

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2018.1187

WANG Jiwei, ZHANG Mingyi, XIA Minghai, et al. Heat-reflective technology and its application in the thermal protection of roads in permafrost regions[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2020, 42(1):282-294. [王继伟, 张明义, 夏明海, 等. 热反射技术及其在多年冻土区道路热保护中的应用[J]. 冰川冻土, 2020, 42(1):282-294.]

热反射技术及其在多年冻土区道路热保护中的应用

王继伟^{1,3}, 张明义¹, 夏明海², 马学良², 刘国军^{1,4}, 游志浪^{1,3}

(1. 中国科学院 西北生态环境资源研究院 冻土工程国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 2. 新疆伊犁哈萨克自治州奎屯河流域水利工程灌溉管理处, 新疆 奎屯 833200; 3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 中国科学院 西北生态环境资源研究院 青藏高原北麓河冻土工程与环境综合观测研究站, 甘肃 兰州 730000)

摘 要: 热反射技术是一项被广泛应用于建筑物及道路表面降温的主动冷却技术, 国内外很少对此技术在多年冻土区道路热保护方面进行研究。针对多年冻土区气候及工程环境特点, 综述了热反射技术在冻土区道路中的应用现状和研究成果, 阐述了热反射涂层的基本成分、反射机理和测试方法, 分析了路用热反射涂层的材料性能、反射效果和路用性能, 简要介绍了热反射涂层在路基边坡应用方面的研究进展。指出在当前条件下利用热反射涂层保护多年冻土区道路所遇到的问题及可行的解决方案, 并在此基础上提出了今后研究的重点: 从材料选择、理论分析和试验方法入手, 对路用热反射涂层的颜色、反射性能、路用性能和区域适用性进行改进和研究, 加强多年冻土区道路热反射涂层的野外试验和分析, 深入研究复杂气候和工程环境下的热反射涂层性能。

关键词: 热反射涂层; 辐射; 多年冻土区道路; 沥青路面; 路基边坡

中图分类号: TQ630.7⁹; P642.14 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2020)01-0282-13

0 引言

随着《国家高速公路网规划》^[1]的逐步实施, 以及冻土区经济的不断发展和寒区工程的建设, 寒区公路高等级化已势在必行, 路面材料将以沥青路面为主。然而, 沥青路面存在明显的吸热、聚热和储热效应, 其表面温度远高于气温, 这会增加路面车辙、路基沉降和其他路基病害的程度和发生频率。在全球气候变暖和工程扰动的背景下, 多年冻土及冻土路基的稳定性受到影响^[2-4]。以在建中的青藏高速公路为例, 其具有“宽、黑、厚”等特点, 面临高等级公路黑色沥青路面温度高、路基宽度大、对沉降和不均匀变形要求高等问题, 现有技术可能无法确保路基的稳定性^[5-6]。此外, 机场道面作为寒区交通工程的重要组成部分, 其下部多年冻土也存在不同程度的退化和不均匀沉降问题。因此, 如何

强化道路和道面冷却效果, 提高整体及其下部多年冻土稳定性, 成为当前亟待解决的新难题^[7]。

总结近年来热反射涂层技术在降温方面的研究成果发现, 该技术在建筑物表面降温方面的研究成果较多^[8], 在冷路面方面的研究也取得了长足发展^[9], 而对寒区道路和道面降温方面的研究仍处于初步探索阶段^[10]。一方面是因为冻土路基长期受到车辆荷载和极端气候环境的作用, 对材料的性能要求非常苛刻; 另一方面是因为路用涂层材料对颜色和使用性能的要求异于其他领域, 涂层材料的选择受到极大制约。

热反射涂层技术的理论与试验结果表明, 随着材料性能的提升和完善, 该技术可作为一种实用手段用于冻土区道路和道面的降温。在这样的背景下, 本文主要介绍了路用热反射涂层的基本反

收稿日期: 2018-11-01; 修订日期: 2019-02-28

基金项目: 国家杰出青年科学基金项目(41825015); 冻土工程国家重点实验室自主研究项目(SKLFSE-ZT-23); 中国科学院前沿科学重点研究项目(QYZDY-SSW-DQC015)资助

作者简介: 王继伟(1992-), 男, 内蒙古包头人, 2015年在内蒙古大学获学士学位, 现为中国科学院西北生态环境资源研究院在读博士研究生, 从事冻土与寒区工程研究。E-mail: wangjiwei@lzb.ac.cn

通信作者: 张明义, 研究员, 从事冻土与寒区工程研究。E-mail: myzhang@lzb.ac.cn.

射原理、降温性能、材料性能和路用性能,分析了其在冻土区道路、道面和路基边坡中应用的研究现状和不足,并在此基础上提出了热反射涂层技术在冻土区道路热保护中应用的研究重点,并对今后的研究工作进行了展望。

1 热反射涂层的基本原理

1.1 热反射涂层的组成及其传热机理

热反射涂层材料是指能够涂覆在物体外表面,对太阳短波辐射具有选择性吸收和高反射率,自身具有高红外发射率,可以降低物体表面及内部温度的一种功能型材料^[11]。近年来,为了提高涂层的降温效果和综合性能,隔热型、辐射型与反射型涂层材料的结合已成为路用热反射涂层材料研发的主流趋势^[12]。这种材料主要由基料树脂、功能填料(颜填料及功能型填料)和助剂^[13]等组成,而且根据服役环境和被涂覆物体表面材料的不同存在较大差异。

太阳辐射到达地球表面的光谱范围为 0.25 ~ 2.5 μm ,属于短波辐射,在光学大气质量为 1.5 时,可见光区(波长 0.38 ~ 0.76 μm)和近红外区(波长 0.76 ~ 2.5 μm)辐射分别占太阳辐射总能量的 43% 和 52%,是太阳光能量的主要组成部分^[14]。热反射涂层在太阳辐射某波长范围内的平均反射率可由下式进行计算。

$$r_{\lambda_0 \rightarrow \lambda_1} = \left(\int_{\lambda_0}^{\lambda_1} r(\lambda) i(\lambda) d\lambda \right) / \int_{\lambda_0}^{\lambda_1} i(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

式中: λ_0 和 λ_1 为太阳光谱的波长范围; $r(\lambda)$ 为涂层的光谱反射率; $i(\lambda)$ 为太阳光谱辐照度(单位面积单位波长的太阳辐射功率)。

根据式(1)可以计算涂层对不同太阳波段的反射率,实现涂层在保持深色的前提下仍具备高反射率。此外,紫外线辐射(波长 0.25 ~ 0.38 μm)约占太阳辐射总能量的 5%,式(1)的计算结果也可用于评价涂层的抗紫外线能力,进而可改善涂层的耐候性能。

路用热反射涂层的基本组成及降温机理如图 1 所示,其热反射性能不仅与材料组成有关,而且受被涂覆材料表面结构、反射率、透明度等因素的影响较大。图 1(b)为沥青混合料上的热反射涂层特写。对于密实型的沥青混合料,涂层一般只粘附于混合料表层,但对于骨架空隙型的混合料而言,涂层还会从混合料间的空隙渗入结构内部,这不仅增加了涂层成本,还会影响原有结构的部分性能,比

如渗水性能、蒸发换热性能等。因此,在沥青路面上使用热反射涂层前,应对沥青混合料的表面结构特性进行分析。图 1(a)为图 1(b)中热反射涂层的局部放大图。沥青路面为不透明材料,所以一般采用单层热反射涂层方案,即所有功能型粒子与基料混合成为单一涂层;当涂层厚度不能满足工程需求,或者涂层降温效果不能满足预定要求时,可采用双层或多层的涂层方案来提升涂层性能^[15]。涂层内部材料的功能各不相同,其中的微纳米颜填料能够有效地将太阳短波辐射以相同的波长反射出去,空心微珠等材料可以有效地减少热量向道路内部传递,而二氧化硅等具有高发射率的材料可以将道路表面的热量以红外长波辐射的形式向外发射,进一步实现降温。

热反射涂层的光热效应机理可通过低斜率道路表面在稳态下的热平衡关系进行分析^[16]。

$$(1 - \rho) I = L + G + C + H + E \quad (2)$$

式中: ρ 为道路表面的反射率,取值范围为 [0, 1]; I 为太阳辐照度; L 为道路表面的净长波辐射量,受涂层材料发射率 ε 的影响; G 为道路表面的热储存量,受涂层和道路材料性能的共同影响; C 为热传导量; H 为道路表面与空气间的对流换热量; E 为道路表面的蒸发换热量。

涂层会减少沥青道路表面的孔隙数量以及表面与空气间的接触面积,从而降低蒸发换热量。由式(2)可知,在表面材料导热系数较小且对流换热不明显的情况下,路面平衡温度主要受表面反射率 ρ 和发射率 ε 的影响,热反射涂层的应用可以有效提高以上两个数值,进而降低路面温度和进入路基内部的热量。太阳辐射在一天正午时最强,涂层的反射性能起主导作用,降温效果最好;夜晚缺少太阳辐射,涂层的红外发射性能起主导作用,可将白天吸收的热量和道路内部多余的热量以热辐射的形式向外界输送。

ASTM 标准提供了一个同时考虑涂层反射率和发射率的参数——太阳能反射指数(solar reflectance index, SRI)^[17],该指数通过比较待测涂层表面温度与标准黑色材料($\rho=0.05$, $\varepsilon=0.90$)和标准白色材料($\rho=0.80$, $\varepsilon=0.90$)间的差距,综合反映出涂层材料的吸热或降温效果。其表达式为

$$SRI = \frac{T_{\text{black}} - T_{\text{surface}}}{T_{\text{black}} - T_{\text{white}}} \times 100 \quad (3)$$

式中: T_{black} 、 T_{white} 和 T_{surface} 分别为相同条件下标准黑板、标准白板 and 待测涂层材料表面的稳态温度。

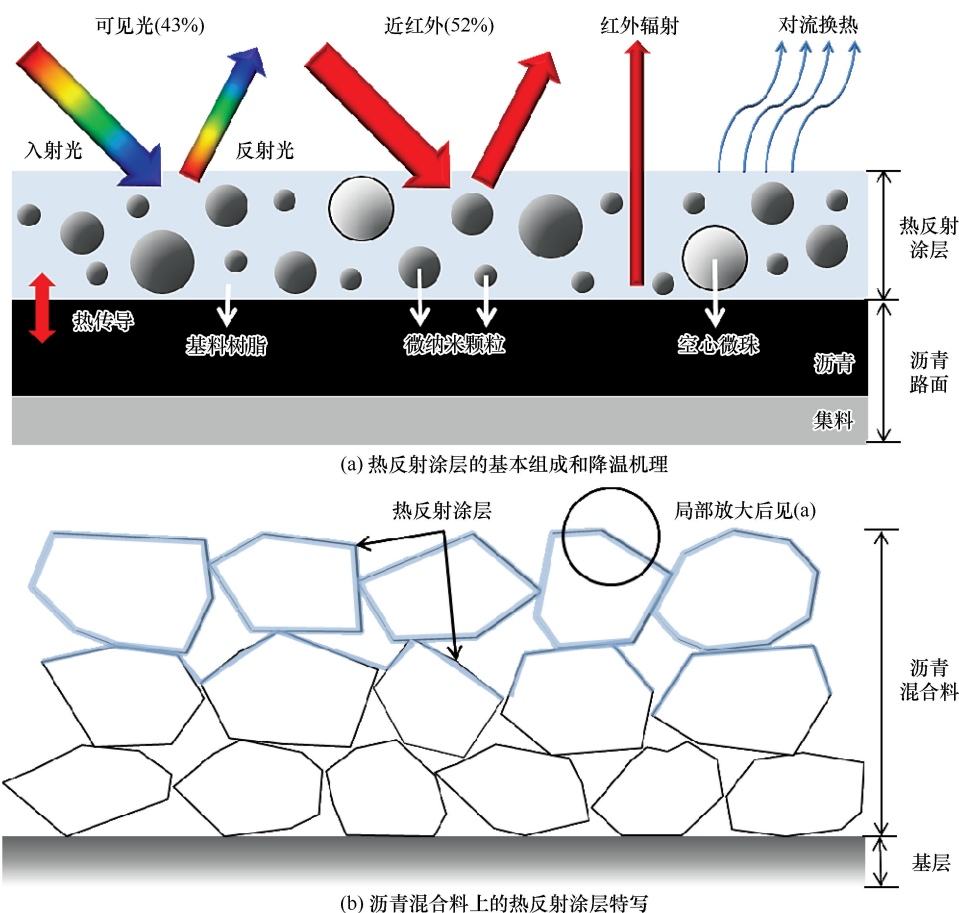


图 1 路用热反射涂层的基本组成和降温机理及实例

Fig. 1 Basic composition and cooling mechanism of heat-reflective coating for road (a), and a close-up of the heat-reflecting coating on an asphalt mixture (b)

根据定义可知,高性能热反射涂层材料的SRI数值可能超过100,而传统深色涂层材料和吸热材料的SRI数值极低,甚至接近于0。冻土区道路的光热环境较为复杂,而道路建设又改变了原有地表的植被状况和热流平衡状态,因此SRI并不能完全描述热反射涂层材料的降温效果。相关试验和数值研究表明,涂层材料的降温效果不仅受其服役地区复杂气候环境的影响,如太阳辐射的光谱特性、环境温湿度和风速等,还受到影响涂层自身性能的因素影响,如紫外线强度、降水量、污染物成分、外界荷载、冻融循环、干湿循环和基层材料稳定性等^[18-19]。此外,一些学者也对影响沥青路面热反射涂层平衡温度的内部因素^[20-21]和外部因素^[22]进行了研究。

1.2 涂层反射率与发射率的测试方法

太阳光反射率是评价涂层热反射性能和降温效果的重要参数,它被定义为物体表面反射辐射量与接收入射太阳总辐射量的比值。常见的反射率

测试方法可分为实验室测量、实地测量和遥感测量等^[23]。冻土区道路具有特殊的结构形式^[24],因此遥感测量方法并不能准确地描述路面和路基边坡反射率及其变化规律。实验室测量系统主要由积分球反射仪、半球反射仪、热腔反射仪和抛物镜反射仪等组成,以上仪器可以用于测量待测物体表面的光谱反射率,这有利于热反射涂层的组成成分优化和性能分析^[25]。然而,实验室测量方法一般要求待测物体表面平整光滑,性质均一,对于表面粗糙以及待测面积较大的冻土区道路而言并不适用。Levinson等^[26]对几种室内外测量太阳光反射率标准方法的测试原理和适用范围进行了总结。经过试验和研究发现,野外测量方法的精度受环境因素影响较大^[27]。为了解决该问题,Sailor等^[28]、Mei等^[29]、Qin等^[30]在理论和试验方法上进行了改进,提出了测量有限区域反射率的新方法。为了进一步提高野外测量精度,笔者认为应将理论方法和数值方法相结合,精确计算目标区域到达辐射接收器

的视角因子,并对外加设备和目标区域阴影造成的误差进行分析。随着热反射涂层材料组成的不断优化,红外发射率成为评价涂层降温性能的另一个重要指标。它指物体辐射能力与相同温度下黑体辐射能力之比,热反射涂层的红外发射率越大,其将热量辐射出去的能力越强,通常的测量方法可参照标准 ASTM C1371-15^[31]和 ASTM E903-12^[32]。

2 热反射技术在寒区路面中的应用

2.1 路用热反射涂层材料性能

2.1.1 基料性能

对于寒区而言,特别是青藏高原多年冻土区,其气候环境多变,日平均气温较低,且日较差较大,太阳辐射尤其是紫外线辐射强烈^[33]。基料树脂作为涂层的主要成膜物质,要求其具备高透明度、高折射比、太阳辐射吸收小以及耐候性能强等特点,因此组成结构中应避免使用含 $\text{O}=\text{C}-$ 、 $-\text{C}-$ 、 $\text{O}-\text{C}-$ 、 $-\text{OH}$ 等吸能基团^[34]和耐紫外线差的苯环^[35]。20 世纪 80 年代,青藏公路浅色路面研究组对无规聚丙烯混合料进行了室内和野外试验研究,发现该种材料的路用性能与沥青混合料没有太大差异,低温性能等甚至优于沥青,且具有较高的反射率,可代替沥青在低温下施工。由青藏公路五道梁低温断面的监测数据可知,涂覆白色油漆的沥青路面反射效果最好,路基下 4 m 处的地温比沥青路面下降约 1 °C,冻土上限提升了约 1.5 m,无规聚丙烯混合料浅色路面的冻土上限提升了约 0.5 m^[36]。鉴于浅色路面取得的良好降温效果,在 1985 年,无规聚丙烯混合料浅色路面在青藏公路斜水河至五道梁路段铺筑并通车^[37]。这是青藏线以及全国第一次大规模铺筑热反射路面,但当时的技术并不成熟,可用的高性能材料有限,导致了涂层耐久性差、道路眩光等问题,从而限制了其在多年冻土区道路工程中的应用。近年来,为了提高路用热反射涂层的降温效果和服役寿命,学者对涂层基料成分进行了大量研究。冯德成等^[38]采用硅丙乳液制备的涂料成本较低,高速路面的降温效果较好,但耐污损和抗滑性能较差,使用寿命较短,适用于预防车辙病害的养护措施。张鑫^[20]、张静^[39]采用体质颜料来改善硅丙乳液的性能,根据冻土区哈阿高速公路试验路段的实测数据,当太阳辐射为 $980 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$,气温为 31.0 °C 时,热反射涂层沥青路面温度仅为 37.1 °C,比沥青路面低了约 12.8 °C。

王赫^[40]发现丙烯酸树脂比环氧树脂的反射率高,在北京季节冻土区试验路段的测试结果表明,与传统沥青路面相比涂层路面降温约 5 °C,而且在使用一年后该涂层仍能保持降温效果。李文珍^[41]、Cao 等^[42]研发的不饱和聚酯涂料可降低夏季路面温度约 10 °C,然而涂层在使用一段时间后出现剥落、变色等现象,降温效果也有所下降。随后,Cao 等^[43]研制的含氟丙烯酸酯乳液涂层的耐污性和降温效果较好,然而其粘附性和耐磨性却较差。为了改善上述问题,Zheng 等^[44]研制了改性双酚 A 型环氧树脂涂层,其抗滑性能好,颜色种类较多,西安试验路面温度降低了约 10 °C。以上研究为多年冻土区道路热反射涂层基料的选择提供了理论依据和参考,而且基料性能的改善可以有效提高道路表面涂层的降温效果和使用寿命,减少热量向路基内部和道路下部输送,进而能提高冻土区道路的热稳定性和服役年限。

2.1.2 功能填料性能

功能填料自身的反射率、发射率、粒径与用量是决定路用热反射涂层降温性能的主要因素,而其与基料之间的折射比和相容性是影响涂层反射效果和成膜性质的其他重要因素^[45]。因此,确定合适的功能填料及材料配比是研发路用热反射涂层材料首先考虑的问题。

颜填料的折光指数是反映其太阳光反射性能的主要指标之一。金红石型 TiO_2 是最常见的高遮盖力填料,其折光系数可达 2.80^[13],与常见基料间的折射比也较高。因此,早期的路用热反射涂层多采用白色 TiO_2 和其他浅色颜填料。为了提高寒区机场道路的稳定性和安全性,提出了许多解决方案,如采用保温隔热板、提高道路等级、开挖富冰土、更换路基填料、修补路面、提高道路表面反射率等,其中浅色热反射涂层路面是较为简单有效的方法^[46]。20 世纪 50 年代,美国首次采用白色热反射涂料来减缓图勒(Thule)机场道路下部富冰多年冻土的退化,研究发现,新建涂层路面的反射率约为 0.84,其下部冻土最大融化深度与传统深色路面相比减少了约 0.7 m,降温效果显著。然而,经过一年的风化和磨损,路面反射率降低至 0.58,路面涂层还降低了道路原本的制动性能,并增加了维护成本,这些都限制了该项技术在机场道面上的推广和应用^[47]。为了研究浅色热反射涂层对多年冻土路基降温效果的影响,美国在费尔班克斯(Fair-

banks)公路和阿拉斯加机场高速修建了浅色涂层试验断面,结果表明,涂层可降低路面平均温度约 1°C ^[48],融化深度较传统路面(约为3.8 m)减少了30%^[49],该类涂层在使用防滑颗粒后仍存在制动问题^[50],但这些研究成果为后续工作的开展提供了宝贵的数据资料。Bjella^[51]根据图勒机场的监测数据提出了路面反射率与融深间的经验公式,并建议用隔热板和超挖富冰冻土的方法代替热反射涂层方案,然而这些方法施工量较大且不易实现。Molmann等^[46]对挪威斯瓦尔巴(Svalbard)机场下部多年冻土的融深进行了监测,结果表明,白色涂层路面有效减少融深约0.4 m。该研究还指出,仅依靠热反射涂层并不能彻底解决该地区多年冻土的冻胀融沉问题,但可以大幅减缓冻土的融化速度,因为该区域冻土的含冰量较大,冻融病害明显,需要采取综合保护措施。

高折光指数的颜填料多为白色或浅色,在太阳辐射强烈的地区(如青藏高原多年冻土区)使用时,路面会产生强烈的眩光问题,因此需要加入一定的着色颜料或冷颜料以缓解驾驶员的视觉疲劳。美国干粉颜料制造商协会按照颜料的化学成分和晶体结构将冷颜料分为14种,使用冷颜料不仅能提高路用热反射涂层的舒适度和美观性,还可增强涂层材料的耐候性和附着力,进而提高其使用寿命。Gonome等^[45,52]利用无机纳米CuO颜料研制出高性能深色热反射涂层材料,此类无机热反射颜料具有较高的近红外反射率,使沥青路面在保持深色的前提下依然拥有较高的热反射性能,同时可以解决浅色颜料在不同太阳光谱下反射率差异较大的问题。对于部分深色有机颜料而言,其涂层组成结构和反射原理与无机颜料有所不同,涂层整体反射率取决于底层涂层或基层材料的反射率、涂层厚度以及通过涂层的光线在某波长范围内被悬浮颜料颗粒吸收(转化为热)和反向反射的程度^[15]。这些有机颜料并不具备高近红外反射性能,而是对近红外波段的辐射呈现出近乎透明的特性,即绝大部分近红外辐射可以在这类物质中透射,如有机花黑,常应用于热反射涂层的顶层,当使用高近红外反射颜料(如 TiO_2)作为底涂层时^[53],涂层整体的热反射系数可达0.45,然而这类材料的价格偏高,不适用于路面涂层材料的制备。

颜料的粒径、体积浓度、晶体结构、涂层结构以及厚度等对涂层的反射效果也至关重要,严格控

制这些因素可实现对涂层热反射性能及多年冻土路基降温的精确调控^[45]。当颜料粒径达到微纳米级别时,其性能会发生本质变化,杜磊^[54]对微米和纳米级 TiO_2 的光谱反射率进行了研究,发现锐钛型 TiO_2 和金红石型 TiO_2 最佳反射率对应的粒径分别为 $0.29 \sim 0.59 \mu\text{m}$ 和 $0.35 \sim 1.13 \mu\text{m}$ 。由于晶体结构的不同,金红石型比锐钛型表现出更好的降温效果^[39],不同晶型和不同粒径的微粒按照一定比例混合可进一步提高涂层的反射率^[55]。Gonome等^[52]对粒径分别为 $0.05 \mu\text{m}$ 、 $0.89 \mu\text{m}$ 和 $3.0 \mu\text{m}$ 的CuO颜料的反射性能进行了分析,发现粒径为 $0.89 \mu\text{m}$ 时反射率最高,试验测得的反射率与射线发射模型中辐射单元法的计算结果相比偏低。因此,可以利用辐射单元法初步确定反射率最高的功能型材料粒径范围,研发和生产对应粒径的微纳米功能材料,最后通过试验测试确定最优的材料方案。空心微珠等作为功能填料的另一重要组分,其应用不仅减少了颜填料的用料,还可提高涂层的隔热能力,因此,研发复合型功能颜填料是路用涂层材料的一个重要研究方向^[56]。

2.1.3 路面组成结构对涂层性能的影响

沥青混凝土路面不同的组成结构具有不同的粗糙程度和孔隙大小,这对涂层用量及反射效果有不同程度的影响^[57]。在相同条件下,孔隙小的沥青路面反射率较高^[58-59],而孔隙越大,达到相同降温效果所需的涂层材料越多,孔隙内的多重反射效应越明显,这会降低表面宏观反射率^[60]和降温效果。Cao等^[11]发现随着涂料用量的增加,不同沥青混合料表面的降温效果均先急速增加后逐渐趋于稳定,降温温差从高至低依次为AC(密级配沥青混凝土混合料)、SMA(沥青玛蹄脂碎石混合料)以及OG-FC(开级配沥青混合料)路面,不同结构的降温差异可达 7°C 。涂层在粗糙路面上应用时,降温效果会降低,但其降温性能仍要优于传统路用材料和部分透水路面材料。此外,王良艳^[61]对比了热反射涂料、浅色耐磨碎石和多孔集料对钢桥面层的降温效果后发现,热反射涂料的降温效果最佳。青藏高原多年冻土区高等级公路多采用AC型沥青混凝土^[62],上述研究表明,该类路面对涂层反射率和降温效果的影响较小,热反射涂层可以更好地发挥原有性能。

2.2 路用热反射涂层降温效果

对于多年冻土区道路而言,沥青路面的吸热、

储热和聚热效应会加剧路基病害的程度和发生频率,通过冷却路基和降低路表温度可有效缓解上述问题^[63],而提高路面和路基边坡反射率是重要的实现途径^[64]。新建沥青混凝土路面反射率约为0.05~0.10,在夏季其表面最高温度比气温高约40~50℃^[65],这增加了热量向路基内部的传输,虽然在使用5年后其平均反射率可提高 0.12 ± 0.03 ^[66],但是这并不能从根本上达到降温目的。铺筑浅色碎石封层^[67]和薄层水泥面层^[68]是提升沥青路面反射率的常见方法,虽然具有一定的降温效果和路用性能,但应用于多年冻土区道路仍存在许多不足之处^[69]。首先,浅色碎石封层路面要求集料拥有较高反射率和红外发射率,对于缺少该类型石料的地区而言,特别是青藏高原多年冻土区,这无疑提高了加工和运输成本。其次,碎石封层路面反射率受沥青和浅色集料共同影响,如何在保证路用性能的同时调控路面反射率成为一项难题。薄层水泥混凝土修补技术一般适用于底层沥青路面破损程度较小的轻载道路,对高等级公路而言并不适用^[70]。

与上述两种方式相比,热反射涂层技术可通过调控材料组成和配比,达到提升反射率和涂层性能的目的,从而满足不同工程的降温需求和服役性能。日本在路用热反射涂层方面的研究起步较早且较为成熟,研发的路用涂层凉顶(cooltop)降温可达10℃,同时根据试验研究结果编制形成了行业技术指南^[71],截至2010年,日本遮热性路面占其全国总铺装路面面积的54%^[72]。相关研究结果表明^[73-74],与普通材料相比,路用热反射涂层在相同颜色和太阳辐射下拥有更高的反射率和红外发射性能,且深色热反射涂层反射率的提升幅度最大,降温效果可达15~17℃^[57,75]。Pomerantz等^[65]根据野外试验结果指出,路面反射率每提高0.1可降低道路表面温度4℃或路面以上2m处温度2.4℃,这说明热反射涂层不仅可以降低路基内部温度,还可以降低路基近地面的环境空气温度,这对保护多年冻土区道路的热稳定性是有利的。

为了综合分析热反射涂层对多年冻土区道路降温效果的影响,研究人员提出了不同的评价指标、测量方法和计算方法。Richard等^[76]发现 n 因子与反射率存在近似的线性关系,热反射涂层可以降低冻土区路面的融化 n 因子,对冻结 n 因子影响较小。Dumais等^[77]提出了预测冻土热反射路面温度的计算模型,并给出风速、气温等参数与路面热反

射率间的关系。Qin等^[78]提出了针对冷却路面的热量传输模型,结果表明,路基内部日累积热储存大约占路面吸收太阳辐射的5%。Jørgensen^[79]利用GPR(ground penetrating radar)方法对机场下部冻土上限进行分析后发现,热反射涂层可减少融深约0.6m。热反射涂层可有效减小冻土区道路温度及其下部多年冻土的融化深度和活动层厚度,然而其路用性能也是影响涂层热保护效果的重要因素^[80]。

2.3 路用热反射涂层路用性能

冻土区沥青路面在涂覆热反射涂层后,其表面的抗滑性、耐磨性、抗冻融循环性(抗温变性)、耐久性和耐老化性等路用性能会发生改变。为了保证涂层的使用寿命、降温效果和安全性,应对涂层路用性能进行系统研究。

冻土区路面常结冰结霜,且降雨后路面湿滑,为了保证交通工具的制动性和行驶安全,要求路面有较高的抗滑性能。研究表明^[81],随涂层用料的增加,沥青路面的构造深度将减小,抗滑性能会降低,在使用防滑颗粒后,路面摩擦系数会大幅增高并满足规范^[82]要求。路用涂层防滑材料主要由聚氨酯树脂颗粒等合成有机材料以及石英砂等无机材料组成^[83-84],其对涂层反射率和降温效果的影响较小^[85],而科学安排防滑颗粒的施工顺序可提高涂层耐久性^[20]。此外,增加涂层表面的粗糙程度和构造深度也是提升抗滑性能的有效方法,具体措施有涂层表面刻槽和添加纤维物质等,但不能忽略表面粗糙度对反射率的影响。

青藏高原多年冻土区道路交通量大,车辆载荷繁重,这会加速涂层的磨耗和脱落,进而影响涂层的反射性能和降温效果。路用热反射涂层的耐磨耗性能可利用室内自制加速磨光仪^[81]、室外自然磨耗试验^[86]和室外加速磨耗试验^[87]进行评估。为了减少涂层的开裂和剥落,Sha等^[10]建议采用提高冻土区沥青路面刚度或者减少沥青与基料间的刚度差距来改善这一问题。本研究认为,可以采用石油衍生物代替传统沥青,如沥青脱色得到的无色胶结料、改性沥青和彩色沥青芳烃油,并结合相应的粘结剂、改性剂、浅色集料以及高反射颜填料,来提高涂层的热反射和耐磨耗性能。此外,石油衍生物也可以替代传统基料树脂作为粘结剂,用于增强涂层的抗滑和耐磨耗性能以及涂层与沥青路面间的协同变形能力。

抗冻融循环性能反映了热反射涂层在冻融循

环作用下,涂层表面不产生粉化、脱落、裂缝等现象的能力。由于涂层直接暴露在复杂的大气环境中,要经历冻融循环过程,尤其在昼夜温差较大的青藏高原多年冻土区,该性能显得更为重要。相关试验表明,纯丙烯酸树脂较好地符合规范要求,而环氧树脂则出现了开裂、剥落等现象^[40],氟碳树脂虽然具有良好的耐温变性能,但是较高的造价限制了其应用。根据沥青路面受荷载能力的不同,提高涂层与沥青路面间的变形协调性可以增加抗温变能力^[85],采用石油衍生物是一种可行方案。

热反射涂层老化的原因主要是光氧化,其速度主要受辐射、水分、氧气、温湿度等因素影响。青藏高原太阳辐射强度和总量较大,其中高强的紫外线辐射是影响老化的重要因素,因为高能紫外线光子会破坏许多基料中的化学键,从而导致聚合物链的断裂、交联以及化学和机械性能的改变,这将加速涂层的老化过程^[88-89],通常采用自然曝晒老化法和人工加速老化法对该性能进行评价^[90]。Takebayashi等^[91]对不同涂层进行了自然和人工加速老化试验,结果显示,涂层在使用数月内就会退化,反射率在使用数年后一般会降低0.10~0.25。唐伯明等^[92]对不饱和聚酯涂层进行了为期一年的自然老化试验,结果显示,降温效果下降了6℃,通过红外光谱仪测得涂层内部羟基、羰基以及碳氧双键等吸能基团随老化时间逐渐增多,此外涂层表面也出现了不同程度的开裂和剥落。添加光稳定剂是减缓涂层老化的一种有效方案^[93],使用紫外线吸收剂亦是延长涂层寿命的可行方案^[34],常见的无机紫外线吸收颜料是炭黑和TiO₂,但炭黑会吸收大量的太阳辐射,这不符合路用热反射涂层的性能要求。

对于路用热反射涂层的其他路用性能,研究人员也做了相关工作。结果表明,试件表面构造深度的减小会降低涂层的耐污性,透光率小且厚度大的油类污染物对涂层降温性能的影响较大^[94],采用自清洁型涂层可以提高其耐污能力^[95];沥青路面高温稳定性随涂层用量的增加,先增加后减小^[96]。李文珍^[41]、邓琰荣^[86]对路用涂层的耐水、耐油污及耐化学制品等性能进行了研究。

此外,施工步骤和工艺对涂层的路用性能也有显著影响。路面在涂覆热反射涂层前应先修复路面病害,对原有道路进行养护,并对路面进行清洁和除尘处理。热反射涂层由于材料组成和服役环

境的不同,其施工温度存在较大差异,施工前应根据试验结果进行测定,对于特殊情况还应对涂层进行加热处理。根据室内试验研究,一些溶剂型涂层材料需要在较高温度下才能充分反应,在多年冻土区施工时应保证一定的气温和路面温度,且避免在雨雪天施工。此外,根据涂层种类的不同,在开放交通前应预留足够的固化和养生时间^[97]。对于涂覆工程量较大的情况,还应使用或研发专用的热反射涂层施工作业设备以提高效率。

3 热反射技术在冻土路基边坡中的应用

多年冻土路基受坡度、坡向、辐射等因素的影响,其两侧边坡的热边界条件存在较大差异,随路基高度的增加,这种差异会更加明显,从而加剧了阴阳坡效应^[98]。为了缓解阴阳坡效应带来的不良影响,研究人员采用复合工程措施来改善传统单一措施对消除阴阳坡效应的不足^[99-101]。以上方法均取得了一定效果,为了完善多年冻土路基边坡降温方法和理论,Qin等^[27]提出利用热反射涂层来缓解阴阳坡效应,并提出了一种测量多年冻土路基模型反射率的新方法。根据试验结果,路基比原地表吸收更多的太阳辐射;边坡反射率与路基整体反射率间存在近似的线性关系,提高向阳面边坡反射率可提高路基整体反射率约0.2,提高低坡度路基边坡反射率将更有效地提高路基整体反射率^[102]。随后,Qin等^[103]提出了一种考虑边坡与相邻地表间多重反射效应的路基辐射传输模型,该模型考虑了太阳方位、路基走向、地面及路基边坡反射率等因素对路基宏观反射率的影响,试验结果表明,正午时路基整体反射率最低,多重反射效应会增加路基对太阳辐射的吸收量,但与路基吸收的总太阳辐射相比该数值可忽略不计,这说明提高冻土路基反射率可有效减少其对太阳辐射的吸收^[104]。此外,提高遮阳板正面反射率并降低其背面发射率^[105]以及提高块石路基边坡反射率^[106]也是保护冻土路基稳定性的新方法。然而,使用涂层降温后应确保路基表面温度场分布不产生较大差异,根据Reckard^[50]在阿拉斯加加热反射试验断面的监测结果,由于路面与边坡温度场分布不均,路肩处产生“边缘效应”,降低了窄幅路基整体的降温效果,并造成了横向不均匀沉降和纵向裂缝等病害。本研究认为,精确测量冻土路基边坡反射率是计算和调控边坡热平衡状态的前提,因此边坡反射率的测量理论和方法是今

后研究的一个重点内容。同时,冻土路基边坡没有受到车辆的直接磨耗,可将涂层直接应用在水泥砂浆或水泥棉加固后的边坡上,并结合路基吸收的太阳辐射、能量平衡关系和其他冷却路基方案,实现对多年冻土路基精确控温和强化降温的目的。

4 结论与展望

热反射涂层技术是降低路面温度、减少路面病害和缓解城市热岛效应的有效方法,许多国家已出台相应的规范,并将其成功应用在实际道路工程中。然而,该方法在多年冻土区道路热保护方面的研究较少,涂层材料的研发以及热反射技术的相关理论与试验多针对于高温和低纬度地区,以及城市的建筑和道路工程,涂层材料在不同服役环境下的性能是亟待研究的课题。借鉴热反射技术在道路降温方面的成功经验,在多年冻土区道路工程中应用热反射技术具有可行性和广阔的发展空间。本文基于路用热反射涂层技术及其在多年冻土区道路中应用方面的研究现状和不足,提出了今后的研究重点:

(1) 材料方面

研发高性能近红外反射颜填料,提高纳米技术和其他新技术的应用,增强路面热反射性能和耐久性,解决涂层路面眩光问题;针对冻土区特殊的气候环境和工程特性,开发抗温变、抗紫外和耐老化性能优异的基料树脂以及可替代沥青材料的石油衍生物;开展涂层抗滑技术及其添加材料方面的研究,进而提高路用涂层的实用性和安全性。

(2) 理论方面

传统理论在精确计算路用热反射涂层性能方面具有一定的局限性,需引入新的理论方法来揭示路用热反射涂层的微观辐射理论,指导多年冻土区路用热反射涂层的研发和应用;完善多年冻土路基边坡反射率测量理论,对热反射涂层应用在多年冻土路基边坡,特别在块、碎石路基边坡中的降温效果和机理进行深入研究,为减缓冻土路基阴阳坡效应提供新的技术支持;完善多年冻土路基光热效应机理,建立涂层微观辐射理论与路基宏观辐射理论间的联系,利用路用热反射涂层对冻土路基进行精细化控温;结合热反射技术与其他主动冷却路基结构,建立新型综合路基热保护技术,提高多年冻土区道路的整体热稳定性。

(3) 试验方面

目前,路用热反射涂层性能方面的研究主要依据建筑热反射涂层材料的相关规范和标准,随着路用涂层在城市和冻土区道路中的应用和普及,需开发新的测试技术和规范标准对涂层的降温性能和路用性能进行系统评价。针对多年冻土区自然和工程环境特点,研发可模拟太阳辐射、温变、降水、风速、车辆荷载等要素的综合试验测试平台,以及专门测试路用热反射涂层耐磨耗、抗冲击、抗滑、耐老化、耐污、抗温变、抗开裂、抗剥落等性能的专业仪器设备,并开展涂层与道路表面间粘附性和变形协调性能方面的试验研究。此外,应开展野外实地监测,将室内试验和野外试验结果进行对比和评价,建立两者间的联系。同时,增加多年冻土区道路热反射涂层的现场试验监测,对不同气候和复杂工程环境下路用热反射涂层的性能进行深入研究,为今后路用热反射涂层在多年冻土区道路工程中的应用及推广提供数据积累和理论支撑。

(4) 工程应用方面

充分发挥热反射涂层技术的优势,进一步拓展其在寒区工程建设中的应用,如在寒区水库坝体上使用高性能涂层材料,用于减少混凝土构件因温变产生的裂缝,同时涂层的热保护和水保护性能还可以减缓冻融/干湿循环作用对水库坝体的破坏,并对高性能涂层在寒区特定工程和环境作用下的热保护机制进行深入研究。

参考文献(References):

- [1] Ministry of Transport of the People's Republic of China. National expressway network plan[J]. Guangdong Highway Survey and Design, 2005(4): 31-39. [中华人民共和国交通部. 国家高速公路网规划[J]. 广东公路勘察设计, 2005(4): 31-39.]
- [2] Jin Huijun, Yu Qihao, Wang Shaoling, et al. Changes in permafrost environments along the Qinghai-Tibet engineering corridor induced by anthropogenic activities and climate warming[J]. Cold Regions Science and Technology, 2008, 53(3): 317-333.
- [3] Tai Bowen, Liu Jianjun, Wang Tengfei, et al. Thermal characteristics and declining permafrost table beneath three cooling embankments in warm permafrost regions[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 123: 435-447.
- [4] Wu Jinqian, 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.]
- [5] Yuan Chang, Yu Qihao, You Yanhui, et al. Formation mechanism of longitudinal cracks in expressway embankments with in-

- clined thermosyphons in warm and ice-rich permafrost regions [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2018, 133: 21 – 32.
- [6] Liu Minghao, Ma Wei, Niu Fujun, et al. Thermal performance of a novel crushed-rock embankment structure for expressway in permafrost regions [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, 127: 1178 – 1188.
- [7] Zhang Mingyi, Lai Yuanming, Wu Qingbai, 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.
- [8] Synnefa A, Santamouris M, Apostolakis K. On the development, optical properties and thermal performance of cool colored coatings for the urban environment [J]. *Solar Energy*, 2007, 81(4): 488 – 497.
- [9] Qin Yinghong. A review on the development of cool pavements to mitigate urban heat island effect [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, 52: 445 – 459.
- [10] Sha Aimin, Liu Zhuangzhuang, Tang Kun, et al. Solar heating reflective coating layer (SHRCL) to cool the asphalt pavement surface [J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 139: 355 – 364.
- [11] Cao Xuejuan, Tang Boming, Zou Xiaoling, et al. Analysis on the cooling effect of a heat-reflective coating for asphalt pavement [J]. *Road Materials and Pavement Design*, 2015, 16(3): 716 – 726.
- [12] Du Mengjuan. The research and application of the reflective nano-materials and thermal insulating coatings [D]. Shanghai: Shanghai Normal University, 2013. [杜孟娟. 热反射纳米材料与隔热涂料的研究及应用 [D]. 上海: 上海师范大学, 2013.]
- [13] Xu Yongxiang, Li Yunde, Shi Hua, et al. Present situation and progress of solar heat reflective thermal insulating coatings [J]. *Paint and Coatings Industry*, 2010(1): 70 – 74. [徐永祥, 李运德, 师华, 等. 太阳热反射隔热涂料研究进展 [J]. 涂料工业, 2010(1): 70 – 74.]
- [14] Standard tables for reference solar spectral irradiance at air mass 1.5: direct normal and hemispherical for a 37 degree tilted surface: ASTM G173 [S]. West Conshohocken, PA, USA: American Society for Testing and Materials, 2008.
- [15] Levinson R, Berdahl P, Akbari H, et al. Methods of creating solar-reflective nonwhite surfaces and their application to residential roofing materials [J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2007, 91(4): 304 – 314.
- [16] Pisello A L. State of the art on the development of cool coatings for buildings and cities [J]. *Solar Energy*, 2017, 144: 660 – 680.
- [17] Standard practice for calculating solar reflectance index of horizontal and low-sloped opaque surfaces: ASTM E1980-11 [S]. West Conshohocken, PA, USA: American Society for Testing and Materials, 2011.
- [18] Levinson R, Berdahl P, Berhe A A, et al. Effects of soiling and cleaning on the reflectance and solar heat gain of a light-colored roofing membrane [J]. *Atmospheric Environment*, 2005, 39(40): 7807 – 7824.
- [19] Levinson R, Akbari H, Berdahl P, et al. A novel technique for the production of cool colored concrete tile and asphalt shingle roofing products [J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2010, 94(6): 946 – 954.
- [20] Zhang Xin. Research on heat reflection and thermal resistance technology of asphalt pavement cooling mechanism and its application [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011. [张鑫. 沥青路面热反射与热阻技术降温机理与应用研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.]
- [21] Chen Suming. Cooling mechanism analysis of heat-reflective coating for asphalt pavement [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2012. [陈肃明. 太阳热反射沥青路面降温机理分析 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2012.]
- [22] Liang Manjie. Asphalt pavement light thermal reaction mechanism and heat reflection coating engineering research [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006. [梁满杰. 沥青路面光热效应机理及热反射涂层技术研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.]
- [23] Despini F, Ferrari C, Bigi A, et al. Correlation between remote sensing data and ground based measurements for solar reflectance retrieving [J]. *Energy and Buildings*, 2016, 114: 227 – 233.
- [24] 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.]
- [25] Fernández-García A, Sutter F, Martínez-Arcos L, et al. Equipment and methods for measuring reflectance of concentrating solar reflector materials [J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2017, 167: 28 – 52.
- [26] Levinson R, Akbari H, Berdahl P. Measuring solar reflectance: part II: review of practical methods [J]. *Solar Energy*, 2010, 84(9): 1745 – 1759.
- [27] Qin Yinghong, Tan Kanghao, Liang Jia. Theory and procedure for measuring the albedo of a roadway embankment [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2016, 126: 30 – 35.
- [28] Sailor D J, Resh K, Segura D. Field measurement of albedo for limited extent test surfaces [J]. *Solar Energy*, 2006, 80(5): 589 – 599.
- [29] Mei Guoxiong, Wu Bo, Ma Shaokun, et al. A simplified method for the solar reflectance of a finite surface in field [J]. *Measurement*, 2017, 110: 211 – 216.
- [30] Qin Yinghong, He Haosong. A new simplified method for measuring the albedo of limited extent targets [J]. *Solar Energy*, 2017, 157: 1047 – 1055.
- [31] Standard test method for determination of emittance of materials near room temperature using portable emissometers: ASTM C1371-15 [S]. West Conshohocken, PA, USA: American Society for Testing and Materials, 2015.
- [32] Standard test method for solar absorptance, reflectance, and transmittance of materials using integrating spheres: ASTM E903-12 [S]. West Conshohocken, PA, USA: American Society for Testing and Materials, 2012.
- [33] Du Jun, Jian Jun, Hong Jianchang, et al. Response of seasonal frozen soil to climate change on Tibet region from 1961 to 2010 [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2012, 34(3): 512 – 521. [杜军, 建军, 洪健昌, 等. 1961 – 2010 年西藏季节性冻土对气候变化的响应 [J]. 冰川冻土, 2012, 34(3): 512 – 521.]
- [34] Berdahl P, Akbari H, Levinson R, et al. Weathering of roofing materials: an overview [J]. *Construction and Building Materials*, 2008, 22(4): 423 – 433.
- [35] Lee M J, Lee K G, Seo W D. Analyses on performances of heat and multilayer reflection insulators [J]. *Journal of Central South University*, 2012, 19(6): 1645 – 1656.
- [36] Chen Ji, Sheng Yu, Cheng Guodong. Discussion on protection measures of permafrost under the action of engineering from the point of earth surface energy balance equation in Qinghai-Tibet

- an Plateau[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2006, 28(2): 223 – 228. [陈继, 盛煜, 程国栋. 从地表能量平衡各分量特点论青藏高原多年冻土工程中的冻土保护措施[J]. 冰川冻土, 2006, 28(2): 223 – 228.]
- [37] Huang Hairong. The first light color pavement of the Qinghai-Tibet Highway is open to traffic[J]. *Highway*, 1985(10): 38. [黄海荣. 青藏公路第一段浅色路面通车[J]. 公路, 1985(10): 38.]
- [38] Feng Decheng, Zhang Xin. Development of heat reflection coating and observation of its road performance[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2010, 27(10): 17 – 20. [冯德成, 张鑫. 热反射涂层开发及路用性能观测研究[J]. 公路交通科技, 2010, 27(10): 17 – 20.]
- [39] Zhang Jing. Asphalt pavement thermal resistance and heat reflection technology application and research[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008. [张静. 沥青路面热阻及热反射技术应用研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.]
- [40] Wang He. Properties and application of solar-reflective coating for asphalt pavement[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013. [王赫. 沥青路面热反射涂层性能及应用研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.]
- [41] Li Wenzhen. Preparation of unsaturated polyester heat reflective coating[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2011. [李文珍. 沥青路面不饱和聚酯降温涂料的研发[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2011.]
- [42] Cao Xuejuan, Tang Boming, Zhu Hongzhou, et al. Cooling principle analyses and performance evaluation of heat-reflective coating for asphalt pavement[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2010, 23(7): 1067 – 1075.
- [43] Cao Xuejuan, Tang Boming, Zhu Hongzhou, et al. Preparation of fluorinated acrylate heat reflective coating for pavement and evaluation of its cooling effect[C/OL]// *Transportation Research Board 93rd Annual Meeting*. Washington, D. C.: Transportation Research Board, 2014 [2019-02-16]. <https://trid.trb.org/view.aspx?id=1288276>.
- [44] Zheng Mulian, Han Lili, Wang Fei, et al. Comparison and analysis on heat reflective coating for asphalt pavement based on cooling effect and anti-skid performance[J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 93: 1197 – 1205.
- [45] Gonome H, Baneshi M, Okajima J, et al. Control of thermal barrier performance by optimized nanoparticle size and experimental evaluation using a solar simulator[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2014, 149: 81 – 89.
- [46] Molmann T, Bergheim B, Valeriote M. Svalbard airport geotechnical study: engineering methodology and results[C]// *Proceedings of the 7th International Conference on Permafrost*. Yellowknife, NT, Canada: Collection Nordicana, 1998: 745 – 755.
- [47] Fulwider C W, Aitken G W. Effect of surface color on thaw penetration beneath an asphalt surface in the Arctic[C]// *Proceedings of the International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements*. Ann Arbor, Michigan, USA: University of Michigan, 1962: 605 – 610.
- [48] Esch D C. Roads and airfield design for permafrost conditions[C]// *Vinson T S. Roads and airfield in cold regions*. New York: ASCE, 1996: 121 – 149.
- [49] Berg R L, Aitken G W. Some passive methods of controlling geocryological conditions in roadway construction[C]// *Proceedings of the 2nd International Conference on Permafrost: the North American contributions*. Washington, D. C.: National Academy of Sciences, 1973: 581 – 586.
- [50] Reckard M K. White paint for highway thaw settlement control: FHWA/RD-85-161985[R]. Juneau, Alaska, USA: Alaska Department of Transportation and Public Facilities, 1985.
- [51] Bjella K. An investigation into a white painted airfield on permafrost: Thule Air Base, Greenland[C]// *Proceedings of the 10th International Symposium on Cold Regions Development*. Anchorage, Alaska, USA: ASCE, 2013: 565 – 575.
- [52] Gonome H, Baneshi M, Okajima J, et al. Controlling the radiative properties of cool black-color coatings pigmented with CuO submicron particles[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2014, 132: 90 – 98.
- [53] Brady R F, Jr, Wake L V. Principles and formulations for organic coatings with tailored infrared properties[J]. *Progress in Organic Coatings*, 1992, 20: 1 – 25.
- [54] Du Lei. Study on preparation of solar reflective coating filled with TiO₂[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2012. [杜磊. TiO₂太阳热反射涂料的制备研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2012.]
- [55] Wang He, Zhong Jing, Feng Decheng, et al. Nanoparticles-modified polymer-based solar-reflective coating as a cooling overlay for asphalt pavement[J]. *International Journal of Smart and Nano Materials*, 2013, 4(2): 102 – 111.
- [56] Hu Yan, Zhong Hong, Wang Yuanhao, et al. Development of an antimony doped Tin Oxide/TiO₂ double-layers coated HGM: a high reflectivity and low transmittance building thermal conservation material[J]. *Energy Procedia*, 2017, 105: 4128 – 4132.
- [57] Kinouchi T, Yoshinaka T, Fukae N, et al. Development of cool pavement with dark colored high albedo coating[C/OL]// *Proceedings of the 5th Conference for the Urban Environment*. Boston, Massachusetts, USA: American Meteorological Society, 2004 [2019-02-16]. <https://ams.confex.com/ams/AFAPURBBIO/webprogram/Paper79804.html>.
- [58] Li Hui. Pavement materials for heat island mitigation: design and management strategies[M]. Oxford, UK: Elsevier, 2015.
- [59] Li Hui, Harvey J, Kendall A. Field measurement of albedo for different land cover materials and effects on thermal performance[J]. *Building and Environment*, 2013, 59: 536 – 546.
- [60] Berdahl P, Akbari H, Jacobs J, et al. Surface roughness effects on the solar reflectance of cool asphalt shingles[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2008, 92(4): 482 – 489.
- [61] Wang Liangyan. Research on the technology of reducing the operating temperature for steel bridge deck pavement layer[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2009. [王良艳. 降低钢桥面铺装层的使用温度技术研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2009.]
- [62] Zhu Dongpeng, Wang Shuangjie, Si Wei, et al. Study on temperature field of high-grade highway pavement structure in Qinghai-Tibet Plateau permafrost regions[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2013, 30(8): 29 – 36. [朱东鹏, 汪双杰, 司伟, 等. 青藏高原多年冻土区高等级公路路面结构温度场研究[J]. 公路交通科技, 2013, 30(8): 29 – 36.]
- [63] Cheng Guodong, Wu Qingbai, Ma Wei. Engineering effect of active cooling subgrade of the Qinghai-Tibet Railway[J]. *Science in China: Series E Technological Sciences*, 2009, 39(1): 16 – 22. [程国栋, 吴青柏, 马巍. 青藏铁路主动冷却路基的工程效果[J]. 中国科学: E辑 技术科学, 2009, 39

- (1): 16 – 22.]
- [64] Zhang Xingui, Yan Li'e, Qin Yinghong. Regulating solar absorptance for remedying thermal asymmetry of a roadway embankment[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, 121: 64 – 71.
- [65] Pomerantz M, Akbari H, Harvey J T. Cooler reflective pavements give benefits beyond energy savings: durability and illumination [Z/OL]. [2019-02-15]. https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc717174/m2/1/high_res_d/789110.pdf
- [66] Synnefa A, Dandou A, Santamouris M, et al. On the use of cool materials as a heat island mitigation strategy[J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2008, 47(11): 2846 – 2856.
- [67] Doré G, Zubeck H K. Cold regions pavement engineering [M]. New York: McGraw Hill, 2009.
- [68] Mack J, Hawbaker L, Cole L. Ultrathin whitetopping: state-of-the-practice for thin concrete overlays of asphalt[J]. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1998, 1610(1): 39 – 43.
- [69] Guirguis M, Buss A. Performance evaluation of emulsion and hot asphalt cement chip seal pavements[J/OL]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2017, 29(11) [2019-02-15]. <https://ascelibrary.org/doi/full/10.1061/%28ASCE%29MT.1943-5533.0002057>.
- [70] Mampearachchi W K, Kosgolla J V, Tia M. Feasibility of whitetopping pavements for resurfacing thin asphalt pavements [J]. *Journal of the National Science Foundation of Sri Lanka*, 2012, 40(4): 293 – 302.
- [71] Iwama M, Yoshinaka T, Omoto S, et al. Use of solar heat-blocking pavement technology for mitigation of urban heat [C/OL]// *Proceedings of the 24th World Road Congress*. Paris: World Road Association, 2011 [2019-02-16]. <https://trid.trb.org/view/1290477>.
- [72] Cheng Cheng. Preparation and performance evaluation of solar heat reflective coating on asphalt pavement [D]. Xi'an: Chang'an University, 2012. [程承. 热反射型沥青路面涂料制备与性能评价[D]. 西安: 长安大学, 2012.]
- [73] Synnefa A, Karlessi T, Gaitani N, et al. Experimental testing of cool colored thin layer asphalt and estimation of its potential to improve the urban microclimate[J]. *Building and Environment*, 2011, 46(1): 38 – 44.
- [74] Synnefa A, Santamouris M, Livada I. A study of the thermal performance of reflective coatings for the urban environment [J]. *Solar Energy*, 2006, 80(8): 968 – 981.
- [75] Wan W C, Hien W N, Ping T P, et al. A study on the effectiveness of heat mitigating pavement coatings in Singapore [Z/OL]. [2019-02-15]. <https://www.coolrooftoolkit.org/wp-content/uploads/2012/05/Cool-Pavement-Singapore.pdf>.
- [76] Richard C, Doré G, Lemieux C, et al. Albedo of pavement surfacing materials: in situ measurements [C]// *Proceedings of the 16th International Conference on Cold Regions Engineering*. Reston, VA, USA: American Society of Civil Engineers, 2015: 181 – 192.
- [77] Dumais S, Doré G. An albedo based model for the calculation of pavement surface temperatures in permafrost regions [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2016, 123: 44 – 52.
- [78] Qin Yinghong, Hiller J E. Understanding pavement-surface energy balance and its implications on cool pavement development [J]. *Energy and Buildings*, 2014, 85: 389 – 399.
- [79] Jørgensen A S. Assessment of three mitigation techniques for permafrost protection: roads and airfields in the Arctic [D]. Copenhagen, Denmark: Technical University of Denmark, 2009.
- [80] Beaulac I, Doré G. Permafrost degradation and adaptations of airfields and access roads Nunavik, Quebec, Canada [C/OL]// *Annual Conference and Exhibition of the Transportation Association of Canada*. Ottawa, Canada: Transportation Association of Canada, 2006 [2019-02-16]. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.577.6650&rep=rep1&type=pdf>.
- [81] Cao Xuejuan, Tang Boming, Zhu Hongzhou. Study on performance of heat-reflective coat of lowering asphalt pavement temperature [J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science)*, 2010, 29(3): 391 – 393. [曹雪娟, 唐伯明, 朱洪洲. 降低沥青路面温度的热反射涂层性能研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2010, 29(3): 391 – 393.]
- [82] Department of Transportation. Highway Research Institute. Field test methods of subgrade and pavement for highway engineering: JTG E60-2008 [S]. Beijing: China Communications Press, 2008. [交通部公路科学研究院. 公路路基路面现场测试规程: JTG E60-2008[S]. 北京: 人民交通出版社, 2008.]
- [83] Zheng Mulian, He Litao, Gao Xuan, et al. Analysis of heat-reflective coating property for asphalt pavement based on cooling function [J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2013, 13(5): 10 – 16. [郑木莲, 何利涛, 高璇, 等. 基于降温功能的沥青路面热反射涂层性能分析[J]. 交通运输工程学报, 2013, 13(5): 10 – 16.]
- [84] Li Wenzhen, Li Liang, Shi Fei, et al. Research and development of unsaturated polyester temperature decreasing coatings of asphalt pavement [J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science)*, 2010, 29(6): 916 – 918. [李文珍, 李亮, 石飞, 等. 沥青路面不饱和聚酯降温涂料的研制[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2010, 29(6): 916 – 918.]
- [85] Wang Wei. Research on performance and application of heat-reflective coating for asphalt pavement [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2011. [王伟. 沥青路面太阳热反射涂层性能及应用研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2011.]
- [86] Deng Yanrong. Study on the composition design and pavement performance of solar heat-reflective coatings of asphalt pavement [D]. Xi'an: Chang'an University, 2012. [邓琰荣. 沥青路面太阳热反射涂层组成设计及路用性能研究[D]. 西安: 长安大学, 2012.]
- [87] Kawakami A, Kubo K. Accelerated loading tests on durability of cool pavement in PWRI [C/OL]// *Proceedings of the 3rd International Conference on Accelerated Pavement Testing*. Washington, D. C.: Transportation Research Board, 2008 [2019-02-16]. <https://www.docin.com/p-1464095941.html>.
- [88] Lu Yanli. Ageing mechanisms and influencing factors for organic coatings used in plateau environment [J]. *Paint and Coatings Industry*, 2012, 42(4): 12 – 16. [卢言利. 有机涂层高原环境影响参数分析及老化机理研究[J]. 涂料工业, 2012, 42(4): 12 – 16.]
- [89] Karlessi T, Santamouris M, Apostolakis K, et al. Development and testing of thermochromic coatings for buildings and urban structures [J]. *Solar Energy*, 2009, 83(4): 538 – 551.
- [90] Du Junli, Li Huaming. Causes of coating film ageing and methods for evaluating them [J]. *Modern Paint and Finishing*, 2008, 11(4): 38 – 42. [杜君俐, 李华明. 涂料的老化及试验[J]. 现代涂料与涂装, 2008, 11(4): 38 – 42.]
- [91] Takebayashi H, Miki K, Sakai K, et al. Experimental examination of solar reflectance of high-reflectance paint in Japan with natural and accelerated aging [J]. *Energy and Buildings*,

- 2016, 114: 173 – 179.
- [92] Tang Boming, Yuan Ying, Cao Xuejuan, et al. Research on ageing process and mechanism of heat-reflective coating of asphalt pavement [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2015, 34(3): 47 – 51. [唐伯明, 袁颖, 曹雪娟, 等. 沥青路面热反射涂料老化规律及其机理探讨[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2015, 34(3): 47 – 51.]
- [93] Huang Yun. Preparation and properties of ultraviolet protective coatings for asphalt pavement [J]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2011. [黄芸. 沥青路面紫外防护涂料的制备与性能研究[J]. 武汉: 武汉理工大学, 2011.]
- [94] Tang Boming, Ding Yongjie, Cao Xuejuan, et al. Effects of roadway contaminants on cooling performance of heat-reflective asphalt pavement [J]. Journal of Building Materials, 2012, 15(6): 793 – 797. [唐伯明, 丁勇杰, 曹雪娟, 等. 路面污染物对热反射沥青路面降温效果的影响[J]. 建筑材料学报, 2012, 15(6): 793 – 797.]
- [95] Aoyama T, Sonoda T, Nakanishi Y, et al. Study on aging of solar reflectance of the self-cleaning high reflectance coating [J]. Energy and Buildings, 2017, 157: 92 – 100.
- [96] Sun Xiaolong, Wang Chaohui, Zhang Honghua, et al. High temperature stability performance of asphalt road cooling coatings based on road wheel tracking test [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2016, 36(4): 18 – 25. [孙晓龙, 王朝辉, 张洪华, 等. 负重轮碾压的路用降温涂层高温稳定性能[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2016, 36(4): 18 – 25.]
- [97] Wang Wei, Tang Boming, Shi Fei, et al. Brief analysis of asphalt concrete pavement construction technology of heat-reflective coating [J]. Highway, 2010(8): 75 – 79. [王伟, 唐伯明, 石飞, 等. 浅析沥青混凝土路面热反射涂层施工工艺[J]. 公路, 2010(8): 75 – 79.]
- [98] Chou Yaling, Cao Wei, Zhang Bo. Study on embankment stability based on sunny-shady effect in permafrost region [M]. Beijing: China Communications Press, 2014. [丑亚玲, 曹伟, 张波. 基于阴阳坡效应的多年冻土区路基稳定性研究[M]. 北京: 人民交通出版社, 2014.]
- [99] Lai Yuanming, Zhang Shujuan, Zhang Luxin, et al. Adjusting temperature distribution under the south and north slopes of embankment in permafrost regions by the ripped-rock revetment [J]. Cold Regions Science and Technology, 2004, 39(1): 67 – 79.
- [100] Pei Wansheng, Zhang Mingyi, Li Shuangyang, et al. Geotemperature control performance of two-phase closed thermosyphons in the shady and sunny slopes of an embankment in a permafrost region [J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 112: 986 – 998.
- [101] Yu Qihao, Pan Xicai, Cheng Guodong, et al. Experimental study on the cooling process of shading board put on an embankment slope in permafrost regions [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2007, 29(2): 299 – 305. [俞祁浩, 潘喜才, 程国栋, 等. 多年冻土区路基边坡遮阳板降温过程试验研究[J]. 冰川冻土, 2007, 29(2): 299 – 305.]
- [102] Qin Yinghong, Liang Jia, Luo Zhenxian, et al. Increasing the southern side-slope albedo remedies thermal asymmetry of cold-region roadway embankments [J]. Cold Regions Science and Technology, 2016, 123: 115 – 120.
- [103] Qin Yinghong, Huang He, Ying Jingwei, et al. Simulation of short-wave solar radiative transfer across a roadway embankment [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2017, 108: 332 – 340.
- [104] Qin Yinghong, Long Xiangru, Ma Xiaojie, et al. Theoretical models for the solar absorptivity of a roadway embankment [J]. Cold Regions Science and Technology, 2017, 137: 30 – 35.
- [105] Qin Yinghong, Tan Kanghao, Liang Jia. Shading boards with smaller lower-surface thermal emissivity perform better cooling effect [J]. Cold Regions Science and Technology, 2015, 120: 30 – 34.
- [106] Qin Yinghong, Tan Kanghao, Yang Haifeng, et al. The albedo of crushed-rock layers and its implication to cool roadbeds in permafrost regions [J]. Cold Regions Science and Technology, 2016, 128: 32 – 37.

Heat-reflective technology and its application in the thermal protection of roads in permafrost regions

WANG Jiwei^{1,3}, ZHANG Mingyi¹, XIA Minghai², MA Xueliang²,
LIU Guojun^{1,4}, YOU Zhilang^{1,3}

(1. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2. Kuytun River Basin Irrigation Department of Water Conservancy Engineering of Ili Kazakh Autonomous Prefecture, Kuytun 833200, Xinjiang, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. Beiluhe Observation and Research Station of Frozen Soil Engineering and Environment, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Heat-reflective technology is widely used for effectively cooling buildings and road surfaces. Few studies have been conducted on the thermal protection of roads in permafrost regions. Based on the characteristics of climate and engineering environment in permafrost regions, this paper reviews the application and research progress of heat-reflective technology in permafrost roads. The basic compositions, heat-reflective mechanisms and testing methods of heat-reflective coatings are introduced. Meanwhile, the material property, heat-reflective performance and pavement performance of the pavement coatings are emphatically analyzed. The applications of heat-reflective coatings on embankment slopes are briefly discussed. Finally, it is pointed out that the problems encountered in the use of heat-reflective coatings to protect roads in permafrost regions under current conditions. On this basis, the focus of future research is put forward: started with material selection, theoretical analysis and test methods, improve the color, cooling performance, pavement performance and regional applicability of heat-reflective coatings, enhance the field tests of heat-reflective coatings in permafrost regions, study the coating performance under complex climate and real engineering environments.

Key words: heat-reflective coating; radiation; roads in permafrost regions; asphalt pavement; embankment slope

(责任编辑: 周成林; 编辑: 武俊杰)