doi:10.19509/j. cnki. dzkq. 2019.0231

陈东灿,窦斌,田红,等.基于花岗闪长岩矿物成分的热导率预测模型[J].地质科技情报,2019,38(2):262-266.

基于花岗闪长岩矿物成分的热导率预测模型

陈东灿¹, 窦 斌¹, 田 $(1^{1}, \beta \mathbb{B}^{1}, \mathbb{H} \mathbb{F}^{2})$

(1. 中国地质大学(武汉)工程学院,武汉 430074; 2. 吉林大学环境与资源学院,长春 130012)

摘 要:岩石矿物成分的种类及相应体积分数是影响岩石热导率的主要因素,通过室内实验测定花岗闪长岩的热 导率及矿物成分的含量,研究矿物成分对岩石热导率的影响规律。将岩样各矿物成分体积分数转化为相同平板 面积的壁面厚度,建立了花岗闪长岩矿物成分对其热导率影响规律的预测模型,预测值与实测值误差在 0.2~0.6 W/(m•K)之间,通过修正系数调整模型使误差控制在 5%范围,同时分析模型得到花岗闪长岩热导率随石英体 积分数与长石体积分数比值的增加而变大,为开发利用干热岩地热能和岩石热物性研究提供理论参考。 关键词:花岗闪长岩;热导率;矿物成分;预测模型

中图分类号:P642 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-7849(2019)02-0262-05

Thermal Conductivity Prediction Model Based on Mineral Composition of Granodiorite

Chen Dongcan¹, Dou Bin¹, Tian Hong¹, Xiao Peng¹, Lan Tianshan²

(1. Faculty of Engineering, China University of Geosciences(Wuhan), Wuhan 430074, China;
 2. College of Environment and Resources, Jinlin University, Changchun 130012, China)

Abstract: The types and corresponding volume fractions of rock and minerals are the main factors that affect the thermal conductivity of rocks. The thermal conductivity and the content of mineral components of granodiorite are determined by laboratory experiments. The experimental results are used to study the influence of mineral composition on the thermal conductivity of rock. The volume fraction of each mineral component of the rock sample is converted into the wall thickness of the same flat, and a prediction model of the influence of the granodiorite mineral composition on the thermal conductivity is established. The camoarison of the experimental results and the analysis of the prediction model indicate that the thermal conductivity of granodiorite increases with the augment of the ratio of quartz volume fraction and feldspar volume fraction, which provides a theoretical reference for the utilization of hot dry rock geothermal energy and study of thermal properties of rocks.

Key words: granodiorite; thermal conductivity; mineral composition; prediction model

传统化石能源短缺及环境污染问题越来越严重,所以开发利用可再生能源就变得愈发紧迫。地 热能是唯一可提供长期基础荷载的可再生能源,具 有更加绿色、高效、安全的属性^[1]。干热岩地热能具 有能量大、分布广、利用率极高、安全性好、无污染、 热能稳定持续、发电可控性强等特点,是地热能开发

收稿日期: 2018-01-14 编辑:杨 勇

基金项目:国家自然科学基金项目(41674180;41602374);中国地质大学(武汉)中央高校基本科研业务费专项资金资助项目 (1810491A19);中国地质大学(武汉)2018年大学生基础科研训练计划(1810491034)

作者简介:陈东灿(1991—),男,现正攻读土木工程专业硕士学位,主要从事干热岩热学性质与传热机理研究工作。E-mail:cdc@ cug.edu.cn

通信作者:窦 斌(1973—),男,教授,主要从事干热岩热学性质与传热机理研究与教学工作。E-mail:briandou@163.com

的重要目标^[2]。干热岩是一种埋深 $3 \sim 10 \text{ km}$,具有 传导型热量、干的、不透水的热岩体[3-4],较常见的干 热岩有花岗岩和花岗闪长岩等[4]。在低渗透性干热 岩体中建立大体积的储水层,并与注入井和生产井 系统进行适当的连通来提取热能供发电使用^[5]。通 过水提取热能的过程中,岩石的传热能力直接影响 提取热能的速率和储层自身的热能传递,而热导率 是表征岩石传热能力的物理量^[6]。Miao 等^[7]认为 某些岩石热导率随着矿物含量、孔隙率、孔隙流体和 各向异性的不同而发生变化^[8],岩石的热导率主要 取决于组成岩石的矿物成分及其相对含量^[9], Andrés 等^[10]主要研究了石英、方解石、白云母等矿 物含量对砂岩热导率的影响。前人虽然也对岩石矿 物成分及热导率的关系进行了研究,但并未揭示各 矿物成分对岩石热导率的影响规律,也未从理论推 导角度得出相对可靠的岩石热导率预测模型。将岩

样各矿物成分体积分数转化为相同平板面积的壁面 厚度,通过理论分析和实验结果提出更可靠的热导 率预测模型,为工程上评估干热岩体地热储层采热 效率、可利用热量等提供理论依据。

1 岩样的选取及制备

岩样主要采集于秭归盆地东南边缘的露头岩石,采集路线有2条,一是秭归向斜西侧从核部到翼部,岩性由花岗闪长岩、花岗岩、闪长岩等岩浆岩向 片麻岩等变质岩变化;二是黄陵背斜东侧核部到翼 部,主要为中细粒斜长花岗岩、中粗粒花岗闪长岩。 对所采集岩样(图1)取小块研磨成粒径0.071 mm (200 目)粉末进行 XRD 矿物成分分析,综合选出花 岗闪长岩样品,岩样加工成7个直径50 mm、长10~ 20 mm 的圆柱体。



图 1 采集岩样照片图 Fig. 1 Sample photos of rocks

2 实验过程与结果

采用吉林大学环境与资源学院高温高压水— 岩—气作用实验室 TCS 热导率扫描仪测得岩样热 导率,TCS 是基于使用聚焦、移动和持续运行的热 源并结合红外温度传感器对研究样品的平面或圆柱 面(沿柱面轴)的扫描技术,能够快速操作、非接触式 的无损测量岩样热导率^[11],如图 2 所示。

从表1可以看出,岩样中主要矿物长石矿物(钾 长石、钠长石)的体积分数为60%~70%,石英为 10%~20%。如图 3 所示,岩样的热导率值随着石 英与长石体积分数比值的增加而变大。

3 花岗闪长岩热导率数学模型的建立

岩石是由一种或几种造岩矿物按照一定的方式 结合而成的矿物天然集合体,影响岩石热导率的因 素较多,为了简化问题,突出影响干热岩(花岗闪长 岩)热导率的几个主要因素,作如下假设:



图 2 TCS 热导率扫描仪 Fig. 2 Thermal conductivity scanning

表1 实验测得的岩样主要矿物成分含量及热导率

Table 1 The main mineral composition and thermal conductivity of rock samples measured by the experiment

	石英	钠长石	钾长石	角闪石	绿泥石	其他	热导率/	
石件编写一	$arphi_{ m B}/$ %						$(\mathbf{W} \cdot \mathbf{m}^{-1} \cdot \mathbf{K}^{-1})$	
S1	11.32	59.12	1.02	10.99	_	17.54	2.397	
S2	13.49	42.61	28.59	_	0.41	14.90	2.648	
S 3	17.02	54.01	11.69	4.06	1.69	11.53	2.693	
S 4	20.82	47.08	28.01	_	_	4.09	2.813	
S 5	18.95	68.21	_	1.03	8.39	3.42	2.897	
S6	18.76	48.77	18.29	2.45	10.13	1.60	3.010	
S7	19.78	61.60	5.40	4.74	2.79	5.69	3.064	



图 3 石英与长石体积分数之比与岩样热导率的关系图 Fig. 3 Relationship between quartz and feldspar volume fraction and rock thermal conductivity



图 4 预测岩石热导率的转化模型

Fig. 4 A converting model for predicting the thermal conductivity of rock

(1)岩样各矿物成分体积分数转化为相同面积 的平面的厚度 δ ,如图 4 所示,第一层厚度 δ_1 代表石 英的体积分数,相应地 δ_2 , δ_3 , δ_4 分别代表长石、角闪 石、绿泥石的体积分数。

(2)将岩石孔隙率和水饱和度的影响计入表 1"其他"中,取空气、水(25℃)、黏土的平均热导率值1.04,作为表 1 中"其他"的热导率。

最简单的一维稳定导热是"大平壁"在没有热源 情况下的稳定导热,根据傅里叶定律^[12],得到平壁 导热稳定导热的热流密度^[13]为:

$$q = -\lambda \frac{\mathrm{d}t}{\mathrm{d}x} = \lambda \frac{t_{w,1} - t_{w,2}}{\delta} = \mathbf{\ddot{\pi}} \mathbf{\Xi}$$
(1)

式中:*t_{w,1}、t_{w,2}*分别为岩石左右两外侧温度;λ为岩 石热导率;δ为岩石厚度。于是有:

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}x}\left(-\lambda\,\frac{\mathrm{d}t}{\mathrm{d}x}\right) = -\lambda\,\frac{\mathrm{d}^2t}{\mathrm{d}x^2} = 0 \tag{2}$$

积分解得,

$$t = C_1 x + C_2 \tag{3}$$

首先以 1、2 两层平壁传热为例,假设已知 $t_{w,1}$ 、 $t_{w,2}$ 、 λ_1 和 λ_2 ,以及两层的厚度 δ_1 和 δ_2 ,在 $x = \delta_1$ 交 接面上给出边界条件一,即给出相互紧密接触的两 固体的导热系数 λ_1 和 λ_2 ,在交界面上两物体的温度 在任何时刻必须相同,热流密度也相同,根据式(1), 于是有:

$$x = \delta_1 \operatorname{I} t_1 = t_2$$

- $\lambda_1 \frac{\mathrm{d}t_1}{\mathrm{d}x}\Big|_{x=\delta_1} = -\lambda \frac{\mathrm{d}t_2}{\mathrm{d}x}\Big|_{x=\delta_2}$ (4)

交界面温度 t₁ 是一个待定的未知温度。若第 1 层的内侧面和第 2 层的外侧面都给出边界条件:

$$x = 0 \mathbf{H}, t_1 = t_{w,1} \tag{5}$$

根据式(3),可得第1层和第2层各自的温度分 布为:

$$0 \leqslant x \leqslant \delta_1 \text{ if }, t_1 = C_{11}x + C_{21} \tag{7}$$

 $\delta_1 \leq x \leq \delta_1 + \delta_2$ 时, $t_{11} = C_{12}x + C_{22}$ (8) 联立式(4)~(8),可求得式中积分常数 $C_{11}, C_{21}, C_{12}, C_{22}$ 。

于是得:
$$q = -\lambda_1 \frac{\mathrm{d}t_1}{\mathrm{d}x} = \frac{t_{w,1} - t_{w,2}}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2}}$$
 (9)

根据"热路"原理^[11],式(9)可直接由串联热阻 相加原则延伸为有 *n* 层组成的多层平壁,则:

$$q = -\lambda_1 \frac{\mathrm{d}t_1}{\mathrm{d}x} = \frac{t_{w,1} - t_{w,2}}{\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i}}$$
(10)

联立式(1)和式(10),解得:

$$\lambda = \frac{\delta}{\sum_{i=1}^{n} \frac{\delta_{i}}{\lambda_{i}}}$$
(11)
由于 $\delta = \sum_{i=1}^{n} \delta_{i}$,则 $\delta = 1$,于是:

$$\lambda = \frac{1}{\sum_{i=1}^{n} \frac{\delta_i}{\lambda_i}} \tag{12}$$

4 分析与讨论

表 2 中, Côté 等^[14]测得石英的热导率为 7.69 W/(m・K), Miao 等^[7]测得钾长石、钠长石的热导 率分别为 2.3 W/(m・K), 2.34 W/(m・K), 岩样 中长石的含量高, 但热导率值偏低, 石英的含量中 等, 但其热导率值较高, 所以长石和石英的相对含量 主导着岩石热导率的变化, 如图 3 所示, 长石与石英 体积分数的比值越大, 岩样热导率越高。由式(12) 可知, λ_i 值越大, 则分母 $\sum_{i=1}^{n} \frac{\delta_i}{\lambda_i}$ 的值越小, 从而岩样 热导率 λ 越大; 而 δ_i 值越大, 则分母 $\sum_{i=1}^{n} \frac{\delta_i}{\lambda_i}$ 值越大, 相应地岩样热导率 λ 越小。 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ 之间相互 独立, 而 $\sum_{i=1}^{n} \delta_i = 1, \delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n$ 之间相互影响, 这与 图 2 实验所得规律相吻合。

表 2 常见造岩矿物的热导率^[7,14]

 Table 2
 Thermal conductivity of common rock-forming minerals

矿物	热导率 /(W・m ⁻¹ ・K ⁻¹)	矿物	<mark>热导率</mark> /(W・m ⁻¹ ・K ⁻¹)		
石英	7.69	云母	2.03		
钾长石	2.30	角闪石	3.46		
钠长石	2.34	绿泥石	5.15		
斜长石	1.53	橄榄石	4.57		
空气	0.026	7K (25℃)	0.59		
黏土	1.28				

图 5 中横坐标上依然按照岩样石英与长石体积 分数的比值从小到大排列,热导率预测值整体也呈 现增长趋势,并且随着其比值的增大,岩样热导率实



Fig. 5 Comparison of measured and predicted values of rock thermal conductivity

测值与预测值之间的误差也逐渐减小,更进一步说 明长石和石英的相对含量主导着岩石热导率的变化 趋势。影响岩样热导率的因素有很多,如矿物成分、 孔隙率、天然裂隙、孔隙水、测量误差等,矿物成分虽 是主导因素,但仅依据矿物成分不能得到精确的岩 石热导率预测值,所以需对热导率预测值进行修正。 实验得到岩样实测值与预测值之间的误差在 0.2~ 0.6 W/(m•K)之间,如表 3 所示,去掉最大和最小 误差值,再取平均值 0.277 W/(m•K)作为热导率 预测值的修正值,代入式(12),得到:

$$\lambda = \frac{1}{\sum_{i=1}^{n} \frac{\delta_i}{\lambda_i}} + 0.277 \tag{13}$$

表 3 岩样热导率实测值与预测值之间的误差

Table 3 The errors between actual measured value and predicted value of thermal conductivity of rock samples

岩样	S1	S2	S 3	S 4	S 5	S6	S7
热导率 / (W・m ⁻¹ ・K ⁻¹)	0.299	0.516	0.382	0.254	0.219	0.207	0.231

将由修正之后的岩石热导率预测模型得到的结 果与实测值进行对比,如图 6,7 所示。图 5 中 S2 处 误差最大为 9%,可能是热导率测量操作或矿物成 分鉴定误差导致,而图 5 中其余岩样,包括图 6 中 Zhao 等^[15]所测不同地区花岗闪长岩热导率与预测 值误差均小于 5%,这 5%的误差主要是由岩石孔隙 度、天然裂隙、结合水等因素引起。



图 6 岩样热导率实测值与修正预测值比较图







Fig. 7 Comparison of actual and measured values of thermal conductivity of rock samples

5 结 论

(1)通过定性研究花岗闪长岩各矿物成分体积 分数,采用转化模型得出花岗闪长岩矿物成分体积分 数与其热导率之间的预测模型,并经过修正误差在 5%以内,在一定程度上为地热工程提供理论依据。

(2) 由花岗闪长岩矿物成分体积分数与其热导

率之间的数学关系式及实验研究结果可知,花岗闪 长岩热导率值随着石英与长石体积分数比值的增加 而变大。工程上利用干热岩地热能时,用水来提取 热能,将来可进一步研究岩石形成矿物的吸湿特性 及其对矿物热性能的影响,以便更好地评估水岩换 热效率。

参考文献:

- [1] 陈梓慧,郑克棪,姜建军.试论我国干热岩地热资源开发战略 [J].水文地质工程地质,2015,42(3):161-166.
- [2] 李德威,王焰新.干热岩地热能研究与开发的若干重大问题
 [J].地球科学:中国地质大学学报,2015,40(11):1858-1869.
- [3] 许天福,张延军,于子望,等.干热岩水力压裂实验室模拟研究 [J].科技导报,2015,33(19):35-39.
- [4] 窦斌,高辉,周刚,等.我国发展增强型地热开采技术所面临的 机遇与挑战[J].地质科技情报,2014,33(5):208-210.
- [5] 王晓星,吴能友,等. 增强地热系统开发技术研究进展[J]. 地球 物理学进展,2012,27(1):355-362.
- [6] 龚建洛,张金功,等. 沉积岩热导率的影响因素研究现状[J]. 地 下水,2013,35(4):246-250.
- [7] Miao Sheqiang, Li Heping, Chen Gang. Progress of high temperature and high pressure experimental study on the thermal conductivity of the minerals and rocks[J]. Progress in Geophysics, 2013, 655/657:123-126.
- [8] Albert K, Schulze M, Franz C, 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.
- [9] Fjeldskaa W, Christie O H J, Midttomme K, et al. On the determination of thermal conductivity of sedimentary rocks and the significance for basin temperature history[J]. Petroleum Geoscience, 2009, 15(9): 367-380.
- [10] Andrés C, RÁlvarez R, Ordóñez A. Estimation of thermal conductivity of rocks from their mineralogical composition for modeling purpose[J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75 (266):1-10.
- [11] Popov Y A. Characterization of rock thermal conductivity by high-resolution optical scanning [J]. Geothermics, 1999, 28: 253-276.
- [12] Clauser C. Heat transport processes in the Earth's crust[J]. Surv. Geophys. ,2009, (30):163–191.
- [13] 王补宣. 工程传热传质学[M]. 北京:科学出版社,2015.
- [14] Côté J, Konrad J. M. Thermal conductivity of base-course materials[J]. NRC Research Press, 2005, 42, 61-78.
- [15] Zhao X G, Wang J, Chen F, et al. Experimental investigations on the thermal conductivity characteristics of Baishan granitic rocks for China's HLW disposal[J]. Tectonophysics, 2016, 683:124-137.