

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2022120723101990

文章编号:1674-599X(2023)05-0084-07

引用格式:孙栖梧. NovaChip加铺沥青混合料性能提升评价[J]. 交通科学与工程, 2023, 39(5): 84-90.

Citation: SUN qiwu. Evaluation of performance improvement of asphalt mixture with NovaChip [J]. J. Transp. Sci. Eng., 2023, 39(5): 84-90.

NovaChip加铺沥青混合料性能提升评价

孙栖梧

(湖南高速设计咨询研究院有限公司, 湖南长沙 410076)

摘要:为量化分析NovaChip超薄磨耗层对沥青混合料性能提升效果,采用复合试件进行试验。通过15℃的小梁弯曲试验、三点弯曲疲劳试验和改进的车辙试验,分别对不同黏层油洒布量下复合试件的抗弯拉性能、疲劳性能、浸水后高温稳定性及抗松散性能进行了分析。研究表明:加铺NovaChip超薄磨耗层后,复合试件的破坏荷载提升了36.4%~82.5%,不同应力水平下的复合试件的疲劳寿命也有了明显提升,动稳定度提升了约10%。黏层油洒布量与复合试件承载性能、疲劳寿命以及改进车辙试件的松散率之间的曲线关系为下开口式抛物线。综合考虑,推荐黏层油洒布量为0.8~1.0 kg/m²。

关键词: NovaChip超薄磨耗层;抗弯拉性能;疲劳性能;抗松散;黏层

中图分类号:U414

文献标志码:A

Evaluation of performance improvement of asphalt mixture with NovaChip

SUN Qiwu

(Hunan High-speed Design Consulting & Research Institute Co., Ltd., Changsha 410076, China)

Abstract: To quantify the improvement effect of NovaChip ultra-thin abrasive layer on asphalt mixture, composite specimens were prepared. Flexure-tension resistant performance, fatigue performance, high-temperature stability after water immersion, and anti-loosening performance were evaluated using three tests including the small beam bending test at 15 °C, three-point bending fatigue test, and modified rutting test. The results showed that after adding NovaChip ultra-thin abrasive layer, the damage load of composite specimens was increased by 36.4% ~ 82.5%. The fatigue life was increased significantly under different stress levels. The dynamic stability was increased by about 10%. Furthermore, the amount of sticky layer spreading showed a quadratic curve variation with the bearing performance, fatigue life, and loosening rate of improved rutting specimens. In summary, the recommended amount of sticky layer spreading was 0.8 ~ 1.0 kg/m².

Key words: NovaChip ultra-thin abrasion layer; flexure-tension resistant performance; fatigue performance; anti-loosening; adhesive layer

随着基础设施建设发展,中国公路建设逐渐从以新建为主转向建设和养护并重。同时,在《交通强国建设纲要》等战略实施背景下,公路建设的质量提出了更高要求^[1]。沥青路面是中国公路高级路面之一,目前现有沥青路面结构承载性能整体良

好,但抗滑和平整度等指标存在衰减快的问题。超薄磨耗层技术作为一种可快速提升旧路面抗滑、平整度等缺陷的技术,同时具有良好的经济性,因此,超薄磨耗层技术得到了较为广泛的应用^[2-7]。

NovaChip超薄磨耗层是一种间断级配骨架空

收稿日期:2022-12-07

作者简介:孙栖梧(1990—),男,湖南高速设计咨询研究院有限公司,中级工程师。E-mail:sumable@qq.com

隙结构,已成为近年来中国最常采用的超薄加铺养护技术之一^[8-14]。该技术采用专门的机械设备(NovaPaver),在破乳的乳化沥青(NovaBond)上进行混合料铺筑,对沥青路面上的轻型车辙和裂缝具有较好的修复作用^[15]。在中国,该技术的研发相对滞后。目前,对其的研究仍主要集中在相关实体工程的性能验证分析及材料优选方面。李晓龙等^[16]研究了高温条件下NovaChip加铺层的层间抗剪性能的影响因素。叶伟^[17]探究了改性乳化沥青材料对加铺层的层间黏结效果的影响,并取得了初步应用。钱普舟等^[18]结合工程实践,探究了加铺前抛丸处治、层间施工工艺以及黏层油类别等对NovaChip加铺效果的影响。还有不少学者分析了沥青种类、压实施工温度对NovaChip路用性能的影响^[19-20]。

目前的研究主要集中在加铺前超薄磨耗层使用性能分析以及在加铺时的层间处治效果评价方面,而对加铺后整体性能提升的评价研究相对较少。因此,本研究拟采用加铺后复合试件进行设计试验,通过小梁弯曲试验、三点弯曲疲劳试验以及改进的车辙试验,分别对不同黏层洒布量下复合试件的抗弯拉性能、疲劳性能、浸水后的高温稳定性以及抗松散性能进行分析。同时,研究黏层洒布对这些性能的影响效果,以期对超薄磨耗层技术在公路养护中的应用提供更加全面的评价。

1 原材料与试验设计

1.1 原材料

1) 沥青材料。

试验采用由壳牌公司生产的专用NovaBinder改性沥青作为超薄磨耗层胶结料,其相关技术指标见表1。

在进行超薄磨耗层施工前,需要对原沥青路面铺设黏层油(乳化沥青)的洒布,试验采用的乳化沥青为改性乳化沥青,其技术指标见表2。

关于成型沥青的下承层,采用常用的AC-13混合料,并使用符合规范要求的SBS I-D改性沥青作为沥青材料^[21]。

2) 集料。

采用玄武岩作为粗集料,按粒径分档。

① 粒径为(4.750, 9.500] mm的集料划分到[5.000, 10.000) mm档;

② 粒径为(9.500, 13.200] mm的集料划分到[10.000, 15.000] mm档。

细集料则选用石灰岩,粒径为[0.00, 4.750] mm的集料划分到[0.000, 5.000) mm档。依照《公路工程集料试验规程》(JTG E42—2005),对所选的集料进行检测^[22],其结果均满足规范要求^[21]。

3) 矿粉。

选用石灰岩研磨矿粉作为填料,其各项技术指标均满足规范要求^[21]。

表1 NovaBinder改性沥青技术指标

Table 1 Technical specifications of NovaBinder modified asphalt

检测指标	检测结果	技术要求	
针入度(25 °C, 100 g, 5 s)/ (0.1 mm)	57	≥50	
延度(5 °C, 5 m/min)/cm	37	≥20	
软化点/°C	82	≥70	
运动黏度 135 °C/(Pa·s)	2.2	≤3.0	
TFOT后残留物	质量变化/%	0.21	≤1.00
	针入度比 25 °C/%	78	≥60
	延度 5 °C/cm	34	≥15

注:试验规范参照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)。

表2 改性乳化沥青技术指标

Table 2 Technical index of modified emulsified asphalt

项目	技术指标	技术要求
破乳速度	快裂	—
粒子电荷	阳离子	阳离子
蒸发残留物含量/%	66.8	≥65.0
蒸发残留物软化点/°C	73.5	≥55.0
蒸发残留物针入度/(0.1 mm)	74	60~120
蒸发残留物 25 °C延度	36.0	≥20.0
1 d储存稳定性/%	0.3	≤1.0
5 d储存稳定性/%	2.8	≤5.0

1.2 NovaChip超薄磨耗层配合比设计

结合工程经验,采用了马歇尔法进行NovaChip超薄磨耗层的配合比设计。设计参照NovaChip推荐级配(Type C类型)^[14],合成级配如图1所示。在各档集料掺配比例中,矿粉占9.5%,[0,5) mm档占19.0%,[5,10) mm档占22.0%,[10,15] mm档占49.5%。通过体积指标试验分析,确定了最佳油石比为5.0%。再对混合料进行高温(车辙试验)、低温(小梁弯曲试验)及水稳(浸水马歇尔试验、冻融劈裂试验)性能分析,试验结果显示该混合料符合规范中对SMA-13性能的要求^[21],见表2。

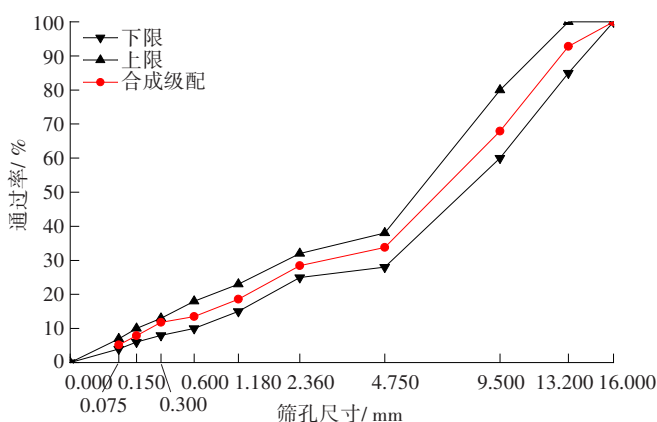


图1 NovaChip超薄磨耗层合成级配

Fig. 1 Synthetic gradation of NovaChip ultra-thin abrasion layer

表3 NovaChip超薄磨耗层路用性能试验结果

Table 3 Road Performance test results of NovaChip ultra-thin abrasion layer

路用性能	评价指标	检测结果	技术要求
高温性能	动稳定度/(次·mm ⁻¹)	6 025	≥3 000
低温性能	-10℃小梁弯曲试验破坏应变/(10 ⁻⁶)	3 200	≥2 800 (冬寒区)
水稳定性	残留稳定度/%	92.5	≥80.0
	冻融劈裂强度比/%	93.8	≥80.0

1.3 试验设计

为评价加铺NovaChip超薄磨耗层对混合料性能的提升效果,采用小梁弯曲试验、三点弯曲疲劳试验及改进的车辙试验,分别对加铺前后的混合料试件进行测试分析。同时,考虑黏层施工质量对层

间黏结效果影响,还研究了不同黏层油洒布量对这些性能提升效果的影响。

2 小梁弯曲试验

试验采用300 mm×300 mm×70 mm的双层车辙板试件进行研究。这种双层车辙试件的具体构造为:下层采用SBS改性AC-13混合料,制成300 mm×300 mm×50 mm的车辙试件;上层采用300 mm×300 mm×20 mm的NovaChip超薄磨耗层。

复合试件成型过程如下:

- 1) 采用标准车辙试件成型方法,制备出50 mm厚的车辙试件。试件成型后,将其脱模,并放入高度为70 mm的定制车辙试模中。
- 2) 在下层车辙试件表面洒布乳化沥青,其洒布量分别为0.6、0.8、1.0、1.2 kg/m²。
- 3) 待乳化沥青破乳后,使用NovaChip超薄磨耗层混合料来成型上层试件。冷却后将试件脱模,并切割成多块小梁试件。

考虑到规范中小梁弯曲试件的尺寸大小为250 mm×30 mm×35 mm^[23],综合考虑加铺路面结构的实际厚度及试验的可操作性,本研究的无加铺层试件采用规范标准试件尺寸,该复合试件尺寸大小为250 mm×30 mm×55 mm。其中,复合试件下层高度为35 mm,加铺磨耗层高度为20 mm,具体构造如图2所示。试验在15℃的温度下进行,加载速率为50 mm/min。

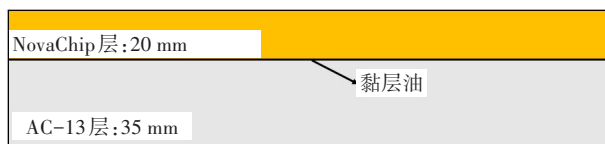


图2 双层试件示意

Fig. 2 Schematic diagram of double-layer specimen

采用这些试验方法,分别测得各小梁试件的最大破坏荷载,测试结果图3所示,具体数据见表4。

从图3可以看出:

- 1) 通过加铺NovaChip超薄磨耗层,试件抗荷载能力得到了显著提升。相比没有磨耗层的试件,加铺后的试件破坏荷载提升了36.4% ~ 82.5%。这是由于加铺试件的厚度增加,提高了试件的整体抗弯

拉性能。还发现在洒布黏层上、下两层的黏结成型效果良好,整体效果优良,有效发挥了加铺层的承载作用。

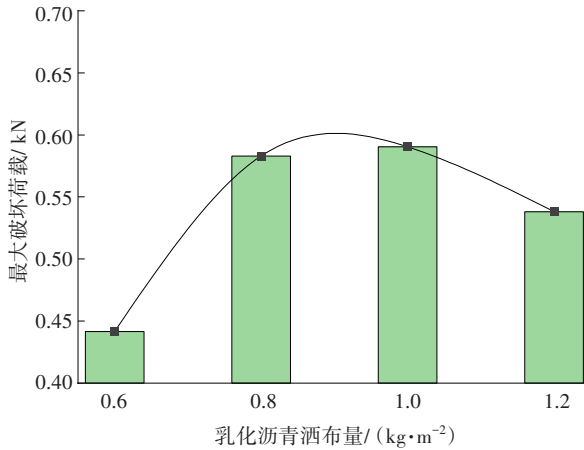


图3 小梁弯曲试验结果随乳化沥青洒布量变化

Fig. 3 Variation of trabecular bending test results with emulsified asphalt spreading volume

表4 15 °C小梁弯曲试验结果

Table 4 Trabecular bending test results at 15°C

小梁试件类型	乳化沥青洒布量/ (kg·m ⁻²)	最大破坏荷载/ kN
加铺NovaChip超薄 磨耗层	0.6	0.441 6
	0.8	0.582 9
	1.0	0.590 5
	1.2	0.538 1
无磨耗层	—	0.324 7

2) 随着乳化沥青洒布量的变化,试件的最大破坏荷载与乳化沥青洒布量的曲线为下开口抛物线。这是因为黏层油的洒布有助于提升复合试件的成型效果,但当洒布量过大时,复合试件整体的抗弯拉性能会下降。根据NovaChip超薄磨耗层的设计思想,黏层油应该上透至NovaChip超薄磨耗层混合料底部约1/3层厚处。当洒布量过大时,黏层油渗透深度过大,沥青含量过高,可能会破坏上层试件的骨架结构,从而降低其承载强度。

综上所述,当洒布量为0.8 ~ 1.0 kg/m²时,复合试件的整体抗弯拉性能最佳。

3 三点弯曲疲劳试验

根据小梁弯曲试验的结果,以及表4中所列的不同乳化沥青洒布量下各试件的最大破坏荷载 P_B ,对复合试件进行了疲劳试验。在疲劳试验中,分别采用了0.3、0.4、0.5、0.6的应力比水平,施加应力 $P = P_B \times S_i$ (S_i 为应力水平),试验温度为15 °C,加载频率为10 Hz。不同乳化沥青的洒布量以及各应力水平下的测试应力见表5。

表5 三点弯曲疲劳试验测试应力

Table 5 Stress was measured by three point bending fatigue test kN

应力水平	不同乳化沥青洒布量(kg/m ²)下所用荷载				
	0.60	0.80	1.00	1.20	无磨耗层
0.3	0.13	0.17	0.18	0.16	0.10
0.4	0.18	0.23	0.24	0.22	0.13
0.5	0.22	0.29	0.30	0.27	0.16
0.6	0.26	0.35	0.35	0.32	0.19

根据表5的计算结果,对各试件进行不同应力水平下的三点弯曲疲劳试验。疲劳寿命试验的结果如图4所示。

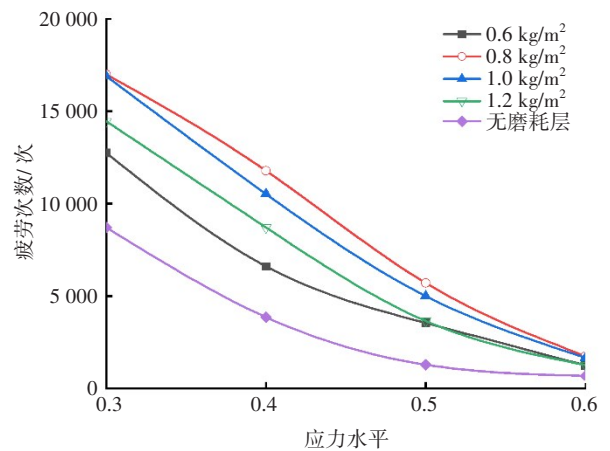


图4 不同应力水平疲劳试验结果

Fig. 4 Fatigue test results of different stress levels

从图4可以看出:

1) 随着应力水平的增加,所有试件的疲劳性能均出现了大幅度衰减。无论在哪个应力水平下,没有加铺磨耗层的试件的疲劳寿命都是最短的。应力水平越低,疲劳寿命的提升效果就越显著。当应力水平为0.3时,无加铺磨耗层的试件疲劳次数为8 712次,而加铺磨耗层后的试件疲劳次数最低为12 748次,最高可达16 993次,疲劳寿命至少提高了46%。当应力水平增加至0.6时,没有加铺磨耗层的试件疲劳次数降低至675次,而加铺磨耗层后的试件疲劳次数最低为1 244次,疲劳寿命至少提高84%。总体而言,无论哪个应力水平下,加铺NovaChip超薄磨耗层能显著提升沥青混合料的疲劳寿命。

2) 当乳化沥青的洒布量分别为0.8、1.0 kg/m²时,混合料的疲劳寿命最长,而且二者相当接近。其他试件的疲劳寿命大小顺序依次为1.2 kg/m²、0.6 kg/m²和无加铺试件。在没有加铺NovaChip超薄磨耗层的情况下,沥青混合料试件的疲劳寿命相比于加铺NovaChip超薄磨耗层时的疲劳寿命有大幅度降低,但无论是小梁弯曲试验还是疲劳试验,持续增大乳化沥青的洒布量并不会使得沥青混合料的疲劳寿命持续增长。这是因为过少的洒布量会导致上层混合料与下层混合料之间的黏结性不足,从而使疲劳寿命的增长受限。随着乳化沥青用量的增加,上下层之间黏结所需的乳化沥青逐渐达到饱和状态,持续增大用量反而会造成黏层油过剩,降低预期的黏结效果,影响整体的受力性能。

4 改进车辙试验

由于在设计NovaChip混合料时已经进行了车辙试验等路用性能的验证,考虑到超薄磨耗层的施工厚度一般较小(约为20 mm),在荷载作用下,特别是在水-力耦合条件下,容易产生松散。为了评估加铺后磨耗层的抗松散性能,对车辙试验进行如下改进:

1) 在试验前,将车辙试件称重,并置于60℃的水中浸泡5 h。

2) 擦干水分后,将试件置于60℃的车辙试验箱中进行车辙试验。

3) 车辙试验完成后,用毛刷刷掉表层的松散集料颗粒。

4) 将车辙试件烘干至恒重,然后称取试件的质量。

5) 分别测试试件的动稳定度和集料松散率。

试验得到的试件动稳定度及加铺前、后试件松散量的结果如图5所示。

从图5可以看出:

1) 加铺NovaChip超薄磨耗层后,复合试件的动稳定度显著提升,这说明加铺层有效地增强了试件在浸水后的高温稳定性。与没有加铺层的试件相比,加铺后的试件的动稳定度提升了约10%。在不同黏层油洒布量下,复合试件的动稳定度差异较小,且没有明显的变化规律。这表明黏层油的洒布量对试件高温稳定性没有显著影响。在浸水后,复合试件的黏结效果良好,没有形成潜在的脱层剥落风险。

2) 在车辙试验完成后,复合试件的松散质量明显小于无磨耗层试件的,且在洒布量为0.8~1.0 kg/m²时,松散量较小。这是因为当层间黏结良好时,车辙试验中的集料松散主要发生在试件的表层。由于NovaChip超薄磨耗层具有优良的力学性能,在湿热耦合加载条件下,它不仅具有优异的抗车辙性能,还具优秀的抗松散能力。

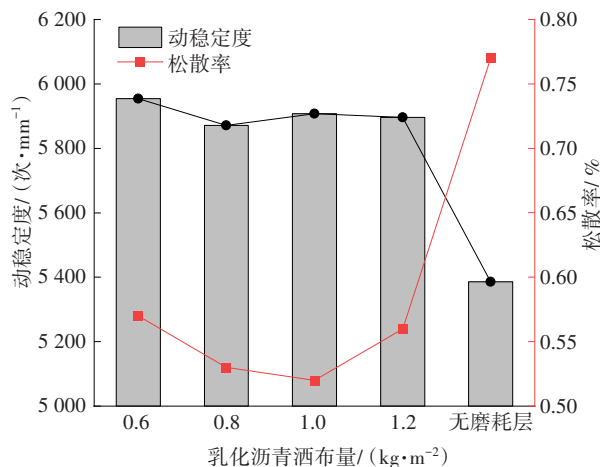


图5 不同乳化沥青洒布量下改进车辙试验结果

Fig. 5 Improved rutting test under different emulsified asphalt sprinkling amounts

5 结论

通过进行小梁弯曲试验、三点弯曲疲劳试验以及改进的车辙试验,评估了在不同黏层油洒布量

下,加铺NovaChip超薄磨耗层对沥青混合料性能的提升效果,得到以下结论:

1) 加铺NovaChip超薄磨耗层后,沥青混合料抗弯拉性能得到了提升,复合试件的破坏荷载提高了36.4%~82.5%。超薄磨耗层还能显著延长沥青混合料的疲劳寿命,尤其是在较低的应力水平下,该提升效果更显著。

2) 通过改进的车辙试验,加铺NovaChip超薄磨耗层可以使动稳定度提升约10%,并且层间黏层油的洒布量对提升效果没有显著影响。

3) 黏层油的洒布量对复合试件的抗弯拉性能、疲劳寿命及改进车辙试件的松散率具有显著影响,并且洒布量与复合试件的抗弯性能、疲劳寿命及改进车辙试件的松散率之间的函数关系均为下开口抛物线。综合考虑,推荐乳化沥青黏层油的洒布量为0.8~1.0 kg/m²。

参考文献(References):

- [1] 《中国公路学报》编辑部. 中国路面工程学术研究综述·2020[J]. 中国公路学报, 2020, 33(10): 1-66. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2020.10.001.
Editorial Department of China Journal of Highway and Transport. Review on China's pavement engineering Research·2020 [J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(10): 1-66. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2020.10.001.
- [2] KARKI P, MRAIZA Z, KARNEI E, et al. Performance-graded asphalt binder selection catalog for asphalt overlays[J]. Construction and Building Materials, 2022, 319: 126012. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.126012.
- [3] HU M J, LI L H, PENG F X. Laboratory investigation of OGFC-5 porous asphalt ultra-thin wearing course[J]. Construction and Building Materials, 2019, 219: 101-110. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.04.205.
- [4] YU J M, CHEN F D, DENG W, et al. Design and performance of high-toughness ultra-thin friction course in South China[J]. Construction and Building Materials, 2020, 246: 118508. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118508.
- [5] 陈富达. 高韧超薄沥青磨耗层的力学性能和功能属性研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2020: 1-85. DOI: 10.27151/d.cnki.ghnl.2020.002982.
CHEN Fuda. Research on mechanical and functional properties of high-toughness ultra-thin friction course [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020: 1-85.
- [6] PANIAGUA F, PANIAGUA J, MATEOS A, et al. Full-scale evaluation of concrete-asphalt interphase in thin bonded concrete overlay on asphalt pavements [J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2020, 2674(9): 676-686. DOI: 10.1177/0361198120931102.
- [7] CHENG H L, LIU L P, SUN L J. Critical response analysis of steel deck pavement based on viscoelastic finite element model [J]. International Journal of Pavement Engineering, 2021, 22(3): 307-318. DOI: 10.1080/10298436.2019.1607341.
- [8] ZHANG C C, CHEN L L, LIU G, et al. Dynamic response of multitower suspension bridge deck pavement under random vehicle load [J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2021, 2021: 1-13. DOI: 10.1155/2021/6667853.
- [9] CHEN L L, QIAN Z D, CHEN D X, et al. Feasibility evaluation of a long-life asphalt pavement for steel bridge deck[J]. Advances in Civil Engineering, 2020, 2020: 1-8. DOI: 10.1155/2020/5890945.
- [10] ALIMOHAMMADI H. A framework for evaluation of existing pavement conditions and selection of feasible maintenance/rehabilitation alternatives; a case study in some routes of Livingston Parish in the state of Louisiana [J]. SN Applied Sciences, 2020, 2(2): 1-13. DOI: 10.1007/s42452-020-1999-6.
- [11] HAN S, YAO T F, HAN X, et al. Performance evaluation of waterborne epoxy resin modified hydrophobic emulsified asphalt micro-surfacing mixture [J]. Construction and Building Materials, 2020, 249: 118835. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118835.
- [12] 郑健龙, 吕松涛, 刘超超. 长寿命路面的技术体系及关键科学问题与技术前沿[J]. 科学通报, 2020, 65(30): 3219-3227. DOI: 10.1360/TB-2020-0227.
ZHENG Jianlong, LYU Songtao, LIU Chaochao. Technical system, key scientific problems and technical frontier of long-life pavement [J]. Chinese Science Bulletin, 2020, 65(30): 3219-3227. DOI: 10.1360/TB-2020-0227.
- [13] LIU F Q, ZHENG M L, FAN X P, et al. Properties and mechanism of waterborne epoxy resin-SBR composite

- modified emulsified asphalt [J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 274: 122059. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.122059.
- [14] 虞将苗, 杨倪坤, 于华洋. 道路高性能沥青超薄磨耗层技术研究与应用现状[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2021, 52(7): 2287-2298. DOI: 10.11817/j.issn.1672-7207.2021.07.016.
- YU Jiangmiao, YANG Nikun, YU Huayang. Research and application status of high-performance asphalt ultra-thin wearing layer technology [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2021, 52(7): 2287-2298. DOI: 10.11817/j.issn.1672-7207.2021.07.016.
- [15] YU J M, YANG N K, CHEN F D, et al. Design of cold-mixed high-toughness ultra-thin asphalt layer towards sustainable pavement construction [J]. *Buildings*, 2021, 11(12): 619. DOI: 10.3390/buildings11120619.
- [16] 李晓龙, 蔡春兵, 邓建斌, 等. 极限高温状态下 NovaChip 层间抗剪性能影响因素分析[C]//中国科学技术协会, 中华人民共和国交通运输部, 中国工程院, 等. 2022 世界交通运输大会(WTC2022)论文集(公路工程篇). 武汉: 人民交通出版社股份有限公司, 2022: 80-86. DOI: 10.26914/c.cnkihy.2022.019005.
- Li Xiaolong, CAI Chunbing, Deng Jianbin, et al. Analysis of influencing factors on interlaminar shear performance of novachip at extreme high temperature [C]// China Association for Science and Technology, Ministry of Transport of the People's Republic of China, Chinese Academy of Engineering, et al. *Proceedings of 2022 world transport congress (WTC2022) (highway engineering)*. Wuhan: China Communications Press Co., Ltd., 2022: 80-86. DOI: 10.26914/c.cnkihy.2022.019005.
- [17] 叶伟. 自研高性能改性乳化沥青在超薄磨耗层层间黏结中的应用[J]. *中外公路*, 2017, 37(2): 254-260. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2017.02.057.
- YE Wei. Application of self-developed high-performance modified emulsified asphalt in bonding between ultra-thin wear layers [J]. *Journal of China & Foreign Highway*, 2017, 37(2): 254-260. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2017.02.057
- [18] 钱普舟, 曹青霞, 魏定邦, 等. Novachip 超薄罩面材料性能研究[J]. *公路*, 2016, 61(4): 233-238.
- QIAN Puzhou, CAO Qingxia, WEI Dingbang, et al. Study on properties of Novachip ultra-thin coating material [J]. *Highway*, 2016, 61(4): 233-238.
- [19] 冯明林, 王妍方, 冯亚磊. 沥青种类对不同级配的超薄层路用性能影响分析[J]. *中外公路*, 2015, 35(6): 76-79. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2015.06.018.
- FENG Minglin, WANG Yanfang, FENG Yalei. Analysis of influence of asphalt types on road performance of ultra-thin layers with different gradations [J]. *Journal of China & Foreign Highway*, 2015, 35(6): 76-79. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2015.06.018.
- [20] 曾梦澜, 胡圣魁, 谭邦耀, 等. 压实温度对温拌 NovaChip 沥青混合料路用性能的影响[J]. *北京工业大学学报*, 2014, 40(10): 1518-1523.
- ZENG Menglan, HU Shengkui, TAN Bangyao, et al. Influence of compaction temperature on pavement performance of NovaChip warm mix asphalt [J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2014, 40(10): 1518-1523
- [21] 交通部公路科学研究所. 公路沥青路面施工技术规范: JTG F 40—2004[S]. 北京: 人民交通出版社, 2005.
- Research Institute of Highway Ministry of Transport. Ministry of Transport of the People's Republic of China. *Technical specifications for construction of highway asphalt pavements: JTG F 40—2004* [S]. Beijing: China Communications Press, 2005.
- [22] 交通部公路科学研究所. 公路工程集料试验规程: JTG E42—2005[S]. 北京: 人民交通出版社, 2005.
- Research Institute of Highway Ministry of Transport. Test methods of aggregate for highway engineering: JTG E42—2005 [S]. Beijing: China Communications Press, 2005.
- [23] 交通运输部公路科学研究所. 公路工程沥青及沥青混合料试验规程: JTG E20—2011[S]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
- Research Institute of Highway Ministry of Transport. Standard test methods of bitumen and bituminous mixtures for highway engineering: JTG E20—2011 [S]. Beijing: China Communications Press, 2011.

(责任编辑:罗容;校对:李脉;英文编辑:曾程)