

基于橡胶粉降噪微表处路用性能研究的配合比优化

王 晨¹, 李秀君¹, 朱思杨¹, 谢 伟², 盛靖昱¹

(1. 上海理工大学 环境与建筑学院, 上海 200093; 2. 浙江致欣检测技术有限公司, 嘉兴 314003)

摘要: 通过分析橡胶粉降噪微表处减振降噪机理, 基于正交试验对橡胶粉降噪微表处路用性能影响因素进行研究, 对橡胶粉降噪微表处的配合比进行优化。研究表明: 微表处路面添加橡胶粉后可以通过增加阻尼的方式来减弱轮胎在路面上的振动, 而且混合料表面形成多孔吸声结构来降低噪声, 同时起到减振降噪的作用; 改性乳化沥青配合比、橡胶粉掺量以及橡胶粉粒径均会不同程度地影响橡胶粉降噪微表处的抗车辙性能、抗水损性能以及降噪性能; 根据各因素对各技术指标的贡献顺序对橡胶粉降噪微表处进行了配合比的优化: 级配为①类型均匀级配, 其中, 改性乳化沥青用量为 11.5%, 外加水量为 3%, 水性环氧树脂掺量为 10%, 另外, 橡胶粉的细度选择 0.250 mm, 掺量为 3%。

关键词: 橡胶粉降噪; 正交试验; 路用性能; 配合比优化

中图分类号: U 414 **文献标志码:** A

Mix ratio optimization for rubber powder noise reduction micro-surfacing based on road performance analysis

WANG Chen¹, LI Xiujun¹, ZHU Siyang¹, XIE Wei², SHENG Jingyu¹

(1. School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;
2. Zhejiang Zhixin Testing Technology Co., Ltd., Jiaxing 314003, China)

Abstract: By analyzing the vibration and noise reduction mechanism of the rubber powder noise reduction micro-surfacing, the influential factors for this kind of micro-surfacing on the road performance were studied based on orthogonal tests, and the mix ratio of the rubber powder mixture used in the micro-surfacing was optimized. The results show that the addition of rubber powder to the micro-surfacing can reduce the tire vibration on road surface by virtue of its damping effect and the porous sound-absorbing structure on the mixture surface can reduce the noise. It can play the role of vibration and noise reduction simultaneously. The blending ratio of emulsified asphalt, the amount of rubber powder and the particle size of rubber powder will affect the rutting resistance, water resistance and noise reduction performance of the rubber powder noise reduction micro-surfacing to different extent. According to the contribution order of each factor to each technical index, the mix ratio for the rubber powder noise reduction micro-surfacing was optimized. The optimal gradation selection is type 1

收稿日期: 2019-04-18

第一作者: 王 晨(1995-), 女, 硕士研究生. 研究方向: 道路养护. E-mail: 529893575@qq.com

通信作者: 李秀君(1976-), 女, 副教授. 研究方向: 道路养护. E-mail: junzixiu@163.com

uniform gradation, where the modified emulsified asphalt is 11.5%, the added water is 3%, and the waterborne epoxy resin is 10%. In addition, the fineness of the rubber powder is 0.250 mm, and the dosage is 3%.

Keywords: rubber powder noise reduction; orthogonal test; road performance; mix ratio optimization

微表处路面相比于普通沥青路面来说, 行车所产生的噪声较大, 持续高分贝的道路噪声不仅影响了驾乘人员的心理和行车安全, 也给附近居民的生活带来了许多不便^[1]。而在生活中发现, 被称为“黑色污染”的废旧轮胎数量逐年增长, 大量的废旧轮胎既浪费了宝贵的橡胶资源, 也形成了比塑料污染(白色污染)更难处理的黑色污染, 但如果将这些废旧轮胎经过合理处置再利用到道路建设中来, 既解决了废旧轮胎污染环境的问题, 又达到了沥青路面减振降噪的目的。研究发现, 橡胶粉可以对路面起到降噪的作用, 如文献[2-3]基于室内试验和试验路铺筑发现, 在不同振动频率范围内, 橡胶粉改性乳化沥青微表处混合料可以大幅度地降低传统微表处的噪音。影响微表处噪声大小的因素有很多, 文献[4-5]通过研究微表处混合料的级配组成, 提出微表处导致车内噪声增大的原因主要与沥青用量、集料、施工工艺、

乳化沥青可拌和时间、稀浆混合料的和易性等因素有关, 可通过改变沥青含量、掺加废旧橡胶粉及控制级配等措施来减少车内噪声, 并推荐了低噪音微表处路面的级配范围。本文采用干法工艺将废旧轮胎再处理后的橡胶粉与集料拌和均匀后, 加入乳化沥青制得橡胶粉降噪微表处混合料, 基于正交试验对橡胶粉降噪微表处路用性能和降噪性能影响因素进行研究, 对配合比进行优化, 使其达到减振降噪的目的。

1 试验原材料及性能指标

1.1 改性乳化沥青

根据《微表处和稀浆封层技术指南》^[6]中相关规定, 试验采用 SBR 改性乳化沥青(3%SBR 胶乳), 改性乳化沥青的基本技术指标如表 1 所示。

表 1 改性乳化沥青技术指标
Tab.1 Technical indicators of modified emulsified asphalt

试验项目		单位	技术指标	试验值	试验方法
筛上剩余量(筛孔孔径 1.18 mm)		%		0.01%	T0652
电荷			阳离子	阳离子	T0653
破乳速度				慢裂	T0658
沥青标准粘度 C _{25,3}		Pa·s	12~60	16.00	T0622
蒸发残留物含量		%	60	60.46%	T0651
蒸发残留物性质	针入度(25 ℃)	0.1 mm	40~100	65.50	T0604
	软化点	℃	53	53.10	T0606
	延度(5 ℃)	cm	20	38.00	T0605

1.2 水性环氧树脂及固化剂

试验采用由艾施姆科技有限公司生产的水性环氧树脂(Water-borne Epoxy Resin, 简称 WER), WER 具有稳定性及热固性好、粘结性强、无毒无污染等诸多优点^[7]。水性环氧树脂中树脂与固化剂的掺加比例为 3:2, 其性能如表 2 所示。

1.3 集料

试验中的粗集料选用强度高、耐腐蚀性强和抗压性强的玄武岩, 细集料选用石灰岩, 此类岩石能够保证改性乳化沥青与集料之间具有较好的粘结力^[8]。根据《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20-2011)^[9]相关规定检测得到集料的各项技术指标如表 3 所示。

表 2 水性环氧树脂体系环氧树脂及固化剂性能指标

Tab.2 Performance index of epoxy resin and curing agent for the waterborne epoxy resin system

性能指标	环氧树脂	固化剂
外观颜色	青黑色	灰色
形态	乳状液	粘稠液
固含量(%)	53.51	18.91
粘度(Pa·s, 20 ℃)	0.4~0.7	30~40
pH(25 ℃)	7~8	9~10
环氧值(mol/100 g)	≥0.20	
胺值(mol/100 g)		≥0.21
D50 粒度/6 h(μm)		2.039
拉伸强度(25 ℃, 500 mm/min, MPa)		1.574
拉伸断裂率(25 ℃, 500 mm/min, %)		186.119

1.4 级配的选择

本文将高等级高速公路微表处路面结构作为研究对象，试验中采用了 MS-3 型级配。由于我国推广的微表处级配参照了国际稀浆分层协会的有

表 3 集料的技术指标

Tab.3 Technical indicators of aggregates

材料名称	测试项目	测试结果	标准	试验方法
粗集料	石料压碎值	19	≤26	T0316
粗集料	洛杉矶磨耗损失	20	≤28	T0317
粗集料	坚固性	7	≤12	T0314
粗集料	针片状含量	11	≤15	T0312
细集料	坚固性	7	≤12	T0340
矿粉	砂当量	77	≥65	T0334

关要求，所以，在 4.75~9.50 mm 之间没有再进行更细的划分，使得相邻筛孔的尺寸偏大。研究表明，混合料中较大粒径集料的占比直接影响了微表处路面的粗糙程度，从而影响路面产生噪声的大小^[4]。所以，通过在 4.75~9.50 mm 之间添加 6.70 mm 筛孔对粗集料进行细分，且保持 4.75 mm 以下集料的级配不变，从而细化微表处混合料中集料级配的具体组成比例，级配类型及级配曲线图如表 4 及图 1 所示。

表 4 级配类型

Tab.4 Grading type

编号	各筛孔(mm)通过率									粗集料特征
	9.50	6.70	4.75	2.36	1.18	0.60	0.30	0.15	0.075	
1	100	90	80	46	38	26.1	15	10	5.4	均匀
2	100	85	80	46	38	26.1	15	10	5.4	偏粗
3	100	95	80	46	38	26.1	15	10	5.4	偏细

注: 粗集料粒径大于 4.75 mm, 中集料粒径介于 4.75~0.15 mm 之间, 细集料粒径小于 0.15 mm。

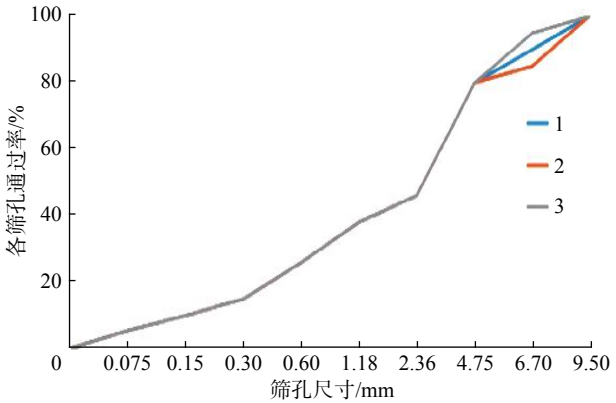


图 1 级配曲线图

Fig. 1 Gradation curve

2 橡胶粉降噪微表处减振降噪机理分析

橡胶粉的掺入将混合料中“石料-石料”的接触形式变为“石料-橡胶-石料”，如图 2(a)和 2(b)所示。当路面受到振动冲击的作用时，橡胶作为阻尼材料会将部分振动产生的能量直接消耗掉，最终有效地减弱了路面系统的振动。同时，橡胶本身作为分子量超 10 000 的高分子聚合物，当轮胎滚过路面时，橡胶在受到周围集料的挤压作用后发生形变，将部分由振动所产生的能量存储到橡胶分子链中，当轮胎离开路面，作用力消失时，被存储的能量就被释放和消耗掉，从而起

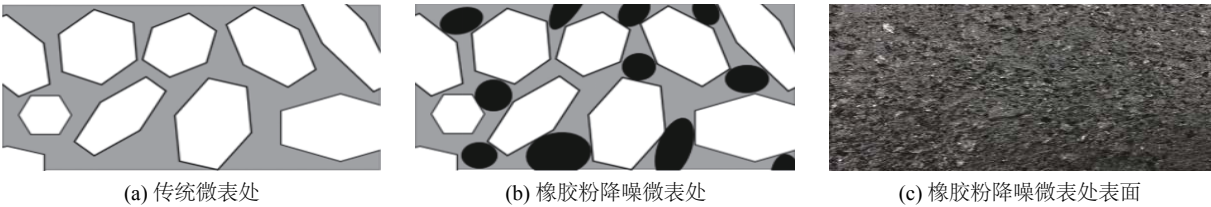


图2 减振降噪机理示意图

Fig.2 Schematic diagram of the vibration reduction mechanism

到减振的作用。

另外，相较于普通微表处试件，所有掺加了橡胶粉的微表处试件表面都有许多能用肉眼观察到的细小孔洞，如图2(c)所示。这是由于橡胶粉的添加使微表处表面形成了多孔吸声结构，橡胶本身具有弹性，所以，橡胶粉和沥青混合料混合后，在橡胶粉聚集处会形成大量相互连通的小孔，使得在材料表面和内部有许多的细小孔隙，这些孔隙不封闭且互相连通，具有一定的通气性。橡胶粉降噪微表处混合料固体部分在空间组成骨架，称为筋络，其作用就是将那些较大的孔隙分割成许多微小的通道。当声波入射到材料表面时，一部分在材料表面上反射，一部分则进入到材料内部向前传播，在传播过程中引起孔隙中的空气运动，且与形成孔壁的固体筋络发生摩擦，由于黏滞性和热传导效应，声能会转化为热能的形式消耗掉。经刚性壁面反射后的声波经过材料内部再次返回到表面，一部分波透回到空气中，一部分又返回到材料内部，如此反复，直到平衡。基于此，大部分声能就被橡胶粉降噪微表处混合料吸收消耗掉了。

综上所述，橡胶粉降噪微表处混合料通过增加阻尼的方式减弱轮胎在路面上的振动，同时形成多孔吸声结构来降低噪声，同时起到减振降噪的作用。

3 基于路用性能研究的配合比优化

3.1 试验方法及试验结果

考虑到影响橡胶粉降噪微表处路用性能的因素较多，根据《微表处和稀浆封层技术指南》^[6]和《路用废胎硫化橡胶粉》^[10]中相关规定和实际工程相关经验，本文主要研究配合比、橡胶粉粒径和橡胶粉添加量这3个因素对橡胶粉降噪微表处抗车辙性能、抗水损性能以及降噪性能的影响。由实际工程经验确定控制每种因素影响范围的

3个水平，通过设计三因素三水平正交试验对3个因素影响路用性能的程度进行量化分析，选用L9(3³)正交表。试验方案及结果如表5所示。因素A主要涉及到集料级配、改性乳化沥青用量和外加水量。在大量试验基础上，选取噪声水平较低的3组配合比(见表6)作为因素A的3个水平。将橡胶粉掺量2%，3%和4%作为因素B的3个水平(B₁: 2%，B₂: 3%，B₃: 4%)，将橡胶粉粒径0.850，0.425和0.250 mm作为因素C的3个水平(C₁: 0.850 mm，C₂: 0.425 mm，C₃: 0.250 mm)。

表5 正交试验方案及结果

Tab.5 Orthogonal test plan and the results

试验号	A 配合比	B 橡胶粉掺量	C 橡胶粉粒径/mm	横向轮辙变形率/%	1 h 湿轮磨耗损失/(g·m ⁻²)	噪声水平/dB
1	①	2%	0.850	1.87	442	67.9
2	①	3%	0.250	2.23	533	67.5
3	①	4%	0.425	1.95	1 418	67.3
4	②	2%	0.250	1.28	296	68.3
5	②	3%	0.425	3.63	515	67.6
6	②	4%	0.850	3.96	1 404	68.4
7	③	2%	0.425	1.62	490	67.3
8	③	3%	0.850	2.06	538	67.1
9	③	4%	0.250	3.78	2 206	67.0

表6 橡胶粉降噪微表处配合比

Tab.6 Mix ratio for the rubber powder noise reduction micro-surfacing

水平	配合比	级配类型	改性乳化沥青用量/%	外加水量/%	水性环氧树脂掺量/%
A1	①	1	11.5	3	10
A2	②	2	11.5	4	5
A3	③	3	10.5	4	10

3.2 基于极差分析法的试验结果分析

根据JB/T7510—1994《工艺参数优化方法》^[11]中规定，采用极差分析法计算同因素各水平下的

最大值与最小值之差, 分析结果如表 7 所示。 K 为各列同级位的各试验指标之和, $\bar{k}$ 为各 K 平均值, R 为各列极差, $R = \bar{k}_{\max} - \bar{k}_{\min}$ 。极差越大, 两级位相应的指标差别也越大, 即对结果影响越大。

表 7 极差分析结果
Tab.7 Range analysis results

因 素	横向轮辙变形率/%						
	K_1	K_2	K_3	$\bar{k}_1$	$\bar{k}_2$	$\bar{k}_3$	R
A 配合比	6.05	8.84	7.46	2.02	2.95	2.49	0.93
B 橡胶粉掺量	4.77	7.92	9.69	1.59	2.64	3.23	1.64
C 橡胶粉粒径	7.89	7.29	7.20	2.63	2.43	2.40	0.23

因 素	1 h 湿轮磨耗损失/(g·m ⁻²)						
	K_1	K_2	K_3	$\bar{k}_1$	$\bar{k}_2$	$\bar{k}_3$	R
A 配合比	2 687	2 801	3 452	896	933	1 151	255
B 橡胶粉掺量	1 181	1 500	6 259	394	500	2 086	1 692
C 橡胶粉粒径	2 931	3 175	2 834	977	1 058	945	113

因 素	噪声水平/dB						
	K_1	K_2	K_3	$\bar{k}_1$	$\bar{k}_2$	$\bar{k}_3$	R
A 配合比	202.9	203.8	201.5	67.6	67.9	67.2	0.7
B 橡胶粉掺量	203.5	202.2	201.7	67.8	67.4	67.2	0.6
C 橡胶粉粒径	202.5	202.7	203	67.5	67.6	67.7	0.2

根据表 7 中的数据可得各性能主要影响因素：
横向轮辙变形率的影响顺序为：B 橡胶粉掺量>A 配合比>C 橡胶粉粒径($R_B>R_A>R_C$)；
1 h 湿轮磨耗损失的影响顺序为：B 橡胶粉掺量>A 配合比>C 橡胶粉粒径($R_B>R_A>R_C$)；
噪声水平的影响顺序为：A 配合比>B 橡胶粉掺量>C 橡胶粉目数($R_A>R_B>R_C$)。

3.3 橡胶粉降噪微表处的路用性能分析

基于综合评分法分析各因素对橡胶粉降噪微表处路用性能, 即抗车辙性能、抗水损性能以及降噪性能的影响程度。

3.3.1 抗车辙性能

微表处混合料的抗车辙性能用试件宽度变形率来评价, 试件宽度变形率越大, 说明混合料的抗车辙性能越不好。由图 3 可知, 主要因素 B 中, 当橡胶粉掺量从 2% 增加到 4% 时, 横向轮辙变形率从 1.59% 增加到 3.23%, 增长了约 1 倍, 说明添加橡胶粉使微表处混合料抗车辙性能变差, 这是由于过多的橡胶粉很难在混合料中均匀分布, 同时吸附了不少的沥青, 降低了混合料的沥青膜厚度, 致使集料间粘附力下降, 无法在反复荷载作用下提供良好的整体强度, 减弱了混合料的抗车

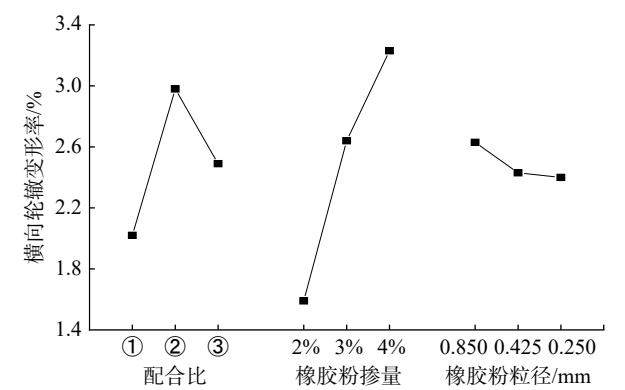


图 3 三因素与抗车辙性能关系

Fig. 3 Relationship between the three factors and anti-rutting performance

辙性能。次要因素 A 中, ①, ②, ③这 3 种类型的配合比所对应的变形率分别为 2.02%, 2.95%, 2.49%, 说明不同配合比本身的抗车辙能力也影响了橡胶粉微表处的抗车辙性能。最次要因素 C 中, 当橡胶粉粒径从 0.850 mm 减小到 0.250 mm 时, 宽度变形率从 2.63% 减小到 2.4%, 说明橡胶粉细度对混合料抗车辙变形能力影响较小。因此, 以微表处混合料抗车辙性能考虑, 3 种因素中, A_1 , B_1 和 C_3 的抗车辙性能最好。

3.3.2 抗水损性能

微表处混合料的抗水损性能用1 h湿轮磨耗损失来评价,湿轮磨耗损失越小,抗水损性能越好。由图4可知,主要因素B中,当橡胶粉掺量从2%增加到3%时,湿轮磨耗损失也增加了120 g/m²,此时耐磨耗性能有略微下降;但当掺量从3%增加到4%时,湿轮磨耗损失大幅度增加了1 147 g/m²,增加了约10倍。这表明在本研究中,当橡胶粉掺量超过3%,微表处混合料的抗水损性能急剧下降。同时由表5可知,第3,6,9组试验中的湿轮磨耗损失质量不满足指南中的要求(即不大于540 g/m²),所以,橡胶粉掺量应控制在3%以下。相较于因素B对混合料抗水损性能明显的不利影响,A,C两个因素的影响明显较小,这主要是因为橡胶颗粒在混合料中具有较大的弹性变形幅度,但沥青混合料本身不能进行协同变形,使混合料的整体性受到了影响。与此同时,橡胶本身的极性又大于沥青,对水的吸附性要明显强于沥青,水分更容易进入橡胶颗粒与沥青的粘附界面中,这也导致了混合料集料之间的粘附性变差。因此,从微表处混合料抗水损性能考虑,3种因素中,A₁,B₁和C₃的抗水损性能最好。

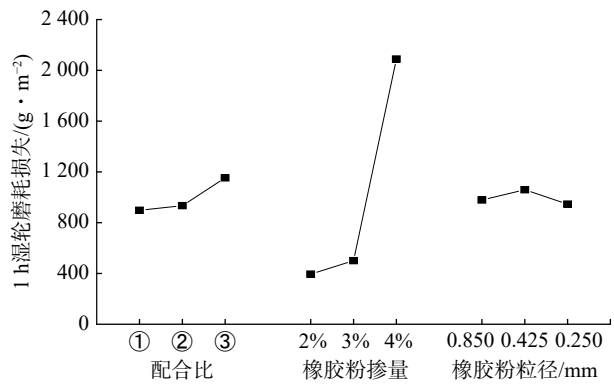


图4 三因素与抗水损性能关系

Fig.4 Relationship between the three factors and water resistance

3.3.3 降噪性能

由图5可知,主要因素A中,③类型的降噪性能最佳,②类型的最差。这是因为微表处本身表面的宏观构造对于轮胎/路面噪声的大小起到了重要作用,路面越平整,所产生的振动就越小。次要因素B中,橡胶粉掺量越多,降噪性能就越好,这主要是因为混合料的阻尼随着橡胶粉掺量的增加而增大,在路面受到撞击时,阻尼便会将一部分能量消耗掉。但掺量从2%提升到

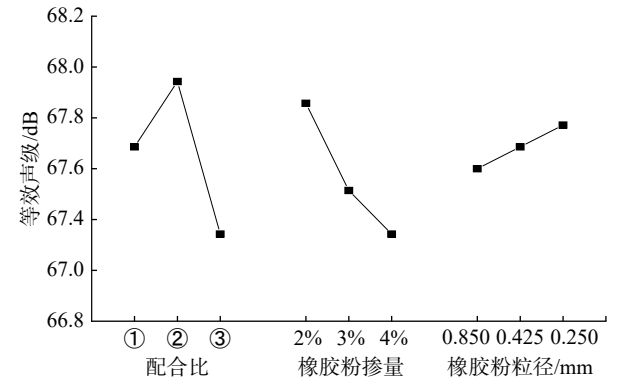


图5 三因素与降噪性能关系

Fig.5 Relationship between the three factors and noise reduction performance

3%时的噪声水平降低幅度比掺量从3%提升到4%时的大,所以,考虑到经济性,将掺量设置在3%也是较好的。最主要因素C中,粒径0.850 mm橡胶粉的降噪效果较好,这是因为橡胶粉经溶胀作用之后,粒径0.850 mm的尺寸更好地填补了混合料的空隙,同时降低了混合料表面构造深度与表面刚度,但又不会过多改变混合料的原有结构。因此,从微表处混合料降噪性能出发,3种因素中,A₃,B₃,C₁的降噪性能最好。

3.4 橡胶粉降噪微表处最优配合比

通过对各因素的分析并综合平衡各因素对路用性能的影响,可以得出橡胶粉降噪微表处配合比优化方案为:级配为①类型均匀级配,其中,改性乳化沥青用量为11.5%,外加水量为3%,水性环氧树脂掺量为10%,另外,橡胶粉的细度选择0.250 mm,掺量为3%。

4 结 论

a. 添加了橡胶粉的微表处混合料通过增加阻尼的方式减弱轮胎在路面上的振动,同时形成多孔吸声结构来降低噪声,同时起到减振降噪的作用。

b. 通过正交试验来评价改性乳化沥青配合比、橡胶粉掺量以及橡胶粉粒径对橡胶粉降噪微表处抗车辙性能、抗水损性能以及降噪性能的影响,3种因素对路用性能的贡献由大到小的顺序分别为:抗车辙性能:橡胶粉掺量—配合比—橡胶粉粒径;抗水损性能:橡胶粉掺量—配合比—橡胶粉粒径;降噪性能:配合比—橡胶粉掺量—橡胶粉粒径。

c. 对各因素进行极差分析并综合平衡各因素对路用性能的影响, 得到橡胶粉降噪微表处配合比的优化方案为: 级配为①类型均匀级配, 其中, 改性乳化沥青用量为 11.5%, 外加水量为 3%, 水性环氧树脂掺量为 10%, 另外, 橡胶粉的细度选择为 0.250 mm, 掺量为 3%。

参考文献:

[1] 张冉. 微表处路面噪声机理与减噪技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.

[2] BUENO M, LUONG J. Noise reduction properties of an experimental bituminous slurry with crumb rubber incorporated by the dry process[J]. *Coatings*, 2014, 4: 602–613.

[3] 连静, 陈喜平. 基于橡胶改性沥青技术低噪声微表处混合料耐久性试验研究[J]. *公路*, 2017, 62(4): 269–275.

[4] 王海有. 微表处减噪技术试验研究[J]. *河南科技*,

2005(13): 34–35.

[5] 杨晓勇, 李春雷, 陈功, 等. 环境友好型微表处混合料配合比设计[J]. *华东公路*, 2013(2): 23–25.

[6] 黄颂昌, 徐剑, 秦永春, 等. JTG/TF40-02-2005, 微表处和稀浆封层技术指南[S]. 北京: 人民交通出版社, 2005.

[7] 陈平, 刘胜平, 王德中. 环氧树脂及其应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.

[8] 徐剑, 黄颂昌, 秦永春, 等. 微表处在铁四高速公路养护工程中的应用研究[J]. *公路*, 2004(3): 117–120.

[9] 李福善, 严二虎, 黄颂昌, 等. JTG E20-2011, 公路工程沥青及沥青混合料试验规程[S]. 北京: 人民交通出版社, 2011.

[10] 王旭东, 周兴业, 张蕾, 等. JT/T 797-2011, 路用废胎硫化橡胶粉[S]. 北京: 人民交通出版社, 2011.

[11] 马贤智, 王援朝, 桑永全, 等. JB/T 7510-1994, 工艺参数优化方法 正交试验法[S]. 北京: 机械科学研究院, 1995.

(编辑: 石 瑛)

(上接第 257 页)

[9] DUTTA R K, VAN KAN J A, BETTIOL A A, et al. Polymer microlens replication by nanoimprint lithography using proton beam fabricated Ni stamp[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 2007, 260(1): 464–467.

[10] PENG C, LIANG X G, FU Z L, et al. High fidelity fabrication of microlens arrays by nanoimprint using conformal mold duplication and low-pressure liquid material curing[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures*, 2007, 25(2): 410–414.

[11] 张新宇, 裴先登, 谢长生. 用于近场集成光学头微透镜器件的灰度掩模技术[J]. *光学技术*, 2002, 28(4): 291–292, 295.

[12] 许乔, 杨李茗, 舒晓武, 等. 微透镜阵列反应离子束蚀刻传递研究[J]. *光学学报*, 1998, 18(11): 1523–1527.

[13] TROST H J, AYERS S, CHEN T, et al. Using drop-on-demand technology for manufacturing GRIN lenses[C]//

Proceedings of 2001 Ann. Mtg. Raleigh: ASPE, 2001: 533–536.

[14] POPOVIC Z D, SPRAGUE R A, CONNELL G A N. Technique for monolithic fabrication of microlens arrays[J]. *Applied Optics*, 1988, 27(7): 1281–1284.

[15] 用喷墨法生产微透镜[J]. *光机电信息*, 2002(7): 45.

[16] YU W X, YUAN X C. UV induced controllable volume growth in hybrid sol-gel glass for fabrication of a refractive microlens by use of a grayscale mask[J]. *Optics Express*, 2003, 11(18): 2253–2258.

[17] FRITZE M, STERN M B, WYATT P W. Laser-fabricated glass microlens arrays[J]. *Optics Letters*, 1998, 23(2): 141–143.

[18] 黄校军. 基于表面微透镜阵列的立体随角异图防伪膜制备研究[D]. 北京: 北京印刷学院, 2015.

[19] 张嘉元. 彩色滤光片阵列制作工艺及应用研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2014.

[20] 范广飞. 光场打印 3D 图形机理与系统研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2016.

(编辑: 丁红艺)