

【环境与能源 / Environment and Energy】

广东惠州地区钻孔岩芯热导率测试与分析

唐科¹, 黄少鹏¹, 魏正安¹, 张敏², 赵欣楠³, 刘远周¹

1) 深圳大学土木与交通工程学院, 广东深圳518060; 2) 广东省有色金属地质局九三五队, 广东惠州516001;
3) 惠州学院地理与旅游学院, 广东惠州516007

摘要: 岩石热导率测试和分析有助于广东惠州地区大地热流计算、岩石圈热结构研究以及地热资源评价。从广东惠州地区22个钻孔中采集研究区主要岩石类型岩芯样品207个, 采用光学扫描测量方法对这些样品进行热导率测试, 测量值介于1.74~5.46 W/(m·K)之间, 平均值为(3.25±0.52) W/(m·K)。其中, 各类岩石样品数和平均热导率分别为: 32块砂岩(3.40±0.67) W/(m·K), 11块砾岩(3.15±0.76) W/(m·K), 63块灰岩(3.12±0.39) W/(m·K), 55块花岗岩(3.33±0.40) W/(m·K), 1块辉绿岩为1.84 W/(m·K), 2块辉绿玢岩(3.08±0.27) W/(m·K), 9块熔结凝灰岩(3.24±0.10) W/(m·K), 9块花岗片麻岩(2.81±0.26) W/(m·K), 3块变质粉砂岩(3.92±0.25) W/(m·K), 12块变质砂岩(3.38±0.68) W/(m·K), 10块大理岩(3.48±0.42) W/(m·K)。分析不同因素对岩石热导率的影响发现, 矿物组成是影响岩石热导率的主要因素, 主要造岩矿物中石英的热导率相对较大, 岩石中石英含量很大程度上影响了岩石热导率。这一效应对砂岩热导率的影响尤其明显, 不同石英含量的砂岩热导率可以相差很大。相较于四川盆地和松辽盆地, 广东惠州地区和中国东南地区砂岩中的石英含量相对更高, 这也是本研究测量得到的砂岩热导率明显高于四川盆地和松辽盆地同类岩石热导率的主要原因。研究结果为后续广东惠州地区大地热流和岩石圈热结构分析提供了数据参考。

关键词: 地热学; 热导率; 岩芯样品; 矿物组成; 砂岩; 石英; 广东惠州

中图分类号: P314

文献标志码: A

DOI: 10.3724/SP.J.1249.2024.01001

Measurement and analysis of the thermal conductivity of borehole core samples from Huizhou, Guangdong, China

TANG Ke¹, HUANG Shaopeng¹, WEI Zheng'an¹, ZHANG Min²,
ZHAO Xinnan³, and LIU Yuanzhou¹

1) College of Civil and Transportation Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, Guangdong Province, P. R. China

2) Team 935 of Guangdong Nonferrous Metals Geological Bureau, Huizhou 516001, Guangdong Province, P. R. China

3) School of Geography and Tourism, Huizhou University, Huizhou 516007, Guangdong Province, P. R. China

Abstract: Thermal conductivity of rocks is an indispensable thermophysical parameter in the fields of terrestrial heat flow study, lithospheric thermal structure analysis, geothermal resources exploration and civil engineering. This paper presents the thermal conductivity measurements of 207 core samples of various rock types from 22 boreholes in Huizhou area of Guangdong Province, South China. The core samples were measured with the TCS optical scanning method. The measured values of thermal conductivity of the 207 samples range from 1.74 to 5.46 W/(m·K) with a

Received: 2023-04-18; Accepted: 2023-08-03; Online (CNKI): 2023-10-09

Foundation: National Natural Science Foundation of China (U20A2096); Shenzhen Basic Research Foundation (20200827003238001)

Corresponding author: Professor HUANG Shaopeng (shaopeng@szu.edu.cn)

Citation: TANG Ke, HUANG Shaopeng, WEI Zheng'an, et al. Measurement and analysis of the thermal conductivity of borehole core samples from Huizhou, Guangdong, China [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2024, 41(1): 1-9. (in Chinese)



mean of $(3.25 \pm 0.52) \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$. The average thermal conductivity and the number of samples for each sampled rock type are $(3.40 \pm 0.67) \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ for 32 pieces of sandstone, $(3.15 \pm 0.76) \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ for 11 pieces of conglomerate, $(3.12 \pm 0.39) \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ for 63 pieces of limestone, $(3.33 \pm 0.40) \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ for 55 pieces of granite, $1.84 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ for 1 piece of diabase, $(3.08 \pm 0.27) \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ for 2 pieces of allgovite, $(3.24 \pm 0.10) \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ for 9 pieces of ignimbrite, $(2.81 \pm 0.26) \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ for 9 pieces of granite gneiss, metasandstone, $(3.38 \pm 0.68) \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ for 3 pieces of metamorphic siltstone, $(3.92 \pm 0.25) \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ for 12 pieces of metamorphic sandstone, and $(3.48 \pm 0.42) \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ for 10 pieces of marble, respectively. The effect of various factors on the thermal conductivity of rocks was analyzed. Mineral composition is found to be the main factor affecting the thermal conductivity, especially the content of quartz, which is a main diagenetic mineral with high thermal conductivity, is a key factor. The effect is particularly significant with sandstones, of which different quartz contents would result in very much different thermal conductivity. This is the main reason why the rock thermal conductivity measured in this paper is highly consistent with the results previously obtained in Southeast China, but significantly higher than that of the same type of rocks in the Sichuan Basin and Songliao Basin. The results of this study lay an important data foundation for further investigations of geothermal heat flow and lithospheric thermal structure in the study area.

Key words: geothermics; thermal conductivity; core sample; mineral composition; sandstone; quartz; Huizhou of Guangdong Province

岩石热物性参数是表征地球内部热的传递、储存和生成的一系列参数,包括岩石的热导率、比热、热扩散率和放射性生热率等^[1].其中,岩石热导率表示的是岩石导热能力的强弱,是研究一个地区大地热流、深部热状态和岩石圈热结构以及地热资源评价中不可或缺的热物性参数^[2-3],在采矿、油气勘探和土木工程等领域也具有重要的作用.

惠州位于中国粤港澳大湾区的东部,包括惠州在内的大湾区是中国开放程度最高、经济活力最强的区域之一,对新能源的需求旺盛.地热能作为一种清洁高效的再生新型能源,具有资源量丰富、成本低、效率高和稳定性好等优点.已有研究表明,在惠州地区内有很多地方极具地热资源开发利用的潜力^[4-5],但是目前惠州地区的地热资源开发利用形式单一,地热资源科学化和综合化利用程度不高,其重要原因是地热研究程度低,缺乏对于热导率等重要热物性参数的观测数据.

本研究对采集自惠州地区的 207 个岩石样品进行热导率测试,统计得到研究区岩石热导率整体分布情况,分析了研究区的不同岩性热导率参数特征,热导率随深度的变化规律,以及热导率的影响因素,为惠州地区开展后续大地热流计算及地热资源评价等提供数据支撑.

1 地质背景

惠州位于中国广东省中东部,在大地构造上属

华南地块东南沿海断褶带,从属于粤东梅县-惠阳拗陷带^[4].新元古代以来研究区经历了多期次复杂的构造演化.晚中生代以来,经历了由特提斯构造域向太平洋构造域的转变,古太平洋俯冲造成了包括研究区在内的整个华南地区发生广泛的岩浆-构造活动^[6].区内断裂构造方向以北东向为主,以近东西向和北西向为辅.深大断裂主要有紫金-博罗断裂和河源断裂,对本区域的构造格局、地质演化发挥重要的控制作用.

根据区域地质资料^[7-9],研究区内地层较为复杂,从老到新有震旦系-寒武系(变质砂岩和千枚岩)、泥盆系(白云质灰岩和大理岩)、三叠系-侏罗系(页岩、粉砂岩和细砂岩)、白垩系(粉砂质泥岩夹泥灰岩)古近系以及第四系(砂和砂砾石).受构造运动的影响,研究区经历了多期次剧烈岩浆侵位事件,大面积出露中生代中酸性侵入岩,其中,以燕山期花岗岩最为发育,岩性以黑云母花岗岩、黑云母二长花岗岩和花岗闪长岩为主.

2 热导率测试与结果

2.1 样品测试

本次热导率测量的 207 个岩芯样品选自 22 个钻井,其岩性主要是砂岩、灰岩和花岗岩等,地层主要包括泥盆系、石炭系和侏罗系等,埋深范围为 17~1 300 m,采样原则是样品尽可能包括研究区主要岩石类型.钻井位置及地理坐标分别如图 1 和表 1

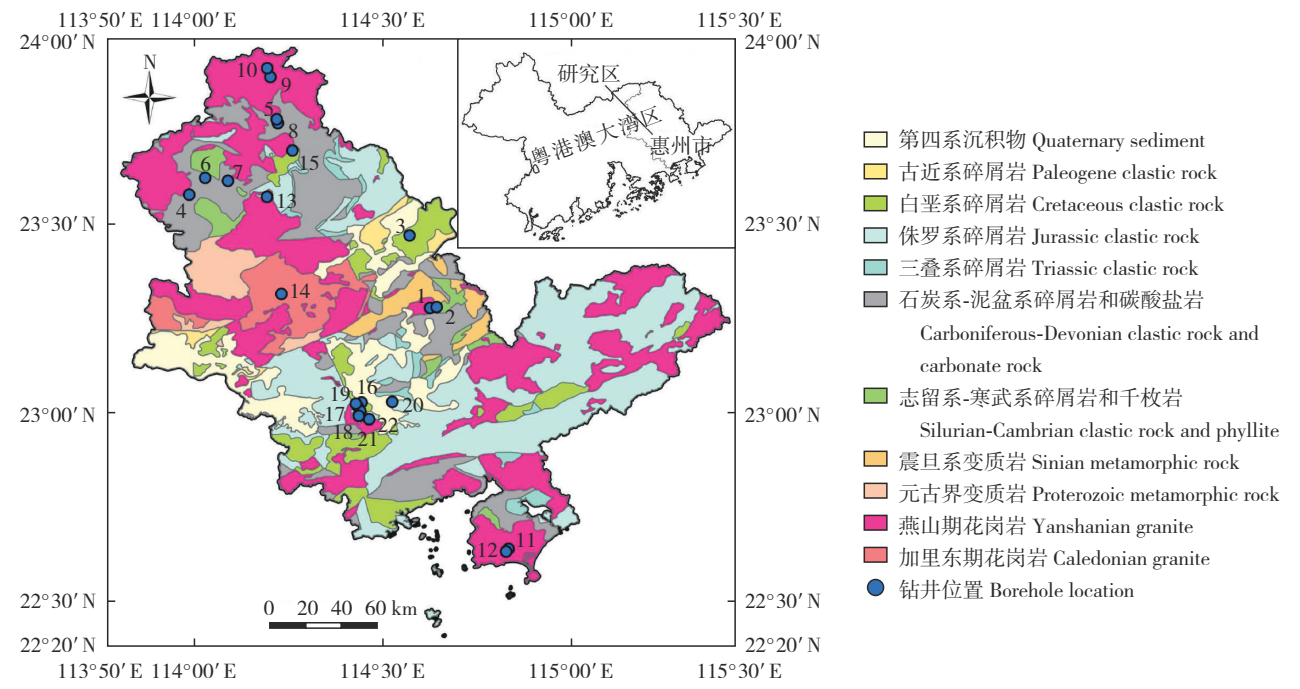


图 1 惠州地区地质简图及钻井位置示意图

Fig. 1 Schematic geology map of Huizhou showing the location of the core-sampled boreholes.

表 1 惠州地区采样钻井地理位置及取样数

Table 1 Locations and number of samples of the sampled boreholes in Huizhou area

编号	钻井	经纬度	取样数	编号	钻井	经纬度	取样数
1	HSD-ZK10	23°16′15.1″N 114°38′39.5″E	9	12	PH-ZK502	22°37′44.3″N 114°49′45.6″E	12
2	HSD-ZK001	23°16′38.0″N 114°38′41.2″E	7	13	LH-ZK002	23°34′10.1″N 114°11′38.7″E	10
3	HR-ZK002	23°28′1.2″N 114°34′21.4″E	15	14	HZ-ZK501	23°18′43.1″N 114°13′56.1″E	9
4	YH-ZK005	23°34′30.3″N 113°59′14.4″E	11	15	LC-ZK5	23°41′32.2″N 114°15′41.4″E	4
5	YH-ZK002	23°45′53.7″N 114°13′21.9″E	8	16	HNH-ZK1	23°1′26.1″N 114°26′43.0″E	5
6	YH-ZK10	23°37′11.1″N 114°1′47.3″E	12	17	HNH-ZK14	23°0′46.5″N 114°26′7.8″E	5
7	LH-ZK21	23°36′42.8″N 114°5′25.1″E	9	18	JSXC-K302	23°0′3.3″N 114°26′30.6″E	6
8	ZW-ZK31	23°46′29.4″N 114°13′11.6″E	15	19	JSXC-K204	23°1′14.1″N 114°25′48.4″E	5
9	LT-ZK61	23°53′13.6″N 114°12′11.3″E	25	20	JSXC-K315	23°1′32.5″N 114°31′36.7″E	9
10	LT-ZK64	23°54′37.7″N 114°11′40.6″E	6	21	JSXC-K504	22°59′18.2″N 114°26′17.2″E	9
11	PH-ZK104	22°38′8.8″N 114°50′7.9″E	10	22	JSXC-K900	22°58′47.0″N 114°27′55.2″E	6

所示, 样品相关信息及测试结果请扫描论文末页二维码查看补充材料表 S1。

热导率测试所用光学扫描热导仪 (thermal conductivity scanning, TCS) 为德国 Lippmann 公司制造, 测量范围为 $0.2 \sim 25.0 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, 测试分辨率为 $0.001 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, 测量精度为 $\pm 3\%$ 。该仪器具有操作简单、省时高效、对测试样品无损坏和准确率高等优点, 已广泛应用于国内外岩石热导率测量工作中, 如法国 EPS1 钻孔岩石物理非均质性研究^[10], 鄂尔多斯盆地岩石热导率测试^[11]等。测量前需要在样品平面上均匀涂抹厚度约 $25 \sim 40 \mu\text{m}$ 黑色油漆, 以减少岩石表面光线反射对吸热效率的影响。在室温 (25°C) 常压 (1 个大气压) 环境下, 仪器通过 1 个移动的热源对岩芯样品进行扫描, 低温传感器和高温传感器连续记录待测样品被侧面加热前后的温度, 根据加热前后两个传感器接收到的温度差值, 并与已知热导率的标样进行对比, 计算出样品的热导率。被测样品随热源加热的温度变化 ΔT 取决于扫描表面单元点吸收的热量 Q 、热源与测点的距离 x 和待测样品热导率 λ , 其关系^[12]为

$$\Delta T = \frac{Q}{2\pi x \lambda} \quad (1)$$

在热源功率恒定的情况下, Q 和 x 为定值, λ 与已知标样的热导率 λ_s 之间存在以下关系,

$$\lambda = \frac{\Delta T_s}{\Delta T_m} \lambda_s \quad (2)$$

其中, ΔT_m 和 ΔT_s 分别为待测样品和标样升温值。

2.2 测试结果

图 2 为惠州地区不同岩石热导率分布直方图。热导率测量结果显示, 惠州地区 207 个样品岩石热导率变化范围为 $1.74 \sim 5.46 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, 主要分布在 $2.5 \sim 4.0 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 之间, 个别样品较高, 可达 $5.0 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 以上, 平均值为 $(3.25 \pm 0.52) \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, 见图 2。

表 2 是按岩性统计的结果 (n 代表岩石样品个数)。由表 2 可见, 砂岩热导率相对偏高, 砾岩和灰岩的热导率较为接近。岩浆岩类岩石中, 花岗岩热导率与熔结凝灰岩热导率相差不大。辉绿岩和辉绿玢岩样品数量少, 不确定性比较大。变质岩类岩石中, 花岗片麻岩、变质粉砂岩、变质砂岩和大理岩相比, 花岗片麻岩的热导率较小, 变质砂岩和大理岩的热导率较大且较为接近。

图 3 为岩芯数目较多的砂岩、灰岩和花岗岩热

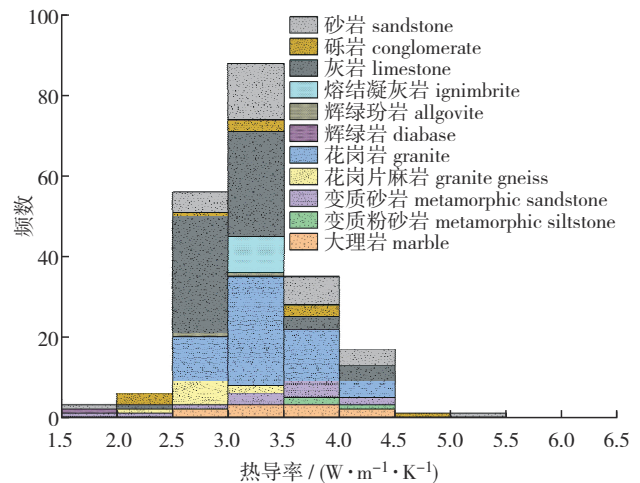


图 2 惠州地区不同岩石热导率分布直方图

Fig. 2 Distribution histogram of thermal conductivity of different rocks in the Huizhou area.

表 2 惠州地区不同岩石的热导率

Table 2 Thermal conductivity of different rocks in Huizhou

岩性	n	热导率范围/ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	平均热导率/ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)
砂岩	32	1.74 ~ 5.46	3.40 ± 0.67
砾岩	11	2.07 ~ 4.69	3.15 ± 0.76
灰岩	63	2.30 ~ 4.45	3.12 ± 0.39
花岗岩	55	2.58 ~ 4.46	3.33 ± 0.40
辉绿岩	1	1.84	1.84
辉绿玢岩	2	2.81 ~ 3.34	3.08 ± 0.27
熔结凝灰岩	9	3.08 ~ 3.36	3.24 ± 0.10
花岗片麻岩	9	2.50 ~ 3.27	2.81 ± 0.26
变质粉砂岩	3	3.68 ~ 4.27	3.92 ± 0.25
变质砂岩	12	1.92 ~ 4.26	3.38 ± 0.68
大理岩	10	2.85 ~ 4.13	3.48 ± 0.42

导率数据统计直方图。由图 3 可见, 在研究区内, 同一岩性不同岩石样品之间以及不同岩性之间热导率存在着明显的差异。研究区内变质粉砂岩的热导率最高, 其次是砂岩, 花岗片麻岩的热导率最低。砂岩的热导率变化范围较其他岩性相比最大, 这可能是由于不同样品砂岩的矿物组成不一以及砂岩样品埋深差距大导致孔隙率变化大相关。

从这批岩石样品热导率测量结果 (图 4) 看, 砂岩、灰岩、花岗岩热导率与深度相关性不大。这很可能是由于所采样品的深度比较浅, 大部分样品集中在埋深小于 0.5 km 的浅部地层, 因此热导率随深度变化的趋势不明显。

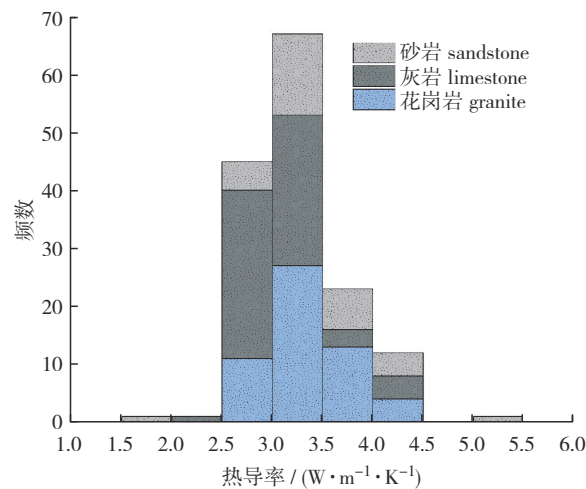


图3 砂岩、灰岩和花岗岩热导率数据统计直方图
Fig. 3 Histograms of the thermal conductivities of the core samples of sandstone, limestone and granite.

3 讨论

3.1 与中国东南地区岩石热导率对比

熊亮萍等^[13]报道了在中国东南地区从109个钻

孔中采集的712个岩石样品的热导率测量结果,对比本研究惠州地区与东南地区岩石热导率测量(表3).由表3可发现,两项研究中的砂岩、砾岩、灰岩、花岗岩和大理岩热导率值相近,砾岩热导率相差最大为0.38 W/(m·K),在测量数据统计误差范围内.大理岩在惠州地区和东南地区的各同类岩石对比中热导率均为最大,其原因可能在于大理岩属变质岩类,经过重结晶作用和变质作用后,一方面会使岩石孔隙度降低,结构更致密,热导率升高^[14];另一方面,经过变质作用后岩石的内部结构和矿物组成等发生变化,导致热导率发生变化.与其他岩性相比,本研究和熊亮萍等^[12]测得的砂岩的热导率变化幅度均较大,这可能是由于不同样品砂岩的矿物组成不一以及与砂岩孔隙率变化大相关.东南地区采集的712块岩石样品热导率测量值为2.0~4.0 W/(m·K),大于5 W/(m·K)的样品占比不到10%,这与本研究207个岩石样品热导率的测量结果一致,惠州地区岩石热导率(图2)整体上也呈现出类似的分布规律.

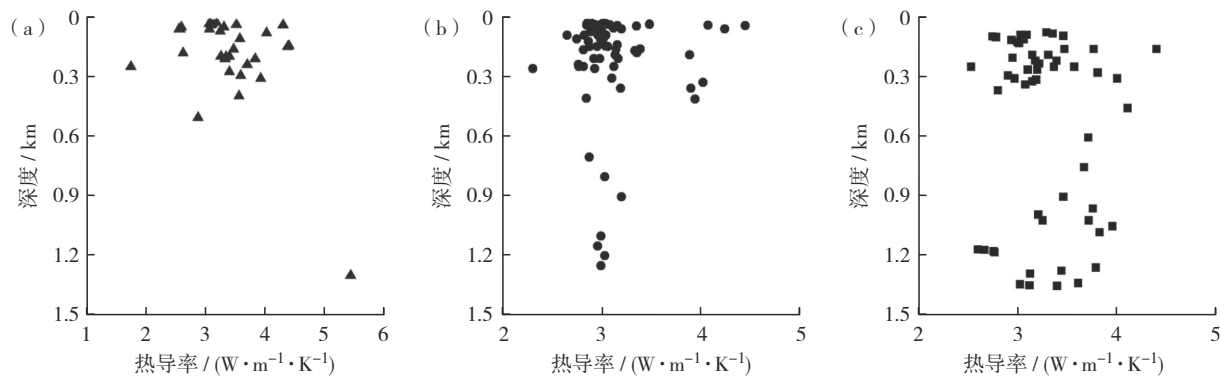


图4 (a)砂岩、(b)灰岩和(c)花岗岩样品热导率与深度的关系
Fig. 4 Relationship between thermal conductivity and depth of the core samples of (a) sandstone, (b) limestone and (c) granite.

表3 惠州地区与其他地区部分岩石实测热导率对比

Table 3 Comparison of measured thermal conductivity of rocks from Huizhou and other areas						W/(m·K)
岩性地区	砂岩	砾岩	灰岩	花岗岩	大理岩	数据来源
惠州地区	3.40 ± 0.67 (n = 32)	3.15 ± 0.76 (n = 11)	3.12 ± 0.39 (n = 63)	3.33 ± 0.40 (n = 55)	3.48 ± 0.42 (n = 10)	本研究
东南地区	3.41 ± 1.22 (n = 181)	3.53 ± 0.65 (n = 11)	3.33 ± 0.56 (n = 56)	3.15 ± 0.32 (n = 68)	3.67 ± 1.01 (n = 53)	熊亮萍等 ^[13] , 1994
四川盆地	3.06 ± 0.73 (n = 108)		2.53 ± 0.44 (n = 87)			TANG等 ^[17] , 2019
松辽盆地	1.89 ± 0.64 (n = 80)	2.18 ± 0.57 (n = 11)				李潇等 ^[18] , 2022

3.2 矿物成分对岩石热导率的影响

岩石热导率的高低很大程度上取决于其造岩矿物热导率的高低。不同矿物之间的热导率差异很大, 常见矿物中, 石英、白云石、方解石、辉石、长石的热导率分别为 7.69、5.50、3.57、3.80 和 $1.9 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ^[15]。在主要的造岩矿物中石英热导率相对较大, 是影响岩石热导率的主要矿物成分, 例如石英砂岩的热导率值最高可达 $6.46 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ^[13]。ZHAO 等^[16]通过对 47 块花岗岩岩样进行了热导率测试研究, 发现在孔隙率相同且完全饱水时, 岩石热导率主要由石英含量决定, 随着石英含量的增加, 热导率明显增大。

TANG 等^[17]和李潇等^[18]分别发表了四川盆地和松辽盆地沉积岩的热导率测量成果, 这两个地区的平均砂岩样品热导率分别为 $(3.06 \pm 0.73) \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 和 $(1.89 \pm 0.64) \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, 明显小于惠州地区和东南地区^[12]砂岩平均热导率 $(3.40 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 和 $3.41 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$)。造成这种热导率差异的原因可能是岩石的矿物组成不同, 特别是石英含量不同。

左银辉等^[19]对粤东、粤中地区中生界储层特征研究结果表明, 区内上三叠统岩石类型主要为长石石英砂岩, 石英体积分数大于 75%; 侏罗系岩石类型绝大多数为石英砂岩, 石英及硅质岩屑体积分数超过 95%; 白垩系地层岩石类型主要为长石石英砂岩、岩屑长石石英砂岩和长石石英杂砂岩。

惠州地区砂岩总体上以石英砂岩和长石石英砂岩等为主, 石英含量占碎屑总量 75%(体积分数)以上。但是松辽盆地北部砂岩主要为岩屑长石砂岩和长石岩屑砂岩, 碎屑成分主要为石英、长石和岩屑, 石英体积分数仅为 21.8%~33.9%^[20]。四川盆地侏罗系地层砂岩石英体积分数也小于惠州地区, 为 35%~89%, 平均为 50%^[21]。石英是主要的造岩矿物之一, 且热导率相对较大, 其含量的多少对岩石热导率具有重大影响。因此, 惠州地区和东南地区砂岩中较高的石英含量可能是该地区砂岩热导率显著高于四川盆地和松辽盆地砂岩热导率的直接原因。

本研究岩石热导率测试结果中, 变质砂岩、变质粉砂岩以及花岗岩的热导率均较高, 分别为 (3.38 ± 0.68) 、 (3.92 ± 0.25) 和 $(3.33 \pm 0.40) \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, 这与它们的矿物组成有直接关系。比如, 大理岩的主要矿物成分为方解石, 灰岩的主要矿物成分为方解石和白云石, 热导率相对较高的方

解石和白云石是本地区大理岩和白云岩热导率较高的直接原因。花岗片麻岩中的主要矿物是长石和石英, 且长石含量高于石英, 而长石的热导率较小, 这也直接造成了花岗片麻岩的热导率相对较小。辉绿岩和辉绿玢岩的主要矿物组成为长石(体积分数为 60% 以上)和辉石(体积分数不超过 40%), 尽管辉石的热导率较大, 但含量较高的长石具有相对较低的热导率, 使得辉绿岩和辉绿玢岩的热导率相对较小。从矿物学的角度看, 研究区的熔结凝灰岩与流纹岩的成分相当, 主要由硅质矿物构成, 因此, 其热导率 $(3.24 \pm 0.10) \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 与花岗岩 $(3.33 \pm 0.40) \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 较为相近。

3.3 孔隙率和温压条件对岩石热导率的影响

对于矿物组成相近的岩石样品, 热导率依然存在一定的差距, 这可能与孔隙率不同相关。大多数岩石都具有孔隙, 含孔隙岩石是一种多相介质系统, 干岩样和饱水岩样均属二相介质, 含水而非饱和的岩样为三相介质, 充填于孔隙中的流体(如水和空气等)的热导率远远小于岩石基质的热导率, 因此岩石的热导率一般随着孔隙率的增大而减小。这种影响在沉积岩当中表现得尤为明显。CLAUSER 等^[22]认为, 矿物组成对各类岩石热导率的影响均较大, 特别是石英含量, 但火山岩和沉积岩的热导率除了受矿物组成影响之外, 还受岩石中孔隙率的影响。

含水饱和度也会影响岩石原位热导率^[23]。由于大多数岩石都具有一定的孔隙率, 地下热传导一般是在饱水情况下进行的, 而实际测量时样品是干燥的, 孔隙当中充填的是空气, 而在饱水状态下空隙充填的是水。空气的热导率 $(0.025 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K}))$ 远小于水的热导率 $(0.067 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K}))$ ^[24], 这就导致干燥岩石样品的热导率可能低于岩石的原位热导率。

本研究虽然没有开展岩石样品孔隙率测量和饱水实验, 但是开展了与孔隙率相关的吸水率测试, 测试结果请扫描论文末页右下角二维码查看补充材料表 S2。由表 S2 可见, 36 个测试样品的平均吸水率为 0.61%。一般来说, 吸水率较低, 岩石的孔隙率也就相对较低。张娜等^[25]通过有关孔隙率对岩石吸水率影响的实验, 比较分析 3 组岩样平均有效孔隙率与平均吸水率之间的关系, 发现它们之间具有较好的正相关关系。杨淑贞等^[23]对孔隙岩石的饱水试验研究发现, 对于低孔隙率的致密岩类, 干试样与饱水试样热导率的差值不大, 可不作校正。

另外,岩石的原位热导率与在室温常压条件下实测得到的热导率可能存在一定的差别.一方面岩石矿物晶体的传热几乎完全依靠晶格的震动来实现,当温度升高时,由非谐振动发散引起的平均自由程减小,从而导致岩石的热导率降低^[26];另一方面,随着岩石埋深的增大,岩石的压实程度增高,使得岩石的孔隙、裂缝趋于闭合,孔隙率减小,从而导致热导率增大.所以一般情况下,岩石的热导率随着温度的升高而减小,随着压力增大而增大^[27],温度和压力对于岩石热导率的影响在一定程度上是可以相互抵消的.由于本研究中的岩石样品大多数埋深较浅(< 500 m),受到的地层压力较小,因此,在实验室常压条件下实测的岩石热导率应该接近真实的原位热导率.岩石样品原位温度大多在23.7~40.0℃之间,与室温差别不大,因此,在室温条件下实测的岩石热导率也比较能够反映真实的原位热导率.

3.4 热导率测试结果的大地热流含义

由地球内部以传导的形式单位时间通过某一地区单位面的热流称为该地区的大地热流,简称热流.大地热流是表征地球内部热状态和热结构最直接最基础的地球物理参数,在数值上等于岩石热导率和地温梯度的乘积.目前尚未见关于惠州地区大地热流的报道,迄今粤港澳大湾区中国大陆地区大地热流汇编^[28]中仅有广州和深圳共计5个热流数据,平均地温梯度和热导率分别为22.46 K/km和3.34 W/(m·K),平均热流值为75 mW/m²,明显高于全国平均值(60.4±12.3) mW/m².本研究207个岩芯样品热导率平均为(3.25±0.52) W/(m·K),略低于前人报道的热导率平均值^[28].目前,惠州地区的钻孔温度数据正在处理之中,从初步结果看,研究区的地温梯度可能高于广州和深圳地区的平均地温梯度.目前尚未获得具有代表性的地温梯度数据,还不足以讨论研究区的大地热流分布,但本研究钻孔岩芯样品热导率的测定为后续研究区大地热流和岩石圈热结构分析奠定了重要的数据基础.

结 语

中国广东惠州地区22个钻孔207个岩芯样品的岩石热导率主要分布在2.5~4.0 W/(m·K)之间,平均值为(3.25±0.52) W/(m·K).沉积岩类中,砂岩、砾岩和灰岩样品的平均热导率值分别为

3.40、3.15和3.12 W/(m·K);火成岩类中,辉绿岩、辉绿玢岩、花岗岩和熔结凝灰岩热导率分别为1.84、3.08、3.33和3.24 W/(m·K);变质岩类中,花岗片麻岩、变质砂岩、变质粉砂岩和大理岩分别为2.81、3.38、3.92和3.48 W/(m·K).

本研究热导率测试的岩芯样品所处地层主要包括泥盆系、石炭系和侏罗系等,埋深范围为17~1300 m,但大部分样品集中在埋深小于500 m的浅部地层,因此实测岩石热导率随深度变化的趋势不明显.

惠州地区岩石样品热导率测量结果与熊亮萍等^[13]在中国东南地区采集测量的同类岩石热导率高度一致,但砂岩热导率明显高于四川盆地和松辽盆地同类岩石样品的热导率,其主要原因是包括惠州地区在内的东南地区砂岩中石英含量高,惠州地区的岩石热导率主要受矿物成分的控制.

本研究对从惠州地区22个钻孔采集的具有代表性的沉积岩、侵入岩和变质岩共计207个岩芯样品进行了热导率测试及其影响因素分析,填补了研究区岩芯样品热导率数据的空白,为后续研究区大地热流和岩石圈热结构分析提供了数据基础.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(U20A2096);深圳市基础研究计划资助项目(20200827003238001)

作者简介:唐科(2100471070@email.szu.edu.cn),深圳大学硕士研究生.研究方向:地热地球物理、岩石热物性测试与分析.

引 文:唐科,黄少鹏,魏正安,等.广东惠州地区钻孔岩芯热导率测试与分析[J].深圳大学学报理工版,2024,41(1):1-9.

参考文献 / References:

- [1] 汪集暘. 地热学及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
WANG Jiyang. Geothermics and its applications [M]. Beijing: Science Press, 2015. (in Chinese)
- [2] 饶松, 胡圣标, 朱传庆, 等. 准噶尔盆地大地热流特征与岩石圈热结构[J]. 地球物理学报, 2013, 56(8): 2760-2770.
RAO Song, HU Shengbiao, ZHU Chuanqing, et al. The characteristics of heat flow and lithospheric thermal structure in Junggar Basin, Northwest China [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56(8): 2760-2770. (in Chinese)
- [3] 余如洋, 黄少鹏, 张炯, 等. 二连盆地白音查干凹陷和乌里雅斯太凹陷岩石热导率测试与分析[J]. 岩石学报, 2020, 36(2): 621-634.

- YU Ruyang, HUANG Shaopeng, ZHANG Jiong, et al. Measurement and analysis of the thermal conductivities of rock samples from the Baiyinchagan Sag and Uliastai Sag, Erlian Basin, northern China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2020, 36(2): 621-634. (in Chinese)
- [4] 旷健, 祁士华, 王帅, 等. 广东惠州花岗岩体及其地热意义[J]. *地球科学*, 2020, 45(4): 1466-1480.
- KUANG Jian, QI Shihua, WANG Shuai, et al. Granite intrusion in Huizhou, Guangdong province and its geothermal implications [J]. *Earth Science*, 2020, 45(4): 1466-1480. (in Chinese)
- [5] 魏正安, 黄少鹏, 王成善, 等. 粤港澳大湾区地下水地球化学特征及其热储含义[J]. *地球学报*, 2023, 44(1): 117-132.
- WEI Zheng'an, HUANG Shaopeng, WANG Chengshan, et al. Geochemistry and its geothermal reservoir implications of geothermal water in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area, South China [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 2023, 44(1): 117-132. (in Chinese)
- [6] 甘浩男, 蔺文静, 王贵玲, 等. 广东惠州黄沙洞地区岩石圈热-流变结构及其热源启示[J]. *水文地质工程地质*, 2023, 50(4): 26-38.
- GAN Haonan, LIN Wenjing, WANG Guiling, et al. Lithospheric thermo-rheological structure of the Huangshadong geothermal field in Huizhou of Guangdong and its heat-sources implications [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2023, 50(4): 26-38. (in Chinese)
- [7] 张敏, 旷健, 肖志才, 等. 广东惠州燕山期以来地质构造演化: 对华南构造的新启示[J]. *地球科学*, 2021, 46(1): 242-258.
- ZHANG Min, KUANG Jian, XIAO Zhicai, et al. Geological evolution since the Yanshanian in Huizhou, Guangdong province: new implications for the tectonics of South China [J]. *Earth Science*, 2021, 46(1): 242-258. (in Chinese)
- [8] 田峰, 祁士华, 王帅, 等. 广东惠州石坝-黄沙洞地区岩石放射性生热率特征研究[J]. *地质科学*, 2020, 55(4): 1277-1289.
- TIAN Feng, QI Shihua, WANG Shuai, et al. Characteristics of radioactive heat production rate of rocks in Shiba-Huangshadong area, Huizhou, Guangdong Province [J]. *Chinese Journal of Geology*, 2020, 55(4): 1277-1289. (in Chinese)
- [9] 徐讲湾, 黄少鹏, 魏正安, 等. 粤港澳大湾区地热异常空间分布特征的 GIS 分析[J]. *深圳大学学报理工版*, 2023, 40(5): 588-598.
- XU Jiangwan, HUANG Shaopeng, WEI Zhengan, et al. Spatial characteristics of geothermal anomalies in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area based on GIS [J]. *Journal of Shenzhen University Science and Engineering*, 2023, 40(5): 588-598. (in Chinese)
- [10] HAFSEN S, GÉRAUD Y, ROSENER M, et al. Thermal conductivity and porosity maps for different materials: a combined case study of granite and sandstone [J]. *Geothermics*, 2017, 66: 143-150.
- [11] 崔景伟, 侯连华, 朱如凯, 等. 鄂尔多斯盆地延长组长 7 页岩层段岩石热导率特征及启示[J]. *石油实验地质*, 2019, 41(2): 280-288.
- CUI Jingwei, HOU Lianhua, ZHU Rukai, et al. Thermal conductivity properties of rocks in the Chang 7 shale strata in the Ordos Basin and its implications for shale oil in situ development [J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2019, 41(2): 280-288. (in Chinese)
- [12] POPOV Y, BEARDSMORE G, CLAUSER C, et al. ISRM suggested methods for determining thermal properties of rocks from laboratory tests at atmospheric pressure [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2016, 49(10): 4179-4207.
- [13] 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.
- XIONG Liangping, HU Shengbiao, WANG Jian. Analysis on the thermal conductivity of rocks from SE China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 1994, 10(3): 323-329. (in Chinese)
- [14] 陈儒庆, 袁奎荣. 岩石的热导率对岩石热变质的影响[J]. *桂林冶金地质学院学报*, 1992, 12(3): 304-308.
- CHEN Ruqing, YUAN Kuirong. Influence of thermal conductivities on thermal metamorphism of wall rocks [J]. *Journal of Guilin College of Geology*, 1992, 12(3): 304-308. (in Chinese)
- [15] HORAI K I. Thermal conductivity of rock-forming minerals [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1971, 76(5): 1278-1308.
- [16] ZHAO X G, WANG J, CHEN F, et al. Experimental investigations on the thermal conductivity characteristics of Beishan granitic rocks for China's HLW disposal [J]. *Tectonophysics*, 2016, 683: 124-137.
- [17] TANG Boning, ZHU Chuanqing, XU Ming, et al. Thermal conductivity of sedimentary rocks in the Sichuan basin, Southwest China [J]. *Energy Exploration & Exploitation*, 2019, 37(2): 691-720.
- [18] 李潇, 朱传庆, 邱楠生, 等. 松辽盆地北部岩石热导

- 率及其影响因素[J]. 地球学报, 2023, 44(1): 70-78.
- LI Xiao, ZHU Chuanqing, QIU Nansheng, et al. Thermal conductivity of rocks and its influencing factors in northern Songliao basin [J]. Acta Geoscientia Sinica, 2023, 44(1): 70-78. (in Chinese)
- [19] 左银辉, 邱楠生, 徐国强, 等. 粤东、粤中地区中生界储层特征研究[C]// 中国地球物理学会第二十五届年会. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2009: 258.
- ZUO Yinhui, QIU Nansheng, XU Guoqiang, et al. A study on the characteristics of the reservoir rocks of Mesozoic strata, East and Central Guangdong [C]// The 25th Annual Meeting of the Chinese Geophysical Society. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2009: 258. (in Chinese)
- [20] 邵红梅, 刘招君, 王成, 等. 松辽盆地北部深层砂岩成岩作用与孔隙演化[J]. 世界地质, 2005, 24(1): 58-62.
- SHAO Hongmei, LIU Zhaojun, WANG Cheng, et al. Diagenesis and pore evolution of deep sandstone in north of Songliao Basin [J]. Global Geology, 2005, 24(1): 58-62. (in Chinese)
- [21] 钱利军, 欧莉华, 郝强. 川西孝泉下沙溪庙组储层特征研究及主控因素[J]. 中国西部科技, 2015, 14(10): 33-36.
- QIAN Lijun, OU Lihua, HAO Qiang. Reservoir characteristics and influencing factors of the middle Jurassic formation in Xiaoquan area of western Sichuan [J]. Science and Technology of West China, 2015, 14(10): 33-36. (in Chinese)
- [22] CLAUSER C, HUENGES E. Thermal conductivity of rocks and minerals [M]// AHRENS T J. Rock Physics & Phase Relations: A Handbook of Physical Constants. Washington, DC, USA: American Geophysical Union, 1995: 105-126.
- [23] 杨淑贞, 张文仁, 沈显杰. 孔隙岩石热导率的饱水试验研究[J]. 岩石学报, 1986, 2(4): 83-91.
- YANG Shuzhen, ZHANG Wenren, SHEN Xianjie. Experimental research on the thermal conductivity of water-saturated porous rocks [J]. Acta Petrologica Sinica, 1986, 2(4): 83-91. (in Chinese)
- [24] NAGARAJU P, ROY S. Effect of water saturation on rock thermal conductivity measurements [J]. Tectonophysics, 2014, 626: 137-143.
- [25] 张娜, 赵方方, 张毫毫, 等. 岩石气态水吸附特性及其影响因素实验研究[J]. 矿业科学学报, 2017, 2(4): 336-347.
- ZHANG Na, ZHAO Fangfang, ZHANG Haohao, et al. Experimental study on water vapor absorption of rock and its influencing factors [J]. Journal of Mining Science and Technology, 2017, 2(4): 336-347. (in Chinese)
- [26] 陈驰, 朱传庆, 唐博宁, 等. 岩石热导率影响因素研究进展[J]. 地球物理学进展, 2020, 35(6): 2047-2057.
- CHEN Chi, ZHU Chuanqing, TANG Boning, et al. Progress in the study of the influencing factors of rock thermal conductivity [J]. Progress in Geophysics, 2020, 35(6): 2047-2057. (in Chinese)
- [27] ABDULAGATOV I M, EMIROV S N, ABDULAGATOVA Z Z, et al. Effect of pressure and temperature on the thermal conductivity of rocks [J]. Journal of Chemical & Engineering Data, 2006, 51(1): 22-33.
- [28] JIANG Guangzheng, HU Shengbiao, SHI Yizuo, et al. Terrestrial heat flow of continental China: updated dataset and tectonic implications [J]. Tectonophysics, 2019, 753: 36-48.

【中文责编: 晨兮; 英文责编: 之聿】



补充材料