DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2018.0102
WU Jingquan, XIN Yangyang, XU Wenxi, et al. Research of thermosyphon applied in patchy permafrost sections along the Genhe-Labudalin Highway[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2018, 40(5): 943-950. [吴金权, 辛洋洋, 徐文玺, 等. 热棒在根拉公路岛状多年冻土路基工程中的应用研究[J]. 冰川冻土, 2018, 40(5): 943-950.]

热棒在根拉公路岛状多年冻土路基工程中的应用研究

吴金权[1], 辛洋洋[2], 徐文玺[2], 孙 田[3]
(1. 内蒙古公路交通投资发展有限公司 海满高速公路项目建设管理分公司, 内蒙古 呼伦贝尔 021000; 2. 中圣科技(江苏)有限公司, 江苏 南京 211112; 3. 中国科学院 南京冻土工程中心, 江苏 南京 211112)

摘 要: 热棒技术是国内外寒区工程中广泛使用的主动冷却地基的有效方法和关键技术。针对根河至拉布大林公路独特的气候和岛状多年冻土条件, 设计间距 4 m 热棒来保护多年冻土路基, 对比分析直式热棒和 L 型热棒路基的降温效能, 实测结果表明: 经过 2 个冬季工作, 热棒降低周边半径 2.5 m 范围路基温度平均降温幅度超过 4 ℃, 能有效抵御夏季路面传下热量, 有效地保护多年冻土上限不下移, 热棒间距 4 m 是合理的; 与直式热棒相比, L 型热棒能更快散发黑色路面传下的热量, L 型热棒对于宽幅路面下部冻土保护具有更好的工程效果。

关键词: 岛状多年冻土; 根拉公路; 热棒
中图分类号: P642.14/U416.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2018)04-0943-08

0 引言

岛状多年冻土以分散的岛的形式出现, 是连续多年冻土与季节性冻土过渡带, 对气温变化格外敏感, 极不稳定, 因此在岛状多年冻土地区新修建公路困难很大。相关资料表明[1-2], 因黑色沥青路面的聚热效应, 多年冻土区路面年平均温度一般比气温高 6 ℃以上, 比普通砂砾路面高 3~4 ℃, 这大大增加了路基下多年冻土的吸热量, 难以确保公路路基的热稳定性, 可能产生融沉病害, 尤其是岛状多年冻土的流变性、沉融性和冻胀性对公路建设和运营影响严重[3-4]。

热棒是一种高效传热装置[5-6], 其工作原理是通过棒体内工质的相变(气态-液态转化)实现热传输即在蒸发段工质吸热, 由液态转化为气态; 在冷凝段工质放热, 由气态转化为液态, 如此循环往复, 不断将热量从蒸发段带到冷凝段(图 1)。当热棒安插在多年冻土段, 源源不断将多年冻土的热量散发到空气中, 降低冻土温度, 保护冻土。热棒在世界各地已有广泛的应用[7], 可降低煤场内部温度以及人工低温贮藏库[8], 也可以用于冷却地基、防止融沉等冻害问题[9-12]。自 20 世纪 50 年代末期以来, 热棒在国外广泛应用于公路工程、铁路工程、机场跑道、输油管线、输电杆塔、水工大坝等工程[13-15], 最为典型工程案例是美国阿拉斯加输油管线工程[16]。自 2001 年青藏铁路开工建设以来, 中国逐渐成为世界上热棒技术应用范围最广, 工程规模最大的国家, 而且热棒技术的理论和试验研究也随之深化和发展, 热棒工程应用理论和应用技术逐渐处于领先地位[17-19]。因热棒无需外加动力源, 无需日常维修养护, 对不同工程环境具有极好的适应性[20-21], 被迅速推广并应用在青藏公路、共玉高速、新藏公路等重大国家级公路中, 在多年的实际运营中, 热棒对路基沉降的保护已经具有较为明显的效果。

上述热棒路基的多年冻土均是高温高含冰量的连续多年冻土。解决岛状多年冻土问题一般采用挖除冻土、换填粗粒土的方法, 热棒技术应用于岛状多年冻土地区的研究报道尚不多。本文通过根河至拉布大林一级公路(以下简称根拉公路)热棒路基(直式热棒路基和 L 型热棒路基)现场试验, 分析热棒工作 2 个冬季后路基温度下降规律, 研究热棒

收稿日期: 2018-06-26; **修订日期:** 2018-09-12
基金项目: 国家自然科学基金重点项目(41630636)资助
作者简介: 吴金权(1975-), 辽宁新金人, 男, 高级工程师, 2004 年毕业于北方交通大学, 从事道路桥梁施工及研究. E-Mail: 398363014@qq.com.cn.

的降温影响半径、降温幅度和降温变化规律等，对比分析直式热棒和 L 型热棒对路中间部位路基的降温效果，研究热棒技术在岛状多年冻土区适用性及合理的热棒路基形式。

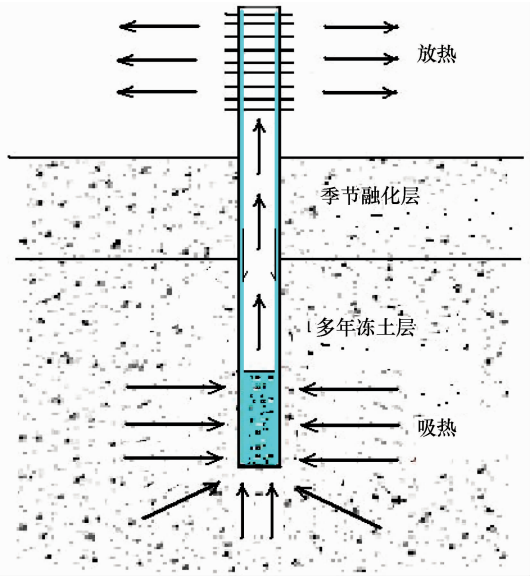


图 1 热棒工作原理示意图

Fig. 1 Working principle diagram of the thermosyphon

1 研究地点与方法

1.1 研究地点

本研究地点选择在根拉公路，其位于大兴安岭西北麓，路段多年冻土多为层状或整体构造的富-饱冰冻土或多冰冻土。多年冻土的天然上限为 0.2 ~ 2.6 m，最大为 3.0 m，下限 1.1 ~ 17.0 m，冻土厚度较小，最大厚度约为 14 m。冻土总含水量高，一般为 35% ~ 65%，最高达 105%。多年冻土沿公路纵向呈间断的零星分布，长度一般 430 ~ 5 800 m。路基下多年冻土沿深度方向的分布则较复杂，多年冻土的剖面特征多呈梯形或透镜状，且多年冻土地温较高，处于退化阶段，极不稳定。热棒路基试验段路基宽 12.25 m，路面宽 10.5 m，路基填方高度 1.5 m，原有天然冻土上限为 2 m，采用换填初步处理，对于冻土厚度、埋深小于 3.0 m 的多年冻土，采取挖除换填砂砾的处理；对地表水、地下水极其丰富地段，在挖除软弱土后先采用 50 cm 厚的毛石填筑，冲击碾压，冲击密实后的在毛石层顶面再采用砂砾分层填筑压实。

1.2 热棒试验段土层分布

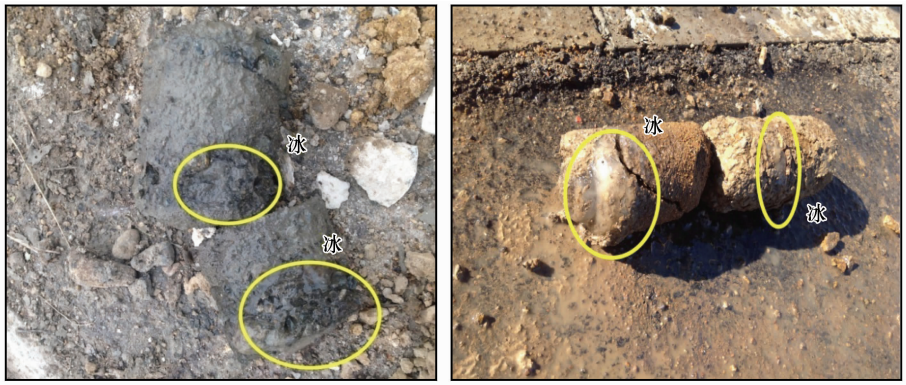
现场钻孔取样，地下 5.7 ~ 8.5 m 处发现有含冰黏土及冰(图 2)。路面下土体和边坡面下土层分布如下：

(1) 路面以下土层分布：0 ~ 2.0 m 为砂土层，夹砾石；2.0 ~ 3.5m 为块石层，夹砂土；3.5 ~ 5.2 m 为毛石层；5.0 ~ 5.7 m 为黏土层；5.7 ~ 8.5 m 为含冰黏土。

(2) 边坡面以下土层分布：0 ~ 2.0 m 为砂土层，夹砾石；2.0 ~ 4.5 m 为块石层，夹砂土；5.0 ~ 6.0 m 为毛石层；6.0 ~ 6.5 m 为黏土层；6.5 ~ 8.5 m 为含冰黏土。

1.3 研究方法

热棒安装在路肩上，距离路缘 1 m，距离路基中心线 6.25 m。图 3 给出了 L 型热棒和直式热棒 2 种路基示意图，图 4 给出了安装完成后的热棒路基。在热棒路基试验段共安装了 80 支热棒，其中直式热棒 60 支(型号：TPA Ⅰ/a 83 - 2/11- C)，L 型热棒 20 支(型号：TPA II/a 83 - 2/11-C)，每支热棒总长为 11 m，地上部分高 3 m，其中带有散热片的冷凝段长度为 2 m。两侧热棒相对而立，相



(a) 含冰黏土 (b) 夹冰黏土

图 2 钻孔土样

Fig. 2 Drilled soil samples, ice-containing clay (a) and iced clay (b)

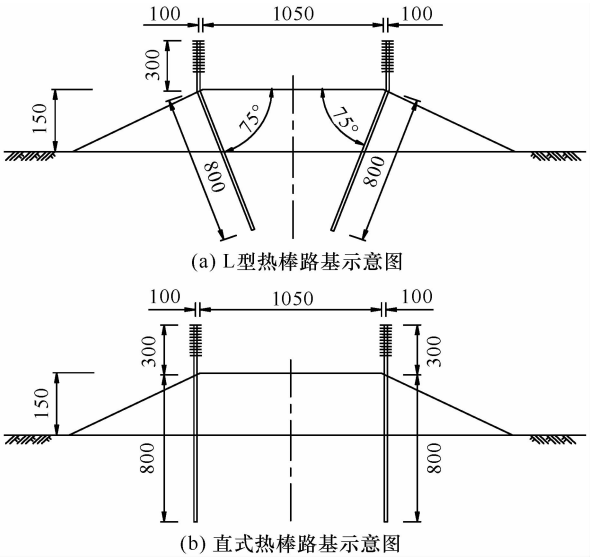


图 3　热棒路基示意图(单位：cm)

Fig. 3　Installation of the thermosyphon: L-type (a) and straight-type (b) (unit: cm)



图 4　安装完成后的热棒路基

Fig. 4　Photo showing the embankment of the Genhe-Labudalin Highway after thermosyphon installed

邻热棒间距为 4 m。

为监测 2 种热棒冷却路基效果及热棒周边土体温度变化，分别选取 L 型路基和直式热棒路基各 1 个断面进行温度监控，采用 MRDT605 智能数据采集仪器，温度计为 Pt100 型，精度为 ±0.1%，图 5 给出了热棒路基测温孔位置，总共 13 个测温孔，128 个测温点：其中 L 型热棒路基断面共布置 6 个测温孔，编号为 1 ~6 号，共 61 个测温点；直式热棒路基断面共布置 7 个测温孔，编号为 7 ~13 号，共 67 个测温点，测温孔编号从路中向路边依次增大。测温孔 4 和测温孔 10 与热棒通孔，这 2 个测温孔的温度传感器固定在热棒上，监控热棒的工作状态。位于路面下的测温孔有 1 ~4 号、7 ~10 号，其余位于边坡上。

图 6 给出了垂直方向测温点在 3 种测温孔内的位置分布。1、2、3、5、6、7、8、9、11、12 号测温孔温度点布置如图 6(a)，4、10 号测温孔温度点布置如图 6(b)，13 号测温孔温度点布置如图 6(c)。每个测温点的数据远程传输到监控设备上，从北京时间 03:00 开始，每隔 8 h 采集 1 次，即 03:00、11:00、19:00，循环采集。

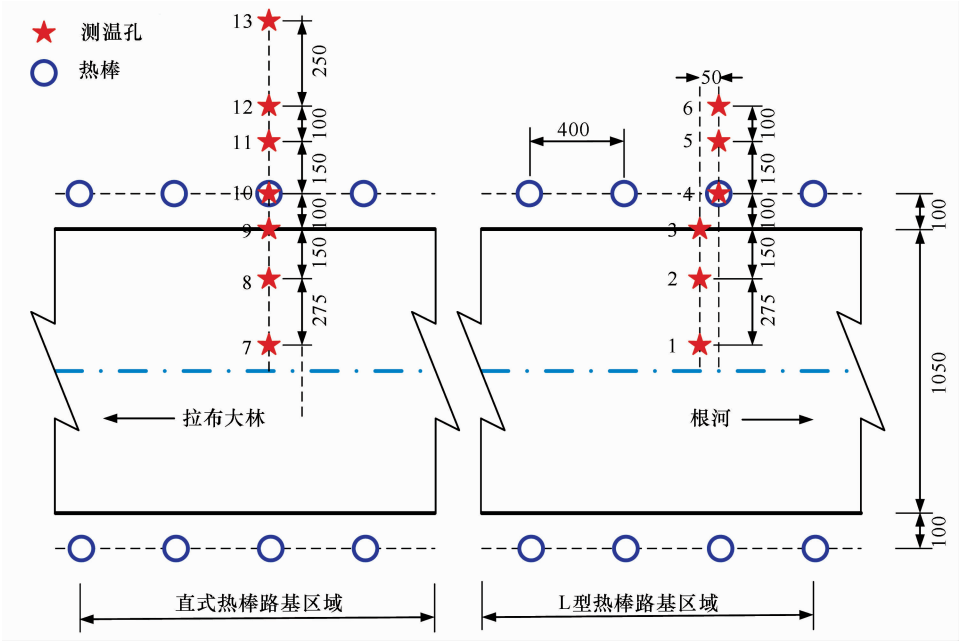


图 5　根-拉公路热棒及路基测温孔布置图(单位：cm)

Fig. 5　Allocations of the thermosyphons and temperature monitoring boreholes in the Genhe-Labudalin Highway (unit: cm)

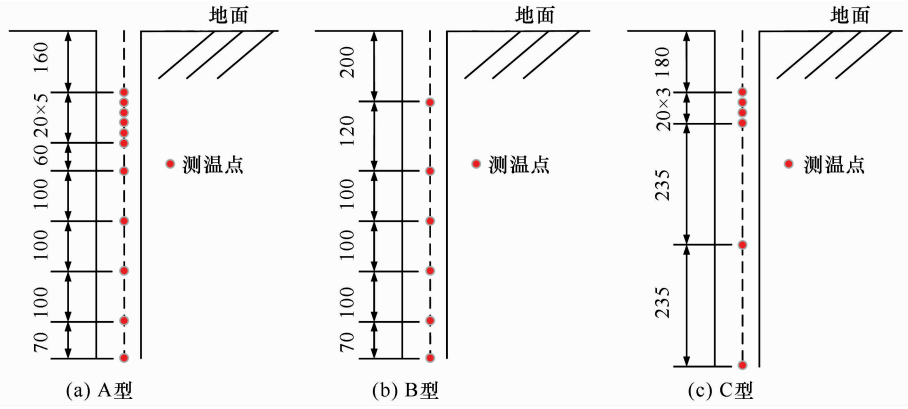


图 6 垂直方向温度点在测温孔内分布(单位:cm)

Fig. 6 The vertical allocation of temperature sensor probes (unit: cm): A – type (a), B – type (b) and C – type (c)

2 监测结果分析

2.1 热棒路基冷却效果分析

图 7 ~ 图 11 分别给出 2014 年 12 月 15 日—2016 年 5 月 10 日的热棒路基土体温度随深度的变化曲线,图 8 为第 1 个冬季热棒正常工作后路基土体温度分布;图 9 显示了气温回暖后路基土体温度分布;图 10 为夏季热棒停止工作后路基土体温度分布;图 12 为第 2 个冬季热棒工作后路基土体温度分布;图 13 为 2016 年 5 月路基土体温度分布。

由图 7 可知,测温孔 4 和测温孔 10 的土体温度明显低于其他测温孔,即热棒侧壁温度明显低于其他地方,直式热棒和 L 型热棒侧壁温度均已低于 –10 ℃,热棒工作正常。测温孔 7 和测温孔 13 距离热棒 5 m 以上,最高温度还在 5 ℃以上。数据表明,在热棒一定范围内土体有降温效果,远离热棒土体降温需要一定时间,这是因为土体热阻存在。

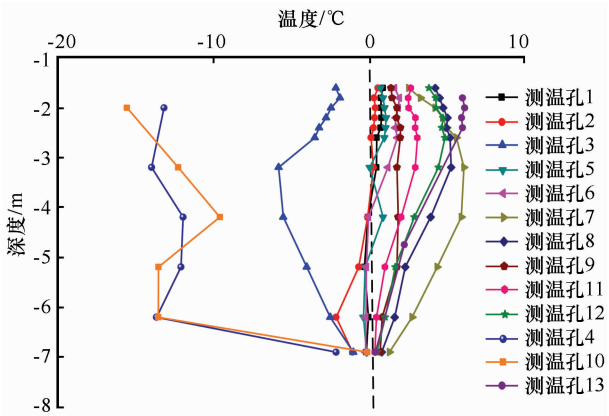


图 7 天然地面下路基土温度随深度的变化曲线(2014 年 12 月 15 日)

Fig. 7 Temperature profiles within embankment monitored within the 13 holes on 15 December, 2014

由图 8 可知,热棒工作 2 个月后,离热棒距离大于 2.0 m 的测温孔(测温孔 6、测温孔 7、测温孔 0 ℃ 以上,其他测温孔显示土温均在 0 ℃以下,这

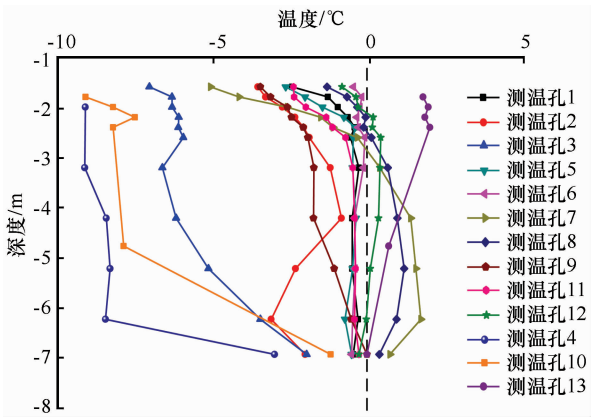


图 8 天然地面下路基土温度随深度的变化曲线(2015 年 2 月 15 日)

Fig. 8 Temperature profiles within embankment monitored within the 13 holes on 15 February, 2015

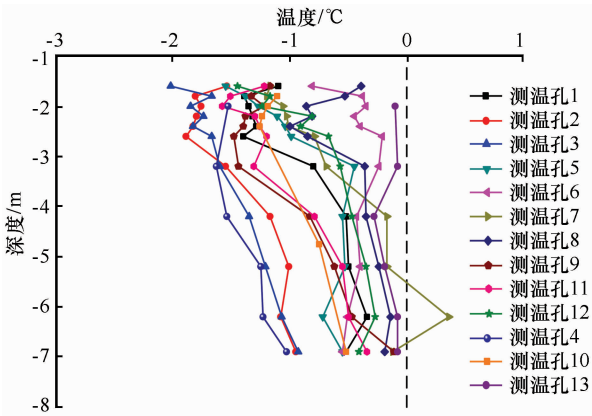


图 9 天然地面下路基土温度随深度的变化曲线(2015 年 5 月 15 日)

Fig. 9 Temperature profiles within embankment monitored within the 13 holes on 15 May, 2015

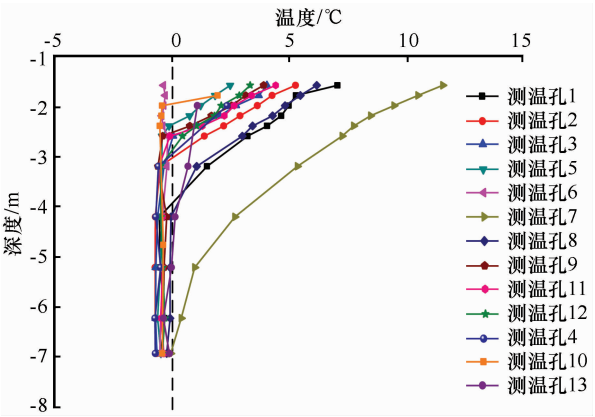


图 10　天然地面下路基土温度随深度的变化曲线（2015 年 9 月 15 日）

Fig. 10　Temperature profiles within embankment monitored within the 13 holes on 15 September, 2015

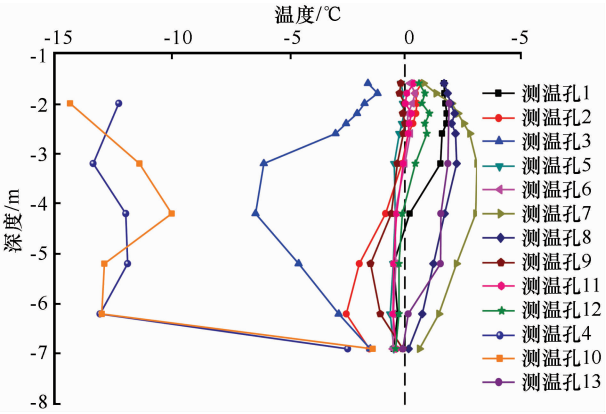


图 11　天然地面下路基土温度随深度的变化曲线（2015 年 12 月 15 日）

Fig. 11　Temperature profiles within embankment monitored within the 13 holes on 15 December, 2015

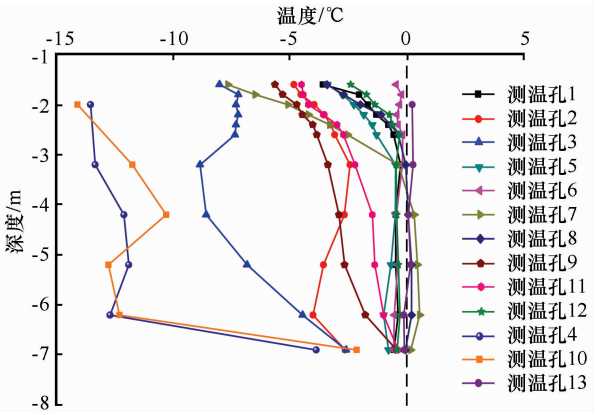


图 12　天然地面下路基土温度随深度的变化曲线（2016 年 2 月 15 日）

Fig. 12　Temperature profiles within embankment monitored within the 13 holes on 15 February, 2016

说明此刻热棒降温范围已不小于 2.0 m。在热棒降温范围内，L 型热棒路基最低温在测温孔 3 号，平均温度为 −5.3 ℃（平均温度取自冻土上限以下至最深测温点之间温度的平均值），与天然孔相比，降温幅度 6.7 ℃；直式热棒路基最低温在测温孔 9 号，平均温度 −1.6 ℃，降温幅度 3.0 ℃。

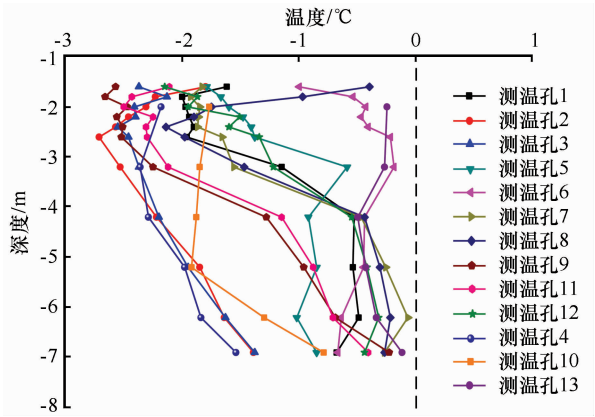


图 13　天然地面下路基土温度随深度的变化曲线（2016 年 5 月 15 日）

Fig. 13　Temperature profiles within embankment monitored within the 13 holes on 15 May, 2016

由图 9 可知，随着气温回暖，热棒停止工作，蒸发段侧壁温度与周边温度趋于相同。虽然热棒停止工作，储存在热棒周边土体中的“冷量”慢慢向四周扩散，持续降温，路基土体温度都低于天然孔地温，降温效果明显。由于黑色路面聚热效应，路面下的温度远高于其他地方温度，路中心测温孔（测温孔 1 和测温孔 7）所测土体温度远高于其他测温孔土体温度。

由图 10 可知，夏天过后，黑色路面聚热效应进一步影响路基温度分布，大部分埋深 4.2 m 以上区域土体温度大于 0 ℃，且越靠近路中心温度越高；埋深大于 4.2 m 路基土体温度保持在 0 ℃以下，处于冰冻状态。

由图 11 可知，路基土体温度在 0 ℃左右，但出现多个测温孔土体温度低于 0 ℃，温度高于 0 ℃的区域温度均不超过 3 ℃，且最高温为受黑色路面影响最大的测温孔 7 土体温度，为 5.3 ℃。

2016 年冬季，热棒继续工作，2 月 15 日（图 12）热棒路基土体温度仅天然孔（测温孔 13）和测温孔 7 部分土体温度在 0 ℃以上，且低于 0.25 ℃；到 5 月 10 日（图 13）整个热棒路基土体温度均在 0 ℃以下，除测温孔 7 以外，相同埋深处其他测温孔土体温度较天然孔低，这说明热棒降温效果明显。

比较图 9 和图 13 可知，2015 年 5 月冻土上限附近土体平均温度为 −1.5 ℃，2016 年同期冻土上

限附近土体平均温度为 -2.3 ℃，这说明热棒的作用下，冻土上限附近土体温度持续降低，有效控制冻土上限下移，保护了冻土稳定。

2.2 L 型热棒路基和直式热棒路基冷却效果对比

L 型热棒地下部分倾斜靠近路基中心线，向内倾斜 15°，与直式热棒相比，L 型热棒地下部分的端部向路中心靠近了 2.07 m，所以 L 型热棒比直式热棒散发黑色沥青路面所聚热量速度更快，降低路中心土体温度更明显。试验结果表明：2014 年 12 月 15 日(图 7)，L 型热棒路基 1 号孔距离热棒 5.25 m，天然地面 4 m 以下的地方温度已降至 0 ℃以下，而同一时间直式热棒路基 7 号孔在相同深度的温度为 6 ℃。测温孔 3 所测土体温度在 0 ℃以下，该测温孔靠近 L 型热棒，而其他测温孔的土体温度基本在 0 ℃以上，这说明 L 型热棒更有利于将路基中部热量散发到空气中，降温速度快。

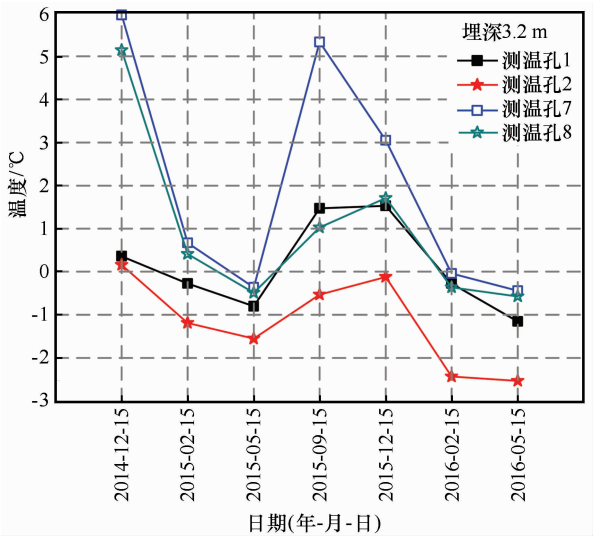


图 14 2 种热棒路基路面下埋深 3.2 m 处不同时间土温对比

Fig. 14 Variations of soil temperatures at the depth of 3.2 meters of the embankments with two kinds of thermosyphon

图 14 为测温孔 1、测温孔 2、测温孔 7 和测温孔 8 不同时间所测埋深 3.2 m 处土体温度情况，由图可知，距离路中心等距离的测温孔 1 土体温度比测温孔 7 土体温度低，测温孔 2 土体温度比测温孔 8 土体温度低，且随着热棒工作时间增加，L 型热棒降温效果比直式热棒明显，以距离热棒 2.5 m 处测温点 2(测温点 8)为例，L 型热棒降温至 -2.53 ℃，直式热棒降温至 -0.57 ℃，二者相差近 2 ℃。

此外，冬季“冷量”储备以及降温效果最终体现在夏季冻土区升温的幅度。由图 10 可知，夏季气温高于冻土温度，热棒停止工作，冬季储存在路基中的“冷量”抵御夏季从路面传入的热量。直式热棒路基最高土体温度达到 11.53 ℃(测温孔 7 所测)，同期比较，L 型热棒路基最高土体最高温度为 7.04 ℃(测温孔 1)，这也说明 L 型热棒在对于路中间抵御夏季从路面传入的热量的能力较直式热棒也要好，提高了路中间冻土的升温惰性，在夏季有效的保护了冻土。

综上所述，热棒能有效控制岛状多年冻土上限，保护多年冻土稳定；L 型热棒比直式热棒对路面下的路基土体冷却效果更好，L 型热棒用较短的时间就把路中间部分的土体冻结了且降温幅度也大于直式热棒的。

3 结论

本试验热棒路基位于根拉公路第六标段，在路基两侧埋设热棒，主动给路基降温，对冻土进行保护。在热棒路基上分别选取了 1 个直式热棒和 1 个 L 型热棒的断面，在断面的土体中设置温度传感器，监控从 2014 年 12 月 15 日至 2016 年 5 月 15 日热棒路基温度变化规律。主要研究结果有：

(1) 热棒能有效控制岛状多年冻土上限。热棒工作第 1 个冬季，热棒周围半径 2.5 m 范围内均出现不同程度降温，该范围内土体温度在冬季结束时均降至 0 ℃以下，L 型热棒路基温度平均降幅 6.7 ℃，直式热棒路基温度平均降幅 3.0 ℃。热棒蓄积的“冷量”把热棒周边 5 m 直径内的路基及边坡全部冻结，工程上通常按 3 ~ 4 m 的间距布置热棒是合理的。

(2) 热棒工作第 2 个冬季，热棒路基土体温度持续降低，距热棒 5.25 m 的路中区域亦出现了降温：相比第一个冬季，L 型热棒路基测温孔 1 平均土体温度 -0.72 ℃，降幅约 0.20 ℃；直式热棒路基测温孔 7 平均土体 -0.15 ℃，降幅约 0.14 ℃。随热棒在路基里面储存“冷量”增多，路基降温幅度递减，但降温范围随着逐渐增大。

(3) 在冬季，L 型热棒和直式热棒路基路面下及边坡土体温度均低于 0 ℃。L 型热棒蒸发段端部距路的中间部位更近，对路中间部位路基的降温幅度比直式热棒更大，冷却速度更快。L 型热棒把绝大部分“冷量”储存在路基中间部位土体中，较直式热棒路基更有利于抵御夏季从黑色路面传入的热量，在夏季有效的保护了冻土，结果表明 L 型热棒对于冻土保护是优选方案。

参考文献(References)：

[1] Tian Yahu, Fang Jianhong, Shen Yupeng. Simulation on stability of large-width highway embankment in permafrost regions[J]. China Journal of Highway and Transport, 2015, 28(1): 17 – 23. [田亚护, 房建宏, 沈宇鹏. 多年冻土地区宽幅公路路基稳定性模拟[J]. 中国公路学报, 2015, 28(1): 17 – 23.]

[2] Zhu Linnan. Study of the adherent layer on different types of ground in permafrost regions on the Qinghai-Xizang Plateau[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1988, 10(1): 8 – 14. [朱林楠. 高原冻土区不同下垫面的附面层研究[J]. 冰川冻土, 1988, 10(1): 8 – 14.]

[3] Zhang Luxin. Regularity of ground temperature variation in Qinghai-Tibet Plateau permafrost region and its effect on subgrade stability[J]. China Railway Science, 2000, 21(1): 37 – 47. [张鲁新. 青藏铁路高原冻土区地温变化规律及其对路基稳定性影响[J]. 中国铁道科学,2000, 21(1): 37 – 47]

[4] Chen Dun, Ma Wei, Zhao Shuping, et al. Recent research progress and prospect of frozen soil dynamics[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2017, 39(4): 868 – 883. [陈敦, 马巍, 赵淑萍, 等. 冻土动力学研究的现状及展望[J]. 冰川冻土, 2017, 39(4): 868 – 883.]

[5] Feldman K. The heat pipe[J]. Mechanical Engineering, 1967, 89: 30 – 31.

[6] Dun P, Reay D. Heat pipe[M]. New York: Pergamum Press, 1967.

[7] Ding Jingkang. Application of permafrost thermal pile technology[R]. Lanzhou: Northwest Research Institute Co. LTD of China Railway Engineering Corporation, 1990. [丁靖康. 冻土地区热桩技术的应用[R]. 兰州: 中铁西北科学研究院有限公司, 1990.]

[8] Deng Jun, Li Bei, Ma Li. Influence of heat pipes on temperature distribution in coal storage pile[J]. China Safety Science Journal, 2015, 25(6): 62 – 67. [邓军, 李贝, 马砺. 用热棒技术强化煤堆降温幅度试验[J]. 中国安全科学学报, 2015, 25(6): 62 – 67.]

[9] Gu Shi′an, Gu Changqing. Application of hot rod in island-shaped tundra[J]. Low Temperature Construction Technology, 2009(8): 100 – 102. [顾世安, 顾长青. 热棒在岛状冻土路基中的应用[J]. 低温建筑技术, 2009(8): 100 – 102.]

[10] Li Yongqiang. Influences of diameter of thermal probes on effect of decreasing earth temperature and producing cold quantity along Qinghai-Tibet Railway in permafrost area[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(Suppl 1): 503 – 504. [李永强. 青藏铁路多年冻土区热棒直径对降温效果和产冷量的影响分析[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(增刊 1): 503 – 504.]

[11] Wu Qingbai, Liang Suyun, Gao Xingwang. Research of convection heat transfer between thermal pile and air[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 18(1): 37 – 42. [吴青柏, 梁素云, 高兴旺. 热桩与空气间的对流换热规律研究[J]. 冰川冻土, 1996, 18(1): 37 – 42.]

[12] Pan Weidong, Lian Fengyu, Deng Hongyan, et al. Application principle and prospect of hot rod technology in cold area engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(Suppl 2): 2674 – 2675. [潘卫东, 连逢愈, 邓宏艳, 等. 寒区工程中热棒技术的应用原理和前景[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(增刊2): 2674 – 2675.]

[13] Zhuang Jun, Zhang Hong. Heat pipe, technology and engineering application[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2000. [庄骏, 张红. 热管技术及其工程应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2000.]

[14] Ran Li, Xue Xingong, Bao Liming. Applications and technical characteristics of thermal pipe subgrade in Qinghai-Tibet Railway design[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2004, 26(Suppl 1): 151 – 154. [冉里, 薛新功, 包黎明. 青藏铁路设计中热棒路基的应用及其技术指标[J]. 冰川冻土, 2004, 26(增刊1): 151 – 154.]

[15] Lock G, Chong K, Dyckerhoff A, et al. On the design of wind-augmented thermosyphons[J]. Cold Regions Science and Technology, 1989, 16(1): 11 – 23.

[16] Heuer C E. The Application of Heat Pipes on the Trans-Alaska Pipeline[R]. United States Army Corps of Engineers, Special Report 79 – 26, 1979.

[17] China Railway Engineering Corporation. Qinghai-Tibet Railway permafrost two-phase closed thermosyphon heat transfer analysis[R]. Lanzhou: Northwest Research Institute of China Railway Engineering Corporation, 2003. [中国铁路工程总公司. 青藏铁路冻土热管的传热分析[R]. 兰州: 中铁西北科学研究院, 2003.]

[18] Ma Wei, Cheng Guodong, Wu Qingbai. Preliminary study on technology of cooling foundation in permafrost regions[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2002, 24(5): 579 – 587. [马巍, 程国栋, 吴青柏. 多年冻土地区主动冷却地基方法研究[J]. 冰川冻土, 2002, 24(5): 579 – 587.]

[19] Wang Jinchang, Wu Qingbai. Settlement analysis of embankment-bridge transition section in the permafrost regions of Qinghai-Tibet Railway[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2017, 39(1): 79 – 85. [王进昌, 吴青柏. 青藏铁路冻土区路桥过渡段沉降原因分析[J]. 冰川冻土, 2017, 39(1): 79 – 85.]

[20] Yang Yongping. Research of cooling effect of permafrost foundation by thermosyphon[D]. Beijing: Dissertation of Beijing Jiaotong University, 2006. [杨永平. 热棒(桩)冷却多年冻土地基效果的分析研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2006.]

[21] Leong W, Hornby R. The application of a CFD code (ASTEC) and a network code (PENHEAT) in analyzing the thermosyphonic behavior of argon gas in a long vertical annulus[J]. Applied Mathematical Modelling, 1996, 20(3): 200 – 213.

Research of thermosyphon applied in patchy permafrost sections along the Genhe-Labudalin Highway

WU Jingquan[1], XIN Yangyang[2], XU Wenxi[2], SUN Tian[3]

(1. Hailar-Manzhouli Highway Project Construction Administration Branch, Inner Mongolia Highway Transportation Investment Development Co., Ltd., Hulunbeir 021000, Inner Mongolia, China; 2. Soupower Group, Nanjing 211112, China; 3. Nanjing Permafrost Engineering Center of Chinese Academy of Sciences, Nanjing 211112 China)

Abstract: Thermosyphon technology is an effective method and key technology for active cooling ground in cold regions at home and abroad. According to the weather conditions and distribution characteristics of the patchy permafrost along the Genhe-Labudalin Highway, thermosyphons with a space between 4 m were applied to cool the permafrost, and consequently ensure the stability of embankment. In this paper, the cooling effect of the embankment with vertical and L-shaped thermosyphons were evaluated based on monitored ground temperatures. The results showed that the vertical thermosyphon was capable to cool foundation soil within a radius of 2.5 meters with an average temperature drop more than 4 ℃. Both the vertical and L-shaped thermosyphons can cool the patchy permafrost and lower the active layer, but the L-shaped thermosyphon is better to cool the patchy permafrost in the middle of embankment. Consequently, the L-shaped thermosyphon can provide a much better protection of permafrost foundation under a wide embankment.

Key words: patchy permafrost; Genhe-Labudalin Highway; thermosyphon

（本文编辑：周成林）