

冯学茂,覃 仲,武建民,等. 高亮度铺装层对隧道中间段行车安全的影响[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2023, 43(1): 92-100.
FENG Xue-mao, QIN Zhong, WU Jian-min, et al. Influence of high brightness pavement layer on driving safety in middle section of tunnel[J].
Journal of Chang'an University(Natural Science Edition), 2023, 43(1): 92-100.

DOI:10.19721/j.cnki.1671-8879.2023.01.010

高亮度铺装层对隧道中间段行车安全的影响

冯学茂^{1,2}, 覃 仲², 武建民³, 张恒聪³, 左 闪³, 赫海涛³

(1. 中南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410083; 2. 广西新发展交通集团有限公司, 广西 南宁 530029;
3. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064)

摘 要:为研究高亮度铺装层对隧道中间段行车安全的影响,以路面反光效果和驾驶人视觉特性为基础设计了对比试验;通过不同光学仪器,测量 3 种高亮度铺装层的光学参数,研究其高亮度性能;通过照明计算软件和三维建模软件,制作了 3 种高亮度铺装层隧道内仿真驾驶视频;通过驾驶模拟器系统,采用眼动试验进行不同铺装层隧道内的模拟驾驶,收集驾驶人在不同铺装层隧道内驾驶的眼动数据,以相对安全距离、驾驶人对障碍物注视持续时间和驾驶人瞳孔直径作为生理和心理指标,研究驾驶人在高亮度铺装层隧道中间段驾驶的眼动特性;通过驾乘体验问卷调查,收集驾驶人在不同铺装层隧道内驾驶的主观感受,综合评价了 3 种高亮度铺装层对隧道中间段行车安全的影响。结果表明:高亮度铺装层具有良好的反光效果,钛白粉的掺加对高亮度铺装层的高亮度性能有较好提升作用,钛白粉掺量(质量分数,下同)为 70% 的高亮度铺装层 A 反光效果最佳,隧道中段行车安全性与铺装层的反光效果呈正相关,使用反光效果较好的高亮度铺装层有助于驾驶人在驾驶过程中更早发现障碍物、更容易辨别障碍物,有利于提高隧道中间段的行车安全性;隧道中段行车视觉舒适性与铺装层的反光效果呈负相关,使用高亮度铺装层后隧道内路面反射光线强烈,对驾驶人的视觉舒适度有一定影响。

关键词:隧道工程;行车安全性;高亮度铺装层;眼动特性;钛白粉;反光效果

中图分类号:U454 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-8879(2023)01-0092-09

Influence of high brightness pavement layer on driving safety in middle section of tunnel

FENG Xue-mao^{1,2}, QIN Zhong², WU Jian-min³, ZHANG Heng-cong³, ZUO Shan³, HE Hai-tao³

(1. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China;
2. Guangxi New Development Transportation Group Co., Nanning 530029, Guangxi, China;
3. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: To study the influence of high-brightness pavement layer on driving safety in the middle section of tunnel, a transverse contrast test was designed based on the reflective effect of road surface and drivers' visual characteristics, the optical of the three kinds of high-brightness

收稿日期:2022-10-09

基金项目:2021 年度广西壮族自治区交通运输行业重点科技项目

作者简介:冯学茂(1984-),男,广西博白人,高级工程师,工学博士研究生,E-mail:407352709@qq.com。

通讯作者:武建民(1971-),男,河北邢台人,副教授,工学博士,E-mail:l08@gl.chd.edu.cn。

pavement layers were measured with different optical instruments, and the brightness performance of the three kinds of high-brightness pavement layers were studied, three kinds of high brightness pavement layer tunnel simulation driving videos were made through lighting calculation software and 3D modeling software, the eye-movement data of drivers when they drive in different paving layer tunnels were collected, through using the driving simulator system and adopting the eye movement experiment to conduct simulated driving in different paving layer tunnels. The eye movement characteristics of drivers when they drive in the middle section of high-brightness pavement layer tunnels were studied, through taking the duration of driver's gaze on obstacles and the driver's pupil diameter as the physiological and psychological indicators under a relatively safe distance. The driver's subjective feelings when they take a tunnel drive at different paving layers were obtained through the questionnaire survey of driving experience, and the driving safety of three high-brightness pavement layers on the middle section of the tunnel was comprehensively evaluated. The results show that the high-brightness pavement layer has a good reflective effect, the addition of titanium dioxide has a better effect on the high brightness performance of high-brightness pavement layer, high-brightness pavement layer A with 70% titanium dioxide content (mass fraction, the same below) has the best reflective effect. The driving safety in the middle part of the tunnel is positively correlated with the reflective effect of paving layer. The using of high-brightness pavement layer with better reflective effect can help drivers find obstacles earlier and identify obstacles more easily in their driving, which is conducive to improving the driving safety of the middle section of the tunnel. However, the visual comfort of driving in the middle part of the tunnel is negatively correlated with the reflective effect of paving layer, the road surface in the tunnel reflects the light strongly after the use of high-brightness pavement layer, which has some influence on the visual comfort of drivers. 11 tabs, 4 figs, 21 refs.

Key words: tunnel engineering; driving safety; high brightness pavement layer; eye movement characteristic; titanium dioxide; reflective effect

0 引言

随着经济的快速发展,中国公路建设里程迅速增加。据统计,截至 2021 年底中国公路总里程达到 528.07 万 km,公路密度达到 55.01 km/10⁴ km²;全国公路隧道共 23 268 处、2 469.89 万延米,相比 2020 年末增加 1 952 处、269.96 万延米,其中特长隧道 1 599 处、717.08 万延米;长隧道 6 211 处、1 084.43 万延米^[1]。公路事业迅速发展的同时,隧道数量和里程也在急剧增加。然而,隧道内的光线较暗导致行车视线较差,使得隧道成为了事故多发路段,且发生事故后救援困难。隧道光环境是由洞外光环境和洞内照明环境等共同组成的。洞外亮度通常远高于洞内亮度,当驾驶人驶入或驶出隧道时,剧烈的明暗变化易导致驾驶人视觉难以及时适应,会引起“黑洞效应”和“白洞效应”,同时隧道内亮度均匀性较差会产生“斑马效应”^[2-3]。最终,隧道光环境所产生这些不利效应会降

低驾驶人的视觉功效、增加驾驶人的视觉负担,甚至造成驾驶人视线错觉的现象,进而诱发隧道交通事故,严重影响了隧道的行车安全,降低了行车舒适性和运营节能效果。因此,如何改善隧道的光环境,改善驾驶人在隧道行车时的视觉环境,提高隧道内行车安全性研究具有重要意义。

Amundsen 等通过调查大量交通事故报告,分析了公路隧道事故的主要区段,发现相比于普通路段,隧道交通事故发生频率更高、更为严重,且隧道入口段事故率最高^[4]。Yeung 等分析了新加坡高速公路隧道的 608 起交通事故,发现隧道进入段和隧道出口段发生交通事故频率明显高于隧道中间段,但是隧道中间段具有发生多车交通事故频率较高的特点^[5]。Pena-garia 分析了驾驶人视觉特性受不同照明条件的影响程度,提出行车安全受隧道照明条件的显著影响,照明设计应与人眼球的视觉机能相适应^[6]。张乐通过研究玻璃集料和浅色石料明色化铺装材料在隧

道中的应用,发现使用了明色化的铺装层材料隧道内路面平均亮度和反射系数的提升效果较为显著^[7]。商艳通过研究驾驶人在草原直线公路行驶的眼动数据,并采用模拟驾驶试验、理论分析与主观评价相结合的研究方法,确定了眨眼持续时间、注视持续时间、瞳孔直径、扫视持续时间、扫视幅度可作为表征草原公路直线路段单调性景观环境下眼动特性的敏感指标^[8]。胡月琦研究心智游移和心理负担对驾驶安全的影响及二者在隧道不同路段的变化,发现驾驶人心里负担程度与其对隧道的熟悉程度负相关,但隧道长度与驾驶人心里负担正相关,隧道越长,其行车综合风险越高^[9]。祁首铭通过设计实车驾驶试验,采集驾驶人的眼动、脑电特征指标和车辆运行指标数据,并与计算不同难度数学题过程中产生不同程度的认知负荷进行对比研究,发现注意力指数、放松度指数、瞳孔直径等在内的多因素车辆冲突风险辨识指标^[10]。李志勇等采用浅色石料和废钢化碎玻璃设计了 10 种明色化铺装材料,对其应用于隧道的路用性能和照明性能进行分析发现,与普通 AC-13 相比,明色化铺装材料能显著提升路面平均亮度,能提高隧道照明质量和隧道行车安全^[11]。

上述研究表明:隧道光环境不良和路面亮度不足,影响驾驶人行车视觉环境是危害隧道内行车安全的重要因素之一;主要通过改变隧道光照条件的方式改善隧道的光环境及路面亮度,但近年来随着对路面材料研究的深入,不少学者逐渐通过改变路面材料,即采用反光效果较好路面材料的方式来改善隧道光环境并提高路面亮度。本文提出的高亮度铺装层是通过使用一种自主研发的浅色环氧沥青作为胶结料,并以钛白粉替代部分传统矿粉制备的一种新型沥青混凝土铺装层。浅色胶结料和钛白粉的应用使得铺装层反光效果得到大幅度提高,且颜色

呈现出浅灰白色。研究相同的照明条件下,使用高亮度铺装层对提高隧道铺装层表面亮度的作用以及对隧道内光环境的影响,改善驾驶人在隧道行车的视觉环境,提高隧道的行车安全性,有重要的经济意义和社会意义。

1 高亮度铺装层材料组成

为了提高路面的反光效果,提高隧道照明效率,改善驾驶人隧道内的行车视觉环境,提高行车安全性,拟从胶结料和细集料颜色的角度出发,选用自主研发的浅色环氧沥青为胶结料,颜色较浅的石灰岩及高亮的钛白粉制备高亮度铺装层,粗集料为秦皇岛某钢铁公司的转炉热焖渣及玄武岩,技术指标见表 1、表 2,石灰岩作为细集料,加入一定比例的钛白粉,钛白粉与矿粉质量比分别为 70%、50%和 30%,通过拌和、碾压成型的方式制备而成的新型沥青混凝土铺装层 A~铺装层 C 如图 1 所示。

表 1 浅色环氧沥青技术指标

Tab. 1 Technical indexes of light color epoxy asphalt

测试指标	布氏旋转黏度/(Pa·s, 135℃)	针入度(25℃, 5 s, 100 g)/0.01 mm	软化点/℃	延度(5℃, 5 cm·min ⁻¹)/cm	含蜡量/%
测试结果	1.74	49.4	50.4	89.5	0.72
技术要求	≤3.00	40.0~60.0	≥49.0	≥80.0	≤2.20

2 高亮度铺装层高亮度性能评价及色度测定

2.1 高亮度铺装层反射比

按照文献[12]推荐的间接法进行高亮度铺装层反射比测量,采用照度计分别测出被测材料表面入射照度和反射照度,由下式计算出其表面反射比

表 2 粗集料的物理力学性能指标

Tab. 2 Physical and mechanical indexes of coarse aggregate

指标	钢渣				玄武岩		
	不同粒级(mm)下的参数			技术要求	不同粒级(mm)下的参数		技术要求
	(13.2,16]	(9.5,13.2]	[4.75,9.5]		(9.5,16]	[4.75,9.5]	
表观密度/(g·cm ⁻³)	3.36	3.39	3.39	≥2.90	3.04	3.02	≥2.60
压碎值(质量分数)/%	14.60			≤26.00	13.60		≤26.00
洛杉矶磨耗损失(质量分数)/%	13.20			≤26.00	12.40		≤28.00
坚固性(质量分数)/%	4.80	4.80	3.60	≤12.00	4.90	40.00	≤12.00
吸水率(质量分数)/%	1.82	1.86	2.01	≤3.00	0.449	0.467	≤2.000
磨光值	58.00			≥45.00	58.00	≥45.00	
针片状含量(质量分数)/%	3.20			≤12.00	5.43	5.21	≤15.00
浸水膨胀率(体积分数)/%	1.11			≤2.00			

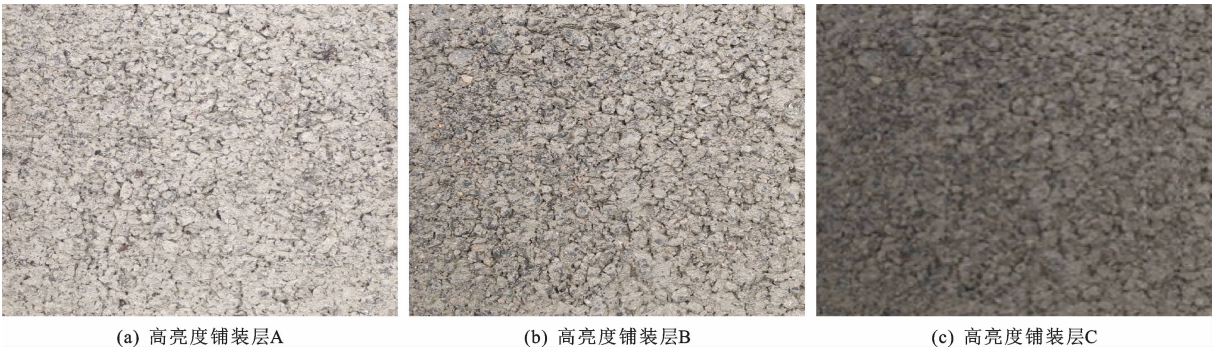


图 1 高亮度铺装层

Fig. 1 High brightness pavement layers

$$\rho=\frac{E_f}{E_R}$$
式中: ρ 为反射比; E_f 为反射照度(lx); E_R 为入射照度(lx)。

经计算,3 种高亮度铺装层反射比见表 3。由表 3 可知:所有的高亮度铺装层表面反射比均大于普通沥青混凝土铺装层,3 种高亮度铺装层反射比平均值为 0.151 6、0.204 2 和 0.246 0,为普通沥青混凝土铺装层的 113.95%、153.49%和 184.91%,但仅为水泥混凝土铺装层反射比的65.99%、88.89%和 107.09%。

表 3 不同铺装层反射比实测结果

铺装层名称	测量区域					平均值
	1	2	3	4	5	
高亮度铺装层 A	0.225 2	0.257 0	0.251 2	0.232 0	0.265 0	0.246 0
高亮度铺装层 B	0.182 5	0.229 7	0.202 7	0.190 5	0.215 6	0.204 2
高亮度铺装层 C	0.138 2	0.165 0	0.152 1	0.148 0	0.154 5	0.151 6
普通沥青混凝土铺装层	0.105 8	0.148 5	0.136 2	0.131 0	0.143 7	0.133 0
水泥混凝土铺装层	0.228 4	0.227 5	0.230 5	0.233 2	0.229 0	0.229 7

2.2 高亮度铺装层逆反射系数

逆反射系数的物理意义为单位面积在单位光照的条件下所产生的亮度值,反映了隧道行车条件下驾驶人对路面反光亮度的客观评价,可以用来定量评价高亮度铺装层的反光效果。逆反射系数的测量采用道路标线逆反射系数测定仪,测定结果见表 4。

由表 4 可知,所有高亮度铺装层逆反射系数均高于普通沥青混凝土铺装层,且小于水泥混凝土铺装层,其中高亮度铺装层 C 的逆反射系数与普通沥青混凝土铺装层相接近,高亮度铺装层 B 显著高于普通沥青混凝土沥青铺装层,显著低于水泥混凝土铺装层,高亮度铺装层 A 的逆反射系数与水泥混凝土铺装层相接近。3种高亮度铺装层反光效果均优

表 4 不同铺装层逆反射系数测量结果

Tab. 4 Measurement results of retroreflection coefficients of different pavement layers mcd · (lx · m²)⁻¹

铺装层名称	测量区域					平均值
	1	2	3	4	5	
高亮度铺装层 A	32	34	32	31	30	31.8
高亮度铺装层 B	24	22	31	19	21	23.4
高亮度铺装层 C	4	9	11	18	27	13.8
普通沥青混凝土铺装层	10	13	12	9	12	11.2
水泥混凝土铺装层	26	40	32	35	33	32.8

于普通沥青混凝土铺装层,但比水泥混凝土铺装层的反光效果依旧较低,3 种高亮度铺装层反光效果由大到小依次为铺装层 A、铺装层 B、铺装层 C。

2.3 高亮度铺装层色度测定

颜色是由亮度和色度共同表示的,色度是不包括亮度在内的颜色性质,它反映颜色的色调和饱和度^[13]。为进一步了解高亮度铺装层的光学特性并为后续建立高亮度铺装层隧道内行车视频,研究高亮度铺装层对隧道中间段行车安全性的影响奠定参数基础,本文使用 BM-7A 彩色亮度计直接测得 3 种高亮度铺装层的 XYZ 和 RGB 色度坐标。测试结果见表 5。

表 5 不同铺装层色度坐标测定结果

Tab. 5 Measurement results of chromaticity coordinates of different pavement layers

铺装层名称	XYZ 色度坐标	RGB 色度坐标
高亮度铺装层 A	(49.81,51.39,40.36)	(193,189,185)
高亮度铺装层 B	(43.48,46.23,37.50)	(175,183,179)
高亮度铺装层 C	(30.12,31.57,26.64)	(149,153,154)
普通沥青混凝土铺装层	(1.292,1.487,1.874)	(26,34,29)

由表 5 可知,3 种高亮度铺装层表面颜色的色调均接近中性色调,即黑、白、灰。根据相关文献可知^[14],不同色相的视觉舒适度依次为暖色调、中性色调、冷色调。因此,高亮度铺装层的颜色对驾驶人

视觉舒适性无明显不利危害。

3 基于眼动试验的高亮度铺装层隧道中间段行车安全

3.1 试验内容

由上文研究结果可知,高亮度铺装层具有良好的亮度特性,能显著提升隧道内路面亮度。因此,基于高亮度铺装层的高亮度特性,以相对安全距离、注视持续时间、瞳孔直径变化、以及驾乘舒适度作为主观评价指标,借助驾驶模拟器系统,通过眼动试验的人机交互方式开展隧道内使用高亮度铺装层对驾驶安全的研究^[15-17],眼动试验驾驶模拟场景见图 2。其中:相对安全距离 S 和对应的相对安全时间 T 为引入参数,相对安全距离 S 为发现障碍物时驾驶人所在位置与障碍物所在位置的纵向距离差;相对安全时间 T 为驾驶人发现障碍物的时间和车头到达障碍物所在位置的时间间隔。



图2 眼动试验模拟驾驶场景

Fig. 2 Eye movement experiment simulating driving scene

3.2 试验过程

3.2.1 仿真视频制作

基于高亮度铺装层反射比和色度坐标的测定结果,采用 Twinmotion 软件建立高亮度铺装层和普通沥青混凝土铺装层仿真隧道,制作匀速驾驶仿真视频。仿真隧道全长 700 m,设计时速 80 km/h,为单向双车道。经计算,仿真隧道中间段长 390 m,在 80 km/h 匀速状态下,隧道中间段的驾驶时长为 17.6 s。

3.2.2 驾乘体验问卷设计

问卷共分为驾驶人基本信息和高度铺装层驾乘体验调查两部分,通过问卷调查获取驾驶人对仿真视频真实程度,对路面亮度、障碍物可见度及视觉舒适程度的主观感受,进而从驾驶人的主观角度评价

隧道内使用高亮度铺装层对驾驶安全的影响。

3.2.3 被试选取

为保证试验严谨性,所有被试采用区域公开招募的方式进行。所有被试均保证身体健康,无红绿色盲等影响驾驶安全的疾病;拥有小汽车驾照 C1 或以上,有一定的驾驶经历;试验前 24 h 内睡眠充足,无饮酒、服用精神类药物等。被试在招募时被告知试验全部时长约 3 d/人,试验结束可以获取 450 元的劳务报酬,且整个试验过程完全自愿参加。经过筛选,最终试验共招募 35 名志愿者作为被试对象,其中 5 名男性志愿者因不适应模拟器出现视觉眩晕退出;最终试验人数为 30 名,男性 22 名,女性 8 名。要求被试试验前填写被试相关信息。经统计,相关信息见表 6~表 9。受西安地区 2021 年年底疫情的严重影响,被试对象多为在校男性研究生及少数其他人员,被试驾驶频率偏低。

表 6 被试年龄分布

Tab. 6 Age distributions of subjects

被试年龄段/岁	[20,30)		[30,40)		[40,50)	
	男	女	男	女	男	女
人数	11	5	6	2	5	1

表 7 被试驾龄分布

Tab. 7 Distributions of driving ages of subjects

被试驾龄/年	(0,1]		(1,5]		(5,10]		10 以上	
	男	女	男	女	男	女	男	女
人数	0	2	10	3	4	1	8	2

表 8 被试驾驶熟练度

Tab. 8 Subject's driving proficiencies

驾驶熟练度	专业		熟练		一般		不熟练	
	男	女	男	女	男	女	男	女
人数	3	0	11	1	6	4	2	3

表 9 被试驾驶喜好度

Tab. 9 Preference of test drive

驾驶喜爱度	热衷		偏好		一般		反感	
	男	女	男	女	男	女	男	女
人数	3	0	11	1	6	5	2	2

3.2.4 试验准则

(1)驾驶过程中须规范驾驶行为,不可出现玩手机或其他分心驾驶行为。

(2)为避免不同铺装层间的相互干扰且避免疲劳驾驶,禁止被试不间断的连续进行多种铺装层眼动试验,被试每完成 1 次铺装层相应眼动试验后,应进行 20 min 的休息,休息完成后方可进行下一步试验。

(3)试验为模拟隧道中间段驾驶行为,周围须屏蔽其他环境光源,如办公灯、台灯等。

3.2.5 试验步骤

具体试验步骤如下:

(1)试验前,所有被试按要求填写驾驶人基本信息;(2)试验人员和仿真视频准备好后,将仿真视频投放至驾驶模拟器系统显示平台;(3)根据被试是否带有眼镜、被试对象瞳孔位置、头部位置等,调试眼动仪摄像头位置捕捉被试瞳孔,根据被试观察视点位置校对眼动仪,完成仪器调整;(4)调试仪器完成,再次向被试对象及设备操作人员确认是否准备就绪,若准备就绪,则开始试验;(5)眼动仪采集数据,进行数据保存和标记,确认是否保存成功,被试进入休息时间;(6)被试在休息时间填写驾乘体验表对应的铺装层驾乘体验;(7)完成休息后,从步骤(2)开始另一种铺装层对应的眼动试验。

3.3 试验结果与分析

本试验使用 Smart Eye 眼动仪采集数据,采集频率为 60 Hz,采样间隔时间为 42 ms,系统通常滞后小于 50 ms;3 自由度头部跟踪,视觉矢量精度为 $0.15^{\circ}\sim0.5^{\circ}$;眼皮按 60 步张开。通过 Smart Eye 自带数据处理系统可获得模拟驾驶过程中驾驶人的眼动数据,如瞳孔直径、注视点位置、眼动轨迹等。

根据既有人眼视觉特性研究^[15,18],将已导出的眼动数据对应的试验录像以频率 60 Hz 逐帧分解为图片,通过视频录像和眼动数据对照的方式确定被试者在某一时间点的眼动数据,以开展后续视觉特性分析。每个试验录像约可分解为 2 100 张图片。

3.3.1 相对安全距离

通过视频录像分解图片和眼动数据逐一对照后,获取了 30 名被试在 80 km/h 行驶速度时不同铺装层隧道中模拟驾驶的平均相对安全时间 T ,并计算出相应的平均相应安全距离 S ,见表 10。

表 10 不同铺装层相对安全距离和时间计算结果

Tab. 10 Calculation results of relative safe distance and time of different pavement layers

铺装层类型	平均相对安全时间 T/s	平均相对安全距离 S/m
高亮度铺装层 A	10.30	228.98
高亮度铺装层 B	7.63	169.48
高亮度铺装层 C	6.52	144.86
普通沥青混凝土铺装层	6.01	133.33
水泥混凝土铺装层	8.79	195.27

从表 10 可知:相比于普通沥青混凝土铺装层,使用高亮度铺装层有助于驾驶人在驾驶过程中更早的发现障碍物,其中使用高亮度铺装层 A 的隧道中,驾驶人发现障碍物的时间最早,此时距车头驶到

障碍物位置时间间隔为 10.30 s,与障碍物所在位置的 道路纵向距离差为 228.98 m,为普通沥青混凝土 铺装层的 171.38%;使用高亮度铺装层 B、铺装层 C 的隧道中,驾驶人发现障碍物的时间次之,此时距车 头驶到障碍物位置时间间隔为 7.63、6.52 s,与障碍 物所在位置的 道路纵向距离差为 169.48、144.86 m, 为普通沥青混凝土铺装层的 126.96%和 108.49%。 相比于水泥混凝土铺装层,使用高亮度铺装层 A 有 助于驾驶人在驾驶过程更早的发现障碍物,平均相 对安全时间是水泥混凝土铺装层的 117.18%;但是 使用高亮度铺装层 B 和铺装层 C 时,平均相对安全 时间仅分别为水泥混凝土铺装层的 86.80%和 74.18%。

分析认为:高亮度铺装层具有较好的反光效果,在同一光照条件下,相比于黑色的普通沥青混凝土铺装层,障碍物与高亮度铺装层路面的对比度更大,对驾驶人的视觉刺激更强,因此能被更早的发现;水泥混凝土铺装层自身反光效果较好,因此只有使用反光效果比它更好的高亮度铺装层 A 时,才能更早的发现障碍物。

3.3.2 平均注视障碍物持续时间

视觉负荷、驾驶难度与平均注视持续时间成正比。基于此,本文以驾驶人对障碍物的平均注视持续时间作为评价指标,分析驾驶人在使用不同铺装层隧道内行驶时的视觉负荷、驾驶难度,进而研究隧道内使用高亮度铺装层对驾驶安全的影响。根据眼动仪所采集的眼动数据,获取 30 名被试在不同铺装层模拟驾驶时对障碍物的注视持续时间,统计结果见图 3。

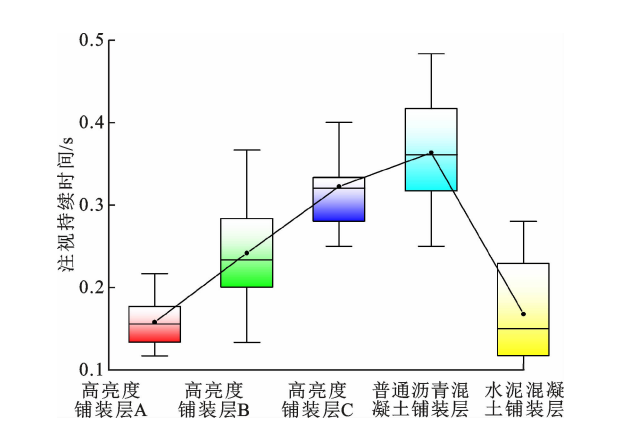


图 3 不同铺装层对应的平均注视持续时间

Fig. 3 Corresponding average fixation duration of different pavement layers

由图 3 可知:驾驶人在使用不同铺装层的隧道内行车时,对障碍物的注视持续时间由短到长依

次为高亮度铺装层 A、水泥混凝土铺装层、高亮度铺装层 B、高亮度铺装层 C、普通沥青混凝土铺装层；且在高亮度铺装层 A 的隧道内行车时，驾驶人对障碍物的注视持续时间与水泥混凝土铺装层的隧道内行车时相接近。相比于使用普通沥青混凝土铺装层的隧道，在使用高亮度铺装层的隧道内行车时，驾驶人的视觉负担更小，驾驶难度更低；在使用高亮度铺装层 A 的隧道内行车时，驾驶人的视觉负担最小，驾驶难度最低。路面亮度和隧道环境亮度与铺装层的反光效果成正比关系，因此使用反光效果良好的铺装层，可以提高路面亮度和隧道环境亮度，使驾驶人在更少的时间内获取行车信息；相比于其他几种铺装层，高亮度铺装层 A 的反光效果最佳，其所对应注视持续时间最短，可认为使用高亮度铺装层 A 有助于提高隧道内行车安全性。

3.3.3 瞳孔直径变化

瞳孔直径的变化具有高度敏感性，当驾驶人处于良好的精神状态时，瞳孔会表现放大或平稳状态，当驾驶人处于疲劳状态时，瞳孔为缓解疲劳而表现出缩小；当光线条件稳定时，瞳孔直径随着认知负荷的增加而扩大，即驾驶人需要努力去注视一个目标物时，其瞳孔直径会增大。瞳孔直径的变化可以反映驾驶人的疲劳特性和认知负荷。因此可通过瞳孔直径变化，分析驾驶人在不同铺装层隧道内行车时的精神状态和认知负荷变化，研究高亮度铺装层对行车安全性的影响。

不同驾驶人的瞳孔直径存在一定差异，因此其无法直接作为视觉应激特性和驾驶人精神状态的分析指标，但相同驾驶人在相同工况下的瞳孔直径大小均值可以反映驾驶人对不同铺装层的视觉应激特性和精神状态。根据眼动仪所采集的眼动数据，获取 30 名被试在不同铺装层模拟驾驶的瞳孔直径，统计结果见图 4。

由图 4 可知，不同铺装层对驾驶人的视觉刺激不同。从整体来看，驾驶人行驶在 3 种高亮度铺装层隧道的瞳孔直径均小于传统的普通沥青混凝土铺装层和水泥混凝土铺装层。根据亮度与瞳孔直径的相关性研究分析^[19-21]，这由 2 个方面原因造成的：一方面是由于高亮度铺装层具有良好的反光效果，在同样的光照条件下，驾驶人更容易发现障碍物，即驾驶人不需要更努力注视障碍物就可以轻易发现障碍物；另一方面是高亮度铺装层属于新型铺装层，相比于传统的铺装层结构，驾驶

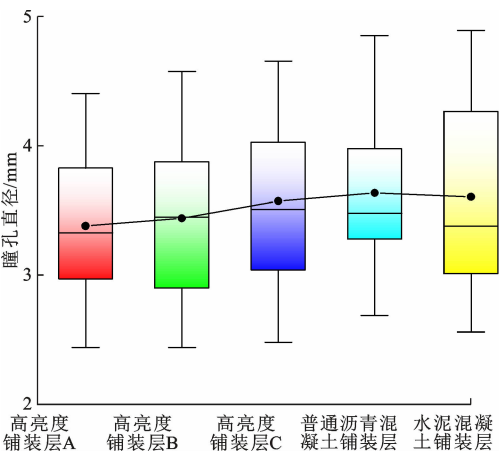


图 4 不同铺装层对应的平均瞳孔直径

Fig. 4 Corresponding average pupil diameter of different pavement layers

人受以往驾驶习惯和视觉习惯等影响，在使用高亮度铺装层的隧道中行车时更容易出现紧张、视觉不适等影响驾驶人精神状态的现象，因此使用高亮度铺装层的隧道行车时驾驶人瞳孔收缩、直径减小，更容易出现疲劳现象。

高亮度铺装层 A 的反光效果最佳，因此最容易发现障碍物，瞳孔直径最小；高亮度铺装层 C 反光效果最差，相对其他 2 种高亮度铺装层而言最难发现障碍物，需要更加努力去观察障碍物，所以瞳孔直径最大。但是当外界光线较强时，眼睛更容易产生疲劳感，需要缩小瞳孔来缓解疲劳，高亮度铺装层 A 反光效果最好，反射光线最强，最容易产生疲劳感，所以瞳孔直径最小；同理，高亮度铺装层 C 反光效果最差，驾驶人在使用高亮度铺装层 C 的隧道上行驶时产生的疲劳感最低，所以其瞳孔直径为 3 种高亮度铺装层中最大值。

3.3.4 驾乘体验

根据问卷调查结果得出所有被试对不同铺装层的各项驾乘体验指标的平均得分及对驾驶安全影响的合计得分见表 11。驾乘体验指标(很差=1，差=2，一般=3，好=4，很好=5)。

由表 11 可知：试验的 5 种不同铺装层仿真视频场景真实性评分的平均分均大于 3.5 分，可认为本次试验的场景真实性良好；相比于沥青混凝土铺装层的隧道环境亮度，使用高亮度对隧道环境的亮度具有一定的提升效果，但相比于使用水泥混凝土铺装层的隧道，仅高亮度铺装层 A 的得分较高，高亮度铺装层 B 和 C 该项得分均低于水泥混凝土铺装层，这与上文不同铺装层反光效果比较结果相一致；相比于沥青混凝土铺装层，使用高亮度铺装层隧道

表 11 驾乘体验问卷调查结果

Tab. 11 Questionnaire results of driving experience

驾乘体验指标		铺装层类型				
		高亮度铺装层			沥青混凝	水泥混凝
		A	B	C	土铺装层	土铺装层
仿真效果评价	场景真实性	4.07	3.73	3.75	3.80	3.83
对驾驶安全 的影响	路面可见度	4.07	4.00	3.47	3.13	4.17
	隧道环境亮度	4.20	3.93	3.60	3.33	4.13
	障碍物识别难度	3.93	3.53	3.07	2.60	4.20
	路面亮度的感知	3.83	3.20	2.87	2.40	4.13
	舒适度的感知	3.77	3.80	3.93	4.20	4.13
	驾驶安全综合得分	19.80	18.46	16.94	15.66	20.76

障碍物识别难度明显降低,表明高亮度铺装层的使用有助于驾驶人更容易发现障碍物,提高驾驶安全性;驾驶人对高亮度铺装层 A 及水泥混凝土铺装层的路面亮度感知效果较好,得分均超过 3.5 分,对高亮度铺装层 B 路面亮度感知效果一般,得分为 3.07 分,对高亮度铺装层 C 和沥青混凝土铺装层的感知效果较差,2 种铺装层该项得分均不超过 3.0 分;对于舒适度感知指标,3 种高亮度铺装层得分均不超过 4.0 分,低于 2 种传统铺装层,表明相比于传统的铺装层,高亮度铺装层的行车视觉舒适度较差;3 种高亮度铺装层的驾驶安全综合得分均高于普通沥青混凝土铺装层,而低于水泥混凝土铺装层,隧道内使用高亮度铺装层的安全效果优于沥青混凝土铺装层,而低于水泥混凝土铺装层,高亮度铺装层 A 的安全效果优于高亮度铺装层 B 和高亮度铺装层 C。

DIALux 与 Twinmotion 的联合使用,可以在尽可能保证隧道光环境参数准确的前提下进行场景渲染,使得本次试验场景具有较好的真实性;高亮度铺装层颜色为浅白色、水泥混凝土铺装层为浅灰色,因此相比于沥青混凝土铺装层,黑色的障碍物与高亮度铺装层和水泥混凝土铺装层对比更加强烈,更具有识别性;高亮度铺装层属于新型铺装层,相比于传统的铺装层,驾驶人受以往驾驶习惯和视觉习惯等影响,在使用高亮度铺装层的隧道中行车时更容易出现紧张、视觉不适等影响驾驶舒适度的现象,因此行车舒适度感知效果较差;隧道内行车要考虑舒适性,更要考虑安全性,因此基于眼动试验综合考虑驾驶安全性和舒适性,隧道内使用高亮度铺装层的安全效果优于沥青混凝土铺装层,且高亮度铺装层 A 的安全效果优于高亮度铺装层 B 和高亮度铺装层 C,接近于水泥混凝土铺装层。

4 结 语

(1)通过对高亮度铺装层光学参数的测定可知,

高亮度铺装层具有良好的反光效果,且高亮度铺装层的反光效果随钛白粉掺量增加而增强,钛白粉掺量为 70% 的高亮度铺装层 A 反光效果最佳。

(2)眼动试验结果表明,相比于传统沥青混凝土铺装层,使用反光效果较好的高亮度铺装层有助于驾驶人在驾驶过程中更早发现障碍物、更容易辨别障碍物,有利于提高隧道内行车安全性,其中在使用高亮度铺装层 A 的隧道内,驾驶人发现障碍物和辨别障碍物所需时间最短,行车安全性最高。

(3)相比于传统的沥青混凝土铺装层和水泥混凝土铺装层,相同照明条件下,在使用高亮度铺装层的隧道内光线较强,驾驶人瞳孔直径较小,对驾驶人的视觉舒适度有一定影响。

(4)相比于普通沥青混凝土铺装层,使用高亮度铺装层可以提高驾驶人的行车安全性,且高亮度铺装层 A 的提升效果最佳,但驾驶人在使用高亮度铺装层的隧道内行车的视觉舒适性比传统普通沥青混凝土铺装层和水泥混凝土铺装层时差。

(5)本文借助驾驶模拟器平台,通过模拟驾驶的手段评价隧道内使用高亮度铺装层对驾驶安全的影响,由于仿真试验自身带有一定的局限性,需要在工程实践中检验,并根据实践结果对试验结果修正;同时,钛白粉的掺加对路面亮度具有良好的提升作用,但过高的路面亮度不利于隧道行车安全,因此需要进一步优化钛白粉掺量,寻求综合反光效果最佳的高亮度铺装层。

参考文献:

References:

[1] 中华人民共和国交通运输部. 2021 年交通运输行业发展统计公报[R]. 北京:中华人民共和国交通运输部,2022.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Statistical bulletin of transport industry development in 2021[R]. Beijing:Ministry of Transport of the People's Republic of China,2022.

[2] 肖尧,杜志刚,陶鹏鹏,等. 公路隧道出口“白洞”效应改善方法研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2015,39(3):573-576.
XIAO Yao, DU Zhi-gang, TAO Peng-peng, et al. Highway tunnel improvement method of the “white hole” effect[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2015, 39(3): 573-576.

[3] 张兴军,陈斌,庞云,等. LED 隧道照明均匀度研究[J]. 控制工程,2010,17(增 3):61-64.
ZHANG Xing-jun, CHEN Bin, PANG Yun, et al.

- LED tunnel lighting uniformity study[J]. Control Engineering of China, 2010, 17(S3): 61-64.
- [4] AMUNDSEN F H, RANES G. Studies on traffic accidents in Norwegian road tunnels[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2000, 15(1): 3-11.
- [5] YEUNG J S, WONG Y D. Road traffic accidents in Singapore expressway tunnels[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2013, 38: 534-541.
- [6] PENA-GARCIA A. The impact of lighting on drivers well-being and safety in very long underground roads: New challenges for new infrastructures[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, 80: 38-43.
- [7] 张 乐. 明色化铺装材料在隧道中的应用技术研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2020.
- ZHANG Le. Research on the application technology of light-colored pavement materials in tunnels[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2020.
- [8] 商 艳. 基于驾驶员眼动特性的草原公路直线段景观单调问题研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2020.
- SHANG Yan. Study on the landscape monotony of prairie highway straight segment based on driver's eye movement characteristics [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2020.
- [9] 胡月琦. 高速公路隧道路段驾驶人心智游移及心理负荷与安全风险研究[D]. 西安: 长安大学, 2021.
- HU Yue-qi. Study on drivers' mind wandering, mental workload and safety risks in highway tunnels[D]. Xi'an: Chang'an University, 2021.
- [10] 祁首铭. 不同认知负荷下考虑驾驶人生理特征的行车风险辨识方法[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
- QI Shou-ming. Driving risk identification method considering the drivers' physiological characteristics under different cognitive workloads[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021.
- [11] 李志勇, 朱尚书. 明色化铺装材料的路用性能研究[J/OL]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2022, 1-6. [2022-06-08]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1190.u.20220407.1744.002.html>.
- LI Zhi-yong, ZHU Shang-shu. Investigation on the road performance of light-colored pavement materials [J/OL]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2022, 1-6. [2022-06-08]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1190.u.20220407.1744.002.html>.
- [12] JJF 1032—2005, 光学辐射计量名词术语及定义[S]. JJF 1032—2005, Terminology and definitions for optical radiation measurements[S].
- [13] 金伟其. 辐射度、光度与色度及其测量[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2006.
- JIN Wei-qi. Photometry, radiometry, colorimetry & measurement[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2006.
- [14] 张铠鸿. 颜色不对称立体图像视觉舒适度与眼动数据相关性研究[D]. 昆明: 云南师范大学, 2022.
- ZHANG Kai-hong. Study on the correlation between visual comfort and eye movement data of color asymmetric stereo images[D]. Kunming: Yunnan Normal University, 2022.
- [15] VICTOR T W, ENGSTROM J, HARBLUK J L. Distraction assessment methods based on visual behavior and event detection[M]. Boca Raton: CRC Press, 2008.
- [16] 方 松, 马健霄. 城市隧道长度对驾驶人视觉特性影响分析[J]. 交通信息与安全, 2020, 38(6): 24-30.
- FANG Song, MA Jian-xiao. Influences of urban tunnel length on visual characteristics of drivers[J]. Journal of Transport Information and Safety, 2020, 38(6): 24-30.
- [17] 胡月琦, 刘浩学, 朱 彤, 等. 高速公路特长隧道环境中驾驶员视觉特性研究[J]. 中国安全科学学报, 2017, 27(6): 31-36.
- HU Yue-qi, LIU Hao-xue, ZHU Tong, et al. Research on visual characteristics of drivers driving through extremely long expressway tunnel[J]. China Safety Science Journal, 2017, 27(6): 31-36.
- [18] 刘东旗. 不同隧道环境下驾驶人眼动特性研究[J]. 汽车实用技术, 2017(10): 179-180, 189.
- LIU Dong-qi. Research on the eye movement characteristics of drivers in different tunnel environments [J]. Automobile Applied Technology, 2017(10): 179-180, 189.
- [19] 孙贵磊, 杨雨昕, 冉令华, 等. 暗环境下 3D 显示亮度对视觉疲劳的影响研究[J]. 安全与环境学报, 2022, 22(3): 1399-1405.
- SUN Gui-lei, YANG Yu-xin, RAN Ling-hua, et al. Research on the effect of luminance on visual fatigue in 3D display mode under a dark background [J]. Journal of Safety and Environment, 2022, 22(3): 1399-1405.
- [20] 王思琦. 基于视觉亮度的屏幕调光等级方法与视觉表现研究[D]. 天津: 天津工业大学, 2021.
- WANG Si-qi. Research on screen dimming level method and visual representation based on visual brightness[D]. Tianjin: Tiangong University, 2021.
- [21] 王 勤, 程 辉. 基于瞳孔直径的自由立体观看视疲劳预测[J]. 成都大学学报(自然科学版), 2020, 39(2): 164-169.
- WANG Qin, CHENG Hui. Prediction of autostereoscopic display visual fatigue based on pupil diameter [J]. Journal of Chengdu University (Natural Science Edition), 2020, 39(2): 164-169.