

断热线法测量污染砂土热导率的实验研究

陈沅江 冯友达*

(中南大学资源与安全工程学院,长沙 410083)

摘要:为研究污染物对砂土热导率的影响,自主设计自动测温断热线法测试系统,对三种不同颗粒尺寸的砂土在汽油、乙酸铅及二者混合等污染条件下的热导率进行测定,获得砂土热导率与其含水率、污染物浓度之间的定量响应规律。研究结果表明:砂土热导率随含水率增大而非单调递增,随含油率的增加而线性递增,水对砂土热导率的影响程度大于油;砂土热导率随乙酸铅溶液浓度增加而线性递减,含铅砂样添加汽油后热导率随含油率的增加以对数形式递减,其降低幅度最少为 38%,铅油混合物对砂土热导率的影响程度大于铅;油水污染砂样的热导率随含水率的变化较复杂。所设计的断热线法测量系统简单易行,测得热导率结果与实际相符,可在工程实际中推广应用。

关键词:自动测温;断热线法;污染砂土;室内实验

中图分类号:X53 **文献标识码:**A **doi:**10.16507/j.issn.1006-6055.2016.05.018

Experimental Study on Measuring Thermal Conductivity of Contaminated Sand by Cut-out Hot Wire Method

CHEN Yuanjiang FENG Youda*

(School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083)

Abstract:To study the influence of pollutants on the thermal conductivity of sand, the automatic test system of cut-out hot wire method with automatic temperature measurement had been self-designed. The thermal conductivity of sand in three different particle sizes of sand under the conditions of gasoline, lead acetate and two mixed contamination was determined. The quantitative response law of sand thermal conductivity and water content and pollutant concentration was obtained. The results shows that: the thermal conductivity of sand increases with the water content, but not monotonically increasing; the thermal conductivity of sand linear increases with gasoline oil content, the effect of water on the thermal conductivity of sand is greater than that of oil; the thermal conductivity of sand linear decreases with increasing concentration of lead acetate solution, the thermal conductivity of lead sand after adding different oil content decreasing in logarithm form, the reduction is at least 38%; the influence of lead oil mixture on the thermal conductivity of sand is greater than that of lead; changes in the thermal conductivity of oil-water sand is complex. The self-designed measurement system is proved to be simple and easy to use, the measured result is coincident with the fact, which can be popularly used in engineering practice.

Key words: automatic temperature measurement; cut-out hot wire method; contaminated sand; laboratory experiment

1 引言

岩土材料的传热传质过程涉及地热和深部矿产资源开采、石油热采、污染土壤改良、地下储存等诸多领域,其研究均涉及热导率这一重要物性参数的确定,当前,国内外大都采用热线法对其进行测定,获得了不同粒径典型砂、黏土、岩石等岩土体导热特性随含水率、饱和程度、污染强度等影响的变化规律^[1-4]。但热线法在实验过程中受电流影响较大,不可避免的产生测量系统误差。为了克服这一不足,张忠进等^[5]提出了断热线法,该法操作简易、精度更高,有很强的工程实用性。研究人员^[5-7]采

用该法对水泥珍珠岩、砂土、粉煤灰等材料的热导率进行测定,获得了一些实用结果。但由于实际过程中岩土材料热导率的影响因素众多,其中以材料本身或外来组份以及温度的影响最为典型,故这方面的研究还有待进一步深入开展。

为此,本文拟展开深入细致研究,通过自行设计的自动测温断热线法测试系统,探讨三种颗粒尺寸的砂土在不同组分的水、汽油、乙酸铅的影响下,其热导率的变化及相应环境温度效应,分析其变化机理,以期热环境下的岩土开挖及环境岩土工程研究等领域的研究提供有益参考。

2 实验方案设计

2.1 实验原理

基于经典热线法,断热线法^[5]的测试原理是

2016-02-17 收稿,2016-04-29 接受,2016-10-25 网络发表

* 通讯作者, E-mail: delilah0323@163.com; Tel: 13808452482

假设在一无限大的均质物体中,存在一根以恒定电流 q 均匀放热的热线,在一段时间后切段电流停止加热热线,避免热线加热电流对测量电偶输出端的影响,通过测量断电后热线的温度变化来测定材料的热导率。由于所研究材料颗粒直径通常在 4mm 以下,可忽略颗粒孔隙中对流换热对材料传热的影响^[8]。热导率计算公式如式(1):

$$\theta(r,\tau) = \frac{q}{4\pi\lambda} \ln \frac{\tau}{\tau - \tau_0}$$

(1)

式中, $\theta(r,\tau)$ — τ 时刻,半径 r 处的温升,℃; r —以热线轴线为中心的圆柱坐标,m; q —热线单位长度的热流率,W/m; λ —物体的热导率,W/m·℃; τ —热线加热所经历的时间,s。

将该公式作微分处理,则有式(2)

$$\frac{d\theta_{r,\tau}}{d\left(\ln \frac{\tau}{\tau - \tau_0}\right)} = \frac{q}{4\pi\lambda} = const$$

(2)

由式(2)可知, $\theta(r,\tau)$ 和 $\ln[\tau/(\tau - \tau_0)]$ 呈线性关系,所以只要测出对应直线的斜率,即 $\theta(r,\tau) - \ln[\tau/(\tau - \tau_0)]$ 直线的斜率,就可以得出被测材料的热导率。

2.2 实验用设备和材料

为实现自动测温,选用型号为 JMT-36C 型的热敏电阻温度传感器,测量范围 -20℃ ~ 110℃,分辨率 0.1℃,精度 ±1℃,线性误差 0.5℃;数据记录仪为其配套的 JM1L-1021RD 信号自动记录仪,可将其连接至装有自动测温系统的计算机实现自动测温。为减小系统误差,所用热线为长 245 mm、直径 0.7 mm 的镍铬合金丝,比率为 245:0.7 = 350:1,符合国际标准 ISO8894-2 规定;选用型号为 KXN-305D 的数字直流恒流恒压电源,电压范围 0 ~ 30 V,电流范围 0 ~ 5 A,电流稳定度 ≤0.05%;万用表为 DT9205 数字万用表,电流精确度 0.01 A。此外,盛装所测试样的容器是一有效尺寸为 245 mm × 165 mm × 85 mm 的 PE 塑料密封盒,在其四个侧面的中心位置各开一个小孔,供热线和温度传感器探头穿过。温度效应实验选用重庆汉巴试验设备有限公司生产的可程式高温试验箱,对试样所处环境温度进行控制,使其保持在一个恒定的温度,其恒温环境 20℃ ~ 300℃,温度波动度 ≤ ±0.5℃。由此组成的测试系统连接示意图如图 1 所示。

本实验所测材料为普通建筑工地用砂土,根据土的工程分类标准^[8],砂粒分为粗砂、中砂、细砂。在实验室用土工标准筛过筛砂土^[9],得到这三种不

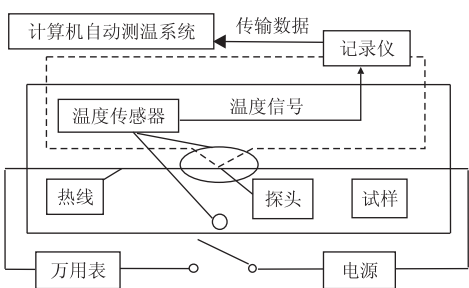


图 1 断热线法实验装置示意图

同颗粒尺寸的砂土,其中粗砂粒径范围为 0.5 ~ 2 mm,代号 S1;中砂粒径范围为 0.25 ~ 0.5 mm,代号 S2;细砂粒径范围为 0.075 ~ 0.25 mm,代号 S3。

根据本实验研究目的,考察含水率、持续性污染物、环境温度、颗粒尺寸对砂土热导率的影响,现选两种污染物为代表,汽油代表可持续有机物污染物,乙酸铅代表重金属污染物,对它们设定不同的因素水平进行组合,制备出可进行 5 类实验的砂土试样,具体见表 1。

表 1 试样影响因素水平表(“—”代表未添加)

实验 编号	含水率 /%	含油率 /%	乙酸铅溶液浓度 /(mg/kg)	环境温度 /℃
1	0~23 0~23	—	—	25 50
2	—	0.5、1、5、10	—	25
3	5、10、15	0.5、1、5、10	—	25
4	—	—	250、500、750、 1000、1500、2000	25
5	—	0.5、1、5、10	500、1000、1500	25

在制备含水试样时,先称量试样,根据重量按预定含水率加水充分混合,但试样制备过程中,三种试样含水率超过 23% 时,其顶部均出现不同程度积水,因此对含水试样的制备直至含水率 23% 为止。

在制备含油试样时,采用中国石油公司出售的 93 号车用汽油。多孔介质的含油率以油的质量在单位质量多孔介质干固体中所占的百分比表示^[3]。根据国标及相关文献^[3,10],确定污染试样的含油率为 0.5%、1%、5%、10% 等 4 个水平。

在制备含铅试样时,采用成都金山化学试剂有限公司生产的乙酸铅结晶粉末,分析纯,乙酸铅含量 ≥99.5%,水不溶物、氯化物等杂质最高总含量为 0.0235%。根据国标及相关文献^[10,11],现场配置 250 mg/kg、500 mg/kg、750 mg/kg、1000 mg/kg、1500 mg/kg、2000 mg/kg 等 6 个浓度水平的乙酸铅溶液(浓度以铅离子计算)。

在制备汽油污染含水砂样时,众多文献^[12,13]研究表明土壤热导率多在含水率为 5%、10%、15% 时有分段变化的现象,故确定砂样含水率为 5%、

10%、15% 时,再添加含油率为 0.5%、1%、5%、10% 等 4 个水平。

在制备汽油污染含铅砂样时,选定砂样添加乙酸铅溶液浓度为 500 mg/kg、1000 mg/kg、1500 mg/kg 等 3 个水平,再添加含油率为 0.5%、1%、5%、10% 等 4 个水平。

2.3 具体实验步骤

1)按图 1 所示组装实验测试系统,镍铬合金热线沿热丝轴向穿过容器侧面小孔,两端通过铜芯双绞导线与直流稳压电源连接。一根温度传感器探头用 C 型活性锡焊接在热线的中间位置,输出端沿热线径向穿过容器侧面小孔,并固定在记录仪上,记录仪与计算机连接。另一温度传感器探头置于试样边界,与热线水平位置齐平,输出端穿过容器另一侧面小孔连接记录仪。将制备好的试样放入容器并装满,呈自然堆积状态,盖好容器。

2)通电前,用计算机测温系统手动对两个温度传感器进行初始温度读数,两个温度传感器初始温度读数需一致,以保证试样初始温度场稳定。

3)正式实验前,需调试适当的电源电压,若热线加热过快或过慢将导致实验失败。待电源电压稳定,用万用电表测出此电压下热线的电阻。测完热线电阻后,关闭电源,待热线温度降至步骤 2)测得的初始温度后方可继续步骤 4)。

4)接通电源,保持步骤 3)中确定的电压电流不变,对热线加热 60 s 左右,同时需观察试样边界的温度传感器若有 0.1℃ 的温升,立即切断电源,以确保热线热流没有传至试样边界。切断电前 5 秒启动计算机自动测温系统,采集试样中心温度随时间变化的数据,测温系统采样间隔设定为 5 s。数据采集直至紧贴热线处测点温度下降变缓停止为止。数据有效测量段约为断电后 10 s 左右开始,至断电后 150 ~ 170 s^[5]。

5)对上一步测得的实验数据进行整理,剔除异常、畸形数据,然后用 origin8.5 统计分析软件处理测得的温度—时间对数数据,并按式(2)计算试样热导率。

6)一次测试数据记录完毕后,关闭仪器,待试样内部温度降至初始温度再按上述步骤重复测试,根据实验情况来看,等待试样降温时间约为 30 min。对同一被测试样应进行 3 ~ 4 次重复试验。

7)在进行含水砂土的环境温度效应实验时,预先将试验炉温度设置为 50℃。先测得环境温度

25℃时各试样的测试数据,测量完成后,将试样放入试验炉中,测得环境温度 50℃时试样的测试数据。每次实验完成后,仍将试样置于试验炉让其蒸发水分,以减少试样含水率,放置时间约 2 ~ 3 h。

3 实验结果及分析

3.1 不同含水率试样热导率测量结果及分析

图 2 是在环境温度 25℃ 和 50℃ 下三组试样含水率为 0% ~ 23% 时热导率的测量结果,将图中热导率变化的三个阶段进行分段线性回归拟合,获得相应的经验回归方程见表 2。由图 2、表 2 可看出:

1)三组试样在含水率从 0% ~ 23% 变化范围内,其热导率在 0.092 ~ 1.4 W/(m · ℃) 范围内变化,且随含水率的增加而增大,呈分段单调递增。存在部分试样热导率数据相差不大,以及曲线交叉的情况,可能是实验系统的随机性造成的。总体来看,其变化可分为三个阶段:含水率 0% ~ 5% 时,近似线性规律递增,变化范围约为 0.1 ~ 0.7 W/(m · ℃);含水率 5% ~ 15% 时,递增趋于缓和,变化范围约为 0.5 ~ 1 W/(m · ℃);含水率 15% ~ 23% 时,递增明显急剧,变化范围约为 0.6 ~ 1.4 W/(m · ℃)。

2)同一试样,其热导率随环境温度升高而增大。如 S1 含水率为 0 时,当环境温度从 25℃ 升至 50℃ 时,其热导率值增长了 0.004 W/(m · ℃),增长幅度 2.23%。

3)同一环境温度,试样热导率随颗粒尺寸的增大而增大。如 S1 ~ S3 含水率为 0 时,测得其热导率分别为 0.179/0.183 W/(m · ℃) (25℃/50℃,后同)、0.092 /0.1169 W/(m · ℃)、0.076/0.1066 W/(m · ℃)。

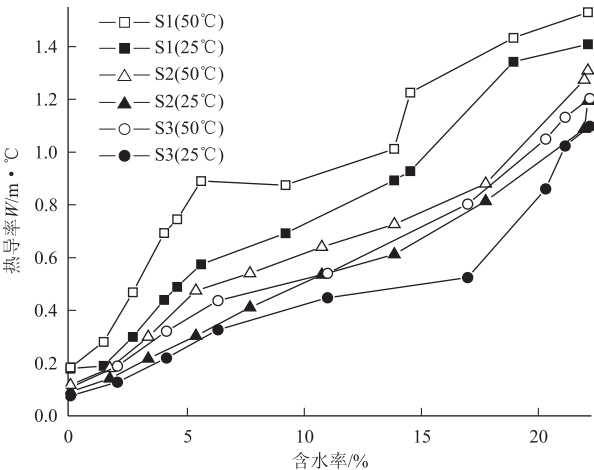


图 2 不同环境温度时试样热导率与含水率关系图

表2 试样热导率随含水率变化的分段线性拟合方程

试样	含水率/%	环境温度 25℃		环境温度 50℃	
		线性回归方程	相关系数	线性回归方程	相关系数
S1	0 ~ 5	$\lambda_1 = 0.073W + 0.135$	0.91	$\lambda_1 = 0.131W + 0.144$	0.97
	5 ~ 15	$\lambda_2 = 0.04W + 0.022$	0.97	$\lambda_2 = 0.021W + 0.719$	0.93
	15 ~ 23	$\lambda_3 = 0.083W - 0.406$	0.96	$\lambda_3 = 0.092 - 0.035$	0.91
S2	0 ~ 5	$\lambda_1 = 0.056W + 0.08$	0.90	$\lambda_1 = 0.047W + 0.114$	0.93
	5 ~ 15	$\lambda_2 = 0.03W + 0.199$	0.96	$\lambda_2 = 0.046 + 0.068$	0.98
	15 ~ 23	$\lambda_3 = 0.08W - 0.564$	0.97	$\lambda_3 = 0.158W - 0.197$	0.94
S3	0 ~ 5	$\lambda_1 = 0.046W + 0.12$	0.95	$\lambda_1 = 0.063W + 0.155$	0.95
	5 ~ 15	$\lambda_2 = 0.03 + 0.276$	0.93	$\lambda_2 = 0.04W + 0.121$	0.96
	15 ~ 23	$\lambda_3 = 0.197W - 2.79$	0.97	$\lambda_3 = 0.174W - 2.16$	0.94

由于砂土是由众多颗粒堆积聚合而成的多孔多相物质,上述实验结果的出现,可参照颗粒物质力学理论及多孔介质传热传质理论来进行分析^[9,12-15]。就砂土含水率的影响来说,由于砂土颗粒表面湿润,当两个湿颗粒相互靠近时会在接触点及其附近形成液桥,使得颗粒发生连接。当含水率低于5%时,颗粒间的液桥具有牵引力使得颗粒间间距变小,颗粒间增加接触,从而降低了颗粒间的热阻,而且,水分也使得砂土导热能力提高,所以此时试样热导率呈单调增大趋势。当含水率为5%~15%时,水分继续增加,颗粒间的有效接触面增加并不明显,热导率增加变缓,表现为图2中该段曲线平缓。当含水率超过15%时,颗粒间液桥逐渐分布均匀,使得颗粒间间距增大,试样的表观容积明显增大,虽然这将使得试样热导率有减小的趋势,但是试样趋于饱和状态,水分增多使试样热导率增大的影响更加明显,故此时砂样热导率将急剧增大。可见,砂土热导率的变化与其颗粒或颗粒团聚体间接触点面的大小、颗粒间自由液相的多少及颗粒表面液相成份形成的液桥等有关。

就温度的影响来说,由于砂土的导热过程包括固体颗粒本身的导热、颗粒间孔隙中流体的导热和对流换热、固体颗粒接触时其间有接触热阻时的导热等多种形式,当环境温度升高时,砂土颗粒的温度亦升高,其导热性增强,同时颗粒间流体本身的导热以及对流换热加强,则更多的有效热量将传递给砂土固体颗粒。当环境温度为50℃时,固体颗粒之间气体的对流传热也将加强。所以环境温度升高,试样热导率增大。

颗粒尺寸对含水试样热导率的影响主要与孔隙率、空隙尺寸有关。粗砂S1的颗粒尺寸最大,所以颗粒间的孔隙尺寸最大,存在更多的流体,流体的导热和对流传热效应更大,能传导更多的热量给颗粒,

使其热导率相应增大。可见,固体颗粒尺寸越大,其热导率越大。文章[6,12]在研究不同颗粒粉煤灰自然堆积体的有效热导率时,也得出了相同的结论。

3.2 含油试样热导率测量结果及分析

图3是在环境温度25℃下三组试样在含油率为0.5%、1%、5%、10%时热导率的测量结果,其经验回归方程见表3。图4是环境温度25℃下三组试样在含水率从0%~10%变化和含油率从0.5%~10%变化时热导率的测量结果对比。由图3、图4、表3可看出:

1)三组试样热导率随含油率的增加而线性递增。当含油率从0.5%增加至10%时,其热导率增长值分别为0.2378 W/(m·℃)、0.1469 W/(m·℃)、0.1243 W/(m·℃),增长幅度分别为158.4%、105.8%、114.1%,说明砂土的含油率增加,能有效提高其热导率。

2)含油试样热导率明显小于含水试样热导率,而且随着含量的增加,相差愈加明显。S1~S3含水率、含油率均为0.5%时,热导率相差约0.02、0.03、0.03;S1~S3含水率、含油率均为10%时,热导率相差约0.3045、0.2592、0.2668。因此,同一温度下,水对砂土热导率的影响程度大于油。

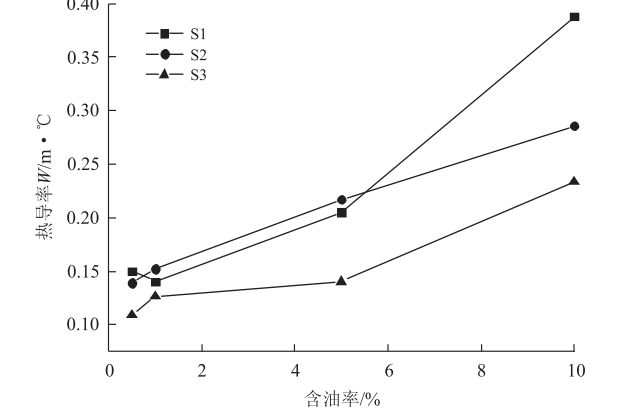


图3 试样热导率与含油率关系图

表 3 试样热导率随含油率变化的线性拟合方程

试样	线性回归方程	相关系数	热导率 ¹⁾ / W/(m·℃)
S1	$\lambda_1 = 0.116 + 0.025C$	0.92	0.1501
S2	$\lambda_2 = 0.135 + 0.015C$	0.97	0.1389
S3	$\lambda_3 = 0.102 + 0.012 C$	0.90	0.1089

1) 含油率 0.5%。

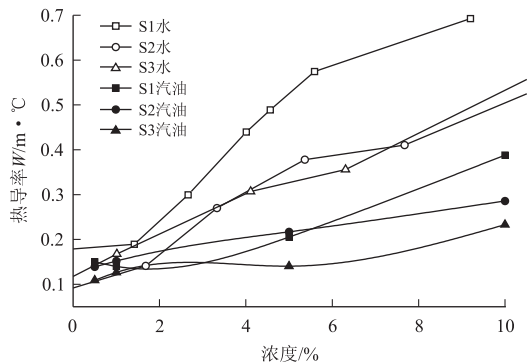


图 4 试样热导率与添加物关系图

上述实验结果可从细观结构角度进行解释^[16]，因含油试样颗粒空隙间的流体包括气态、液态汽油，其有效热导率是固、液、气三相的叠加或耦合，影响其导热过程的主要因素包括空隙尺寸、流体的种类、组分和特性。汽油吸附能力强，易牢固吸附在颗粒表面，含油率较低时，颗粒仅被少量汽油包裹，颗粒间流体大部分为气相。随着含油率增加，油品可在介质孔隙之间以自由液态形式存在^[3]。由于颗粒表面被大量汽油包裹，又能进一步吸附更多的颗粒成团，颗粒间的接触增加导致热阻减小。而且，颗粒团度的增大，使得空隙中的流体增多，其导热和对流传热效应亦增大。所以试样含油率越大，其热导率越大。

在含水率和含油率相同的情况下，含水试样热导率大于含油试样热导率，是因为水的导热能力远大于汽油的导热能力，如环境温度为 20℃ 时，水的热导率约 0.58 W/(m·k)，汽油的热导率约 0.12 W/(m·k)。可知，含水率对于提高砂土热导率的影响更大。

3.3 含油水混合物试样的热导率测量结果及分析

图 5 是在环境温度 25℃ 下三组试样在含水率为 5%、10%、15% 时，分别添加含油率为 0.5%、1%、5%、10% 后，其热导率的测量结果。由图 5 可看出：

1) 三组试样含水率 5% 时，其热导率随含油率的增加而增大，其值分别增长 0.608W/(m·℃)、0.5868 W/(m·℃)、0.7292 W/(m·℃)，增长幅

度分别为 260.8%、159.2%、361.7%。

2) 三组试样含水率 10% 时，其热导率随含油率先减后增。当含油率 0.5% ~ 5% 时，其热导率分别降低了 0.369 W/(m·℃)、0.364 W/(m·℃)、0.3358 W/(m·℃)；当含油率 5% ~ 10% 时，其热导率分别增长了 0.1472 W/(m·℃)、0.1222 W/(m·℃)、0.0203 W/(m·℃)。

3) 三组试样含水率 15% 时，其热导率随含油率的增加而减小，其值分别降低 0.3661 W/(m·℃)、0.241 W/(m·℃)、0.3841 W/(m·℃)，降低幅度分别为 35.9%、24.8%、40.2%。

究其原因，是由于试样制备时，水先吸附于试样颗粒表面，再往其添加汽油，水和油在固体颗粒表面都存在吸附现象。流体为多组分的混合流体时，颗粒对各组分的吸附效应之强弱是不相同的，必将形成流体主流中浓度分布的改变^[9]。出现图 5(a) 的变化规律是由于此时试样含水较少，随着含油率的增加，汽油取代空气成为空隙流体主流，此时并无明显斥水性，水膜和油膜都包裹于颗粒表面，使得试样热导率增大。当多孔介质中含油率达到某一临界值时，固体颗粒界面的润湿性可发生反转，由亲水表面变回疏水表面^[3]。当试样含水率 10% 时，现场实验时，肉眼明显可见三种试样皆随含油率的增加而出现斥水现象。随着含油率的增加，汽油吸附于颗粒表面，使其产生斥水性，颗粒表面的水膜在减少，油膜在增加，导致试样热导率减小；但由于固体颗粒斥水后，油水混合物以自由态存在于试样中，又大大提升试样导热能力，所以此时试样的热导率先减后增，表现为图 5(b) 中的曲线变化非线性。当试样含水率 15% 时，含油率较低时，此时颗粒表面是亲水的，大量的水和少量的油都吸附于颗粒表面，颗粒间空隙部分的空气被水排出，此时试样热导率较大。同理，含油率的增加使颗粒表面出现斥水性，导致试样热导率减小。可见，水和油同时存在于砂土颗粒中时，随着含油率的增加，颗粒表面形成的油膜和水膜比例的变化会使其表面发生湿润性的改变，由此导致砂土热导率也会发生改变。砂土的宏观导热特性是含油率和含水率共同作用的结果。

3.4 含铅试样的热导率测量结果及分析

图 6 是在环境温度 25℃ 下三组试样分别添加浓度为 250 mg/kg、500 mg/kg、750 mg/kg、1000 mg/kg、1500 mg/kg、2000 mg/kg 等 6 个水平的乙酸铅溶液后，其热导率的测量结果，对 S1 ~ S3 热导率随乙

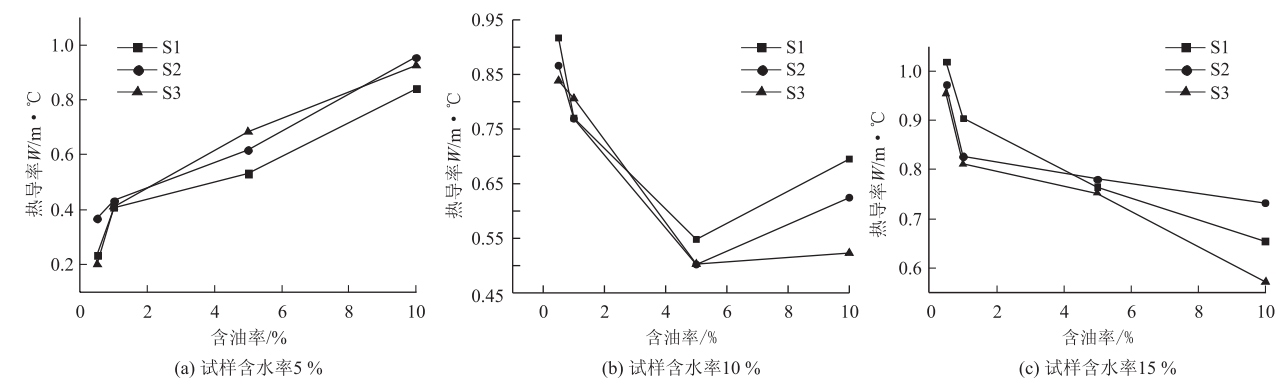


图5 不同含水试样热导率与含油率关系图

酸铅浓度变化进行回归方程拟合见表 4,S1 线性拟合,S2,S3 分段线性拟合。由图 6、表 4 可看出：

- 1)随着乙酸铅溶液浓度增加,三组试样的热导率在总体上呈减少趋势,说明砂土铅污染愈严重,其热导率降低愈多。
- 2)在实验浓度范围内,S1 热导率的变化近似单调递减,其热导率值降低了 0.5014 W/(m·℃),降低幅度为 55.97%。
- 3)当乙酸铅浓度为 750 mg/kg、1000 mg/kg 时,S2、S3 热导率有不同程度的波动,S2 的热导率波动较大,波动幅值 0.1182 W/(m·℃);S3 的热导率波动不明显,波动幅值 0.0048 W/(m·℃)。

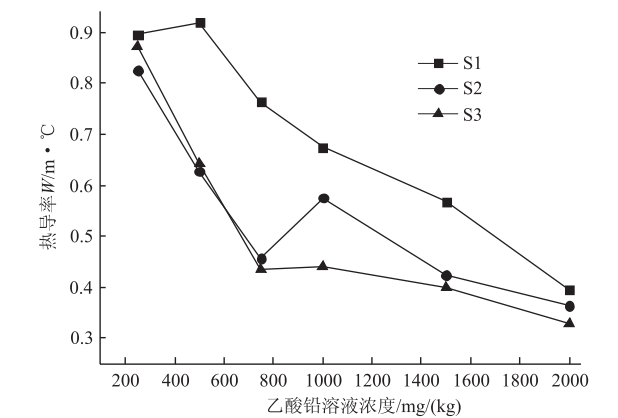


图6 试样热导率与乙酸铅溶液浓度关系图

表 4 试样热导率随乙酸铅溶液浓度变化线性拟合方程		
试样	线性回归方程	相关系数
S1	$\lambda_1 = 0.969 - 0.0003C$	0.98
S2	$\lambda_{21} = 1.0059 - 0.00738C \text{ (} C = 250 \sim 750 \text{)}$	0.97
	$\lambda_{22} = 0.771 - 0.00212C \text{ (} C = 750 \sim 1500 \text{)}$	0.87
S3	$\lambda_{31} = 1.0882 - 0.00877C \text{ (} C = 250 \sim 750 \text{)}$	0.98
	$\lambda_{32} = 0.5541 - 0.0011C \text{ (} C = 750 \sim 1500 \text{)}$	0.94

之所以出现这样的变化,是由于乙酸铅粉末溶于水后,铅以离子形式存在于溶液中。铅离子与颗粒界面间的行为取决于颗粒有机、无机组分对铅离子的吸附-解吸特性,同一土壤中,各因子间存在多种复杂的关系,最终促进或抑制对重金属离子的吸附^[12]。随着铅离子的增加,试样中有机、无机组分与铅离子形成沉淀,形成了难溶物铅盐,占领了部分颗粒间空隙,使得试样热导率随含铅量的增加而递减。在本实验浓度范围内图中曲线的波动可能是由于生成的难溶物铅盐的导热特性和固体颗粒间液桥共同作用的结果。

3.5 含铅油混合物试样的热导率测量结果及分析

图 7 是在环境温度 25℃ 下不同含铅试样分别添加含油率为 0.5%、1%、5%、10% 后,其热导率的测量结果,其对数拟合方程见表 5,含铅试样热导率随含油率变化的降低幅度见表 6。由图 7、表 5、表 6 可看出：

- 1)三组试样分别添加乙酸铅溶液浓度为 500 mg/kg、1000 mg/kg、1500 mg/kg 后,其热导率随含油率的增加而减小,两者间关系符合对数形式,说明在含铅砂土中添加汽油,能有效降低其热导率。
- 2)受铅油复合污染的砂土热导率大于受铅污染的砂土热导率。S1 ~ S3 添加乙酸铅浓度 1500 mg/kg、含油率 10% 时,其热导率分别为 0.56 W/(m·℃)、0.5544 W/(m·℃)、0.5481 W/(m·℃),而 S1、S2、S3 乙酸铅溶液浓度 1500 mg/kg 时,热导率分别为 0.5582 W/(m·℃)、0.4226 W/(m·℃)、0.3997 W/(m·℃)。因此,其他条件相同时,铅油混合对砂土热导率的影响程度大于铅。

表 5 含铅试样热导率随含油率变化的对数拟合方程

试样	500 mg/k		1000 mg/kg		1500 mg/kg	
	对数方程	相关系数	对数方程	相关系数	对数方程	相关系数
S1	$\lambda_1 = 1.01 - 0.15\ln(C + 0.3)$	0.97	$\lambda_1 = 1.3 - 0.24\ln(C + 0.89)$	0.97	$\lambda_1 = 1.11 - 0.25\ln(C + 0.43)$	0.95
S2	$\lambda_2 = 1 - 0.21\ln(C + 0.05)$	0.97	$\lambda_2 = 0.97 - 0.13\ln(C + 0.15)$	0.97	$\lambda_2 = 0.98 - 0.2\ln(C - 0.12)$	0.94
S3	$\lambda_3 = 0.85 - 0.15\ln(C + 0.07)$	0.95	$\lambda_3 = 0.89 - 0.11\ln(C - 0.3)$	0.97	$\lambda_3 = 0.91 - 0.18\ln(C - 0.28)$	0.94

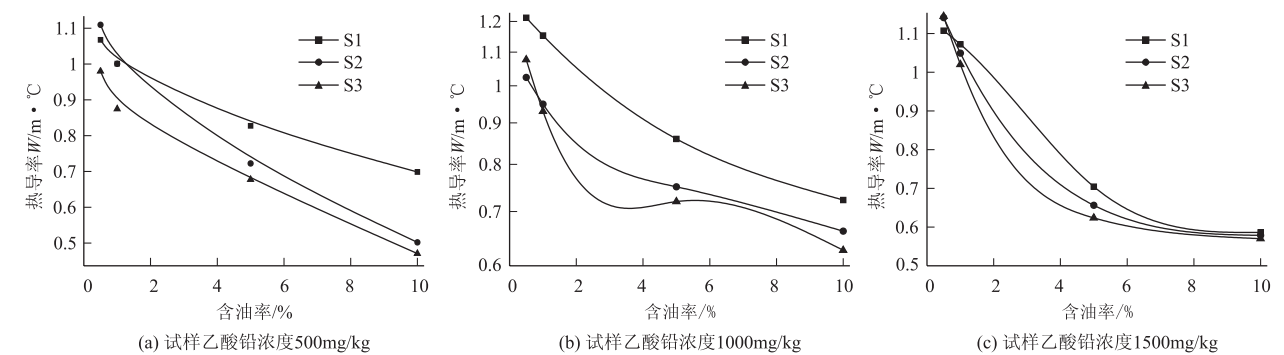


图7 不同含铅试样热导率与含油率关系图

表6 含铅试样热导率随含油率变化的降低幅度

试样	500 mg/kg	1000 mg/kg	1500 mg/kg
S1	38%	38%	49%
S2	55%	38%	53%
S3	49%	42%	52%

之所以如此,原因与上述大致相同。一方面因铅离子与固体颗粒有机、无机组分结合形成难溶物铅盐,导致试样热导率减小;另一方面,一定量的含油率使含水试样颗粒表面变为斥水性,汽油吸附在固体颗粒表面,亦使试样热导率减小。所以含铅试样热导率与含油率关系呈对数递减关系。

由于砂土为多孔介质,其间存在固、液、气三相,液相为液态水、汽油,气相即空气。固体颗粒与液、气两相流体的各种传热模式相互掺杂,导致其导热过程的复杂性。但就最终折合的有效热导率来说,油铅混合物对其的影响比铅更大。

4 结论

1)采用本文设计的自动测温断电热线法装置测量岩土材料的导热系数,具有简便、快捷的特点,且所得结果有效,可满足工程实际需要。

2)自然界砂土热导率除与其自身材料组成、温度、颗粒级配及含水率有关外,还与众多外源性污染因素有关。本文研究获得的砂土导热率与其含水率及汽油、铅等持续污染物含量之间的经验回归方程可为该值的确定提供数量级区间参考标准,工程实际中最好以现场实测来具体校正确定。

3)砂土热导率随其含水率的增大呈现出分段单调线性递增的特性,这与砂土细观颗粒结构中颗粒或颗粒团聚体间接触点面的大小、颗粒间自由液相的多少及颗粒表面液相成份形成的液桥等因素有关;砂土热导率随其中汽油污染物的含量增加而线性增加,这主要与颗粒表面形成油膜及其后的颗粒成团使颗粒间的接触热阻减小所致;砂土被铅离子

污染后,则其热导率整体呈减小趋势,这与铅离子和砂土中有机、无机组分作用产生了难溶性铅盐沉淀有关。水和油相比,水对砂土热导率的影响程度大于油。

4)汽油和水混合砂土的导热率呈现多种变化情况。含水率较小时,随含油率的增加,砂土的导热率升高;含水率中等时,导热率先增后减;含水率较大时,砂土导热能力反而降低。这种多变性主要是由于砂土颗粒表面油膜与水膜比例的增大而导致其湿润性发生反转所造成的。铅油混合砂土的导热率随含油率的增加而呈对数形式递减,本文研究的组份范围内,其降低幅度最少可达38%。此外,受铅油复合污染的砂土热导率大于受铅污染的砂土热导率。可见,含铅砂土中添加汽油,能有效降低其热导率。这种变化是由砂土中固、液、气三相组分和特性所决定的复杂传热过程而导致的。

5)更多岩土材料在复合持续污染物作用下的热导率变化特性及其利用将在后续的研究中进一步进行。

参考文献

[1]陈善雄,陈守义. 砂土热导率的实验研究[J]. 岩土工程学报, 1994,16(5):47-53.
[2]张廷军,于子望,黄芮,等. 岩土热导率测量和温度影响研究[J]. 岩土工程学报,2009,(2):213-217.
[3]梁春,郑西来,张俊杰. 石油污染多孔介质湿润性变异特征[J]. 地球科学——中国地质大学学报,2011,36(4):765-770.
[4]NIKOLAEV I V,LEONG W H,ROSEN M A. Experimental investigation of soil thermal conductivity over a wide temperature range[J]. International Journal of Thermophysics,2013,34(6):1110-1129.
[5]张忠进,郎敏. 断电热线法测试材料热导率的研究[J]. 东北电力学院学报,1995,(4):16-20.
[6]赵晓彤,赵景林,孙灵芳,等. 均匀粒径堆体积热导率的实验研究[J]. 东北电力学院学报,1997,17(3):7-11.
[7]张海林,杨善让,徐志明,等. 计及温度影响的散体有效热导率模型[J]. 工程热物理学报,2005,26(2):277-279.

(下转第1059页)

参考文献

[1] 黄真,孔令富. 并联机器人机构学理论及控制[M]. 北京:机械工业出版社,1997;3-8,12-14,18-29.

[2] 丛爽,尚伟伟. 并联机器人:建模控制优化与应用[M]. 北京:电子工业出版社,2010;1-7.

[3] 刘艳芳,杨随先. 球面机构研究动向[J]. 机械设计与研究,2010,27(1):32-35.

[4] 方中甲. 面向颈关节的三自由度球面并联机构的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2004.

[5] 周玉林,高峰. 具有偏置输出的 3 自由度球面并联仿生肩关节:中国,ZL200810055021.8[P/OL]. 2008-11-12. [http://www. qian-yan. biz/Patent-Display/200810055021. html](http://www.qian-yan.biz/Patent-Display/200810055021.html).

[6] 张立杰,李永泉,黄真. 球面二自由度 5R 并联机器人的运动学分析[J]. 中国机械工程,2006,17(4):343-346.

[7] JAME BOZORGI E R, YAHYAPOUR I, KARIMI A, et al. Design, development, dynamic analysis and control of a 2-DOF spherical parallel mechanism[C]. 2014 2nd RSI/ISM International Conference on Robotics and Mechatronics. New York City: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, 2014:445-450.

[8] KONG X. Reconfiguration Analysis of a 2-DOF 3-4R Parallel Manipulator with Orthogonal Base and Platform [J]. Advances in Reconfigurable Mechanisms and Robots II. Mechanisms and Machine Science, 2016,36:235-245.

[9] 张晓伟,段学超,冷国俊,等. 一种面向低频隔振的两自由度球面并联机构[J]. 河北科技大学学报,2016,37(1):13-19.

[10] WANG W H, FENG Z Y, YANG T L, et al. Inverse Dynamics of 2UPS-2RPS Parallel Mechanism Based on Virtual Work Principle [J]. Applied Mechanics & Materials, 2010,29:744-749.

[11] 邵国友. 平面 3-PRR 非对称并联机构动力学分析[J]. 制造业自动化,2014,36(2):10-12.

[12] 王娜,唐一科,吴小勇,等. 探月工程 3UPS-PU 并联机构的动力学建模与分析[J]. 世界科技研究与发展,2016,38(2):270-275.

[13] 邓恩,帕贝利. 3D 数学基础:图形与游戏开发[M]. 史银雪,陈洪,王荣静,译. 1 版. 北京:清华大学出版社,2005:160-161.

[14] 黄真,李艳文,高峰. 空间运动构件姿态的欧拉角表示[J]. 燕山大学学报,2002,26(3):189-193.

[15] 谭烁. 3-PSR 并联机器人动力学分析与仿真[D]. 大连:大连交通大学,2014.

[8] GB/T 50145—2007, 土的工程分类标准[S]. 北京:中国计划出版社,2008.

[9] 林瑞泰. 多孔介质传热传质引论[M]. 北京:科学出版社,1995:34-60.

[10] GB 15618—1995, 土壤环境质量标准[S]. 北京:中国计划出版社,1995.

[11] 杨少敏. 红壤与黄褐土根际环境下外源重金属铅的化学行为研究[D]. 武汉:华中农业大学资源与环境学院,2007:12-14.

[12] LIKOS W J. Pore-Scale Model for Thermal Conductivity of Unsaturated Sand [J]. Geotechnical & Geological Engineering, 2014, 33(2):179-192.

[13] 于明志,曹西忠,王善明,等. 水分含量对土壤热导率的影响及机理[J]. 山东建筑大学学报,2012,27:152-154.

[14] 孙其诚. 颗粒物质力学导论[M]. 北京:科学出版社,2009:4-28.

[15] 刘晓燕,郑春媛,黄彩凤. 多孔材料热导率影响因素分析[J]. 低温建筑技术,2009,31(9):121-122.

[16] LI C B, XIE L Z, CHEN S, et al. Experimental research on mechanical and thermal properties of oil sand[J]. Yantu Lixue/rock & Soil Mechanics, 2015,36(8):2298-2306.

(上接第 1016 页)