

# 岩石热导率影响因素实验研究及其对地热资源评估的启示

朱传庆<sup>1,2\*</sup>, 陈驰<sup>1,2,3</sup>, 杨亚波<sup>1,2</sup>, 邱楠生<sup>1,2</sup>

1 中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249

2 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249

3 中国地质调查局广州海洋地质调查局, 广州 510075

\* 通信作者, zhucq@cup.edu.cn

收稿日期: 2022-01-18

国家自然科学基金“渤海湾盆地晚近时期构造-热演化与有效热源机制”(42172334)和国家重点研发计划课题“中国东部晚近时期热体制与深层高温地热聚集模式”(2021YFA0716003)资助

**摘要** “双碳”背景下, 作为清洁可再生能源的地热在能源结构中的地位逐渐受到重视。热传导是地球向外界散发热量的最主要方式, 岩石热导率对研究地温场和评估地热资源量具有重要作用。为了定量认识岩石热导率及其影响因素, 采用瞬态平板热源法测量了135件岩石样品的热导率, 并测量了部分样品的孔隙度、密度和矿物成分。测量结果表明典型岩石中, 火山岩热导率最小, 碎屑岩与侵入岩热导率接近, 碳酸盐岩的平均热导率最大, 侵入岩、火山岩、碎屑岩和碳酸盐岩的热导率分别为介于1.62~4.00 W/m·K, 1.09~2.07 W/m·K, 1.52~5.23 W/m·K和2.34~6.55 W/m·K, 4类岩石样品的热导率平均值分别为 $2.54 \pm 0.53$  W/m·K,  $1.50 \pm 0.24$  W/m·K,  $2.77 \pm 0.83$  W/m·K和 $4.21 \pm 1.28$  W/m·K。热导率与岩石组构关系密切, 矿物是影响热导率的重要因素, 高热导率的石英含量可以明显影响侵入岩和碎屑岩热导率, 白云石含量明显影响碳酸盐岩热导率; 碎屑岩的热导率与孔隙度负相关, 较大的孔隙度范围, 岩石热导率随着孔隙度升高而下降, 在较小的孔隙度范围内该趋势不明显; 岩石热导率和密度具有正相关性; 热导率的各向异性主要由岩石的层状构造导致, 块状结构侵入岩的热导率基本没有各向异性, 层理发育的岩石有明显的各向异性, 各向异性系数从1.08到2.08。低热导率盖层对地热资源聚集具有重要作用, 使地下深处来的热量聚集于盆地盖层底部和基底的顶端, 造成热储上部较高的温度分布。研究结果为认识岩石组构对热导率的影响以及深部温度场和地热资源评价中岩石热物性参数的建模问题提供了参考。

**关键词** 热导率; 密度; 孔隙度; 岩性; 各向异性

## Experimental study into the factors influencing rock thermal conductivity and their significance to geothermal resource assessment

ZHU Chuanqing<sup>1,2</sup>, CHEN Chi<sup>1,2,3</sup>, YANG Yabo<sup>1,2</sup>, QIU Nansheng<sup>1,2</sup>

1 College of Geoscience, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

2 State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

3 Guangzhou Marine Geological Survey, China Geological Survey, Guangzhou 510075, China

引用格式: 朱传庆, 陈驰, 杨亚波, 邱楠生. 岩石热导率影响因素实验研究及其对地热资源评估的启示. 石油科学通报, 2022, 03: 321-333

ZHU Chuanqing, CHEN Chi, YANG Yabo, QIU Nansheng. Experimental study into the factors influencing rock thermal conductivity and their significance to geothermal resource assessment. Petroleum Science Bulletin, 2022, 03: 321-333. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2022.03.029

**Abstract** China's 'Double Carbon' policy (carbon peaking and carbon neutrality goals), means geothermal energy, as a clean renewable energy, has gradually received attention in the energy domain. The thermal conductivity of rock plays an important role in studying the geothermal field and evaluating the amount of geothermal resources, as heat conduction is the main way that the Earth conveys heat to the outside. In order to quantitatively understand the thermal conductivity of rock and the factors influencing it, the thermal conductivity of 135 rock samples were measured by the transient plate heat source method (TPS) and the porosity, density and mineral composition of some selected samples were also measured to provide a dataset for the understanding on the influencing factors of rock thermal conductivity. The results show that the thermal conductivity of volcanic rocks is the lowest, the thermal conductivity of clastic rocks is close to that of intrusive rocks, and the average thermal conductivity of carbonate rocks is the highest, with the thermal conductivity of intrusive rocks, volcanic rocks, clastic rocks and carbonate rocks ranging from 1.62 to 4.00 W/m·K, 1.09 to 2.07 W/m·K, 1.52 to 5.23 W/m·K, and 2.34 to 6.55 W/m·K respectively. The average thermal conductivity of the four types of rock samples is  $2.54 \pm 0.53$  W/m·K,  $1.50 \pm 0.24$  W/m·K,  $2.77 \pm 0.83$  W/m·K and  $4.21 \pm 1.28$  W/m·K, respectively. There is a close relationship between thermal conductivity and rock fabric. Thermal conductivity of the rock-forming minerals is an important factor affecting rock thermal conductivity. Quartz, the typical mineral with a high thermal conductivity can obviously affect the thermal conductivity of intrusive rocks and clastic rocks, and dolomite content obviously affects the thermal conductivity of carbonate rocks. The thermal conductivity of clastic rocks is negatively correlated with porosity, it decreases with an increase of porosity in a larger porosity range, but the trend is not obvious when the porosity is relatively low. There is a positive correlation between rock thermal conductivity and density. The anisotropy of thermal conductivity is mainly caused by the stratified structure of rocks, that is, there is basically no anisotropy in the thermal conductivity of massive intrusive rocks. The anisotropy coefficients of stratified rocks range from 1.08 to 2.08. A low thermal conductivity cap plays an important role in the accumulation of geothermal resources, which makes the heat from depth accumulate at the bottom of the cap and the top of the basement, resulting in higher temperature distribution in the upper part of the geothermal reservoir. The results provide a reference for understanding the influence of rock fabric on thermal conductivity, the modeling of rock thermophysical parameters in a deep temperature field and geothermal resource evaluation.

**Keywords** thermal conductivity; density; porosity; lithology; anisotropy

doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2022.03.029

## 0 引言

能源安全和环境保护是当今社会发展中极为重要的两个问题。为了缓解对化石能源的依赖、减少碳和污染物排放<sup>[1-4]</sup>, 亟需扩大能源来源、开发清洁能源。地球内部蕴含着巨大的能量, 地热是地球上储量丰富的天然能源。“双碳”背景下, 作为清洁可再生能源的地热在能源结构中的地位逐渐受到重视。地热与其他可再生能源诸如太阳能、风能、生物质能等相比, 具有潜力大、能源利用系数高、稳定性强的优势<sup>[5]</sup>, 以其节能减排效果显著并且能够有效地缓解雾霾的特点, 已成为当前新能源开发利用的热点。

热传导是地球向外界散发热量的最主要方式<sup>[6]</sup>, 岩石的热导率对约束地球温度场、热演化和岩石圈热状态等有重要意义。已有文献表明, 选取不同的热导率对岩石圈张裂过程的模拟<sup>[7]</sup>、大地热流计算<sup>[8-9]</sup>、盆地地热史恢复<sup>[10]</sup>会产生较大差异的结果。在生产应用中, 热导率对地热资源开发<sup>[11-12]</sup>、矿山开采<sup>[13-14]</sup>、公路隧道修筑<sup>[15]</sup>、热电材料发电<sup>[16]</sup>等有重要的实际意义。

目前, 对岩石热导率影响因素的研究拓展到温度

和压力<sup>[17-21]</sup>等外部因素和矿物成分、孔隙度及含水饱和度、孔隙结构等内部因素方面<sup>[22-27]</sup>。然而由于天然岩石结构复杂, 目前对岩石组构与热导率关系的认识仍不完全明确, 岩石的热导率的计算模型难以精确建立。实验测试是获取岩石的热导率数据以及探讨其影响因素的重要手段。为了更好的认识岩石热导率及其影响因素, 本文利用具有高测试精度的瞬态平板热源法测量了135件岩石样品的热导率, 并测量了部分典型样品的密度、孔隙度和矿物成分, 分析了其对岩石热导率的影响, 通过地层垂向热导率差异对地温分布的影响讨论了地层热导率在地热资源评估的意义。研究对进一步认识岩石组构对热导率的影响, 为地热资源评价开发中岩石热导率参数的选取等具有参考价值。

## 1 实验方法

岩石的热导率测试仪器为基于瞬态平板热源法(Transient Plane Source Method, 简称TPS法)的Hot Disk 2500S热常数分析仪, 实验测试方法已有论述<sup>[28-29]</sup>。Hot Disk测量热物理性质的理论假设是探头(Sensor)发出的热流不能穿透样品边界, 样品尺寸需满足要求

(本次实验采用的样品尺寸为: 截面 5 cm×5 cm, 厚度 1.5 cm)。一次成功的测量首要考虑的因素是样品热导率的大致范围, 根据样品热导率的范围选择合适的探头。一般情况下, 样品的热导率越大, 所选探头的半径越大。探头的半径和样品的传热性能同时影响着测量时间和功率。判断测量成功与否有 4 个关键参数: 总体温升(Total Temperature Increase)、总体比特征时间(Total to Characteristic Time)、平均偏差(Mean Deviation)和探测深度(Probing Depth)。

总体温升是样品在整个测量过程中样品升高的最大值。在其他条件不变时, 总体温升正比于测量功率, 同时还和样品热导率、探头半径有关。在测量时间和功率一定时, 测量样品的热导率越大, 总体温升越小; 探头的半径越大, 总体温升越小。在一次测量中, 合理的总体温升是 2~5 K。

总体比特征时间正比于样品的热导率和测量时间, 反比于探头半径的平方:

$$C \propto \frac{\alpha \times t}{r^2} \quad (1)$$

其中,  $C$  为总体比特征时间,  $\alpha$  为样品热导率,  $t$  为测量时间,  $r$  为探头半径。在一次测量中, 合理的总体比特征时间为区间(0.33,1.0)。

探测深度  $D_p$  为热流传递最大距离。如图 1 所示, 在垂直方向样品的探测深度为  $D_p$ , 在水平方向样品的探测深度则为  $D_p+r$ ,  $r$  为探头半径。测试时的热流场为图 1 中截面绕垂直方向旋转 180° 构成的似椭球体。

探测深度取决于样品的热导率和测量时间。样品的热导率越大, 传热越快, 探测深度越深; 测量时间越长, 传热越远, 探测越深; 该过程的表达式如下:

$$D_p = 2\sqrt{\alpha t} \quad (2)$$

实验结果平均偏差为所测数据点拟合所得偏差, 和选择的测点有关。合理的平均偏差数量级为  $10^{-4}$ , 或者更小。只有同时满足总体温升在 2~5 K, 总体比上特征时间在 0.33~1, 探测深度不超出样品边界, 平均偏差为  $10^{-4}$  或更小才是一次合格的测量。

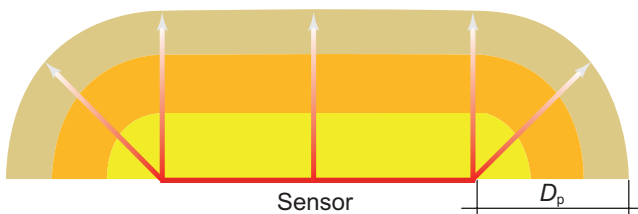


图 1 瞬态平板热源法热导率探测深度示意图

Fig. 1 Schematic diagram of probing depth of TPS method

## 2 结果与讨论

### 2.1 四类岩石的热导率特征

本次实验选取 135 块岩样, 包含 44 块侵入岩, 23 块火山岩, 36 块碎屑岩, 32 块碳酸盐岩, 测量其在常温常压下的热导率, 实验结果见附录 1、表 1 和图 2。本次实验侵入岩样品主要包含花岗岩、辉绿岩、辉长岩、正长岩、橄榄岩等, 热导率分布为 1.62~4.00 W/m·K, 平均值为 2.54±0.53 W/m·K。火山岩主要包含霏细岩、松脂岩、珍珠岩、细碧岩、安山岩等, 热导率分布为 1.09~2.07 W/m·K, 平均值为 1.50±0.27 W/m·K。碎屑岩包含石英砂岩、长石砂岩等, 粒度主要为细到中粒, 部分粗粒, 热导率分布为 1.52~5.23 W/m·K, 平均值为 2.77±0.83 W/m·K。碳酸盐岩主要包含白云岩、灰质白云岩、白云质灰岩和灰岩, 热导率分布为 2.34~6.55 W/m·K, 平均值为 4.21±1.28 W/m·K。其中白云岩及灰质白云岩热导平均值为 5.23±0.75 W/m·K, 显著大于灰岩及白云质灰岩热导率平均值 3.29±0.45 W/m·K。

四类岩石中, 碳酸盐岩的平均热导率最大, 明显高出其他三类岩石, 侵入岩和碎屑岩的平均热导率相似, 处于 2.50~3.00 W/m·K, 火山岩的热导率最小。热导率的分布也各有特点。侵入岩和火山岩的热导率分布比碳酸盐岩和碎屑岩更集中。原因为除石英具有较高热导率外, 其它矿物的热导率差异不大。在碳酸盐岩中, 方解石和白云石的热导率相差较大, 通常白云石的热导率为 4.00~6.00 W/m·K, 而方解石的热导率为 3.00 W/m·K 左右, 导致白云岩和灰岩的热导率分布具有较大差别。碎屑岩的热导率分布较广是因为石英含量起到了较大影响。石英是岩石材料中最明显、分布最广的高导热材料, 同为碎屑岩主要成分的长石和岩屑的热导率明显的低于石英。

表 1 四类岩石样品热导率测量结果统计

Table 1 Statistical result of thermal conductivity for four types rock

岩性	样品数量	热导率/(W/m·K)	平均值/(W/m·K)
侵入岩	44	1.62~4.00	2.54 ± 0.53
火山岩	23	1.09~2.07	1.50 ± 0.24
碎屑岩	36	1.52~5.23	2.77 ± 0.83
碳酸盐岩	32	2.34~6.55	4.21 ± 1.28

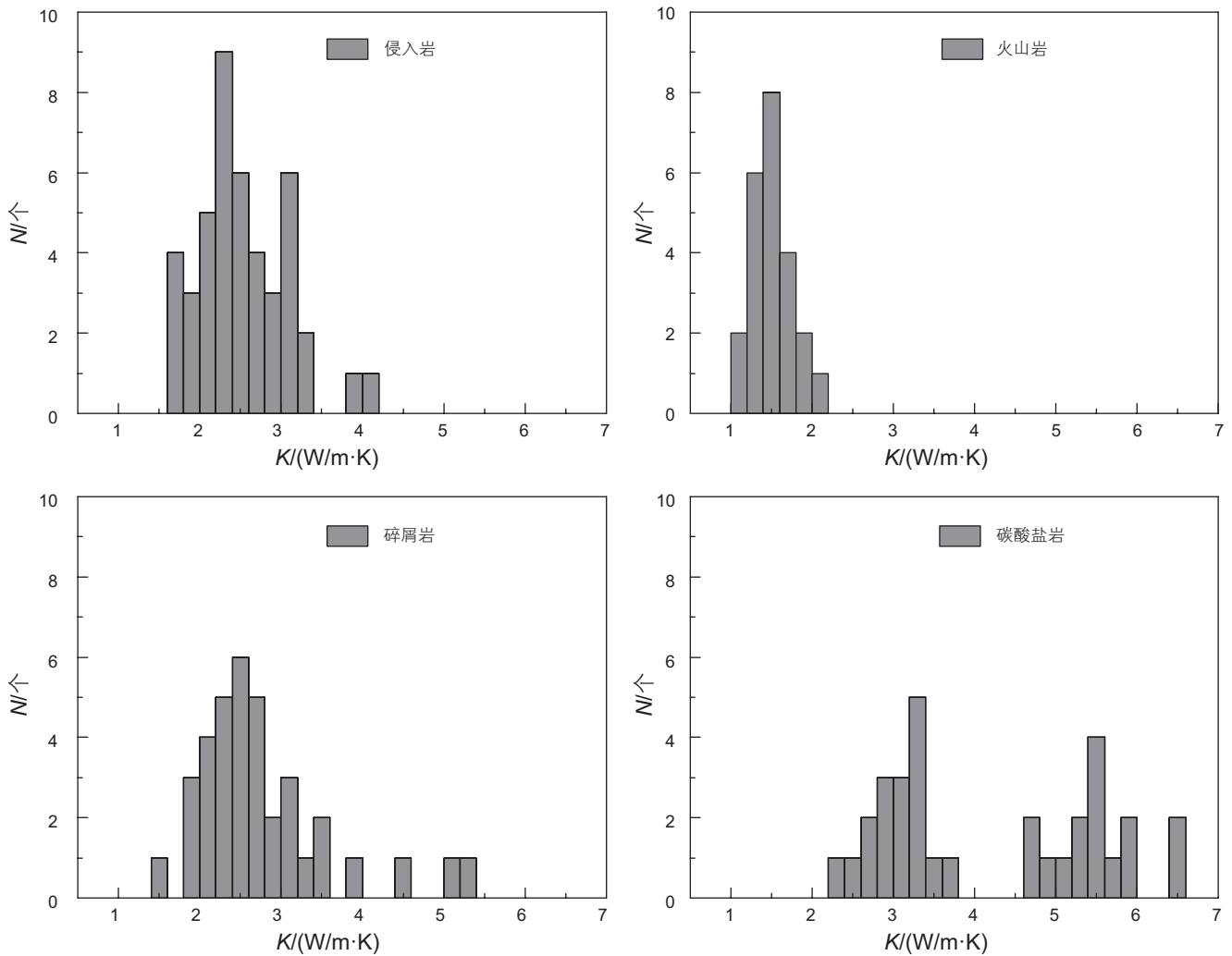


图2 岩石热导率频数分布直方图

Fig. 2 The frequency distribution histogram of thermal conductivity of rocks

## 2.2 岩石热导率与孔隙率的关系

孔隙度( $\phi$ )是岩石中孔隙总体积和岩石体积的比值,孔隙中可以被流体(空气、水、油)介质充填。这些流体介质的热导率远远小于矿物颗粒的热导率,所以孔隙度越大,其对岩石热导率的影响也就越大。由于火成岩和碳酸盐岩的孔隙度总体较小,挑选18件在手标本尺度上粒度、颜色、结构相似孔隙度不同的粉砂,分析热导率与孔隙度的关系。从图3中可得,在孔隙度从3%~25%范围内,碎屑岩的热导率随着孔隙度的增加而逐渐减小,且减小速率随孔隙度增大而逐渐放缓。本文和前人实验结果都展示出了岩石热导率随着孔隙度上升而下降的趋势(图3),同时下降的速率并不完全相同。本实验和杨淑贞<sup>[30]</sup>的实验呈现出一种下降速率越来越小的下降趋势,而Duchkov<sup>[31]</sup>和Chen<sup>[32]</sup>的实验更偏向于线性的下降。由于热导率受到

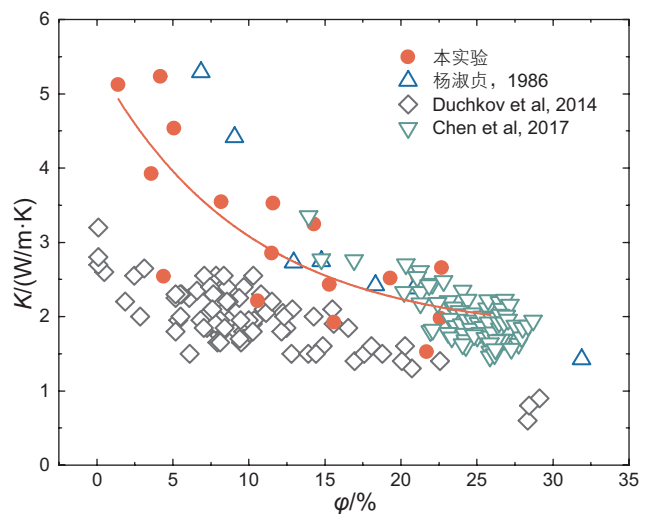


图3 热导率和孔隙度关系

Fig. 3 The relationship between thermal conductivity and porosity

岩石组构多方面的影响，且不同类型岩石热导率差异较大，因此，热导率与孔隙度的关系也包含了其它方面因素的影响。

### 2.3 密度和热导率的关系

密度不是影响岩石热导率的基本物理量，但它和热导率有共同的影响因素，如矿物组成、孔隙度等，因此一定程度上与热导率具相关性。从表 2 和图 4 可得，本次实验四类岩石的密度分布差异较小，基本处于 2.00~3.00 g/cm<sup>3</sup> 的范围，其中 58% 的岩石密度分布于 2.50~2.90 g/cm<sup>3</sup>，密度分布存在较大重叠，碳酸盐岩和侵入岩的平均密度最大，火山岩的平均密度最小。

图 5 显示不同岩性的热导率和密度的关系不完全相同。火山岩和碎屑岩的热导率和密度的关系更接近线性增大，而侵入岩和碳酸盐岩没有这种关系。从整个密度范围看，四种岩石类型都展现出热导率随密度增大而增大的趋势。但是在某一个局部范围(如图 5 中红圈所示范围)，其热导率可能不会呈现热导率随密度增大而增大的趋势甚至会呈现相反的趋势。图 5 中红圈所示范围表明岩石即使有大致相同的密度其热导

表 2 四类岩石密度统计表

Table 2 Statistical table of density for four types rock

岩性	范围/(g/cm <sup>3</sup> )	极差/(g/cm <sup>3</sup> )	平均值/(g/cm <sup>3</sup> )
侵入岩	2.30~3.30	1.00	2.76 ± 0.26
火山岩	2.20~2.87	0.67	2.48 ± 0.18
碎屑岩	2.19~2.94	0.80	2.57 ± 0.25
碳酸盐岩	2.27~3.15	0.88	2.78 ± 0.20

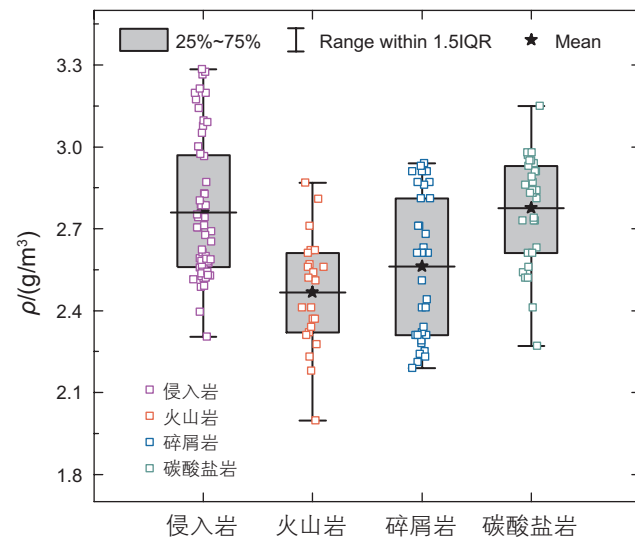


图 4 四类岩石密度的箱线图

Fig. 4 The box-plot of density for four types rock

率可能有很大区别。岩石密度由颗粒密度和颗粒的排列方式共同决定。本文中的岩石样品都为块状结构，从统计意义上可以认为这些岩石样品的颗粒排列相同。所以决定岩石密度的最主要的应该是所含矿物的密度和岩石本身的孔隙度。孔隙度与热导率的负相关前文已述及，密度与热导率的相关性中，很大程度上反应了孔隙度的影响。矿物密度由原子质量、比例和结合方式共同决定，同时原子及其排列方式也决定着声子传热的效率，宏观上体现就是热导率的大小。因此密度大致相同的岩石或矿物而其热导率差异较大，这可能是因为其原子总数和体积相似，但是构成此结构的化学键传热效率可能有差异。例如二氧化硅的密度只有 2.20 g/cm<sup>3</sup>，远小于橄榄石的密度 3.30~3.50 g/cm<sup>3</sup>，但是二氧化硅的热导率却大于橄榄石的热导率。这是因为二氧化硅中 Si-O 键比橄榄石中的离子键传热效率更大。因此密度越大热导率越大这一规律可能只同族矿物中有效。因为同族矿物有相似的晶体结构，其传热的化学键类似。而不同族矿物其晶体结构不同，故传热的化学键不同，传热效率也不同。

### 2.4 岩石热导率的各向异性

矿物物理性质的各向异性普遍存在，其中也包括矿物的热学性质。在已知的七种晶系中，除了等轴晶系外，其晶系都有不同程度的各向异性。矿物是岩石的基本组分之一，由于矿物热导率的各向异性进而可能导致岩石热导率同样具有各向异性。样品中选取 5 件侵入岩样品，这些样品都是块状构造。除此之外，重新挑选具有水平层理构造的泥岩、砂岩、流纹岩样品共计 4 件。测量这 9 件样品在两个互相垂直方向的热导率，其中对于沉积岩，测量其平行层理方向热导率( $K_{par}$ )和垂直地层方向热导率( $K_{perp}$ )，其结果如表 3 和图 6 所示。

为了进一步定量表征岩石热导率的各向异性，定义一个参数  $\alpha$ :

$$\alpha = \frac{K_{par}}{K_{perp}} \quad (3)$$

$\alpha$  越大，说明各向异性的程度越强。测量结果显示，第一类样品的热导率除 35 号样品以外，其余样品的  $K_{par}$  和  $K_{perp}$  的差异在仪器的测量误差范围之内，可以认为这些样品的  $K_{par}$  和  $K_{perp}$  相等，基本上没有各向异性。35 号样品展现出的轻微非均质性说明，可能还有其他因素也控制着岩石热导率非均质性；例如岩石内部可能有某些高导的层状矿物。第二类非均质样品都展现出了不同程度的非均质性。其中 HL-1 号样品泥

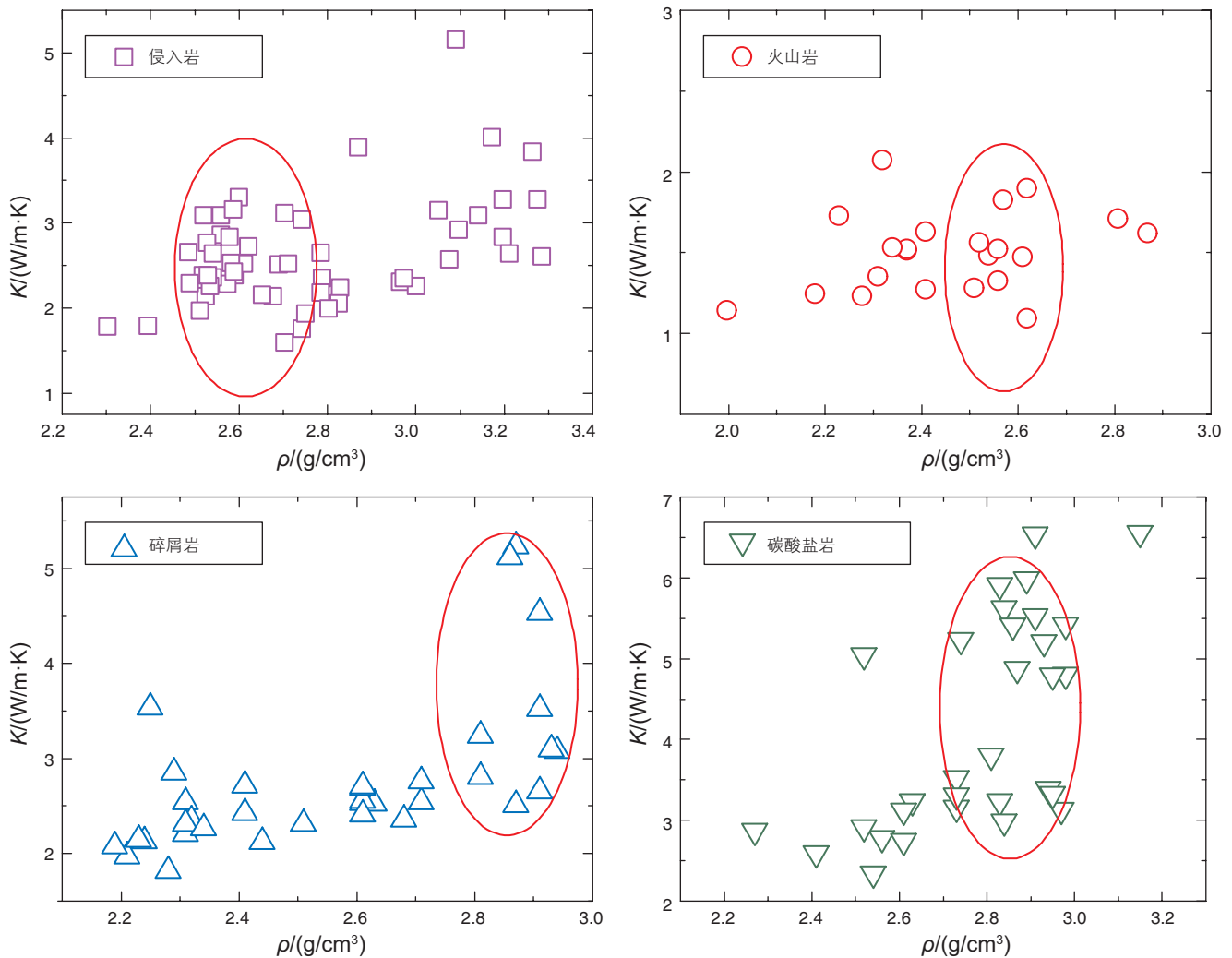


图5 四类岩石密度-热导率关系

Fig. 5 The relationship between thermal conductivity and density for four types of rock

表3 岩石平行和垂直热流方向的热导率

Table 3 Thermal conductivity of perpendicular and parallel directions

编号	类型	岩性	$K_{\text{perp}}/(\text{W}/\text{m}\cdot\text{K})$	$K_{\text{par}}/(\text{W}/\text{m}\cdot\text{K})$	$K_{\text{par}}/K_{\text{perp}}$
16	均质样品	侵入岩	4.00	3.96	0.99
22		侵入岩	3.15	3.09	0.98
23		侵入岩	2.53	2.52	1.00
26		侵入岩	3.28	3.37	1.03
35		侵入岩	3.05	2.52	0.83
YQ-1	非均质样品	白云岩	2.75	5.73	2.08
HL-1		泥岩	1.87	2.03	1.08
HL-8		流纹岩	1.66	2.00	1.20
MS-5		砂岩	2.45	3.12	1.27

岩的非均质性较弱, YQ-1号样品白云岩的非均质性较强, 其 $K_{\text{par}}/K_{\text{perp}}$ 达到了2.08。这种巨大的非均质性表明, 在实际地层中, 即使是某特定方向热导率较大的岩层, 在其他某一方向的热导率可能较小。同时, 实

验结果也表明, 岩石热导率的各向异性主要由层理、层状构造等导致。

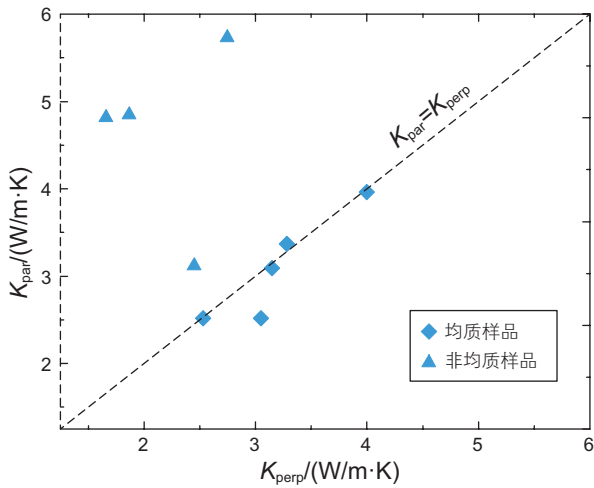


图6 均质和非均质样品的  $K_{\text{par}}-K_{\text{perp}}$  图  
 Fig. 6  $K_{\text{par}}-K_{\text{perp}}$  correlation plot for homogeneous and heterogeneous samples

2.5 岩石热导率对地热资源评价的影响

体积法是目前估算地热资源，特别是干热岩资源的最基本方法。干热岩所蕴含的地热资源量取决于干热岩的温度及干热岩岩石的热物性。干热岩地热资源总量或称资源基数  $Q$  就是低孔渗(忽略岩石中流体的储热量)岩石介质中所赋存的热量<sup>[5]</sup>:

$$Q = \rho \cdot C_p \cdot V \cdot (T - T_c) \tag{4}$$

其中,  $\rho$  为岩石密度;  $C_p$  为岩石比热;  $V$  为岩石体体积;  $T$  为特定深度上的岩石温度;  $T_c$  为地表平均温度或特定参考温度。

进行干热岩地热资源量评价的直接参数是深部温度, 而决定不同深度  $z$  温度分布的参数包括: 地表(恒温带)温度  $T_0$ , 地表热流  $q_0$ , 岩石生热率  $K$ , 岩石生热率  $A$ 。限制于钻井深度和分布密度等原因, 无法实测的地层温度通常采用计算方法获得。在一维稳态热传导条件下, 对于均匀层状的沉积岩分布区, 其单层内热导率和生热率可以近似为常数, 依不同岩性取其实测平均值即可, 相应的深部温度  $T_z$  可由下式进行计算<sup>[5]</sup>:

$$T_z = T_0 + q_0 \cdot z / K - A \cdot z^2 / 2K \tag{5}$$

对于复杂地质条件下的深部温度计算, 可参照钻井、物探、露头解释的岩性厚度、热物性参数由地表向深部逐层计算。图 7a 展示了假设岩性均一情况下, 取相同的地表热流 ( $q_0 = 60 \text{ mW/m}^2$ )、恒温带温度 ( $T_0 = 10 \text{ }^\circ\text{C}$ ) 和生热率 ( $A = 1 \text{ } \mu\text{W/m}^3$ ) 条件下, 热导率分别为  $4.0 \text{ W/m}\cdot\text{K}$  ( $K_1$ ) 和  $2.5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$  ( $K_2$ ) 时, 采用式 (5) 计算的  $0\sim 5 \text{ km}$  深度范围内的温度分布曲线①、②。5 km 深度时, 两种不同热导率参数计算下的温度差值  $\Delta T_1$  可达  $43 \text{ }^\circ\text{C}$ , 若通过式 (4) 计算某深度范围 (如  $4\sim 6 \text{ km}$ ) 的地热资源量, 两种不同热导率条件下估算的地热资源量相差较大。

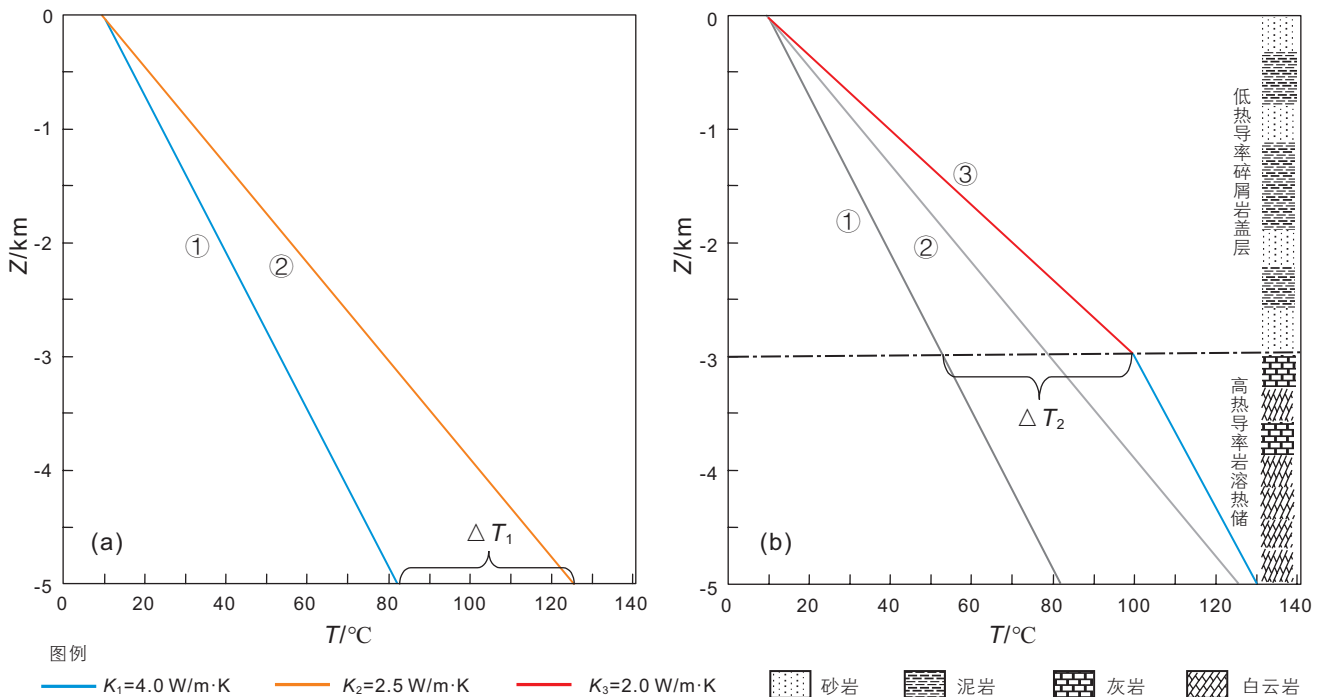


图7 不同热导率对深部温度计算的影响  
 Fig. 7 Influence of different thermal conductivity on deep temperature calculation

由式(5)可推断,地层垂向热导率差异会造成“热折射”现象,指示了低热导率盖层对地热资源聚集的作用。在我国一些中生代沉积盆地中,低热传导的砂泥岩层组合覆盖在高温传导的碳酸盐岩或基底结晶岩之上,使上部砂、泥岩层构成一相对的隔温盖层,由地下深处来的热量一般不易很快散失,而聚集于盆地中的盖层底部和基底的顶端,造成热储上部较高的温度分布。如图7b中,在所述边界条件下,0~3 km范围若为平均热导率 $2.0 \text{ W/m}\cdot\text{K}(K_3)$ 的砂泥岩,3~5 km范围为平均热导率 $4.0 \text{ W/m}\cdot\text{K}(K_1)$ 的灰岩和白云岩,则形成地温分布曲线③,3 km处与曲线①的差值 $\Delta T_2$ 可达 $46 \text{ }^\circ\text{C}$ 。显而易见,具有明显热导率差异的良好储、盖组合对于地热资源富集意义重大。

### 3 结论

基于热导率内部影响因素复杂的问题,采用瞬态

平板热源法精确测量典型岩石的热导率,结合岩石密度、孔隙度、矿物成分等物性特征,分析了岩石结构对热导率的影响,获得以下结论:(1)典型岩石中,火山岩热导率最小,碎屑岩与侵入岩热导率接近,碳酸盐岩的平均热导率最大;(2)矿物是影响热导率的重要因素,高热导率的石英含量可以明显影响侵入岩和碎屑岩热导率,白云石含量明显影响碳酸盐岩热导率;(3)碎屑岩的热导率随着孔隙度的增加而逐渐减小;(4)块状结构侵入岩的热导率基本没有各向异性,层理发育的岩石有明显的各向异性,各向异性系数从1.08到2.08,热导率的各向异性主要由岩石的层状构造导致;(5)低热导率盖层对地热资源聚集具有重要作用,使地下深处来的热量聚集于盆地盖层底部和基底的顶端,造成热储上部较高的温度分布。研究结果为深部温度场和地热资源评价中岩石热物性参数的建模问题提供了参考。

### 参考文献

- [1] 吴良华,舒娱琴,潘晓榕,等.基于回归模型的道路二氧化碳排放体积分数的估算与验证[J].华南师范大学学报(自然科学版),2015,47(5):147-153.[WU L H, SHU Y Q, PAN X R, et al. Estimate and verification of the concentrations of on-road carbon dioxide emissions based on regression model[J]. Journal of South China Normal University (Natural Science Edition), 2015, 47(5): 147-153.]
- [2] 黄虹,李顺诚,曹军骥,等.广州市住宅室内外PM2.5中碳污染源解析[J].华南师范大学学报(自然科学版),2007,(4):85-91.[HUANG H, LI S C, CAO J J, et al. Source apportionment of carbonaceous for indoor and out room PM2.5 in Guangzhou city[J]. Journal of South China Normal University (Natural Science Edition), 2007, (4): 85-91.]
- [3] 杨文越,李涛,曹小曙.基于碳排放-位置分配模型的公共中心规划支持系统设计与应用研究[J].华南师范大学学报(自然科学版),2015,47(5):119-125.[YANG W Y, LI T, CAO X S. The study of design and application of CO<sub>2</sub> emissions-location allocation model based on public center planning support system[J]. Journal of South China Normal University (Natural Science Edition), 2015, 47(5): 119-125.]
- [4] 黄道建,陈晓雯,蔡凤珊,等.珠江三角洲垃圾焚烧发电厂烟气污染物的呼吸暴露风险研究[J].华南师范大学学报(自然科学版),2020,52(5):41-48.[HUANG D J, CHEN X W, CAI F S, et al. A study of the inhalation exposure risk of pollutants in flue gas from solid waste incineration power plants in the Pearl River delta[J]. Journal of South China Normal University (Natural Science Edition), 2020, 52(5): 41-48.]
- [5] 汪集旸,胡圣标,庞忠和,等.中国大陆干热岩地热资源潜力评估[J].科技导报,2012,30(32):25-31.[WANG J Y, HU S B, PANG Z H, et al. Estimate of geothermal resources potential for hot dry rock in the continental area of China[J]. Science & Technology Review, 2012, 30(32): 25-31.]
- [6] MOSTAFA M S, AFIFY N, GABER A, et al. Investigation of thermal properties of some basalt samples in Egypt[J]. Journal of Thermal Analysis & Calorimetry, 2004, 75(1): 179-188.
- [7] 湛永强,施小斌,廖杰,等.地幔热导率的选取对动力学数值模拟的影响——以岩石圈张裂过程为例[J].地球物理学报,2020,63(05):1998-2012.[SHEN Y Q, SHI X B, LIAO J, et al. The effect of mantle thermal conductivity on dynamic numerical modeling: A case study of lithospheric extension[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2020, 63(05): 1998-2012.]
- [8] 常健,邱楠生,赵贤正,等.渤海湾盆地冀中坳陷现今地热特征[J].地球物理学报,2016,59(03):1003-1016.[CHANG J, QIU N S, ZHAO X Z, et al. Present-day geothermal regime of the Jizhong depression in Bohai Bay basin, East China[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2016, 59(03): 1003-1016.]
- [9] 姜光政,高珊,饶松,等.中国大陆地区大地热流数据汇编(第四版)[J].地球物理学报,2016,59(08):2892-2910.[JIANG G Z, GAO P, RAO S, et al. Compilation of heat flow data in the continental area of China (4<sup>th</sup> edition) [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2016, 59(08): 2892-2910.]



- [10] 唐晓音, 黄少鹏, 杨树春, 等. 南海珠江口盆地钻井BHT温度校正及现今地温场特征[J]. 地球物理学报, 2016, 59(08): 2911–2921. [TANG X Y, HUANG S P, YANG S C, et al. Correcting on logging-derived temperatures of the Pearl River Mouth Basin and characteristics of its present temperature field[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2016, 59(08): 2911–2921.]
- [11] 庞忠和, 孔彦龙, 庞菊梅, 等. 雄安新区地热资源与开发利用研究[J]. 中国科学院院刊, 2017, 32(11): 1224–1230. [PANG Z H, KONG Y L, PANG J M, et al. Development and utilization prospect of the geothermal resources in the buried hills of the Xiong'an New Area and its periphery[J]. Natural Gas Industry, 2017, 32(11): 1224–1230.]
- [12] 王贵玲, 高俊, 张保健, 等. 雄安新区高阳低凸起区雾迷山组热储特征与高产能地热井参数研究[J]. 地质学报, 2020, 94(07): 1970–1980. [WANG G L, GAO J, ZHANG B J, et al. Study on the thermal storage characteristics of the Wumishan Formation and huge capacity geothermal well parameters in the Gaoyang low uplift area of Xiong'an New Area[J]. Acta Geologica Sinica, 2020, 94(07): 1970–1980.]
- [13] 段忠丰, 庞忠和, 杨峰田. 华北地区煤系地层岩石热导率特征及对热害的影响[J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(08): 15–17+21. [DUAN Z F, PANG Z H, YANG F T. Features of coal-bearing strata rock thermal conductivity and influence on heat hazard in North China[J]. Coal Science and Technology, 2013, 41(08): 15–17+21.]
- [14] 张永亮, 李涛, 牟瑞涛, 等. 复杂地质条件下矿山深部开采地温预测方法研究[J]. 青岛理工大学学报, 2015, 36(04): 1–6. [ZHANG Y L, LI T, MENG R T, et al. Study of underground temperature prediction method for deep exploitation of mines under complicated circumstances[J]. Journal of Qingdao Technological University, 2015, 36(04): 1–6.]
- [15] 肖琳, 杨成奎, 胡增辉, 等. 地铁隧道围岩内温度分布规律的模型试验及其热导率反算研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(S2): 86–91. [XIAO L, YANG C K, HU Z H, et al. Model test on temperature distribution in metro tunnel surrounding rock and inverse calculation of its thermal conductivity[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(S2): 86–91.]
- [16] 何琴玉, 李维谦, HAO Q, 等. 热电材料发电的商业化进展与前景展望[J]. 华南师范大学学报(自然科学版), 2015, 47(5): 9–17. [HE Q Y, LI W Q, HAO Q, et al. Development in commercialization and application progress of thermoelectric materials[J]. Journal of South China Normal University (Natural Science Edition), 2015, 47(5): 9–17.]
- [17] RAMAZANOVA A E, EMIROV S N. Effect of pressure and temperature on the thermal conductivity of siltstone and dolomite[J]. Bulletin of Russian Academy of Science, 2012, 76(1): 125–127.
- [18] ABDULAGATOVA Z, ABDULAGATOV I M, EMIROV V N. Effect of temperature and pressure on the thermal conductivity of sandstone[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2009, 46(6): 1055–1071.
- [19] SEIPOLD U. Temperature dependence of thermal transport properties of crystalline rocks — a general law[J]. Tectonophysics, 1998, 291(1): 161–171.
- [20] ABDULAGATOVA Z, ABDULAGATOV I M, EMIROV V N. Effect of temperature and pressure on the thermal conductivity of sandstone[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2009, 46(6): 1055–1071.
- [21] ABDULAGATOV I M, EMIROV S N, ABDULAGATOV A 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.
- [22] ALBERT KATHARINA, SCHULZE MARCELLUS, FRANZ CLAUDIA, et al. Thermal conductivity estimation model considering the effect of water saturation explaining the heterogeneity of rock thermal conductivity[J]. Geothermics, 2017, 66: 1–12.
- [23] NAGARAJU P, ROY SUKANTA. Effect of water saturation on rock thermal conductivity measurements[J]. Tectonophysics, 2014, 626: 137–143.
- [24] JORAND RACHEL, FEHR ANNICK, KOCH ANDREAS, et al. Study of the variation of thermal conductivity with water saturation using nuclear magnetic resonance[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2011, 116(B8).
- [25] MIDTTOMME KIRSTI, ROALDSET ELEN. The effect of grain size on thermal conductivity of quartz sands and silts[J]. Petroleum Geoscience, 1998, 4(2): 165–172.
- [26] TAVMAN I. H. Effective thermal conductivity of granular porous materials[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 1996, 23(2): 169–176.
- [27] POPOV Y, TERTYCHNYI V, ROMUSHKEVICH R, et al. Interrelations between thermal conductivity and other physical properties of rocks: Experimental data[J]. Pure and Applied Geophysics, 2003, 160(5–6): 1137–1161.
- [28] CHEN C, ZHU C Q, ZHANG B S, et al. Effect of temperature on the thermal conductivity of rocks and its implication for in-situ correction[J]. Geofluids, 2021, doi: 10.1155/2021/6630236.
- [29] TANG B N, ZHU C Q, QIU N S, et al. Analyzing and estimating thermal conductivity of sedimentary rocks from mineral composition and pore property[J]. Geofluids, 2021, doi: 10.1155/2021/6665027.
- [30] 杨淑贞, 张文仁, 沈显杰, 等. 孔隙岩石热导率的饱水试验研究[J]. 岩石学报, 1986, 02(04): 83–91. [YANG S Z, ZHANG W R, SHEN X J, et al. Experimental research on the thermal conductivity of water-saturated porous rocks[J]. Acta Petrologica Sinica, 1986, 02(04): 83–91.]
- [31] DUCHKOV A D, SOKOLOVA L S, RODYAKIN S V, et al. Thermal conductivity of the sedimentary-cover rocks of the West Siberian

Plate in relation to their humidity and porosity[J]. Russian Geology and Geophysics, 2014, 55(5-6): 784-792.

- [32] CHEN FENGJUAN, POPOV YURI A, SEVOSTIANOV IGOR, et al. Replacement relations for thermal conductivity of a porous rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2017, 97: 64-74.

(编辑 付娟娟)

## 附录 1 样品测量数据

编号	岩性 大类	热导率 /(W/m·K)	密度 /(g/cm <sup>3</sup> )	孔隙度 /%	XRD 成分测定 (括号内表示矿物识别可能存在测试误差)
1	侵入岩	2.38	2.52	1.2	斜长石 71.6%+石英 17.2%+钾长石 9.2%+(铁白云石 2%)
2	侵入岩	1.75	2.74	0.7	(黏土矿物 47.3%)+斜长石 34.2%+(白云石 7.8%+方沸石 3.8%+黄铁矿 3.1%+菱铁矿 2.0%+钙芒硝 1.8%)
3	侵入岩	2.35	2.79	1.7	(钙芒硝 77.6%+白云石 13.3%+非晶体 7.5%+石英 1.0%+铁白云石 0.6%)
4	侵入岩	2.13	2.53	2.3	
5	侵入岩	2.39	2.59	1.8	斜长石 58.1%+石英 23.2%+(铁白云石 7.3 %)+钾长石 5.9%+(硬石膏 5.4%)
6	侵入岩	2.52	2.61	2.7	斜长石 53.1%+石英 28.6%+钾长石 15.7%+(铁白云石 2.6%)
7	侵入岩	3.11	2.70	3.8	斜长石 47.1%+(黏土矿物 28.1%)+石英 10.3%+钾长石 7.2%+(方解石 3.0%+白云石 2.4%+黄铁矿 1.3%+菱铁矿 0.5%)
8	侵入岩	2.65	2.79	0.7	(黏土矿物 34.0%)+斜长石 18.9%+(菱铁矿 15.9%)+石英 15.6%+(白云石 8.8%+方解石 4.0%)+钾长石 1.7%
9	侵入岩	3.03	2.74		
10	侵入岩	2.28	2.57	2.5	(菱铁矿 34.9%+白云石 25.8%)+斜长石 20.8%+(硬石膏 7.4%+赤铁矿 6.5%)
11	侵入岩	3.83	3.26	0.8	
12	侵入岩	3.30	2.60	1.7	石英 46.0%+斜长石 45.6%+钾长石 15.4%+(铁白云石 4.8%)
13	侵入岩	2.86	2.56	1.9	
14	侵入岩	2.83	2.58	2.7	石英 41.5%+斜长石 29.4%+钾长石 16.2%+(钙芒硝 4.5%)
15	侵入岩	1.62	2.56	3.6	石英 40.0%+斜长石 33.8%+钾长石 16.2%+(钙芒硝 4%+硬石膏 3.8%+白云石 2.2%)
16	侵入岩	4.00	3.17	2.5	橄榄石 93.0%+角闪石 5.3%+辉石 1.7%
17	侵入岩	2.51	2.69	0.9	斜长石 37.0%+石英 22.5%+角闪石 21.6%+(黏土矿物 3.8%+文石 3.7%)
18	侵入岩	2.52	2.71	1.3	斜长石 42.6%+石英 37.3%+角闪石 7.1%+(硬石膏 3.7%)+钾长石 2.9%
19	侵入岩	1.93	2.75	1.8	石英 72.0%+(白云石 15.8%+菱镁矿 9.7%+菱铁矿 2.5%)
20	侵入岩	2.72	2.62	3.5	斜长石 42.6%+石英 18.6%+角闪石 15.4%+钾长石 8.9%+(黏土矿物 7.9%)+普通辉石 4.1%+(白云石 2.4%)
21	侵入岩	2.13	2.68	0.9	斜长石 45.3%+钾长石 22.6%+石英 26.6%+(铁白云石 4.4%+菱镁矿 1.0%)
22	侵入岩	3.15	3.05	0.8	角闪石 67.1%+(黏土矿物 17.2%)+斜长石 5.7%+文石 3.5%+石英 3.5%+(白云石 2.4%+石盐 0.7%)
23	侵入岩	2.53	2.58	2.1	斜长石 34.0%+石英 20.3%+钾长石 18.8%+角闪石 12.6%+(钙芒硝 7.4%+黏土矿物 5.0%+文石 1.9%)
24	侵入岩	2.57	3.08	2.8	斜长石 43.1%+(黏土矿物 20.5%+白云石 10.4%+方解石 8.6%+石英 5.4%+无水芒硝 5%+菱铁矿 4.8%)
25	侵入岩	2.31	2.97		角闪石 75.1%+(黏土矿物 8.1%)+斜长石 6.5%+(文石 3.3%)+普通辉石 2.6%+(菱铁矿 1.7%+黄铁矿 1.2%)
26	侵入岩	3.28	3.20		角闪石 66.3%+(黏土矿物 22.4%+黄铁矿 4.2%)+石英 1.7%+斜长石 0.9%+(方解石 0.6%)

(续表)

编号	岩性 大类	热导率 /(W/m·K)	密度 /(g/cm <sup>3</sup> )	孔隙度 /%	XRD成分测定(括号内表示矿物识别可能存在测试误差)
27	侵入岩	1.96	2.51		钾长石 38.5%+(黏土矿物 28.1+钙芒硝 11.5%+铁白云石 7.8%+方解石 5.6%)+ 石英 4.9%+(菱铁矿 2.2%+角闪石 1.4%)
28	侵入岩	2.26	3.00		斜长石 68.7%+石英 16.4%+(白云石 14.9%)
29	侵入岩	2.76	2.53		石英 42.9%+斜长石 32.6%+钾长石 16.7%+角闪石 7.8%
30	侵入岩	2.84	3.20		
31	侵入岩	2.35	2.97		
32	侵入岩	2.18	2.79		(赤铁矿 <sup>+</sup> 47.3%+菱铁矿 <sup>+</sup> 43.1%+非晶体 6.5%+石英 2.2%+铁白云石 0.8%+石盐 0.1%)
33	侵入岩	1.78	2.30		
34	侵入岩	3.08	2.52		石英 51.3%+斜长石 28.8%+钾长石 16.4%+普通辉石 3.6%
35	侵入岩	3.05	2.56		钾长石 47.4%+斜长石 24.4%+石英 21.5%+(铁白云石 3.6%+方解石 1.5%+菱 铁矿 <sup>+</sup> 1.5%)
36	侵入岩	2.66	2.49		石英 47.7%+斜长石 33.9%+普通辉石 6.9%+(钙芒硝 5.2%+硬石膏 2.9%+白云 石 2.5%+菱铁矿 <sup>+</sup> 0.9)
37	侵入岩	2.15	2.65		斜长石 58.5%+钾长石 13.1%+石英 13.2%+普通辉石 8.1%+(硬石膏 7.0%)
38	侵入岩	2.24	2.83		斜长石 65.9%+石英 22.9%+(方解石 4.6%+方沸石 1.7%+菱镁矿 1.6%+重晶石 1.9%+菱铁矿 <sup>+</sup> 1.4%)
39	侵入岩	2.43	2.59		斜长石 53.6%+石英 29.2%+钾长石 15.3%+(铁白云石 2.0%)
40	侵入岩	2.05	2.83		
41	侵入岩	1.99	2.80		斜长石 50.3%+赤铁矿 <sup>+</sup> 11.7%+石英 9.8%+(黏土矿物 8.7%+白云石 8.1%+文石 6.3%+硬石膏 1.6%)
42	侵入岩	2.28	2.49		石英 27.8%+斜长石 27.7%+(黏土矿物 15%+钙芒硝 6.4%+白云石 2.8%+方解 石 2.7%+菱铁矿 <sup>+</sup> 2.2%+重晶石 0.8%)
43	侵入岩	1.79	2.40		钾长石 62.9%+石英 14.9%+(方解石 9.4%+铁白云石 6.4%+菱镁矿 4.0%+菱铁 矿 <sup>+</sup> 2.5%)
44	侵入岩	3.15	2.59		石英 41.0%+斜长石 34.8%+钾长石 15.7%+(黏土矿物 3.4%+钙芒硝 2.6%+白 云石 2.0%+硬石膏 0.7%)
45	火山岩	1.71	2.81	2.8	黏土矿物 28.8%+普通辉石 27.1%+(白云石 13.5%)+方沸石 5.8%+磷石英 5%
46	火山岩	1.62	2.00	3.9	
47	火山岩	1.14	2.28	7.8	(赤铁矿 <sup>+</sup> 35.5%)+黏土矿物 34.3%+(菱铁矿 <sup>+</sup> 14.8%)+斜长石 8.2%+石英 2.8%+ 角闪石 2.1%+(方解石 1.8%+石盐 0.5%)
48	火山岩	2.07	2.32	5.1	角闪石 77.2%+斜长石 17.8%+(文石 2.1%+菱镁矿 1.5%+菱铁矿 <sup>+</sup> 0.9%+锐钛矿 0.4%+石英 0.2%)
49	火山岩	1.23	2.87	12.5	斜长石 42.8%+(赤铁矿 <sup>+</sup> 18.4%+方沸石 6.3%+方解石 3.2%)
50	火山岩	1.89	2.62	3.2	(斜长石 78.5%)+钾长石 11.4%+(赤铁矿 <sup>+</sup> 3.0%+硬石膏 2.8%+菱铁矿 <sup>+</sup> 1.1%)
51	火山岩	1.28	2.51	6.4	
52	火山岩	1.73	2.23	2.5	
53	火山岩	1.27	2.41	3.2	
54	火山岩	1.35	2.31	4.8	
55	火山岩	1.63	2.41	15.3	
56	火山岩	1.09	2.62	0.4	
57	火山岩	1.24	2.18	4.7	
58	火山岩	1.82	2.57	7.3	

(续表)

编号	岩性 大类	热导率 /(W/m·K)	密度 /(g/cm <sup>3</sup> )	孔隙度 /%	XRD成分测定(括号内表示矿物识别可能存在测试误差)
59	火山岩	1.32	2.56	4.9	
60	火山岩	1.51	2.37		
61	火山岩	1.48	2.54		
62	火山岩	1.52	2.37		
63	火山岩	1.47	2.61		
64	火山岩	1.56	2.52		
65	火山岩	1.53	2.34		
66	火山岩	1.52	2.56		
67	火山岩	1.51	2.71		
68	碳酸盐岩	2.34	2.54	2.6	
69	碳酸盐岩	3.52	2.73	4.1	白云石 74.7%+(石英 20.5%+黏土矿物 3.7%)+方解石 1.0%
70	碳酸盐岩	3.80	2.81	4.7	白云石 100%
71	碳酸盐岩	3.38	2.94	3.6	
72	碳酸盐岩	3.23	2.83	5.3	
73	碳酸盐岩	2.78	2.56	4.9	
74	碳酸盐岩	3.16	2.73	3.8	
75	碳酸盐岩	2.59	2.41	2.9	
76	碳酸盐岩	3.23	2.63		
77	碳酸盐岩	2.87	2.27	3.2	
78	碳酸盐岩	2.98	2.84	2.7	
79	碳酸盐岩	3.13	2.97		
80	碳酸盐岩	2.74	2.61	3.8	
81	碳酸盐岩	6.54	2.91	0.8	白云石 63.1%+(石英 36.9%)
82	碳酸盐岩	5.04	2.52	3.6	白云石 72.2%+方解石 27.8%
83	碳酸盐岩	4.80	2.98		白云石 62.8%+(石英 37.2%)
84	碳酸盐岩	4.87	2.87		白云石 83.1%+方解石 14%+(石英 3%)
85	碳酸盐岩	5.62	2.84	3.2	
86	碳酸盐岩	5.91	2.83		
87	碳酸盐岩	5.52	2.91		
88	碳酸盐岩	6.55	3.15	0.4	白云石 88.9%+(石英 8.2%+钾长石 2.9%)
89	碳酸盐岩	4.79	2.95	0.9	
90	碳酸盐岩	5.98	2.89	0.3	
91	碳酸盐岩	5.20	2.93	1.5	
92	碳酸盐岩	3.32	2.95	1.3	
93	碳酸盐岩	3.12	2.61		
94	碳酸盐岩	2.91	2.52		
95	碳酸盐岩	3.31	2.73		
96	碳酸盐岩	5.42	2.98		
97	碳酸盐岩	5.23	2.74		
98	碳酸盐岩	5.41	2.86		
99	碳酸盐岩	5.52	2.81		
100	碎屑岩	2.43	2.41	15.3	石英 49.7%+钾长石 30.2%+钙芒硝 14.0%+赤铁矿 3.8%+菱铁矿 2.3%

(续表)

编号	岩性 大类	热导率 /(W/m·K)	密度 /(g/cm <sup>3</sup> )	孔隙度 /%	XRD 成分测定 (括号内表示矿物识别可能存在测试误差)
101	碎屑岩	4.53	2.91	5.1	
102	碎屑岩	5.23	2.87	4.2	石英 97.5%+钾长石 2.5%
103	碎屑岩	5.12	2.86	1.4	石英 66.8%+钾长石 24.4%+白云石 8.8%
104	碎屑岩	2.54	2.31	4.4	
105	碎屑岩	3.54	2.25	8.2	
106	碎屑岩	1.97	2.21	22.6	
107	碎屑岩	2.51	2.87	19.3	
108	碎屑岩	2.65	2.91	22.7	
109	碎屑岩	1.82	2.28	25.9	
110	碎屑岩	2.54	2.61	21.1	
111	碎屑岩	3.24	2.81	14.3	黏土矿物 35.9%+石英 22.7%+斜长石 14.6%+白云石 8.2%+普通辉石 4.8%+黄铁矿 2.4%+钙芒硝 1.2%
112	碎屑岩	2.85	2.29	11.5	
113	碎屑岩	1.92	2.91	15.6	
114	碎屑岩	3.52	2.31	11.6	
115	碎屑岩	2.21	2.51	10.6	
116	碎屑岩	1.52	2.71	21.7	
117	碎屑岩	3.92	2.63	3.6	
118	碎屑岩	2.76	2.71		
119	碎屑岩	2.35	2.32		
120	碎屑岩	2.56	2.61		
121	碎屑岩	2.41	2.61		
122	碎屑岩	2.36	2.68		
123	碎屑岩	2.72	2.41		
124	碎屑岩	2.69	2.61		
125	碎屑岩	2.71	2.61		
126	碎屑岩	2.81	2.81		
127	碎屑岩	2.12	2.44		
128	碎屑岩	2.13	2.24		
129	碎屑岩	2.08	2.19		
130	碎屑岩	2.15	2.23		
131	碎屑岩	2.31	2.31		
132	碎屑岩	2.27	2.34		
133	碎屑岩	3.08	2.94		
134	碎屑岩	3.10	2.93		
135	碎屑岩	3.09	2.94		