

宁波地区地层温度的原位测试分析*

林乃山

(宁波市轨道交通集团有限公司, 浙江 宁波, 315101)

摘要:气温波动会影响浅部地层温度的分布特征, 改变地下工程的环境温度, 从而影响轨道建设的设计和施工过程。依托宁波轨道交通3号线勘察工程, 对沿线地层温度进行全年原位观测, 分析了不同深度地层温度的分布特征, 获得了以下基本结论: 宁波地区恒温层的起始深度在地表以下10 m, 地层温度约为18.7℃。深度5 m以上范围为气温强烈影响区, 不同深度的地温差别较大, 而5~10 m范围的温差相对较小, 该范围地层为气温的微弱影响区。在气温强烈影响区的地层中, 夏季和冬季地层温度随着深度的改变而发生明显变化, 夏季平均地温约为18.1℃~26.8℃, 而冬季平均地温为10.8℃~17.9℃。研究结果表明, 地层深度和季节是影响地层温度分布的主要因素, 在浅部地层内进行地下工程设计和施工中, 要考虑气温对地层温度的影响。

关键词:浅部地层; 地层温度; 气温; 恒温层; 原位观测

中图分类号: TU47

文献标识码: A

文章编号: 1673-0836(2019)02-0543-06

In-situ Observation of the Stratum Temperature in Ningbo Area

Lin Naishan

(Ningbo Rail Transit Group Co., Ltd., Ningbo Zhejiang 315101, P.R. China)

Abstract: Atmospheric temperature fluctuation affects the design and construction process of track construction because of the changes of the environmental temperature in underground engineering, which affects the shallow stratum temperature distribution. Based on the investigation of No. 3 line in Ningbo rail transit, the formation temperature along the line was tested in situ for more than a year. Conclusions are obtained by analyzing the distribution characteristics of formation temperature at different depths. Firstly, the temperature is about 18.7℃ in the stratum below 10 m, which is the isothermal layer in different seasons. Secondly, the temperature difference at different depths is large in the formation above 5 m, because the temperature distribution is strongly affected by atmospheric temperature. However, the temperature difference between 5~10 m is small, and the affection of atmospheric temperature in this range is weak. Thirdly, the formation temperature difference along the depth direction is obviously in the summer and winter period in the formation above 5 m. In the summer the average temperature in the formation above 5 m is about 18.1℃~26.8℃, while it is 10.8℃~17.9℃ in winter. The results show that the formation depth and season period are the main factors affecting the distribution of stratum temperature, and the influence of temperature on the formation temperature should be taken into account in the construction of underground engineering.

Keywords: shallow stratum; formation temperature; atmospheric temperature; isothermal layer; in-situ observation

* 收稿日期: 2018-09-05(修改稿)

作者简介: 林乃山(1978-), 男, 浙江平阳县人, 高级工程师, 主要从事岩土工程勘察管理与研究工作。

E-mail: linnaishan78@163.com

0 引言

轨道交通已成为很多城市解决交通矛盾的重要手段之一^[1],越来越多的轨道工程建设中需要考虑周围地层温度变化的影响^[2],因为温度是影响土体物理力学性质的重要因素,不仅会改变土层的先期固结压力、孔隙水压力、压缩曲线等参数^[3],而且会直接影响到轨道交通建设中的结构设计。比如在地铁车站的空调设计中,周围地层温度是空调合理设计的基础数据,也是控制车站空调运行成本的关键因素^[4],特别是当空调采用地源热泵系统时,原始地层温度是系统取、放热量的背景条件以及系统优化设计、运行评价的重要参数,对地源热泵系统设计及运行策略的制定具有重要意义^[5]。而在人工冻结法施工中,地层温度是影响冻结时间和需冷量等设计参数的重要因素,不仅会影响到冻结施工时间和冻结壁的稳定性^[6],而且直接影响到停冻之后的解冻过程^[7]。所以,浅部地层温度对车站建设及后期运营影响明显,研究地层温度的变化规律对地下工程的设计和施工具有明显的工程意义^[8-9]。

研究学者一直以来都对市政建设中的地层温度给予了高度的关注,进行了一系列的测试研究。虞岳明等^[10]研究原始地温浅孔的监测方法,获得了浅孔测试地温的施工工艺。金旭等^[11]考虑到浅部地表气温周期性变化的干扰,提出了浅层地温测试数据的修正方法。刘晓燕等^[12]研究了土层内恒温层温度及深度的影响因素,提出了确定恒温层深度的方法。而现场实测一直是研究地层温度的重要手段,刘彩波等^[4]对西安地区浅层地温进行了监测,分析了地温场的分布特征及影响因素,获得了深度 200 m 范围地层的温度分布梯度参数。任建喜等^[13-14]还对西安地铁沿线的恒温层位置 and 不同季节地温的分布规律进行了研究,获得了不同季节恒温层的深度位置。瞿成松等^[15-16]通过对上海地区浅层地温场的监测和分析,划分了不同温度层的位置,分析了太阳辐射的周期变化、城市热岛效应、地表植被、地下水径流、人工回灌等因素对浅部地层温度的影响。王树刚等^[17]对北京地铁进行了壁面热流的现场实测,分析了隧道内和站台的壁面热流变化规律,研究地下结构的不稳定传热过程,获得了热环境变化的规律。裴海瑛等^[18]还研究了不同下垫面对南京近地面的气温影响,分析了不同季节近地温度的变化规律。

地层原始地温的分布特征一般受气候、地层结构、地层岩性、水文地质条件以及地质构造等多方面因素的影响^[5]。从已有的研究结果可以看出,不同城市之间地层温度分布特征差别较大,需要对不同城市的地层温度进行测试,以掌握地层温度的分布规律。本文依托宁波轨道交通 3 号线勘察工程,进行轨道沿线的地温测试,分析了气温对地层温度的影响规律,获得了地层温度基础数据和地温分布特征的研究成果,可供宁波地区地下工程设计和施工时采用,也可以为类似地层的相关研究提供参考。

1 温度测点的布置和测试

宁波市轨道交通 3 号线为南北向骨干线,南起鄞州新城区南部陈婆渡片区,依次经过鄞州区、江东区、江北区及镇海新城北区,止于骆驼街道绕城高速以南,全长约 25.8 km。考虑到工程地质条件的特点,选择句章路站和四明中路站的 2 个温度测孔监测数据进行分析。2 个温度测孔的深度均为 25 m,孔口高程分别为 3.121 m 和 2.624 m(1985 国家高程标准),在测孔内按照不同间隔各布置 12 个温度测点,测点之间的间距和所处的地层见表 1。温度测试区域的地下水主要为松散岩类空隙潜水和空隙承压水,松散岩类空隙潜水主要赋存于场区表层填土和浅部黏土、淤泥质黏土中,观测期间测孔位置潜水位埋深为 0.80~2.40 m。空隙承压水主要赋存于粉土、砾砂、粉砂层内,温度测点埋置深度内无空隙承压水。

表 1 测孔位置地层条件和测点布置情况

Table 1 Formation condition and measuring points arrangement

编号	地层名称	句章路站 测点埋深/m	四明中路站 测点埋深/m
① ₁	杂填土	0.5	0.5
		1.0	1.0
		2.0	2.0
① ₂	黏土	3.0	3.0
① ₃	淤泥质黏土	5.0	5.0
② ₁	黏土	6.0	6.0
		7.0	7.0
② _{2a}	淤泥	8.0	8.0
		10.0	10.0
② _{2b}	淤泥质黏土	15.0	15.0
		20.0	20.0
③ ₂	粉质黏土	20.0	20.0
④ ₁	淤泥质黏土	25.0	25.0

温度测试采用 JTM-T400 型精密电阻感温计,测量范围 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 70\text{ }^{\circ}\text{C}$,测试精度 $\pm 0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$,测试从2013年3月29日开始,至2014年4月25日结束,测试时间经历了4个季节。测试过程中,时间间隔为3 d,固定在每天上午9:00进行定时测量,测量时利用布置在大气中的测点同时测试气温。

2 温度测试结果分析

2.1 气温的测试结果

测试期间,气温变化情况如图1所示。

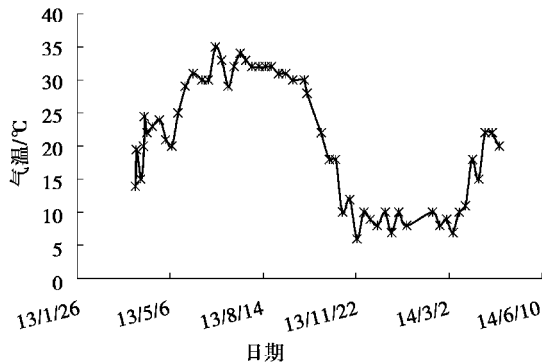


图1 测试期间气温变化曲线

Fig. 1 Changing curve of temperature during the test

整个测试期间经历了不同季节变换,从图1可以看出,宁波地区气温一年中的变化曲线近似满足正弦函数,最高气温为 $35\text{ }^{\circ}\text{C}$,最低为 $6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

受到季节和气候的影响,气温波动幅度较明显,即使在较短时间内,气温也会产生明显波动,如2013年4月24日的气温与2013年5月1日的差值超过 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

2.2 浅部地层温度的测试结果

由于气温波动幅度较大,考虑通过分析浅部地层的温度变化情况,来确定不同季节变换时间。测试期间,四明中路站温度测孔中深度为0.5 m和1 m的测点温度变化情况如图2所示。

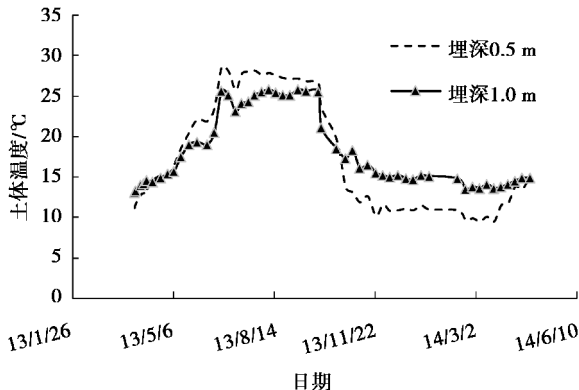


图2 浅部测点的温度变化曲线

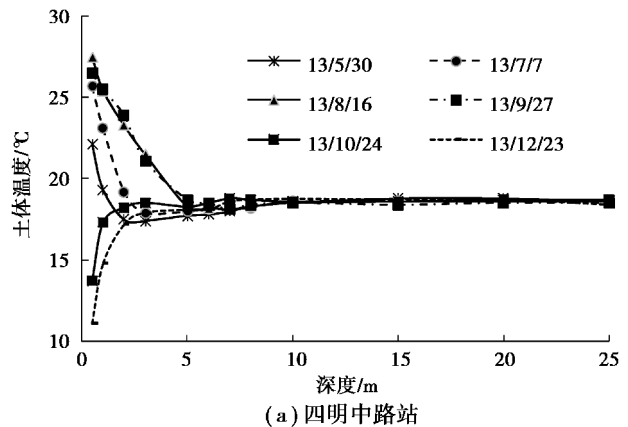
Fig. 2 Temperature variation curves of shallow stratum

从图2可以看出,深度为0.5 m和1 m的浅部测点地层温度变化规律与气温基本相同,其温度变化幅度相对较小,不同测试时间的温度差别较大。

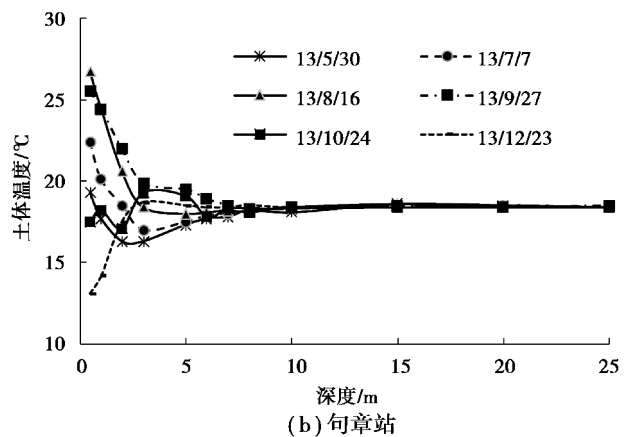
在研究地温的变化规律时,根据气温和浅部地层温度的变化,可以将宁波地区的春、夏、秋、冬4个季节的月份确定为3、4、5月为春季,6、7、8月为夏季,9、10、11月为秋季,12月和次年1、2月为冬季。在夏季和冬季,浅部的地层温度相对稳定,而在春季和秋季期间,浅部地温的波动较大。

2.3 测温孔内的温度测试结果

为了分析不同深度的地温分布特征,分别选择不同季节的测试数据,来分析不同深度的地温分布特征,具体如图3所示。



(a) 四明中路站



(b) 句章站

图3 不同时刻测温孔内温度分布

Fig. 3 Temperature distribution curves at different time

从图3可以看出,对于不同季节的测试时间来说,浅部地层温度的差别较大,随着深度的增加,温差逐渐缩小,深度超过10 m后,地层温度基本不受季节变化的影响,处于稳定状态,即恒温层的起始位置位于地表以下10 m,温度约为 $18.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

从图3(b)中的13年10月24的数据可以看出,进入秋季后,气温的下降使埋深1 m的测点温

度明显降低而低于恒温层温度;埋深4 m的测点还维持在较高的温度,说明气温对深部地层温度的影响有一定的滞后性,埋深较大位置的地层温度变化需要较长的时间。处于季节变换期间的2013年5月30日和12月23日的测点温度分布特征,也表现出类似的规律。

受到不同季节气温的影响,从埋深10 m以上地层的温度变化趋势来看,浅部地层的温度在冬季低于恒温层温度,而在夏季高于恒温层温度,且随着埋深的增加,不同季节的地温与恒温层的温差逐渐变小。比较图3中的(a)和(b)可以看出,选择不同测孔的温度监测数据,获得的恒温层的位置和温度值基本相同,而在浅部地层温度分布也相差不大,所以在后续的讨论中,主要以四明中路站测孔数据为主进行分析。

3 讨论

3.1 不同深度下气温对地层温度的影响分析

测试期间不同深度的测点温度变化曲线如图4所示。

从图4(a)中的温度变化趋势可以看出,深度5 m以上范围的地层在不同季节的温度波动范围较大,属于气温的强烈影响区。在此范围内,夏季的地温明显高于冬季,一年中的温度变化曲线基本满足正弦函数。在夏季和冬季,不同深度的地层温度差别较大,随着深度的增加,温差逐渐缩小,而在春季和夏季,浅部地层的温差相对较小,特别是在5月份和10月份的大部分测试时间里,不同深度的地温是基本一致的。

从图4(b)可以看出,对于埋深在5~8 m范围内的测点来说,一年测试期中的温度波动幅度约为2℃,可以将此深度范围定义为气温的微弱影响区。分析此深度范围内地温的变化规律可以发现,春季期间不同深度测点的温差较大,且最高(或者最低)的测点温度出现时间较浅部地层约晚2个月,说明季节的改变使气温发生较大改变时,影响到深度为5~8 m地层约需要2个月的时间。

从图4(c)可以看出,埋深超过10 m地层内测点在一年测试期中的地温波动幅度不超过1℃,且未发现地层温度随埋深增加呈规律性的升温,所以

可以认为10~25 m深地层为恒温区,不同季节中地温基本稳定,维持在18.7℃左右。

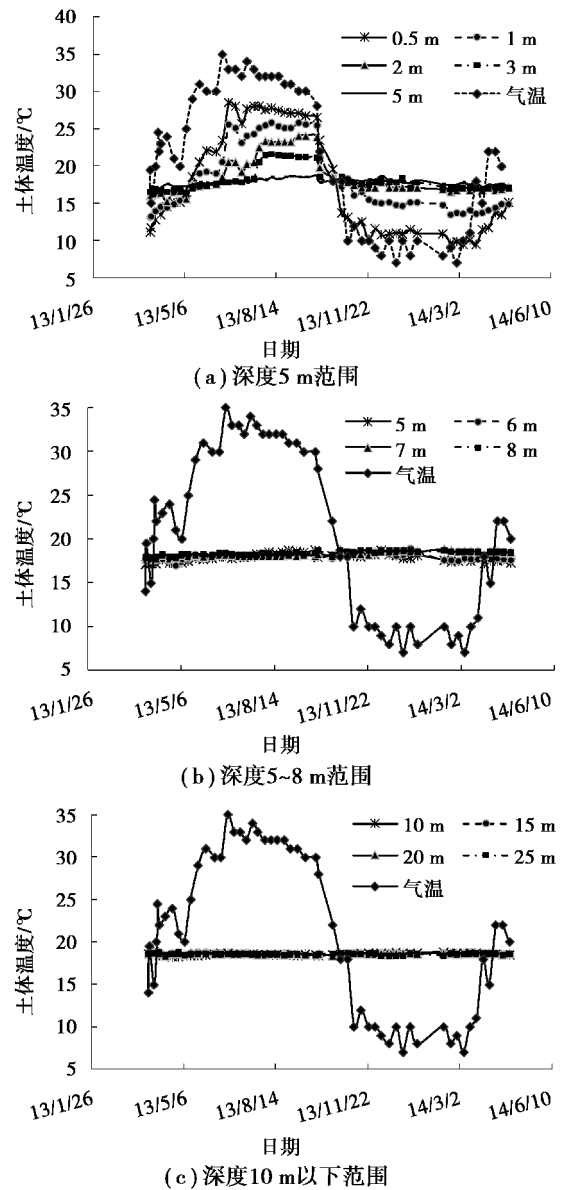


图4 不同深度地层温度变化曲线

Fig. 4 Temperature variation curves at different depths

3.2 不同季节中气温对地层温度的影响

3.2.1 不同月份的地温变化规律

考虑到气温及浅部地温受到气候影响而产生波动,将测试的数据按月份取平均值,不同月份的温度变化曲线如图5所示。

从图5中的月平均温度变化曲线可以看出,深度0.5 m和1 m的测点温度变化曲线与平均气温的变化曲线基本相似,能更好地符合正弦函数。所以在数值计算或者室内试验中,可以利用正弦曲线变化的温度,来模拟一年内的浅部地温和气温的变

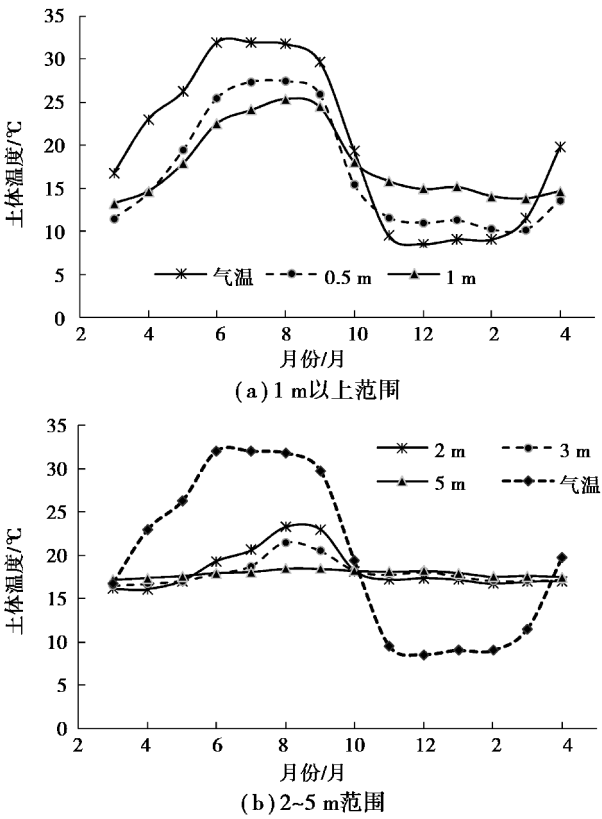


图 5 不同月份的地层温度变化曲线

Fig. 5 Temperature variation curves in different months
化过程。从图 5(b) 中的温度变化曲线可以看出, 对于深度 2 m 以下地层来说, 在一年的测试期内, 月平均地温基本稳定, 仅在夏季期间, 埋深 2~5 m 范围内的地层温度有明显升高。

3.2.2 不同季节的地温变化规律

为了分析季节对地温变化的影响, 将测试数据按季节取平均值。不同季节中测点季平均温度沿深度的分布曲线如图 6 所示。

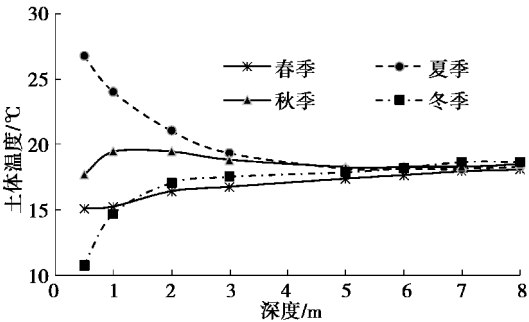


图 6 不同季节的地层温度分布

Fig. 6 Temperature distribution in different seasons

从图 6 中可以看出, 在气温变化不大的春季和秋季里, 不同深度的季平均地层温度相差不大, 基

本可以按照恒温层的温度来标识整个深度地层的温度。其中春节的季平均温度偏低的原因是, 宁波地区 3 月份的气温及地层温度偏低, 使 3、4、5 月份的平均温度偏低, 造成季平均温度较恒温层温度略低。

对于夏季和冬季来说, 由于气温波动幅度较大, 不同深度的地层温度相差较多, 浅部的地层温度分别在夏季达到最高值, 而在冬季达到最低值。所以在地下工程结构环境设计中, 气温及地层温度数据可以分别取夏季和冬季的平均温度作为设计的基础数据。浅部地层中夏季和冬季的平均地温取值可以参考表 2。

表 2 不同深度地层的季平均温度数据

Table 2 Average formation temperature at different depths

测点深度 /m	夏季/℃		冬季/℃	
	平均温度	波动幅度	平均温度	波动幅度
0	31.9	3.1	8.8	2.8
0.5	26.8	2.8	10.8	0.9
1	24.0	1.8	14.7	1.2
2	21.1	2.1	17.1	0.6
3	19.3	2.3	17.5	0.9
5	18.1	0.2	17.9	0.4

4 结论

通过对宁波轨道交通 3 号线沿线地温监测数据分析, 可以获得以下主要结论:

(1) 宁波地区气温波动较大, 一年测试期间的变化规律近似满足正弦曲线, 最高气温约为 35℃, 最低气温约为 6℃。

(2) 随着地层深度的增加, 不同季节地温的波动幅度逐渐减小, 可以将深度 5 m 以上的范围确定为气温强烈影响区, 将 5~8 m 范围确定为微弱影响区。而深度 10 m 以下范围为恒温区, 地层温度常年维持在 18.7℃左右。

(3) 气温对地层温度的影响存在一定的滞后性, 季节变换时气温明显影响到 5~8 m 深度地层,

约需要2个月的时间。

(4)对于深度5 m以上范围的地层来说,夏季和冬季期间不同深度的地层温度差别较大,夏季的平均温度约为18.1℃~26.8℃,而冬季的平均地温约为10.8℃~17.9℃。对于相同深度处的地层季节平均温度来说,夏季和冬季中的月平均温度波动范围不超过3℃。

参考文献(References)

- [1] 洪开荣.我国隧道及地下工程发展现状与展望[J].隧道建设, 2015, 35(2): 95-107. (Hong Kairong. State-of-art and prospect of tunnels and underground works in China[J]. Tunnel Construction, 2015, 35(2): 95-107. (in Chinese))
- [2] 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(增2): 86-91. (Xiao Lin, Yang Chengkui, Hu Zenghui, 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(Supp.2): 86-91. (in Chinese))
- [3] 祁良, 郑荣跃, 陶海冰, 等. 考虑温度影响的宁波软土临界状态参数研究[J]. 水文地质工程地质, 2015, 42(5): 79-83. (Qi Liang, Zheng Rongyue, Tao Haibing, et al. A study of the critical state parameter of the Ningbo soft clay considering the effect of temperature [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2015, 42(5): 79-83. (in Chinese))
- [4] 刘彩波, 胡安焱, 黄景锐, 等. 西安市浅层地温场特征及其影响因素分析[J]. 地下水, 2013, 35(2): 30-32. (Liu Caibo, Hu Anyan, Huang Jingrui, et al. Characteristics of shallow geothermal field and its influencing factors in Xi'an[J]. Groundwater, 2013, 35(2): 30-32. (in Chinese))
- [5] 潘玉亮, 徐伟. 土壤源热泵系统地下温度场变化规律分析与探讨[J]. 建筑科学, 2010, 26(12): 92-96. (Pan Yuliang, Xu Wei. Analysis and discussion on variation patterns of soil temperature field of ground-coupled heat pump system[J]. Building Science, 2010, 26(12): 92-96. (in Chinese))
- [6] 张婷, 杨平. 不同因素对浅表土导热系数影响的试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2012, 8(6): 1233-1238. (Zhang Ting, Yang Ping. Effect of different factors on the heat conduction coefficient of shallow top soil[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2012, 8(6): 1233-1238. (in Chinese))
- [7] 石荣剑, 岳丰田, 张勇, 等. 液氮冻结管壁温度的分布规律[J]. 中国矿业大学学报, 2013, 31(1): 12-18. (Shi Rongjian, Yue Fengtian, Zhang Yong, et al. Temperature distribution law of freezing pipe wall in liquid nitrogen freezing[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2013, 31(1): 12-18. (in Chinese))
- [8] 王兆瑞, 许鹏. 地面表层温度场及隧道排水沟埋置深度设计探讨[J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11(1): 149-155. (Wang Zhaorui, Xu Peng. Study on temperature field of ground surface and discussion of tunnel centre drains depth design in cold region[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2015, 11(1): 149-155. (in Chinese))
- [9] 李晓昭, 熊志勇, 乔恒君, 等. 地铁隧道围岩传热规律的监测分析[J]. 地下空间与工程学报, 2012, 8(1): 105-110. (Li Xiaozhao, Xiong Zhiyong, Qiao Hengjun, et al. Monitoring and analysis of heat transfer through surrounding rocks of subway tunnel[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2012, 8(1): 105-110. (in Chinese))
- [10] 虞岳明, 樊海兵, 曲方, 等. 原始地温浅孔测温方法探讨及应用[J]. 山西煤炭, 2007, 27(4): 50-53. (Yu Yueming, Fan Haibing, Qu Fang, et al. A Shallow-hole temperature-measuring method to original rock temperature[J]. Shanxi Coal, 2007, 27(4): 50-53. (in Chinese))
- [11] 金旭, 陈晓冬, 管彦武. 气候变化对浅层地温测量影响的改正[J]. 地球学报, 2004, 25(5): 579-582. (Jin Xu, Chen Xiaodong, Guan Yanwu. The correction of the influence of climatic change upon geotemperature measurement at shallow layer [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2004, 25(5): 579-582. (in Chinese))
- [12] 刘晓燕, 赵军, 石成, 等. 土壤恒温层温度及深度研究[J]. 太阳能学报, 2007, 28(5): 494-497. (Liu Xiaoyan, Zhao Jun, Shi Cheng, et al. Study on soil layer of constant temperature[J]. Acta Energetica Sinica, 2007, 28(5): 494-497. (in Chinese))

(下转第588页)