

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2019.09.003

基于反射率的路面降温机理及其影响因素研究综述

潘述平¹, 孙斌祥^{1,2}, 詹培敏¹, 陈晓¹, 苗佳琪¹

(1. 绍兴文理学院 土木工程学院, 浙江 绍兴 312000; 2. 绍兴文理学院 元培学院, 浙江 绍兴 312000)

摘要: 传统的路面热惯性较大, 吸热、储热能力强, 加剧了城市热岛效应的发展。近年, 使用冷路面技术降低城市热岛效应的研究不断增加。基于路面反射率的冷路面技术, 分析了反射路面的降温机理及其对室外热环境的影响。分析了太阳辐射峰值、面层材料、热反射涂层、面层材料含水量及城市构造这5种因素对路面温度的影响。结果表明: 太阳辐射峰值随季节呈规律性变化, 由于峰值对日最高温度的作用效果不同, 使路面夏季降温效果明显优于冬季, 既满足夏季降温又降低对冬季路面的不利影响; 面层材料对路面温度的作用效果与材料的性能、骨料颜色及路面龄期密切相关; 热反射涂层在颜料中添加高折光率材料, 通过反射太阳辐射降低路面太阳辐射的吸收量, 从而降低路面热量的积累, 颜色越浅反射效果越明显, 考虑路面低温对冬季路用性能的不利影响, 在路面材料中添加可逆热变色微胶囊, 考虑其经济性及光稳定性并未广泛应用; 由于水分子对太阳辐射的吸收程度不同, 随着面层材料含水量的增加, 太阳反射率呈降低趋势, 但可为蒸发散热提供源动力; 根据城市构造分析, 高宽比小于1的峡谷降温效果较好。虽然该5种因素对反射率的影响程度不同, 但都不同程度地达到路面降温效果。同时, 针对路面反射率现阶段研究的工程应用进行了阐述。

关键词: 道路工程; 反射率; 综述; 路面温度; 降温效果; 影响因素

中图分类号: U416.2

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268(2019)09-0014-10

Overview of Studies on Pavement Cooling Mechanism and Its Influencing Factors Based on Reflectance

PAN Shu-ping¹, SUN Bin-xiang^{1,2}, ZHAN Pei-min¹, CHEN Xiao¹, MIAO Jia-qi¹

(1. School of Civil Engineering, Shaoxing University, Shaoxing Zhejiang 312000, China;

2. Yuanpei College, Shaoxing University, Shaoxing Zhejiang 312000, China)

Abstract: Conventional pavements have large thermal inertia and strong capacity of heat absorption and heat storage, contributing to the development of urban heat island. In recent years, the researches on mitigating urban heat island effect by using cool pavement technologies are increasing. Based on the cool pavement technologies of pavement reflectance, the cooling mechanism of reflective pavement and its influence on outdoor thermal environment are analysed. The influences of 5 factors such as solar thermal radiation peak, surface layer material, thermal reflective coating, water content of pavement material and urban structure on pavement temperature are analysed. The result shows that (1) The peak value of solar radiation changes regularly with the seasons. Due to the different effects of peaks on the daily highest temperature, the pavement cooling effect of summer is obviously better than that of winter, which not only satisfies the summer cooling but also reduces the adverse effect on the winter pavement. (2) The effect of the surface layer

收稿日期: 2018-02-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(41572305, 41272345)

作者简介: 潘述平(1992-), 女, 山东邹城人, 硕士研究生. (pshuping5741@163.com)

material on the pavement temperature is closely related to the performance of the material, the color of the aggregate and the age of the pavement. (3) The heat reflective coating adds a high refractive index material to the pigment, and reduces the pavement's absorption of solar radiation by reflective solar radiation, thereby reduces the accumulation of heat on the road surface. The lighter the color, the more obvious the reflection effect. Considering the adverse influence of pavement low temperature on the road performance in winter, the reversible thermochromic microcapsules are added to the pavement material, which is not widely used due to its economics and photostability. (4) Due to the different absorptions of solar radiation by water molecules, the solar reflectivity decreases with the increase of water content of the surface layer material, but it provides the source power for evaporation and heat dissipation. (5) According to urban structural analysis, the canyon cooling effect with aspect ratio less than 1 is better. Although these 5 factors have different influences on the pavement reflectance, all of them could achieve the cooling effect to a certain extent. Meanwhile, the engineering applications of researches on pavement reflectance at present stage are expounded.

Key words: road engineering; reflectance; overview; pavement temperature; cooling effect; influencing factor

0 引言

随着城市化进程的加快,农田、草地等逐渐被水泥、沥青路面取代,导致路面释放的显热增加,加之人类活动的影响,使城市温度显著增加,这种由城市下垫面产生的温度不平衡效应称为城市热岛效应。

城市热岛效应的发展会降低环境质量、加剧城市污染,引发自然灾害,降低路面寿命,影响居民身体健康^[1]。由于路面释放的显热是引起城市热岛效应的主要原因之一,降低路面温度可在一定程度上缓解热岛效应的影响。近年,国内外开始研究路面反射率对城市热岛效应的影响。国外的许多研究者一直在研究冷路面技术,主要是研究路面反射率^[2],希望利用该技术达到冷却建筑物、降低城市耗能、缓解城市热岛效应的目的。由于路面反射率的增加,太阳短波辐射的流出量增加,太阳热辐射吸收量降低,从而降低路面温度,同时降低进入大气的热辐射,这种“负辐射强迫”的过程可有效抑制城市热岛效应^[3]。H. Li^[4]研究发现提高路面反射率可降低路面温度,减少夏季建筑物的冷却能耗,同时减少臭氧的形成而改善空气质量,但可能会影响行人的热舒适度。

目前,路面反射率的研究还存在一个不容忽视的问题——冬季路用性能,冬季降温增加路面结冰期,降低路面寿命,威胁行车安全,必须权衡路面的冬夏收益。本研究从反射率的测量方法和路面反射率降温的影响因素出发,分析现有的路面反射率研究中存在的问题,以期为国家海绵城市建设及冷

路面技术在寒区道路工程中的应用提供参考。

1 反射率的测量

相关研究表明,路面反射率影响环境温度及建筑耗能。在当今全球变暖日益加剧的趋势下,冷路面技术得以发展,从而促进了路面反射率的研究。

1.1 光滑表面反射率的测量

对于表面光滑且均匀的物体,其反射率可根据分光光度计测得的反射光谱计算得出,反射率可用各光谱参数积分值的比值表示。令 $i(\lambda)$ 为单位面积单位波长 λ 的入射功率,设光滑表面光谱反射率为 $r(\lambda)$,则反射率的计算公式为^[5]:

$$\rho = \frac{\int_{\lambda_0}^{\lambda_1} r(\lambda) i(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_0}^{\lambda_1} i(\lambda) d\lambda}, \quad (1)$$

式中, ρ 为光滑表面反射率,无量纲; $i(\lambda)$ 为入射太阳光谱; λ 为波长,一般短波波长 $\lambda_0 = 280 \text{ nm}$,长波波长 $\lambda_1 = 2500 \text{ nm}$; $r(\lambda)$ 为均匀表面的光谱反射率。

1.2 曲面反射率的测量

现有曲面反射率的测量有如下几种方法。ASTM E1918—06^[6]是测量野外水平和低地表反射率的试验方法,是专门测量大型表面反射率的方法,其目标模型的尺寸至少为 $4 \text{ m} \times 4 \text{ m}$,如此大的目标模型在试验过程中可能无法满足,此外,该方法使用日射强度计进行测试,先将日射强度计朝上记录入射辐射量,再将日射强度计翻转向下调制水平并记录目标模型反射量,这种翻转日射强度计的测量方法使

入射辐射量与反射辐射量的测量存在时间差,容易受天气的影响而增加反射率的测量误差。

针对 ASTM E1918—06 中目标模型尺寸的不足,提出了 ASTM E1918A^[7],这是一种利用黑、白色控制板测量有限目标反射率的一种方法,目标模型尺寸为 1 m × 1 m 即可,但 ASTM E1918A 并未解决使用日射强度计测量产生的不利影响。基于现有的研究方法,Y. Qin 等^[8]提出了一种测量有限程度目标反射率的简化方法,在目标模型上方设置背靠背的两个日射强度计,在朝下的日射强度计的下部中央设有带孔的圆形挡板,保证目标在日射强度计的视野范围内,以降低环境因素对反射率的影响。上下两个日射强度计分别记录入射辐射和反射辐射,反射辐射与入射辐射的比值即为反射率。

将简化后的方法与 ASTM E1918—06 标准对比,发现可作为其简化替代品,G. Mei 等^[5]利用该方法使用型号 Kipp & Zonen CMP11 的两个日射强度计对旧沥青路面、新铺混凝土路面、粗糙土壤、石灰石块等 8 个目标模型进行测试,将测试结果与 ASTM E1918—06 的测试结果对比,表明二者所测反射率的最大差值为 0.013,证实了该方法的可靠性。

2 路面降温机理研究

路面降温效应的机理研究主要是对热传导、热对流、热辐射的研究。热传导是指路表热量与下部结构层及土层之间的相互传递过程,是路面能量平衡方程中不可忽略的因素。文献[9]中的现场实测数据表明,反射率为 0.13 的沥青路面热传导的能量占太阳辐射总量的 10%,反射率为 0.45 的沥青路面热传导的能量占太阳辐射总量的 6%。热对流是指流体空间位置转换而引起的热量转移,主要包括强迫对流和自由对流,路面与其上方空气的热对流通常用牛顿冷却公式表示。太阳热辐射主要是指短波辐射,路面吸收短波辐射的同时又以长波辐射的形式向周围环境发射能量,根据斯蒂芬-波尔兹曼定律,物体的温度越高其辐射能力越强。因此,路面吸收的能量越多,路面温度越高,向周围环境释放的热量越多。

抑制热传导、增加热对流、降低路面热辐射的吸收是理想的降温方式。路面反射率降温机理研究主要是通过建立数学模型和路面太阳能辐射试验系统,从而对路面降温过程及各影响因素进行分析。Y. Qin 利用热传导、热对流、热辐射的原理建立了路面热平衡方程,并引入一维瞬时热传导模型、路

面温度方程及净辐射方程,得出路面温度振幅的理论模型^[10]:

$$A_d = \frac{a_1(1-r)I_0}{2P\sqrt{w}} + A_0, \quad (2)$$

式中, A_d 为每天的温度振幅; a_1 为回归常数(净辐射中热传导所占的百分比); I_0 为太阳最大辐射量; r 为路面反射率; w 为角频率, $w = 2\pi/(24 \times 3600)$; P 为路面材料的热阻; A_0 为回归常数,与空气温度、相对湿度及路面辐射系数相关^[11]。

由式(2)中所表示的路面温度振幅、路面吸收率、太阳最大辐射量及路面热阻之间的物理关系可知,降低路面吸收率即提高路面反射率可降低路面温度振幅。考虑路面温度最大值随路面温度振幅而变化,通过类比方程建立路面最大温度 T_{smax} 的计算公式^[4]:

$$T_{\text{smax}} = \Gamma \frac{(1-r)I_0}{P\sqrt{w}} + T_0, \quad (3)$$

式中, T_{smax} 为路面最大温度; Γ 为常数(热传导吸收百分比); T_0 为回归常数。

通过式(2)~(3)可以看出,路面温度的研究是基于热传导、热对流、热辐射理论的研究。路面温度与日最高温度、最低温度及太阳辐射相关^[12],降低温度最有效的方法就是防止能量沿路表向下传递。选用高发射率的面层材料可降低路面吸收率进而降低路面温度。Y. Qin^[10]为验证反射率降温的有效性,通过相关试验数据发现,反射率提高 0.01 可使路面温度降低 3.5~4.3℃。P. E. Phelan 等^[13]基于能量平衡原理建立了一维数学模型,通过气象数据计算近地表温度,分析了材料热物理性质对路面温度的影响,表明反射率对降低路面温度起积极作用。Y. Qin 等^[14]模拟了不同反射率和不同热惯性的路面,发现路面吸收的热量大部分以显热热流和长波辐射的形式出现,热传导的热量约为吸收的 5%,提高路面反射率可有效抑制显热热流。

数学模型的建立有利于研究反射降温的过程,可以获得影响降温的各物理参数,但大都采用经验公式,使得数学模型的应用有一定的局限性,公式中的某些参数有时会取经验值,以某常量代替,且太阳能辐射模拟装置尚无统一标准,室内模拟一般采用碘钨灯作为辐射光源,使辐射强度为某定值并假设试样表面辐射强度是均匀的,实际情况下太阳辐射强度随时间呈正弦规律变化,需要根据公式做等量变换。同时室外条件风速大小非定值,室内采用等值风速不能模拟工程环境中的实际效果。

3 路面降温影响因素

3.1 太阳辐射峰值对路面温度的影响

吴胜标等^[15]从季节角度出发, 对黑河流域反射率进行了分析。陈星等^[16]选取黄土高原半干旱区结合观测站 1 a 的观测资料, 研究了太阳辐射、反射率、热通量等因素的季节性变化规律。肖瑶等^[17]对藏北高原不同下垫面的反射率进行了试验研究, 表明该地区四季反射率呈 U 字形变化, 受积雪和植被覆盖的影响, 反射率的四季变化规律为: 冬季 > 春季 > 秋季 > 夏季。H. Li^[4]选取 9 种不同反射率的路面, 测量了路面每天的最高温度和最低温度, 发现反射率影响路面日最高温度且冬夏作用效果不同。夏季反射率为 0.08 的沥青路面比反射率为 0.28 的混凝土路面温度高约 15 °C; 在相同天气条件下, 冬季两路面温差约 8 °C。为了进一步分析两者的差异性, 对冬夏日最高温度分别进行拟合, 发现夏季反射率每增加 0.1 路面日最高温度下降约 6 °C; 冬季反射率每增加 0.1 路面日最高温度下降约 3 °C, 这是因为冬夏太阳的辐射峰值不同对路面日最高温度的影响不同, 也表示太阳辐射峰值对路面的降温效果产生积极的影响, 尤其是在太阳辐射峰值较高的炎热天气下。

太阳辐射峰值随季节呈规律性变化, 在路面反射率不变的情况下, 冬季路面降温幅度小于夏季, 既有利于降低夏季城市热岛的影响, 减少空调制冷能耗, 又降低了对冬季路用性能产生的不利影响, 这意味着夏季获得最大限度的收益, 同时尽可能降低冬季带来的损失。H. Li 等^[18]利用一种具有双光伏计和自动数据采集系统的新型反射率测试了系统对透水及不透水路面进行现场测试, 发现路面反射率的大小与面层粗糙度、含水率、太阳入射角相关, 且路面白天的冷却效果与太阳辐射强度峰值呈正相关。

3.2 面层材料对路面温度的影响

面层材料对路面温度的影响取决于面层材料的性能, 主要体现在反射率、渗透性、导热性、热容量及孔隙率。现主要分析反射率这一特性对路面温度的影响。反射率是指反射辐射量与入射辐射量之比, 提高路面反射率有助于抵消全球变暖的趋势^[19]。文献 [20] 研究了不同路面铺设材料的反射率与路面温度的关系, 发现虽然受不同太阳辐射、风速、温度等因素的影响, 仍可看出路面温度随反射率的增加而降低, 随反射率的降低而增加。赵昕

等^[21]选取沥青路面、水泥混凝土路面、热反射涂层路面进行反射率对比试验, 对 3 种路面 24 h 的温度变化情况进行了研究, 如图 1 所示。

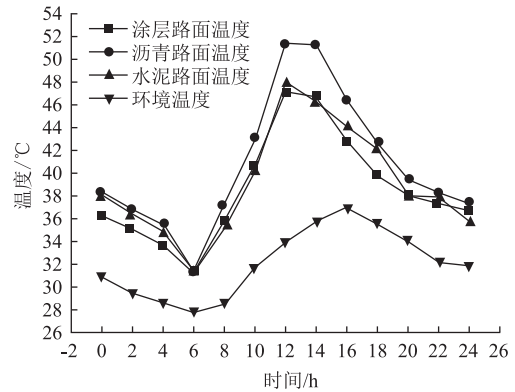


图1 不同路面温度与环境温度比较

Fig. 1 Comparison of different pavement surface temperatures and ambient temperature

可以看出, 3 种路面温度的变化曲线大致呈正弦规律变化, 路面温度均大于环境温度, 沥青路面温度最高, 峰值超过 50 °C, 水泥路面次之, 涂层路面最低, 峰值约 47 °C, 比沥青路面低 3 ~ 4 °C, 原因是面层材料对太阳辐射量的吸收程度不同即反射率不同。梁桢^[11]建立了求解路面温度的数学理论模型, 并以涂层反射率及面层材料为变量验证了该模型的可靠性。试验表明, 路面温度与反射率成反比, 与当日太阳最大辐射量成正比。

权磊等^[22]通过现场测量分析了青藏高原地区两种路面温度场的变化情况, 发现沥青混凝土路面、水泥混凝土路面的温度场特征存在明显差异, 最高日平均温度差异较大, 沥青混凝土路面较水泥混凝土路面高约 13 °C, 二者最低日平均温度相当; 二者年平均温度差异不明显, 沥青混凝土路面较水泥混凝土路面高约 0.4 °C。崔耀平等^[23]引入城市地表辐射参数化方案 (NARP), 利用该方案对道路、房屋、林地、草地 4 种下垫面的净辐射值进行了模拟。结果显示, 道路净辐射值最大, 林地、房屋次之, 草地最小。

根据我国道路使用情况及科学领域的发展状况分析, 目前研究的面层材料主要分 3 大类, 见表 1。

3.3 热反射涂层对路面温度的影响

根据太阳光谱分析, 太阳辐射量大部分为可见光和近红外光。为了降低路面对可见光和近红外光的吸收程度, 热反射涂层成为新的研究方向, 其隔热原理就是实现对可见光及近红外光的高反射。热

表 1 面层材料对路面反射率的影响
Tab. 1 Influence of surface layer material on pavement reflectance

分类	沥青路面	水泥路面	热反射涂层路面
反射率	新铺: 0.05 ~ 0.10	新铺: 0.35 ~ 0.40	新铺: 0.50 左右,
	老旧: 0.10 ~ 0.18	老旧: 0.20 ~ 0.30	随涂料配比变化
影响因素	龄期、骨料	龄期、骨料颜色、 Ca(OH) ₂ 含量	涂料成分及配比、 涂层厚度
结论	随着龄期的增加, 反射率逐渐增大, 原因是材料的磨损及老化 ^[24]	随着龄期的增加, 反射率降低 ^[24] ; 浅色骨料可使路面温度降低 4 ℃ ^[25] ; 反射率随 Ca(OH) ₂ 含量的增加而增大 ^[26]	在试件 2 cm 处, 涂层路面可降低温度 7 ~ 12 ℃, 随着涂层厚度的增加, 降温效果先增加后趋于平缓 ^[27]

反射涂层主要由薄膜和颜料组成, 薄膜是指聚乙烯醇和环氧树脂, 颜料作为反射元件。

A. Sha 等^[28]选择折射率高的 TiO₂ 颜料, 并通过计算求得颜料的最佳粒径及浓度, 配制出具有冷却性、抗滑性可用于多年冻土区的热反射涂层, 并利用试验验证了其冷却性, 发现热反射涂层可防止能量向下传递, 同时可降低顶部温度 (10 ± 2.5) ℃, 降低底部温度 (10 ± 3) ℃。王伟^[27]针对沥青路面的热环境建立了热平衡方程, 通过室内外试验得出, 夏季热反射涂层可有效降低沥青路面温度 9 ℃左右, 并研究了涂层厚度对降温效果的影响, 综合考虑降温效果与经济效益确定了涂层厚度的范围。

A. Synnefa 等^[29]利用 10 种不同颜色的涂料将热反射涂层做成标准型和凉爽型两类, 凉爽型是指添加了折光材料的涂料。研究表明, 由于 10 种涂层的颜色差异较大, 虽然可见光及近红外光的吸收强度不同, 仍可看出凉爽型较标准型光谱吸收率低。为了形象表征上述两种热反射涂层的冷却性能, 利用所测光谱数据计算了每个样品的反射率。结果表明, 添加折光材料的涂层的反射率较高。分析传感器的测量数据发现, 凉爽型涂层的表面温度较低。

郑木莲等^[30]利用自主研发的热反射型沥青路面综合测试装置对不同涂层颜色的路面试件进行了对比试验, 并进一步分析了路面温度随涂层厚度的变化规律。试验表明, 涂层中加入防滑颗粒既能满足路面的抗滑性能又不影响路面降温效果, 但热反射涂层的降温效果在冬季是不可取的, 冬季路面温度

过低不利于冰雪融化且降低路用寿命, 应综合考虑路用性能的季节性影响。

T. Karlessi 等^[31]选取 2 组热变色涂层, 并设置其转变温度为 30 ℃, 将颜料微胶囊化, 平均粒度为 5 μm。当表面温度升高到 30 ℃ 以上时, 涂层颜色开始变浅, 颜色随着温度的升高逐步变浅从而增强太阳热反射能力、降低表面温度, 冬季颜色则发生可逆性变化, 太阳热辐射吸收率的增加使表面温度升高。

Y. Ma 等^[32]在水泥中加入可逆热变色微胶囊 (颜色随光谱变化的可逆转化分子结构), 设置其变色温度, 使夏季路面呈暖色调、冬季路面呈冷色调。虽然热变色微胶囊用于路面及建筑外壁面可以减少加热或冷却负载, 但考虑其经济性及光稳定性并未广泛应用于工程中。

3.4 面层材料含水量对路面温度的影响

路面利用湍流交换和水分蒸发的形式将热量输送给大气^[33], 孔隙率、路面含水率及蒸发面决定蒸发散热量的大小, 蒸发速率则取决于材料孔隙率及迂曲度。H. Li 等^[34]根据 1 种不透水路面及两种可透水路面设置 3 个沥青混凝土测试段, 利用 8 个热电偶分别记录了干燥、潮湿条件下的试验路面温度和近地表环境温度。用最小二乘法进行回归分析表明, 在干燥条件下的透水路面降温效果低于潮湿条件下, 且低于不透水路面的降温能力。

侯红青^[35]以大孔隙水泥混凝土为试验材料, 通过室内外试验研究了含水量对路面温度场的影响, 发现在孔隙率和试件厚度相同的情况下路面温度随含水量的增加而降低。由于开级配沥青混凝土路面不具有保水性, 水分一般储存在下部结构层, 路面铺设保水材料增加含水率, 有利于降低路面温度。东京、大阪等城市验证了保水路面对缓解城市热岛效应的有效性。由于保水路面的含水率较高, 用于蒸发散热的水分充足, 夏季在路面温度高达 60 ℃ 的情况下可降低路面温度 25 ℃, 降低环境温度约 2 ~ 3 ℃^[4]。魏建军等^[36]利用碘钨灯做光源模拟了路面蒸发过程。试验结果表明, 对相同孔隙率试件, 含水率越多可供蒸发的水分越多, 降温效果越明显, 在满足路面使用性能的前提下, 路面含水层越厚、孔隙率越大, 路面温度越低。

由于反射率是控制路面能量收支的重要因素, 加之冻土层对温度的敏感性较强, 冻土层的稳定性危及路基的稳定性, 因此, 相关学者对冻土区的反射率展开了研究。姚济敏等^[37]选取多年冻土区及季

节性冻土区两个不同的站点,讨论了太阳高度角与土壤含水量对地表反射率的影响。张乐乐等^[38]对青藏高原唐古拉地区的暖季土壤含水量与反射率的关系进行了研究,发现土壤水分对反射率的影响较大,随着土壤含水量的增加,反射率呈下降趋势。同时,土壤含水量对反射率的影响与植物生长周期有关。岳平等^[39]对比分析了青藏高原与四川盆地在无降水条件下的地表反射率及其月平均日变化规律。由于受太阳高度角、下垫面及土壤含水量的影响,反射率的变化规律呈U字型。姚彤等^[40]选取下垫面不同的10个站点研究了太阳高度角及土壤含水量与地表反射率之间的关系。发现反射率的变化趋势与当地降雨量有关,干旱、半干旱地区在降雨时反射率较低,多雨区由于土壤含水量较大,土壤含水量比较稳定,长期趋于饱和状态,因此反射率受土壤含水量的影响较小。

3.5 城市构造对路面温度的影响

提高路面反射率降低路面温度的理论适用于宽敞无遮挡的开放区域或建筑物的屋顶。建筑物密集的市区必须考虑太阳辐射与两相邻建筑物间的影响。因此对于峡谷反射率的研究应运而生。

M. Aida^[41]利用立方体混凝土试块设计街道峡谷模型实测了其反射率。结果表明,峡谷模型的太阳能吸收率高于标准平面模型,且峡谷模型越高,反射率越低,峡谷模型内部温度越高,这是峡谷模型对太阳辐射的多重吸收引起的。Y. Qin^[42]利用数学模型对城市峡谷反射率进行了研究。谭康豪等^[43]对不同走向的城市峡谷模型进行了试验研究,同时建立一维无限街道峡谷数学模型进行了数值模拟,将结果与美国规范作对比并建立了分维度数与反射率之间的关系。发现当街道纵横比小于1.0时,提高路面反射率可有效降低路面温度。P. J. Pablo等^[44]选取5组不同高宽比的峡谷模型,为使该模型更符合现有的城市构造,将模型设置东西、南北两个走向,研究了其反射率随时间的变化规律。结果表明,高宽比为0.1的模型受时间变化的影响小,反射率保持在0.35左右,随着高宽比的增大,反射率受时间变化的影响增加,南北走向的峡谷模型一般出现在日出、正午、日落时间段,而东西走向的峡谷模型正午时间没有明显变化,这种变化应该与太阳辐射的角度相关。为了验证结论的准确性,选取南北、东西走向及两种不同宽度的峡谷模型对其季节性因素进行了分析,发现反射率从春季到冬季呈降低趋势,冬季两种宽度的模型反射率差异较小,其余3

个季节差异明显。J. Chen等^[45]研究表明,增加路面反射率能降低不同深度的路面温度,但是对于一定宽度的街道,随着建筑物高度的增加,峡谷反射率降低,加剧了建筑物对热能的吸收,意味着路面反射率只有在低峡谷情况下才有降温效果。

前述5种影响因素中,有关面层材料含水量的研究大多是考虑蒸发降温效应。在土壤学研究领域,有学者对土壤含水量与太阳辐射的近红外波之间的关系进行了研究,基于该研究方向建立含水量与反射率的理论模型并进行相关试验研究,旨在综合利用可用资源获得最大程度的降温效果。

4 路面反射率对室外热环境的影响

随着太阳辐射强度的增加,室外综合温度明显高于空气温度,热流向室内传导,可以降低冬季采暖能耗^[46],但辐射热效应会降低人体舒适度。

钱炜^[47]基于丹麦科学家预测平均热反应PMV指标,提出了室外热环境评价指标OTCD来评价室外热舒适度,并建立了室外热环境评价指标模型。由于黑球温度 T_g 不仅可以反映环境平均辐射温度,还可以综合反映太阳辐射、大气逆辐射,因此,将黑球温度、空气温度、风速、湿度作为该模型中的基本参数。何利涛^[48]利用该指标对3种不同颜色涂层的热反射型沥青路面进行了研究,发现3种涂层路面对路表空气OTCD值的提升幅度小于1,虽然依旧非常热,但是该指标较普通路面的最大值已经降低1.5,说明涂层路面有利于增加人体舒适度。林波荣^[49]设计数值试验分析了不同反射率对室外热环境的影响,发现高反射率虽然可以降低路面温度,进而降低环境温度,但高反射率会提高平均辐射温度,降低人体的热舒适度。

P. Schrijvers等^[50]建立街道峡谷模型,利用数值模型计算了峡谷热输送,考虑了多重辐射散射效应下反射率对空气温度、平均辐射温度的影响,同时引入了通用温度气候指数评价反射率对室外热环境的影响。研究发现,由于平均辐射温度对峡谷阴影的敏感性而表现出强烈的峡谷空间变化,反射率高的模型依然会增加行人的热应激性,这与E. Erell等^[51]的研究结果是一致的。H. Li^[4]利用生理学等效温度模型评估了不同路面技术对室外热环境的影响,反射路面会增加平均辐射温度进而增加生理等效温度值,降低人体的热舒适度。研究发现,炎热时期使用可透水的蒸发路面可降低路面温度进而降低平均辐射温度,增加人体舒适度。

综合考虑路面降温与人体舒适度，在高温多雨的南方可使用具有反射的可透水路面。考虑温度、湿度、太阳辐射等气象参数，结合国内外研究的人体热舒适度模型并进行验证，这里介绍现今认可度较高的几种热舒适度模型^[52]，具体见表 2。

表 2 人体热舒适度模型
Tab. 2 Human thermal comfort models

模型分类	模型表达式	参数含义
基于 Steadman 建立的室外无遮挡温感模型	$T_{\text{body}} = 4.5 + 1.02T + 0.28e_u - V - 5.8\varphi_s + 0.0054(Q_d + Q_D)$	T_{body} 为体感温度； e_u 为水汽压； φ_s 为直接辐射与间接辐射之比； Q_d 为散射辐射； Q_D 为直接辐射
基于北京气象局的人体舒适度模型	$DI = 1.8T + 0.55(Q - RH) + 32\sqrt{V}$	DI 为不适指数； T 为气温； RH 为相对湿度； V 为风速
基于 Kyle 的炎热指数模型	$THI = T - (1 - RH)(T - 14.5)$	T 为气温； THI 为人体舒适度的划分标准

5 反射路面工程应用研究展望

基于反射率的冷路面技术受到国内外的广泛关注，虽然在缓解城市热岛效应、保护冻土区路基的稳定性等方面取得了一定成果，但目前还处在试验探索阶段，亟需进一步深入研究。

(1) 有关提高路面反射率降低路面温度的研究更适用于开阔路面及无遮挡屋面。根据现有的城市格局，应该综合考虑墙体与路面之间的遮挡及多重吸收问题。现有的街道峡谷模型仅验证了高宽比小于 1.0 时路面反射率与环境温度之间的关系，高宽比较大的情况需要进一步验证。此外，在满足路面降温效果的同时，应权衡反射率与人体舒适度的关系。

(2) 热反射涂层夏季降温效果良好，但并未考虑冷路面对冬季路面使用的不利影响。考虑冬季路面性能，有学者提出了可逆热变色微胶囊，当路面温度达到设定温度时，该胶囊的分子结构发生可逆性变化，改变路面色调，但考虑其经济性与热稳定性并未广泛应用于工程领域。虽然热反射涂层的降温效果有许多研究予以验证，但是现有的热反射涂层不能做到使用周期与环境效应的有机结合，今后可将热反射涂层的环境效应及使用寿命作为一种新的研究方向。

(3) 在龄期及行车荷载反复作用下，路面平整

度降低导致路面粗糙度增加。根据光的入射、反射路径分析，路面粗糙度增加会影响路面对太阳热辐射的吸收量。粗糙度作为反射率的影响因素之一，虽有研究证明二者的相关性，但并未系统分析其间的变化规律，因此，可结合路面粗糙度研究反射率对路面温度的定量影响。

(4) 随着全球变暖日益加剧，青藏高原等多年冻土区的稳定性受到严重威胁，冻土层的稳定性影响路基的稳定性。由于青藏高原季风气候盛行，用于对流换热的路堤碎石层及铁路道渣层被积沙覆盖，改变了地表对太阳辐射的吸收能力。反射率是控制地表能量收支的重要因素，为确保冻土层的稳定性，今后可从碎石层级配、积沙覆盖率与反射率的关系出发，对碎石路堤及铁路道渣进行级配设计，使其同时满足对流换热与降低热辐射的效果，达到保护冻土层稳定性的目的。

6 结论

本研究对反射率的测量方法、路面降温机理进行了阐述，结合太阳辐射峰值、面层材料、热反射涂层、面层材料含水量、城市构造这 5 种影响因素对反射率的降温效果进行了分析，同时分析了反射率对人体舒适度的影响。具体研究体现在以下几个方面：

(1) 对反射率的测量方法进行分析。根据现有的方法选择 1 种适合有限曲面模型的测量方法，为了降低环境反射率对目标模型反射率的影响，根据相关学者的研究，在朝向目标模型的日射强度计下面设置圆形挡板。同时，基于传热的 3 种形式对反射路面的降温机理进行了阐述。研究表明，提高反射率可有效抑制显热热流的释放，从而抑制路面的热传导效应。

(2) 上述 5 种影响因素分析表明，反射率的降温效果与季节、太阳高度角、表面粗糙度、面层颜色、面层材料含水量、下垫面类型、城市构造等密切相关。季节对路面温度的影响主要是不同季节太阳辐射峰值的不同，导致路面对太阳热辐射的吸收不同进而影响路面的日最高温度。由于太阳光以近红外光、可见光、不可见光的形式辐射到路表，而不同颜色对太阳光谱的吸收程度不同。因此，通过控制面层颜色可调节路表对太阳辐射的吸收程度，根据冬夏路面对太阳热辐射的需求程度，提出了可逆热变色微胶囊。在城市构造研究方面，验证了高宽比小于 1.0 的城市峡谷模型，提高了反射率对城市峡谷降温的积极作用。

(3) 通过分析人体热舒适度模型,发现太阳的直接辐射、间接辐射、大气温度、湿度直接影响人体热舒适度。虽然反射率可以控制路面辐射热的吸收量,进而降低路面温度,但是反射率过高将提高平均辐射温度,应谨慎看待反射率对路面降温效果的影响。

参考文献:

References:

- [1] TAN J, ZHENG Y, TANG X, et al. The Urban Heat Island and Its Impact on Heat Waves and Human Health in Shanghai [J]. *International Journal of Biometeorology*, 2010, 54 (1): 75–84.
- [2] AKBARI H, POMERANTZ M, TAHA H. Cool Surfaces and Shade Trees to Reduce Energy Use and Improve Air Quality in Urban Areas [J]. *Solar Energy*, 2001, 70 (3): 295–310.
- [3] AKBARI H, MATTHEWS H D. Global Cooling Updates: Reflective Roofs and Pavements [J]. *Energy and Buildings*, 2012, 55: 2–6.
- [4] LI H. Evaluation of Cool Pavement Strategies for Heat Island Mitigation [D]. [S. l.]: University of California, 2012.
- [5] MEI G, WU B, MA S, et al. A Simplified Method for the Solar Reflectance of a Finite Surface in Field [J]. *Measurement*, 2017, 110: 211–216.
- [6] ASTM E1918—06, Standard Test Method for Measuring Solar Reflectance of Horizontal and Low-sloped Surfaces in the Field [S].
- [7] AKBARI H, LEVINSON R, STERN S. Procedure for Measuring the Solar Reflectance of Flat or Curved Roofing Assemblies [J]. *Solar Energy*, 2008, 82 (7): 648–655.
- [8] QIN Y, HE H. A New Simplified Method for Measuring the Albedo of Limited Extent Targets [J]. *Solar Energy*, 2017, 157: 1047–1055.
- [9] DUMAIS S, DORE 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.
- [10] QIN Y. A Review on the Development of Cool Pavements to Mitigate Urban Heat Island Effect [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, 52: 445–459.
- [11] 梁枏. 超薄浅色水泥混凝土路面降温效果研究 [D]. 南宁: 广西大学, 2016.
LIANG Jia. Research on Ultra-thin Light Color Cement Concrete Pavement Cooling Effect [D]. Nanning: Guangxi University, 2016.
- [12] 周岚, 倪富健, 赵岩荆. 环境温度及荷载对沥青路面车辙发展的影响性分析 [J]. *公路交通科技*, 2011, 28 (3): 42–47.
ZHOU Lan, NI Fu-jian, ZHAO Yan-jing. Impact of Environment Temperature and Vehicle Loading on Rutting Development in Asphalt Concrete Pavement [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2011, 28 (3): 42–47.
- [13] GUI J, PHELAN P E, KALOUSH K E, et al. Impact of Pavement Thermophysical Properties on Surface Temperatures [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2007, 19 (8): 683–690.
- [14] QIN Y, HILLER J E. Understanding Pavement-surface Energy Balance and its Implications on Cool Pavement Development [J]. *Energy and Buildings*, 2014, 85: 389–399.
- [15] 吴胜标, 闻建光, 刘强, 等. 黑河流域地表反照率估算及其时空特征分析 [J]. *地球科学进展*, 2015, 30 (6): 680–690.
WU Sheng-biao, WEN Jian-guang, LIU Qiang, et al. Estimation of Land Surface Albedo and Spatio-temporal Variability over Heihe River Basin [J]. *Advances in Earth Science*, 2015, 30 (6): 680–690.
- [16] 陈星, 余晔, 陈晋北, 等. 黄土高原半干旱区雨养农田地表辐射和能量通量的季节变化 [J]. *高原气象*, 2016, 35 (2): 351–362.
CHEN Xing, YU Ye, CHEN Jin-bei, et al. Seasonal Variation of Radiation and Energy Fluxes over the Rain-Fed Cropland in the Semi-arid Area of Loess Plateau [J]. *Plateau Meteorology*, 2016, 35 (2): 351–362.
- [17] 肖瑶, 赵林, 李韧, 等. 藏北高原多年冻土区地表反照率特征分析 [J]. *冰川冻土*, 2010, 32 (3): 480–488.
XIAO Yao, ZHAO Lin, LI Ren, et al. The Characteristics of Surface Albedo in Permafrost Regions of Northern Tibetan Plateau [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2010, 32 (3): 480–488.
- [18] LI H, 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.
- [19] AKBARI H, MENON S, ROSENFELD A. Global Cooling: Increasing World-wide Urban Albedos to Offset CO₂ [J]. *Climatic Change*, 2009, 94 (3/4): 275–286.
- [20] LEVINSON R, AKBARI H. Effects of Composition and Exposure on the Solar Reflectance of Portland Cement

- Concrete, Report IBNL-48334 [R]. Berkeley: Lawrence Berkeley National Laboratory, 2001.
- [21] 赵昕, 刘洋. 路表反射率对路面表面温度影响研究 [J]. 科技创新与应用, 2013 (30): 211-212.
- ZHAO Xin, LIU Yang. Study on Influence of Road Surface Reflectance on Road Surface Temperature [J]. Technology Innovation and Application, 2013 (30): 211-212.
- [22] 权磊, 田波, 牛开民, 等. 青藏高原高等级道路路基路面温度变化特征 [J]. 交通运输工程学报, 2017, 17 (2): 21-30.
- QUAN Lei, TIAN Bo, NIU Kai-min, et al. Temperature Variation Properties of Pavements and Subgrades for High-grade Roads on Qinghai-Tibet Plateau [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2017, 17 (2): 21-30.
- [23] 崔耀平, 刘纪远, 胡云锋, 等. 城市不同下垫面辐射平衡的模拟分析 [J]. 科学通报, 2012, 57 (6): 465-473.
- CUI Yao-ping, LIU Ji-yuan, HU Yun-feng, et al. Modeling the Radiation Balance of Different Urban Underlying Surfaces [J]. Chinese Science Bulletin, 2012, 57 (6): 465-473.
- [24] DOULOS L, SANTAMOURIS M, LIVADA I. Passive Cooling of Outdoor Urban Spaces: The Role of Materials [J]. Solar Energy, 2004, 77 (2): 231-249.
- [25] GUNTOR A, DIN M, PONRAJ M, et al. Thermal Performance of Developed Coating Material as Cool Pavement Material for Tropical Regions [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2014, 26 (4): 755-760.
- [26] LEVINSON R, AKBARI H. Effects of Composition and Exposure on the Solar Reflectance of Portland Cement Concrete [J]. Cement and Concrete Research, 2002, 32 (11): 1679-1698.
- [27] 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.
- WANG Wei. Research on Performance of Solar Heat Reflective Coatings on Asphalt Pavement and Application [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2011.
- [28] SHA A, LIU Z, TANG K, et al. Solar Heating Reflective Coating Layer (SHRCL) to Cool the Asphalt Pavement Surface [J]. Construction and Building Materials, 2017, 139: 355-364.
- [29] SYNNEFA A, SANTAMOURIS M, APOSTOLAKIS M. On the Development, Optical Properties and Thermal Performance of Cool Colored Coatings for the Urban Environment [J]. Solar Energy, 2007, 81 (4): 488-497.
- [30] 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.
- ZHENG Mu-lian, HE Li-tao, 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.
- [31] 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.
- [32] MA Y, ZHU B. Research on the Preparation of Reversibly Thermochromic Cement Based Materials at Normal Temperature [J]. Cement Concrete Research, 2009, 39 (2): 90-104.
- [33] 杨文娟, 顾海荣, 单永体. 路面温度对城市热岛的影响 [J]. 公路交通科技, 2008, 25 (3): 147-152.
- YANG Wen-juan, GU Hai-rong, SHAN Yong-ti. Influence of Pavement Temperature on Urban Heat Island [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2008, 25 (3): 147-152.
- [34] LI H, HARVEY J, JONES D. Cooling Effect of Permeable Asphalt Pavement under Dry and Wet Conditions [J]. Transportation Research Record, 2013, 2372: 97-107.
- [35] 侯红青. 大孔隙水泥混凝土路面材料温度响应特征 [D]. 西安: 长安大学, 2010.
- HOU Hong-qing. Temperature Response Characteristics of Macroporous Cement Concrete Pavement Material [D]. Xi'an: Chang'an University, 2010.
- [36] 魏建军, 关彦斌, 张新, 等. 透水性沥青路面降低路表温度的研究与分析 [J]. 交通科技与经济, 2007, 9 (5): 1-2.
- WEI Jian-jun, GUAN Yan-bin, ZHANG Xin, et al. Analysis of Permeable Asphalt Pavement Applied to Reducing the Temperature of Road Surface [J]. Technology & Economy in Areas of Communications, 2007, 9 (5): 1-2.
- [37] 姚济敏, 谷良雷, 赵林, 等. 多年冻土区与季节冻土区地表反照率对比观测研究 [J]. 气象学报, 2013, 71 (1): 176-184.
- YAO Ji-min, GU Liang-lei, ZHAO Lin, et al. Comparatively Observational Study of the Surface Albedo between the Permafrost Region and the Seasonally Frozen Soil Region [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2013, 71 (1): 176-184.
- [38] 张乐乐, 赵林, 李韧, 等. 青藏高原唐古拉地区暖季土壤水分对地表反照率及其土壤热参数的影响 [J].

- 冰川冻土, 2016, 38 (2): 351–358.
- ZHANG Le-le, ZHAO Lin, LI Ren, et al. Investigating the Influence of Soil Moisture on Albedo and Soil Thermodynamic Parameters during the Warm Season in Tanggula Range, Tibetan Plateau [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2016, 38 (2): 351–358.
- [39] 岳平, 李耀辉, 张良, 等. 青藏高原林芝与四川盆地温江地区晴天辐射和能量平衡特征 [J]. *冰川冻土*, 2012, 34 (6): 1328–1335.
- YUE Ping, LI Yao-hui, ZHANG liang, et al. Radiation and Surface Energy Balance Characteristics during Clear Days in Nyingchi (Tibet) and Wenjiang (Sichuan) [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2012, 34 (6): 1328–1335.
- [40] 姚彤, 张强. 我国北方不同类型下垫面地表反照率特征 [J]. *物理学报*, 2014, 63 (8): 460–468.
- YAO Tong, ZHANG Qiang. Study on Land-surface Albedo over Different Types of Underlying Surfaces in North China [J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63 (8): 460–468.
- [41] AIDA M. Urban as a Function of the Urban Structure: A Model Experiment [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 1982, 23 (4): 405–413.
- [42] QIN Y. Urban Canyon Albedo and Its Implication on the Use of Reflective Cool Pavements [J]. *Energy and Building*, 2015, 96: 86–94.
- [43] 谭康豪, 覃英宏, 苏益声, 等. 城市模型反射率测量方法与运用 [J]. *土木与环境工程学报*, 2016, 38 (2): 111–117.
- TAN Kang-hao, QIN Ying-hong, SU Yi-sheng, et al. Approach and Procedure of Measuring the Albedo of Urban Prototype [J]. *Journal of Civil & Environmental Engineering*, 2016, 38 (2): 111–117.
- [44] ROSADO P J, BAN-WEISS G, MOHEGH A, et al. Influence of Street Setbacks on Solar Reflection and Air Cooling by Reflective Streets in Urban Canyons [J]. *Solar Energy*, 2017, 144: 144–157.
- [45] CHEN J, WANG H, ZHU H. Analytical Approach for Evaluating Temperature Field of Thermal Modified Asphalt Pavement and Urban Heat Island Effect [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 113: 739–748.
- [46] 刘大龙, 杨柳, 刘加平, 等. 被动式采暖中太阳辐射热效应分析 [J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2015, 47 (8): 117–119.
- LIU Da-long, YANG Liu, LIU Jia-ping, et al. Analysis of Thermal Reaction of Solar Radiation in Passive Building Heating [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2015, 47 (8): 117–119.
- [47] 钱炜. 城市户外热环境舒适性研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2003.
- QIAN Wei. Study on Outdoor Thermal Comfort of City [D]. Chongqing: Chongqing University, 2003.
- [48] 何利涛. 热反射型沥青路面环境效应与施工技术研究 [D]. 西安: 长安大学, 2013.
- HE Li-tao. Research of Environmental Effect and Construction Technology of Thermal Reflective Asphalt Pavement [D]. Xi'an: Chang'an University, 2013.
- [49] 林波荣. 绿化对室外热环境的影响 [D]. 北京: 清华大学, 2004.
- LIN Bo-rong. Greening's Effects on Outdoor Thermal Environment [D]. Beijing: Tsinghua University, 2004.
- [50] SCHRIJVERS P J C, JONKER H J J, DE ROODE S R, et al. The Effect of Using a High Albedo Material on the Universal Temperature Climate Index Within a Street Canyon [J]. *Urban Climate*, 2016, 17: 284–303.
- [51] ERELL E, WILLIAMSON T. Simulating Air Temperature in an Urban Street Canyon in all Weather Conditions Using Measured Data at a Reference Meteorological Station [J]. *International Journal of Climatology*, 2006, 26 (12): 1671–1694.
- [52] 张新. 大孔隙透水沥青路面对城市热岛效应的影响分析 [D]. 北京: 北京交通大学, 2007.
- ZHANG Xin. Analysis on Influence of Macroporous Pervious Asphalt Pavement on Urban Heat Island Effect [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2007.