which shows the thermal conductivity of eclogite in this area decreased as increasing of  $V_{\text{Grt}}/V_{\text{Omp}}$ . Inhomogeneous distribution of minerals and the foliation texture in rocks also significantly affect the value of thermal conductivity and induce the anisot-

ropy up to 10% in eclogite. For temperature dependence, according to calculations from the correlation between  $K-T$ , thermal conductivities under high temperature were also fitted to a function:  $K(T)=1/(7.85 \times 10^{-2} + 6.95 \times 10^{-4} \times T)$ ,  $T$  is absolute temperature. Based on this function and the published geothermal data of this area, a depth dependence of thermal conductivity can be concluded. The  $K$  of eclogite decreased as the increasing depth of CCSD drill hole. The  $K$  values of eclogite in surface and in bottom of hole are  $3.511 \text{ Wm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  and  $2.687 \text{ Wm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ , respectively. The  $K$  of eclogite will be predicted to be decreased about 24% from surface to the end of 5 000 m depth of CCSD. These research results are helpful to establish the geothermal model of this area and to interpret well logging results from CCSD.

**Key words:** UHP eclogite; thermal conductivity; half-space line TC meter; CCSD; Jiangsu Donghai.

\* \* \* \* \*

## 中国首例猛玛象古 DNA 序列

杨淑娟, 赖旭龙

(中国地质大学地球科学学院, 湖北武汉 430074)

古 DNA (ancient DNA, aDNA) 是指博物馆标本、生物遗骸和古生物化石中的 DNA。1980 年我国湖南医学院报道了有关约 2 000 多年前长沙马王堆汉代女尸的古核酸研究成果, 这是世界上最早的一例古 DNA 研究<sup>[1]</sup>。自 1984 年 Higuchi 等<sup>[2]</sup> 首先从一种已绝灭约 140 a 的南非斑驴 (quagga) 标本中提取了线粒体 DNA, 并用于与现代生物种的对比研究, 在世界范围内掀起了古 DNA 研究的热潮。在过去 10 多年里, 古 DNA 研究在演化生物学、人类起源、动植物的家养和驯化、考古学等研究领域取得了许多重要的成果。目前, 古 DNA 研究已经成为世界性的前沿热点领域。

在存活的有机体中, DNA 的损伤可以通过自身的修复机制自行修正。但是在生物死亡之后, 修复机制停止作用, DNA 也不再受保护。生物死亡后, 由于水解和氧化的作用, 使 DNA 大量的降解。由于 DNA 的降解, 使得古代样本中只含有少量高度片段化的 DNA, 其含量水平与正常的生物体相差 6 个数量级<sup>[3]</sup>, 这些保存下来短的基因片段大小一般仅约 50~500 bp 大小, 并且遭受了严重损伤和降解。另外在实验操作过程中, 由于采用了极为灵敏的 PCR

(聚合酶链式反应) 技术来扩增古代样品中微量的 DNA 片段, 如果在实验操作过程中稍有不慎, 极易受到污染。实践证明上述因素会降低古 DNA 的提取成功率, 从而大大地增加了古 DNA 研究的难度。

现在世界上长鼻目 (Proboscidea) 仅存有亚洲象 (*Elephas*) 和非洲象 (*Loxodonta*) 两个属, 已经绝灭的重要种属有猛犸象 (*Mammuthus*)、乳齿象 (*Mastodon*) 和分布于华南地区更新世的剑齿象 (*Stegodon*) 等。真猛犸象在晚更新世开始出现, 在 12 000 年以前, 猛犸象从欧亚大陆北部到北美都有广泛的分布, 但之后却渐渐退缩至西伯利亚北部地区, 直至几千年前最后绝灭<sup>[4]</sup>。长期以来, 人们在形态学研究上对于两种现存象和已经绝灭了象之间的亲缘演化关系存有争议。过去几年里, 人们开始从分子水平上探讨象亚目之间的谱系关系。Yang 等<sup>[5]</sup> 从已绝灭的美洲乳齿象 (*Mammuthus americanum*) 及采自阿拉斯加的猛犸象 (*Mammuthus primigenius*) 化石中获得线粒体细胞色素 b 基因序列, 以乳齿象作为外类群分析象亚科的系统发育关系, 建立了较为可信的象系统演化树, 并提出了现存的亚洲象与已绝灭的猛犸象之间的亲缘关系较密切的观点。1999 年, Greenwood 等<sup>[6]</sup> 提取了晚更新世阿拉斯加和西伯利亚猛犸象的核基因, 得出了和上述观