

基于瞳孔变化的隧道内饰材料辅助照明研究*

潘国兵,刘圳,刘毅,赵宁雨

(重庆交通大学 土木工程学院,重庆 400074)

摘 要:在公路隧道运营中,照明系统是与行车安全、舒适度关系最为密切也是最为直接的部分,照明系统也是隧道运营中能耗最大的部分。隧道照明系统是为隧道内驾驶人员提供良好的照明环境以满足其视觉需求。目前国内隧道照明研究方向多集中于隧道光源本身,而对于隧道侧壁内饰材料反射光的辅助照明作用却鲜有研究。笔者通过对国内外隧道照明技术和方法的大量调研,利用眼动仪、光谱仪等仪器开展了基于驾驶员瞳孔变化的隧道内饰材料辅助照明的室内模型模拟试验和实体隧道试验的隧道照明试验,对隧道内饰材料在隧道照明中的辅助作用及规律进行了探讨,旨在为内饰材料在隧道照明系统中辅助性运营的进一步推广应用提供一定的参考价值。

关键词:隧道照明;内饰材料;瞳孔变化;模型试验;节能减排

中图分类号:U453 文献标识码:A 文章编号:1673-0836(2017)03-0851-07

Study on the Tunnel Lighting of Tunnel Interior Material
Based on the Pupil Changes

Pan Guobing, Liu Zhen, Liu Yi, Zhao Ningyu

(School of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, P.R.China)

Abstract: In the tunnel operation, the tunnel lighting system is the key component about the road safety and comfort, it is also the biggest energy consumption. The tunnel lighting system must meet drivers' visual demands. At present, domestic research on the tunnel lighting is most concentrated in the light source itself, while the reflected light from tunnel side wall's auxiliary function is ignored. Through massive investigation and research on tunnel lighting technology and method at home and abroad, the eye tracker and spectrometer etc was used, a series of models and real vehicle experiments based on drivers pupil reaction was carried out. At last we discussed and summed up tunnel interior material lighting booster action mechanism, which provided design ideas and reference for tunnel interior material auxiliary popularization and application in tunnel lighting system.

Keywords: tunnel lighting; interior material; pupil changes; model test; energy consumption

0 引言

由于公路隧道具有缩短公路里程、提高交通运输效率、节省用地和保持生态环境等优越性,公路

隧道项目日益增多。截至2015年末,全国公路隧道为14 006处、1 268.39万m,较上年年末增加1 602处、192.72万m,其中特长隧道744处、329.98万m,长隧道3 138处、537.68万m。根据

* 收稿日期:2016-06-10(修改稿)
作者简介:潘国兵(1976-),男,四川眉山人,博士,副教授,主要从事隧道照明节能与安全方面的研究。
E-mail:panguobing@126.com
基金项目:交通运输部应用基础研究项目(2014319814260);重庆市教委科学技术研究项目(KJ1500505);重庆市社会民生科技创新专项项目(cstc2015shmszx30023);国家自然科学基金(5167082166);国家自然科学基金项目(51608081)

对各地公路隧道照明的费用调查,每月的费用在 2~5 万元/km,甚至个别隧道段超过 6 万元/km。按上述标准估算,我国目前一年的照明费用约为 40 亿元,相当于消耗约 140 万 t 标准煤,排放二氧化碳约 410 万 t^[1]。高额的照明费用不仅给公路运营部门带来了极大的经济负担,同时也造成了大量的能源消耗和环境污染。在强调持续发展、注重能效的今天,隧道照明带来的巨大能源消耗与国家积极推行的绿色照明政策存在一定的矛盾,处理不好必将影响高速公路的可持续发展。如何在保证交通安全和满足隧道行车视觉舒适的条件下,尽可能地降低隧道照明能耗,已成为隧道节能降耗的重点研究对象,也是目前亟待解决的问题。

隧道照明系统是为隧道内驾驶人员提供良好的照明环境以满足其视觉需求的设施。隧道照明环境由灯具的发射光和路面、隧道侧壁和顶拱的反射光所构成,考虑到路面和顶拱的光反射系数很小,使得反射光对隧道照明环境的增效作用微乎其微,因此,路面和顶拱的反射光可忽略不计。由此可见,影响隧道照明环境有两方面因素:一是隧道灯具的发射光;二是隧道侧壁内饰材料的反射光。相关学者大都关注于第一个影响因素,并从隧道光源类型的选择、布灯方式、照明控制等途径对其进行了大量研究。然而,对隧道侧壁内饰材料反射光这一影响因素却鲜有研究^[2]。

本文基于人眼特性,通过室内模型试验和实体隧道试验,针对不同隧道侧壁内饰材料下的人眼瞳孔变化进行研究,旨在总结出隧道侧壁内饰材料的辅助照明机理及对驾驶人视觉特性的影响规律。

1 隧道光环境下的人眼特性

隧道由于自身封闭的结构特点,隧道大部分区段都需要布置照明设施来提供行车照明(除部分采用自然照明的短隧道)。众所周知,人眼瞳孔直径在明亮环境下较暗环境下要大,驾驶人驾车进入隧道或者从隧道内驶出,由于隧道内外的亮度差,瞳孔直径会相应变化以适应环境亮度,在人眼瞳孔适应的过程中则会出现“黑洞现象”“白洞现象”等不良现象,对行车安全性、舒适性产生不良影响,所以优秀的隧道照明设计应是能尽量贴合人眼瞳孔适应变化曲线的,否则容易出现险情。隧道照明的方法除在隧道洞内中间段设置照明来改善洞内的视觉环境外,主要采用在隧道入口或出口段加强照明来达到“明适应”或“暗适应”,内饰材料在隧道

中也可以起到加强照明,行车向导,减缓亮度差的辅助照明作用^[3]。

因此,考虑到隧道中还会产生的管状视觉现象和闪烁现象等一系列不良现象,以及这些隧道内特殊的视觉特性对驾驶员的视觉、生理产生的影响,会对驾驶员生理和心理上造成的不适应感,隧道照明研究还需从隧道光环境下的人眼特性出发。解决好隧道照明特有的视觉问题,才能创造出良好的视觉环境,从而更有利于隧道照明安全、节能和舒适^[4]。

2 室内模型试验研究

针对隧道内饰材料进行试验,考虑到实体隧道无法更换隧道内饰材料、隧道光源等,试验参数以进行系统试验研究,故试验采用室内模型试验。试验选取了被试人员的瞳孔直径参数作为指标,寻找不同隧道照明光源下不同内饰材料对人眼特性的影响规律。

2.1 隧道照明环境模拟

通过大量的实地隧道调研,课题组制作了与实体隧道尺寸比例 1:10 的隧道模拟装置,如图 1。



图 1 隧道照明环境模拟装置

Fig.1 Simulation device of tunnel lighting environment

隧道模型内部路面宽度为 1 m,侧壁高度为 0.6 m,拱顶为近似直径为 0.57 m 的 1/3 圆拱,侧壁内饰材料和光源灯具可根据工况进行更换,借助光谱仪、亮度计等仪器调整照明亮度等参数。为了充分模拟实体隧道光环境,试验照明光源采用目前常用高压钠灯和 LED 灯。其中,高压钠灯因其光效高、光色好和显色性强,桔黄色的光线透雾性强,使用寿命长,是目前实现隧道照明的主要光源。而 LED 光源因具有寿命长、能耗低、光效高以及良好的定向性等优点,LED 照明已成为隧道照明的主流发展方向。课题组通过模拟测试不同灯具、内饰材料所组成的照明环境下,被试人员发现小目标

的反应时间,借助德国 SMI ETG 眼镜式眼动仪采集被试人员整个实验过程中的瞳孔变化信息。具体室内模型试验参数变量设置如表 1 所示。

表 1 试验参数
Table 1 Experimental parameter

试验变量	变量参数值				
内饰材料	防火涂料	瓷砖	蓄能发光材料		
照明光源	高压钠灯		LED 灯		
背景亮度/ 小目标 亮度/ (cd·m ⁻²)	2/3	4/6	6/9	8/12	10/15
视标偏心角/(°)	-20	-10	0	10	20

2.2 试验分析

人类的视觉系统是通过瞳孔获取外部信息的。瞳孔大小的变化,起到调节进入眼内光量的作用。

从生物物理角度说,有两种情况会使瞳孔大小发生变化:一是光的强弱,在强光照射时,瞳孔缩小以减小光线对视网膜的刺激;弱光时,瞳孔放大以使视网膜得到足够刺激。二是观察物体的距离,在看远处物体时,瞳孔放大以增加进入眼球的光线;看近处物体时,瞳孔缩小以减少进入眼球的光线^[5]。另外,精神负荷越重,如警惕、恐惧、疼痛时,瞳孔直径越大。试验借助 SMI 眼镜式眼动仪对隧道光源、内饰材料、背景亮度所对应的各工况照明环境下人眼瞳孔直径进行测量研究,得出隧道内饰材料、光源类型、背景亮度等参数对人眼瞳孔直径的影响规律。

综合比对被试人员在不同工况下的瞳孔直径,以隧道内饰材料为横坐标,瞳孔直径为纵坐标,绘制出隧道内饰材料辅助隧道照明环境下人眼平均瞳孔直径折线图,如图 2、图 3 所示。

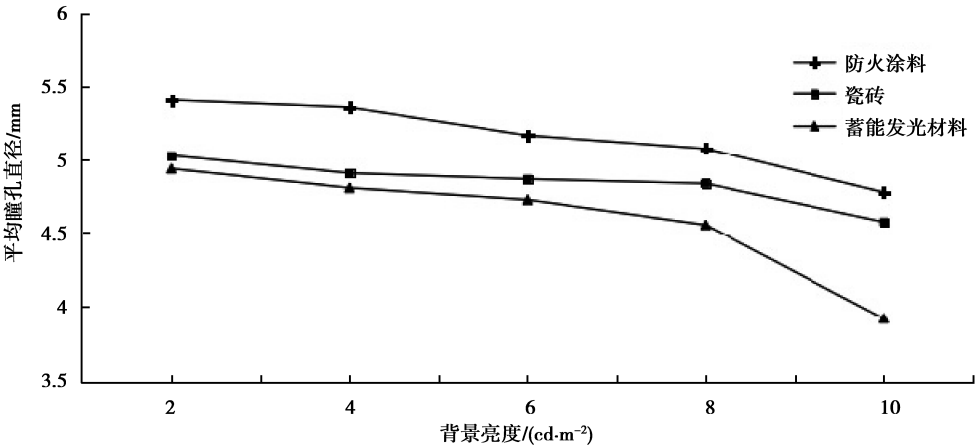


图 2 高压钠灯照明环境下 3 种内饰材料对应平均瞳孔直径折线图

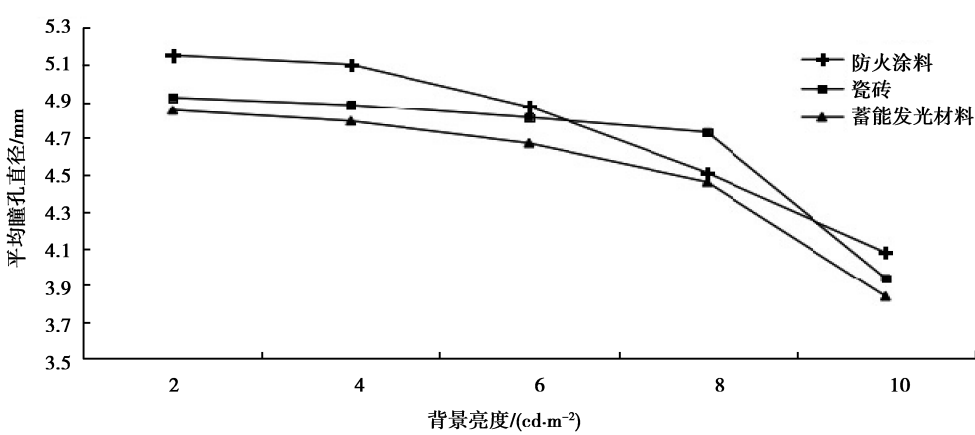


图 3 LED 灯照明环境下 3 种内饰材料对应平均瞳孔直径折线图

Fig.3 Comparison of average pupil diameter between three interior materials under the LED lighting

从图 2、图 3 可以直观看出:同一隧道光源、背景亮度照明环境下,防火涂料对应人眼瞳孔直径最大(4.08~5.41 mm),瓷砖次之(3.94~5.03 mm),蓄能发光材料最小(3.84~4.94 mm)。说明隧道内饰材料反光能力越强时,人眼瞳孔直径越小,表明在同等隧道照明环境下,侧壁材料发光(或自发光)辅助照明能力越强,驾驶人看得越清楚,人眼识别隧道内障碍物信息越容易,心理负荷越小,且隧道的“黑洞现象”“白洞现象”等带来的影响越小,从而有利于保证隧道内司乘人员的人身财产安全。

3 实体隧道试验结果及分析

为进一步验证隧道内饰材料对瞳孔变化影响试验研究成果,课题组利用 SMI 眼镜式眼动仪对重庆真武山隧道、南山隧道以及招商局重庆交通科研设计院有限公司(以下简称重庆交科院)的国家山区公路工程技术研究中心隧道建设与养护技术

实验室的实体隧道进行了实车试验,如图 4。



图 4 重庆南山隧道试验眼动仪记录画面截图

Fig.4 Eye tracking glasses recording video capture of Chongqing Nanshan tunnel experiment

各隧道侧壁材料及照明方式如表 2 所示。取隧道入口段到中间段被试人员瞳孔直径得到瞳孔直径变化折线图,如图 5 和图 6 所示。

表 2 实体隧道试验隧道概况

Table 2 Tunnel condition in tunnel experiment

隧道名称	隧道长度/m	灯具光源	内侧侧壁材料	布灯方式	侧壁反射率
重庆交科院实体隧道	200	LED	水泥砂浆	双侧布灯	低
真武山隧道	5 895	LED	1331 号乳白油漆	双侧布灯	较高
南山隧道	2 830	LED	乳白油漆	中间布灯 (加强段为双侧布灯)	高

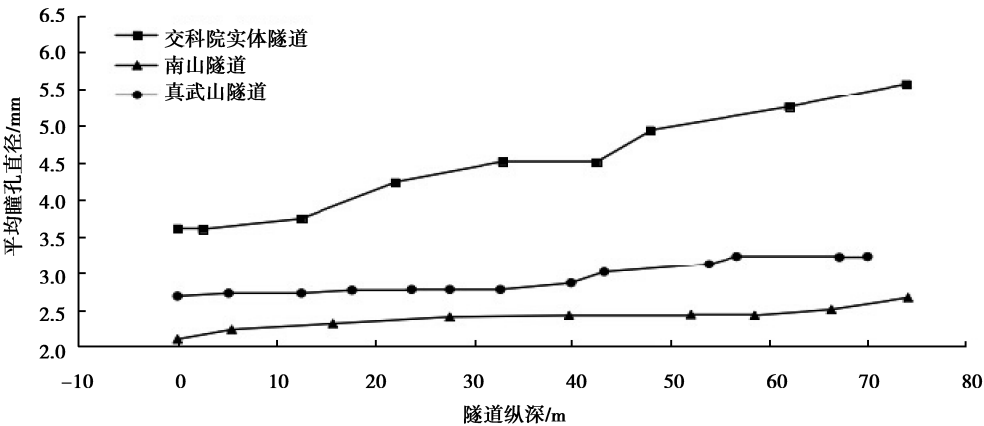


图 5 隧道入口段内饰材料对瞳孔直径影响折线图

Fig.5 Influence of interior materials on pupil diameter in tunnel portal segment

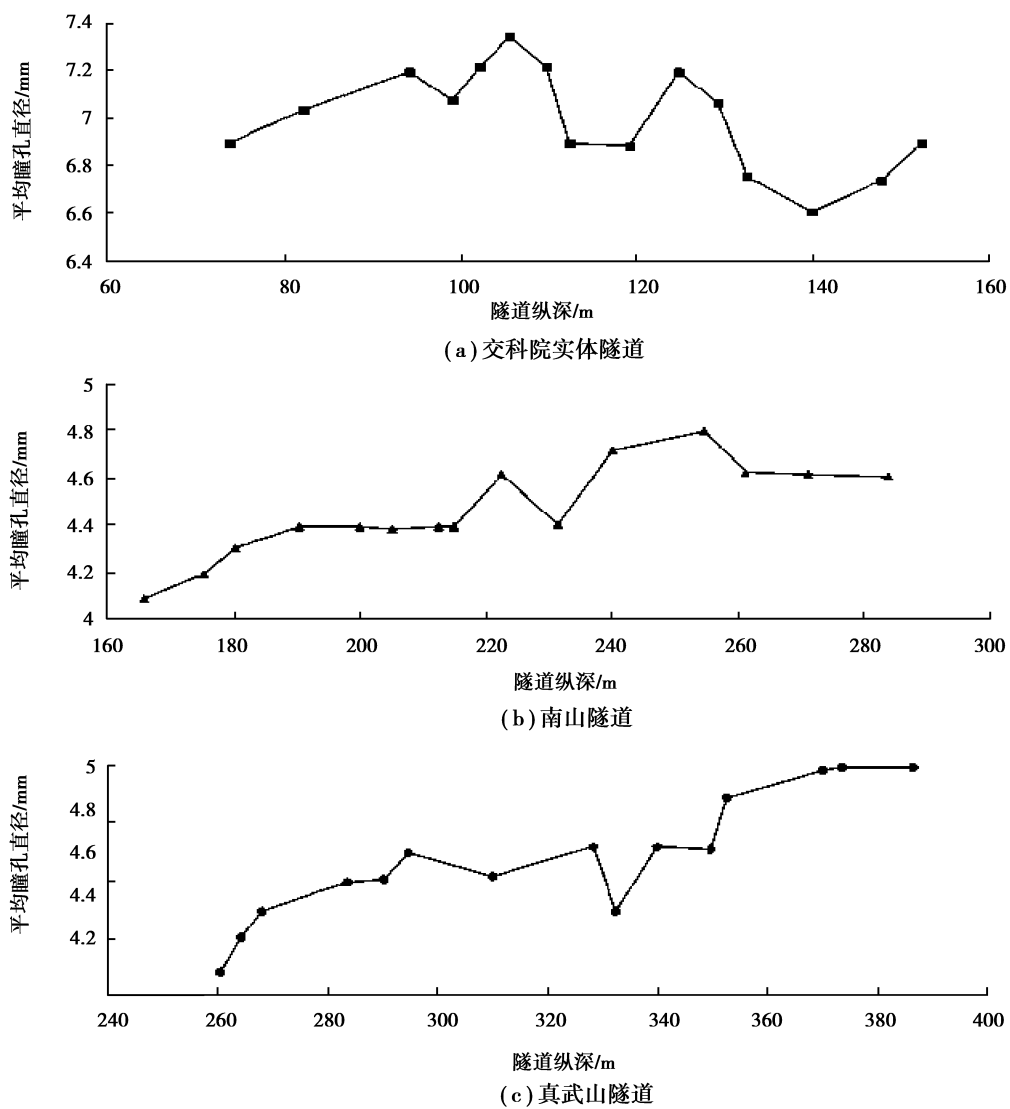


图6 各隧道中间段内饰材料对瞳孔直径影响折线图

Fig.6 Influence of interior materials on pupil diameter in tunnel middle segment

对比图 5、图 6 可以得出:驾驶员在重庆交科院实体隧道内驾驶时,眼睛瞳孔直径均明显大于真武山隧道和南山隧道驾驶时眼睛瞳孔直径,真武山隧道和南山隧道所对应的瞳孔直径变化曲线相似。另外,重庆交科院实体隧道对应的人眼瞳孔直径变化波动幅度大,真武山隧道和南山隧道对应的人眼瞳孔直径变化较为平稳。由此可见,相比水泥砂浆辅助隧道照明而言,采用乳白油漆的真武山隧道和南山隧道辅助隧道照明能够使隧道内人眼的瞳孔直径更小,瞳孔直径波动更为平稳,能够改善隧道内亮度水平,缓解人的心理负荷压力,保证隧道内司乘人员的安全行车。

4 结论与展望

4.1 结论

在隧道照明系统能耗严重、运营昂贵、维修不便的今天,隧道的可持续发展受到了严峻挑战,隧道节能研究刻不容缓。课题组在大量调研已有研究成果的基础上,选择鲜有研究的隧道内饰材料作为研究对象。基于人眼特性,以瞳孔变化作为指标,进行了隧道光环境模拟试验、眼动实体隧道试验等一系列功能试验,对内饰材料在隧道照明系统中的作用进行了深入探索和分析,基于大量的技术调研和数据分析得到如下主要结论:

(1) 蓄能发光材料辅助隧道照明环境下,在隧

道中间段行驶时驾驶人瞳孔直径最小,人眼在明亮环境到暗环境之间调节适应时间最短,有效地减轻了隧道“黑洞现象”“白洞现象”等不良现象,表明隧道内饰材料在一定条件下能够有效辅助隧道照明,提高驾驶人的视觉功效、减小视觉和心理负荷,有利于隧道内的行车安全与舒适。

(2)相比采用水泥砂浆的重庆交科院实体隧道而言,采用乳白油漆的真武山隧道和南山隧道所对应的人的瞳孔直径更小,瞳孔直径波动较为平稳;照明亮度水平与瞳孔直径大小呈反相关关系,人所处照明亮度水平越低,其瞳孔直径越大。

(3)同样布灯间距照明环境下,蓄能发光材料辅助隧道照明所产生的照度水平最高,瓷砖次之,防火涂料最小。对比防火涂料,瓷砖辅助隧道照明最大可节能3.3%,蓄能发光材料辅助隧道照明最大可节能8.8%。

(4)内饰材料的选择应用不仅仅需考虑材料在隧道这一特殊使用环境的适应性(抗老化、耐酸碱、耐沾污),还应考虑隧道内饰材料对隧道光环境的辅助照明作用,优秀的内饰材料应具有增光照明、引导指示、缓解驾驶人视觉疲劳、绿色环保等特点。

4.2 展望

隧道内饰材料是隧道照明系统中重要的组成部分,利用内饰材料来辅助隧道照明,增加隧道光环境的安全性、舒适性是合理可行的。设计者应对隧道内饰材料引起足够的重视,全面且深入的了解隧道内饰材料在复杂恶劣隧道环境下的适应性、对司乘人员安全性的影响、工程经济性以及应用原则,这也有助于隧道照明的节能减排,有利于隧道的可持续发展,符合国家绿色照明战略。

参考文献(References)

[1] 涂耘,王少飞,张琦,等.“低碳经济”背景下公路隧道照明节能策略[J].现代隧道技术,2011,48(3):14-21. (Tu Yun, Wang Shaofei, Zhang Qi, et al. Strategy for illumination energy-saving of highway tunnels under the condition of "Low-Carbon Economy" [J]. Modern Tunnelling Technology, 2011, 48(3): 14-21. (in Chinese))

[2] 梁波,崔璐璐,潘国兵,等.基于反光蓄光理念的辅助隧道节能照明理论与技术[J].现代隧道技术,2014,51(5):15-22. (Liang Bo, Cui Lulu, Pan Guobing, et al. Auxiliary tunnel lighting technology based on the light reflection and energy storage concept

[J]. Modern Tunnelling Technology, 2014, 51(5): 15-22. (in Chinese))

[3] 刘明高,马杰,洪锦.公路隧道内壁的装饰材料的应用与选择[J].地下空间与工程学报,2009,5(4):757-761. (Liu Minggao, Ma Jie, Hong Jin. Application and choice of the decoration material for inner wall of highway tunnel [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2009, 5(4): 757-761. (in Chinese))

[4] 王长翔.隧道进出口路段车辆安全运行分析及防雪棚修建的相关建议[D].西安:长安大学,2010. (Wang Changxiang. The safe analysis of vehicles at tunnel section and some recommendations of the anti-snow shed [D]. Xi'an: Chang'an University, 2010. (in Chinese))

[5] 梁波,何世永,潘国兵,等.基于新型内装材料的公路隧道行车安全研究[J].现代隧道技术,2015,52(2):16-21,29. (Liang Bo, He Shiyong, Pan Guobing, et al. Study of driving safety in a highway tunnel with new interior applied materials [J]. Modern Tunnelling Technology, 2015, 52(2): 16-21, 29. (in Chinese))

[6] 潘国兵,梁波,皮宇航,等.隧道侧壁内装材料的照明节能[J].公路交通科技,2012,29(9):103-109. (Pan Guobing, Liang Bo, Pi Yuhang, et al. Lighting energy saving of tunnel sidewall interior materials [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2012, 29(9): 103-109. (in Chinese))

[7] 徐蔚.基于瞳孔收缩的非视觉感光系统的研究[D].上海:复旦大学,2011. (Xu Wei. Research on non-visual photosensitive system based on pupil contraction [D]. Shanghai: Fudan University, 2011. (in Chinese))

[8] 杨超,黄传茂.高速公路隧道中央布灯照明参数优化研究[J].地下空间与工程学报,2015,11(增2):817-821. (Yang Chao, Huang Chuanmao. Study on parameters optimization of central luminaire distribution style of highway tunnel [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2015, 11(Supp. 2): 817-821. (in Chinese))

[9] 郭春,王明年.特长公路隧道中间段照明调压节能技术研究[J].地下空间与工程学报,2012,8(增2):1422-1425. (Guo Chun, Wang Mingnian. Research on energy-saving technology of illumination voltage regulating technology in the middle segment of super-long highway tunnel [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2012, 8(Supp. 2): 1422-1425. (in Chinese))

[10] 杨勇.公路隧道照明光源对疲劳度的影响[J].照明

- 工程学报, 2015(6): 76-79, 121. (Yang Yong. Effect of highway tunnel illumination light source on fatigue [J]. China Illuminating Engineering Journal, 2015 (6): 76-79, 121. (in Chinese))
- [11] 叶飞. 高速公路隧道群路段驾驶人视觉明暗适应变化规律研究[D]. 西安:长安大学, 2014. (Ye Fei. Study on driver's light and dark adaptation change law in section of expressway tunnel group[D]. Xi'an: Chang'an University, 2014. (in Chinese))
- [12] Arnedt J T, Geddes M A C, Maclean A W. Comparative sensitivity of a simulated driving task to self-report, physiological, and other performance measures during prolonged wakefulness [J]. Journal of Psychosomatic Research, 2005(1), 58: 61-71.
- [13] 宿蕾艳, 庄曾渊. 视疲劳病因机制及防治的研究进展[J]. 中国中医眼科杂志, 2010, 20(3): 183-185. (Su Leiyan, Zhuang Zengyuan. Recent advances in the pathogenesis and therapy of asthenopia[J]. Journal of Traditional Chinese Ophthalmology, 2010, 20(3): 183-185. (in Chinese))
- [14] 李小阳, 陈旺, 常晓勇, 等. 照明长度和亮度随车速变化的隧道照明智能控制系统研究[J]. 交通节能与环保, 2015, 11(6): 64-67. (Li Xiaoyang, Chen Wang, Chang Xiaoyong, et al. Enhance lighting brightness and length changes with vehicle speed tunnel lighting intelligent control system [J]. Energy Conservation & Environmental Protection in Transportation, 2015, 11(6): 64-67. (in Chinese))
- [15] 张晓芹, 胡江碧, 王猛, 等. 基于驾驶视认需求的隧道中间段路面亮度需求[J]. 北京工业大学学报, 2016, 42(5): 768-773. (Zhang Xiaoqin, Hu Jiangbi, Wang Meng, et al. Road surface luminance of tunnel interior zone based on the driving visual cognition demand [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2016, 42(5): 768-773. (in Chinese))
- [16] 杨超, 王志伟. 公路隧道照明节能技术[J]. 现代隧道技术, 2010, 47(2): 102-108. (Yang Chao, Wang Zhiwei. Energy-saving technology for highway tunnel lighting[J]. Modern Tunnelling Technology, 2010, 47(2): 102-108. (in Chinese))
- (上接第 803 页)
- [4] 李雪峰, 韩文峰, 谌文武. 大柳树坝址松动岩体波速特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(3): 596-600. (Li Xuefeng, Han Wenfeng, Chen Wenwu. Wave velocity characteristics of dynamo-relaxed rock mass at site of Daliushu dam [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(3): 596-600. (in Chinese))
- [5] 汪波, 李天斌, 何川, 等. 强震区软岩隧道大变形破坏特征及其成因机制分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(5): 928-936. (Wang Bo, Li Tianbin, He Chuan, et al. Analysis of failure properties and formatting mechanism of soft rock tunnel in meizoseismic areas [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(5): 928-936. (in Chinese))
- [6] 周艺, 何川, 汪波, 等. 基于支护参数优化的强震区软岩隧道变形控制技术研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(4): 1147-1155. (Zhou Yi, He Chuan, Wang Bo, et al. Research on deformation control technology for tunnels in soft rocks and meizoseismic area based on supporting parameters optimization [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(4): 1147-1155. (in Chinese))
- [7] 中华人民共和国交通部. 公路隧道设计规范(JTG D70-2004) [S]. 北京: 人民交通出版社, 2004. (Ministry of Communications of the People's Republic of China. Code for design of road tunnel (JTG D70-2004) [S]. Beijing: China Communications Press, 2004. (in Chinese))
- [8] 王建宇, 胡元芳, 刘志强. 高地应力软弱围岩隧道挤压型变形[J]. 现代隧道技术, 2012, 49(3): 9-17. (Wang Jianyu, Hu Yuanfang, Liu Zhiqiang. Tunneling in squeezing ground with yielding supports [J]. Modern Tunnelling Technology, 2012, 49(3): 9-17. (in Chinese))
- [9] 陈宗基. 地下巷道长期稳定性的力学问题[J]. 岩石力学与工程学报, 1982, 1(1): 1-20. (Chen Zhongji. The mechanical problems for the long-term stability of underground galleries [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1982, 1(1): 1-20. (in Chinese))
- [10] Mahmutoglu Y, Vardar M. Effects of inelastic volume in-crease on fractured rock behaviour[J]. Bull Eng Geol Env, 2003, 62: 117-121.
- [11] 王明恕, 何修仁, 郑雨天. 全长锚固锚杆的力学模型及其应用[J]. 金属矿山, 1983(4): 24-29. (Wang Mingshu, He Xiuren, Zheng Yutian. The mechanics model and application of fully grouted rock bolt [J]. Metal Mine, 1983(4): 24-29. (in Chinese))
- [12] Mogi K. Effect of the triaxial stress system on rock failure[J]. Rock Mechanics in Japan, 1970, 1: 53-55.