

文章编号:1671-1637(2016)04-0059-09

## 多年冻土区热棒路基应用效果

刘 戈,汪双杰,金 龙,董元宏,袁 堃

(中交第一公路勘察设计研究院有限公司,高寒高海拔地区道路工程安全与健康国家重点实验室,陕西 西安 710075)

**摘 要:**为了研究热棒在青藏公路多年冻土区的应用效果,基于楚玛尔河试验监测场地8年的地温观测数据,以水平温度梯度为指标,分析了不同时期热棒的有效半径。为了提高热棒的调控效果,拓展热棒的使用范围,满足宽幅路基强吸热的使用要求,依托北麓河与安多2个试验监测场地,分析了热棒-XPS板路基与热棒-片块石路基地温监测数据。分析结果表明:热棒工作1年后的有效半径约为2.3 m,此后,随着热棒工作时间的增加,热棒影响范围逐渐增大;在热棒工作的前5年,地温降幅明显,周围土体地温降幅都基本维持在 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上,之后每年降温较小,这主要是由于外界环境温度升高,气温与地温的温差逐渐减小,热棒工作的动力逐渐衰减引起的;在热棒工作的8年中,由于热棒的持续制冷作用,热棒路基的人为上限基本不变,而普通路基同时期人为上限最大降低约为80 cm;热棒-XPS板路基从6月份开始,XPS板上下温差不断增大,最大温差约为 $17\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,有效阻隔了暖季大量热量向板下传递;热棒-片块石路基通过2年的调控作用,地温最大降幅为 $0.51\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

**关键词:**路基工程;多年冻土区;热棒路基;应用效果

**中图分类号:**U416.168

**文献标志码:**A

## Applicable effect of thermosyphon subgrades in permafrost regions

LIU Ge, WANG Shuang-jie, JIN Long, DONG Yuan-hong, YUAN Kun

(State Key Laboratory of Road Engineering Safety and Health in Cold and High-Altitude Regions,  
CCCC First Highway Consultants Co., Ltd., Xi'an 710075, Shaanxi, China)

**Abstract:** In order to investigate the applicable effect of thermosyphon in permafrost regions along Qinghai-Tibet Highway, 8 years' observational ground temperature data were collected from Chuma'er River test site, and the effective radius of thermosyphon was evaluated by taking the horizontal temperature gradient as the index. Additionally, to enhance the temperature-adjusted effect of thermosyphon, extend its application scope and meet the using demand of strong heat absorption of widened subgrade, the observational ground temperature data of the subgrade with XPS insulation board and thermosyphons and the subgrade with rock-crushed interlayer and thermosyphons at Beilu River and Anduo test sites were analyzed. Analysis result shows that the effective radius of thermosyphon after 1 year's operation is about 2.3 m, and the influencing range gradually increases with the increase of operational time. Within the first 5 years of thermosyphon operation, the ground temperature obviously decreases, the ground temperature's decrease around the thermosyphon is over  $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , and then, the ground temperature slowly

收稿日期:2016-06-10

基金项目:国家科技支撑计划项目(2014BAG05B03,2014BAG05B07);交通运输部建设科技项目(2013 318 490 010);交通运输部应用基础研究项目(2014 319 495 090)

作者简介:刘 戈(1979-),男,山东泰安人,中交第一公路勘察设计研究院有限公司高级工程师,工学博士,从事多年冻土路基工程研究。

decreases, which results from the decrease of ground-air temperature difference because of the increase of air temperature and the gradual decay of work motivation of thermosyphon. During 8 years of thermosyphon operation, the artificial permafrost tables of thermosyphon subgrades are almost unchangeable because of thermosyphons' continuing refrigeration, while the maximum decrease of contemporaneous artificial permafrost table of common subgrade is about 80 cm. Since June for the subgrade with XPS insulation board and thermosyphons, the temperature difference between top and bottom of XPS insulation board gradually increases, and the maximum value is  $17\text{ }^{\circ}\text{C}$ , which effectively mitigates the downward transfer of heat in warm seasons. In 2 years' adjustment of subgrade with crushed-rock interlayer and thermosyphons, the maximum decrease of ground temperature is  $0.51\text{ }^{\circ}\text{C}$ . 16 figs, 25 refs.

**Key words:** subgrade engineering; permafrost region; thermosyphon subgrade; applicable effect

**Author resume:** LIU Ge (1979-), male, senior engineer, PhD, +86-29-87600996, 416954907@qq.com.

## 0 引 言

多年冻土区公路路基设计原则一般分为控制融化速率和保护冻土,在全球气候变暖的背景下,单纯采用增大路基热阻(隔热板路基、填土路基)保护冻土的工程措施将难以保证多年冻土区路基的长期稳定性,在高温高含冰量地区尤为明显,需要采用热棒路基、片块石路基、通风管路基等主动降温的工程措施<sup>[1-2]</sup>。热棒是一种单向传热元件,利用两相封闭式热虹吸管的优良传热效能对冻土路基地温进行主动调控<sup>[3-4]</sup>,有效抬升冻土上限,已广泛应用于青藏公路、青藏铁路、输电工程与输油管线等多年冻土区工程建设当中,在维护地基稳定性方面发挥出了积极的作用<sup>[5-6]</sup>。

20 世纪 70 年代,美国在阿拉斯加输油管线工程建设中采用了大量热棒(当时叫热管),该输油管线全长约为 1 200 km,从北冰洋起横穿阿拉斯加至太平洋,共使用热棒 112 000 根,目前,这些热棒已成功运营了 40 多年<sup>[7-8]</sup>;前苏联早在 20 世纪 60 年代初期就有学者提出了热传导桩的概念,此后,一些研究机构曾设计了单相热管,应用于伊尔库兹克公路和雅库斯克水库等工程中<sup>[9]</sup>;1987 年,加拿大在哈德逊湾多年冻土区铁路工程建设中,为防治冻土地基热融下沉修筑了 4 km 的热棒路基,取得了良好的效果<sup>[10-11]</sup>;20 世纪 80 年代,热管技术在中国多年冻土区工程建设中得到了应用,中国科学院兰州冰川冻土研究所、中铁西北科学研究院等单位的专家和技术人员成功研制了热棒,并在青藏公路的路基和涵洞中进行了试验,取得了比较满意的效果<sup>[12-13]</sup>。

2002 年以来,在青藏公路与铁路的建设中,对高温高含冰量路段采用热棒作为治理路基病害及主动保护冻土的工程措施,热棒技术得到了大规模的推广,应用效果十分显著<sup>[14-15]</sup>。汪双杰等建立了多年冻土区热棒路基等效传热模型,运用有限元方法进行模拟,计算结果与青藏公路环境下热棒路基的观测结果吻合较好,并分析了热棒路基的工作周期、工作状态与冷却半径,提出了工程设计建议<sup>[16]</sup>;Wu 等基于青藏铁路热棒路基试验段监测数据,提出了热棒路基传输能量的估算方法,经过计算,单根热棒的年内传输能量约为 1 259 MJ<sup>[17]</sup>;Lai 等研究了 L 型热管-碎石复合路基的工作状况,与普通碎石路基相比,热管可以有效降低路基中部的温度<sup>[18]</sup>。

虽然热棒技术已成功应用于多年冻土区工程中,但对其长期降温效能的研究大多依据数值模拟计算<sup>[19]</sup>,缺乏实体工程观测数据的验证,同时对热棒的有效工作半径没有明确的评价指标<sup>[20-21]</sup>。本文以青藏公路楚玛尔河区热棒路基作为研究对象,对其长期应用效果进行了研究,依托北麓河与安多试验场地,分析了热棒与其他结构复合措施的应用效果。

## 1 实体工程简介

在 2002~2004 年青藏公路整治改建工程中,楚玛尔河高平原的清水河以北地区,路基主要病害为重度不均匀沉降与纵向开裂,路基两侧湿洼地占 80%左右,属高温高含冰量多年冻土,人为上限为 4.7~7.6 m,冻土温度为  $-0.3\text{ }^{\circ}\text{C}\sim-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。经过历次整治改建,路基高度已达 3.0~3.5 m,实践表明采用抬高路基方案已不能有效治理路基病害的产

生与发展。对此段采取的整治方案为:恢复路基两侧的冻土环境,在路基边坡两侧设置防水保温护道,在路肩外侧布设热棒,热棒间距为4.0 m,埋深为人为上限以下1.5~2.0 m,为便于安装,埋深统一采用8 m。布设路段为K2937+100~K2939+160和K2947+500~K2951+100,全长约为5.6 km,设计方案见图1。

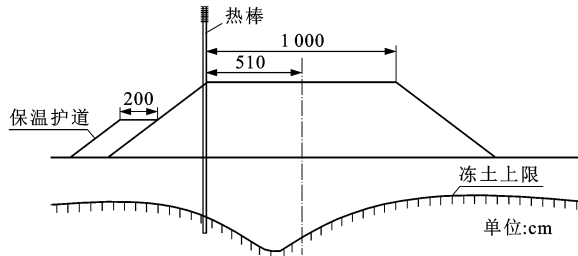


图1 热棒路基

Fig. 1 Thermosyphon subgrade

为增强热棒的降温效能,满足宽幅路基的使用要求,在北麓河进行了热棒与XPS板复合路基的试验,布设了2种复合结构形式,实体工程分别位于青藏公路K3052+450~K3052+600和K3053+340~K3053+440段,全长250 m;在安多以北进行了热棒与片块石的复合路基试验,实体工程位于青藏公路K3402+640~K3403+100段,全长460 m,都采用在路基右侧加宽1个3.5 m的车道,形成一个路基总宽度为13.5 m的宽幅路基,来验证在大尺度条件下,热棒与其他工程措施的复合应用效果。

楚玛尔河观测断面位于K2939+120,热棒布设于距路中5.1 m处,分别在距热棒0.5、1.0、1.5 m及路中、天然地表、保温护道(坡脚)处布设测温孔,沿深度方向10 m以上每0.5、10 m以下每1.0 m间隔观测地温变化,观测孔布设位置见图2。为对比热棒的降温效果,在K2939+185设置了对比断面,并布设了相应的测温孔。目前,已经收集了2004~2012年的地温观测数据,将以此对热棒的有效半径与长期降温效果进行分析。

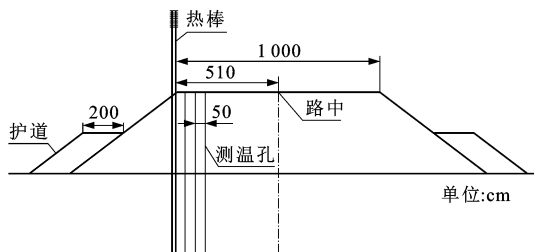


图2 测温孔布设

Fig. 2 Layout of observational boreholes

## 2 有效半径的确定

热棒的影响范围是热棒降温效果的主要评价指标之一,是指热棒在工作期间所带入的外界冷量在地基中所传递的距离。图3是距离热棒0.5 m处2月份时的地温曲线,此时热棒的制冷效果最明显,可以看出:0~2.0 m为热棒的绝热段,受外界气温变化影响较大,温度曲线波动明显;2.0~6.5 m为热棒的蒸发段,纵向等温性较好,是热棒工作的主要部分;6.5~8.0 m为热棒充液段,工作效率较低,制冷效果减弱,因此,本文选取热棒6.5 m处来分析其影响范围。

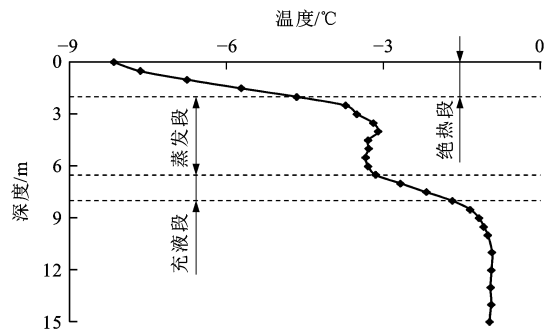


图3 2月份地温曲线

Fig. 3 Ground temperature curve in February

图4为观测断面与对比断面在路面以下6.5 m处2月份时地温对比情况,横坐标5.0 m处为左路肩,0 m处为路中,热棒位于距路中左侧5.1 m处。从图4可以看出:对比断面路肩与路中地温差异不大,由于阳坡效应,左路肩处的地温略高于路中处,而热棒路基在左路肩处形成一个突变,最低地温达到-1.82 °C,远低于对比断面,说明此时在阳坡侧冻土已经回冻;随着距离的增大,地温迅速升高,水平温度梯度减小,在距热棒2.75 m左右,温度梯度基本与对比断面一致,表明热棒对周围土体的冷却作用随着距离增大逐渐衰减。

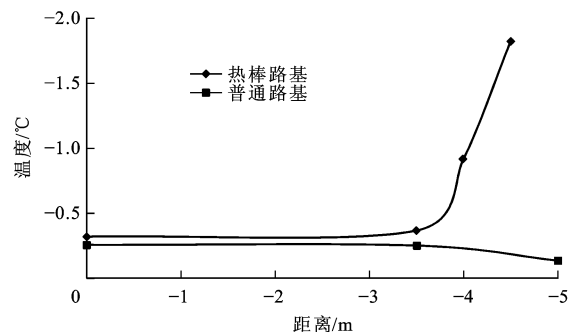


图4 地温对比

Fig. 4 Comparison of ground temperatures

可以通过热棒水平温度曲线的突变程度来反映其影响范围,图5为热棒埋设一年后6.5 m深度处2、5、7、10月份沿水平方向的地温曲线,以热棒水平温度梯度是否为0来判断其有效影响范围,约为2.3 m。此外,不同季节热棒的水平温度曲线形态不尽相同。在2月份,热棒的功率最大,距离热棒0.5 m处的地温最低,为 $-1.82^{\circ}\text{C}$ ,而距热棒1.5 m处的地温为 $-0.37^{\circ}\text{C}$ ,是图5中最高的温度。而10月份的水平温度曲线表现规律正好相反,此时,热棒基本停止工作,距热棒0.5 m处的温度为 $-0.86^{\circ}\text{C}$ ,为图5中最高温度,而距热棒1.5 m处的地温为 $-0.53^{\circ}\text{C}$ ,为图5中最低温度。这主要是由于热棒的距离所导致的温度传播(“冷量扩散”)滞后效应所引起的,在一年中的不同月份,由于气温的变化,加之地温变化滞后于气温,热棒在不同季节对周围土体的冷却作用是不同的。在冬季,热棒处于工作状态,其周围土体降温较快,但由于土体热阻作用,制冷效果尚未传递到远处土体,因而水平温度曲线升温较快,温度梯度较大。而在夏季,虽然热棒停止工作,其附近的土体温度开始上升,但热棒在冬季时聚集的“冷量”逐渐扩散,影响范围不断扩大,从而降低了远处土体的温度。

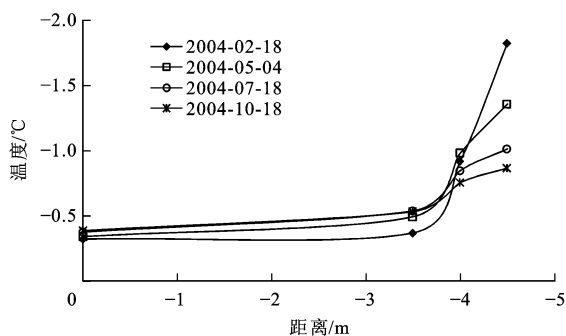


图5 水平方向的地温曲线

Fig. 5 Horizontal ground temperature curves

以上分析表明:热棒的影响范围受到季节变化的影响,为消除季节差异,以下采用年平均温度来分析热棒的影响范围。图6是热棒路基6.5 m深度处的水平地温曲线,可以看出,随着热棒工作时间的增加,热棒侧的地温不断降低。2004年,距离热棒0.5 m处年平均地温为 $-1.25^{\circ}\text{C}$ ,2008年,此处年平均地温为 $-2.16^{\circ}\text{C}$ ,到2010年和2012年,此处年平均地温已分别降为 $-2.43^{\circ}\text{C}$ 与 $-2.74^{\circ}\text{C}$ 。随着热棒工作时间的增加,其影响范围也在逐渐扩大,2004年,距离热棒约2.3 m处水平地温梯度约为0,2008年,该处的水平地温梯度为 $0.257^{\circ}\text{C} \cdot \text{m}^{-1}$ ,2012年,该处的水平地温梯度为 $0.459^{\circ}\text{C} \cdot \text{m}^{-1}$ ,此

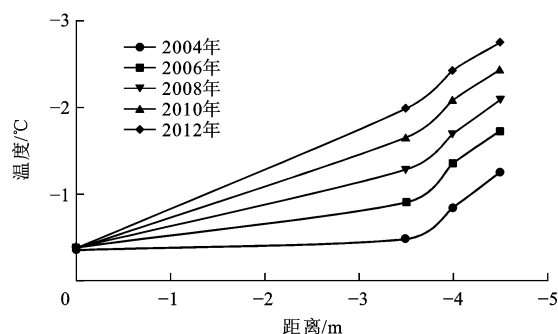


图6 平均的水平地温曲线

Fig. 6 Average horizontal ground temperature curves

时的影响范围已远大于2.3 m。

### 3 长期应用效果分析

图7为路面以下6.5 m处,距离热棒0.5、1.0、1.5 m及路中的地温随时间变化过程。在热棒的作用下,其周围土体的温度持续降低,降低的幅度随着距离的变化各不相同。距离热棒0.5、1.0 m处的地温在热棒埋设后8年分别降低了 $0.59^{\circ}\text{C}$ 和 $0.66^{\circ}\text{C}$ ,而路中的地温基本保持不变。

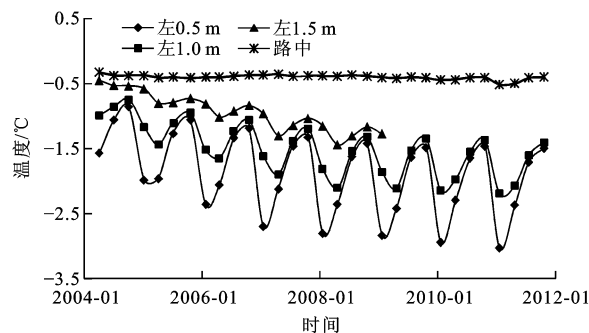


图7 观测孔地温曲线

Fig. 7 Ground temperature curves at observational boreholes

此外,热棒的工作状态可以分为2阶段,在最初的5年间,周围土体的温度不断降低,降幅十分显著,而在第5年之后,热棒的降温效果逐渐减弱,周围土体的温度趋于稳定,不再明显降低。在2004~2008年间,距热棒0.5、1.0 m处的地温分别降低了 $0.52^{\circ}\text{C}$ 和 $0.56^{\circ}\text{C}$ ,而在2008~2011年间,两处的地温分别只降低了 $0.08^{\circ}\text{C}$ 和 $0.10^{\circ}\text{C}$ 。这主要是由于经过前5年的降温制冷作用,热棒周围地温已降低到一定程度,下降空间已十分有限;此外,随着全球气候的逐渐变暖,气温不断升高,气温、地温的温差逐渐减小,而这正是热棒工作的“动力”源泉,热棒工作“动力”的衰减导致了其制冷效果的减弱。

为了分析热棒对路基温度场的长期影响,将热棒路基与普通路基2004、2011年左路肩的地温进行

了对比,结果见图8。从图8(a)可以看出,热棒路基左路肩路面以下0~8 m范围内地温显著下降,尤其在4~8 m区间,2011年2月时的地温比2004年同期地温降低了约2℃,而普通路基则由于外界气候变暖的影响,该处地温在8年间最大升高了约0.75℃。图8(b)10月份的地温对比也表明,热棒路基左路肩0~8 m范围内的地温8年间最大降低了约0.6℃,而普通路基的地温最大增加了约2.06℃;2004年,热棒路基左路肩的人为上限约为2.55 m,与2011年基本保持一致;普通路基左路肩2004年的人为上限为6.55 m,而到2011年,人为上限已下降了约80 cm。这说明由于热棒的持续制冷作用,可长期保持热棒作用范围内的地温不断降低,人为上限维持在设计允许范围内,有效抵御黑色路面的吸热作用和全球气候变暖的影响。

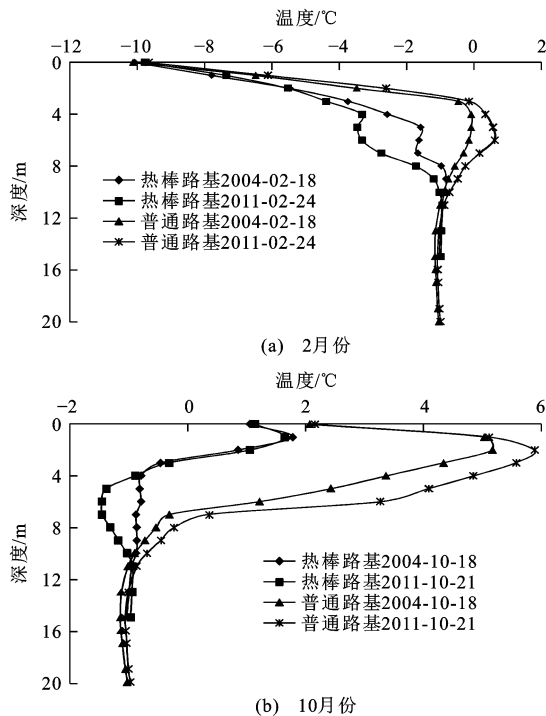


图8 左路肩地温对比

Fig. 8 Comparison of ground temperatures at left shoulders

图9为路中位置热棒路基与普通路基2004、2011年的地温对比。从图9(a)可以看出,2004年2月份,热棒路基与普通路基路中地温相差不大,但到了2011年同期,普通路基路中3.5~7.0 m范围内已变为正温,表明多年冻土已经退化,而热棒路基路中该处地温变化不大,与普通路基最大差值约为0.90℃。图9(b)10月份的路中地温曲线则表现出了与左路肩相似的规律,8年间,热棒路基的路中人为上限基本没有变化,而普通路基的人为上限下降了约50 cm,说明对于远离热棒的路中位置,其长期

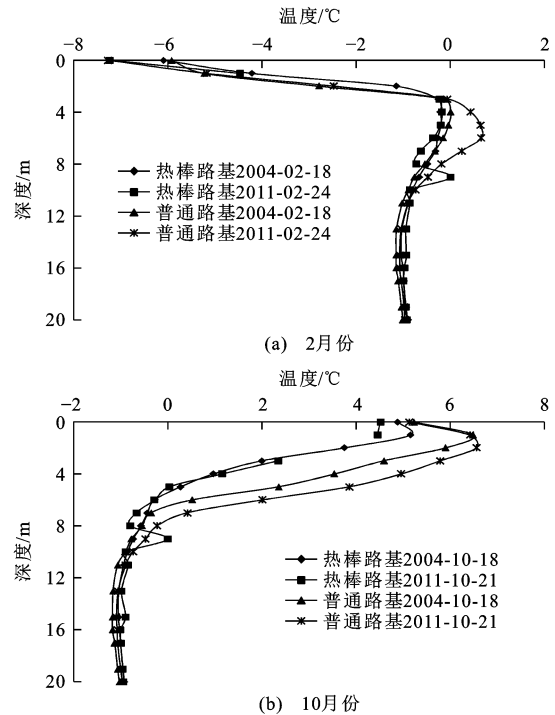


图9 路基中心线地温对比

Fig. 9 Comparison of ground temperatures at center lines of subgrades

制冷效果依然明显存在。

## 4 热棒与其他工程措施的组合降温效果

热棒在多年冻土区虽具有良好的冷却效果,对维护冻土路基的热稳定性有积极的作用,但是,热棒在暖季不工作,只有在冷季外界温度低于路基体温度,且达到热棒启动温差时才工作,全年有效工作时间有限。此外,随着多年冻土区高速公路的建设逐渐推进,由于热棒有效半径的局限,在大尺度宽幅路基上单独采用热棒,在远离热棒的路中位置很难达到调控要求,需要和其他工程措施进行复合使用。

### 4.1 热棒与隔热板的复合

为达到热棒全年都可发挥地温调控作用的效果,可将其与XPS板进行组合,将热棒冷季对流换热强烈能主动冷却路基与XPS板有较大热阻能减少路基体暖季吸热的各自积极因素进行综合利用<sup>[22]</sup>。根据热棒的规格,目前有2种复合结构,一种为直插热棒与XPS板的复合,见图10;一种为发卡热棒与XPS板的复合,发卡热棒是在刚性热棒的基础上开发出的一种新型柔性产品,是将热棒的冷凝端置于隔热层的顶部,将蒸发端置于隔热层底部,将XPS板夹在热棒中间,暖季时XPS板起到阻

热作用,冷季时可因板上温度低于板下温度,满足热棒启动温差的要求,发卡热棒开始工作,通过工质的循环将 XPS 板上部的冷量传递到下部,最终达到冷却路基的效果<sup>[23]</sup>,见图 11。

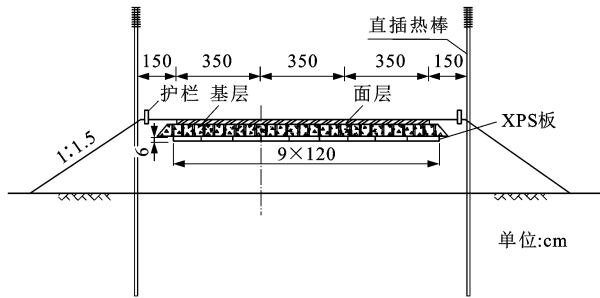


图 10 直插热棒-XPS 板复合路基

Fig. 10 Combined subgrade with XPS insulation board and inserted thermosyphons

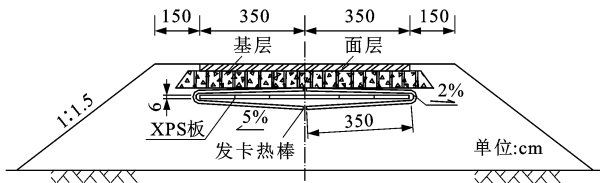


图 11 发卡热棒-XPS 板复合路基

Fig. 11 Combined subgrade with XPS insulation board and hairpin thermosyphons

直插热棒-XPS 板复合路基观测断面位于 K3052+580 处,对比断面位于 K3052+630 处。图 12 为连续 2 年地温曲线,1 月份观测断面的地温明显低于对比断面,表现为在路面结构下 2~5 m 范围内,两断面地温最大相差约为 0.8℃,说明复合路基对活动层处的地温有一定的调控效果,这主要是由于暖季时 XPS 板阻止了外界热量进入路基体内,冷季时热棒开始工作,到 1 月份已连续工作近 3 个月,主动制冷的效果已开始显现。

发卡热棒-XPS 板复合路基的观测断面、对比断面分别位于 K3053+360 与 K3053+229 处。图 13 为 XPS 板上下温差随时间变化情况,在 6~10 月份,XPS 板上下温差表现为先增后降的趋势,从 6 月份开始,由于外界气温不断升高,XPS 板阻隔了大量热量向板下传递,因此,板上下温差不断增大,最大温差约为 17℃,这充分说明 XPS 板具有良好的阻热效果。从 8 月份开始,温差开始缓慢减小,进入 10 月份后,板上下温差开始迅速减小,到 10 月 19 日,板上下温差已小于 1℃。

图 14 为复合路基地温变化过程,进入 10 月份后,气温开始降低,XPS 板上下的温差逐渐满足发卡热棒启动条件,发卡热棒开始工作,通过循环散热

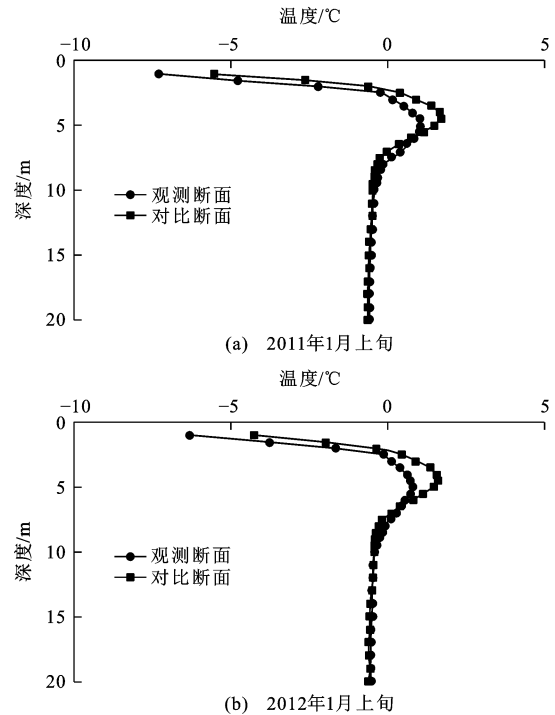


图 12 一月上旬路中孔地温对比

Fig. 12 Comparison of ground temperatures at mid-subgrade boreholes in early January

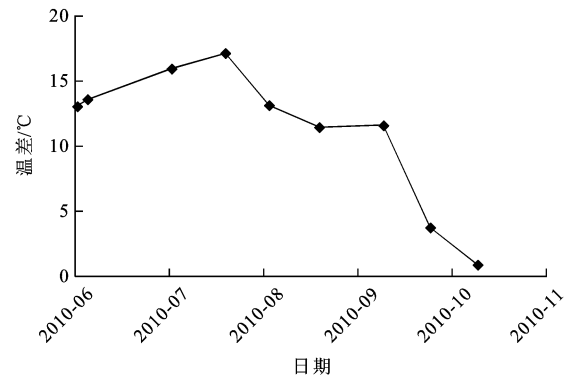


图 13 XPS 板上下温差曲线

Fig. 13 Curves of temperature difference between top and bottom of XPS insulation board

的方式,将 XPS 板下的热量带到板上,显著降低了板下及下伏冻土路基的地温。

#### 4.2 热棒与片块石的复合

为增强热棒的有效作用范围,可将热棒与片块石进行复合,片块石路基本身具有“热半导体”性能,冷季时片块石层的导热系数较大,暖季时导热系数较小,可对热棒的作用起到有益的补充<sup>[24-25]</sup>,实现对宽幅路基的地温调控效果,设计方案见图 15。

观测断面位于 K3402+660 处,对比断面位于 K3402+800 处,该段地处捷布曲河断陷谷地,地质条件为洪冲积砾砂土与洪坡积亚黏土夹碎石等,多

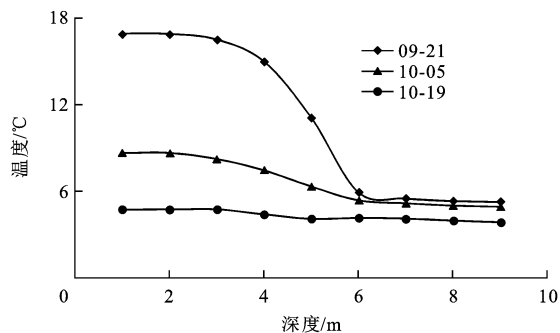


图14 发卡热棒路基地温变化过程

Fig. 14 Changing processes of ground temperatures of hairpin thermosyphon subgrade

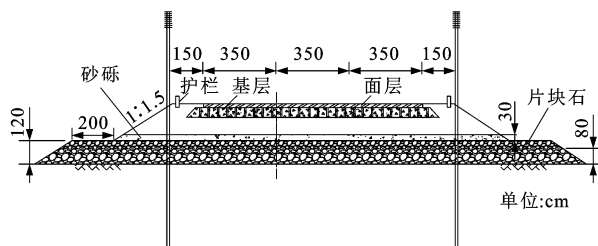


图15 热棒-片块石复合路基

Fig. 15 Combined subgrade with crushed rocks and thermosyphons

数路段为富冰、饱冰冻土,融沉系数为18%~25%,人为上限为5.0~6.5 m,年平均地温较高,处于多年冻土退化区。

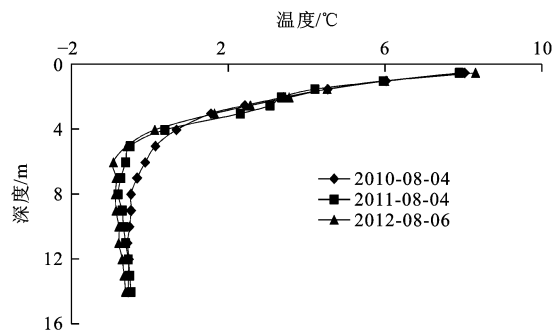
片块石层厚度为1.2 m,分2层填筑,第1层(下层)厚度为0.8 m,粒径不小于20~30 cm,第2层(上层)厚度为0.4 m,粒径为10~15 cm,片石层上为30 cm厚的砂砾层。热棒布设于路基左右路肩处,纵向布设间距为4 m。

图16为热棒-片块石复合路基在观测期2月份与8月份路中孔地温曲线,复合路基工作第3年比前2年地温都有一定的降幅,8月份地温曲线在上限以下范围有一定的偏差,并且偏移量逐年增大,在6 m深度处,2011年比2010年地温降低了0.49℃,至2012年时该位置处地温已降至-0.8℃,最大地温降幅为0.51℃;在冷季2月份,地温也有明显降低,在路面下4~10 m范围内,地温下降明显,在8 m深度处,2012年地温相比2011年降低了0.18℃,表现出了良好的地温调控效果。

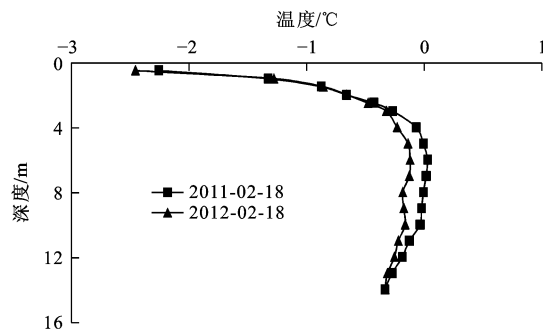
## 5 结 语

(1)以热棒的水平温度梯度是否为0判断其有效影响范围约为2.3 m,由于冷量扩散的滞后效应,有效半径随季节变化而波动。

(2)在热棒工作的8年里,左路肩与路中的冻土



(a) 8月上旬



(b) 2月中旬

图16 路中孔地温对比

Fig. 16 Comparison of ground temperatures for borehole at subgrade center

人为上限基本没有下移,保障了冻土路基的稳定。

(3)热棒工作最初5年,地温降幅明显,距热棒0.5、1.0 m处的地温分别降低了0.52℃和0.56℃,之后气温、地温的温差逐渐减小,热棒工作动力逐渐衰减,制冷效果逐渐减弱。

(4)由于热棒有效作用范围有限,因此,在以宽幅路基为特征的高速公路上使用时,可采用热棒与片块石或隔热板进行复合,以增强其降温效果,复合措施的长期降温效能还需进一步研究。

## 参考文献:

### References:

- [1] 汪双杰,陈建兵,李仙虎. 多年冻土地区公路修筑技术研究与工程实践[J]. 冰川冻土, 2009, 31(2): 384-392.  
WANG Shuang-jie, CHEN Jian-bing, LI Xian-hu. The highway construction technology in permafrost regions: research and engineering practice[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2009, 31(2): 384-392. (in Chinese)
- [2] 温智,盛煜,马巍,等. 保温法保护多年冻土的长期效果分析[J]. 冰川冻土, 2006, 28(5): 760-765.  
WEN Zhi, SHENG Yu, MA Wei, et al. Long-term effect of insulation on permafrost on the Tibetan Plateau[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2006, 28(5): 760-765. (in Chinese)
- [3] 刘戈,樊凯,朱东鹏,等. 多年冻土区路基调控措施的设计方法及适用性[J]. 公路交通科技, 2008, 25(9): 279-281, 290.

- LIU Ge, FAN Kai, ZHU Dong-peng, et al. The design way and the applicability of the regulation[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2008, 25(9): 279-281, 290. (in Chinese)
- [4] MU Yan-hu, WANG Guo-shang, YU Qi-hao, et al. Thermal performance of a combined cooling method of thermosyphons and insulation boards for tower foundation soils along the Qinghai-Tibet Power Transmission Line[J]. Cold Regions Science and Technology, 2016, 121: 226-236.
- [5] 李永强, 吴志坚, 王引生, 等. 青藏铁路冻土路基热棒应用效果试验研究[J]. 中国铁道科学, 2008, 29(6): 6-11.
- LI Yong-qiang, WU Zhi-jian, WANG Yin-sheng, et al. Test study on the application effect of the thermal pipes on the roadbed in the permafrost region along Qinghai-Tibet Railway[J]. China Railway Science, 2008, 29(6): 6-11. (in Chinese)
- [6] WU Di, JIN Long, PENG Jian-bing, et al. The thermal budget evaluation of the two-phase closed thermosyphon embankment of the Qinghai-Tibet Highway in permafrost regions[J]. Cold Regions Science and Technology, 2014, 103(7): 115-122.
- [7] WEN Zhi, SHENG Yu, MA Wei, et al. Analysis on effect of permafrost protection by two-phase closed thermosyphon and insulation jointly in permafrost regions[J]. Cold Regions Science and Technology, 2005, 43(3): 150-163.
- [8] ZHANG Ming-yi, LAI Yuan-ming, ZHANG Jian-ming, et al. Numerical study on cooling characteristics of two-phase closed thermosyphon embankment in permafrost regions[J]. Cold Regions Science and Technology, 2011, 65(2): 203-210.
- [9] 孙文, 吴亚平, 郭春香, 等. 热棒对多年冻土路基稳定性的影响[J]. 中国公路学报, 2009, 22(5): 15-20.
- SUN Wen, WU Ya-ping, GUO Chun-xiang, et al. Influences of two-phase closed thermosyphon on permafrost roadbed stability[J]. China Journal of Highway and Transport, 2009, 22(5): 15-20. (in Chinese)
- [10] DONG Yuan-hong, LAI Yuan-ming, XU Xiang-tian, et al. Using perforated ventilation ducts to enhance the cooling effect of crushed-rock interlayer on embankments in permafrost regions[J]. Cold Regions Science and Technology, 2010, 62(1): 76-82.
- [11] 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2): 2673-2676.
- PAN Wei-dong, LIAN Feng-yu, DENG Hong-yan, et al. Application principle and prospect of thermal-probe technique in cold regions engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(S2): 2673-2676. (in Chinese)
- [12] ZHANG Ming-yi, LAI Yuan-ming, WU Qing-bai, et al. A full-scale field experiment to evaluate the cooling performance of a novel composite embankment in permafrost regions[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2016, 95: 1047-1056.
- [13] 章金钊. 多年冻土地地区公路路基设计技术研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2008.
- ZHANG Jin-zhao. Study on the heat conduction process of roadbed in permafrost region and new control methods[D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2008. (in Chinese)
- [14] 田亚护, 刘建坤, 沈宇鹏. 青藏铁路多年冻土区热棒路基的冷却效果三维有限元分析[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(增2): 113-119.
- TIAN Ya-hu, LIU Jian-kun, SHEN Yu-peng. 3-D finite element analysis of cooling effect of Qinghai-Tibet Railway embankment with thermosyphons in permafrost regions[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(S2): 113-119. (in Chinese)
- [15] MA Wei, MU Yan-hu, WU Qing-bai, et al. Characteristics and mechanisms of embankment deformation along the Qinghai-Tibet Railway in permafrost regions[J]. Cold Regions Science and Technology, 2011, 67(3): 178-186.
- [16] 汪双杰, 黄晓明, 陈建兵, 等. 无动力热棒冷却冻土路基研究[J]. 公路交通科技, 2005, 22(3): 1-4, 20.
- WANG Shuang-jie, HUANG Xiao-ming, CHEN Jian-bing, et al. Research on frozen soil subgrade cooling by non-power heat pipe[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2005, 22(3): 1-4, 20. (in Chinese)
- [17] WU Jun-jie, MA Wei, SUN Zhi-zhong, et al. In-situ study on cooling effect of the two-phase closed thermosyphon and insulation combinational embankment of the Qinghai-Tibet Railway[J]. Cold Regions Science and Technology, 2010, 60(3): 234-244.
- [18] LAI Yuan-ming, GUO Hong-xin, DONG Yuan-hong. Laboratory investigation on the cooling effect of the embankment with L-shaped thermosyphon and crushed-rock revetment in permafrost regions[J]. Cold Regions Science and Technology, 2009, 58(3): 143-150.
- [19] SONG Yi, JIN Long, ZHANG Jin-zhao. In-situ study on cooling characteristics of two-phase closed thermosyphon embankment of Qinghai-Tibet Highway in permafrost regions[J]. Cold Regions Science and Technology, 2013, 93(9): 12-19.
- [20] ZHANG Ming-yi, LAI Yuan-ming, PEI Wan-sheng, et al. Effect of inclination angle on the heat transfer performance of a two-phase closed thermosyphon under low-temperature conditions[J]. Journal of Cold Regions Engineering, 2014, 28(4): 1-11.
- [21] JIN Long, WANG Shuang-jie, CHEN Jian-bing, et al. Study on the height effect of highway embankments in permafrost regions[J]. Cold Regions Science and Technology, 2012, 83-84: 122-130.
- [22] 汪双杰. 高原多年冻土区公路路基稳定及预测技术研究[D]. 南京: 东南大学, 2005.
- WANG Shuang-jie. Study on highway subgrade stabilization and prediction technique in plateau permafrost region[D]. Nanjing: Southeast University, 2005. (in Chinese)
- [23] 刘戈, 汪双杰, 袁堃, 等. 尺度效应下冻土路基结构适应性及优化[J]. 中国公路学报, 2015, 28(12): 17-25.



- LIU Ge, WANG Shuang-jie, YUAN Kun, et al. Adaptability and optimization of permafrost embankment structure under scale effect[J]. China Journal of Highway and Transport, 2015, 28(12): 17-25. (in Chinese)
- [24] MA Wei, WEN Zhi, SHENG Yu, et al. Remedying embankment thaw settlement in a warm permafrost region with thermosyphons and crushed rock revetment[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2012, 49(9): 1005-1014.
- [25] 董元宏,赖远明,陈武. 多年冻土区宽幅公路路基降温效果研究——一种L型热管-块碎石护坡复合路基[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(6): 1043-1049.
- DONG Yuan-hong, LAI Yuan-ming, CHEN Wu. Cooling effect of combined L-shaped thermosyphon, crushed-rock revetment and insulation for high-grade highways in permafrost regions[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(6): 1043-1049. (in Chinese)