

DOI:10.11918/201902103

# 彩色路面反射率和内部温度的室内测试分析

陈俊<sup>1</sup>,周政<sup>1</sup>,孙志林<sup>2</sup>,张军辉<sup>2</sup>,王真<sup>3</sup>

(1. 河海大学 土木与交通学院, 南京 210098; 2. 公路养护技术国家工程实验室(长沙理工大学), 长沙 410114;  
3. 北京市政路桥正达道路科技有限公司, 北京 100071)

**摘要:** 为准确评价彩色路面材料的反射性能,以双辐射传感器为基础,测试了室外路面反射率,分析了太阳入射强度、传感器高度、入射角度、测点周边环境对反射率测试结果的影响;针对反射率室外测试受环境影响显著的问题,开发了反射率和温度的室内测试系统,对6种常见颜色路面材料的反射率和内部温度进行了测试,并与水泥混凝土、沥青混合料进行了对比。结果表明:太阳入射强度、入射角度对路面反射率室外测试影响极大,强度越大、入射角度越大,反射率测试结果越大;红、黄、蓝、绿4种彩色路面材料的反射率为20%~25%,高于开级配沥青混合料5.8%、密级配沥青混合料5.4%、多孔水泥混凝土16%,略低于密实水泥混凝土32%的反射率;相同辐射条件下,彩色路面材料内部温度普遍低于沥青混合料和多孔水泥混凝土,绿色路面材料具有最佳的降温效果。

**关键词:** 道路工程;彩色路面;太阳辐射;室内测试;反射率;内部温度

中图分类号: U414

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2020)09-0159-08

## Laboratory measurement for albedo and internal temperature of colored pavement

CHEN Jun<sup>1</sup>, ZHOU Zheng<sup>1</sup>, SUN Zhilin<sup>2</sup>, ZHANG Junhui<sup>2</sup>, WANG Zhen<sup>3</sup>

(1. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. National Engineering Laboratory of Highway Maintenance Technology (Changsha University of Science & Technology), Changsha 410114, China; 3. Beijing Municipal Road and Bridge Zhengda Road Technology Co., Ltd., Beijing 100071, China)

**Abstract:** In order to evaluate the reflective performance of colored pavement materials accurately, factors affecting the field measurement of albedo were tested by a double pyranometer outdoors, which include solar radiation intensity, height of pyranometer, incident angle, and surrounding conditions. A new albedometer for laboratory testing of albedo and internal temperature was developed to overcome the negative effects of field measurements. Six common colored pavement materials were tested and compared with cement concrete and asphalt mixture. Results show that solar incident intensity and incident angle had great influence on the field measurement of albedo. The greater the intensity and incident angle were, the greater the measured albedo was. The albedo of red, yellow, blue, and green pavement materials was 20%–25%, which was higher than that of open-graded asphalt mixture (5.8%), dense-graded asphalt mixture (5.4%), and porous cement concrete (16%), and slightly lower than that of dense cement concrete (32%). Under the same radiation conditions, the internal temperature of the colored pavement material was generally lower than that of asphalt mixture and porous cement concrete, whereas green pavement materials had the best cooling effect.

**Keywords:** road engineering; colored pavement; solar radiation; laboratory measurement; albedo; internal temperature

随着城市建设规模的扩大和建筑物密度的提高,夏季城市的热岛效应日趋显著,严重降低了人体舒适度,危害了居民身体健康。在城市热岛效应的影响因素中,除建筑物的高度和密度、车辆排放热量、植被覆盖率、人体感知等之外,路面对太阳辐射的低反射率不容忽视<sup>[1-2]</sup>。不仅如此,较低的反射率还造成大量的太阳辐射能被路面吸收,内部蓄热量增加,造成更

严重的热岛效应<sup>[3-4]</sup>,同时路面结构内部温度大幅提升,更容易产生车辙、拥包等高温损坏<sup>[5-8]</sup>。

针对路面反射率低、吸热量大的问题,近年来一些学者对路面材料反射率、热反射涂层等进行了研究。文献[9]采用近红外分光光度计对沥青混合料试件的切片进行反射率室内测试。文献[10]使用双辐射传感器进行了路面反射率室外测试,并与室内测试结果进行了比较,发现室外测试得到的反射率均小于室内结果,分析认为近红外分光光度计法采用的混合料平整切片忽视了构造深度,淡化了颜色,双辐射传感器法更符合实际。文献[11]采用双辐射

收稿日期: 2019-02-26

基金项目: 公路养护技术国家工程实验室开放基金(kfj180107)

作者简介: 陈俊(1981—),男,博士,副教授

通信作者: 陈俊, chen\_jun2728@163.com

传感器测试了太阳辐射下水泥和沥青路面的反射率,但发现采用双辐射传感器的室外测试结果可能受太阳入射角度、辐射强度等影响. 可见,上述两种方法各有优缺点,但双辐射传感器法比近红外分光光度计法更符合实际,然而其测试结果受外界环境的影响并不明确. 此外,以  $TiO_2$  为填料的热反射涂层、以浅色集料铺筑路表层等形式的降温路面也得到了初步研究,并采用上述两种方法对其反射率进行了系统测试与分析<sup>[12-15]</sup>.

近年来,彩色路面越来越多的应用于城市广场、小区道路、停车场等场合,尤其与多孔路面结构相结合,铺筑的彩色多孔路面,不仅发挥了美化道路环境、提升视觉效果、诱导交通、警示安全的效果,还起到排水、抗滑、降噪的作用<sup>[16]</sup>. 但是,目前太阳辐射下彩色多孔路面的反射率、内部温度等均没有得到系统地研究,与传统路面相比,彩色多孔路面对城市热岛效应的影响,尚不明确.

本文采用双辐射传感器方法,室外测试了不同辐射强度、传感器高度、太阳入射角、测点环境下路

面反射率,分析了上述因素对路面反射率测试的影响规律;针对室外测试受环境影响大的问题,开发了反射率室内测试系统,测试了 6 种颜色路面材料的反射率和内部温度,并与黑色沥青混合料和灰色水泥混凝土进行了对比.

### 1 路面反射率测试的影响因素分析

根据文献[11]的研究,温度、风速等对路面反射率测试没有影响,本文将分析太阳入射强度、传感器高度、太阳入射角度和周围环境对反射率测试结果的影响. 测试采用如图 1 所示的双辐射传感器,两个传感器测试的波长均为  $0.3\sim 3\ \mu\text{m}$ ,其中朝上的入射传感器,测试太阳辐射的入射强度,朝下的反射传感器,测试由路面反射出的辐射强度,反射率计算公式为

$$A = \frac{R}{I} \times 100\%. \quad (1)$$

式中:  $A$  为反射率;  $R$  为反射强度,  $\text{W}/\text{m}^2$ ;  $I$  为入射强度,  $\text{W}/\text{m}^2$ .

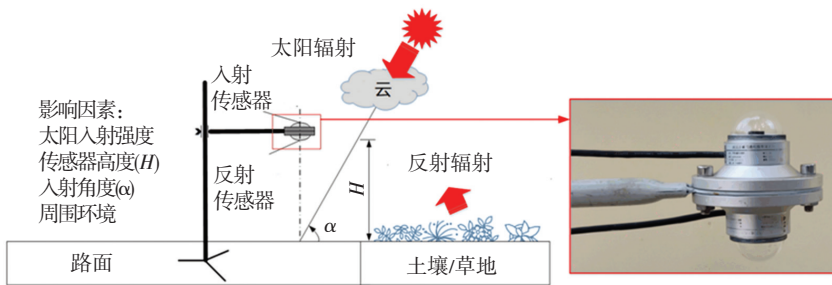


图 1 室外反射率测试的潜在影响因素

Fig.1 Potential factors affecting field measurement of albedo

#### 1.1 太阳入射强度对反射率的影响

在传感器高度为 80 cm 时,分别在 2018-08-14(晴)和 2018-08-15(多云)的午间(12:00—12:10),测试了某多孔沥青路面的入射和反射强度,并计算了反射率,结果如图 2 所示. 可以发现,不论是晴朗还是多云天气,太阳入射强度都会产生很大波动,原因主要是测试时间段内大气层中云量出现了较大的变化. 此外,由图 2 还可以看

出,反射率出现了与太阳入射强度相当的波动,太阳入射强度越大反射率越大,入射强度越小反射率越小. 在晴天,随着入射强度从  $1\ 376\ \text{W}/\text{m}^2$  减少到  $735\ \text{W}/\text{m}^2$ , 10 min 内测得的反射率从 9% 下降到 4%; 多云天气下,随着入射强度从  $1\ 005\ \text{W}/\text{m}^2$  减少到  $543\ \text{W}/\text{m}^2$ , 反射率从 6.5% 下降到 2%. 这表明即使在晴天条件下,天气条件(云量)对反射率测试结果也有显著影响.

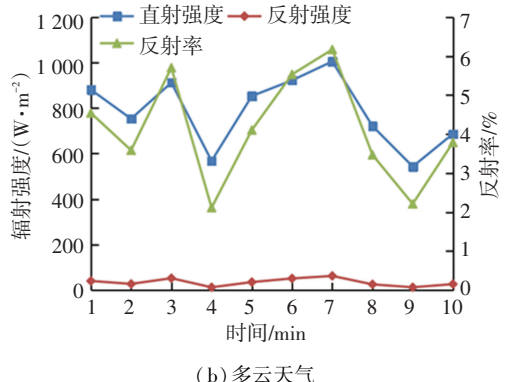
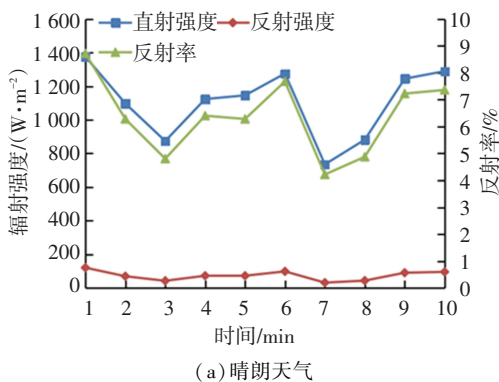


图 2 在晴朗和多云天气下辐射数据在 10 min 内的变化

Fig.2 Variation of radiation data within ten minutes in sunny and cloudy weather

### 1.2 传感器高度对反射率的影响

选取夏季晴天正午时分,在沥青路面同一点分别进行4种高度(20、40、60、80 cm)的反射率测试.每个高度下,10 min内测试得到的入射和反射强度如图3所示.可以看出,与图2类似,反射强度和反射率随着入射强度的波动而波动,为此以10 min内

的平均值表征该高度下的反射率值.4个高度下(20、40、60、80 cm)测试的反射率均值分别为6.19%、5.82%、5.97%、6.38%,路面反射率与传感器高度之间没有明显的关系,这表明在80 cm高度以内,传感器高度对反射强度和反射率的测试值没有影响.

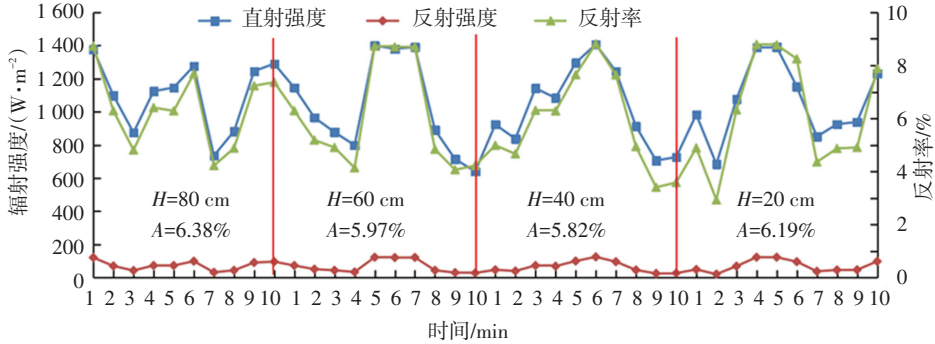


图3 传感器高度对反射率的影响

Fig.3 Influence of height of pyranometer on albedo

### 1.3 太阳入射角对反射率的影响

测试不同入射角度(25°、70°、110°、155°)下的路面反射率,由于地面某点的太阳入射角度取决于该点的经纬度、海拔高度、日期和当地时间,当测试点固定时,太阳入射角只与测试时间有关.对应的测试时间计算公式为

$$t_a = t_1 + \frac{12 - t_1 + t_2}{180} \cdot \alpha \quad (2)$$

式中:α为太阳入射角度;t<sub>1</sub>、t<sub>2</sub>分别是测试当日的日

出和日落时间,2018-08-14的日出和日落时间分别是5:29和18:49.

上述4个入射角下测得的反射率如图4所示.入射角25°和155°时(早晨和傍晚)的入射强度远低于午间入射角70°和110°时的入射强度,而早晚测得的反射率却高于午间测得的反射率.可见,入射角对反射率测试影响显著,低入射角将产生较大的反射率.

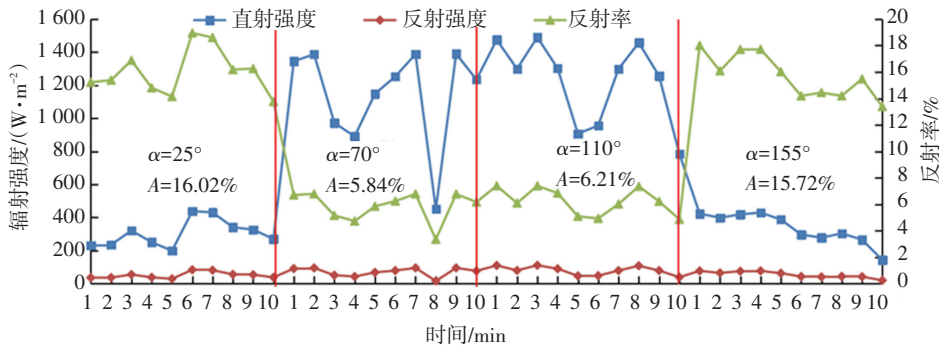


图4 在不同入射角下的太阳反射率

Fig.4 Solar reflectivity at different incident angles

为了分析入射角度对反射率测试的影响,在夏季晴天正午,将传感器垂直放置在太阳光下,然后在5 min内逆时针缓慢转动90°,每隔5°记录一次入射强度,其结果见图5.可以发现,在太阳不同入射角下测得的入射强度差异显著,入射角越小入射强度越小.入射强度测试值随太阳入射角显著变化的特点,使得必须在同一太阳入射角下,测得的入射强度及由此计算的反射率才有意义,而每次室外测试都必须采用同一入射角显然不现实.

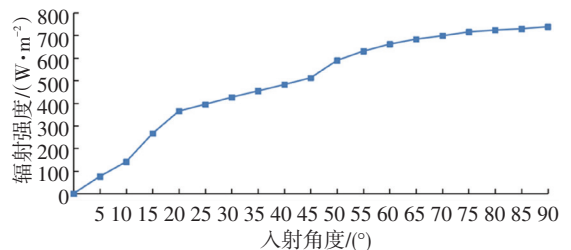


图5 在不同入射角度下的入射强度

Fig.5 Incident intensity at different incident angles

### 1.4 周围环境对反射率的影响

为了分析测点周围环境(草地或裸露土壤)对路面反射率测试结果的影响,在传感器高度为 20、40、60、80 cm 时,分别测试了草坪和土壤距路面测点 20、30、40 cm 时的反射率,结果如图 6 所示. 在入射强度为  $1\ 200\sim 1\ 250\ \text{W}/\text{m}^2$  时,草地和土壤的反射率分别为 22.0% 和 30.1%,均大于测点路面本身的反射率. 当传感器高度相同时,路面反射率随着测点与草地和土壤之间距离的减小而增加. 当测点与草地和土壤的距离减小到 20 cm 时,测得的反射率分别为 12% 和 15%,远离草地和土壤(40 cm)测试的反射率约 6%. 这表明周围草地和土壤影响了路面反射率的测试值,其原因是随着双辐射传感器高度的增大,朝下的反射传感器的测试范围增大,当其增大的范围包含测点周边草地或裸露土壤时,反射传感器采集的光辐强度并非路面测点的反射强度,而是测点和周边草地或土壤反射强度的综合,从而影响路面反射率测试的准确性. 此外,在 40 cm 和较远距离处测试的反射率没有明显差异,说明为了避免周围环境对反射率的影响,测点与周围土壤和草地的距离至少大于 40 cm.

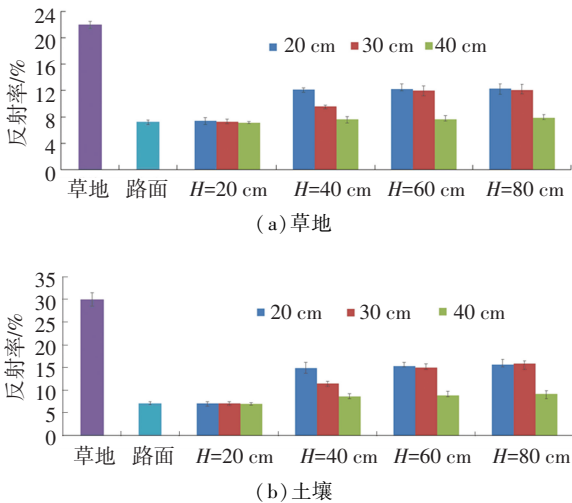


图 6 距草地与土壤不同距离下的路面反射率  
Fig.6 Albedo of pavement at different distances from grass and soil

## 2 试验测试装置和方法

### 2.1 测试装置

考虑到太阳入射强度、入射角度、周围环境等室外条件对路面反射率测试存在较大影响,本文基于双辐射传感器开发了一套室内测试装置,包括光源、反射率测试系统和测温系统,如图 7 所示. 该装置不仅能室内测试光照条件下路面材料的反射率,还能测试该光照强度下路面材料内部温度.

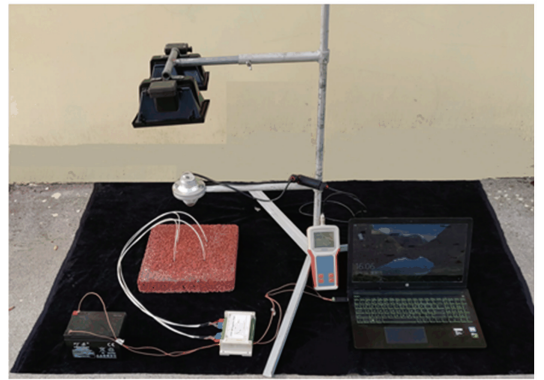


图 7 装置实物照片

Fig.7 Picture of customized equipment

光源由两个碘钨灯组成,功率均为 500 W,其波长为  $0.3\sim 2.5\ \mu\text{m}$ ,采用此波长范围碘钨灯的理由是:抵达地表的太阳光中,辐射能量主要位于此波长范围内,且该波长范围在辐射传感器能接收的波长范围内. 碘钨灯始终保持竖直向下照射,通过调整碘钨灯与试件上表面的垂直距离可以控制试件所接收的光照强度.

反射率测试系统由双辐射传感器、数据采集仪和吸光布组成. 吸光布是吸光率达 99.2% 的黑布,将其铺在室内地面上,可避免测试区域附近地面对反射率测试的影响. 光源和双辐射传感器由竖直三脚架相连,可以在三脚架上调节辐射传感器和碘钨灯高度. 测温系统由热电阻、温度采集模块、24 V 电源和计算机组成. 热电阻感应试板内温度变化,将温度信号转换成电信号,温度采集模块采集电信号并将其传输至计算机,计算机通过特定软件读取该信号,并显示成温度数值.

### 2.2 试验方法

#### 2.2.1 试板成型与热电阻布设

采用图 8 所示的带钉垫片,按轮碾法成型长宽高分别为 30、30、5 cm、含 4 个深度(1、2、3、4 cm)小孔的混合料板式试件. 将热电阻埋入孔洞中,即可测试混合料板在 4 个深度处的内部温度.

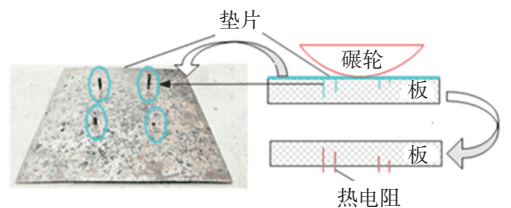


图 8 带孔混合料板的制备

Fig.8 Preparation of pored mixture slabs

#### 2.2.2 测试步骤

1) 将混合料试板放入温度恒为  $15\ \text{℃}$  的室内,底面垫隔热泡沫板后,置于吸光布的正中间,并将有孔洞的一面朝上.

2)室内保温 2 h 后,调整碘钨灯高度,确保碘钨灯与试板上表面之间的垂直距离为 25 cm(该高度下试板表面所接收的辐射强度约为 1 300 W/m<sup>2</sup>,与夏季晴天正午相接近).将双辐射传感器置于板正中间上方,确保朝下的传感器与板上表面的高度为 10 cm.

3)读取试板内部 4 个深度处的初始温度,打开碘钨灯电源,计算机每隔 1 min 自动读取并记录温度数据.

4)每隔 1 min 读取反射传感器的反射辐射数据,共计测试 5 min.取 5 min 内反射强度的平均值,作为板表面的平均反射强度.

5)移动碘钨灯和双辐射传感器,确保碘钨灯在传感器正上方,且距离入射传感器的高度为 25 cm.

并记录 5 min 内入射传感器的数值,取其平均值作为入射强度.按照式(1)计算试板的平均反射率.

### 3 试验材料

本文制备了 6 种颜色(红、黄、蓝、绿、灰、黑)的多孔水泥混凝土试板,长宽高分别是 30、30、5 cm.水泥采用 425 号普通硅酸盐水泥,集料选用玄武岩碎石,颜料选用一品颜料(美国)有限公司生产的氧化铁颜料:铁红 S190,铁黄 S313,铁蓝 S463,铁绿 S5605,铁黑 S722.这些氧化铁颜料的摩尔质量为 159.69 g/mol,细度粒径为 0.4 ~ 20 μm,熔点为 1 565 °C,沸点为 3 414 °C.颜料掺量均为水泥用量的 30%<sup>[17]</sup>.灰色多孔水泥混凝土不添加颜料,其余材料用量均一致.彩色多孔水泥混凝土配比见表 1.

表 1 彩色多孔水泥混凝土配比

Tab.1 Mix proportion of colored porous cement concrete

水灰比	不同筛孔通过率/%			配比(质量分数)/%				
	9.5 mm	4.75 mm	2.36 mm	水泥	粗骨料	水	颜料	减水剂
0.32	100	78.5	0	14.90	75.74	4.82	4.47	0.07

为了与其他类型的路面材料进行对比,本文还制备了开级配沥青混合料 OGFC-13、密级配沥青混合料 AC-13 及普通密实水泥混凝土试板. OGFC-13 和 AC-13 的集料为玄武岩,填料为石灰石矿粉, AC-13 采用 90#基质沥青, OGFC-13 采用改性沥青.改性沥青是由 90#基质沥青和 5.4% SBS 制备而成.

密实水泥混凝土采用 425 号普通硅酸盐水泥,集料选用单档粒径玄武岩碎石(粒径为 5~10 mm)、干燥黄沙.改性沥青基本性能、沥青混合料和密实水泥混凝土级配见表 2~4.采用上述材料及配比,本文制备的试板如图 9 所示.

表 2 改性沥青性能

Tab.2 Properties of modified asphalt

软化点/°C	25 °C 针入度/0.1 mm	5 °C 延度/cm	60 °C 粘性/(Pa · s)	老化后		
				质量损失/%	25 °C 针入度/0.1 mm	5 °C 延度/cm
90.5	63	34	145 008	0.001	53	28

表 3 AC-13 和 OGFC-13 级配及油石比

Tab.3 Gradation and asphalt binder content of AC-13 and OGFC-13

种类	不同筛孔通过率/%										油石比/%
	16 mm	13.2 mm	9.5 mm	4.75 mm	2.36 mm	1.18 mm	0.6 mm	0.3 mm	0.15 mm	0.075 mm	
AC-13	100	96.7	76.1	48.3	34.2	22.5	15.6	10.0	6.0	4.6	5.2
OGFC-13	100	93.3	64.6	28.0	19.4	13.7	10.6	8.1	6.2	5.2	5.4

表 4 密实水泥混凝土配比

Tab.4 Mix proportion of dense cement concrete

水灰比	砂率	配比(质量分数)/%			
		水泥	粗骨料	黄沙	水
0.4	0.31	19.2	50.5	22.6	7.8

考虑到同种颜色,色度不同,所造成的反射率测试结果也可能有差异.为此本文采用三原色——红(R)、绿(G)、蓝(B)定量表征试板的色度.三原色指色彩中不能再分解的 3 种基本颜色,三原色可以混合出所有的颜色,用 R、G、B 值表征颜色的亮度,数值越大,亮度越大.

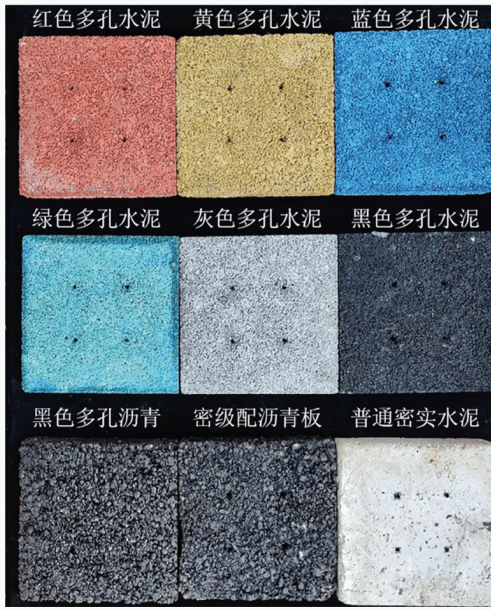


图 9 不同类型试板实物图示

Fig.9 Picture of test slabs of different types

在充分采光条件下,照相机高度、角度、聚焦等条件均一致,拍摄各试板图像,使用 Photoshop 软件计算各试板图像的 R、G、B 均值,结果见图 10.

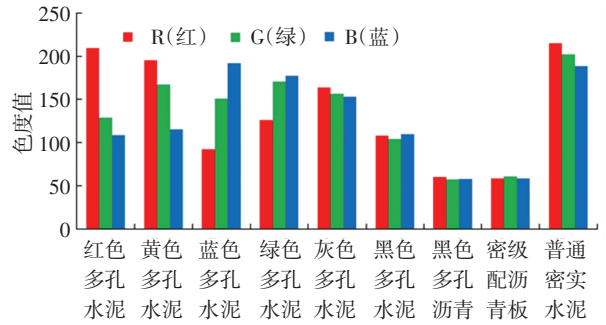


图 10 各试板色度值分布

Fig.10 Chromaticity distribution of test slabs

### 4 试验结果

#### 4.1 室内外反射数据比较与分析

对上述成型的混合料试件分别进行室外(夏季晴天正午 11:30—12:30)和室内反射率测试,测试时长 5 min,每分钟采集 1 组入射和反射强度,并计算反射率,结果见图 11. 可以发现,无论是入射强度、反射强度,还是反射率,在 5 min 内室外测试结果波动显著,而室内测试相对稳定,这表明采用本文开发的装置进行反射率的室内测试,能够获得稳定的测试结果.

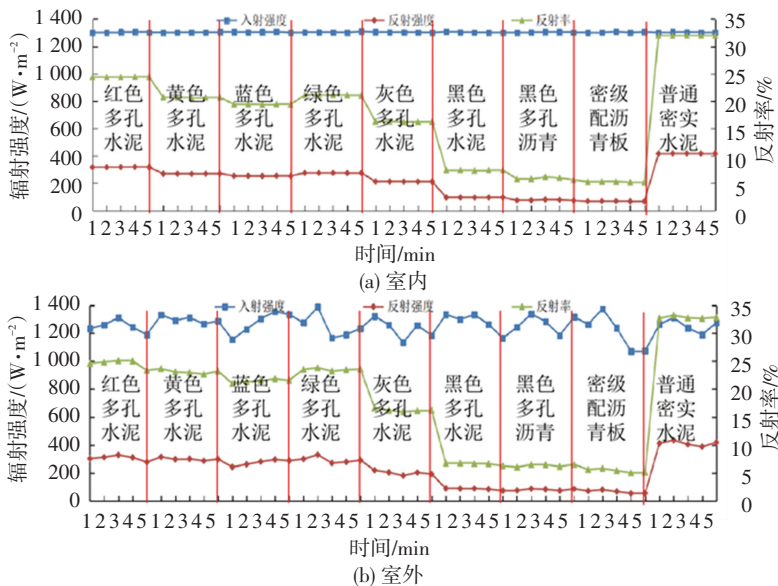


图 11 不同路面材料室内外测试的入射强度、反射强度及反射率

Fig.11 Incident intensity, reflection intensity, and albedo of different pavement materials in indoor and outdoor tests

为了分析不同路面材料反射率的差异,本文取 5 min 内测试结果的均值作为反射率,并计算了变异系数,结果如图 12 所示. 由图可知,室外与室内测试的路面材料反射率差异很小,9 种路面材料反射率室内测试值的大小排序与室外完全一致,且室内测试的反射率变异系数明显小于室外测试,表明采用本文研发装置进行的室内反射率测试,克服了天气条件、测点环境等因素的不利影响,可重复性高.

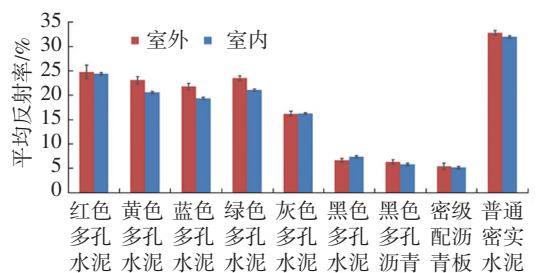


图 12 不同路面材料反射率的室内外测试结果

Fig.12 Albedo of different pavement materials in indoor and outdoor tests

### 4.2 内部温度分析

按照 2.2 的试验方法,在碘钨灯照射混合料试板 1 h 时间内,测试混合料内部 4 个深度处(1、2、3、4 cm)温度,结果如图 13 所示.可以发现,不同颜色混合料试板在碘钨灯照射的初始阶段,内部温度基本不变,且深度越深,该时间段越长,这反映了温度

传递的滞后性.各深度处温度上升速率也不相同,1 cm 处温度上升速度明显大于 4 cm 处.以 OGFC-13 的沥青混合料为例,1 cm 处温度在 1 h 内由 15 °C 上升到 48.5 °C,而 2、3、4 cm 处温度仅分别上升 27.1、18.9、16.4 °C,其他试板与之相似,均存在温度梯度,这与普遍认知的路面内部温度梯度相符.

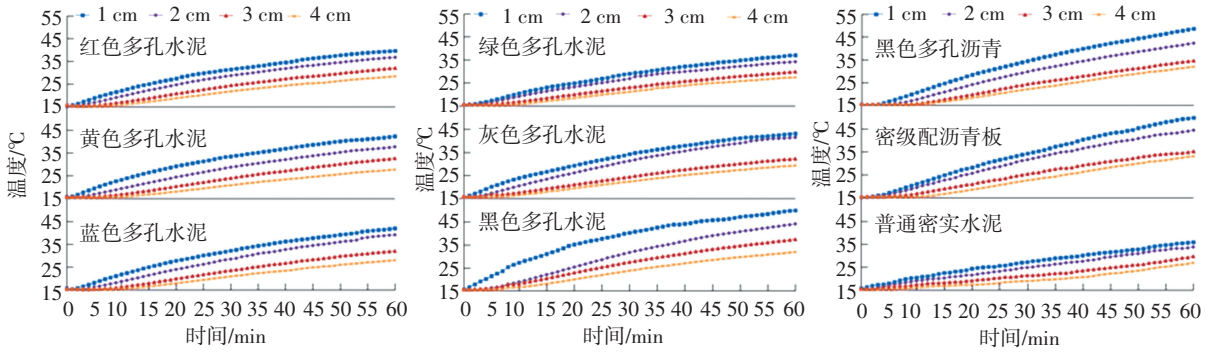


图 13 不同路面材料在照射 1 h 期间内部 4 处深度处温度变化

Fig.13 Temperature variation of different pavement materials exposed to radiation within one hour at four depths

不同颜色试板经照射 1 h 后,其温度上升幅度见图 14.由图可知,1 cm 处升温值最大,2、3、4 cm 处依次递减,并且 3、4 cm 处升温值变化很小.将各试板的升温幅度与图 12 反射率相比较,升温幅度基本与反射率结果相对应,表现为:反射率最高的普通密实水泥混凝土的升温幅度最小,而反射率最低黑色多孔水泥混凝土、多孔沥青混合料以及密级配沥青混合料升温幅度最大.这表明混合料表面反射率可以显著地影响其内部温度.此外,相同结构类型的路面材料中,4 种彩色多孔水泥混凝土升温幅

度均小于灰色多孔水泥混凝土和黑色多孔水泥混凝土,可见相同的光辐条件下彩色路面材料反射率更高,其内部温度更低,有利于降低热岛效应.

从图 14 还可以看出,红、黄、蓝、绿 4 种彩色路面材料中,绿色的升温幅度最小,基本与高反射率的密实水泥混凝土相接近.这是因为在太阳辐射至地球的可见光中,绿光波长范围内的总能量最大<sup>[18]</sup>,而绿色路面材料主要反射绿光,导致了其内部温度最低.从这个意义上讲,绿色路面材料对降低路面内部温度、缓解热岛效应最有效.

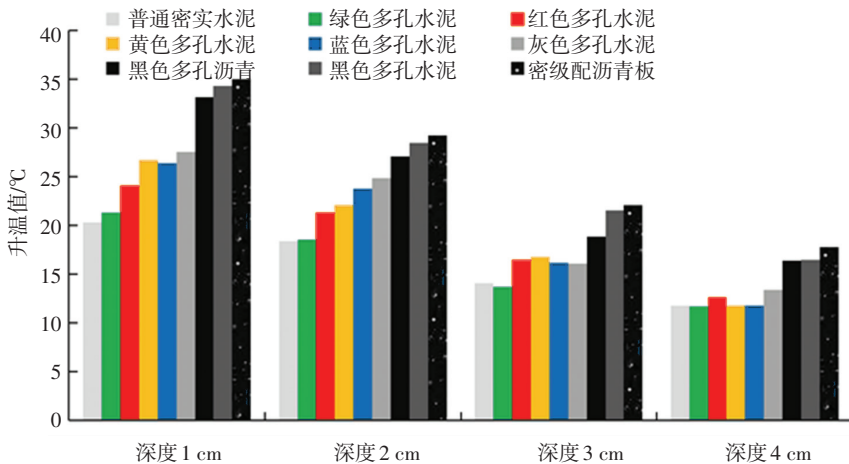


图 14 不同颜色路面材料在不同深度处的升温值

Fig.14 Temperature rise values of different colored pavement materials at different depths

## 5 结论

1) 太阳辐射强度、入射角度和周围环境对室外反射率测试具有显著影响,前两者影响入射强度测

试值,后者影响反射强度测试值,导致反射率的室外测试可控性和重复性差.

2) 研发的室内测试装置,能在室内准确获得一定光辐强度下的路面材料反射率及该光辐强度下路

面材料的内部温度。

3) 密实水泥混凝土、开级配沥青混合料和密级配沥青混合料的反射率分别为 32%、5.8%、5.4% 左右,级配对沥青混合料反射率几乎没有影响。

4) 相比于灰色多孔水泥混凝土 16% 的反射率,红、黄、蓝、绿多孔水泥混凝土的反射率为 20% ~ 25%,具有优良的反射太阳辐射和降低路面内部温度的能力。

## 参考文献

- [1] CARNIELO E, ZINZI M. Optical and thermal characterisation of cool asphalts to mitigate urban temperatures and building cooling demand[J]. *Building and Environment*, 2013, 60: 56. DOI: 10.1016/j.buildenv.2012.11.004
- [2] 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]. *土木建筑与环境工程*, 2016, 38(2): 111  
TAN Kanghao, QIN Yinghong, SU Yisheng, et al. Approach and procedure of measuring the albedo of urban prototype[J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2016, 38(2): 111. DOI: 10.11835/j.issn.1674-4764.2016.02.015
- [3] AKBARI H, MATTHEWS H D. Global cooling updates: reflective roofs and pavements[J]. *Energy Buildings*, 2012, 55: 2. DOI: 10.1016/j.enbuild.2012.02.055
- [4] LI H, HARVEY J T, HOLLAND T J, et al. The use of reflective and permeable pavements as a potential practice for heat island mitigation and storm water management[J]. *Environmental Research Letters*, 2013, 8(1): 015023. DOI: 10.1088/1748-9326/8/1/015023
- [5] YU B, LU Q. Estimation of albedo effect in pavement life cycle assessment[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2014, 64: 306. DOI: 10.1016/j.jclepro.2013.07.034
- [6] GHASAN S, MUNIANDY R. The effect of binder type and temperature differential on the rutting performance of hot mix asphalt[J]. *International Journal of Applied Engineering Research*, 2017, 12(17): 6841
- [7] 闫天昊, 黄晓明, 张志刚, 等. 沥青混合料线性黏弹性变形预估模型修正[J]. *东南大学学报(英文版)*, 2017, 33(1): 86  
YAN Tianhao, HUANG Xiaoming, ZHANG Zhigang, et al. Modification of the linear viscoelastic deformation prediction model of asphalt mixture[J]. *Journal of Southeast University (English Edition)*, 2017, 33(1): 86. DOI: 10.3969/j.issn.1003-7985.2017.01.014
- [8] 赵延庆, 黄大喜. 沥青混合料破坏阶段的黏弹性行为[J]. *中国公路学报*, 2008, 21(1): 25  
ZHAO Yanqing, HUANG Daxi. Viscoelastic behavior of asphalt mixtures with damage stage[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2008, 21(1): 25. DOI: 10.3321/j.issn:1001-7372.2008.01.005
- [9] 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  
WANG He. Properties and application of solar-reflective coating for asphalt pavement[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013
- [10] POMERANTZ M, AKBARI H, CHANG S C, et al. Examples of cooler reflective streets for urban heat-island mitigation: Portland cement concrete and chip seals[Z]. Berkeley: Lawrence Berkeley National Laboratory, 2003
- [11] 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. DOI: 10.1016/j.buildenv.2012.10.014
- [12] 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  
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. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1637.2013.05.002
- [13] 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. DOI: 10.1080/14680629.2015.1026383
- [14] 曹雪娟, 李瑞娇, 杨晓宇. 路用环氧类热反射涂料的研制及性能评价[J]. *化工新型材料*, 2016, 44(12): 140  
CAO Xuejuan, LI Ruijiao, YANG Xiaoyu. Preparation and performance evaluation of epoxy-based heat-reflective coating for the pavement[J]. *New Chemical Materials*, 2016, 44(12): 140
- [15] GUNTOR N A A, DIN M F M, PONRAJ M, et al. Thermal performance of developed coating material as cool pavement material for tropical regions[J]. *Journal of Material in Civil Engineering*, 2014, 26: 755. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000859
- [16] 沙爱民, 蒋玮. 环保型多孔路面材料设计理念与架构[J]. *中国公路学报*, 2018, 31(9): 1  
SHA Aimin, JIANG Wei. Design philosophy and architecture of eco-friendly porous pavement materials[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2018, 31(9): 1
- [17] 李永童. 一种彩色多孔混凝土及其制备方法: CN1293166A[P]. 2001-05-02  
LI Yongtong. A kind of colored porous concrete and its preparation method: CN1293166A[P]. 2001-05-02
- [18] 赵立华, 唐其环. 太阳辐射试验标准中的太阳光谱分布[J]. *装备环境工程*, 2017, 14(12): 65  
ZHAO Lihua, TANG Qihuan. Solar spectral distribution in solar radiation test standard[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2017, 14(12): 65. DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2017.11.013

(编辑 魏希柱)