

文章编号:1671-6833(2025)04-0100-07

深厚含土重冰层路基高聚物隔热性能试验

郭成超¹, 党鹏², 马合木提·依明², 刘建刚², 吴栋², 王贺³, 曹鼎峰¹

(1. 中山大学 土木工程学院, 广东 珠海 519082; 2. 新疆交通建设集团股份有限公司, 新疆 乌鲁木齐 830016; 3. 西南交通大学 土木工程学院, 四川 成都 610031)

摘要:深厚含土重冰层是极限性不良地质,在其上修建路基会面临严重的冻胀和融沉病害,威胁车辆的运行安全。为此探究了将聚氨酯高聚物材料(PU)用作路基的保温隔热层以防止冻融病害。进行了PU的隔热性能试验,分析密度和冻融循环次数对PU导热系数的影响。开展了重冰层冻土路基保温隔热模型试验。研究了普通路基、单层PU板路基和双层PU板路基在冻融过程中的温度分布特征,定量描述了PU的隔热效果。结果表明:PU的导热系数与自身密度呈正相关,与冻融循环次数也呈正相关;PU的密度越低,其导热系数受到冻融循环的影响越大;PU的密度越高,其隔热性能越能在多次冻融循环中保持稳定;冻结时,普通路基的热通量是单层和双层PU板路基的1.7倍,融化时,普通路基的热通量是单层PU板路基的2.1倍,双层PU板路基的2.8倍;PU板具有保温隔热能力,可以抬升路基的冻结深度,减少冻胀病害,延长路基的冻结过程,避免融沉病害;双层PU板比单层PU板表现出更优秀的隔热效果。

关键词:道路工程;深厚含土重冰层;聚氨酯高聚物;保温隔热结构;模型试验

中图分类号:TU445 **文献标志码:**A **doi:**10.13705/j.issn.1671-6833.2025.04.004

随着西部大开发及“一带一路”倡议的实施,中国在高海拔寒冷地区修建的公路工程越来越多。高海拔寒冷地区广泛分布着深厚含土重冰层。深厚含土重冰层对温度的敏感性高^[1],施工活动会扰动地下冰层的原始热平衡从而诱发沉降,严重时会造成冻融泥流和滑坡^[2-3]。因此在深厚含土重冰层上修建路基时,必须采取有效的工程措施。

预防和减少冻土路基变形(冻胀和融沉)的关键是保持路基的热稳定性和保护下层冻土。保持路基热稳定性的主要方式包括主动制冷和被动隔热^[2]。主动制冷措施包括碎石层、通风管道和热棒等。碎石层在暖季通过自身结构隔绝外部热量,在冷季通过空气的对流加快热量向外界的散失,有效减少路基中热量的积累。然而,由于空气密度的差异性,碎石层在冷季的自然对流会被削弱^[4-6]。通风管道同样利用空气的对流换热原理,在冻土路基中起到良好的冷却效果。但是在夏季,通风口会将

热量带入冻土路基中,对冻土路基造成不利影响^[7-8]。热棒的工作原理是利用蒸发器和冷凝器之间的温差快速降低路基温度,不需要额外的能源。但是热棒具有点状制冷的特点,导致冻土路基的温度场分布极不均匀^[9-11]。

被动隔热措施包括在路基中使用高反射率表面、遮阳板和隔热材料。高反射率表面在白天可以显著减少路基表面吸收的太阳辐射,但在夜间不发挥作用^[12]。遮阳板覆盖的路基表面的温度在暖季比未覆盖的路基低4~5℃。但遮阳板的冷却效果会受到强风、路基朝向和地形条件的影响^[13]。因此,保护冻土最有效的措施是铺设隔热材料,以增加路基的热阻。最常见的隔热材料是聚苯乙烯^[14]和聚氨酯高聚物(PU)^[15],两者的保温性能和抗压强度相近,但聚苯乙烯更容易老化开裂并且只能通过工厂预制成型,在现场铺设时会存在拼接缝。PU是通过自发泡形成的轻质多孔结构,具有低导热率

收稿日期:2024-09-22;修订日期:2024-11-01

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFB2302205)

作者简介:郭成超(1973—),男,河南南阳人,中山大学教授,博士,博士生导师,主要从事工程灾变防护理论与技术的研究,E-mail:guochch25@mail.sysu.edu.cn。

通信作者:王贺(1995—),女,内蒙古赤峰人,西南交通大学博士研究生,主要从事寒区工程理论和数值分析的研究,E-mail:wangh1030@my.swjtu.edu.cn。

引用本文:郭成超,党鹏,马合木提·依明,等.深厚含土重冰层路基高聚物隔热性能试验[J].郑州大学学报(工学版),2025,46(4):100-106,144.(GUO C C, DANG P, YIMING M, et al. Experimental on thermal insulation capacity of polymers in roadbed of deep soil-bearing heavy ice layer[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2025, 46(4): 100-106, 144.)

和化学性质稳定的优点^[16]。PU 可以直接注入已建成的路基中^[17]。对于正在修建的路基,PU 既可以通过现场喷涂形成隔热层,这样避免了拼接缝的影响,也可以在工厂将 PU 预制成板,运至现场进行铺设。PU 的注浆和喷涂过程方便快捷,极大缩短施工时间,对交通干扰小,且施工规模小,节省造价。此外,PU 的耐久性好,抗酸碱腐蚀能力强,就算长期被水浸泡的情况下,也不会降解或者腐烂^[17]。聚醚多元醇和多异氰酸酯是构成 PU 的主要原材料,在注浆前以特定体积比混合^[18]。PU 中还含有发泡剂、催化剂、泡沫稳定剂和其他添加剂。这些材料充分混合并注入路基后,会发生凝胶反应、发泡反应和三聚反应,并在 30 s 内迅速膨胀形成固化体。聚氨酯已成功应用于提高路基承载力、减少路基的不均匀沉降和阻止路基渗漏中^[19-21],但却很少应用于路基隔热中。

本文对聚氨酯材料的隔热性能进行测定。开展了重冰层冻土路基保温隔热模型试验,研究了普通路基、单层 PU 板路基和双层 PU 板路基在冻融过程中的温度分布特征,定量描述了 PU 的隔热效果。

1 PU 隔热性能试验

在开展重冰层冻土路基保温隔热模型试验前,需要了解 PU 的隔热性能,才能为试验选择最佳性能的 PU。PU 的隔热性能主要取决于自身的导热系数。采用热常数分析仪(测量范围为 0.005 ~ 1 800 W/(m·K))测量了 PU 在不同密度下的导热系数。采用高低温箱(温控范围为 -60 ~ 210 ℃)研究冻融循环对 PU 隔热性能的影响。

如图 1 所示,根据热常数分析仪对样品尺寸的规定,将 PU 制成直径为 80 mm,厚度为 30 mm 的圆柱体试样。试样共有 0.15, 0.20, 0.25 和 0.30 g/cm³ 这 4 种密度,每种密度有 3 组试样,取 3 组试样测量结果的平均值作为每种密度下 PU 的导热系数值。冻融循环试验中对冻融温度、时间的设定依据 GB/T 33011—2016《建筑用绝热制品 抗冻融性能的测定》^[22]。设置冻结温度为 -20 ℃,持续 6 h,融化温度为 20 ℃,持续 6 h,因此 12 h 为一个冻融周期。

图 2 为密度 ρ 对 PU 导热系数的影响。从图 2 可以看到,密度为 0.15, 0.20, 0.25, 0.30 g/cm³ 的 PU 初始导热系数分别为 0.030, 0.034, 0.039 和 0.044 W/(m·K),即 PU 的密度越大,其导热系数就越大。这是因为 PU 的密度越大,其内部包含空气的泡孔体积占比越小,因此 PU 的导热系数越大。从图 2 还可以看到,随着冻融循环次数 N 的增加,PU 导热系数与密度之间的线性关系曲线的斜率越

来越小。这说明 PU 的密度越低,其导热系数受到冻融循环的影响越大。

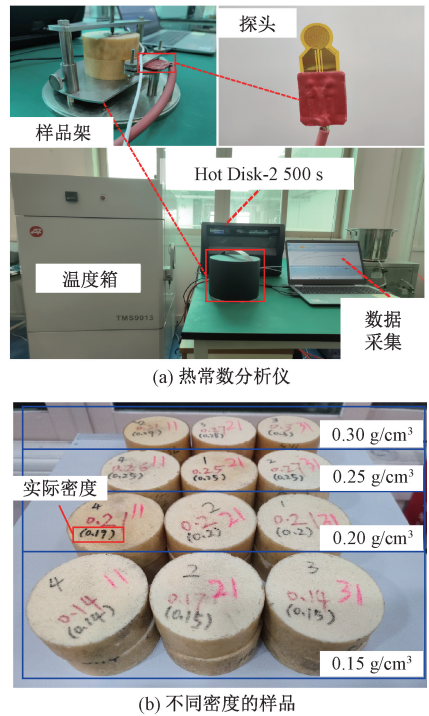


图 1 PU 导热系数的测试及制作样品
Figure 1 Test of thermal conductivity of PU and the sample

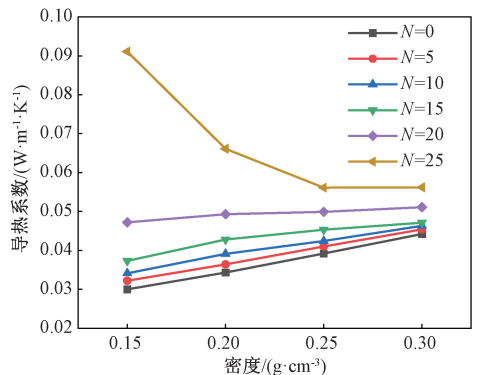


图 2 PU 导热系数和密度关系
Figure 2 Relationship between thermal conductivity and density of PU

图 3 为循环次数 N 对 PU 导热系数的影响,可以看出,PU 的导热系数会随着冻融循环次数的增加而增大。从开始冻融到第 15 次循环,各密度下 PU 的导热系数均有小幅度增大,PU 密度为 0.20 g/cm³ 时的导热系数变化幅度最大,比初始值增加了 24.8%。在冻融 15 次后,各密度下 PU 的导热系数曲线均出现明显拐点。冻融 20 次时各密度下 PU 的导热系数数值非常接近。冻融 25 次时,PU 密度为 0.15 g/cm³ 时的导热系数已远大于其余密度下 PU 的导热系数。从开始冻融到循环 25 次的过程中,密度为 0.15, 0.20, 0.25, 0.30 g/cm³ 的 PU 导热系数

相比初始值分别增加了 203.89%,92.81%,43.08%和 27.15%。说明密度越高的 PU,受冻融循环的影响越小,其导热系数增加的幅度越小,隔热性能越稳定^[23]。

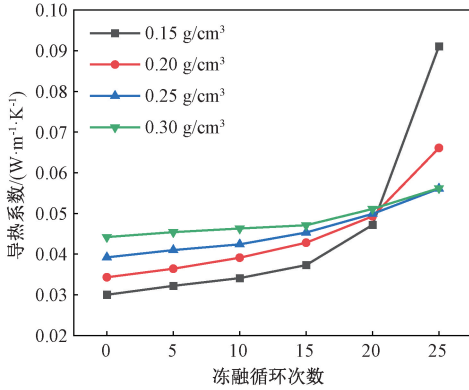


图3 PU导热系数与冻融循环次数关系

Figure 3 Relationship between thermal conductivity of PU and number of freeze-thaw cycles

由此可以看到,冻融循环 20 次是临界循环次数,当只考虑热学性能时,若冻融小于等于临界次数,选择密度为 0.15 g/cm³ 的 PU,若冻融大于临界次数,则选择密度为 0.25~0.30 g/cm³ 的 PU。但是在实际应用中,铺设在路基中的 PU 还会受到上覆荷载的影响,因此要考虑其力学性能。有研究表明,PU 的抗压强度随着密度的增加而增大,而经过冻融循环后,低密度的 PU 损失的强度大于高密度的 PU 损失的强度^[23]。因此,综合考虑热力学性能,PU 的最佳的密度为 0.25~0.30 g/cm³。

2 重冰层冻土路基保温隔热模型试验设计

2.1 模型试验的相似准则

影响冻土路基温度场的主要影响因素包括:几何尺寸 L 、时间 t 、温度 T 、冻土上限 ζ 、地表温度 T_0 、冻土温度 T_D 、空气温度 T_K 、土的导温系数 a 、土的导热系数 λ 、土的相变潜热 Q 等,其关系可以表示为

$$f(L, t, T, \zeta, T_0, T_D, T_K, a, \lambda, Q) = 0. \quad (1)$$

利用量纲分析法,得到模型试验应遵循的相似准则^[24]为

$$\left\{ \begin{aligned} \pi_1 &= \frac{1}{\zeta} = R \text{ (几何准则)}; \\ \pi_2 &= \frac{T}{T_0} = \frac{T}{T_D} = \frac{T}{T_K} = \Theta \text{ (温度准则)}; \\ \pi_3 &= \frac{at}{L^2} = F_0 \text{ (傅里叶准则)}; \\ \pi_4 &= \frac{QL^2}{\lambda Tt} = \frac{Q}{c_s T} \frac{L^2}{\lambda t} = \frac{Q}{c_s T} \frac{L^2}{at} = K_0 \frac{1}{F_0} \end{aligned} \right. \quad (2)$$

(柯索维奇准则及傅里叶准则)。

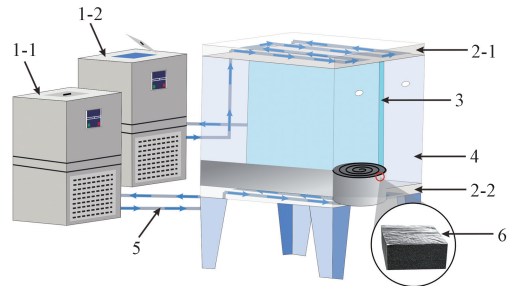
式中: c_s 为冻土的体积比热容。

模型试验准则方程可表示为

$$f(R, \Theta, F_0, K_0) = 0. \quad (3)$$

2.2 模型试验装置

试验采用大型土体冻融循环装置,如图 4 所示,共由 4 个部分组成:试验箱、温控系统、数据监测与采集系统以及保温系统。试验箱为立方体有机玻璃容器,内部净空为长 1 m×宽 1 m×高 1 m。试验箱内部空间被隔板分成两个试验空间,以提高工作效率。隔板的外壳采用不易变形的钢板,内部填充隔热材料以防止两个试验区域的温度相互干扰。温控系统是确保路基温度边界条件实现的关键。箱内温度控制在 -40~60 °C 之间,可通过控制面板自动连续控制箱内的环境温度。温控系统包括冷浴槽、冷浴盘、导管和循环液。为了避免运行过程中的能量损失,管道和温度控制面板都进行了隔热处理。数据监测系统采用山东建大仁科电子科技有限公司生产的土壤温度传感器,传感器可测量温度为 -40~80 °C,精度为 ±0.2 °C。采集系统采用安徽聚杰自动化科技有限公司生产的 GT71R 多通道彩屏无纸记录仪,可实时显示温度传感器采集到的信号,采集仪每 4 min 记录一次温度数据。保温系统包括试验箱外部包裹的 30 mm 厚保温棉(导热系数为 0.07 W/(m·K))以及 1.2 m(长)×1.2 m(宽)×1.2 m(高)的装配式保温板房。



1-1 上冷浴槽; 1-2 下冷浴槽; 2-1 上冷浴盘; 2-2 下冷浴盘; 3 可拆卸分腔隔板; 4 模型箱; 5 循环液体连接导管; 6 保温棉

图4 土体冻融循环模型试验装置

Figure 4 Freeze-thaw cycle model test setup for soils

2.3 模型试验方案

根据地质勘探资料,在我国西北地区海拔约 4 200 m 的位置存在典型的深厚含土重冰层。通过钻孔获得该位置的地质结构,表碛层分布在 0~0.2 m 深度,主要以碎石为主。表碛层之下是厚度为 22 m 的冰层,由纯冰组成,中间零星分布碎石。依据实际的工程地质进行模型试验。

试验规模主要取决于模型试验的几何缩比 C_L ,

根据 2.1 节的相似准则并结合实际条件,设计几何缩比 $C_L = 10$ 。取冻土路基的实际宽度 8 m,高度 2 m,坡比 1:1.5,则冻土路基模型的几何尺寸为宽度 0.8 m,高度 0.2 m,坡比不变。由于试验箱尺寸的限制以及呈对称结构的路基,试验时只填筑一半的路基,同时填筑 0.6 m 深的含土重冰层。模型试验使用的 PU 板是采用高压注浆工艺制作。由于试验条件的限制,最小只能制作 0.007 m 厚度的 PU 板,根据几何缩比,对应实际路基中铺设 0.07 m 的 PU 板。依据第 1 节给出的 PU 的最佳密度范围,通过控制注浆量,将 PU 板的密度控制在 0.25 g/cm^3 。试验中冻融时间缩比 $C_t = 100$,土的导温系数 C_a 、导热系数 C_λ 和相变潜热 C_Q 的相似比均为 1,采用与原状土相似的重塑土进行模型试验,路基填料为级配碎石,导热系数为 $0.579 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ 。

试验共设计 3 组工况,分别为普通路基对照组、单层 PU 板路基试验组 1、双层 PU 板路基试验组 2,图 5 为试验填筑路基的垂直剖面示意图,包括 PU 板的位置和温度测点的布置。对照组不铺设 PU 板,温度测点位置在 0 m、0.03 m、0.12 m、0.20 m 处(为表述方便,下文均将路基顶面的高程设为 0 m)。试验组 1 在 0.02 m 深铺设 PU 板,温度测点位置在 0 m、0.03 m、0.12 m、0.20 m。试验组 2 在 0.02 m 和 0.11 m 深的位置铺设 PU 板,温度测点位置在 0 m、0.03 m、0.10 m、0.12 m、0.20 m。试验组中,在边坡处铺设 PU 板,防止路基内外通过边坡进行能量交换。在路基的填筑过程中,为增加 PU 板与土体之间的整体性,在 PU 板上、下铺设土工布。

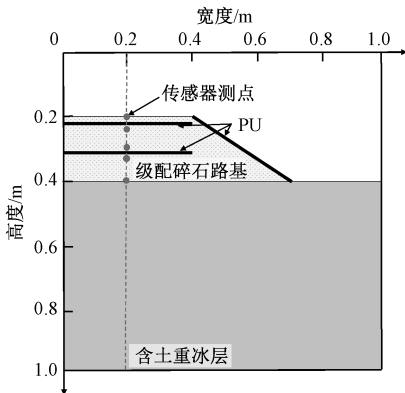


图 5 试验箱垂直剖面图

Figure 5 Vertical profile of the test chamber

根据实际气象数据并结合附面层理论,实际路基表面的温度可采用正弦周期性波动函数表示^[25],如式(4)所示。设置冷浴槽的温控程序时采用阶梯形变化模式,并考虑因上冷浴盘与路基表面之间存在空气而导致的热量传递损耗。下边界温度设置为

恒温 $-15 \text{ }^\circ\text{C}$,使底部冰层保持冻结状态。

$$T = 2.1 + 15\sin\left(\frac{2\pi}{8760}t + \frac{\pi}{2}\right) \quad (4)$$

图 6 为实际和试验箱内路基表面温度变化曲线。其中“程序温控”是指按照提前设定的温度变化程序调整各时刻的试验温度。可以看出,试验路基表面与实际路基表面的温度变化曲线基本吻合,满足模型试验温度相似准则。试验过程中 0 h 至 43.8 h 为冻结期,43.8 h 至 87.6 h 为融化期,满足冻融时间缩比 $C_t = 100$ 的条件。

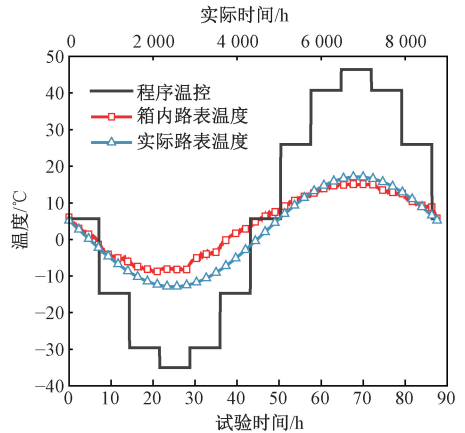


图 6 实际和试验箱内路表温度变化

Figure 6 Temperature variations of the roadbed surface in the field and the test chamber

3 试验结果与分析

3.1 不同试验工况路基温度分布云图

图 7 为一个冻融周期各工况路基土体的温度云图。根据颜色的不同,图 7 中的温度云图可以分为 3 个主要区域,即低温区从 $-12 \text{ }^\circ\text{C}$ 到 $0 \text{ }^\circ\text{C}$,中温区从 $0 \text{ }^\circ\text{C}$ 到 $10 \text{ }^\circ\text{C}$,高温区从 $10 \text{ }^\circ\text{C}$ 到 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 。虚线表示 PU 板的位置。通过路基表面的温度变化判断 0~43.8 h 为冻结期,43.8~87.6 h 为融化期。在冻结期,普通路基低温区的面积大于单、双层 PU 板路基低温区的面积,说明 PU 板减少了路基内部的热量向外扩散,起到了保温的作用。此外,图 7 所示的 $0 \text{ }^\circ\text{C}$ 等温线的深度代表了冻结锋面所在的深度。在冻结期,普通路基的 $0 \text{ }^\circ\text{C}$ 等温线没有呈现闭合形式,整个路基(20 cm 深度)在冻结期都处于冻结状态;单层 PU 板路基的 $0 \text{ }^\circ\text{C}$ 等温线下限在 2 cm 深度,双层 PU 板路基的 $0 \text{ }^\circ\text{C}$ 等温线下限在 8 cm 深度。说明 PU 板可以抬升冻结深度,减少冻害。在融化期,单层 PU 板和双层 PU 板路基表面温度最大值均为 $16 \text{ }^\circ\text{C}$,比普通路基的表面温度最大值高 $4 \text{ }^\circ\text{C}$ 。这是因为热量受到 PU 板的阻碍,无法向下传递,从而在 PU 板上积累,导致此处的温度升高。还可以看出,

在双层PU板路基中,虽然在两层PU板中间存在高温区,但是由于深层PU板的隔热作用,使得其下的路基温度处于中温区。温度都在PU板的位置发生骤变,说明PU层可以拦截外界热量向路基内部的传递,起到隔热的作用。

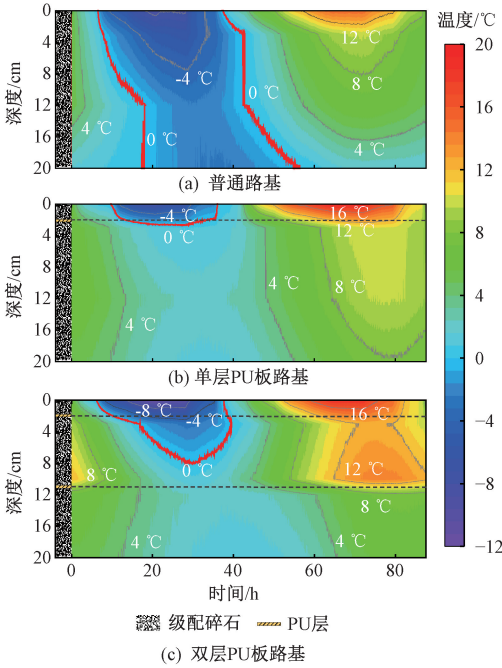


图7 各工况路基温度分布云图

Figure 7 Temperature distribution cloud diagram of each type of roadbed

3.2 不同试验工况路基温度差对比

由于3种工况路基的冻融试验不在同一组试验内展开,因此监测的土壤温度数据不能直接进行比较。需要将每一时间点的土温减去其初始温度,从而获得冻融过程土壤温度的定量变化。

图8分别为3种工况路基的温差变化曲线。可以看出,路基各土层的温度都随时间推移呈规律性波动,且波动符合正弦波的变化规律。温度波动随着土壤深度的增加而逐渐减小,这归因于传递过程中的能量消耗。PU板下土壤温度对冻融的响应较

弱,这是由于PU板对土壤热传导的阻碍作用。此外,图8(c)中的表层土壤温度在68.3 h时达到解冻峰值,20 cm深度处的最高温度出现在78.6 h。这种滞后效应归因于热传导的时间消耗。分析0 cm与3 cm深的土层,普通路基在冻结期和融化期温度最高分别相差3.1℃和5.1℃,单层PU板路基分别相差8.4℃和9.0℃,双层PU板路基分别相差8.4℃和8.6℃。温度差异大的原因是单层PU板和双层PU板路基均在2 cm深的位置铺设了PU板,保温隔热效果显著。此外,10 cm和12 cm深的土层,双层PU板路基在冻结期和融化期温度最高分别相差6℃和2℃。原因是11 cm深也存在一层PU板,这层PU板对热量进一步拦截,起加强隔热的作用。

3.3 不同试验工况热通量的对比

采用热通量对PU层的隔热能力进行更直观描述。热通量是通过单位面积的热流量,定义为土体导热系数和土层垂直温度梯度的乘积。设定路基表面向下的方向为正,热通量大于0则表示热量的传递方向向下。

图9为各工况的热通量变化的对比图,冻结期热通量的值小于0,说明此时热量是向上传递。普通路基热通量绝对值的最大值为23.7 W/m²,是两种PU板路基热通量绝对值最大值(14.0 W/m²)的1.7倍。而且,普通路基的热通量小于0的时长为30 h,另两种PU路基的热通量小于0的时长为40 h,说明PU板不仅能减少热量传递,还能延长路基的冻结过程,减轻融沉病害。单层和双层PU板路基的热通量在冻结期基本重合,说明两种PU板路基在冻结期的保温能力相当。融化期热通量的值均大于0,说明此时热量是向下传递。普通路基的热通量最大值为40.0 W/m²,是单层PU板路基(19.0 W/m²)的2.1倍,是双层PU板路基(14.5 W/m²)的2.8倍,说明PU板作为路基的隔热层,其隔热效果显著,并且双层PU板路基在融化

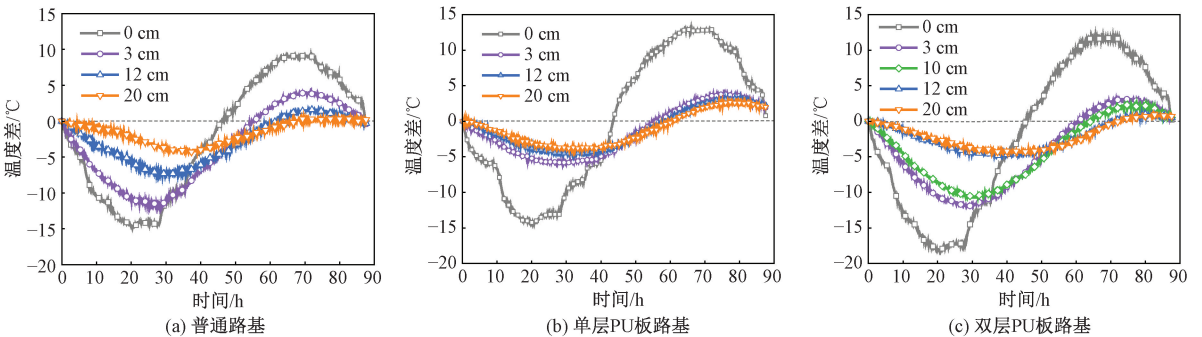


图8 各工况路基温度差对比

Figure 8 Comparison of temperature difference of each type of roadbed

期表现出更优秀的隔热效果。

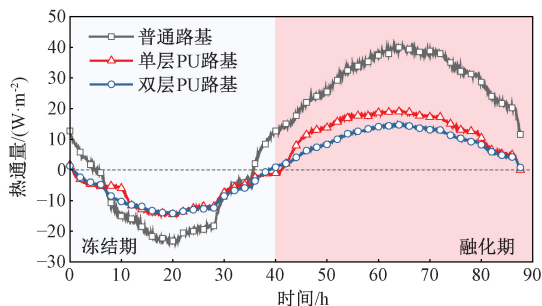


图9 各工况路基热通量对比

Figure 9 Comparison of heat fluxes of each type of roadbed

4 结论

探究了将聚氨酯高聚物材料(PU)应用于深厚含土重冰层冻土路基的隔热结构的可行性,并对PU进行隔热性能试验测定,开展了重冰层冻土路基保温隔热模型试验,得出以下结论。

(1)PU的导热系数与密度呈正相关。同一密度下,PU的导热系数随着冻融循环次数的增加而增大。PU的密度越低,其导热系数受到冻融循环的影响越大。PU的密度越高,其隔热性能越能在多次冻融循环中保持稳定。

(2)冻结时,普通路基的热通量是两种PU板路基的1.7倍;融化时,普通路基的热通量是单层PU板路基的2.1倍,双层PU板路基的2.8倍。PU板在冻结时能防止路基内部的热量向上扩散,融化时拦截热量向下传递,起到保温隔热作用。

(3)PU板可以抬升路基的冻结深度,减少冻胀病害,延长路基的冻结过程,减轻融沉病害。而且在融化期,双层PU板比单层PU板表现出更优秀的隔热效果,多一层PU板可以对热量进一步拦截,起加强隔热的作用。

在实际工程中,若在温度敏感性低的地基上修建路基,首要考虑的是经济效益、成本、时间和人工等因素时,冻土路基保温隔热结构采用单层PU板即可。若在温度敏感性高的地基上(富冰多年冻土、深厚含土重冰层)修建路基,首要关键目的是保持路基的热稳定性和保护下层冻土时,应采用双层PU板保温隔热结构。

冻土路基的冻融过程是复杂的水热耦合过程,在未来的研究中还需进一步探究PU保温隔热路基中水分分布特性,以及水分和温度相互作用的特点。

(本文受到新疆交通建设集团股份有限公司深厚含土重冰层区域公路工程防水防冻隔热关键技术

研究项目(G580-JSZXHT-2020-002)的支持。)

参考文献:

- [1] 谭玲,黄勇,张益,等.新疆典型高山冻土类型快速评判技术研究[J].公路交通技术,2018,34(6):22-29. TAN L, HUANG Y, ZHANG Y, et al. Research on the fast classification technology of typical mountain frozen soil in Xinjiang[J]. Technology of Highway and Transport, 2018, 34(6): 22-29.
- [2] HJORT J, STRELETSKIY D, DORÉ G, et al. Impacts of permafrost degradation on infrastructure [J]. Nature Reviews Earth & Environment, 2022, 3: 24-38.
- [3] 杨平,王岩梓,刁鹏程.上覆荷载对重塑粉质黏土补水冻胀特性影响[J].郑州大学学报(工学版),2022,43(6):83-89. YANG P, WANG Y Z, DIAO P C. Influence of load on frost heaving characteristics of remolded silty clay [J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2022, 43(6): 83-89.
- [4] WANG Q Z, FANG J H, ZHAO X Q, et al. The influence of pavement type on the thermal stability of block-stone embankments in the warm permafrost region [J]. Transportation Geotechnics, 2020, 23: 100334.
- [5] CHEN L, LAI Y M, FORTIER D, et al. Impacts of snow cover on the pattern and velocity of air flow in air convection embankments of sub-Arctic regions [J]. Renewable Energy, 2022, 199: 1033-1046.
- [6] 赵翊婷,吴青柏,侯彦东,等.青藏铁路块碎石护坡路基降温效果分析[J].铁道学报,2022,44(5):132-140. ZHAO H T, WU Q B, HOU Y D, et al. Analysis on cooling effect of embankment with crushed rock and gravel revetment along Qinghai-Tibet Railway [J]. Journal of the China Railway Society, 2022, 44(5): 132-140.
- [7] 栗晓林,马巍,穆彦虎,等.高海拔多年冻土区高速公路分离式通风管路基的降温效果研究[J].岩石力学与工程学报,2022,41(增刊2):3488-3498. LI X L, MA W, MU Y H, et al. Study on the cooling effect of separated duct-ventilated embankments used for the Qinghai-Tibet expressway in high-altitude permafrost zones [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(S2): 3488-3498.
- [8] 宋正民,穆彦虎,马巍,等.高海拔冻土区通风管路基管内风速及影响因素研究[J].冰川冻土,2021,43(4):1111-1120. SONG Z M, MU Y H, MA W, et al. Characteristics and influence factors of wind speed in ventilation duct of ventilation duct embankment in high altitude permafrost regions [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2021,

- 43(4):1111-1120.
- [9] KUZNETSOV G V, PONOMAREV K O, FEOKTISTOV D V, et al. Heat transfer in a two-phase closed thermosyphon working in Polar Regions[J]. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2021, 22: 100846.
- [10] 刘金修, 李泽, 李钰, 等. 多年冻土区热棒路基降温调控效能研究[J]. *公路*, 2021, 66(2): 20-27.
LIU J X, LI Z, LI Y, et al. Research on thermosyphon subgrade cooling regulation efficiency in permafrost regions[J]. *Highway*, 2021, 66(2): 20-27.
- [11] 蔡汉成, 孟进宝, 赵相卿, 等. 基于热量收支平衡原理的多年冻土区热棒路基设计计算方法[J]. *岩土力学*, 2020, 41(11): 3769-3776.
CAI H C, MENG J B, ZHAO X Q, et al. Design method of the thermosyphon embankment in permafrost region based on principle of heat balance[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(11): 3769-3776.
- [12] BAI R Q, ZHANG M Y, WANG J W, et al. Study on the solar albedo characteristics of pavement and embankment slope surfaces in permafrost regions[J]. *Solar Energy*, 2022, 237: 352-364.
- [13] QIN Y H, LI Y P, BAO T. An experimental study of reflective shading devices for cooling roadbeds in permafrost regions[J]. *Solar Energy*, 2020, 205: 135-141.
- [14] 王功博, 钱国玉, 王永. XPS 保温板在高速铁路路基结构防冻胀措施中的应用[J]. *铁道勘察*, 2019, 45(3): 56-60.
WANG G B, QIAN G Y, WANG Y. The application of XPS insulation board in anti-frost heave measures for high-speed railway subgrade structure[J]. *Railway Investigation and Surveying*, 2019, 45(3): 56-60.
- [15] CONG L, YANG F, GUO G H, et al. The use of polyurethane for asphalt pavement engineering applications: a state-of-the-art review[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 225: 1012-1025.
- [16] WANG Z G, WANG C Z, GAO Y B, et al. Porous thermal insulation polyurethane foam materials [J]. *Polymers*, 2023, 15(18): 3818.
- [17] 郭成超, 王超杰, 崔璨. 非水反应高聚物注浆技术在道路养护中的应用[J]. *交通建设与管理*, 2019(3): 112-114.
GUO C C, WANG C J, CUI C. Application of non-water reactive polymer grouting technology in road maintenance [J]. *Transport Construction & Management*, 2019(3): 112-114.
- [18] HWANG B K, KIM S K, KIM J H, et al. Dynamic compressive behavior of rigid polyurethane foam with various densities under different temperatures [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2020, 180: 105657.
- [19] 方宏远, 董智峰, 薛冰寒, 等. 高聚物注浆修复的面板堤坝探地雷达波场特征分析[J]. *郑州大学学报(工学版)*, 2024, 45(3): 1-6, 13.
FANG H Y, DONG Z F, XUE B H, et al. Analysis of ground penetrating radar wave field characteristics of dam face disengaging repaired by polymer grouting [J]. *Zhengzhou University (Engineering Science)*, 2024, 45(3): 1-6, 13.
- [20] BIAN X C, DUAN X, LI W, et al. Track settlement restoration of ballastless high-speed railway using polyurethane grouting: full-scale model testing [J]. *Transportation Geotechnics*, 2021, 26: 100381.
- [21] FAROOQ M A, NIMBALKAR S. Static and cyclic performance of polyurethane foam adhesive bound soil-rubber mixtures under drained conditions [J]. *Acta Geotechnica*, 2024, 19(2): 561-589.
- [22] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 建筑用绝热制品 抗冻融性能的测定: GB/T 33011—2016 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2016: 12.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Thermal insulating products for building applications—determination of freeze-thaw resistance: GB/T 33011—2016 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2016: 12.
- [23] 秦修云. 聚氨酯高聚物注浆材料的制备及性能研究 [J]. *功能材料*, 2023, 54(11): 11134-11138.
QIN X Y. Preparation and properties of polyurethane polymeric grouting materials [J]. *Journal of Functional Materials*, 2023, 54(11): 11134-11138.
- [24] 刘志强, 马巍, 周国庆, 等. 纵向布管调控冻土路基温度场的模拟试验研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(11): 1827-1831.
LIU Z Q, MA W, ZHOU G Q, et al. Simulated experiment study on the temperature field of frozen subgrade modulated by horizontal pipes [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(11): 1827-1831.
- [25] 罗晓晓, 俞祁浩, 马勤国, 等. 基于附面层理论的路基热边界模型 [J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2019, 50(3): 658-668.
LUO X X, YU Q H, MA Q G, et al. A prediction model on thermal boundary condition of embankment based on boundary layer theory [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2019, 50(3): 658-668.

Optimization and Scheduling of Integrated Energy System in a Park with the Use of Natural Gas Pressure Energy

LI Hongwei¹, CHEN Weifa¹, YANG Yang², WAN Chongshan¹, LIU Lingyuan¹

(1. School of Electrical Engineering and Information, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China; 2. PetroChina Kunlun Gas Co., Ltd. Beijing Branch, Beijing 100000, China)

Abstract: In order to make effective use of the pressure energy in the transmission and regulation process of natural gas networks, a integrated energy system scheme involving the comprehensive use of power generation and cold energy of the natural gas pressure was proposed. Firstly, considering that natural gas pressure energy could be used with power generation and refrigeration, a model of electricity-heat-gas-cold integrated energy system containing natural gas pressure energy was established. Secondly, an economic optimization scheduling model with the minimum daily operating cost as the objective function was proposed including the cost of power purchase, gas purchase and equipment operation and maintenance, etc. Finally, the mixed-integer nonlinear optimization model was solved based on MATLAB platform combined with CPLEX solver. The economy and effectiveness of the proposed model were verified with the operation data of a real industrial park. The results showed that the operating cost of the system could be reduced by 74.9% compared with no natural gas pressure energy utilization, and the system could obtain a good economic benefit.

Keywords: natural gas pressure energy; integrated energy systems; power generation; refrigeration; economic optimization; coordinated scheduling

(上接第 106 页)

Experimental on Thermal Insulation Capacity of Polymers in Roadbed of Deep Soil-bearing Heavy Ice Layer

GUO Chengchao¹, DANG Peng², YIMING Mahemuti², LIU Jiangang², WU Dong², WANG He³, CAO Dingfeng¹

(1. School of Civil Engineering, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519082, China; 2. Xinjiang Communications Construction Group Co., Ltd., Urumqi 830016, China; 3. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: The deep soil-bearing heavy ice layer is the extreme adverse geology, on which the construction of roadbed will be exposed to serious frost heave, and thawing and settlement disease, threatening the safe operation of vehicles. Polyurethane polymer (PU) material was investigated as a thermal insulation layer for roadbeds to prevent freeze-thaw damage. The thermal insulation capability test of PU was conducted to analyze the effect of density and number of freeze-thaw cycles on the thermal conductivity of PU. The model test of thermal insulation of heavy ice layer frozen soil roadbed was carried out. The temperature distribution characteristics of ordinary roadbed, single-layer PU board roadbed and double-layer PU board roadbed during freeze-thaw process were investigated and the thermal insulation effect of PU board was described quantitatively. The results showed that the thermal conductivity of PU was positively correlated with its own density and the number of freeze-thaw cycles. The lower the density of PU, the more its thermal conductivity was affected by freeze-thaw cycles. The higher the density of PU, the more its thermal insulation performance could remain stable in multiple freeze-thaw cycles. The heat flux of ordinary roadbed was 1.7 times of single-layer PU board roadbed and double-layer PU board roadbed in the freezing process, and 2.1 times of single-layer PU board roadbed and 2.8 times of double-layer PU board roadbed in the thawing process. PU board had thermal insulation ability, which could lift the freezing depth of the roadbed and reduce frost heave disease. The existence of PU could also prolong the freezing process of the roadbed and avoid thawing and settlement disease. Double-layer PU board showed better thermal insulation effect than single-layer PU board.

Keywords: roads & highways; deep soil-bearing heavy ice layer; polyurethane polymer; thermal insulation structure; model test