

TLA与聚酯纤维复合改性热再生沥青混合料路用性能研究

Study on Road Performance of Hot Recycled Asphalt Mixture Modified by TLA and Polyester Fiber

胡文娟

(郑州市公路工程公司, 河南 郑州 450000)

摘要: 为了改善热再生沥青混合料的路用性能及耐久性, 首先采用 TLA 与聚酯纤维进行复配设计, 然后基于马歇尔、高温车辙、低温弯曲、浸水马歇尔、冻融劈裂、两点弯曲与浸水 APA 等试验, 针对 TLA 与聚酯纤维复合改性热再生沥青混合料的高温稳定性、低温抗裂性、水稳定性、抗疲劳耐久性能展开综合考察。结果表明: 单掺 TLA 或聚酯纤维均能改善热再生沥青混合料的高温稳定性能、低温抗裂性能及水稳定性, 且 TLA 的各项性能改善效果相对较为明显; 经复掺 TLA 与聚酯纤维改性后热再生沥青混合料的路用性能均得到显著的提升, 可适用于我国北方严寒或南方高温湿热多雨等复杂气候地区的沥青路面建设之中; TLA 能够有效提高热再生沥青混合料的劲度模量与疲劳寿命, 合理复掺聚酯纤维后提升效果更为明显, 均符合高模量沥青混合料的规定及要求; 采用合理比例的 TLA 与聚酯纤维进行复掺, 可综合提升热再生沥青混合料的路用性能及耐久性。

关键词: 聚酯纤维; 热再生沥青混合料; TLA; 路用性能; 耐久性

中图分类号: U414 文献标志码: A 文章编号: 1005-8249 (2024) 01-0022-06

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2024.01.005

HU Wenjuan

(Zhengzhou Highway Engineering Company, Zhengzhou 450000, China)

Abstract: In order to improve the road performance and durability of hot recycled asphalt mixture, TLA and polyester fiber are first used for composite design, and then based on Marshall, high-temperature rutting, low-temperature bending, soaking Marshall, freeze-thaw splitting, two-point bending and soaking APA tests, the high-temperature stability, low-temperature crack resistance, water stability and fatigue endurance of TLA and polyester fiber composite modified hot recycled asphalt mixture were comprehensively investigated. The results show that both TLA and polyester fiber can improve the high-temperature stability, low-temperature crack resistance and water stability of hot recycled asphalt mixture, and the improvement effect of TLA is relatively obvious; The road performance of the hot recycled asphalt mixture modified by TLA and polyester fiber has been significantly improved, and it can be applied to the construction of asphalt pavement in the severe cold in the north of China or the high temperature, humid and rainy areas in the south; TLA can effectively improve the stiffness modulus and fatigue life of hot recycled asphalt mixture, and the improvement effect is more obvious after reasonable mixing of polyester fiber, which meets the regulations and requirements of high modulus asphalt mixture; The road performance and durability of hot recycled asphalt mixture can be comprehensively improved by using a reasonable proportion of TLA and polyester fiber.

Keywords: polyester fiber; hot recycled asphalt mixture; TLA; road performance; durability

作者简介: 胡文娟 (1978—), 女, 本科, 高级工程师, 主要研究方向: 土木工程相关工作。

收稿日期: 2023-10-29

0 引言

随着我国公路建设的快速发展, 使得天然石料、沥青等路面材料的需求量逐年增多, 同时大量沥青

路面的翻修或改建,造成废旧沥青路面材料(RAP)的堆积问题日益严重^[1-3]。据统计,我国每年都会产生几千万吨的RAP,因此RAP的合理高效利用一直是现阶段道路工作者关注的热点^[4-5]。热再生沥青混合料是将一定比例的RAP添加至新沥青混合料中而形成复合材料,不仅能够降低新沥青用量,还能解决废料占地难题,具有良好的经济性和环境友好性,值得在公路路面建设中大规模的推广与应用^[6-8]。

近年来,国内外学者对热再生沥青混合料进行了大量的研究,如程培峰^[9]等研究了RAP粒径及比例对厂拌热再生沥青混合料性能的影响规律,得到细RAP掺量为13%时路用性能表现最佳,而合适的基准料组合可以改善高RAP掺量再生沥青混合料的使用性能;刘燕燕等^[10]首先采用变异系数CV对RAP的变异性进行定量评价,然后确定出RAP的分级标准,最后系统分析了不同RAP分级标准情形下热再生沥青混合料的高低温稳定性及水稳定性;伊庆刚等^[11]通过在SBR改性热再生沥青混合料内掺入不同比例的青川岩沥青,分别采用室内路用性能、疲劳性能试验综合评价了青川岩沥青与SBR复合改性混合料的性能。考虑到传统的热再生沥青混合料在抗开裂、抗水损及抗疲劳等性能方面存在严重技术缺陷,本研究采用马歇尔、高温车辙、低温弯曲、浸水马歇尔、冻融劈裂、两点弯曲以及浸水APA等试验,针对TLA与聚酯纤维复合改性热再生沥青混合料的高温稳定性、低温抗裂性、水稳定性和抗疲劳耐久性能进行系统分析,旨在为热再生沥青混合料的设计及推广应用提供技术支撑。

1 试验材料及方案

1.1 原材料

基质沥青:采用泰和沥青公司生产的90#A级道路石油沥青,其技术性能均符合JTGE 20-2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》的要求;特立尼达湖沥青(TLA)由广东东莞某公司生产,外观为粉末状细颗粒,其各项性能指标及筛分试验结果分别见表1~2;废旧沥青路面材料(RAP):取自某快速路大修工程的破碎铣刨料,RAP中旧沥青的沥青含量为4.71%,针入度(25℃,5s,100g)为38.8(0.1mm),延度(10℃)为35.2cm,软化点

为68℃,RAP中粗集料的压碎值和针片状含量分别为19%、9.3%,细集料砂当量与坚固性分别为66%、16%;再生剂:选用RA-25型,其相关技术指标符合JTG/T 5521-2019《公路沥青路面再生技术规范》要求;纤维:外观为白色聚酯纤维(PF),其技术性能指标见表3;集料:粗集料为石灰岩碎石,细集料为石灰岩机制砂及石灰岩矿粉,粗细集料的各项技术指标均符合JTG F40-2017《公路沥青路面施工技术规范》的要求。

表1 TLA湖沥青性能指标

项目	试验结果	指标要求
针入度(25℃,100g,5s)/0.1mm	4.0	0~5.0
软化点/℃	93.0	≥90.0
密度/(g/cm ³)	1.3	1.3~1.5
灰分/%	35.8	33.0~38.0
TFOT后残留针入度比/%	53.0	≥50.0

表2 TLA湖沥青筛分试验结果

项目	通过下列筛孔尺寸(mm)百分率/%			
	2.36	0.6	0.3	0.075
试验结果	100	75	43	15
规范要求	100	90~100	10~30	—

表3 聚酯纤维性能指标

项目	指标性能
单丝直径/μm	7
长度/mm	7
密度/(g/cm ³)	1.158
熔点/℃	350
吸油率/%	147
断裂强度/MPa	5.6

1.2 试验方案

为考察TLA与聚酯纤维掺量对复合改性热再生沥青混合料路用性能及耐久性能的影响,试验共设计了TLA掺量为15%、30%、45%(占新沥青质量的百分比)的三组热再生沥青混合料,同时于每组TLA掺量情形下添加了1.5‰、3‰、4.5‰掺量(占新沥青质量的百分比)的聚酯纤维,采用车辙试验、低温弯曲试验、浸水马歇尔试验及冻融劈裂试验评价TLA与聚酯纤维复合改性热再生沥青混合料的路用性能,采用浸水APA试验评价复合改性热再生沥青混合料的耐久性能。

2 复合改性热再生沥青混合料制备

2.1 矿料级配

根据相关文献^[12-13]与RAP及新集料筛分试验

材料科学

结果可知, RAP 过量不仅能削弱热再生沥青混合料的低温抗裂性能及水稳定性能, 还会造成新集料的预热

温度过高等问题。经过综合考虑, 最终确定 RAP 掺量为 30%, 其合成级配设计见表 4。

表 4 沥青混合料的合成级配
Table 4 Synthetic grading of asphalt mixture

项目	通过下列筛孔尺寸/mm 百分率/%									
	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
级配上限	100	100	83	57	44	33	26	19	15	9
级配下限	100	90	71	45	28	19	11	8	6	5
RAP 级配	100	96.5	77.6	51.5	33.5	23.5	15.8	11.8	8.7	5.7

2.2 制备工艺及马歇尔试验

试验首先分别对 RAP 和新集料进行预热处理, 其中 RAP 的预热温度设置为 110 ℃, 待 RAP 预热完全后与再生剂一起加入搅拌罐内均匀搅拌 30 s, 接着再将新集料加入并搅拌 45 s, 然后将 TLA、聚酯纤维置于搅拌罐内继续搅拌 30 s 至纤维均匀分散, 接着再将基质沥青加入并均匀的搅拌 30 s, 最后将矿粉加入搅拌罐内继续搅拌 45 s, 热再生沥青混合料的总拌合时间为 180 s。热再生沥青混合料的配合比严格参照 JTG/T 5521-2019 的要求采用马歇尔法进行设计, 不同 TLA 与聚酯纤维复合改性热再生沥青混合料的马歇尔试验结果见表 5。

大变化; 而在相同 TLA 掺量情形下, 马歇尔稳定度则随着聚酯纤维掺量的增加呈先增大后减小变化, 即确定出复合改性热再生沥青混合料中聚酯纤维的最佳掺量为 3‰, 故路用性能与耐久性能试验均采用聚酯纤维掺量为 3‰。

3 复合改性热再生沥青混合料路用性能及耐久性试验研究

为了研究 TLA 与聚酯纤维复合改性热再生沥青混合料的路用性能及耐久性能, 试验参照 JTG F40-2017、JTG E20-2011 等相关规范的规定, 设计了 6 组 TLA 与聚酯纤维复合改性热再生沥青混合料组合方案, 见表 6, 并分别采用高温车辙试验、低温弯曲试验、浸水马歇尔试验、冻融劈裂试验与浸水 APA 试验, 对 TLA 与聚酯纤维复合改性热再生沥青混合料的路用性能及耐久性能进行综合评价。

表 5 复合改性沥青混合料的马歇尔试验结果

Table 5 Marshall test results of composite modified asphalt mixture

TLA 掺量/%	聚酯纤维掺量/‰	空隙率 VV/%	间隙率 VMA/%	饱和度 VFA/%	稳定度 /kN	流值 /mm	最佳沥青用量/%
0	0	4.01	13.72	71.1	8.36	3.97	4.50
	1.5	4.03	14.16	72.0	11.0	2.26	5.18
15	3	3.97	14.25	72.6	11.9	2.21	5.36
	4.5	4.13	14.20	71.5	11.5	2.02	5.51
30	1.5	4.01	14.16	72.0	12.1	2.23	5.02
	3	4.16	14.19	71.2	13.2	2.05	5.18
45	4.5	4.06	14.11	71.7	11.9	1.83	5.06
	1.5	3.98	14.26	72.6	14.1	2.03	4.70
45	3	4.01	14.22	72.3	14.6	1.92	4.81
	4.5	3.99	14.25	72.5	14.3	1.76	4.99

由表 5 可知, 在相同聚酯纤维掺量情形下, 复合改性热再生沥青混合料的最佳沥青用量均随着 TLA 掺量的增加呈逐渐减小变化。原因是 TLA 在受热后释放出部分黏稠度较大的硬质沥青, 同时起到了良好的润滑作用。TLA 与聚酯纤维复合改性热再生沥青混合料的空隙率 VV、间隙率 VMA、饱和度 VFA、稳定度及流值等指标均满足 JTG F40-2017 的要求, 其中在相同聚酯纤维掺量情形下, 复合改性热再生沥青混合料的稳定度随着 TLA 掺量的增加呈逐渐增

表 6 复合改性热再生沥青混合料组合方案
Table 6 Combination scheme of composite modified thermal recycled asphalt mixture

序号	TLA 掺量/%	PF 掺量/‰	备注说明
1	0	0	PT
2	30	0	30%TLA
3	0	3	3‰PF
4	15	3	15%TLA+3‰PF
5	30	3	30%TLA+3‰PF
6	45	3	45%TLA+3‰PF

3.1 高温稳定性

TLA 与聚酯纤维复合改性热再生沥青混合料的车辙试验结果如图 1 所示。由图 1 可知, 普通热再生沥青混合料的动稳定度为 1916 次/mm, 而单掺 30% 的 TLA 或 3‰ 聚酯纤维后, 热再生沥青混合料的动稳定度分别增至 4302、2246 次/mm, 即分别增大了 124.5% 和 17.2%, 说明 TLA 与聚酯纤维均能有效改善热再生沥青混合料的高温稳定性能, 且 TLA 的高温性能改善效果更加显著。在 3‰ 聚酯纤维掺量情形下, 复掺再生沥青混合料的动稳定度随着 TLA 掺量

增加逐渐增大, 其中当 TLA 掺量由 0 增至 30% 时, 动稳定度增大了 212.1%; 而 TLA 掺量由 30% 增至 45% 时, 动稳定度仅增大了 10.2%, 说明复掺热再生沥青混合料动稳定度变化规律呈先快后慢的非线性增大趋势。TLA 掺量为 30%、45% 时, 复掺热再生沥青混合料的动稳定度均超过了 7000 次/mm, 表明了其高温稳定性能比较优异。原因是 TLA 灰分内含有丰富的 CaCO_3 等碱矿物质, 一定程度上促进了沥青与集料间的黏附能力, 且 TLA 在受热过程中会析出部分硬质沥青, 而软硬质沥青相互交融有利于提高新沥青的硬度及黏度; 另外, 聚酯纤维均匀分散于沥青胶浆与集料间, 起到良好的加筋、吸附等作用, 既增加了集料间的滑移约束, 又分散了荷载应力, 促使混合料整体结构更加稳固, 因此能够有效改善荷载、温度等耦合条件下复掺热再生混合料的抗变形能力。

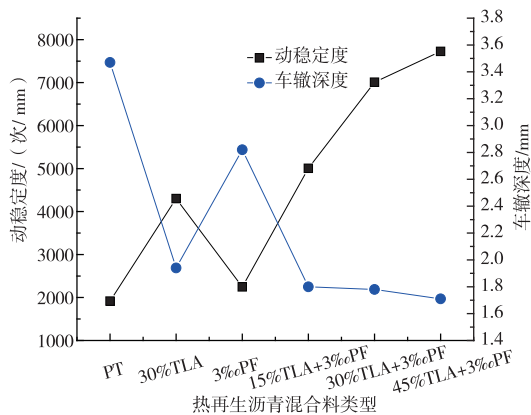


图 1 热再生沥青混合料车辙试验结果

Fig. 1 Rutting test results of hot recycled asphalt mixture

3.2 低温抗裂性

TLA 与聚酯纤维复合改性热再生沥青混合料的低温弯曲试验结果如图 2 所示。由图 2 可知, 普通热再生沥青混合料的抗弯拉强度和最大弯曲应变分别为 7.46 MPa、2073 $\mu\epsilon$, 而单掺 30% 的 TLA 或 3% 聚酯纤维后热再生沥青混合料的抗弯拉强度和最大弯曲应变均高于普通热再生沥青混合料, 说明 TLA 与聚酯纤维均能增强热再生沥青混合料的低温抗裂性能。在 3% 聚酯纤维掺量情形下, 复掺热再生沥青混合料的抗弯拉强度随着 TLA 掺量增加逐渐增大, 而最大弯曲应变则随着 TLA 掺量增加呈先增大后减小变化, 15%、30%、45% 掺量的 TLA 与聚酯纤维复掺热再生沥青混合料的抗弯拉强度较于单掺聚酯纤维

分别增大了 20.3%、35.3%、42%, 且最大弯曲应变较于单掺聚酯纤维分别增大了 35.3%、41.5%、24.1%, 表明掺量 30% 的 TLA 与 3% 聚酯纤维的复掺热再生沥青混合料的低温抗裂性能最佳。JTG D50-2017 《公路沥青路面设计规范》规定, 在冬季严寒地区热再生沥青混合料的弯曲应变不得低于 2300 $\mu\epsilon$, 由此可知普通热再生沥青混合料不适用于我国北方严寒地区; 而经 TLA、聚酯纤维单掺或复掺改性后均能满足规范的要求, 因此可应用于我国北方严寒地区的沥青路面建设中。

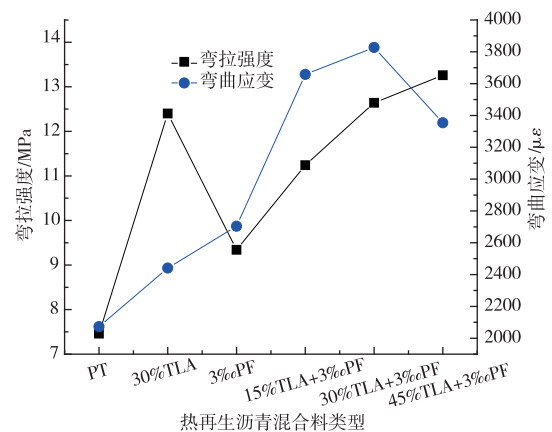


图 2 热再生沥青混合料低温弯曲试验结果

Fig. 2 Low temperature bending test results of hot recycled asphalt mixture

3.3 水稳定性

TLA 与聚酯纤维复合改性热再生沥青混合料的水稳定性试验结果如图 3 所示。

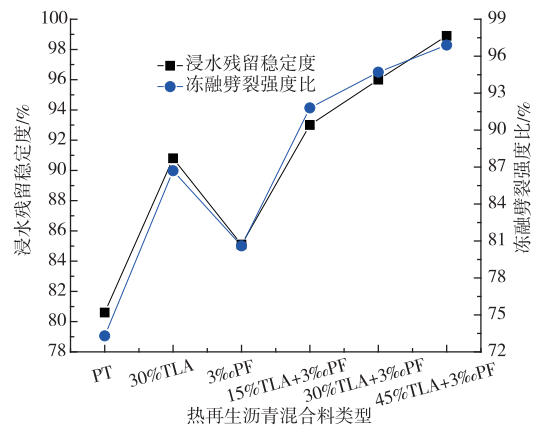


图 3 热再生沥青混合料水稳定性试验结果

Fig. 3 Water stability test results of hot recycled asphalt mixture

由图 3 可知, 普通热再生沥青混合料的浸水残留稳定度与冻融劈裂强度比分别仅为 80.6%、73.3%, 而 JTG E20-2011 中规定浸水残留稳定度 $\geq 85\%$ 、冻

材料科学

融劈裂强度比 $\geq 80\%$ 的要求,表明普通热再生沥青混合料的水稳定性较差,因此不适用于我国的南方湿热多雨地区。TLA、聚酯纤维复掺热再生沥青混合料的浸水残留稳定度超过了 85%,且冻融劈裂强度比均超过了 80%,说明复掺热再生沥青混合料的水稳定性均满足 JTG E20-2011 要求。另外,经 TLA 与聚酯纤维复掺改性后的浸水残留稳定度和冻融劈裂强度均超过 90%,表明复掺热再生混合料具有优异的抗水损害能力。

3.4 抗疲劳耐久性

3.4.1 两点弯曲试验

采用两点梯形梁弯曲试验机,按照法标《Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt (EN 12697)》进行劲度模量试验及疲劳试验,其中劲度模量试验温度为 15 ℃,加载频率为 10 Hz;疲劳试验温度为 10 ℃,加载频率为 25 Hz,应变控制水平为 130 $\mu\epsilon$ 。TLA 与聚酯纤维复合改性热再生沥青混合料的两点弯曲试验结果如图 4 所示。

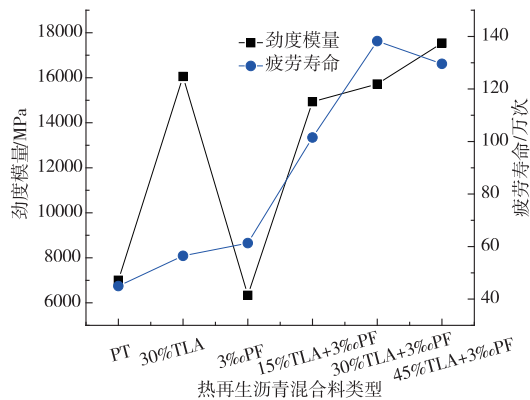


图 4 热再生沥青混合料两点梯形梁弯曲试验结果
Fig. 4 Two-point trapezoidal beam bending test results of hot recycled asphalt mixture

由图 4 可知,普通、TLA 单掺 30%与单掺 3%聚酯纤维热再生沥青混合料的劲度模量分别为 7003、16057 和 6335 MPa,其中仅单掺 TLA 热再生沥青混合料满足我国 T/CHTS 10004-2018《公路高模量沥青路面施工技术指南》规定模量大于 14000 MPa 的要求;复掺热再生沥青混合料的劲度模量随着 TLA 掺量增加逐渐增大,且均达到高模量沥青混合料的要求,表明掺入 TLA 能够有效提高热再生沥青混合料的模量,从而增强其抗变形能力。原因是 TLA 受热离析出稠度大且标号低的硬质沥青,增强新沥青的硬度及黏度;加之 TLA 中灰分呈

疏松多孔状结构,富含 CaCO_3 等活、碱性矿物,因此可以有效改善热再生沥青混合料的劲度模量和黏附强度。较于普通热再生混合料而言,单掺 TLA 或聚酯纤维热再生沥青混合料的疲劳寿命均有所增长,其中聚酯纤维增幅更为明显,原因是聚酯纤维具有吸附、加筋的作用,其在混合料内均匀分散形成网状结构,能有效抑制疲劳破坏裂纹的发展;在 3%聚酯纤维掺量情形下,复掺热再生沥青混合料的疲劳寿命随着 TLA 掺量增加呈先增长后减短变化趋势。其中当 TLA 掺量为 30%时,复掺热再生沥青混合料的疲劳寿命最长;而当 TLA 掺量为 45%时,疲劳寿命虽有所降低,但仍满足 T/CHTS 10004-2018 中规定疲劳寿命需大于 100 万次的要求。原因是适量的 TLA 发挥增黏与改善黏附强度的作用,有利于疲劳寿命增长;而 TLA 过量则引起劲度模量过大,使得混合料的脆性增大,降低荷载释放、消散及自身愈合的能力,故而疲劳寿命有所减短。

3.4.2 浸水 APA 疲劳试验

首先采用轮碾法将沥青混合料制备成 300 cm×300 cm×10 cm) 试件,然后按照 (300 mm×125 mm×75 mm) 尺寸切割成标准的 APA 试件,试验环境为 50 ℃恒温水浴,试验钢轮加载速率为 25 Hz,轮压约为 0.7 MPa,试验终止条件为 APA 标准试件的加载次数达 2 万次,或车辙变形量超过 14 mm。TLA 与聚酯纤维复合改性热再生沥青混合料的 APA 疲劳试验结果如图 5 所示。

由图 5 可知,在钢轮加载次数为 8153 次时,普通热再生混合料的车辙变形量达到试验终止条件,表明在高温、浸水耦合条件下普通热再生混合料的耐久性相对较差;在钢轮加载次数分别为 18558、11964 次时,TLA、聚酯纤维单掺热再生沥青混合料的车辙变形量达到 14 mm,两者承受的加载次数较普通热再生混合料分别增大了 127.6%、46.7%,表明高温、浸水耦合条件下,TLA、聚酯纤维单掺均能改善热再生沥青混合料的耐久性,且 TLA 的抗疲劳耐久性改善效果更佳,原因是 TLA 中的灰粉一般呈疏松多孔状结构,能够有效增强热再生沥青混合料的黏附性。在 3%聚酯纤维掺量情形下,TLA 与聚酯纤维复掺热再生沥青混合料所承受的钢轮加载次数均超过试验终止条件的 20000 次,且其车辙变形量随着 TLA 掺量的增加呈逐渐减小变化,当 TLA 掺量由 15%增至 45%时,复掺热再生沥青混合料的车辙变

形量从 11.25 mm 减至 7.41 mm, 说明在一定程度上增加 TLA 掺量能够有效改善热再生沥青混合料的抗疲劳耐久性。

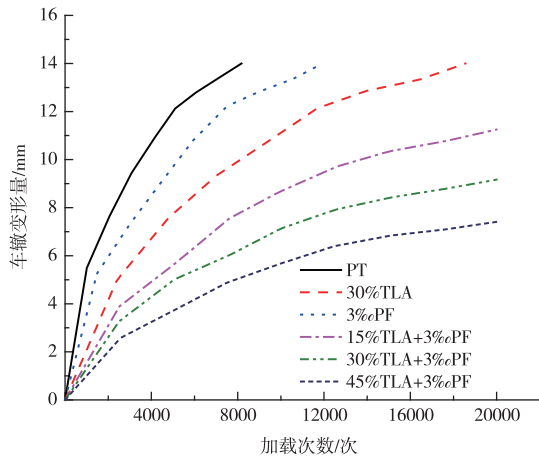


图 5 热再生沥青混合料 APA 疲劳试验结果
Fig. 5 APA fatigue test results of hot recycled asphalt mixture

4 结论

(1) TLA 与聚酯纤维单掺均能有效提高热再生沥青混合料的高温稳定性能、低温抗裂性能及水稳定性, 其中 TLA 对各项性能的综合提升效果更为明显。

(2) 随着 TLA 掺量的增加, TLA 与 3%ePF 聚酯纤维复掺热再生沥青混合料的动稳定度、最大弯曲应变、浸水残留稳定度及冻融劈裂强度比均逐渐增大, 而抗弯拉强度则先显著增大后略微减小; 复掺热再生沥青混合料的路用性能较单掺更为优异, 复掺改性后的弯曲应变均高于 $3000 \mu\epsilon$, 且浸水残留稳定度与冻融劈裂强度比均超过了 90%, 适用于我国北方严寒地区或南方湿热多雨地区的沥青路面建设。

(3) TLA 单掺能够有效提高热再生沥青混合料的劲度模量指标; TLA 或聚酯纤维单掺、复掺均能提高热再生沥青混合料的疲劳寿命, 复掺热再生沥青混合料的疲劳寿命随着 TLA 掺量增加呈先增长后减短变化; 在高温、浸水耦合条件下, TLA、聚酯纤维单掺或复掺均能改善热再生沥青混合料的耐久性。

(4) 采用合理比例的 TLA 与聚酯纤维进行复掺, 可综合提升热再生沥青混合料的路用性能及耐久性,

TLA 掺量为 30%、45% 与 3%ePF 聚酯纤维的组合方案下热再生沥青混合料的综合性能提升最为显著, 这对于提升高品质热再生沥青路面的服役水平具有重要应用价值。

参考文献

- [1] 李浩, 熊鑫, 李俊. 不同 RAP 掺量 SMA 再生沥青混合料性能试验分析 [J]. 中外公路, 2022, 42 (2): 242-246.
- [2] 李希友. 热拌再生沥青混合料水稳定性研究 [J]. 公路, 2022, 67 (2): 242-248.
- [3] 王国方. 玄武岩纤维 SUP-13 就地热再生沥青混合料性能研究及工程应用 [D]. 江苏: 扬州大学, 2022.
- [4] 郝培文, 李洪祥, 崔鹰翔, 等. 新旧沥青融合程度对热再生沥青混合料性能影响 [J]. 硅酸盐通报, 2021, 40 (11): 3837-3846.
- [5] MARCO P, ANDREA B B, GIOVANNI G, et al. Towards very high RAP content asphalt mixes: a comprehensive performance-based study of rejuvenated binders [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition), 2021, 8 (6): 1022-1035.
- [6] 张强, 高学凯, 梁春雨. 热再生沥青混合料低温蠕变行为及黏弹性分析 [J]. 中外公路, 2022, 42 (2): 218-222.
- [7] 徐金枝, 郝培文, 郭晓刚, 等. 厂拌热再生沥青混合料组成设计方法综述 [J]. 中国公路学报, 2021, 34 (10): 72-88.
- [8] 吴建涛, 焦岩, 夏新全, 等. 基于筛分试验的热再生沥青混合料结团量化分析 [J]. 东南大学学报 (自然科学版), 2022, 52 (3): 564-570.
- [9] 程培峰, 向银剑, 李炬辉, 等. RAP 粒径对热再生沥青混合料性能的影响研究 [J]. 重庆交通大学学报 (自然科学版), 2020, 39 (6): 81-86, 91.
- [10] 刘燕燕, 裘秋波, 纪文强, 等. RAP 分级对热再生沥青混合料路用性能变异性的影响 [J]. 公路工程, 2021, 46 (1): 68-72, 111.
- [11] 伊庆刚, 琚花花, 张启志. 青川岩沥青与 SBR 复合改性热再生沥青混合料性能研究 [J]. 新型建筑材料, 2020, 47 (8): 32-36.
- [12] 雷勇, 汪海年, 尤占平, 等. 拌和次序对热再生沥青混合料压实特性的影响 [J]. 武汉大学学报 (工学版), 2019, 52 (4): 317-323, 330.
- [13] 杨林, 李文博. 热再生沥青混合料有效再生率的影响分析 [J]. 科学技术与工程, 2019, 19 (5): 291-296.