

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2022.06.036

基于干法改性的浇注式沥青混合料性能试验研究

王民^{1,2}, 李波^{1*}, 包广志², 胡德勇²

(1. 重庆交通大学 土木工程学院, 重庆市 400074; 2. 重庆市智翔铺道技术工程有限公司, 重庆市 401336)

摘要:浇注式沥青混合料作为大跨径钢桥面铺装应用最为广泛的材料,采用的专用沥青结合料无法小批量生产和使用,湿法改性工艺显然不适合运营养护期浇注式沥青混合料材料的生产条件。该文根据浇注式沥青混合料及其结合料的要求,结合干法改性工艺要求,采用所开发的直投改性剂,进行浇注式沥青混合料配合比设计及流动性、贯入度及其增量、低温极限弯拉应变、疲劳性能等试验,并与湿法工艺生产的浇注式沥青混合料性能进行对比分析。结果表明:干法工艺拌制的浇注式沥青混合料各项性能均达到现行规范要求,与湿法工艺基本持平,其中的流动性相对较好、高温强度及低温抗裂性能略低;两种干法工艺的疲劳性能相差较大,1 000 μe 时疲劳次数相差达到 50.7%,但均低于湿法工艺;两种工艺浇注式沥青混合料的内部损伤越来越“独立”,耗散能变化比 $R_w \times 10^{-4}$ 趋向于[-1,1],但在前期阶段湿法优于干法。

关键词: 浇注式沥青混合料; 干法; 改性剂; 性能; 疲劳试验

中图分类号: U414 **文献标志码:** A

目前,中国道路交通行业常用的沥青混合料生产工艺主要有两种:一种是传统成品改性沥青预加工方案,即将已经制作好的成品改性沥青直接注入集料中拌和生产改性沥青混合料,该法称为湿法工艺;另一种是直投式改性方案,指先将改性剂添加到集料中干拌,然后再加入基质沥青生产混合料,亦称为干法工艺^[1-5]。和传统工艺相比,干法施工简单,不仅可以节省改性沥青生产和储存环节,还可以有效避免改性沥青生产过程中因高温高速剪切导致的沥青老化问题^[6-9]。

浇注式沥青混合料作为钢桥面铺装常用材料,得到广泛应用,与此同时桥面病害修复问题亟需解决。由于桥面养护修复对混合料需求小、且分散,现场不具备成品改性沥青的供货条件,而干法工艺刚好可以弥补湿法工艺的局限性。此外,浇注式沥青混合料具有拌和温度高、时间长、油石比大的特点,符合干法改性工艺的要求。

张国强^[10]探讨了直投改性浇注式沥青混凝土技术,拓展了浇注式沥青混凝土的应用范围;刘莹等^[11]分析了干法改性沥青混合料的发展现状,并指出了应用干法改性技术需要注意的问题;刘宁^[12]总结了纤维类、高模量剂两类为国内外现阶段主要使用的直投改

性剂,并探讨其作用机理和混合料性能以及指出今后直投改性剂研发的核心,即高性能、经济、环保。

该文通过两种工艺的混合料配合比设计及流动性、贯入度及增量、极限弯拉应变、疲劳性能等试验,探究干法工艺下浇注式沥青混合料性能与湿法工艺的差异性,以解决运营养护浇注式沥青混合料加工的难题。

1 原材料及配合比设计

1.1 原材料

(1) 沥青

该文干法工艺以 SK-70[#] 为母体,基于前期的研究基础,通过添加聚合物改性剂、降黏剂及硬化剂等改性剂,采用不同比例,形成适用于浇注式沥青混合料的两种干法改性方案。基质沥青 SK-70[#] 及湿法工艺采用的聚合物复合改性沥青检测结果见表 1。

(2) 集料

粗集料采用峨眉山玄武岩,细集料采用重庆本地石灰岩,矿粉采用石灰岩磨制而成,检测结果见表 2~4。

1.2 配合比设计

采用干湿法两种工艺,按照 JTG/T 3364-02-2019《公路钢桥面铺装设计与施工技术规范》进行配合

收稿日期:2020-11-23

基金项目:重庆市科技创新领军人才支持计划项目(编号:CSTCCXLJRC201902);重庆市技术创新与应用示范(社会民生类)项目(编号:cstc2018jcsx-msybX0275)

作者简介:王民,男,博士,研究员. E-mail:panda9496@163.com

* 通信作者:李波,男,硕士研究生. E-mail:970457275@qq.com

表 1 改性沥青性能指标

测试项目	单位	SK-70 [#]	湿法 沥青	技术 要求	试验方法
针入度(25℃, 100 g,5 s)	0.1 mm	62.6	39.2	20~40	T0604
延度(15℃/5℃, 5 cm/min)	cm	109.0	30.3	≥20	T0605
软化点 (环球法)	℃	49.8	109.8	≥85	T0606

表 2 粗集料(5~10 mm)主要性能指标

检测项目	单位	测试值	技术要求	试验方法
压碎值	%	12.90	≤20	T0316
针片状颗粒含量	%	5.00	≤10	T0312
洛杉矶磨耗值	%	12.10	≤25	T0317
吸水率	%	0.62	≤2	T0304
坚固性	%	8.70	≤12	T0314
黏附性	级	5	≥5	T0616

表 3 细集料主要性能指标

检测项目	单位	测试值	技术要求	试验方法
表观相对密度		2.735	≥2.5	T0328
坚固性	%	7.9	≤12	T0340
含泥量	%	0.90	≤3	T0333
砂当量	%	79	≥60	T0334

表 4 石灰岩矿粉性能指标

检测项目	单位	测试值	技术要求	试验方法
表观相对密度		2.719	≥2.5	T0352
含水率	%	0.82	≤1	T0103
通过率	0.6 mm	%		
	0.15 mm	%	100	100
	0.075 mm	%		
外观		无团粒结块		—

比设计,确定矿料最佳级配(表 5),干法 1[#]、干法 2[#]、湿法的最佳油石比依次为:7.4%、8.6%、7.4%。

表 5 GA-10 级配组成

项目	通过下列筛孔(mm)的质量百分率/%							
	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
设计级配	99.91	66.09	53.78	42.62	36.40	32.78	28.94	25.52
规范要求	80~100	63~80	48~63	38~52	32~46	27~40	24~36	20~30

2 混合料基本性能

2.1 流动性

浇注式沥青混合料的流动性采用刘埃尔值进行评价,拌和温度 230℃时干法 1[#]、干法 2[#]、湿法生产工艺下刘埃尔值分别为 36.28 s、29.59 s、57.91 s。干法 2[#] 的流动性最好,但同为干法工艺,干法 1[#] 由于添加的硬质改性剂较多,其流动性较差。湿法流动性能最差,主要原因可能是在改性过程中聚合物改性剂溶胀,分散程度彻底,致使沥青的黏度增大。

2.2 高温稳定性能

浇注式沥青混合料的高温性能常用贯入度及其增量指标来评价,试验温度 60℃的试验结果见表 6。

由表 6 可知:三者的贯入度性能相差不大,干法 2[#] 的贯入度性能最优,为 3.26 mm,其次是湿法,最后是干法 1[#],可能是干法工艺添加岩沥青增强了混合料的高温性能。但是贯入度增量指标湿法性能最优。

表 6 贯入度及贯入度增量

生产工艺	贯入度/mm	贯入度增量/mm
干法 1 [#]	3.68	3.9
干法 2 [#]	3.26	3.1
湿法	3.39	2.7

2.3 低温抗裂性

浇注式沥青混合料的低温性能常用-10℃的低温弯曲应变来表征,试验结果见表 7。

表 7 低温弯拉性能

生产工艺	弯拉强度/ MPa	极限弯曲破坏 应变/με	弯拉劲度 模量/MPa
干法 1 [#]	12.93	2 615	4 971.5
干法 2 [#]	13.51	2 171	6 286.2
湿法	16.97	2 798	6 120.1

由表 7 可知:极限弯曲破坏应变下干法 1[#] 和湿法

相差不大,而干法 2[#] 试件应变性能较差,这就证明改性剂性能的贡献差别很大,从弯拉劲度模量可以看出,不同生产工艺相差较大,且改性剂的作用也较为明显。

3 疲劳性能

3.1 试验条件及结果分析

该文选用四点弯曲疲劳试验。试验装置采用 BFA 独立式小梁疲劳试验装置。试验前要先进行 4 h 保温,试验温度(15±0.5)℃,试验频率 10 Hz,采用偏正弦加载模式,分别以 600 με、800 με、1 000 με 为单一变量进行疲劳试验,待弯曲劲度模量降低到初始弯曲劲度模量的 50% 时试验终止,疲劳试验结果见表 8。

表 8 沥青混合料疲劳试验结果

生产工艺	不同应变条件(με)下混合料疲劳寿命/次		
	600	800	1 000
干法 1 [#]	2 969 010	760 620	158 190
干法 2 [#]	2 326 250	552 420	104 970
湿法	3 105 720	795 430	163 750

由表 8 可知:荷载作用次数均已达到规范要求(600 με 荷载作用次数≥100 万次),其中湿法工艺性能最优,达到 3 105 720 次,干法 1[#] 性能次之,干法 2[#] 性能较差。横向对比来看,干法 1[#] 和干法 2[#] 性能在 1 000 με 相差最多,约为 50.70%,主要源于湖沥青的加入,导致混合料脆性增强,疲劳性能大幅下降,这也从侧面证明了混合料的疲劳性能受沥青性能影响极大。干法 1[#] 与湿法相比(600 με、800 με、1 000 με)性能相差不多,600 με 条件下相差较大,约为 4.40%,由此可见,干法工艺使得改性剂的分散程度低于湿法工艺,改性剂的性能不能均衡地展现出来。

3.2 疲劳模型

根据不同应变下的疲劳试验结果,结合典型疲劳方程式(1),对疲劳次数和应变水平进行拟合分析,建立不同工艺条件下的疲劳方程,见图 1。

$$N_f = A \times \epsilon^{-n} \quad (1)$$

式中: N_f 为四点弯曲疲劳次数; ϵ 为四点弯曲的应变水平; A 和 n 为回归参数。

从图 1 可以看出:疲劳方程的相关性系数 R^2 均大于 0.95,说明疲劳次数与应变水平之间具有显著相关性。随着应变增大,曲线斜率由“陡”转“缓”,说明应变条件对疲劳寿命影响显著。

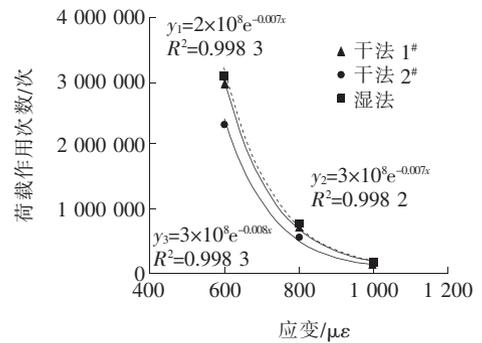


图 1 不同工艺下疲劳次数与应变水平的幂函数关系

3.3 耗散能变化比

浇注式沥青混合料的疲劳破坏是一个能量耗散的过程,累积耗散能的大小直接反映混合料的疲劳寿命。图 2 为沥青混合料在自然对数坐标下累积耗散能(1 000 με)与荷载作用次数的关系。

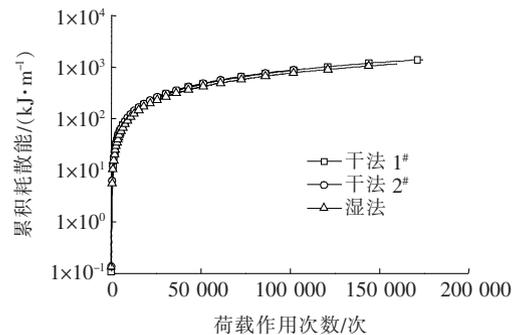


图 2 累积耗散能

从图 2 可知:干法 1[#] 和干法 2[#] 的累积耗散能曲线几乎重合,而湿法的耗散能始终低于干法,且两者相差的趋势越来越大。前期三者的曲线斜率相差不多且都远大于 1,在荷载作用次数约为 2 500 次时,出现了拐点,斜率大幅度下降,到 2 万次时,曲线的斜率趋向于 0。

在早期的耗散能理论的研究中提出在单一循环作用下耗散能曲线包括两部分^[13]:一部分是热能或机械功消耗的能量;另一部分为参与材料损伤破坏的耗散能量,其大小远小于前者。在上述理论的基础上,Ghuzlan 等^[14] 提出采用耗散能变化比 R_w ,来消除加载过程中机械功消耗部分的影响,耗散能变化比定义为:

$$R_w = \frac{|W_j - W_i|}{W_i(j-i)} \quad (2)$$

式中: W_i 、 W_j 分别为第 i 、 j 次加载周期耗散能(MJ/m³)。

从式(2)可以看出:耗散能比 R_w 表征某一可变步长内对试件造成损伤的耗散能 ΔW 占前一周期耗散能的比例。

图 3 为微应变 1 000 με 时不同生产工艺下耗散能变化比 R_w 随荷载作用次数的变化情况。

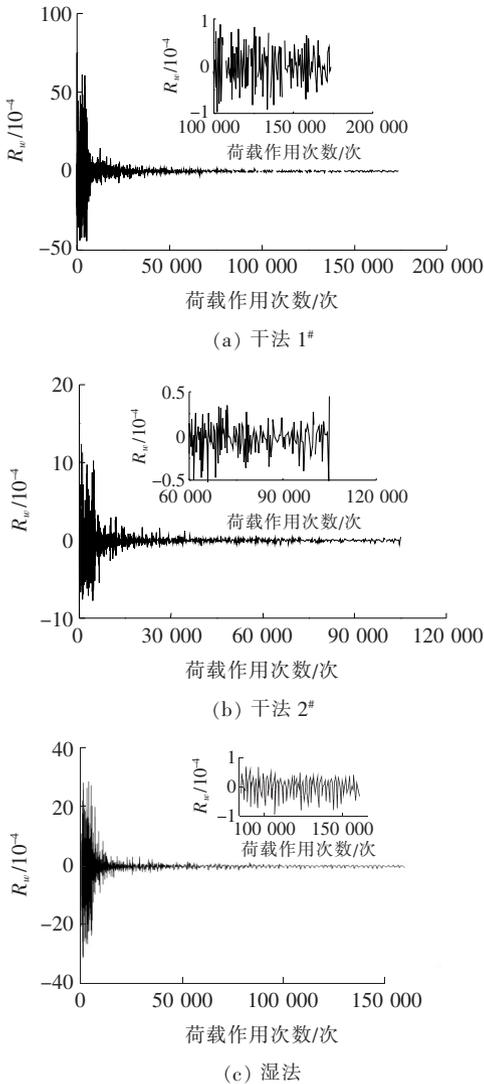


图 3 耗散能变化比 R_w ($1\ 000\ \mu\epsilon$)

由图 3 可知: $R_w \times 10^{-4}$ 随着荷载作用次数的增加而趋向于 $[-1, 1]$, 证明浇注式沥青混合料试件无论是干法工艺还是湿法工艺, 内部损伤是越来越“独立”的。可以得出混合料的疲劳内部损伤随着荷载作用次数的增加, 历史作用力的影响越来越趋于平衡。但 $R_w \times 10^{-4}$ 在前期阶段, 干法 1# 处于 $[-50, 50]$, 湿法处于 $[-30, 30]$, 由此可见耗散能比的前期阶段湿法工艺优于干法工艺。

4 结论

根据浇注式沥青混合料及其结合料的要求, 结合干法改性工艺要求, 采用所开发直投改性剂, 进行浇注式沥青混合料配合比设计及流动性、贯入度及增量、低温极限弯拉应变、疲劳性能等试验。得到以下结论:

(1) 干法的流动性要优于湿法, 其中干法 2# 的流动性最好, 达到 29.59 s ; 三者的贯入度性能相差不大, 干法 2# 的贯入度为 3.26 mm , 性能最优, 其次是湿法, 干法 1# 最差, 但是贯入度增量指标湿法最优; 极限弯曲破坏应变下干法 1# 和湿法相差不大, 而干法 2# 试件低温弯曲应变性能较差。

(2) 干法 1# 和干法 2# 疲劳性能在 $1\ 000\ \mu\epsilon$ 相差最多, 约为 50.7% ; 干法 1# 与湿法相比 ($600\ \mu\epsilon$ 、 $800\ \mu\epsilon$ 、 $1\ 000\ \mu\epsilon$) 性能相差不多, $600\ \mu\epsilon$ 条件下两者相差较大约为 4.40% 。无论是干法工艺还是湿法工艺, 浇注式沥青混合料随着荷载作用次数的增加内部损伤是越来越“独立”, 耗散能变化比 $R_w \times 10^{-4}$ 趋向于 $[-1, 1]$, 但在前期阶段, 干法 1# 处于 $[-50, 50]$, 湿法处于 $[-30, 30]$, 由此可见耗散能比的前期阶段湿法工艺优于干法工艺。

参考文献:

- [1] 姚立阳. 聚丙烯腈纤维在沥青混合料路面中的应用研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2012.
- [2] 赵朋华. 玄武岩纤维对沥青混合料性能影响机理的研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2013.
- [3] 胡晓宇. 玄武岩纤维高粘沥青及混合料性能特性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
- [4] 董元帅. 可卷曲预制沥青路面材料特性与施工工艺研究[D]. 南京: 东南大学, 2015.
- [5] 王超. PR MODULE 高模量沥青混合料路面性能及其应用技术研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2014.
- [6] 王迪. 制备过程和表面改性对煤质活性炭官能团影响规律研究[D]. 北京: 中国矿业大学, 2014.
- [7] 罗国虎. 高寒地区复合矿物纤维沥青路面应用研究[D]. 西安: 长安大学, 2014.
- [8] 宋帅. 高模量沥青混凝土路面研究[D]. 西安: 长安大学, 2014.
- [9] 王少森. 掺加抗车辙剂 PR 的大粒径沥青碎石性能研究与应用[D]. 西安: 长安大学, 2014.
- [10] 张国强. 直投改性浇注式沥青混凝土的研究和应用[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2018, 14(3): 55-56.
- [11] 刘莹, 王涵, 郭娜, 等. 干法工艺生产改性沥青混合料的发展现状[J]. 石油沥青, 2017, 31(2): 63-67.
- [12] 刘宁. 直投式沥青混合料改性剂及其作用机理[J]. 筑路机械与施工机械化, 2018, 35(10): 50-52, 59.
- [13] 黎晓, 梁乃兴. 应力控制模式下沥青混合料劈裂疲劳试验研究[J]. 中外公路, 2013, 33(5): 276-280.
- [14] CHUZLAN K A, CARPENTER S H. Energy-Derived, Damage-Based Failure Criterion for Fatigue Testing [J]. Transportation Research Record, 2000, 1723: 141-149.

高掺量胶粉/SBS 复合改性沥青混合料 永久变形预估模型

张庆宇^{1,2}, 康佳旺¹, 赵毅^{3*}

(1. 重庆交通大学 土木工程学院, 重庆市 400074; 2. 河北交通职业技术学院, 河北 石家庄 050091;
3. 重庆交通大学 材料科学与工程学院, 重庆市 400074)

摘要: 选用 HDPE 和 TOR 两种改性剂制备胶粉掺量 20% 和 25% 的胶粉/SBS 改性沥青混合料, 并与 SBS 改性沥青混合料对比分析技术性能。通过三轴重复荷载动态蠕变试验, 研究 3 种胶粉/SBS 改性沥青混合料的永久变形规律; 基于修正 Burgers 模型构建重复荷载作用下胶粉/SBS 改性沥青混合料永久变形预估模型。研究表明: 高掺量胶粉/SBS 改性沥青混合料的制备是可行的, 其路用性能满足规范要求; 不同胶粉掺量的胶粉/SBS 改性沥青混合料具有基本一致的永久变形规律。胶粉的掺入有利于提高沥青混合料抗永久变形性能, 但胶粉掺量过大, 容易增大沥青的黏度, 不利于施工; 胶粉/SBS 改性沥青混合料永久变形预估模型, 拟合效果良好, 相关性系数均大于 0.98。构建全温域条件下基于叠加原理的沥青路面永久变形预估模型, 为胶粉/SBS 改性沥青混合料永久变形预估模型的应用提供思路。

关键词: 道路工程; 胶粉/SBS 改性沥青混合料; 三轴重复荷载动态蠕变试验; 永久变形; 预估模型

中图分类号: U414 **文献标志码:** A

胶粉改性沥青混合料是由胶粉、沥青、集料和空隙组成的复合材料, 是典型的黏弹性材料^[1]。胶粉改性沥青混合料作为一种环保新型道路工程材料, 不仅消耗了大量废旧轮胎, 而且可以改善沥青混合料的路用性能^[2]。沥青层的永久变形是沥青路面最主要的损坏类型之一, 因此, 开展胶粉改性沥青混合料永久变形特性研究非常必要。

胶粉掺量较大时, 沥青黏度增大, 不便于混合料的施工, 因此, 胶粉改性沥青中胶粉掺量通常为 20%。南非、澳大利亚废胎胶粉掺量能达到 25%, 中国制备了胶粉掺量 30%~40% 的高掺量橡胶沥青^[1]。随着废旧轮胎破碎工艺的进步和绿色环保的需求, 提高橡胶沥青中胶粉掺量成为新的方向, 高掺量胶粉改性沥青的制备及性能值得研究。

吴正光等^[3] 选用 40 目胶粉、HR 复合剂制备了新型胶粉改性沥青混合料, 结果表明其具有良好的抗永久变形能力; 赵毅等^[4] 推导了重复荷载作用下沥青混合料永久变形黏弹性力学修正模型; 王新强等^[1] 研究了高掺量胶粉改性沥青混合料的黏弹特性, 结果表明: 随着胶

粉掺量增加, 胶粉改性沥青混合料的动态模量降低。

该文选取 20% 和 25% 两种胶粉掺量, 制备胶粉/SBS 改性沥青混合料, 并与 SBS 改性沥青混合料对比分析。通过 SPT 简单性能试验机进行动态蠕变试验, 研究胶粉掺量、温度、偏应力对胶粉/SBS 改性沥青混合料永久变形规律的影响, 并基于修正 Burgers 模型, 建立胶粉/SBS 改性沥青混合料永久变形黏弹性模型, 为沥青路面沥青层永久变形预估提供理论基础。

1 胶粉/SBS 改性沥青混合料设计

1.1 原材料

该文选用 60 目胶粉颗粒, SBS 作为沥青改性剂, 掺量为 3%。选用 HDPE 和 TOR 两种改性剂对复合改性沥青进行降黏以及优化复合改性沥青性能^[5-6]。

胶粉/SBS 复合改性沥青制备方法: 首先将基质沥青低温预热, 然后快速升温至 180 °C, 加入 SBS, 并不停搅拌, 充分溶胀, 保持 10 min; 溶胀结束后, 采用高速剪切机在温度为 180 °C 的恒温水浴锅中对 SBS 改

收稿日期: 2020-11-01

基金项目: 河北省交通运输厅科技项目(编号: QC2018-3); 重庆市教委科学技术研究项目(编号: KJQN201800704); 河北省高等学校科学技术研究项目(编号: ZD2018201); 重庆市研究生联合培养基地建设项目(编号: JDLHPYJD2021011)

作者简介: 张庆宇, 男, 博士研究生, 教授, E-mail: 584464701@qq.com

* 通信作者: 赵毅, 男, 博士, 副教授, E-mail: 1585513635@qq.com