



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2403867

引用格式:赵迁乔,徐君全.水性环氧树脂增强灌浆复合混合料抗裂性能设计与评价[J].科学技术与工程,2025,25(11):4754-4760.

Zhao Qianqiao, Xu Junquan. Design and evaluation of anti-cracking performance of water-borne epoxy resin reinforced grouting asphalt mixture [J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(11): 4754-4760.

交通运输

水性环氧树脂增强灌浆复合混合料抗裂性能设计与评价

赵迁乔¹, 徐君全²

(1. 青岛理工大学土木工程学院, 青岛 266520; 2. 中南大学土木工程学院, 长沙 410083)

摘要 灌浆路面容易发生开裂问题,影响路面服役寿命。为此,在灌浆料中添加水性环氧树脂(water-borne epoxy resin, WER)来改善灌浆复合混合料的性能。制备不同 WER 含量的灌浆料,并对其流动性、凝结时间、力学强度和微观形貌进行表征。通过车辙试验、低温弯曲试验和浸水马歇尔试验对灌浆复合混合料的路用性能进行评价。结果表明,WER 可以在水化产物表面形成膜结构,有利于提高灌浆料的柔韧性,但会延迟灌浆料的凝结时间。WER 的添加会小幅度降低灌浆复合混合料的高温性能,但能提高灌浆复合混合料低温抗裂性能和水稳定性。特别地,7.5% WER 使灌浆复合混合料的低温破坏应变提高了 29.2%。

关键词 灌浆复合混合料; 环氧树脂; 灌浆料; 路用性能

中图分类号 U416.217; 文献标志码 A

Design and Evaluation of Anti-cracking Performance of Water-borne Epoxy Resin Reinforced Grouting Asphalt Mixture

ZHAO Qian-qiao¹, XU Jun-quan²

(1. School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266520, China;

2. School of Civil Engineering Changsha, Central South University, Changsha 410083, China)

[Abstract] Grouting pavements are susceptible to cracking, which can significantly reduce their service life. For this reason, water-borne epoxy resin (WER) was added to the grouting materials to improve the performance of grouting asphalt mixtures. Grouting materials with different levels of WER were prepared and characterised for their flow properties, setting time, mechanical strength and micro-morphology. The road performance of the grouting asphalt mixtures was evaluated through wheel tracking test, low-temperature bending test and water immersion Marshall test. The results show that, WER can form a membrane structure on the surface of hydration products, improving the flexibility of grouting materials. However, it also delays the setting time of grouting materials. The addition of WER slightly diminishes the high-temperature performance of grouting asphalt mixtures, but improves the low-temperature cracking resistance and water stability of grouting asphalt mixtures. In particular, 7.5% WER increases the low-temperature destructive strain of grouting asphalt mixtures by 29.2%.

[Keywords] grouting asphalt mixture; water-borne epoxy resin; grouting material; road performance

灌浆复合混合料是在多孔沥青混合料(空隙率为 20%~30%)中灌注水泥基灌浆材料而形成的一种复合材料^[1],作为一种“刚柔并济”的路面材料,其由骨架嵌挤型的多孔沥青混合料与密实的水泥基材料共同抵抗车辆荷载作用^[2-3],可以有效缓解因高温重载条件引起的车辙病害,且密实的水泥基材料还可以阻止水分对混合料内部的侵入^[4]。因

此,灌浆复合抗车辙路面常被应用于高温重载路段^[5]。但由于硬化后的水泥基灌浆材料与沥青混合料的刚度差异较大^[6],灌浆复合混合料在低温或者循环荷载作用下容易产生开裂,严重地影响了灌浆沥青路面的服役寿命^[6-7]。

对水泥基灌浆料进行增柔设计,有利于改善灌浆复合混合料的抗裂性能^[8-9],研究人员通常采用

收稿日期:2024-05-24 修订日期:2024-09-11

基金项目:国家自然科学基金(51808562);湖南省自然科学基金(2020JJ5723);浙江省公路与运输管理中心科技计划(2020H05)

第一作者:赵迁乔(1976—),女,汉族,山东东阿人,博士,讲师。研究方向:高性能路面材料。E-mail:zhaopianqiao@126.com。

投稿网址:www.stae.com.cn

纤维、胶粉等材料提升灌浆料的柔韧性^[10]。但纤维和胶粉会降低灌浆材料的流动性能^[11-12],导致灌浆料在多孔沥青混合料内的灌注效果不佳,且对灌浆复合混合料的抗裂性能提升幅度较小,难以满足工程应用的要求^[13]。作为建筑领域常见的聚合物材料之一,水性环氧树脂(water-borne epoxy resin, WER)是环氧树脂以颗粒或液滴的形式分散在水中形成的稳定体系^[14-16],其固化后具有良好的机械强度、柔韧性、耐化学腐蚀性和黏结性^[17-19]。环氧树脂颗粒能够在水泥的水化产物上覆盖成膜,水化产物和聚合物两者相互交织^[20-21],使得聚合物水泥材料兼顾强度和柔韧性^[22],主要表现为抗折强度、黏结强度和柔韧性的提升^[23-25]。

鉴于WER的特点,以灌浆复合混合料的水泥基灌浆料为研究对象,评价WER掺量对水泥基灌浆料流动性能、凝结时间、力学性能及微观形貌的影响。并以此为基础,综合评价WER对灌浆复合混合料路用性能的影响,并提出WER在水泥基灌浆料中的最佳掺量,为灌浆复合抗车辙路面工程的抗裂设计提供相关参考。

1 试验材料

1.1 WER 灌浆料

采用水泥基灌浆料和WER(固含量为55%)进行WER灌浆料的制备。灌浆料的水固比(用水质量与水泥基灌浆料质量的比值,用水量为WER中的水量和新加水量之和)均为0.35。水泥基材料和WER的性能指标如表1、表2所示。分别制备了WER固含量占灌浆料质量比为2.5%、5%、7.5%和10%的灌浆料,具体配比如表3所示。在拌和前先将WER和水进行搅拌混合,再将其与灌浆料进行搅拌,搅拌300 s后将其倒入模具中在室温 $[(20 \pm 1) \text{ } ^\circ\text{C}]$ 下养护至试验龄期。

表1 水泥基灌浆料材料性能指标

Table 1 Performance indexes of cement-based grouting materials

性能指标	单位	结果	要求 ^[26]
流动度(水固比0.35)	s	12	10~14
抗压强度(7 d)	MPa	17.5	≥ 15
抗折强度(7 d)	MPa	3.6	≥ 3.5

表2 WER 性能指标

Table 2 Performance indexes of WER

性能指标	单位	测试结果
固含量	%	55
环氧当量	g/mol	550
密度	g/cm ³	1.3
黏度	mPa·s	6 000

表3 试验材料配比

Table 3 Proportion of test materials

编号	质量分数/%		
	水泥基灌浆料	水	WER
A0	100.0	30.0	—
A2.5	100.0	27.9	4.5
A5	100.0	25.9	9.1
A7.5	100.0	23.8	13.6
A10	100.0	21.8	18.2

1.2 灌浆复合混合料

采用SBS(styrene-butadiene-styrene block copolymer)沥青、玄武岩集料和石灰石矿粉进行多孔沥青混合料(PAC-13)配合比设计。PAC-13的级配设计结果如表4所示,沥青混合料的最佳沥青用量为3.7%。PAC-13试件的空隙率为24.7%,并且配合比设计结果满足析漏和飞散试验的相关要求^[27]。

将拌制后的灌浆料浆体均匀地灌注到多孔沥青混合料的空隙中,直到浆体已经充满多孔沥青混合料的空隙,完成后将试件置于标准条件[温度 $(20 \pm 1) \text{ } ^\circ\text{C}$,湿度90%]下养护14 d。

表4 PAC-13 沥青混合料级配

Table 4 PAC-13 asphalt mixture gradation

粒径/mm	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
通过率/%	100	84	36	13	8	6.7	5.2	4.2	3.2	2.2

2 试验方法

2.1 灌浆料性能试验

依据《水泥基灌浆材料应用技术规范》(GB/T 50448—2015)^[26]和《公路工程水泥及水泥混凝土试验规程》(JTG 3420—2020)^[28],采用截锥圆模法获取灌浆料的扩散直径来评价其流动性能;采用维卡仪测试灌浆料的凝结时间;采用灌浆料的7 d抗折强度和抗压强度来表征其力学强度,抗压试件的尺寸为40 mm×40 mm×40 mm,仪器加载速度为50 N/s,抗折试件的尺寸为160 mm×40 mm×40 mm,仪器加载速度为2.4 kN/s。

将养护龄期14 d的灌浆料(A0、A5、A10)样品破碎成小块进行干燥,并利用扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)来表征灌浆料的微观形貌,设置加速电压为20 kV,放大图像倍数为1 000倍。

2.2 灌浆复合混合料试验方法

依据《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)^[29],对灌浆复合混合料开展高温车辙试验,低温弯曲试验和浸水马歇尔试验,以评价灌浆复合混合料的高温性能、低温性能和水稳定性能。

3 灌浆料试验结果分析

3.1 流动性能

从图1可以看出,WER对灌浆料流动性能的影响效果较小。一方面,WER与水混合后,液体组分的黏性大幅降低,不会对流动性能产生较大的影响;另一方面,WER会在水化体系中引入气泡,而WER液滴及其引入的气泡可以发挥良好的润滑作用,提高了水化体系整体的流动渗透作用。

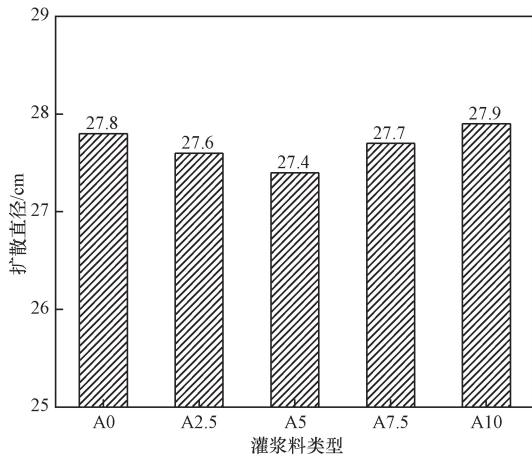


图1 灌浆料的流动性能

Fig. 1 Flow performance of grouting materials

3.2 凝结时间

从图2中可以看出,WER灌浆料的凝结时间均大于普通灌浆料,而且随着WER掺量的提高,其凝结时间显著提高。其中,A10初凝时间和终凝时间分别是A0初凝时间和终凝时间的4.3倍和8.3倍,表明WER会延缓水泥基材料的水化过程。这是因为,部分WER颗粒会包裹在水泥颗粒表面,阻断了水泥颗粒之间的接触,影响了水泥颗粒之间的相互搭接凝聚速度,进而延缓了灌浆材料的水化过程。

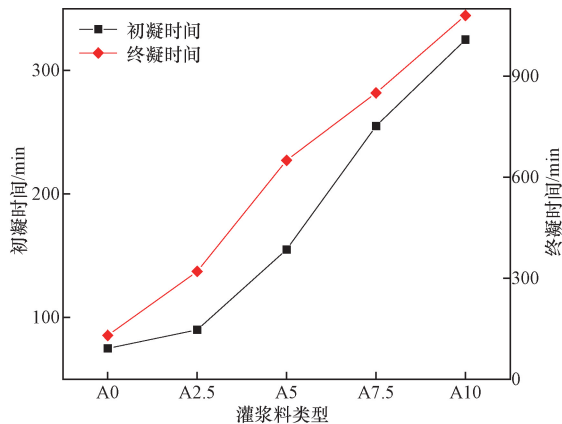


图2 灌浆料的凝结时间

Fig. 2 Setting time of grouting materials

3.3 强度

从图3可以看出,WER灌浆料的抗压强度均低于普通灌浆料的抗压强度,且灌浆料的抗压强度随WER掺量的增长而降低。具体地,与A0相比,A10的抗压强度降低了24.0%。这是因为WER为柔性材料,具有较好的柔韧性,同时WER液滴将少量气体引入水化体系中,在灌浆料水化体系内部引入了“微小气孔”,未填充的气孔结构使灌浆料的密实度下降,有效受荷体积降低,因此灌浆料的抗压强度随WER掺量的增加而逐渐降低。与抗压强度变化规律不同,随着WER用量的增加,灌浆材料抗折强度呈现先增大后降低的变化趋势。与A0相比,A2.5的抗折强度提高了5.0%,A10的抗折强度降低了21.3%。在WER较低掺量下,WER提高了其柔韧性,且WER的引气作用导致灌浆料内部的“微小气孔”数量较少,对其受力截面的有效受荷面积影响较小。随着WER掺量的增大,尽管WER还能进一步提高其柔韧性,但是由于其自身的引气作用,气孔对抗折强度的影响要高于WER的增韧效果。

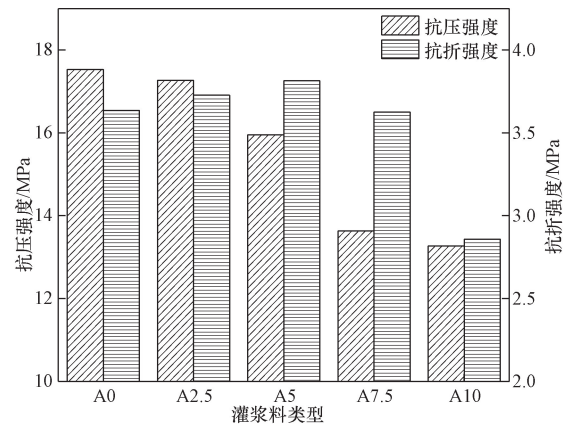


图3 灌浆料的抗压抗折强度

Fig. 3 Compressive and flexural strength of grouting materials

为了更好地评价灌浆料的柔韧性,采用灌浆料试件的压折比来评价灌浆料的柔韧性,计算结果如图4所示。由图4可知,WER灌浆料的压折比均低于普通灌浆料,随着WER用量的增加,灌浆料的压折比呈现先减小后增大的变化趋势,表明WER的添加有利于提高灌浆料的柔韧性。A7.5的压折比降低幅度最显著,与A0相比其压折比降低了22.0%。

3.4 微观形貌

从图5(a)中可以看出,A0内部存在大量簇状的钙矾石(Aft)和不规则的C-S-H凝胶,两者相互连接构成三维网络结构,水化产物形成的体系致密。由图5(b)和图5(c)可以看出,WER附着在灌浆料水化产物的表面,形成一层膜结构。这是因为

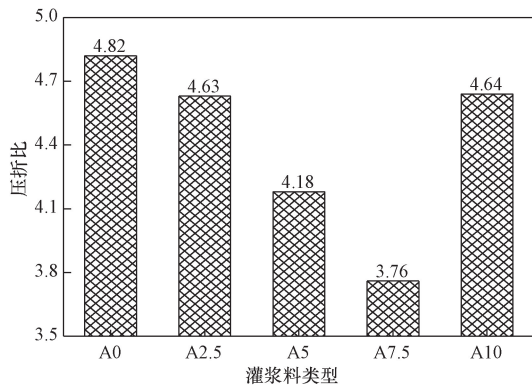


图4 灌浆料的压折比

Fig. 4 Ratio of compressive strength to flexural strength of grouting materials

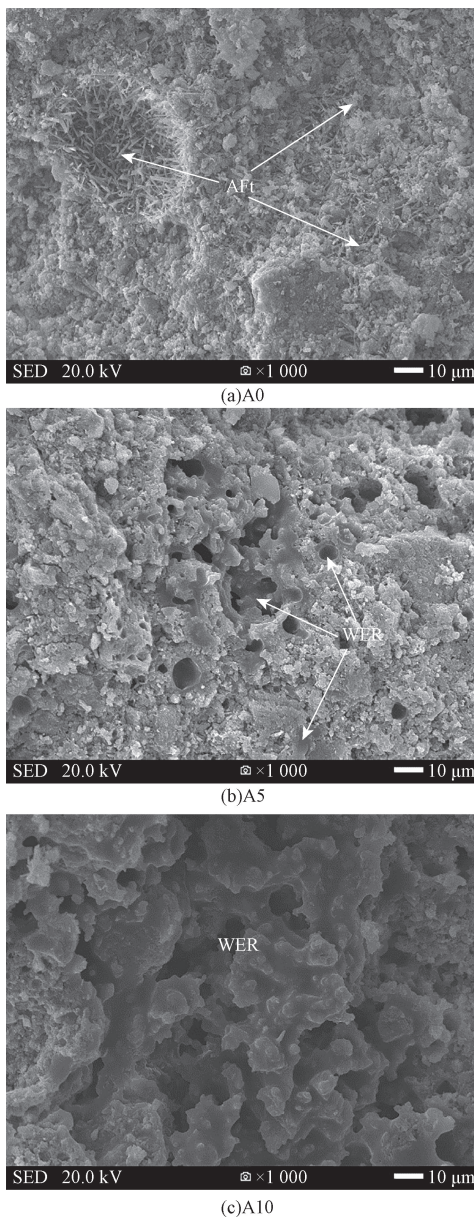


图5 不同灌浆料 SEM 图(×1 000)

Fig. 5 SEM images of different grouting materials (×1 000)

随着水泥水化过程的进行,WER 在水泥浆体中失水成膜,WER 薄膜相互连接与水化产物共同形成相互交织的网络结构,并且随着掺量的提高,形成的薄膜覆盖面积增大。由于 WER 薄膜的柔韧性较为优异,灌浆料水化产物之间的韧性得到提升;同时,由于其本身具有引气作用,会使得水化体系内部蓬松多孔,密实度下降,但是过量的 WER 会严重影响水化体系的密实程度,这会对灌浆料的力学强度产生不利影响。综上分析可知,WER 的在灌浆料内部的成膜裹覆作用有利于提升灌浆料宏观的韧性,但是过量 WER 的引气作用会对灌浆料的力学性能产生不利影响,这解释了第 3.3 节灌浆料强度的变化规律。

4 灌浆复合混合料性能

根据灌浆料的试验结果,灌浆料 A10 不仅需要消耗更多的 WER,而且其力学性能降低最明显,结合材料性能和降低材料成本的目的,本文将灌浆料 A10 剔除,采用灌浆料(A0、A2.5、A5 和 A7.5)制备了 4 种 WER 灌浆复合混合料,并分别命名为 G0、G2.5、G5 和 G7.5。

4.1 高温稳定性

由图 6 可以看出,不同灌浆沥青混合料均具有较高的动稳定度,其动稳定度均超过 10 000 次/mm。WER 灌浆复合混合料的动稳定度均低于普通灌浆复合混合料,而且 WER 灌浆复合混合料的动稳定度随着 WER 用量的增加而逐渐降低。其中,与 G0 相比,G7.5 的动稳定度降低了 13.9%。不同灌浆复合混合料均采用相同的多孔沥青混合料,因此导致灌浆复合混合料高温性能下降是由于灌浆材料引起的。因而,灌浆复合混合料高温性能下降与灌浆料抗压强度下降有关。

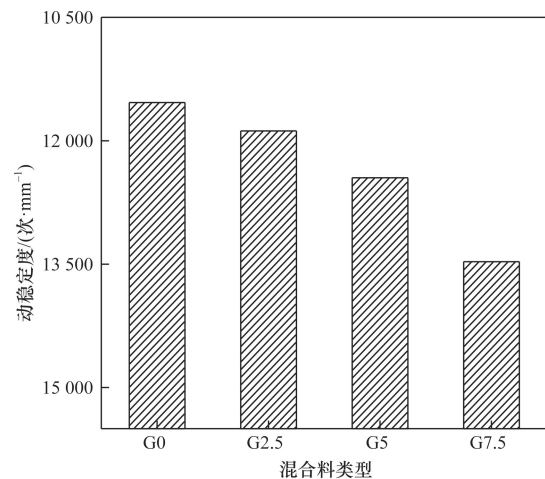


图6 灌浆复合混合料的动稳定度

Fig. 6 Dynamic stability of grouting asphalt mixtures

4.2 低温抗裂性

从图7中可以看出,随着 WER 掺量的增加,灌浆复合混合料的破坏应变提高,而劲度模量降低,表明 WER 可以有效提高灌浆复合混合料的低温抗裂性能。与 G0 相比,G7.5 的破坏应变提高了 29.2%,其劲度模量降低了 21.2%。由灌浆料的强度测试和微观结构可知,WER 在灌浆料的内部覆盖成膜,并与其水化产物相互交织,灌浆料的柔韧性提高,使得 WER 灌浆料与基体沥青混合料的刚度差异减小,一方面有利于灌浆料与基体沥青混合料产生更好的协同变形,进而提高灌浆沥青混合料整体破坏的应变;另一方面,灌浆沥青混合料整体的韧性得到提升,有利于提高灌浆沥青混合料破坏前的变形成能。最终宏观试验表现为 WER 灌浆复合混合料的破坏应变提升,劲度模量下降。

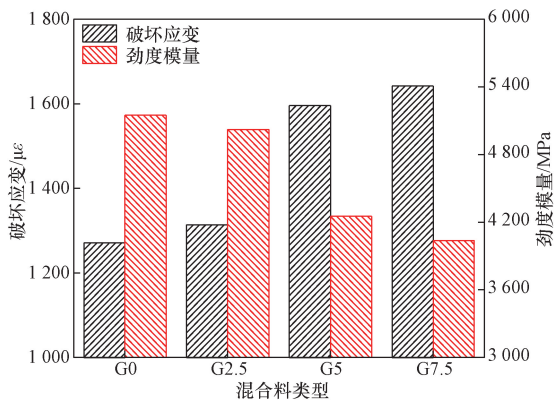


图7 灌浆复合混合料的破坏应变和劲度模量

Fig. 7 Failure strain and stiffness modulus of grouting asphalt mixtures

4.3 水稳定性

从图8中可以看出,WER 的添加会降低灌浆复合混合料水浴 0.5 h 和 48 h 后的马歇尔稳定度。随着 WER 用量的增加,灌浆复合混合料的马歇尔稳定度降低,与 G0 相比,G7.5 的马歇尔稳定度降低了 13.5%,这也验证了灌浆复合混合料高温稳定性的试验结果。灌浆沥青混合料的残留稳定度均高于 90%,表明灌浆复合混合料的水稳定性较好,而且 WER 的添加会进一步提高灌浆复合混合料的残留稳定度,但是灌浆复合混合料的残留稳定度变化较小,表明 WER 对灌浆复合混合料的水稳定性影响相对较小。

5 结论

采用 WER 对灌浆材料进行改性,进而对灌浆复合混合料进行设计,研究了 WER 对灌浆材料流动性能、凝结时间、力学强度和微观形貌的影响,并通过制备灌浆复合混合料对其路用性能进行评价。得到的主要结论如下。

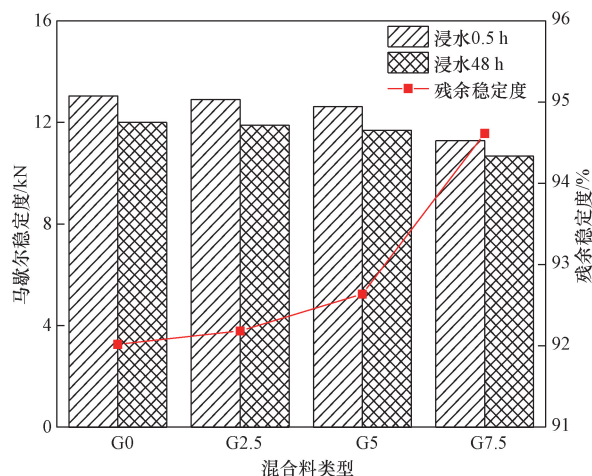


图8 浸水马歇尔试验结果

Fig. 8 Immersion Marshall test results

(1) WER 对灌浆材料的流动性能影响较小,但会延长凝结时间。10% WER 使灌浆料的初凝时间为普通灌浆料的 4.3 倍。

(2) WER 在灌浆料内部形成膜结构并与水化产物相互交织形成网络结构,少量的 WER 有利于提高灌浆材料的柔韧性,过量的 WER 会降低灌浆料的抗压与抗折强度。

(3) WER 会提高灌浆沥青混合料的低温抗裂性能和水稳定性,但是会降低其高温稳定性。其中,7.5% WER 使灌浆沥青混合料的破坏应变提高了 29.2%。

综上所述,WER 可以用于灌浆复合混合料的设计,未来的研究中可以考虑采用多种聚合物材料对灌浆料进行设计,并结合路用性能和施工成本进行优选。

参 考 文 献

- [1] 王涛,李成栋,彭浩然,等. 灌入式半柔性路面抗车辙性能研究[J]. 北方交通, 2021(9): 43-46.
Wang Tao, Li Chengdong, Peng Haoran, et al. Research on rutting resistance of pouring semi-flexible pavement[J]. Northern Communications, 2021(9): 43-46.
- [2] Hassani A, Taghipoor M, Karimi M M. A state of the art of semi-flexible pavements: Introduction, design, and performance [J]. Construction and Building Materials, 2020, 253: 119196.
- [3] 凌森林,王永鑫,金辉球,等. 灌注式半柔性路面研究进展(1)——半柔性混合料组成设计[J]. 石油沥青, 2021, 35(5): 50-59.
Ling Senlin, Wang Yongxin, Jin Huiqiu, et al. Review on pouring semi-flexible pavement(1)——composition design of semi-flexible mixture[J]. Petroleum Asphalt, 2021, 35(5): 50-59.
- [4] 郭庆林,张博昊,高颖,等. 不同种类沥青对灌入式半柔性材料的影响[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(31): 13550-13555.
Guo Qinglin, Zhang Bohao, Gao ying, et al. Influence of different types of asphalt on semi-flexible materials[J]. Science Technology

- and Engineering, 2023, 23(31): 13550-13555.
- [5] Gong M H, Xiong Z J, Chen H, et al. Evaluation on the cracking resistance of semi-flexible pavement mixture by laboratory research and field validation [J]. Construction and Building Materials, 2019, 207: 387-395.
- [6] 郑晓光, 吴立报, 水亮亮. 高性能灌注式半柔性路面材料的路用性能[J]. 建筑材料学报, 2023, 26(6): 638-643, 652. Zheng Xiaoguang, Wu Libao, Shui Liangliang. Road performance of high performance pouring semi-flexible pavement material [J]. Journal of Building Materials, 2023, 26(6): 638-643, 652.
- [7] 王世奇. 半柔性路面的疲劳开裂行为研究[D]. 南京: 东南大学, 2021. Wang Shiqi. Investigation on fatigue cracking behavior of semi-flexible pavement [D]. Nanjing: Southeast University, 2021.
- [8] 张家荣, 介少龙, 岳祖润, 等. 高速铁路基床掺胶粉水泥稳定碎石动力学特性分析[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(16): 7064-7073. Zhang Jiarong, Jie Shaolong, Yue Zurun, et al. Dynamic characteristics analysis of cement stabilized crushed stone mixed with rubber powder for high-speed railway bed [J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(16): 7064-7073.
- [9] 沈忱, 任成锋, 王金光, 等. 轻质聚合物干粉抹面砂浆抗压强度与抗冻性[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(2): 698-705. Shen Chen, Ren Chengfeng, Wang Jinguang, et al. Lightweight polymer dry powder mortar compressive strength and frost resistance [J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(2): 698-705.
- [10] 胡文佩. 半柔性路面高性能灌浆料的制备与性能研究[J]. 现代交通技术, 2021, 18(4): 13-16. Hu Wenpei. The preparation and properties of high performance grouting material for semi-flexible pavement [J]. Modern Transportation Technology, 2021, 18(4): 13-16.
- [11] 王学鹏, 王亮, 王浩, 等. 玄武岩纤维支护砂浆动态力学性能[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(30): 13078-13084. Wang Xuepeng, Wang Liang, Wang Hao, et al. Dynamic mechanical properties of basalt fiber support mortar [J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(30): 13078-13084.
- [12] 黄允宝, 邓成, 龚明辉, 等. 高抗裂半柔性路面的性能研究与工程应用[J]. 上海公路, 2023(2): 119-123, 191. Huang Yunbao, Deng Cheng, Gong Minghui, et al. Performance research and engineering application of semi-flexible pavement with high crack resistance [J]. Shanghai Highways, 2023(2): 119-123, 191.
- [13] 姚江龙, 扈惠敏, 韩风. 可再分散乳胶粉对水泥稳定碎石材料性能影响的试验研究[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(27): 11816-11827. Yao Jianglong, Hu Huimin, Han Feng. Experimental study on the effect of redispersible latex powder on the properties of cement stabilized crushed stone material [J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(27): 11816-11827.
- [14] 黄忠财, 吴金华, 郭寅川, 等. 湿热-疲劳作用下水性环氧树脂桥梁混凝土裂缝演化[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(29): 12985-12992. Huang Zhongcai, Wu Jinhua, Guo yichuan, et al. Crack evolution of waterborne epoxy resin modified bridge concrete under hygro-thermal environment and fatigue load [J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(29): 12985-12992.
- [15] 王可, 刘富强, 孙天一, 等. 水性环氧树脂-丁苯橡胶复合改性乳化沥青高温性能[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(1): 359-366. Wang Ke, Liu Fuqiang, Sun Tianyi, et al. High temperature properties of waterborne epoxy resin-styrene butadiene rubber composite modified emulsified asphalt [J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(1): 359-366.
- [16] 孙国强, 杨建军, 陈春俊, 等. 纳米改性水性环氧树脂防腐涂料的研究进展[J]. 现代化工, 2022, 42(4): 33-38. Sun Guoqiang, Yang Jianjun, Chen Chunjun, et al. Research progress on nano modified waterborne epoxy anticorrosive coatings [J]. Modern Chemical Industry, 2022, 42(4): 33-38.
- [17] 张筱逸. 环氧树脂的特性及其作为功能性建筑材料的应用研究[J]. 应用化工, 2022, 51(3): 884-886, 890. Zhang Xiaoyi. Study on the characteristics of epoxy resin and its application as a functional building material [J]. Applied Chemical Industry, 2022, 51(3): 884-886, 890.
- [18] 郭寅川, 张冲, 申爱琴, 等. 湿热环境下水性环氧树脂改性桥梁混凝土耐久性及其机理[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2022, 42(2): 32-42. Guo Yichuan, Zhang Chong, Shen Aiqin, et al. Durability and mechanism of waterborne epoxy resin modified bridge concrete in humid and hot environment [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2022, 42(2): 32-42.
- [19] 陈启辉, 朱士豪, 刘巧玲, 等. 水性环氧树脂改性超细水泥基防水堵漏材料性能研究[J]. 新型建筑材料, 2022, 49(4): 124-130. Chen Qinhui, Zhu Shihao, Liu Qiaoling, et al. Study on properties of waterborne epoxy resin modified ultra-fine cement-based waterproof and plugging materials [J]. New Building Materials, 2022, 49(4): 124-130.
- [20] 戚顺鑫, 王修山, 陈柯宇, 等. 水性环氧树脂改性水泥基材料应用于彩色路面的研究[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(12): 4977-4983. Qi Shunxin, Wang Xiushan, Chen Keyu, et al. Application of waterborne epoxy resin modified cement-based material to colored pavement [J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(12): 4977-4983.
- [21] 郝肖雨, 田耀刚, 赵成, 等. 高早强水性环氧树脂-乳化沥青-水泥快速修复材料性能研究[J]. 功能材料, 2021, 52(12): 12210-12215. Hao Xiaoyu, Tian Yaogang, Zhao Cheng, et al. Performance of high early strength waterborne epoxy resin-emulsified asphalt-cement rapid repair material [J]. Journal of Functional Materials, 2021, 52(12): 12210-12215.
- [22] 钟鑫. 水性环氧树脂改性水泥混凝土的制备及力学性能分析[J]. 功能材料, 2021, 52(12): 12008-12012. Zhong Xin. Preparation and mechanical properties of cement concrete modified by waterborne epoxy resin [J]. Journal of Functional Materials, 2021, 52(12): 12008-12012.
- [23] 李争, 李宏亮, 孙晋明. 高性能环氧树脂透水混凝土的制备及其性能研究[J]. 功能材料, 2022, 53(9): 9231-9236. Li Zheng, Li Hongliang, Sun Jinming. Preparation and properties of high performance epoxy resin permeable concrete [J]. Journal of Functional Materials, 2022, 53(9): 9231-9236.

- [24] 王海明. 水泥基环氧树脂灌浆材料的制备及性能研究[J]. 功能材料, 2023, 54(11): 11015-11021.
Wang Haiming. Preparation and properties of cement-based epoxy resin grouting material[J]. Journal of Functional Materials, 2023, 54(11): 11015-11021.
- [25] 翟成宇. 半柔性路面树脂基灌浆料配合比设计与性能研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2022.
Zhai Chengyu. Proportioning design and performance research of resin-based grouting material for semi-flexible pavement [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2022.
- [26] 住房和城乡建设部. 水泥基灌浆材料应用技术规范: GB/T 50448—2015[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development. Technical code for application of cementitious grout: GB/T 50448—2015 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015.
- [27] 交通运输部公路科学研究院. 公路沥青路面施工技术规范: JTG F40—2004[S]. 北京: 人民交通出版社, 2005.
Research Institute of Highway Ministry of Transport. Technical specifications for construction of highway asphalt pavements: JTG F40—2004[S]. Beijing: China Communication Press, 2005.
- [28] 交通运输部公路科学研究院. 公路工程水泥及水泥混凝土试验规程: JTG 3420—2020 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2021.
Research Institute of Highway Ministry of Transport. Testing methods of cement and concrete for highway engineering: JTG 3420—2020[S]. Beijing: China Communication Press, 2021.
- [29] 交通运输部公路科学研究院. 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 Communication Press, 2011.