

# 公路隧道反光沥青路面

史小丽,王选仓,刘 昆

(长安大学 公路学院,陕西 西安 710064)

**摘 要:**为了提高隧道沥青路面亮度,利用玻璃珠的回复反光特性,在升级配沥青磨耗层(OGFC)中掺加高强度玻璃珠;分析了不同掺加比例及不同粒径玻璃珠的 5 种组合方案对 OGFC 混合料路用性能的影响,并给出了最佳的掺加方案。结果表明:在 OGFC 中掺入玻璃珠会使马歇尔稳定度略有下降,沥青混合料的抗车辙能力、抗滑、降噪和反光性能与玻璃珠在沥青混合料表面的覆盖率有关;在 OGFC-13 混合料面层中掺加 10%~15%、粒径为 2~3 mm 的玻璃珠可以满足路用性能各项技术指标的要求。

**关键词:**道路工程;升级配沥青磨耗层;玻璃珠;反光强度;隧道路面

**中图分类号:**U454.1

**文献标志码:**A

## Glistening asphalt pavement structure of highway tunnel

SHI Xiao-li, WANG Xuan-cang, LIU Kun

(School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

**Abstract:** In order to increase the illumination of tunnel pavement, through appending glass bead into OGFC mixes owing to the retro-reflective performance of glass bead, this paper analyzed the influence on pavement performance when different rates and diameter glass bead appended into OGFC mixes, and put forward the optimal appending proportion and diameter of glass bead into OGFC. The test results show that Marshall stability is slightly lower than those without glass bead, and the performances of resistance of rutting, anti-skidding, noise-reduction and retro-reflective performance relate to the coverage rate of glass bead; the specifications of pavement performance could be meet by 10%~15% quantity and 2~3 mm diameter of glass bead mixed to OGFC-13. 4 tabs, 9 figs, 11 refs.

**Key words:** road engineering; open-graded friction course(OGFC); glass bead; retro-reflective intensity; tunnel pavement

## 0 引 言

文献[1]指出:对隧道路面高反光特性的要求是从照明方面提出的;国际照明委员会(CIE)也提出了 R1~R5 共 5 级基于照明的路面分类。国外有一种称为“glassphalt”的路面,是将废玻璃破碎后掺入

混合料铺在城市道路中,其路用性能与普通沥青路面相比并未降低,而且在夜晚还表现出良好的景观效果,被认为是一种会闪闪发光(glistening)的路面。研究认为,废玻璃颗粒用于沥青路面的最大粒径为 4.75 mm、掺入比例为 10%~15%时能获得最佳的路用性能<sup>[2]</sup>。试验表明,在 OGFC-13 混合料中掺入

高折射率的玻璃珠以提高隧道沥青路面的反光特性,不仅能达到节约电能、降低隧道运营成本的目的,而且也兼顾了隧道内工作环境对路面结构的抗滑、降噪和阻燃等性能<sup>[3]</sup>,是一种很有发展前景的隧道路面结构形式,本文对此进行了分析研究。

1 基本原理

1.1 玻璃珠的回复反射原理

由光的反射和折射原理可知,当一束光线照射到玻璃珠表面时,将产生表面反射光、内部反射光和透射光。其中,内部反射光具有聚光性和回归性,将入射光线集中在一个狭小的光锥角内反射回光源处,这就是玻璃珠的回复反射原理<sup>[4]</sup>。对于单个的玻璃珠,在同一光源照射下,反射光的强度与玻璃珠直径的平方成正比。

1.2 路面亮度的评价

路面反射可看成均匀漫反射<sup>[5]</sup>,漫反射材料的反射系数  $\rho$  为

$$\rho = \pi L / E$$

式中: $L$  为漫反射面的亮度( $\text{cd}/\text{m}^2$ ); $E$  为漫反射面

的照度( $\text{lx}$ )。

文献[1] 推荐采用  $L = E/13$ (水泥路面)、 $L = E/22$ (沥青路面),由此可以反算出水泥路面的反射系数  $\rho = 0.24$ ,沥青路面的反射系数  $\rho = 0.14$ ,即水泥路面比沥青路面亮度高。

一般道路照明效果根据亮度系数评价,由  $L = \rho E / \pi$  可知,在相同照度的情况下,因路面材料不同,相应的亮度也不同。当沥青混合料中加入玻璃珠后, $\rho$  由 0.14 提高到 0.65~0.80(玻璃珠的反射率),路面亮度提高了 3.6~4.7 倍。

2 OGFC 混合料配合比的确定

2.1 混合料的最佳级配

根据玄武岩集料筛分结果,初拟 3 个级配,按沥青油膜法粗估沥青用量,制作马歇尔试件(双面击实 50 次),测定混合料试件密度,并计算其空隙率;根据 2.36 mm 通过率与空隙率的关系,得出 20%目标空隙率所对应的通过率,调整确定的最终级配为:10~15 mm 粒径、5~10 mm 粒径、机制砂、矿粉的比例为 30:54:12:4,最终级配配合比计算结果见表 1。

表 1 最终级配配合比计算结果

合成级配	下列筛孔(mm)的通过率/%									
	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
最终级配	100	94.03	71.66	23.51	13.59	8.79	7.58	6.28	5.41	4.64
级配上限	100	100.00	80.00	30.00	22.00	18.00	15.00	12.00	8.00	6.00
级配中值	100	95.00	70.00	21.00	16.00	12.00	9.50	7.50	5.50	4.00
级配下限	100	90.00	60.00	12.00	10.00	6.00	4.00	3.00	3.00	2.00

2.2 最佳沥青用量的确定

试验采用高粘度的 MAC 改性沥青,在油膜法粗估的沥青含量(质量分数)基础上,再拟定 4 组沥青含量进行析漏和分散试验,绘出沥青含量与分散损失和析漏损失的关系(图 1、图 2)。由图 1、图 2 可知,当最佳沥青含量为 4.7%、分散损失为 13%和析漏损失为 0.2%时,可满足《公路沥青路面设计规范》(以下简称规范)的要求。

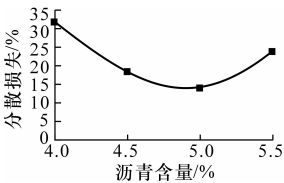


图 1 沥青含量与分散损失的关系

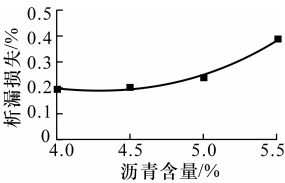


图 2 沥青含量与析漏损失的关系

2.3 玻璃珠的掺加

本研究采用的是一种硼硅酸盐玻璃珠,具有耐酸碱、耐磨耗和硬度高等特点。试验在最佳级配

各级筛孔筛余质量分数(见下页表 2)的基础上,共设计了 5 个方案,进行混合料路用性能的验证。

方案 1:采用 6%的玻璃珠(直径为 1.18 mm+0.06 mm)替代对应部分细集料。

方案 2:用 9.92% 的玻璃珠(直径为 2.36 mm)替代对应部分细集料。

方案 3:用 10%的玻璃珠(直径为 4.75 mm)替代对应部分细集料。

方案 4:用 14.72%的玻璃珠(直径为 2.36 mm 和 1.18 mm)替代对应部分细集料。

方案 5:用 20%的玻璃珠(直径为 4.75 mm)替代对应部分细集料。

由于玻璃珠表面光滑,与沥青粘附性差,试验在采用高粘度沥青的同时,添加 2%消石灰粉来提高玻璃珠与沥青的粘附性。试验发现,方案 1 成型试件中玻璃珠陷入集料之间的空隙中,起不到反光效果,所以后期试验没有再考虑这种方案。但为了与

表 2 最终级配各级筛孔筛余质量分数

筛孔尺寸/mm	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
筛余质量分数/%	5.97	22.37	48.15	9.92	4.80	1.21	1.30	0.87	0.77

不掺加玻璃珠的混合料路用性能进行对比,下文中将方案 1 设定为不掺加玻璃珠的情况。

3 试验内容

3.1 掺加玻璃珠对空隙率的影响

由图 3 可见,掺加玻璃珠后混合料的空隙率(目标空隙率为 20%)变小,原因是玻璃珠的密度为 2.5 g/m<sup>3</sup> 左右,小于集料的密度;比较掺加量相同而直径不同的玻璃珠,直径为 2.36 mm 玻璃珠对混合料空隙率的影响小于直径为 4.75 mm 玻璃珠对混合料空隙率的影响;同一直径(4.75 mm)玻璃珠的掺加量越大(质量分数),混合料空隙率越小。

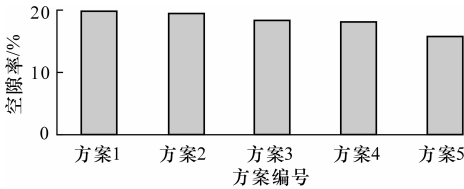


图 3 玻璃珠的掺加量对混合料空隙率的影响

3.2 掺加玻璃珠对混合料路用性能的影响

主要测定掺加玻璃珠后对混合料的高温稳定性、水稳定性、表面抗滑性和降噪性能等的影响,试验结果如图 4~图 9 所示。

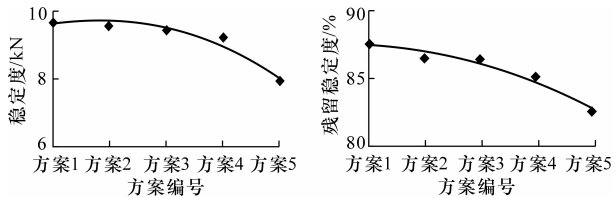


图 4 玻璃珠的掺加量与马歇尔稳定度的关系

图 5 玻璃珠的掺加量与马歇尔残留稳定度的关系

(1)由图 4、图 5 可见,随着玻璃珠掺加量的增加,马歇尔稳定度及其残留稳定度呈下降趋势;当玻璃珠掺加量超过 15%时,下降幅度比较迅速,但都满足规范对马歇尔稳定度值的要求。

(2)由图 6 可见,随着玻璃珠掺加量的增加,流值逐渐升高;在掺加量为 10%~15%时基本保持平稳,掺加量大于 15%时,流值增加得更快些,但仍小于 40(0.1 mm)的规范值要求。

(3)由图 7 可知,玻璃珠掺加量与动稳定度的关系似乎规律性不强。当玻璃珠掺加量由 0 增至 10%时,动稳定度呈下降趋势;但掺加量为 10%而玻璃珠直径不同时,直径大的玻璃珠其动稳定度值

更大一些,原因是相同质量的玻璃珠,直径越大其颗粒数会更少些,与混合料的接触面积越小,混合料的抗车辙能力更强些;相同粒径的玻璃珠,随掺加量的增加,抗车辙能力呈下降趋势。

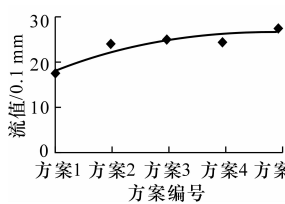


图 6 玻璃珠的掺加量与流值的关系

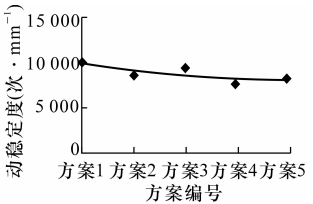


图 7 玻璃珠的掺加量与动稳定度的关系

(4)由图 8 可见,由于玻璃珠的掺加,使混合料的抗滑能力下降,但其变化趋势与玻璃珠在混合料表面的覆盖率有关。玻璃珠覆盖率是其直径与粒数共同作用的结果:当粒数一定时,直径越小,覆盖率越小;直径越大,覆盖率越高。

方案 4 与方案 2 相比,方案 4 混合料试件表面不仅有 2.36 mm 玻璃珠,而且还有 1.18 mm 的玻璃珠,其覆盖率更大些,抗滑能力自然会下降。

(5)路面噪声源于轮胎与路面的接触、轮胎变形和轮胎与空气的相互作用。OGFC 路面结构由于存在许多连通的小孔,当轮胎滚动时,被压缩的气体能够通畅的钻入路面孔隙内,而不是向周围排射,因而在噪声的辐射过程中吸收了大量声能。图 9 中噪声值是通过轮胎下落法<sup>[6]</sup>测定的,其与玻璃珠掺加量的关系与空隙率的变化趋势是一致的:随着玻璃珠掺量的增加,混合料空隙率下降,所测噪声值增大。

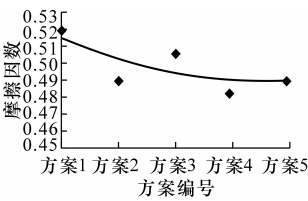


图 8 玻璃珠的掺加量与摩擦因数的关系

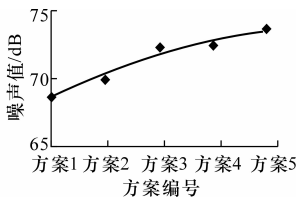


图 9 玻璃珠的掺加量与噪声值的关系

3.3 掺加玻璃珠的反光效果

公路隧道照明设计<sup>[7]</sup>中,通过布设灯具提高路面亮度总均匀度和纵向均匀度。通过在混合料中掺加玻璃珠,可以利用玻璃珠的回复反射原理,提高照度上升的系数,不仅节约电能,同时也增加了隧道行车的安全性。

在混合料中掺加玻璃珠的反光效果,可以采用

手电筒照射方式目测;对其反光效果的定量评价可通过测逆反射系数来实现,如表 3 中数据所示。表 3 中数据是在车辙板上测定的,由于玻璃珠的掺加是拌和方式,玻璃珠表面裹覆了一层沥青,其逆反射系数值较小;在实际使用后,随着道路表面的逐步磨损,其反光性能还会进一步提高。

表 3 掺加玻璃珠后的反光强度测定值

方案编号	1	2	3	4	5
逆反射系数/ ( $\text{mcd} \cdot (\text{lx} \cdot \text{m}^2)^{-1}$ )	12	24	19	17	20

4 试验路铺筑

试验路段于 2008 年 9 月 21 日至 22 日在张家口—石家庄高速公路东渝河隧道内铺筑。东渝河隧道全长 488 m,试验路在该隧道中间 300 m 处共铺筑 3 段,分别是 100 m 密级配沥青混合料(AC-13)上面层、100 m 开级配沥青混合料(OGFC-13)磨耗层和 100 m 掺加玻璃珠(方案 2)的开级配沥青混合料(OGFC-13)磨耗层,摊铺厚度都是 4 cm。试验路段性能指标检测结果如表 4 所示。

表 4 试验路性能指标测定结果

沥青混合料类别	稳定度/ kN	流值/ mm	构造深度/ mm	渗水性/ ( $\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$ )	压实度/ %
AC-13	17.8	2.48	0.7	15.0	99.3
OGFC-13 掺加玻璃珠	6.5	2.17	0.8	157.0	99.0
OGFC-13	6.8	2.07	1.6	4 857.3	98.8

表 4 数据均是现场测定的结果,渗水性能可从侧面反映铺筑层的空隙率,进一步也可以体现各段的降噪效果。表 4 数据表明,从抗滑、降噪的角度来看,OGFC-13 最好,OGFC-13 掺加玻璃珠其次,AC-13 最差;3 者的施工压实度差别不大<sup>[8-11]</sup>。

5 结 语

- (1)隧道内铺设反光路面,不仅能达到节约电能目的,而且还提高了行车安全性。
- (2)隧道中铺筑掺加玻璃珠的 OGFC 路面结构,能同时达到抗滑、降噪、阻燃和反光等目的,是一种很有发展前景的多功能性隧道路面结构形式。
- (3)5 种方案分析结果表明:在 OGFC-13 面层中掺加 10%~15%、直径为 2~3 mm 的玻璃珠时,可以满足路用性能各项技术指标的要求;玻璃珠直径过小,会使玻璃珠陷入集料空隙之间而达不到反光的效果;直径过大,则会使路用性能下降过多,而

且会因玻璃珠覆盖率减小影响反光效果。

(4)玻璃珠不仅可掺入 OGFC 混合料中,而且可加入密级配的沥青混合料中,但其最佳掺加量及直径的选择,还需通过试验验证来确定。

参考文献:  
References:

[ 1 ] JTGD70—2004,公路隧道设计规范[S].

[ 2 ] Yue H,Roger N B,Oliver H. A review of the use of recycled solid waste materials in asphalt pavements [J]. Resources,Conservation and Recycling,2007,52 (1):58-73.

[ 3 ] 杨 良,郭忠印,杨学良,等. OGFC 面层在公路隧道防火中的作用[J]. 安全与环境学报,2004,4(4):83-87. YANG Liang, GUO Zhong-yin, YANG Xue-liang, et al. Effect of porous asphalt pavement on highway tunnel fire protection[J]. Journal of Safety and Environment,2004,4(4):83-87.

[ 4 ] 黄 翀,欧阳艳东,周学平,等. 玻珠材料的反光特性[J]. 汕头大学学报:自然科学版,2004,19(2):23-27. HUANG Chong, OUYANG Yan-dong, ZHOU Xue-ping, et al. Reflection properties of glass micro-bead [J]. Journal of Shantou University: Natural Science, 2004,19(2):23-27.

[ 5 ] 吕康成. 公路隧道运营管理[M]. 北京:人民交通出版社,2006.

[ 6 ] 韩 森. 露石水泥混凝土路面研究[D]. 西安:长安大学,2006.

[ 7 ] JTJ 026.1—1999,公路隧道通风照明设计规范[S].

[ 8 ] 沙爱民,王玲娟,耿 超. 大粒径碎石沥青混合料振动压实方法[J]. 长安大学学报:自然科学版,2008,28 (2):1-4. SHA Ai-min, WANG Ling-juan, GENG Chao. Vibrating compaction method of large stone asphalt mixture [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition,2008,28(2):1-4.

[ 9 ] 王选仓,侯荣国. 长寿命路面结构设计[J]. 交通运输工程学报,2007,7(6):46-49. WANG Xuan-cang, HOU Rong-guo. Structure design of long-life pavement [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering,2007,7(6):46-49.

[10] 黄宝涛,田伟平,李家春,等. 沥青路面抗滑性能定量评价的分形方法[J]. 中国公路学报,2008,21(4):12-17. HUANG Bao-tao, TIAN Wei-ping, LI Jia-chun, et al. Fractal method based on quantitative evaluation of asphalt pavement anti-slide performance[J]. China Journal of Highway and Transport,2008,21(4):12-17.

[11] Su N,Chen J S. Engineering properties of asphalt concrete made with recycled glass[J]. Resources,Conservation and Recycling,2002,35(4):259-274.