

透水路面反射率对热环境参数的影响分析

林宇凡¹, 李安琪², 田宇航¹, 杨秋侠¹, 李婷¹, 李宁³

(1. 西安建筑科技大学 城市发展与现代交通学院, 陕西 西安 710055; 2. 浙江天正设计工程有限公司, 浙江 杭州 310012;
3. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要: 为探究透水路面反射率对室外热环境参数的影响规律, 选取孔隙率为15%、20%、25%的透水混凝土试件, 进行现场实测试验。采集各试件的反射率、表面温度及0.2 m高度处的平均辐射温度, 进行回归分析和相关性统计。研究发现: 试件反射率随孔隙率增大而减小, 存在一定的相关性, 相关系数为-0.903; 孔隙率增大, 反射率减小, 对应的试件表面温度升高, 而0.2 m处的平均辐射温度降低。研究表明, 透水混凝土孔隙率不仅能直接影响反射率, 对表面温度和近地面热环境亦产生复合影响。选择孔隙率较大的透水混凝土作为下垫面, 可以在一定程度上降低室外环境的温度。研究成果对于提升城市户外活动空间的环境质量, 推动绿色低碳出行环境的实现具有重要的实际意义。

关键词: 反射率; 现场实测; 透水下垫面; 热环境参数

中图分类号: TU11; U41

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)09-0019-05

Analysis of Influence of Permeable Pavement Reflectivity on Thermal Environment Parameters

LIN Yufan¹, LI Anqi², TIAN Yuhang¹, YANG Qiuxia¹, LI Ting¹, LI Ning³

(1. School of Urban Development and Modern Transportation, XAUAT, Xi'an 710055, China; 2. Zhejiang Tianzheng Design Engineering Co., Ltd., Hangzhou 310012, China; 3. School of Civil Engineering, XAUAT, Xi'an 710055, China)

Abstract: To explore the influence of permeable pavement reflectivity on outdoor thermal environmental parameters, the field measured experiments are conducted by using the permeable concrete specimens with the porosities of 15%, 20%, and 25%. The reflectivity, surface temperature and the average radiant temperature at a height of 0.2 m of each specimen are collected for regression analysis and correlation statistics. The research results show that the reflectivity of the specimens decreases with the increase of porosity, and there is a certain correlation. The correlation coefficient is -0.903. When the porosity increases and the reflectivity decreases, the corresponding surface temperature of the specimen rises, while the average radiation temperature at 0.2 m decreases. These findings indicate that the porosity of permeable concrete not only directly influences the reflectivity, but also exerts a compound effect on both surface temperature and the near-ground thermal environment. The permeable concrete with higher porosity is selected as the underlying surface, which is able to lower the temperature of the outdoor environment to a certain extent. The research achievements have significant practical significance for improving the environmental quality of urban outdoor activity spaces and promoting the realization of a green and low-carbon travel environment.

Keywords: reflectivity; field measurement; permeable underlying surface; thermal environment parameters

0 引言

目前,我国城镇化水平已提升至66.1%,对应的城镇居民数量约为9.3亿人。随着城市规模的持续扩张,城市下垫面发生了显著变化,这成为热岛效应

产生的重要原因之一。城市下垫面作为地表与大气之间能量与水分交换的重要界面,在调节城市生态系统的水热平衡中发挥着关键作用,并最终对城市的热环境产生影响^[1]。

改善室外热环境的方法多种多样,其中绿化、水体、天井因子和遮阳设施对人体热舒适度的影响尤为显著。这些要素在降温、增湿等方面具有显著的积极效果,已被国内外学者广泛认可,证实为改善热环境的关键途径^[2-7]。

然而城市中的某些场地,如小型活动场地、步行

收稿日期: 2025-04-21

基金项目: 国家自然科学基金(52308465);陕西省住房和城乡建设厅科研开发项目(Z20210451);校级前沿交叉领域培育专项(X20240125)

作者简介: 林宇凡(1974—),女,博士,副教授,从事交通运输规划与管理的教学与科研工作。

街、人行道、广场等,其首要的功能是通行和休憩,我国《城市道路工程设计规范》(CJJ 37—2016)^[8]对设计通行能力和净空有具体的设计要求,而水体、绿化占用有限的使用面积,影响了人们的活动和通行。遮阳设施可能无法满足净空要求,加之在较大空间尺度实施的可行性问题,因此多数时候这些场地采用不透水的混凝土或沥青等硬质下垫面,在夏季,这些材料的蒸腾作用微弱,通常还具有较高的热容量和显著的热惰性,使其吸收并储存热量后,通过长波辐射与对流换热等方式释放。这一过程会导致近地面空气温度升高,从而加剧城市热岛效应,进而恶化场地的热环境质量^[9]。近些年,海绵城市在我国得到了广泛推广,而透水下垫面作为其主要载体,成为改善热环境质量的重要手段之一。研究发现,下垫面的热湿物理性能,例如含水率、蒸发率、反射率等是影响热环境质量的主要原因,其中反射率为反射辐射量与太阳总辐射量之比,能够通过反射太阳辐射减少路面对太阳能的吸收^[10]。Wu等发现在白天太阳辐射下,不同下垫面的反射辐射和热辐射热量有所不同,相较于水泥混凝土路面与密级配结构,沥青混合料及开级配路面通常具有更强的热吸收能力,其表面温度普遍更高,但其反射辐射量较少^[11]。郭建国等通过现场测量,获取了不同混凝土材料的反射率,并分析了地表温度随反射率变化的规律,从而得出其对室外热环境的差异性效应^[12-13]。

已有文献研究证明,透水下垫面反射率是影响室外热环境质量的重要原因之一,但目前对于不同配置下垫面的反射率,其量化分析还不够清晰,且如何影响室外环境参数的分析不够清楚,因此,本文基于不同配置透水下垫面的对比研究,采用现场实测和数学分析的研究方法,分析孔隙率与反射率的逻辑关系与变化特性,以及对热环境参数的影响规律。研究成果对改善城市室外活动空间的环境质量,推动绿色低碳出行环境的实现具有重要的实际意义。

1 研究方法

1.1 场地概况

实测地点选在西安建筑科技大学校园内的田径场外一片小型活动区域(见图1),测量时间为暑假期间,场地上几乎无人,确保了数据不受人群干扰。实测时间设定在10:00—16:00,天气晴朗,场地周围无树荫、墙体遮挡,且无水体设施。



图1 实测场地

1.2 试验对象

由水泥、水和胶结材料与高质量的单一粒径或间断级配的骨料混合而成的透水混凝土。试件的制备首先确定各混凝土试件的配合比,采用体积法确定透水混凝土试件配合比,由于骨料用量无需计算,因此直接根据透水要求,以孔隙率和水胶比为关键控制参数,设计混凝土配合比方案^[14]。体积法计算公式见式(1):

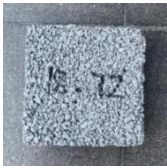
$$\frac{M_a}{\rho_a} + \frac{M_c}{\rho_c} + \frac{M_w}{\rho_w} + \frac{M_{ma}}{\rho_{ma}} + \frac{M_{ca}}{\rho_{ca}} + V_i = 1 \quad (1)$$

式中: M_a 、 M_c 、 M_w 、 M_{ma} 、 M_{ca} 为每 m^3 中粗骨料、水泥、水、掺合料、外加剂质量, kg/m^3 ; ρ_a 、 ρ_c 、 ρ_w 、 ρ_{ma} 、 ρ_{ca} 为粗骨料、水泥、水、掺合料、外加剂的表观密度, kg/m^3 ; V_i 为空隙率, %。

依据《透水水泥混凝土路面技术规程》(CJJ/T 135—2009)^[15],实测透水水泥混凝土下垫面选用C25强度等级,水泥的抗压强度为45.2 MPa,硬度等级至少为42.5R,为确保透水水泥混凝土试件的透水性能,选用粒径为4.75~9.50 mm的单一粒级粗集料,并以水泥浆包裹其表面,不掺入细砂,以改善混凝土的和易性并简化成型过程。试件的表观密度为3 050 kg/m^3 ,尺寸为300 mm × 300 mm × 100 mm,厚度不小于80 mm。表观密度2 700 kg/m^3 ,堆积密度1 550 kg/m^3 。根据《规程》要求,当连续孔隙率超过10%且水胶比在0.25~0.35的范围内时,可满足透水性要求。因此,本文试验选取了孔隙率为15%、20%和25%的参数组合,并将水胶比设定为0.25。表1为配合比计算参数,通过计算得到对应配合比,结果见表2。试件成型工艺分为搅拌、铺筑、养护3个阶段。首先,采用水泥裹石法拌制混凝土,先将石料和50%用水量加入强制式搅拌机拌合30 s,再加入水泥拌合40 s,最后加入剩余用水量拌合50 s后出料;其次铺筑前制作符合试件厚度、支撑稳定的模板,浇筑后用低频振动压实机进行压实和平整;试件完毕后,采用塑料薄膜覆盖的方法进行养护,定期检查薄膜

完整性,养护周期为两周。

表 1 配合比计算参数	
内容	参数
孔隙率%	15/20/25
水胶比	0.25
表观密度/(kg·m ⁻³)	2 700
堆积密度/(kg·m ⁻³)	1550
粒径/mm	4.75~9.50
水泥表观密度/(kg·m ⁻³)	3 050
水密度/(kg·m ⁻³)	1 000

表 2 各透水混凝土试件配合比		
孔隙率%	配合比(粗骨料:水泥:水)	试件
15	12.26:4:1	
20	14.82:4:1	
25	18.72:4:1	

1.3 实测仪器和步骤

太阳总辐射传感器(型号为 JXBS-3001-ZFS,产地为中国山东,测量范围为 0~1 500 W/m²,适用环境温度为-45~85 ℃,依据 ISO 9060 标准每 2 a 进行一次灵敏度、响应时间、温度系数等参数的校准)测定太阳辐射量与太阳辐射反射量,每分钟记录一次数据,每小时汇总采集一次(见图 2)。采用热力指数计(型号为 8778,产地为中国台湾,温度范围为 0~50 ℃,温度准确度为±0.6 ℃,依据 ISO 7243 标准每年进行一次黑球温度、湿球温度等参数的校准)、红外线测温仪(依据 ASTM E2847 标准每年进行一次测量距离、环境温度补偿等参数的校准)、无线万向风速风温记录仪分别测量各试件在 0.2 m 处的温度、湿度和黑球温度,表面温度和风速。采用电子秤(型号为 30 kg 计价秤,产地为中国浙江,称量范围为 0~30 kg,测量精度为 0.005 kg,依据《数字指示秤》(JJG 539—2016)标准每月进行一次灵敏度、示值误差、重复性误差等参数的校准)记录试件质量变化,其他装置有浸泡试件的塑料盆、支架、锡纸盒等。

为降低单次测量的偶然性影响,本实验采用重

复测量^[16],各类型试件均设置 3 组重复测量样本,试验对象包括孔隙率为 15%、20% 及 25% 的透水混凝土,以及一组非透水混凝土试件。测量时间为 10:00—16:00,每隔 1 h 记录一次,结果取多次测量的平均值。

1.3.1 实验 1:反射率测定方法

如图 2 所示,将太阳辐射测量仪放置在试件上方,仪器朝上测量太阳总辐射量,朝下测量反射辐射量。反射率为反射辐射量与太阳总辐射量之比,其计算公式见式(2)。



图 2 反射率实测

反射率=反射辐射强度/太阳总辐射强度 (2)

1.3.2 实验 2:反射率对热环境影响分析

太阳辐射是影响温度的主要因素,该实验将试件反射率与太阳辐射大小建立联系,测量透水试件反射率与环境参数,研究反射率不同的试件表面温度与周围热环境的变化。实验方法:通过无线万向风速风温记录仪、红外线温度计和热力指数计分别测量风速、试件表面温度以及各试件在 0.2 m 处的温度、湿度和黑球温度。

在炎热的夏季气候条件下,太阳平均辐射温度作为影响人体热量传递效率与热舒适感受的重要参数,在热环境研究中具有关键意义。可以通过相关参数进行计算,计算公式见式(3)^[17]:

T_mrt = [(1.1 × 10^8 V^0.6) × (T_g - T_a) / (ε × D^0.4) + (T_g + 273)^4]^1/4 - 273 (3)

式中:T_mrt 为平均辐射温度,℃;T_g 为黑球温度,℃;T_a 为空气温度,℃;V 为风速,m/s;ε 为黑球的吸收率,取 0.95;D 为黑球半径,取 0.035 m。

2 结果与分析

2.1 反射率

现场实测发现,不同孔隙率的透水混凝土试件的反射率平均值分别为:15%时为 0.203 9,20%时为

0.187 0,25%时为0.185 0。这表明孔隙率越大,反射率越小。表3为孔隙率与反射率的相关性分析,皮尔逊相关系数为-0.903,且相关性显著。基于Anova方差分析结果,构建了相应的回归模型 $Y(\text{反射率})=-0.617X(\text{孔隙率})+31.792$,相关系数 $R^2=0.815$ (见图3),反射率与孔隙率存在一定相关性,反射率随孔隙率增大而减小,不同孔隙率所对应的反射率分别为:15%时为22.53%,20%时为19.45%,25%时为16.37%;孔隙率增大1%,反射率则减少0.617%。

表3 皮尔逊相关性			
指标	相关	孔隙率	反射率
孔隙率	皮尔逊相关性	1	-0.903**
	Sig.(双尾)		0.000
反射率	皮尔逊相关性	-0.903**	1
	Sig.(双尾)	0.000	

注:**表示非常显著相关。

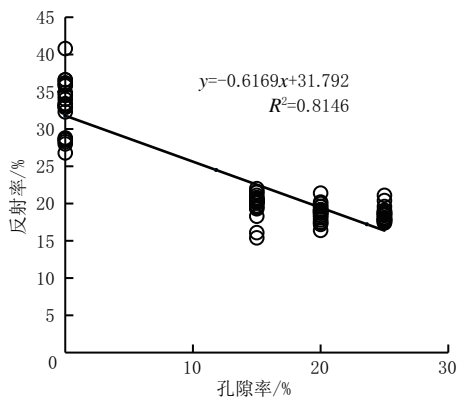


图3 孔隙率与反射率的拟合关系

研究发现,试件的面层材料会影响反射率。透水试件表面粗糙,太阳光照射时,由于表面不平整,会产生漫反射,将辐射分散到各个方向,从而减弱了特定方向的反射。相较之下,非透水试件的表面较为平滑,使得反射的太阳辐射集中在特定方向上。有文献发现,通过对灰色陶瓷透水砖、普通混凝土透水砖、再生混凝土透水砖和透水混凝土等不同透水材料的反射率进行测量,发现这几种灰色透水材料的反射率相差不大。相较之下,密实混凝土的反射率更高,是因为其浅色和光滑的表面结构。这一结果表明,透水材料的反射性能与表面特征密切相关,特别是颜色和粗糙度^[9]。

2.2 反射率对热环境参数的影响分析

图4所示为透水混凝土试件在不同时间点的表面温度变化趋势对比情况。由图可知,随着环境温度的升高,各试件的表面温度也随之上升。试件的表面温度由低到高所对应的试件孔隙率依次为15%、20%和25%的透水混凝土。各试件其表面温

度差约为2℃,透水试件的反射率随孔隙率增大而减小,对应的试件表面温度升高。其原因可能在于,当太阳辐射照射到试件表面时,不同反射率的透水试件具有开放的多孔结构,而试件的热传导主要通过孔隙内介质的热传递实现。随着试件孔隙率增加,热传导路径被低导热系数的孔隙结构打断,导致试件导热系数降低,并使材料内部的热阻增大,当热量在试件表面附近积聚,导致表面温度升高。因此,试件孔隙率越大,其粗糙度导致反射率降低,但孔隙率越大,试件导热系数降低,热阻增大,则吸收的热量难以传导,试件表面温度升高。赵昕等^[18]通过对不同材料和不同反射率的下垫面如沥青、水泥和涂层表面温度的测定,发现涂层路面具有最高的反射率,且表面温度最低。因此,提升路面反射率被认为是一种有效降低路面温度的方法。李朝昌等^[19]在测量不同反射率的涂层路面温度时发现,反射率为0.052的样本吸收了约95%的太阳辐射能量,其高吸热特性使其表面温度显著升高。当在混凝土试样表面涂上热反射涂层时,试样表面温度的降幅可达到12.3℃,这是由于高反射率涂层能够反射更多的太阳辐射,从而减少路面吸收的辐射量,抑制了路面温度的升高。

图5所示为不同试件在距地表0.2 m高度处的平均辐射温度变化情况。结果显示:0.2 m处平均辐射温度随着孔隙率的增大而逐渐降低,其温度高低依次对应孔隙率为15%、20%、25%的试件。其可能的原因是,透水混凝土试件表面粗糙,能够对太阳辐射产生漫反射效应,使辐射向周围环境各个方向扩散。孔隙率越大,一定范围内太阳辐射量就越小,因此0.2 m处平均辐射温度越低。

3 结 论

本文基于透水下垫面的现场对比实验研究,分析不同孔隙率透水下垫面的反射率特性,以及对热环境参数的影响,结论如下。

- (1)不同孔隙率的透水混凝土试件的反射率平均值分别为:15%时为0.203 9,20%时为0.187 0,25%时为0.185 0。表明反射率随孔隙率的增大而减小。
- (2)反射率与孔隙率存在一定相关性,反射率随孔隙率增大而减小,孔隙率增大1%,反射率则减少0.617%。
- (3)透水试件的反射率随孔隙率增大而减小,对

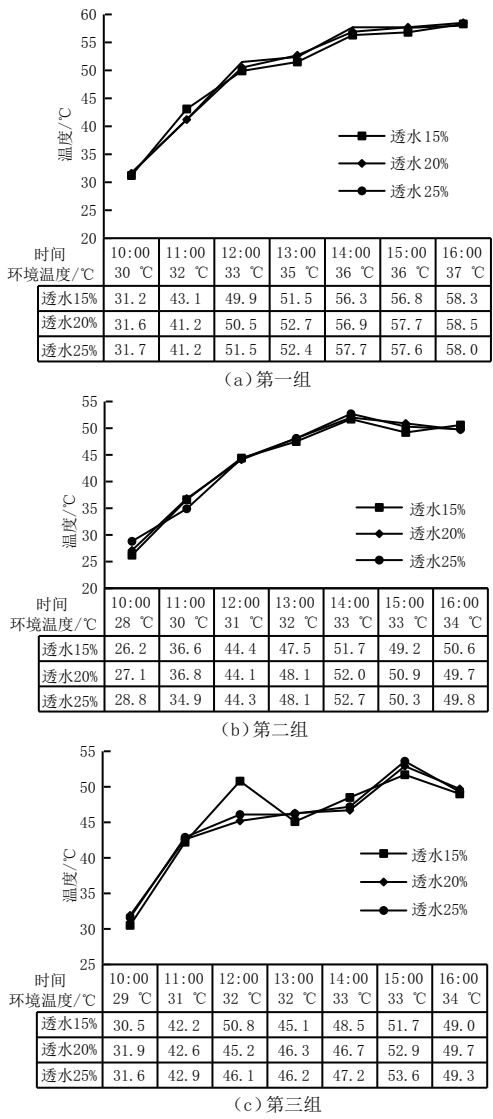


图4 各试件表面温度变化对比图

应的试件表面温度升高。

(4)透水试件0.2 m处平均辐射温度随孔隙率增大而降低。选择孔隙率较高的透水混凝土作为下垫面,可以在一定程度上有效降低室外环境的温度。

本文主要对夏季白天一定时间段内下垫面反射率对室外热环境参数影响进行了对比实验研究,后续还需对季节变化和夜间效应下反射率对热环境的影响进行研究,同时,在配置不同孔隙率的透水混凝土试件时,还需进一步细化配比。后续研究还需综合考虑多种因素配置或透水材料的热湿物理性能对热环境的影响作用,提出改善室外热环境的建议。

参考文献:

[1] 杨雅君,邹振东,赵文利,等.6种城市下垫面热环境效应对比研究[J]. 北京大学学报(自然科学版),2017,53(5):881-889.
[2] LI K, ZHANG Y, ZHAO L. Outdoor thermal comfort and activities in the urban residential community in a humid subtropical area of China [J]. Energy and Buildings, 2016(133): 498-511.

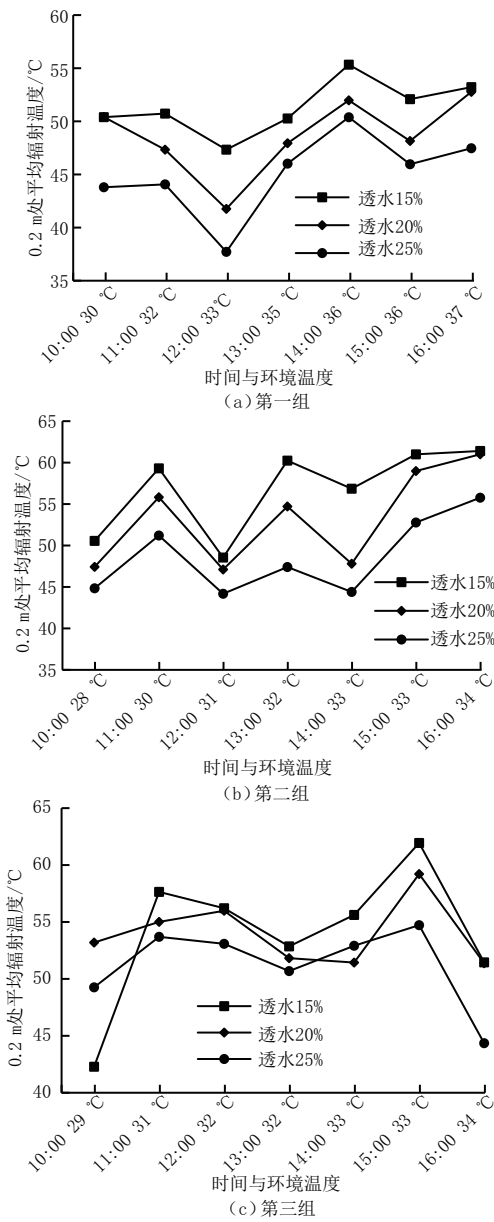


图5 各试件0.2 m处平均辐射温度变化对比图

[3] SHOOSHTARIAN S, RIDLEY I. The effect of physical and psychological environments on the users thermal perceptions of educational urban precincts [J]. Building and Environment, 2017(115): 182-198.
[4] XU M, HONG B, MI J, et al. Outdoor thermal comfort in an urban park during winter in cold regions of china[J]. Sustainable Cities and Society, 2018(43): 208-220.
[5] LAI D, GUO D, HOU Y, et al. Studies of outdoor thermal comfort in northern China[J]. Building and Environment, 2014(77): 110-118.
[6] NIU J, LIU J, LEE T, et al. A new method to assess spatial variations of outdoor thermal comfort: Onsite monitoring results and implications for precinct planning [J]. Building and Environment, 2015(91): 263-270.
[7] 熊珂,张雅茹,何宝杰.湿热地区遮阳形式对校园热环境的影响研究[J]. 西部人居环境学刊,2024,39(1): 149-156.
[8] CJJ 37—2016,城市道路工程设计规范[S].
[9] 汪俊松.湿热地区透水铺装蒸发降温特性研究[D]. 广州:华南理工大学,2019.

(下转第 29 页)