

利用超高压变质岩的 P 波速度估算 地下岩石的热导率

欧新功^{1,2}, 金振民², 夏 斌¹, 徐海军², 金淑燕²

1. 中国科学院广州地球化学研究所, 中国科学院边缘海地质重点实验室, 广东广州 510640

2. 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 湖北武汉 430074

摘要: 岩石热导率是了解地球内部热传导过程的重要参数之一, 但热导率的测量在室内和野外都比较复杂. 如何利用容易获得的岩石物理参数(如超声波速度)来估算岩石的热导率就显得非常重要. 通过对中国大陆科学钻探(CCS D)主孔 655 件样品热导率和超声波速度的相关分析, 把样品分为新鲜榴辉岩、退变质榴辉岩、副片麻岩和正片麻岩 4 类, 并分别建立了利用岩石 P 波速度估算热导率的计算方程. 回归计算表明, 榴辉岩热导率和 P 波速度之间的相关性较大, 相关系数在 0.7 左右, 片麻岩显示的相关系数比较小, 在 0.4~0.5 之间. 鉴于样本数量较大, 这种结果足以表明热导率和 P 波速度之间可以用给定的线性关系来表达. 为了检验获得的方程, 在 CCS D 主孔中选取典型的岩性单元, 利用测得的 P 波速度估算相应的热导率, 结果显示估算值和实测热导率平均值非常接近, 表明利用 P 波估算岩石热导率的方程是可行和实用的, 为本区和相似地区大地热流和热结构计算提供了热导率的计算方法和依据, 因而具有重要的岩石物理学和地球物理意义.

关键词: 热导率; 地震波速度; 回归分析; 超高压变质岩.

中图分类号: P 313.3

文章编号: 1000-2383(2006)04-0564-05

收稿日期: 2006-03-05

Prediction of Thermal Conductivity of Underground Rocks from P-Wave Velocity of Ultrahigh-Pressure Metamorphic Rocks

OU Xin gong^{1,2}, JIN Zhen min², XI A Bin¹, XU Hai jun², JIN Shu yan²

1. Guangzhou Institute of Geochemistry, Key Laboratory of Marginal Sea Geology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

2. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources (GPMR), China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: The relationship between thermal conductivity and ultrasonic velocity has been analyzed by using 655 samples from scientific boreholes drilled in Donghai, eastern China. The samples are classified into 4 different types: fresh eclogite, retrograde eclogite, orthogneiss and paragneiss. We established equations that enabled us to predict thermal conductivity from measuring the P-wave velocity of each type of rock. The regression analysis of thermal conductivity vs. ultrasonic velocity yields a correlation coefficient of about 0.7 for eclogite and 0.5-0.4 for gneiss. The result shows that the linear equation is sufficient to describe the relationship between thermal conductivity and ultrasonic velocity. For verifying these equations, we chose several typical lithology units of the CCS D mainhole to estimate thermal conductivity from P-wave velocity. The calculated values are consistent with the measured average value of thermal conductivity, which means these equations can be used to infer thermal conductivity for underground rocks through P-wave velocity in the Donghai region or similar area. These results are of great significance for thermal conductivity selection in thermal structure analysis or heat flow calculations.

Key words: thermal conductivity; P-wave velocity; regression analysis; ultrahigh pressure metamorphic rocks.

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目(No. 2003CB716506); 地质过程与矿产资源国家重点实验室开放基金项目(No. GPMR0505); 中国博士后科学基金项目(No. 2003034457).

作者简介: 欧新功(1974-), 男, 博士后, 主要从事岩石物理学和岩石流变学方面的研究. E-mail: xgou@gig.ac.cn

0 引言

岩石热传导率(简称热导率) K 是岩石的重要物理性质之一,在地质基础研究(如岩石圈热结构、地球深部热状态、深部岩石的变质作用和热演化历史等)和应用研究(如大型地质工程、深部热水、石油矿产的开采等)中均具有重要的意义.岩石热导率的测定是一项比较复杂且费时的工作,对于可以直接探测到的岩石样品,热导率的测定可以在实验室内进行(Williams *et al.* , 1988; Lee , 1989; Seipold and Raab , 2000),也可以在钻孔内进行原位测量(Silli man and Neuzil , 1990; Pribnow *et al.* , 1993; Burkhardt *et al.* , 1995),但对于地下无法直接探测到的地质单元,获得热导率还有一定的困难.在进行大地热流或热结构计算时,有的将这部分岩石的热导率取为常数(沈显杰等,1995),有的取相似岩石的热导率值进行代替,或者取与温度压力有关的估算值(Chapman , 1986; 迟清华和鄢明才,1998),一般很难进行有依据的定量取值.岩石的地震波速度是岩石的另外一个重要物理参数,但相对于热导率而言,无论是在实验室还是在野外,地震波速度的测量相对都比较容易.对地下无法直接测量的地质单元,地球物理测量也可以获得岩石的地震波速度.因此,如果这 2 个物理参数之间具有某种关系的话,无疑为我们获得地下岩石的热导率提供了一种简易快速的方法.本文就是基于这样的研究思路对中国大陆科学钻探获得的相关数据进行了这方面的整理分析.

前人的相关文献对热导率和地震波速度之间的关系进行过一定的理论探讨(Popov *et al.* , 2003; G ğ ü , 2004) 和应用研究(Durut ğ k , 1999; Demirci *et al.* , 2004),如通过测井数据或其他岩石物理数据进行估算热导率(Sass *et al.* , 1992; Prinow and Sass , 1995; Hartmann *et al.* , 2005),利用弹性波速度、密度或其他物理参数预测热导率大小(Ökahra man *et al.* , 2004; Singh *et al.* , 2006)等,但这类研究总体上还存在以下问题:一是数据量偏少,几件或十几件样品得出的关系具有很大的偶然性,代表性也不强;二是样品的来源分散,有些研究虽然数据量比较大,但样品取自不同的地区或不同的构造环境,把这些样品放在一起分析所得出的规律可信度也较弱.热导率和地震波速度虽然都是岩石本身固有的重要物理性质,但影响二者的因素不同,加之各类岩石千差万别,不可能存在一

个普适的关系适合所有岩石或所有地区.因此,这类研究只能集中在某一区域特定的岩石类型,在大量数据统计的基础上得出的关系才能在该地区或相似的构造背景下具有应用价值.本次研究的全部样品取自中国大陆科学钻探主孔岩心,这些样品均为致密的结晶岩类,具有相同的构造背景并一起经历了超高压变质作用,所得出的相关公式可以在苏鲁地区乃至超高压变质带进行应用.

1 样品采集

中国大陆科学钻探(CCS D)提供了苏鲁超高压变质带丰富的垂向连续的超高压岩石样品,为系统研究该区的岩石物理资料提供了绝好的机会.本文涉及的样品均取自中国大陆科学钻探主孔 100~5 000 m 的岩心,取样间隔为 5 m/个.钻孔获得的岩石种类丰富,为方便研究,本文选取榴辉岩和片麻岩这两大类岩石为研究对象,并进一步按照榴辉岩的退变质程度和片麻岩的成因细分为新鲜榴辉岩、退变质榴辉岩、副片麻岩和正片麻岩 4 类,分别对它们之间地震波速度和热导率的对应关系进行研究.在 CCS D 主孔 5 000 m 采集的岩石物理性质样品 800 余件,岩石类型大致分布如图 1 所示,可以看出各种榴辉岩和片麻岩类是钻孔岩石的主体.由于样品加工和测试方面的原因,部分样品没有测试热导率或没有测试波速,通过对数据库的整理,最终在榴辉岩和片麻岩中获取 655 件数据齐全样品,按照上述标准分成 4 类,分别对每类岩石的热导率和地震波速度进行分析.

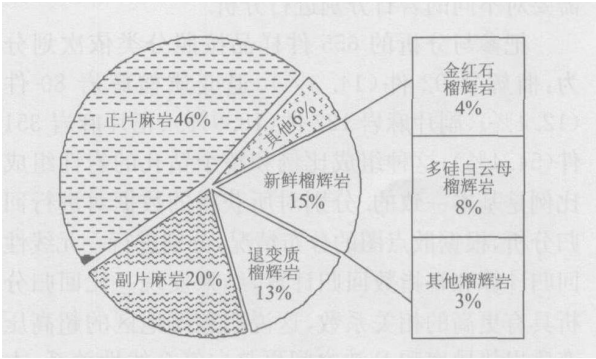


图 1 CCS D 主孔 5 000 m 所采集岩心的岩性分布
Fig. 1 Lithology distribution of samples collected from CCS D 5 000 m main hole

2 测试方法

对采集到的岩心样品在实验室内分别进行制样加工.热导率样品制成直径 90 mm、厚度 30 mm 的单面抛光块体,利用德国 Te-Ka 公司生产的半环线状(half space line)热导率仪进行测定.该仪器属于稳态绝对测量法范畴,测量精度高,精确度±2%,可重复性误差±1.5%.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,并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.超声波测量的样品在实验室内加工成直径 25 mm,长度 25~50 mm 的圆柱体,端面抛光,使用的测量仪器是中国大陆科学钻探工程中心和中国科技大学共同开发研制的“岩石超声波精密测定仪”.该仪器采用全波列数字化记录,纵波换能器工作频率为 1 MHz,采样频率 40 MHz(即时间间隔 0.025 ts),测量精度高,相对误差<1%.所有样品均在干燥状态下,在实验室常温常压条件下测试完成.

3 相关性分析

根据 CCSD 100~5 000 m 所获得的数据,分别作出岩石热导率 K 和纵波速度 P 随深度的变化关系图(图 2),从图中可以看出,热导率和 P 波之间具有相似的变化趋势,这种变化主要受不同深度岩石类型的控制,如 500~750 m 这一段具有很高的热导率和 P 波速度,主要因为这段岩石为新鲜的榴辉岩.同时,由于影响岩石热导率和 P 波速度的因素很多,不同岩石类型对影响因素的响应也不相同,所以钻孔中热导率和 P 波的变化趋势也不完全相同,需要对不同的岩石分别进行分析.

把参与分析的 655 件样品按照分类依次划分为:榴辉岩 92 件(14.3%)、退变质榴辉岩 80 件(12.4%)、副片麻岩 122 件(18.9%)、正片麻岩 351 件(54.4%),这种组成比例和整个钻孔的岩性组成比例是基本一致的.分别对所获得的数据对进行回归分析,根据散点图的分布情况,分别进行一元线性回归计算和幂指数回归计算,结果发现一元回归分析具有更高的相关系数,这说明东海地区的超高压变质岩热导率和 P 波之间更趋向符合线性关系,本文采取一元线性回归计算的结果进行讨论.图 3 分别给出了 4 类岩石热导率随 P 波速度的变化关系和

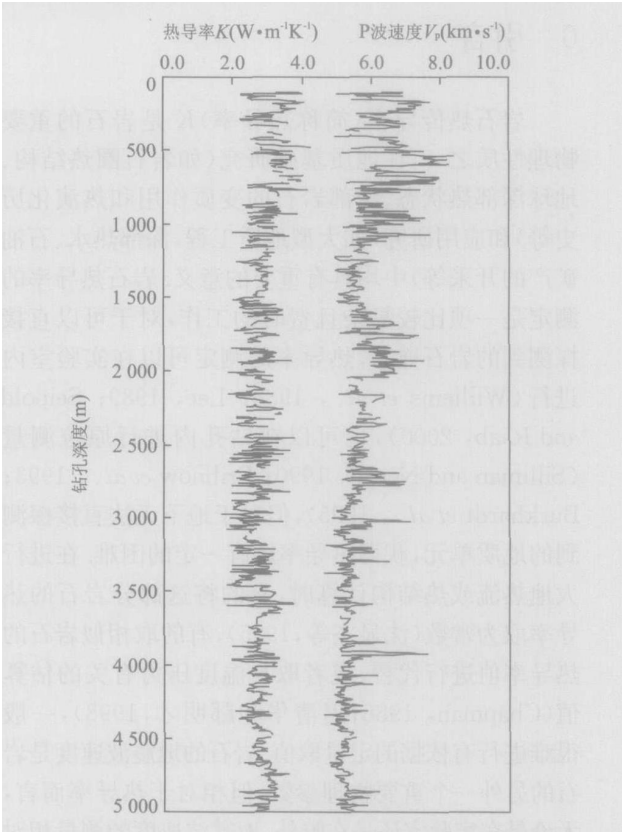


图 2 CCSD 主孔 5 000 m 岩石热导率和 P 波随深度的变化关系

Fig. 2 Depth log of thermal conductivity and P-wave velocity measured on cores from CCSD 5 000 m main hole

回归计算结果,从拟合的曲线来看,新鲜榴辉岩的热导率和 P 波之间具有较高的相关性,相关系数 0.733,榴辉岩发生退变质作用之后,这种相关性有所降低,相关系数 0.683.退变质作用降低了榴辉岩的地震波速度,也降低了热导率值.片麻岩的热导率和 P 波之间的相关性稍差,正副片麻岩的相关系数分别在 0.4 和 0.5 左右.对片麻岩来说,石英含量对岩石热导率影响很大,尤其是正片麻岩,石英含量变化很大,造成岩石热导率和 P 波之间的关系很不明显.表 1 给出了 4 类岩石利用 P 波估算热导率的回归方程,以及回归分析的相关系数和标准偏差.

4 讨论与结论

根据前面的分析结果,我们认为即使在同一地区,也不会存在一个方程适合估算所有岩石的热导率,应该根据不同的岩性选取不同的估算方式.就

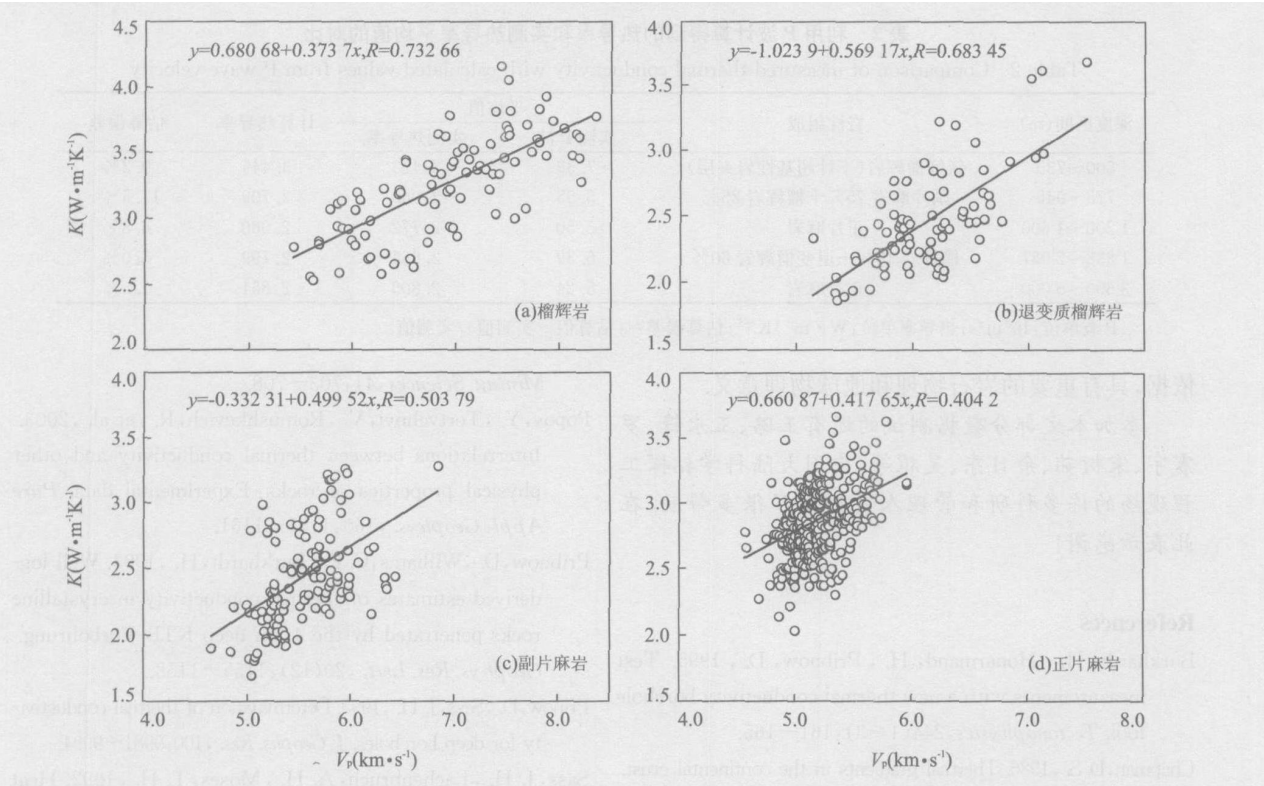


图 3 岩石热导率和纵波速度的相关性

Fig .3 Correlation analysis of thermal conductivity versus P-wave velocity

表 1 不同岩石热导率 K 和纵波速度 V_p 的回归分析结果

Table 1 Regression analysis of thermal conductivity versus P-wave velocity of different rocks

岩石类型	岩性	样品数	线性回归方程	相关系数	标准偏差
榴辉岩	较新鲜,或者含多硅白云母、钛铁矿、金红石、黄铁矿、黄铜矿等副矿物	92	$K=0.374V_p+0.681$	0.733	0.25
退变质榴辉岩	中等程度退变质,含角闪石、黑云母、绿帘石、斜长石等退变质矿物	80	$K=0.570V_p-1.024$	0.683	0.42
副片麻岩	以黑云斜长或黑云二长片麻岩为主,或含有石榴石、绿帘石、绿泥石、角闪石、黄铁矿等矿物	122	$K=0.500V_p-0.332$	0.504	0.44
正片麻岩	以长英质片麻岩为主,或者含有角闪石、黑云母、绿泥石、黄铁矿等	351	$K=0.418V_p+0.661$	0.404	0.27

CCSD 的岩石而言,利用岩石的 P 波估算热导率对榴辉岩是可信的,对副片麻岩基本可信,而对于正片麻岩来说,这种估算可能会有较大的误差.因为在正片麻岩中普遍含有不等量的石英矿物,石英含量对岩石热导率的影响很大,但对波速的影响相对较小,因此正片麻岩的热导率和 P 波之间关系复杂,仅可根据地震波的特征半定量的估计热导率的状况.

为了检验表 1 所列的方程在估算岩石热导率上的实用性,选取 CCSD 不同深度比较典型的岩性单元进行反演,依据某一岩性单元的平均 P 波估算出该段的热导率值,然后与实测的热导率平均值进行

对比,并依照误差公式计算出估算误差,相关的计算结果列于表 2.

从表 2 中可以看出,利用方程反演出来的热导率值和实测平均值非常接近,对榴辉岩热导率的估算误差小于 5%,在 500~735 m 这段新鲜榴辉岩中实测和估算的热导率基本相同.775~945 m 这一段片麻岩比较复杂,且含有榴辉岩夹层,估算出的热导率误差偏大(11.5%),其他几段的估算误差均小于 10%.这说明本文得出的利用 P 波估算岩石热导率的方程是可行和实用的,为本区和相似地区大地热流和热结构计算中热导率的取值提供了计算方法和

表 2 利用 P 波计算得到的热导率和实测热导率平均值的对比

Table 2 Comparison of measured thermal conductivity with calculated values from P-wave velocity

深度区间(m)	岩性组成	平均值		计算热导率	估算误差
		实测 P 波	实测热导率		
500~735	新鲜榴辉岩(不计超基性岩夹层)	7.39	3.453	3.445	0.2%
775~945	副片麻岩 75%+榴辉岩 25%	5.95	3.060	2.709	11.5%
1 200~1 600	正片麻岩	5.50	2.772	2.960	6.8%
1 838~2 037	榴辉岩 40%+退变榴辉岩 60%	6.39	2.664	2.799	5.0%
3 600~5 000	正片麻岩	5.24	2.809	2.851	1.5%

P 波单位:10³m/s;热导率单位:W·m⁻¹K⁻¹;估算误差=(估算值-实测值)/实测值.

依据,具有重要的岩石物理和地球物理意义.

参加本文部分数据测试的还有王璐、王永锋、罗震宇、宋衍茹、余日东、吴耀等,中国大陆科学钻探工程现场的许多科研和管理人员提供了很多帮助,在此表示感谢!

References

Burkhardt, H., Honarmand, H., Pribnow, D., 1995. Test measurements with a new thermal conductivity borehole tool. *Tectonophysics*, 244(1-3): 161-165.

Chapman, D.S., 1986. Thermal gradients in the continental crust. In: Dawson, J.B. ed., *The nature of the lower continental crust*. Geological Society Special Publication, 24: 63-70.

Chi, Q.H., Yan, M.C., 1998. Radioactive elements of rocks in North China platform and the thermal structure and temperature distribution of the modern continental lithosphere. *Chinese J. Geophys.*, 41(1): 38-47 (in Chinese with English abstract).

Demirci, A., Gökçü, K., Durutürk, Y.S., 2004. Thermal conductivity of rocks and its variation with uniaxial and triaxial stress. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 41: 1133-1138.

Durutürk, Y.S., 1999. The variation of thermal conductivity with pressure in rocks and the investigation of its effect in underground mines. Cumhuriyet University Sivas, Turkey, 188.

Gökçü, K., 2004. Determination of relationships between thermal conductivity and material properties of rocks. *Journal of University of Science and Technology*. Beijing, 11: 297.

Hartmann, A., Rath, V., Clauser, C., 2005. Thermal conductivity from core and well log data. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 42: 1042-1055.

Lee, T.C., 1989. Thermal conductivity measured with a line source between two dissimilar media equals their mean conductivity. *J. Geophys. Res.*, 94(B9): 12443-12447.

Özkahraman, H.T., Selver, R., Isik, E.C., 2004. Determination of the thermal conductivity of rock from P-wave velocity. *International Journal of Rock Mechanics and*

Mining Sciences, 41: 703-708.

Popov, Y., Tertychnyi, V., Romushkevich, R., et al., 2003. Interrelations between thermal conductivity and other physical properties of rocks: Experimental data. *Pure Appl. Geophys.*, 160: 1137-1161.

Pribnow, D., Williams, C.F., Burkhardt, H., 1993. Well log-derived estimates of thermal conductivity in crystalline rocks penetrated by the 4 km deep KTB Vorbohrung. *Geophys. Res. Lett.*, 20(12): 1155-1158.

Prinow, D., Sass, J.H., 1995. Determination of thermal conductivity for deep boreholes. *J. Geophys. Res.*, 100: 9981-9994.

Sass, J.H., Lachenbruch, A.H., Moses, T.H., 1992. Heat flow from a scientific research well at Cajon Pass, California. *J. Geophys. Res.*, 97(B4): 5017-5030.

Seipold, U., Raab, S., 2000. A Method to measure thermal conductivity and thermal diffusivity under pore and confining pressure. *Phys. Chem. Earth*, 25(2): 183-187.

Shen, X.J., Yang, S.Z., Shen, J.Y., 1995. Heat flow study and analysis along the Golmud-Ejinaqi geotranssect. *Chinese J. Geophys.*, 38 (Suppl. II): 86-97 (in Chinese with English abstract).

Silliman, S.E., Neuzil, C.E., 1990. Borehole determination of formation thermal conductivity using a thermal pulse from injected fluid. *J. Geophys. Res.*, 95(B6): 8697-8704.

Singh, T.N., Sinha, S., Singh, V.K., 2006. Prediction of thermal conductivity of rock through physico-mechanical properties. *Building and Environment* (in press).

Williams, C.F., Anderson, R.N., Broglia, C., et al., 1988. In situ investigations of thermal conductivity, heat production, and hydrothermal circulation in the Cajon Pass scientific drill hole. *California. Geophys. Res. Lett.*, 15(9): 985-988.

附中文参考文献

迟清华, 鄯明才, 1998. 华北地台岩石放射性元素与现代大陆岩石圈热结构和温度分布. *地球物理学报*, 41(1): 38-47.

沈显杰, 杨淑贞, 沈继英, 1995. 格尔木-额济纳旗地学断面热流分析与研究. *地球物理学报*, 38(增 II): 86-97.