

关于岩石导热性野外测定方法的研究

江 海

山东正元地质资源勘探有限责任公司, 山东 济南 250000

摘 要: 导热系数是岩石重要的物理参数之一, 其在地热能开发及岩土热工程应用中有着重要意义。目前的测试方法需要将岩样采回实验室进行表面加工, 运输和加工过程会破坏岩石结构和影响含水率等, 不仅测试工艺复杂, 而且导致测试结果不准确。本研究提出一种现场获取岩石导热系数的新方法。利用导热耦合剂填充岩石表面与探头之间的接触面, 减小测试过程中的接触热阻, 辅助热物性测试仪器来开展野外导热系数测试工作。通过配制不同导热硅脂与不同铜粉掺量充分混合的导热耦合剂进行对比实验, 确定导热耦合剂的最优配比。实验表明, 导热耦合剂的涂抹能有效地减小探头与岩石表面的接触热阻, 提高测试精度, 且导热耦合剂本身对岩石的导热系数影响甚微。研究成果可为野外准确便捷地获得岩石导热系数提供参考。

关键词: 岩石导热性; 导热系数; 热物性测试仪; 导热耦合剂; 野外测定

STUDY ON THE FIELD MEASUREMENT METHOD OF ROCK THERMAL CONDUCTIVITY

JIANG Hai

Shandong Zhengyuan Geological Resources Exploration Co., Ltd., Jinan 250000, China

Abstract: Thermal conductivity coefficient, as one of the important physical parameters of rock, is of great significance in geothermal energy development and geotechnical thermal engineering application. The current test method requires the collected rock samples to be processed in the laboratory. The transportation and processing can damage the rock structure and affect the water content. It needs a complex test process, and yields inaccurate results. This study proposes a new test method to obtain the thermal conductivity coefficient of rock on site. The contact surface between rock surface and probe is filled with thermal coupling agent to reduce thermal contact resistance during the test process, and the field thermal conductivity test is carried out with the aid of the thermophysical property tester. The optimal ratio of thermal coupling agent is determined by the comparison experiment of preparing thermal coupling agents by fully mixing different amounts of thermally conductive silicone grease and copper powder. The experiment shows that the application of thermal coupling agent can effectively reduce the thermal contact resistance between probe and rock surface, and improve the test precision. Moreover, the thermal coupling agent itself has little effect on the thermal conductivity coefficient of rock. The research results can provide reference for obtaining thermal conductivity coefficient of rock accurately and conveniently in the field.

Key words: thermal conductivity of rock; thermal conductivity coefficient; thermophysical property tester; thermal coupling agent; field measurement

收稿日期:2019-12-13; 修回日期:2020-02-20. 编辑:张哲.

作者简介:江海(1976—),男,硕士,高级工程师,主要从事地质工程、岩土工程勘察工作,通信地址 山东省济南市高新区颖秀路 3366 号 中国冶金地质总局山东局, E-mail//HBJC2586@126.com

0 引言

岩土体的热物理性参数测试是地热能开发和利用过程中的关键环节,准确和便捷地评估岩土的热物理参数,对人类合理开发地热能有着重要意义^[1]。岩石的导热性能通常用导热系数 λ 评价。岩石的导热系数受到岩石的岩性、孔隙率、含水率、温度和压力等诸多因素的影响^[2-3]。研究表明,岩石的导热系数随岩石的孔隙率增大而降低^[4-5]。另外,常温常压条件下,水的导热系数 $[0.599 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})]$ 远大于空气的导热系数 $[0.026 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})]$,因此岩石的含水率增大,导热系数也迅速增大^[6]。国外对岩石导热系数的研究相对较早,技术也较成熟。20世纪90年代即提出了岩石的导热系数主要受岩石的孔隙率、矿物、结构影响的相关理论^[7],其相关的实验研究也相对较早^[8-10]。国内近年来也开展了相关的研究,研究多集中于导热系数的影响因素,对于导热系数测量方面的研究却很少。

传统的导热系数测量方法工艺复杂,对测试样品表面的平整和光滑程度要求较高,岩样必须在实验室切割打磨。然而,在野外缺乏操作工具,很难完成对岩样的切割和打磨,必须取样带回实验室测试,需要对样品进行钻取、搬运、加工等环节,耗时较长且成本较高。而且取样的过程破坏了原始的含水率、结构等参数,某些陆源碎屑岩,尤其是粉砂岩在打磨过程中很难获取较好的平整度,部分粉砂岩的碎屑颗粒会因打磨过程而脱落(图1),使得室内测得的参数与实际值存在较大的误差。



图1 砂岩打磨过程中造成的孔隙

Fig. 1 Pores in sandstone formed by grinding

针对上述问题,本文拟研究一种能够在野外直接测量岩石导热系数的方法。该方法能够便捷地测出岩

石的热物性参数,缩短周期,降低成本,提高精度。

现有的热物性测试仪器虽然能够在便携性方面满足野外测试的要求,但测试仪器探头对测试样品表面的平整和光滑程度要求较高,因为热物性测试过程中,探头与岩石界面间的接触热阻是影响导热系数测试的关键因素。传统的观点认为,当两接触表面的实际接触面积只占名义接触面积的0.01%~0.1%,这种接触状况会引起热流的收缩,从而产生接触热阻^[11]。因此,测试前为确保热物性探头与岩石样品的充分贴合,需要将岩石试样表面打磨平整,减小传感器与试样的接触热阻。然而,在野外缺乏操作工具,很难完成对岩样的切割和打磨。为解决该问题,需要对野外样品及探头的接触面进行处理,使得样品满足测试条件。利用导热耦合剂填充探头和岩石接触面之间的空隙,可减小接触热阻,确保测试的准确性。

导热耦合剂可用导热胶和导热填料配制而成。一直以来,导热胶的研制都是材料科学的研究热门,国内外学者针对导热胶的导热性能开展了大量研究。目前导热胶的制备一般有两种途径:合成高导热性能的聚合物;或者在胶黏剂中加入高导热系数的填料^[12]。其中后者是增加材料导热性能的主要方法。导热填料一般分为两种:一种是导热绝缘填料,另一种是导热非绝缘填料。非绝缘填料主要为金属及炭基粉末,且导热性能普遍大于绝缘填料^[13]。研究表明,当填料与基体导热系数比超过100:1时,复合材料导热性随填料增加只会有微小增加^[14],因此盲目的增大填料的导热系数并不能使导热耦合剂的导热系数有明显增加。而当填料在基体内堆积形成导热网链后,复合材料的导热系数并不会随着填料份额增加而增大,而是先增大后减小^[15],因此填料与基体的比例也应适量。

目前,导热胶的制备更多地应用于电子产品及机械制造中,针对热物性测试的导热胶还认识不足,填料与基体的最优配比还无法确认。本研究以制备满足现场快速准确测试岩石导热系数的导热耦合剂为主要目的,制造出热物性测试仪野外测试所需要的条件,使得野外岩石导热系数测试工作可以方便快捷地展开。

1 实验材料制备

导热耦合剂的制备采用在普通胶黏剂中加入填料的方法,胶黏剂主要起粘结填料颗粒的作用,填料颗粒

则会在胶黏剂中形成热流通道,增强胶黏剂的导热性能^[16].

1.1 材料

1)导热填料

常见导热填料有各种金属粉末,如铝粉、铜粉等;导热系数较高的晶体矿物,如石英、金刚石粉末等;以及各种金属氧化物及人工合成材料^[17]. 常见填料的导热系数如表 1.

表 1 常见导热填料的导热系数
Table 1 Thermal conductivity coefficient of common conductive fillers

材料名称	导热系数/[W/(m·K)]	材料名称	导热系数/[W/(m·K)]
纯铝	236	AlN	300
纯铜	398	Al ₂ O ₃	36
银	427	石墨	105~243
锌	121	金刚石	2000

综合考虑填料的价格及性能等因素,选用铜粉作为填料.

2)导热硅脂

以市面上常见的 3 种计算机散热硅质为基质,将填料与基体按不同质量比充分混合,制成导热耦合剂. 导热硅脂具体信息如表 2 所示.

3)岩石样品

测试岩样取自湖北武汉南望山,采取完整岩体,确保得到的岩块尺寸不小于 10 cm,表面尽可能平整,且不含有裂纹. 为保证取样和运输过程中岩样保持天然含水率,用保鲜膜包裹岩样,并用胶带缠紧,然后进行标记,共取得不同岩样 5 块. 其中粉砂岩由于在打磨过程中很难获取较好的平整面,故取 3 块岩样,取其平均值;而灰岩和石英砂岩打磨后表面较平整光滑,测量误差较小,各取 1 块.

各类岩样的基本物理性质如表 3 所示,其中导热系数采用传统的测量方法所得,体积比热采用 Hot-

表 3 岩石基本物理参数

Table 3 Basic physical parameters of rock

编号	岩性	导热系数/ [W/(m·K)]	体积比热/ [10 ⁶ J/(m ³ ·K)]	密度/ (g/cm ³)	孔隙率/ %
1	C 灰岩	2.89	2.14	2.68	0.74
2	S 粉砂岩	2.32	1.69	2.62	13.11
3	D 石英砂岩	3.45	1.81	2.65	6.42

Disk 热常数分析仪测试,密度采用封蜡法测试,孔隙率由岩样干密度和饱和密度换算而得.

1.2 样品制备

在选用铜粉时,考虑到铜粉与硅脂需要充分混合,目数应尽可能高. 但研究显示,在质量相同的条件下,颗粒粒径越小,其比表面积越大,颗粒之间接触的热阻越大,不利于热传导^[18]. 因此选用 800 目的铜粉作为填料. 分别将 3 种不同导热系数的导热硅脂与铜粉按照质量比 100:30,100:40,100:50 进行充分混合并搅拌均匀(比例继续增大时,铜粉与导热硅脂难以充分混合均匀,且通过一组测试得知,当二者比例为 100:70 时,测量误差较大,故只选用这 3 组),制得导热耦合剂,见表 4 和图2.

表 4 导热耦合剂制备

Table 4 Preparation of thermal coupling agents

导热硅脂编号	导热硅脂与铜粉质量比
第一类	100:30
	100:40
	100:50
第二类	100:30
	100:40
	100:50
第三类	100:30
	100:40
	100:50

表 2 导热硅脂信息

Table 2 Features of thermal conductive silicone grease

导热胶编号	名称	生产厂家	密度/(g/cm ³)	工作温度/℃	导热系数/[W/(m·K)]
第一类	导热硅脂	奥斯邦(中国)有限公司	2	-60~+300	1
第二类	导热硅脂	无锡市科朗电子材料有限公司	2.3	-50~+200	2.5
第三类	银硅脂	梓宏数码专营店	2	-30~+280	4.15



图2 导热耦合剂

Fig. 2 Thermal coupling agents

2 测试方法与过程

测试仪器采用 ISOMET2114 热物性测试仪, 它是一部基于瞬态测试理论研制而成的便携式热物性测试仪器, 配备了两种测试探头: 一种为探针式, 适用于软土等柔性材料; 另一种为表面式, 可用于表面平整光滑的岩土介质。测试精度为 5%。测试岩石的导热系数时, 测试岩样需要满足所测区域直径不小于 80 mm, 厚度不低于 40 mm, 试样表面应尽可能地光滑平整^[19]。将表面式探头置于试样光滑表面, 由位于探头表面中心位置处的线热源进行加热, 探头边缘位置的传感器记录岩样表面的温度变化, 最后由主机计算出岩石的热物性参数, 如图 3 所示。该仪器基于瞬态的测试理论, 相比稳态的测试方法, 可大大降低测试时间。其瞬态的测试原理为^[20]: 根据经典物理学中的拉普拉斯变

换, 在无限大的均匀介质中, 与线热源相距 r 处的点的温度随时间的变化规律为:

$$T = \frac{Q}{4\pi\lambda} \int_0^x \left(\frac{e^{-u}}{u} \right) du \quad (1)$$

式中: T —温度($^{\circ}\text{C}$); Q —单位时间单位长度热源提供的热量; λ —导热系数 [$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$].

$$x = \frac{r^2}{4at} \quad (2)$$

t 为时间, 当 t 值极大时, x 值极小, 式(1)变为:

$$T = \frac{Q}{4\pi\lambda} \left(\ln \frac{4at}{r^2} - \gamma \right) \quad (3)$$

γ 为欧拉常数, 为 0.5772。于是在任意有效时间区间内有:

$$\lambda = \frac{Q}{4\pi\Delta T} \Delta \ln t \quad (4)$$

由此可根据测试温度的变化值与测试时间对数的变化值之间的关系求得导热系数。



图3 ISOMET2114 材料热物性测试仪

Fig. 3 ISOMET2114 thermophysical property tester

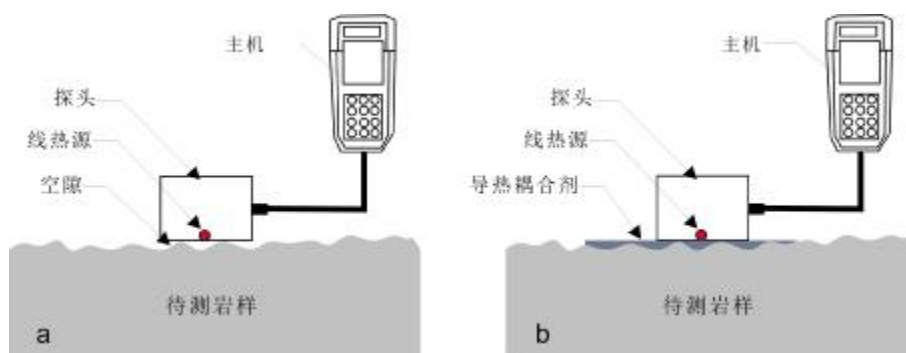


图4 测试过程示意图

Fig. 4 Schematic diagram of test process

a—无导热耦合剂(without thermal coupling agent); b—有导热耦合剂(with thermal coupling agent)

实验基本思路是取导热系数各异的岩样若干,分别测试其在天然粗糙表面状态下,粗糙表面涂抹不同导热耦合剂以及打磨加工之后的导热系数,根据测试结果确认导热耦合剂的最优配比.如图4所示.为保证测试精度,每种岩石均在同一面上进行测试,先测试粗糙面下的导热系数,然后在该面上涂导热耦合剂,测试该状态下的导热系数,最后再将该面进行加工打磨整形,测试平整状态下的导热系数(图5).



图5 测试过程

Fig. 5 Test process

具体实验步骤为:

- 1)将天然岩样自然风干,确保各测试阶段岩样含水率及测试温度保持一致;
- 2)选择一个较平整的面,测试岩石在自然状态下的导热系数,为保证测试精度,每个样品测试3次,取平均值;
- 3)在第2步的岩面上均匀涂抹一层导热耦合剂,填充岩样表面凹槽,形成平面,将热物性测试仪表面式探头与耦合剂充分贴合,测试其导热系数;
- 4)测试完毕后,将导热耦合剂用小刀刮去,然后再用水冲洗干净,自然状态下晾干48 h,使用另一种导热耦合剂对岩样表面进行填充,测试其导热系数;
- 5)重复步骤3、4直至所有导热耦合剂测试结束;
- 6)用角磨机对岩样进行加工,使岩石表面平整,测试其导热系数;
- 7)为确保导热耦合剂对测试误差没有太大影响,在岩样光滑表面涂抹导热耦合剂,测试在导热耦合剂作用下岩石导热系数.

3 测试结果与分析

按照上述实验步骤,对粉砂岩、灰岩及石英砂岩在

表面粗糙的情况下的导热系数进行测试,并在探头与岩体粗糙表面涂抹不同配比的导热耦合剂进行对比实验,最后将岩块打磨,测试打磨后传统测试条件下的导热系数.对上述步骤各阶段岩石导热系数进行分析,所得结果见表5~7.

表5 粉砂岩导热系数测试结果

Table 5 Test results of the thermal conductivity coefficient for siltstone

导热胶种类	测试条件	导热系数/ [W/(m·k)]	相对误差
无	粗糙表面	1.69	-27.16%
第一类	粗糙表面+100:30 导热耦合剂	2.65	14.22%
	粗糙表面+100:40 导热耦合剂	2.85	22.84%
	粗糙表面+100:50 导热耦合剂	2.45	5.60%
第二类	粗糙表面+100:30 导热耦合剂	2.98	28.45%
	粗糙表面+100:40 导热耦合剂	2.94	26.72%
	粗糙表面+100:50 导热耦合剂	2.99	28.88%
第三类	粗糙表面+100:30 导热耦合剂	2.18	-6.03%
	粗糙表面+100:40 导热耦合剂	2.13	-8.19%
	粗糙表面+100:50 导热耦合剂	2.22	-4.31%
无	平整表面	2.32	

表6 灰岩导热系数测试结果

Table 6 Test results of the thermal conductivity coefficient for limestone

导热胶种类	测试条件	导热系数/ [W/(m·k)]	相对误差
无	粗糙表面	1.60	-44.64%
第一类	粗糙表面+100:30 导热耦合剂	2.68	-7.27%
	粗糙表面+100:40 导热耦合剂	2.74	-5.19%
	粗糙表面+100:50 导热耦合剂	2.71	-6.23%
第二类	粗糙表面+100:30 导热耦合剂	3.05	5.54%
	粗糙表面+100:40 导热耦合剂	2.94	1.73%
	粗糙表面+100:50 导热耦合剂	2.98	3.11%
第三类	粗糙表面+100:30 导热耦合剂	2.39	-17.30%
	粗糙表面+100:40 导热耦合剂	1.78	-38.41%
	粗糙表面+100:50 导热耦合剂	2.51	-13.15%
无	平整表面	2.89	

表 7 石英砂岩导热系数测试结果

Table 7 Test results of the thermal conductivity coefficient for quartz sandstone

导热胶种类	测试条件	导热系数/ [W/(m·k)]	相对误差
无	粗糙表面	2.96	-14.20%
	粗糙表面+100:30 导热耦合剂	4.09	18.55%
	粗糙表面+100:40 导热耦合剂	3.9	13.04%
第一类	粗糙表面+100:50 导热耦合剂	3.6	4.35%
	粗糙表面+100:30 导热耦合剂	4.47	29.57%
	粗糙表面+100:40 导热耦合剂	5.06	46.67%
第二类	粗糙表面+100:50 导热耦合剂	4.95	43.48%
	粗糙表面+100:30 导热耦合剂	4.14	20.00%
	粗糙表面+100:40 导热耦合剂	4.09	18.55%
第三类	粗糙表面+100:50 导热耦合剂	3.84	11.30%
	平整表面	3.45	

各类导热耦合剂测试效果如图 6 所示。

通过不同岩石导热系数测试数值对比可见，在岩石未经打磨且不涂抹导热耦合剂的状态下，所测得的导热系数普遍较低；在涂抹导热耦合剂之后，导热系数测试精度都有不同程度的提高。其中灰岩的导热系数测试误差由 44.64%降低到 1.73%，效果显著。由实验数据可知，在同一种导热硅脂的不同铜粉掺量配比情况下，3 组材料所表现出的精度走势相同，随着铜粉在材料总质量中的比例增大，所测得岩石导热系数测试值均表现出越接近于岩样打磨后直接测试情况下的数据。综合测试效果和导热胶的成本，当选用第一类导

热胶配制导热耦合剂，且导热胶与铜粉的比例为 100：50 时，整体上其测试值与真实值偏差最小，最大偏差为 6.23%。综合仪器自身的测试精度可以认为，导热耦合剂的应用可以获取较为精确的导热系数测试值。因此在导热系数测试过程中，应该选用由第一类导热胶为基底，铜粉掺量为 100：50 的导热耦合剂。

为确保导热耦合剂对测试结果没有太大影响，在上述岩石打磨后的表面上涂抹导热耦合剂，测试在导热耦合剂作用下岩石导热系数。导热耦合剂选用第一类导热胶，铜粉掺量为 100：50，测试结果如表 8 所示。

表 8 导热耦合剂影响测试结果

Table 8 Test results under the effect of thermal coupling agents

样品岩性	测试条件	导热系数/ [W/(m·k)]	相对误差
粉砂岩	平整表面	2.32	5.17%
	平整表面+100:50 导热耦合剂	2.44	
灰岩	平整表面	2.89	1.04%
	平整表面+100:50 导热耦合剂	2.92	
石英砂岩	平整表面	3.45	4.93%
	平整表面+100:50 导热耦合剂	3.62	

测试结果显示，对于灰岩这类碳酸盐而言，导热耦合剂的涂抹对测试结果不会产生较大的影响，误差控制在 1%左右；而对于粉砂岩和石英砂岩等陆源碎屑岩，导热系数测试值受导热耦合剂的影响较大，误差均为 5%左右。这是因为粉砂岩等碎屑岩体在打磨过程中很难获取较好的平整度，部分粉砂岩的碎屑颗粒在打磨过程中脱落，形成许多微小孔隙。而导热耦合剂

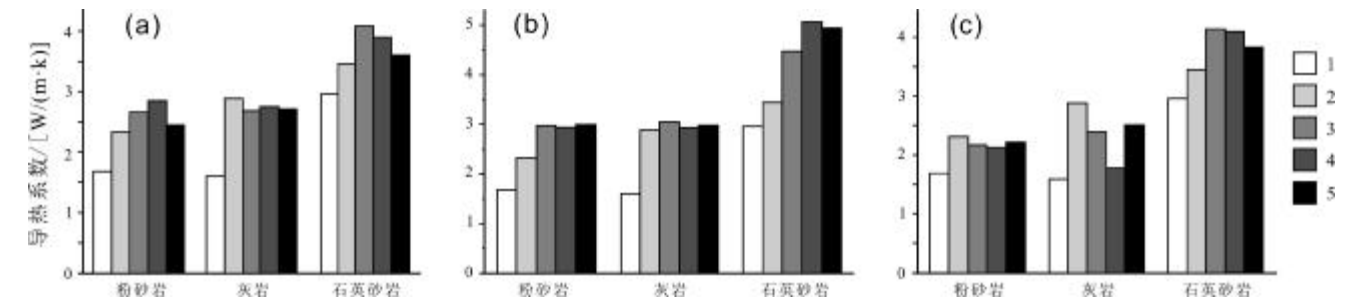


图 6 各类导热胶测试结果对比

Fig. 6 Comparison of test results of various thermal conductive adhesives

a—第一类导热胶(Type 1 thermal conductive adhesive); b—第二类导热胶(Type 2); c—第三类导热胶(Type 3); 1—粗糙表面(rough surface); 2—平整表面(flat surface); 3—粗糙表面+100:30 导热耦合剂(rough surface with 100:30 thermal coupling agent); 4—粗糙表面+100:40 导热耦合剂(rough surface with 100:40 thermal coupling agent); 5—粗糙表面+100:50 导热耦合剂(rough surface with 100:50 thermal coupling agent)

能够填充此类孔隙,减小接触热阻,因此在涂抹导热耦合剂后所测导热系数相对于传统的打磨后直接测试值较高。而碳酸盐岩为化学沉积岩,一般不会产生明显的颗粒,因此可认为打磨过程不会造成因碎屑颗粒脱落而产生孔隙。所以其涂导热耦合剂后导热系数不会发生大的变化。

综合上述分析可知,热耦合剂的涂抹对岩石导热系数真实值没有太大影响,因此,本文所研制的导热耦合剂可用于在野外直接测试岩石的导热系数。

4 结论

为研究岩石的导热系数野外测量方法,采用不同导热硅脂与不同比例铜粉掺量充分混合,配制了 9 组导热耦合剂。利用配制的导热耦合剂填充测试时岩石表面与热物性测试仪器探头之间的接触面,测试岩石在自然状态下的导热系数,并与传统的测量方法对比,寻找最佳配比的导热耦合剂,所得结论如下:

1)在不涂抹导热耦合剂的情况下,岩石粗糙表面的导热系数测试误差可以达到 40%以上,这个误差对实际工程设计可能带来很大影响。

2)导热耦合剂的涂抹可充分填充探头与野外测试岩样之间的缝隙,减小由于岩样表面空隙过大所产生的接触热阻。综合所有测试数据可以确认,选用第一类导热胶配制导热耦合剂,且铜粉掺量为 100:50 时,耦合剂的导热系数为 $41.1 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,此时整体上导热系数测试值与打磨后直接测试值偏差最小。误差最大为 6.23%,最小为 4.35%,低于仪器测试误差,导热耦合剂在应用中切实有效。导热耦合剂的使用可使测试精度提高约 40%,在实际应用中效果显著。

3)通过对打磨之后的岩样涂抹导热耦合剂并测试其导热系数,可知导热耦合剂在涂抹光滑岩样表面之后,与传统测试方法的最大误差仅为 5.17%,在合理的误差范围以内,因此导热耦合剂的涂抹对岩石导热系数真实值不会产生较大影响。

参考文献:

- [1]Midttømme K, Roaldset E, Aagaard P. Thermal conductivity of selected claystones and mudstones from England[J]. Clay Minerals, 1998,33(1):131-145.
- [2]许模,王迪,蒋良文,等. 岩土体导热系数研究进展[J]. 地球科学与环境学报,2011,33(4):421-427,433.

- [3]欧新功,金振民,王璐,等. 中国大陆科学钻探主孔 100~2000 m 岩石热导率及其各向异性:对研究俯冲带热结构的启示[J]. 岩石学报,2004,20(1):109-118.
- [4]Bloomer J R. Thermal conductivities of mudrocks in the United Kingdom[J]. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 1981,14(4):357-362.
- [5]Sundberg J, Back P E, Ericsson L O, et al. Estimation of thermal conductivity and its spatial variability in igneous rocks from in situ density logging[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2009,46(6):1023-1028.
- [6]Moench A F, Evans D D. Thermal conductivity and diffusivity of soil using a cylindrical heat source[J]. Soil Science Society of America Journal, 1970,34(3):377-381.
- [7]Menberg K, Steger H, Zorn R, et al. Determination of thermal conductivity in the subsurface using laboratory and field experiments and theoretical models[J]. Grundwasser, 2013,18(2):103-116.
- [8]Blázquez C S, Martín A F, Nieto I M, et al. Thermal conductivity map of the Avila region (Spain) based on thermal conductivity measurements of different rock and soil samples[J]. Geothermics, 2017,65:60-71.
- [9]Çanakcı H, Demirboğa R, Karakoç M B, et al. Thermal conductivity of limestone from Gaziantep (Turkey)[J]. Building and Environment, 2007,42(4):1777-1782.
- [10]Stylianou I I, Tassou S, Christodoulides P, et al. Measurement and analysis of thermal properties of rocks for the compilation of geothermal maps of Cyprus[J]. Renewable Energy, 2016,88:418-429.
- [11]张平,宣益民,李强. 界面接触热阻的研究进展[J]. 化工学报,2012,63(2):335-349.
- [12]许强. 导热硅橡胶的制备和性能研究[D]. 济南:山东大学,2010.
- [13]刘汉,吴宏武. 填充型导热高分子复合材料研究进展[J]. 塑料工业,2011,39(4):10-13.
- [14]Wang L, Li F P, Su Z T. Effective thermal conductivity behavior of filled vulcanized perfluoromethyl vinyl ether rubber[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2008,108(5):2968-2974.
- [15]韩志慧,刘传超,范和平. 导热绝缘胶粘剂的研究进展及其在金属基板上的应用[C]//CPCA2011 春季国际 PCB 技术/信息论坛论文集. 上海:中国印制电路行业协会,2011:9-16.
- [16]王秀丽. 高性能热界面材料的制备与接触热阻实验研究[D]. 南京:南京理工大学,2014.
- [17]周文英,齐暑华,李国新,等. 导热胶粘剂研究[J]. 材料导报,2005,19(5):26-29,33.
- [18]张捷. 界面处理对材料导热性能影响的研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2015.
- [19]乔宇,骆进,项伟,等. 秭归地区陆源碎屑岩导热系数试验研究[J]. 地质科技情报,2019,38(1):82-89.
- [20]谢华清,王锦昌,程曙霞,等. 热针法测量材料导热系数研究[J]. 应用科学学报,2002,20(1):6-9.