

文章编号:1671-1637(2014)02-0007-07

水泥稳定沥青路面铣刨料力学性能分析

林 通¹, 邝宏柱², 胡力群¹, 焦生杰¹, 宋世杰¹

(1. 长安大学 道路施工技术与装备教育部重点实验室, 陕西 西安 710064;

2. 江西省高速公路投资集团有限责任公司, 江西 南昌 330025)

摘 要:结合陕西渭南 G108 线二级公路大修工程, 设计了 6 种水泥稳定沥青路面铣刨料配合比。通过室内试验研究了水泥稳定沥青路面铣刨料的击实特性, 成型试件后通过力学试验, 研究了水泥用量、铣刨料组成、温度以及养生龄期对混合料无侧限抗压强度、抗折强度和抗压回弹模量的影响规律。分析结果表明:水泥稳定沥青路面铣刨料的最大干密度随着面层和基层铣刨料含量的增加而减小, 而最佳含水量随之增大;水泥稳定沥青路面铣刨料的抗压、抗折强度及其抗压回弹模量均随养生龄期和水泥石用量的增加而增大, 但随着试验温度升高而下降;掺入新碎石有助于提高混合料的强度和模量。在使用合理的情况下, 水泥稳定沥青路面铣刨料的强度可达到 3.2 MPa, 能够满足除特重交通以外的路面基层要求。

关键词:道路工程; 铣刨料; 水泥稳定; 击实; 力学性能

中图分类号: U416.217

文献标志码: A

Analysis of mechanical properties for cement stabilized asphalt pavement milling mixture

LIN Tong¹, KUANG Hong-zhu², HU Li-qun¹, JIAO Sheng-jie¹, SONG Shi-jie¹

(1. Key Laboratory of Road Construction Technology and Equipment of Ministry of Education,

Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Jiangxi Expressway Investment Group

Co., Ltd., Nanchang 330025, Jiangxi, China)

Abstract: Six proportions of cement stabilized asphalt pavement milling mixture were designed combining the overhaul project of G108 secondary road in Weinan, Shaanxi. Based on laboratory test, the compaction properties of cement stabilized asphalt pavement milling mixture were studied. Through mechanics test of molding specimens, the influence laws of cement content, milling mixture composition, temperature and curing period on the unconfined compressive strength, rupture strength and compressive resilient modulus of mixture were studied. Analysis result shows that the maximum dry density of cement stabilized asphalt pavement milling mixture declines with the increases of milling mixture contents in surface course and base course, but the optimum moisture content increases. The compressive strength, rupture strength, and compressive resilient modulus of cement stabilized asphalt pavement milling mixture increase with the increases of curing period and cement content, but decreases with the increase of temperature. Incorporating new macadam is helpful to improve the strength and modulus of mixture. In the case of reasonable use, the strength of cement stabilized asphalt pavement milling

收稿日期:2013-11-10

基金项目:国家 973 计划项目(2012CB626814);江西省交通运输厅科技计划项目(2011C0007);中央高校基本科研业务费专项资金项目(CHD2010JC107, CHD2011TD014)

作者简介:林 通(1980-),男,福建福州人,长安大学工学博士研究生,从事路面施工技术研究。

导师简介:焦生杰(1955-),男,陕西富平人,长安大学教授,工学博士。

mixture can reach 3.2 MPa, which can meet the requirement of pavement base except for over-heavy traffic. 5 tabs, 10 figs, 20 refs.

Key words: road engineering; milling mixture; cement stabilization; compaction; mechanical property

Author resumes: LIN Tong(1980-), male, doctoral student, +86-29-82334496, 67662782@qq.com; JIAO Sheng-jie(1955-), male, professor, PhD, +86-29-82334496, jsj@chd.edu.cn.

0 引 言

沥青路面现场冷再生技术不仅能够利用旧路面的废弃材料从而节省了筑路材料,还解决了废弃材料对空间的占用及对环境的污染,同时现场冷再生技术还具有简化施工工序、缩短工期等优点^[1]。

国内外很多研究人员开展了路面材料再生利用的研究。马君毅研究了水泥稳定旧沥青路面材料冷再生后的无侧限抗压强度、劈裂强度和抗压回弹模量等主要力学指标,发现再生混合料的无侧限抗压强度随基层、面层掺配比例的改变而发生变化^[2];张海等对冷再生材料的疲劳性能进行了研究,认为水泥冷再生基层材料的疲劳性能不如常规半刚性基层材料^[3];纪小平等在热再生沥青混合料拌和温度研究中对沥青路面面层铣刨料的性质进行了分析^[4];Karlsson 等对沥青混合料铣刨料中沥青组分及化学成分变化进行了研究^[5-6];Iwanski 等研究了泡沫沥青稳定路面铣刨料的物理和力学性能,认为泡沫沥青用量的增加能够提高混合料的劈裂强度^[7];Taha 利用水泥窑粉尘作为结合料稳定路面再生料,并对混合料的抗压强度和击实特性进行了研究^[8];张西棉在水泥稳定路面铣刨料的研究中对目前就地冷再生设备的功能要求进行了总结^[9];耿九光等在研究水泥-乳化沥青复合稳定路面再生料力学性能的基础上给出了混合料组成设计方法^[10];张超等利用水泥混凝土路面破碎料作为路面基层,并认为其力学特性能够满足要求^[11];李强等对沥青路面冷再生混合料的疲劳性能进行了研究,发现随温度降低再生混合料的疲劳阻抗提高,同时其疲劳寿命对应力水平的敏感程度也有所增强^[12];刘建兰从原材料、配合比设计、施工工艺等方面论述了水泥稳定铣刨料的再生技术,认为采用水泥稳定铣刨料作基层

环保且节约成本^[13];张敏江等在研究中发现,在合理地进行配合比设计,再生剂用量达到 5% 以上时,冷再生材料可以用于沥青路面基层之中^[14];郭银涛等对水泥-改性乳化沥青稳定沥青冷再生混合料进行了研究,认为水泥能显著地提高改性乳化沥青冷再生混合料的高温稳定性和水稳定性^[15];王晓刚等对水泥稳定冷再生材料的抗冲刷性能进行了研究,发现水泥稳定碎石冷再生混合料经过一段时间的冲刷后,冲刷量趋向于平稳,并能保持较高的抗压强度^[16];冯德成等对水泥稳定再生料的劈裂应力-应变特性进行了研究,发现劈裂强度、劈裂回弹模量和脆性指数均随温度升高而降低,降幅随冷再生料掺量增加而增大^[17];宋世杰等通过研究发现,沥青路面铣刨料往往杂质较多,且级配变异性较大,对其击实特性、力学性能、收缩性能及抗冲刷能力有很大影响,一般含泥量越大性能越差^[18-20]。

综上所述,国内外在路面材料冷再生方面开展了大量研究工作并取得了一定的成果。但由于不同地区、不同等级路面的使用环境有很大差异,导致路面铣刨料组成、性质也有很大不同。本文结合陕西渭南 G108 线二级公路大修工程,设计了 6 种混合料配合比,通过室内试验研究了水泥用量、温度以及养生龄期对水泥稳定沥青路面铣刨料击实特性、无侧限抗压强度、抗折强度和抗压回弹模量的影响规律。

1 原材料性质

1.1 铣刨料

路面铣刨料取自 G108 国道施工现场,为便于研究,将路面铣刨料分成面层铣刨料和基层铣刨料。面层铣刨料主要为打碎后的旧沥青混合料,基层铣刨料主要为原路面打碎后的石灰稳定砾石土。将铣刨料晾干,并将结团打散后进行筛分,结果见表 1。

表 1 沥青路面铣刨料筛分结果

Tab. 1 Sieving test results of asphalt pavement milling mixture

铣刨料种类	通过不同筛孔尺寸(mm)的百分率/%											
	26.5	19	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
面层	100.0	99.1	89.0	68.9	52.0	36.8	25.0	17.9	14.3	10.7	6.5	3.6
基层	100.0	84.0	70.7	58.8	46.0	36.8	31.5	27.3	21.4	17.2	13.7	13.1

观测路面铣刨料可发现,面层铣刨料上大多粘附旧沥青,并有结团现象,同时不同程度的有粘土等杂物。基层铣刨料中除含有较大的石块外,还有不少结团的颗粒。从筛分结果可以看出,面层铣刨料的级配主要集中在 2.36~13.2 mm 之间,基层铣刨料中细料偏多。

1.2 碎石

由于旧路面经过铣刨后,铣刨料中细料较多或杂质较多,通常需要加入一定数量的新碎石粗集料以提高性能。试验中所用碎石为渭南某石料场石灰岩,压碎值为 28%,满足规范要求,碎石的级配见表 2。

表 2 碎石级配
Tab. 2 Macadam gradation

筛孔尺寸/mm	26.5	19	16	13.2	9.5	4.75
通过率/%	100.0	68.3	55.7	43.8	22.4	3.6

1.3 水泥

本研究采用水泥作为结合料,所用水泥为陕西耀县水泥厂生产的秦岭 42.5 号普通硅酸盐水泥,其各项技术指标见表 3。

表 3 水泥性质试验结果
Tab. 3 Test results of cement properties

细度(80 μm 方孔筛筛余量)/%	凝结时间/min		3 d 强度/MPa		28 d 强度/MPa	
	初凝	终凝	抗压	抗折	抗压	抗折
7.2	165	230	21.8	3.8	43.4	6.8

2 混合料配合比

在实际路面铣刨过程中,路面铣刨料中可能包含原路面沥青混合料铣刨料,也可能混有原路面基层铣刨料,此外为提高性能还会加入一定量的碎石。

表 5 各混合料的最大干密度和最佳含水量

Tab. 5 Maximum dry density and optimum moisture content of each mixture

混合料类型	不同水泥用量(%)时的最大干密度/(g·cm ⁻³)				不同水泥用量(%)时的最佳含水量/%			
	4	5	6	7	4	5	6	7
A	2.10	2.12	2.14	2.17	7.3	7.3	7.5	7.8
B	2.19	2.23	2.24	2.24	6.4	6.5	6.6	6.7
C	2.21	2.23	2.24	2.25	7.3	7.2	7.3	7.6
D	2.22	2.21	2.24	2.26	7.7	7.8	7.9	8.0
E	2.12	2.12	2.14	2.13	8.7	8.8	9.0	9.0
F	2.10	2.12	2.16	2.17	8.2	8.3	8.3	8.5

在试验中发现,各混合料中虽然均含有铣刨后的旧沥青混合料,但击实后混合料干密度随含水量的增加呈抛物线,这与普通水泥稳定碎石的击实曲线相似。试验结果表明,对于组成相同的混合料,随

为了对比混合料中各成分含量(质量分数)对混合料性能的影响,试验中设计了 6 种混合料,具体见表 4。

表 4 试验混合料类型
Tab. 4 Test mixture types

混合料类型	面层铣刨料含量/%	基层铣刨料含量/%	碎石含量/%
A	100		
B	80		20
C	60		40
D	60	20	20
E	60	30	10
F	80	20	

表 4 中:混合料 A 中全部为面层铣刨沥青混合料;混合料 B、C 中均包含铣刨沥青混合料和碎石,但含量不同;混合料 D、E 中的面层铣刨料含量相同,但基层铣刨料和新碎石含量不同;混合料 F 中包含面层铣刨料和基层铣刨料,但不添加新碎石。

在研究抗压强度、抗折强度、抗压回弹模量随龄期和温度变化时,各混合料均采用 5% 的水泥用量。研究水泥用量对抗压强度、抗折强度和抗压回弹模量的影响时,分别采用 4%、5%、6%、7% 的水泥用量。

3 水泥稳定沥青路面铣刨料击实特性

击实试验用于确定混合料的最大干密度和最佳含水量,可从一定程度上反映混合料的压实性能。研究中采用重型击实试验,试验方法参照《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》(JTG E51—2009)。表 5 为不同混合料在 4%、5%、6%、7% 水泥用量时的最大干密度及最佳含水量。图 1 为水泥用量为 5% 时,不同混合料的最大干密度和最佳含水量变化情况。

着水泥用量增加,最大干密度呈增加趋势,最佳含水量也稍有增加。混合料中掺入新碎石后,混合料的最大干密度会随之增加,而最佳含水量会随之减少。当混合料中混有较多的基层铣刨料时,最大干密度

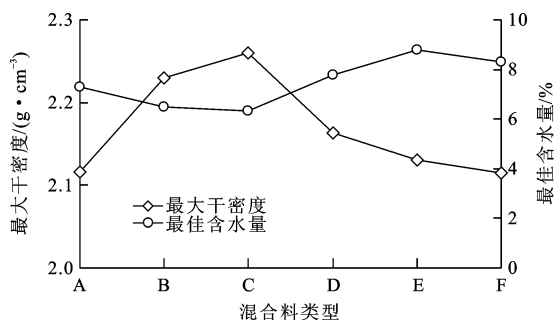


图1 5%水泥用量下混合料最大干密度和最佳含水量
Fig. 1 Maximum dry density and optimum moisture content of each mixture with 5% cement content

会减小,但不明显,而最佳含水量会明显增加,这主要是因为基层铣刨料中含有较多的细料。

4 力学性能试验分析

4.1 无侧限抗压强度

无侧限抗压强度试验采用静压法成型的 $15\text{ cm} \times 15\text{ cm}$ 圆柱体试件,压实度为 98%,每组 7 个试件,养生温度为 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$,湿度为 95%。无侧限抗压强度测试方法参照《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》(JTGE51—2009)。

图2为5%水泥用量下各混合料在7、28、90 d龄期下无侧限抗压强度试验结果。图3为不同温度下采用5%水泥用量时各混合料的无侧限抗压强度。图4为不同水泥用量下各混合料7 d龄期下无侧限抗压强度。从试验结果可以得出如下结论。

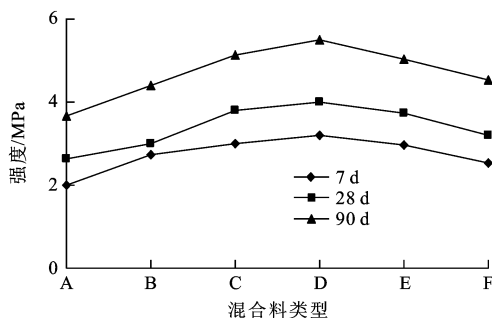


图2 不同龄期再生料的无侧限抗压强度
Fig. 2 Unconfined compressive strengths of recycled mixtures with different curing periods

(1)各混合料无侧限抗压强度均随着养生龄期的延长而增加。在各龄期中,只包含面层铣刨料的混合料无侧限抗压强度最低,当其中掺入部分新碎石后强度会得到提高,但强度最高的是既包含面层铣刨料又包含新碎石和部分基层铣刨料的混合料。试验之前,预计加入基层铣刨料后对无侧限抗压强度不利,但试验结果有所不同,分析其原因认为,基层铣刨料中含

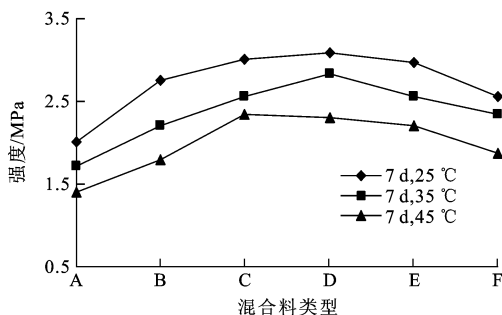


图3 不同温度再生料的无侧限抗压强度
Fig. 3 Unconfined compressive strengths of recycled mixtures at different temperatures

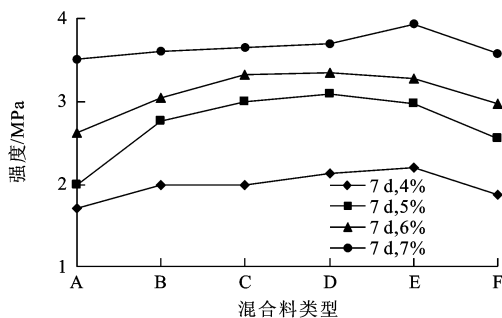


图4 不同水泥剂量再生料的无侧限抗压强度
Fig. 4 Unconfined compressive strengths of recycled mixtures with different cement contents

有较多的细料成分,能够促使混合料形成较好的级配,从而使混合料具有较高的强度,这也从另一方面证明了级配水泥稳定类材料强度的重要性。

(2)与普通水泥稳定碎石不同,温度对水泥稳定沥青路面铣刨料有明显影响。随着测试温度从 25°C 增加到 45°C ,各混合料 7 d 无侧限抗压强度随之减小。混合料中铣刨沥青混合料越多,这种趋势越明显。主要原因是混合料中的旧沥青在温度升高之后变软,粘结力下降,在石料之间起到了润滑的作用。

(3)水泥用量从 4% 增加到 7%,各混合料的 7 d 无侧限抗压强度也随之增加。按照《公路沥青路面设计规范》(JTGD50—2006)的要求,在 4% 水泥用量时,各混合料的 7 d 无侧限抗压强度明显偏低,只能作为沥青路面底基层。当水泥用量超过 6% 以后,在掺入碎石及改善级配后可以用作二级公路沥青路面的基层,但考虑到温度变化对抗压强度的影响,水泥用量大于 6% 更为可靠。

4.2 抗折强度

抗折强度试验采用静压法成型的 $10\text{ cm} \times 10\text{ cm} \times 40\text{ cm}$ 梁式试件,压实度为 98%,每组 4 个试件,养生温度为 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$,湿度为 95%。试件成

型后抗折强度测试方法参照《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》(JTG E51—2009)。

图5为5%水泥用量下,各混合料7、28、90 d龄期下抗折强度试验结果。图6为不同温度下采用5%水泥用量时各混合料的90 d抗折强度。图7为不同水泥用量下各混合料室温下的90 d抗折强度。从试验结果可以得出如下结论。

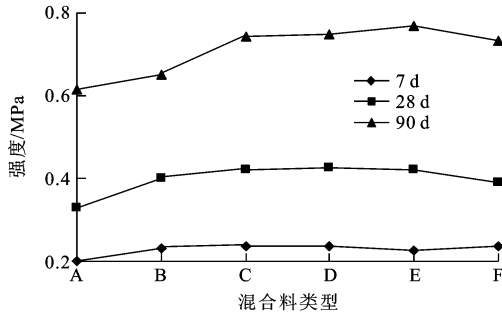


图5 不同龄期再生料的抗折强度

Fig. 5 Rupture strengths of recycled mixtures with different curing periods

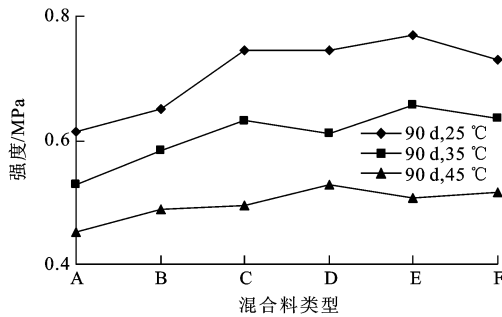


图6 不同温度再生料的抗折强度

Fig. 6 Rupture strengths of recycled mixtures at different temperatures

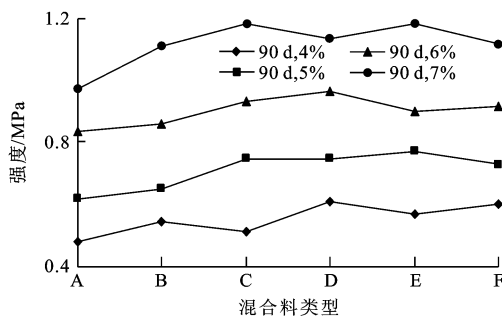


图7 不同水泥剂量再生料的抗折强度

Fig. 7 Rupture strengths of recycled mixtures with different cement contents

(1)各混合料抗折强度随着养生龄期的延长而增加。在7 d龄期时,不同混合料抗折强度的差别不大,但随着养生龄期的增加,各混合料抗折强度之间的差别逐渐增加,其规律与无侧限抗压强度变化规律基本一致。

(2)由于龄期较短时,各混合料之间的抗折强度不易对比,图6中给出各龄期混合料90 d龄期下不同温度时的抗折强度。温度较低时抗折强度较大,随着温度的升高抗折强度明显下降,但各混合料之间抗折强度大小排序基本不变。水泥稳定沥青路面混合料抗折强度具有温度敏感性的特性同样与其中的旧沥青有关。

(3)当水泥用量从4%增加到7%时,各混合料的90 d抗折强度均随之增加。

4.3 抗压回弹模量

抗压回弹模量所用试件与无侧限抗压强度所用试件尺寸、成型方式以及养生方式相同。抗压回弹模量采用顶面法,具体参照《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》(JTG E51—2009)中 T0808—1994 进行。

图8为5%水泥用量下各混合料28、90 d龄期下抗压回弹模量试验结果。图9为不同温度下采用5%水泥用量时各混合料的28 d抗压回弹模量。图10为不同水泥用量下各混合料室温下28 d抗压回弹模量。从试验结果可以得出如下结论。

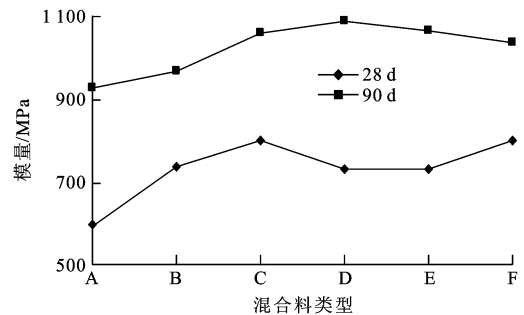


图8 不同龄期再生料的回弹模量

Fig. 8 Resilient moduli of recycled mixtures with different curing periods

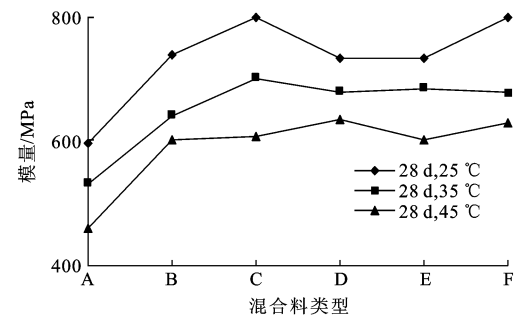


图9 不同温度再生料的回弹模量

Fig. 9 Resilient moduli of recycled mixtures at different temperatures

(1)各混合料抗压回弹模量随着养生龄期延长呈增加趋势。28、90 d抗压回弹模量显示,混合料中铣刨沥青混合料含量越多,模量值相应减小;相比之下,

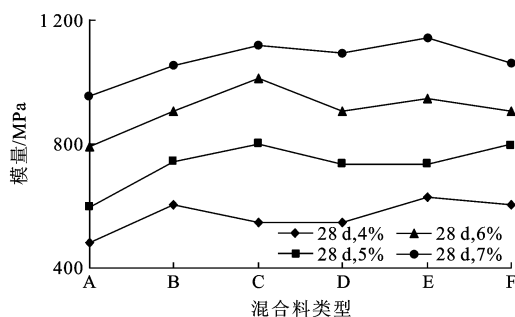


图 10 不同水泥剂量再生料的回弹模量

Fig. 10 Resilient moduli of recycled mixtures with different cement contents

混合料中增加新碎石能够增加试件的抗压回弹模量。当混合料中增加铣刨基层料后能够从一定程度上改善混合料级配,从而也会增加抗压回弹模量。

(2) 由于沥青的温度敏感性,水泥稳定沥青路面铣刨料的抗压回弹模量也随温度不同而有所差异,其中铣刨沥青混合料含量越多,温度对其抗压回弹模量的变化幅度影响越大。

(3) 与抗压强度、抗折强度试验结果相同,当水泥用量从 4% 增加到 7% 时,各混合料的 28 d 抗压回弹模量均随之增加。与普通水泥稳定碎石混合料相比,水泥稳定沥青路面铣刨料的抗压回弹模量总体偏低。

5 结 语

(1) 与普通水泥稳定碎石材料相似,水泥稳定沥青路面铣刨料在混合料击实试验中存在最佳含水量和最大干密度,抗压、抗折强度及其抗压回弹模量均随养生龄期 and 水泥用量的增加而增大。

(2) 水泥稳定沥青路面铣刨料的性能会随温度变化而变化,通常随着试验温度升高,其抗压、抗折强度及抗压回弹模量会随之下降。

(3) 在使用合理的情况下,水泥稳定沥青路面铣刨料在强度上能够满足路面基层的要求,此外,较低的模量有利于减少基层的开裂。

本文对水泥稳定沥青路面铣刨料力学性能及其影响因素进行了研究,对其疲劳特性还需进一步研究。此外,还应该进一步研究掺入乳化沥青、泡沫沥青后其路用性能的变化情况。

参考文献:

References:

[1] 贾淑俊. 沥青路面冷再生工艺技术的研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2007.
JIA Shu-jun. Research on asphalt pavement cold reutilization

workmanship technology[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2007. (in Chinese)

- [2] 马君毅. 冷再生旧沥青路面材料在基层的应用研究[D]. 西安: 长安大学, 2005.
MA Jun-yi. Study on application of cold-mix reclamation of old asphalt pavement materials used for base [D]. Xi'an: Chang'an University, 2005. (in Chinese)
- [3] 张海, 阎石, 李炜光. 水泥冷再生材料疲劳性能研究[J]. 筑路机械与施工机械化, 2013, 30(4): 67-69.
ZHANG Hai, YAN Shi, LI Wei-guang. Research on fatigue properties of cement cold-recycling materials [J]. Road Machinery and Construction Mechanization, 2013, 30(4): 67-69. (in Chinese)
- [4] 纪小平, 郑南翔, 杨党旗, 等. 基于复合粘温曲线的热再生沥青混合料拌和温度研究[J]. 中国公路学报, 2010, 23(5): 16-21.
JI Xiao-ping, ZHENG Nan-xiang, YANG Dang-qi, et al. Research on mixing temperature of hot-recycled asphalt mixture based on composite curve of viscosity-temperature [J]. China Journal of Highway and Transport, 2010, 23(5): 16-21. (in Chinese)
- [5] KARLSSON R, ISACSSON U. Material-related aspects of asphalt recycling—state-of-the-art [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2006, 18(1): 81-92.
- [6] WANG Hai-nian, HUANG Zhi-han, LI Lei, et al. Three-dimensional modeling and simulation of asphalt concrete mixtures based on X-ray CT microstructure images [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering: English Edition, 2014, 1(1): 55-61.
- [7] IWANSKI M, CHOMICZ-KOWALSKA A. Laboratory study on mechanical parameters of foamed bitumen mixtures in the cold recycling technology [J]. Procedia Engineering, 2013, 57: 433-442.
- [8] TAHA R. Evaluation of cement kiln dust-stabilized reclaimed asphalt pavement aggregate systems in road bases [J]. Transportation Research Record, 2003(1819): 11-17.
- [9] 张西棉. 水泥稳定就地冷再生基层应用技术研究[D]. 西安: 长安大学, 2010.
ZHANG Xi-mian. Cement recycling base application technology [D]. Xi'an: Chang'an University, 2010. (in Chinese)
- [10] 耿九光, 陈忠达, 李龙, 等. 水泥-乳化沥青冷再生混合料配合比设计[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2009, 29(1): 10-14.
GENG Jiu-guang, CHEN Zhong-da, LI Long, et al. Mixing design of cement-emulsified-asphalt-cold-recycled-mixture (CEACRM) [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2009, 29(1): 10-14. (in Chinese)
- [11] 张超, 丁纪忠, 郭金胜. 废弃水泥混凝土再生集料在半刚性基层中的应用[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2002, 22(5): 1-4.
ZHANG Chao, DING Ji-zhong, GUO Jin-sheng. Use of scrap concrete materials in semi-rigid base-course [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2002, 22(5): 1-4. (in Chinese)
- [12] 李强, 马松林, 王鹏飞. 沥青路面冷再生混合料疲劳性能[J].

- 交通运输工程学报, 2004, 4(1): 7-10.
- LI Qiang, MA Song-lin, WANG Peng-fei. Fatigue properties of cold-recycled asphalt mixture[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2004, 4(1): 7-10. (in Chinese)
- [13] 刘建兰. 水泥稳定铣刨料再生技术[J]. 公路, 2009(8): 132-134.
LIU Jian-lan. Regeneration technique of cement-stabilized milling planning material[J]. Highway, 2009(8): 132-134. (in Chinese)
- [14] 张敏江, 刘 峰, 李 辉. 冷再生材料路用性能的试验分析[J]. 沈阳建筑大学学报: 自然科学版, 2007, 23(3): 363-366.
ZHANG Min-jiang, LIU Feng, LI Hui. Test and analysis of cool recycled mixture for old asphalt pavement[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University: Natural Science, 2007, 23(3): 363-366. (in Chinese)
- [15] 郭银涛, 刘清泉, 刘振清. 考虑水泥作用的改性乳化沥青冷再生混合料性能研究[J]. 公路交通科技, 2012, 29(6): 6-10, 21.
GUO Yin-tao, LIU Qing-quan, LIU Zhen-qing. Study on performance of modified emulsified asphalt cold recycled mixtures considering cement effect[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2012, 29(6): 6-10, 21. (in Chinese)
- [16] 王晓刚, 冯 玮. 水泥稳定碎石冷再生技术在路面维修中的应用[J]. 公路工程, 2013, 38(2): 44-46.
- WANG Xiao-gang, FENG Wei. Application of cold-regeneration technique of cement stabilized macadam in pavement maintenance[J]. Highway Engineering, 2013, 38(2): 44-46. (in Chinese)
- [17] 冯德成, 赵 银, 陈 剑. 水泥稳定 RAP 材料劈裂应力-应变特性[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2013, 45(4): 74-78.
FENG De-cheng, ZHAO Yin, CHEN Jian. Splitting stress-strain properties of cement stabilized reclaimed asphalt pavement[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2013, 45(4): 74-78. (in Chinese)
- [18] 宋世杰. 沥青路面现场冷再生技术在 G108 线大修中的应用研究[D]. 西安: 长安大学, 2009.
SONG Shi-jie. The use of the asphalt pavement in-place cold recycling in the G108 heavy maintenance [D]. Xi'an: Chang'an University, 2009. (in Chinese)
- [19] MAGGIORE C, AIREY G, MARSAC P. A dissipated energy comparison to evaluate fatigue resistance using 2-point bending[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering: English Edition, 2014, 1(1): 49-54.
- [20] ZHOU Hai-ping, HOLIKATTI S, VACURA P. Caltrans use of scrap tires in asphalt rubber products: a comprehensive review[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering: English Edition, 2014, 1(1): 39-48.

(上接第 6 页)

- [6] 赵延庆, 白琦峰, 宋 宇. 柔性基层沥青路面温度场测量与分析[J]. 中外公路, 2006, 26(6): 22-25.
ZHAO Yan-qing, BAI Qi-feng, SONG Yu. Measurement and analysis of temperature field in flexible asphalt pavement[J]. Journal of China and Foreign Highway, 2006, 26(6): 22-25. (in Chinese)
- [7] 康海贵, 郑元勋, 蔡迎春, 等. 实测沥青路面温度场分布规律的回归分析[J]. 中国公路学报, 2007, 20(6): 13-18.
KANG Hai-gui, ZHENG Yuan-xun, CAI Ying-cun, et al. Regression analysis of actual measurement of temperature field distribution rules of asphalt pavement[J]. China Journal of Highway and Transport, 2007, 20(6): 13-18. (in Chinese)
- [8] 李浩天, 贾 渝, 白琦峰. 柔性基层沥青路面温度场的预估模型[J]. 武汉理工大学学报, 2010, 32(24): 84-89.
LI Hao-tian, JIA Yu, BAI Qi-feng. Prediction model on temperature field in flexible asphalt pavement[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2010, 32(24): 84-89. (in Chinese)
- [9] BACKSTROM M. Ground temperature in porous pavement during freezing and thawing[J]. Journal of Transportation Engineering, 2000, 126(2): 375-381.
- [10] GOLDEN J S, KALOUSH K E. Mesoscale and microscale evaluation of surface pavement impacts on the urban heat island effects[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2006, 7(1): 37-52.
- [11] 董泽蛟, 温佳宇, 李生龙. 路用光纤光栅温度传感器标定方法对比分析[J]. 建筑材料学报, 2014, 17(1): 120-125.
DONG Ze-jiao, WEN Jia-yu, LI Sheng-long. Comparison analysis of calibration methods for fiber bragg grating temperature sensor used in asphalt pavement[J]. Journal of Building Materials, 2014, 17(1): 120-125. (in Chinese)
- [12] 方友军. 旧水泥路面沥青加铺层温度荷载应力分析[J]. 筑路机械与施工机械化, 2012, 29(5): 58-59, 62.
FANG You-jun. Temperature load stress analysis of asphalt overlay on old cement pavement[J]. Road Machinery and Construction Mechanization, 2012, 29(5): 58-59, 62. (in Chinese)
- [13] 曹海波, 陈团结, 陆晶晶, 等. 水泥混凝土桥面自破冰铺装温度场分析[J]. 筑路机械与施工机械化, 2011, 28(11): 79-81.
CAO Hai-bo, CHEN Tuan-jie, LU Jing-jing, et al. Analysis on temperature field of self ice-breaking pavement of cement concrete bridge[J]. Road Machinery and Construction Mechanization, 2011, 28(11): 79-81. (in Chinese)
- [14] ZHOU Hai-ping, HOLIKATTI S, VACURA P. Caltrans use of scrap tires in asphalt rubber products: a comprehensive review[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering: English Edition, 2014, 1(1): 39-48.