

微纳米砖混凝土垃圾改性沥青及其混合料路用性能研究

张琛¹, 许辉², 尚为公³, 韩森^{*1}

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064;

2. 甘肃省公路管理局, 甘肃 兰州 730000;

3. 陕西交通建设养护工程有限公司, 陕西 西安 710064)

摘要: 针对逐年提高的路面质量要求和大量的废旧沥青材料浪费的现象, 提出将建筑垃圾中的砖、混凝土类细料部分进行碾压、研磨并加工成微纳米级别, 并将其作为改性剂加入到基质沥青中, 达到改善沥青并减少沥青用量的作用. 采用针入度、延度、软化点、黏度和动态剪切流变等试验测试并验证改性沥青的高、低温性能; 采用车辙试验、低温弯曲蠕变试验、冻融劈裂试验以及浸水马歇尔试验分别验证改性沥青混合料的高、低温性能和水稳定性. 试验结果表明: 改性沥青中, 微纳米砖混凝土垃圾材料能够改善其高温性能, 且在10%掺配比时效果最佳; 混合料中, 微纳米砖混凝土垃圾材料能显著提高其高温稳定性和水稳定性, 其中动稳定度提高60.2%, 残留稳定度与劈裂强度比分别提高13.8%和24%. 由此可见, 微纳米砖混凝土垃圾能够有效提高沥青及其混合料的路用性能.

关键词: 道路工程; 改性沥青; 微纳米材料; 砖混凝土垃圾; 路用性能

中图分类号: U414

文献标识码: A

doi: 10.7511/dllgxb202001008

0 引言

随着材料加工技术的不断创新和进步, 具有精致工艺和独特功能的微纳米材料开始被各行各业所广泛接受与应用. 微纳米材料所表现出的高表面能和量子效应在材料研究中十分突出. 因此, 基于微纳米材料特有的表面效应和力学性能, 将微纳米材料作为添加剂或改性剂用于提高道路质量、改善沥青性能受到广泛关注. 近些年, 大量国内外研究人员投身到这一新兴领域并取得众多优异成绩, 其中惠小艳^[1]进行了源于纳米 $\text{TiO}_2/\text{g-C}_3\text{N}_4$ 复合材料改性沥青的研究, 得到了其能延缓沥青老化的结论. 王相彬^[2]进行了纳米碳酸钙、微米级粉煤灰和纳米蒙脱土改性沥青的研究, 发现其对沥青延缓老化、高低温稳定性和弹性恢复能力有显著提高. 孙杰^[3]将纳米 SiC 材料用于改性沥青, 得出了其对沥青延缓老化、水稳定性提高等更加优越的结果. 此外一些天然微纳米材料也得到新的开发应用, 张贤康^[4]通过对硅藻土材料改

性沥青进行研究, 得出混合料抗车辙能力、水稳定性都显著提高的结论. Liu 等^[5]通过进行动态剪切流变(DSR)试验、低温弯曲试验和三点弯曲试验对火山灰改性沥青进行研究, 发现火山灰改性沥青具有良好的流变特性, 可明显改善沥青混合料的抗车辙能力, 并且证明掺加火山灰能够提高混合料抵抗低温开裂的极限应力. Yao 等^[6]通过沥青旋转薄膜加热试验(RTFOT)和沥青加速老化(PAV)试验, 用聚合物改性纳米黏土对沥青的长、短期老化效果进行研究, 发现可以有效提高沥青的抗车辙、抗疲劳性能. 由此可见, 微纳米材料的独特功能对改善沥青性能有显著效果, 但是这些纳米材料的价格昂贵、加工困难, 很难实际应用到工程施工中.

与此同时, 我国公路大发展 30 余年来, 全国公路系统已日趋完善. 早期建设的公路大部分已接近使用寿命, 进入维修养护的时期, 还有部分路面为满足更高的道路使用要求, 而需要改造重建.

收稿日期: 2019-08-09; 修回日期: 2019-11-20.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51578076); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(300102219207).

作者简介: 张琛(1993-), 男, 硕士生, E-mail: 291950855@qq.com; 韩森*(1958-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, E-mail: hyram_hs@chd.edu.cn.

由此在道路修补和改造过程中产生了大量建筑垃圾,这部分材料往往再利用率低,既污染环境又浪费资源.国内外很多学者从事了建筑垃圾再利用的研究:谢朝阳^[7]将高掺量 RAP 材料应用于 SMC 再生沥青,得到环保、高效的路面效果;赵纪飞^[8]对建筑垃圾进行分类、加工,并试验证明了建筑垃圾可作为良好的路基填料以实现节约资源和垃圾再利用的效果.卢珊^[9]对砖混凝土垃圾实际应用提出了具体方向,采用砖混凝土垃圾修筑路缘石且进行了抗冻性检验;方涛等^[10]研究了混凝土和砖块垃圾作为骨料在轻交通量公路中的应用,通过进行 7 d 无侧限抗压强度试验、击实试验分析垃圾骨料的力学性能,得到建筑垃圾再生骨料最佳含水量为 9.8%~18.4%,最大干密度为 1.537~2.050 g/cm³ 的结论.水中和等^[11]利用扫描电镜对再生建筑垃圾集料进行微观结构观测并与天然集料进行对比研究,得出再生集料混凝土微观结构和性能的主要影响因素是再生集料表面状况的结论,并且证明使用表面孔隙率更低、强度更高的混凝土作为再生集料获得的新混凝土强度更高. Hu 等^[12]研究了利用空气筛分机筛除砖混凝土垃圾混合料中砖颗粒的技术,研究证明砖混凝土混合料中砖颗粒含量越多则再生骨料的强度越低,通过分析砖混凝土垃圾再生骨料运动轨迹得出操作参数,应用空气筛分机有效筛除砖颗粒含量,可使 RCA 产品纯度高达 95%. Li 等^[13]将不同种类的砖混凝土垃圾材料加工制备成特定粒径(0~45 μm 或 0~75 μm),通过一系列微观试验观测并和水泥性能对比分析其细度、WRR、LOI 和 SAI 等性能,发现在混凝土中采用砖混凝土建筑垃圾再生粉末代替水泥有很大可行性. Bassani 等^[14]研究了使用碱性溶液对建筑垃圾细粉进行活化,发现建筑垃圾粉末在碱性环境下强度显著提高,且无须进行热处理;通过扫描电镜观测,得到碱性溶液能有效稳定建筑垃圾粉末聚集体的结论.尽管有很多关于建筑垃圾再利用的探索,但在目前建筑垃圾的研究应用中,主体部分仍是破碎较轻、裂缝少的坚固粗料.由于建筑垃圾较新料细料部分更细,这部分破裂严重的细料利用率很低.

因此,本文将砖混凝土垃圾的细料部分,通过碾压、研磨并再加工成为微纳米级别颗粒,将其作为改性剂加入基质沥青中,通过进行沥青技术性能试验和动态剪切流变试验研究其对沥青性能的影响,并通过车辙试验、低温弯曲蠕变试验、冻融

劈裂试验以及浸水马歇尔试验进一步研究微纳米砖混凝土垃圾材料对沥青混合料性能的影响.

1 试验的原材料和改性工艺

1.1 试验的原材料

(1) 基质沥青

本试验采用 GS 90 号沥青,技术指标见表 1,针入度、软化点及延度的试验方法分别见 T 0604—2011、T 0606—2011、T 0605—2011.

表 1 基质沥青技术指标
Tab. 1 Matrix asphalt technical indicators

项目	针入度(25 ℃, 100 g, 5 s)/(0.1 mm)	软化点/℃	延度(15 ℃)/cm
实测值	81.7	45.6	107
技术指标	80~100	44~54	>100

(2) 微纳米砖混凝土垃圾材料

本试验采用长安大学新型路面研究所采用的砖混凝土垃圾再生细骨料(砖混凝土比 3 : 7,吸水率 8.1%,压碎值 29.2%).

将砖混凝土垃圾先经小型压路机碾压破碎为细骨料级别(0~5 mm),之后再由粉碎机初步粉碎为粉末状,最后经行星式球磨机研磨至微纳米级别.将研磨好的微纳米砖混凝土垃圾材料采用 ZETA 电位分析仪通过动态光散射法测量粒度,测得其平均粒径为 1 355 nm,即可得到试验所用微纳米砖混凝土垃圾原材料.

微纳米砖混凝土垃圾材料具体性能见表 2.

表 2 微纳米砖混凝土垃圾常规技术指标
Tab. 2 Conventional technical indicators of micro-nano bricks and concrete waste

项目	外观	干粉粒径	pH	表观密度/(g · cm ⁻³)	比表面积/(m ² · g ⁻¹)
技术指标	黄灰色粉末	99.9%小于 10 μm	7~8	2.61	2.86

(3) 集料

采用石灰岩,性能均满足规范要求,具体测试结果见表 3、4. 矿粉由石灰岩磨制,具体性能见表 5.

1.2 改性沥青制备工艺

本研究采用物理改性的方式,首先将 GS 90 号的基质沥青放入 160 ℃烘箱保持 1.5 h 左右,待沥青熔化将基质沥青放入加热套,165 ℃恒温保存.随后将研磨好的微纳米砖混凝土颗粒边用玻

表 3 试验用粗集料技术性能

Tab. 3 Technical properties of experimental coarse aggregates

项目	表观相对密度/ (g·cm ⁻³)	毛体积密度/ (g·cm ⁻³)	吸水率/%	压碎值/%	洛杉矶 磨损/%	针片状 含量/%	坚固性/%	软石含量/%
4.75 mm	2.93	2.840						
实测值 9.5 mm	3.12	3.066	0.651	18.7	16.9	11.5	9.4	1.7
13.2 mm	3.14	3.085						
规范值	≥2.6	≥2.6	≤2.0	≤26	≤28	≤18	≤12	≤3

注:表观相对密度、毛体积密度、吸水率采用 T 0304—2005 测试;压碎值、洛杉矶磨损、针片状含量、坚固性、软石含量分别采用 T 0316—2005、T 0317—2005、T 0312—2005、T 0314—2000、T 0320—2000 测试。

表 4 试验用细集料技术性能

Tab. 4 Technical properties of experimental fine aggregates

项目	表观相对密度/(g·cm ⁻³)	吸水率/%	水洗法<0.075 mm 颗粒含量/%	砂当量/%
实测值	2.844	1.315	0.43	72.3
技术指标	≥2.5	≤3.0	≤1.0	≥60

注:表观相对密度、吸水率、水洗法<0.075 mm 颗粒含量、砂当量分别采用 T 0328—2005、T 0330—2005、T 0333—2000、T 0334—2005 测试。

表 5 试验用矿粉技术性能

Tab. 5 Technical properties of experimental ore powder

项目	表观相对密度/(g·cm ⁻³)	亲水系数/%	塑性指数	颗粒范围/%			外观
				<0.6 mm	<0.15 mm	0.075 mm	
实测值	2.660	0.80	3.6	100	97.3	91.5	无团粒结块
技术指标	≥2.5	<1.0	<4	100	90~100	75~100	无团粒结块

璃棒搅拌边倒入基质沥青中,使其高温共熔,再用高速剪切仪持续高速剪切 40 min,剪切速度为 6 000 r/min,加热温度维持在 165 ℃,使得微纳米砖混凝土垃圾颗粒在沥青中均匀分布即可得到微纳米砖混凝土垃圾改性沥青^[15]。

微纳米级的砖混凝土垃圾材料具有高表面能且易发生团聚现象,采用高温条件可以降低基质沥青黏度,有利于微纳米砖混凝土垃圾颗粒分散,并且高速剪切仪可以起到强力搅拌作用,可促进微纳米砖混凝土垃圾材料分布均匀,能有效防止出现颗粒团聚现象。

2 试验过程及方案

2.1 改性沥青性能测试

2.1.1 改性沥青技术性能试验 本研究分别制备了微纳米砖混凝土垃圾材料掺配比例 5%、10%、12%和 15%的改性沥青。依照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011),将基质沥青和微纳米砖混凝土垃圾改性沥青进行针入度、延度和软化点等沥青技术性能的测试^[16]。

2.1.2 改性沥青布氏黏度试验 本文采用布氏黏度仪,即采用《沥青旋转黏度试验法(布洛克菲

尔德黏度计法)》(T 0625—2011)测定沥青结合料抵抗流动性程度的能力。测定黏度的主要目的是检查沥青在运输存储、搅拌与压实过程中的泵送能力。测试温度为 135 ℃,材料为微纳米砖混凝土垃圾掺配比例 5%、10%、12%和 15%的改性沥青^[16]。

2.1.3 改性沥青储存稳定性试验 本研究采用分层离析试验,按照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(T 0661—2011),测定基质沥青和微纳米砖混凝土垃圾材料比例 5%、10%、12%和 15%的改性沥青,在 163 ℃的恒温烘箱中持续 48 h 后冷藏 4 h,并切成等距 3 段的离析软化点^[16]。

2.1.4 改性沥青动态剪切流变试验 本研究使用动态剪切流变仪,按照美国 SHRP 规范进行试验。试验温度为 46~76 ℃,测试频率为 10 rad/s。通过测验砖混凝土垃圾微纳米材料掺配比例 5%、10%、12%和 15%时改性沥青的复数剪切模量 G^* 和相位角 δ ,并进一步分析比较其车辙因子 ($|G^*|/\sin \delta$)和流变特性。

2.2 改性沥青混合料路用性能测试。

本文混合料矿料级配选择 AC-13(中)型级配,经配合比设计确定最佳油石比为 4.7,具体级配数据见表 6。

表 6 混合料矿料级配
Tab. 6 Mixing ore material grading

筛孔尺寸/mm	筛孔通过率/%	筛孔尺寸/mm	筛孔通过率/%
13.2	95	0.6	16
9.5	76	0.3	11
4.75	46	0.15	9
2.36	32	0.075	6
1.18	20		

本文混合料制备过程中,混合料拌和温度为 175 ℃,马歇尔试件压实温度为 165 ℃,车辙试件成型前碾压轮预热 100 ℃.

2.2.1 车辙试验 沥青路面在高温情况下通常呈现为弹塑性体.若沥青路面高温稳定性不足,则在荷载作用下极易发生车辙变形和渠化,影响道路质量和交通安全.

本文采用《沥青混合料车辙试验》(T 0719—2011)来研究微纳米砖混凝土垃圾改性沥青混合料的高温稳定性.试验将微纳米砖混凝土垃圾材料掺配比例分别为 5%、10%、12%和 15%的改性沥青以及基质沥青制备成沥青混合料,分别制成长 300 mm、宽 300 mm、厚 50 mm 的车辙试件各 4 个,按照试验规程进行测试^[16].

2.2.2 弯曲蠕变试验 沥青路面在温差较大和温度骤降情况下容易出现裂缝甚至断裂,这种现象常见于我国寒冷地区.

本文采用《沥青混合料弯曲蠕变试验》(T 0728—2000)来检测沥青混合料的低温抗裂性能.试验采用的微纳米砖混凝土垃圾材料掺配比例分别为 5%、10%、12%和 15%的改性沥青以及基质沥青制备沥青混合料,分别制成长(250±2) mm、宽(30±2) mm、高(35±2) mm 的小梁试件各 3 个,按照试验规程进行测试^[16].

2.2.3 冻融劈裂试验和浸水马歇尔稳定度试验 水损害通常是在多雨地区或冻融循环交替时期导致的沥青路面破坏现象.水分侵入沥青路面后一方面会渗透进沥青结合料与矿料的接触面,导致沥青和矿料之间裹覆不严密;另一方面水分留存于路面结构中,当发生温度骤变时会出现冻胀,导致路面产生裂缝,影响路面服务质量^[17].

本文分别采用《沥青混合料冻融劈裂试验》(T 0729—2000)和《沥青混合料马歇尔稳定度试验》(T 0709—2011)表征微纳米砖混凝土垃圾材料改性沥青混合料抗水损害能力;冻融劈裂试验中,采用最佳掺量的改性沥青与基质沥青制成混

合料,分别制备标准马歇尔试件各 8 个,并分成两组;浸水马歇尔稳定度试验中,采用最佳掺量的改性沥青与基质沥青制成混合料,分别制备马歇尔试件 6 个,同样分组并按试验规程进行试验^[16].

3 试验结果与分析

3.1 沥青性能试验结果

3.1.1 改性沥青技术性能试验结果 图 1 为微纳米砖混凝土垃圾改性沥青的针入度、软化点和延度试验结果.

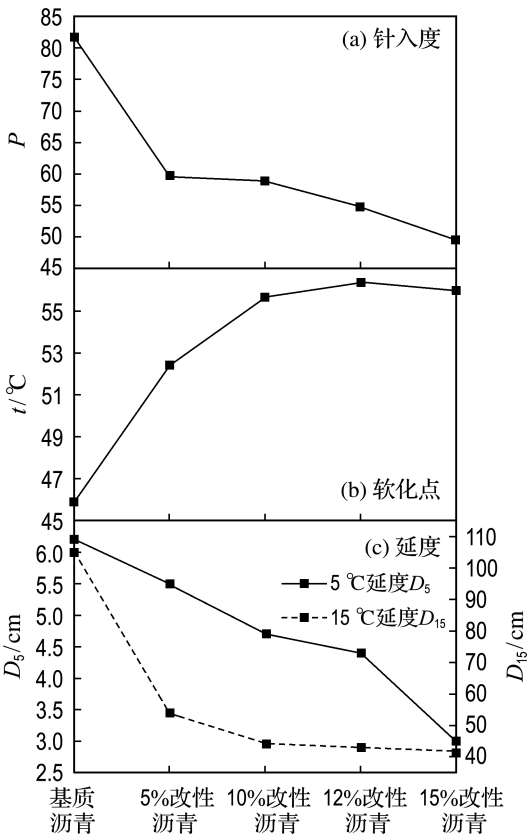


图 1 改性沥青技术性能测试结果折线图
Fig. 1 Line chart of modified asphalt technical performance test results

根据图 1(a)分析可得,在砖混凝土垃圾微纳米颗粒掺量的增加过程中,改性沥青的针入度随之持续降低,其中由基质沥青到 5%掺量过程中针入度降低 24.7%,降幅最大;而当微纳米砖混凝土垃圾材料掺量为 12%~15%时,针入度降幅变化趋于平缓.该试验结果表明,微纳米砖混凝土垃圾材料掺量增加对沥青的高温稳定性有提高作用,原因是砖混凝土垃圾微纳米颗粒的小尺寸效应,砖混凝土垃圾微纳米颗粒吸附了基质沥青中

的轻质油分,改变了沥青的组分比例,使沥青变硬且稠度变大,表明微纳米砖混凝土垃圾材料一定程度上可增强沥青的黏滞性^[2].

根据图 1(b)分析可得,掺量较低时,随着试件中微纳米砖混凝土垃圾材料增加,改性沥青的软化点随之迅速提高,且在掺量为 12%时达到最大值.随着掺量增大,软化点曲线斜率逐渐减小.掺量超过 12%之后软化点曲线变化趋于平缓.这表明掺量增加可以明显提高沥青的高温性能,这是由于砖混凝土垃圾微纳米颗粒极大的表面积,极易吸收沥青中的轻质组分,并且与沥青充分混熔形成密实的结构,使得沥青分子链结构在高温情况下运动受阻^[2],即提高了其高温稳定性.

根据图 1(c)分析可得,随着微纳米砖混凝土垃圾材料掺配比例的增加,改性沥青的 5℃和 15℃延度整体均呈降低趋势.其中 5℃延度,掺配比例范围为 12%~15%时,降低速率最大,为 32.2%;而 15℃延度,由基质沥青到 5%掺量降低速率最大.这表明,微纳米砖混凝土垃圾材料掺量过大时会对沥青改性产生不良效果,这是由于砖混凝土垃圾微纳米颗粒掺量过大,破坏了沥青的胶结体系,降低了其内部结构的连续性,导致其延展性降低,使其在低温条件下受到拉伸时易产生断裂,由此可见沥青改性过程中,微纳米砖混凝土垃圾材料掺量不宜过高.

综合以上微纳米砖混凝土垃圾改性沥青的技术性能试验结果,为保证改性沥青的各项性能均达到较好效果,初选砖混凝土垃圾微纳米颗粒的最佳掺配比例为 10%.在此掺量下改性沥青的高温性能明显提高,且改性沥青低温性能降低幅度较小.

3.1.2 改性沥青布氏黏度试验结果 图 2 为微纳米砖混凝土垃圾改性沥青的 135℃黏度试验结果.

根据图 2 可分析得出,随着微纳米砖混凝土垃圾材料掺配比例的增加,改性沥青的 135℃黏度随之增大,并于掺量 10%之前呈现线性增长趋势,在 10%~15%掺量间增长幅度变缓,且均小于 3 Pa·s,符合 SHRP 沥青结合料性能规范中提出的技术要求,不影响改性沥青的施工性能^[16].这说明,微纳米砖混凝土垃圾材料的加入使沥青与微纳米颗粒充分结合,且随着掺量增加形成的混熔结构更加密实,有利于提高沥青的高温稳定性,可使沥青在高温情况下具有更好的抵抗变形能力.

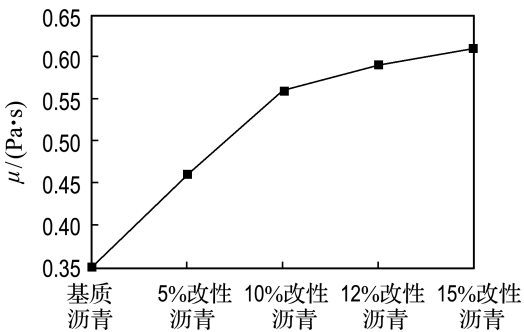


图 2 改性沥青 135℃黏度结果折线图

Fig. 2 Line chart of 135℃ viscosity results of modified asphalt

3.1.3 改性沥青离析试验结果 表 7 为基质沥青和各掺量下微纳米砖混凝土垃圾改性沥青的分层离析试验数据.

表 7 改性沥青分层离析试验

Tab. 7 Layered segregation experiment of modified asphalt

微纳米砖混凝土材料掺量	上部软化点/℃	下部软化点/℃	软化点差值/℃
基质沥青	46.5	46.6	0.1
5%改性沥青	53.6	54.4	0.8
10%改性沥青	57.8	59.5	1.7
12%改性沥青	57.5	59.8	2.3
15%改性沥青	58.0	60.6	2.6

由表 7 能够看出,在基质沥青中持续加入微纳米砖混凝土垃圾材料后,沥青的软化点随之升高,且上下部软化点差值也持续增大,微纳米砖混凝土垃圾材料改性沥青的分层离析也更明显,由基质沥青的 0.1℃增长到 15%掺量下的 2.6℃,因为软化点差值小于 2.5℃才能确保改性沥青储存性良好,所以可得出掺量 15%时改性沥青储存稳定性较差.试验结果说明,砖混凝土垃圾微纳米颗粒掺量不宜过大,否则会使颗粒发生明显团聚现象,而与沥青相互作用变弱,导致改性沥青相容性变差、离析程度增加.

3.1.4 改性沥青 DSR 试验结果 图 3 为微纳米砖混凝土垃圾改性沥青复数剪切模量 G^* 和相位角 δ 随温度变化的试验结果.图 4 为微纳米砖混凝土垃圾改性沥青车辙因子($|G^*|/\sin \delta$)试验结果.

根据图 3 分析可得,随着 DSR 试验扫描温度的提高, G^* 均呈现先快速降低后平缓降低趋势,表明沥青重复剪切变形时所受的总阻力不断减

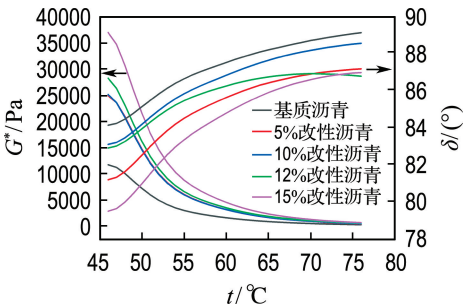


图 3 改性沥青复数剪切模量-相位角折线图
Fig. 3 Line chart of modified asphalt complex shear modulus-phase angle

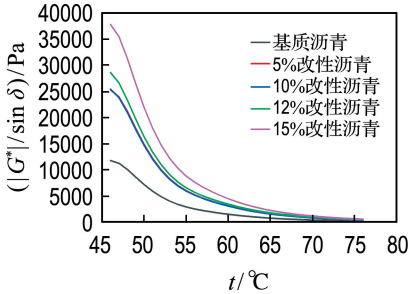


图 4 改性沥青车辙因子 $|G^*|/\sin \delta$ 折线图
Fig. 4 Line chart of modified asphalt rutting factor $|G^*|/\sin \delta$

小; δ 持续增大, 表明随着温度增加沥青受热损失一部分弹性成分, 而黏性成分比例增加. 在同一温度下, 基本所有掺加微纳米砖混凝土垃圾材料的改性沥青 G^* 均比基质沥青的大, 其 δ 均比基质沥青的小; 且在同一温度下, 微纳米砖混凝土垃圾材料掺量越高, 其 G^* 越大、 δ 越小. 改性沥青的 G^* 反映其抵抗流动变形的能力, 而 δ 表征其弹性性能. 由此可见, 随着微纳米砖混凝土垃圾颗粒的掺入, 沥青的高温稳定性提升、弹性增大, 这主要是由于微纳米砖混凝土垃圾颗粒在沥青中均匀分散后, 形成稳定的骨架结构, 阻碍了沥青的流动, 提高了改性沥青变形所需的能量, 尤其是温度较高时微纳米砖混凝土颗粒对抗剪效果作用显著, 从而提高沥青的抗变形能力^[18].

根据图 4 分析可得, 随着 DSR 试验扫描温度的提高, 各掺量微纳米砖混凝土垃圾改性沥青的车辙因子 $|G^*|/\sin \delta$ 呈下降趋势, 且在 65~76 °C 下降幅度趋于平缓, 最后基本重合于 400 Pa 左右. 这表明, 沥青的抗剪性能降低、黏性成分比例增加, 使沥青高温性能都具有随着温度升高而衰减的规律; 但在相同温度下, 掺加微纳米砖混凝土垃圾材料的改性沥青 $|G^*|/\sin \delta$ 都大于基质

沥青, 这表明掺加微纳米砖混凝土颗粒后能够有效改善其衰减效果; 基质沥青和改性沥青在 $|G^*|/\sin \delta$ 小于 1 000 Pa 时的温度称为失效温度, 由图可见基质沥青的失效温度约为 64 °C, 而改性沥青可提高至 72 °C. 试验结果证明: 随着温度升高, 基质沥青与改性沥青的抗车辙能力均降低, 但掺加微纳米砖混凝土垃圾材料后, 在相同温度下改性沥青较基质沥青有更好的抗车辙性能, 且微纳米砖混凝土垃圾颗粒掺量越高越明显. 由此可见, 微纳米砖混凝土垃圾材料能有效增强沥青的高温稳定性和抗变形能力^[18].

3.2 沥青混合料的高温稳定性

图 5 为微纳米砖混凝土垃圾改性沥青混合料车辙试验测试结果.

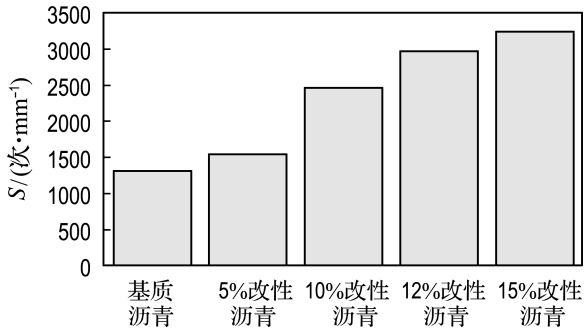


图 5 改性沥青混合料车辙试验结果
Fig. 5 Results of modified asphalt mixture rutting test

由图 5 分析可得, 提高微纳米砖混凝土垃圾颗粒掺量, 混合料的动稳定度 S 也随之持续增大. 相比基质沥青混合料的动稳定度, 各掺配比例的微纳米砖混凝土垃圾改性沥青动稳定度均明显提高. 其中掺量 5% 到 10% 过程中涨幅最大, 达 60.2%. 试验结果表明, 微纳米砖混凝土垃圾材料掺量增加对沥青混合料的高温稳定性有持续提高的作用, 这是由于微纳米砖混凝土垃圾材料的细度低, 可以充分填充到集料骨架的空隙中, 以达到混合料整体更密实、强度更高的效果. 再由于纳米颗粒比表面积很大, 能有效吸附沥青, 导致混合料中游离的沥青减少, 阻碍了集料之间的滑动, 使沥青混合料整体性更好, 不易出现车辙^[19].

3.3 沥青混合料的低温抗裂性

图 6 为微纳米砖混凝土垃圾改性沥青混合料低温弯曲蠕变试验结果.

分析图 6(a) 可得, 各掺配比例下改性沥青混合料相比于基质沥青混合料弯拉应力均提高, 且

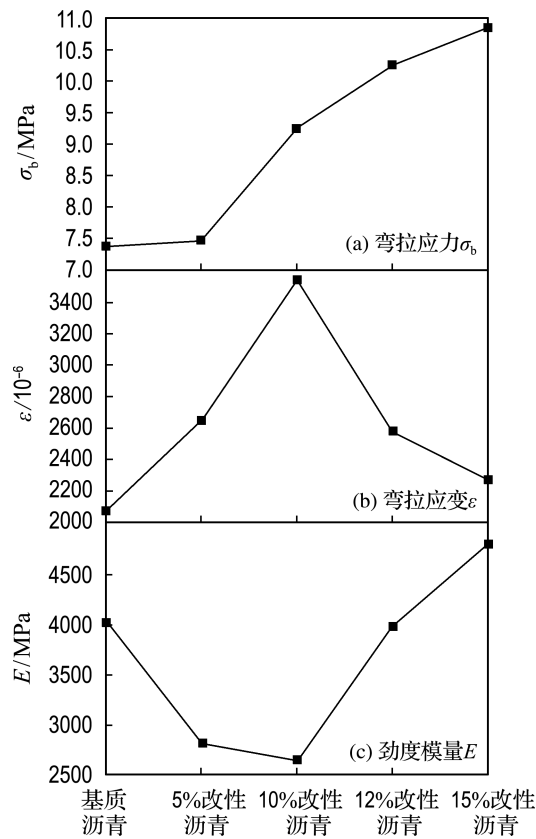


图 6 改性沥青混合料弯拉应力、应变及劲度模量折线图

Fig. 6 Line charts of modified asphalt mixture bending tensile stress, bending strain and stiffness modulus

随着掺配比例增加呈现持续增长的趋势,其中掺量 5%到 10%过程中弯拉应力增长幅度最大.这表明微纳米砖混凝土垃圾材料可明显增强沥青混合料的抗弯拉强度.原因其一是砖混凝土垃圾纳米颗粒填充了混合料骨架空隙,使得结构整体更加密实;其二是微纳米砖混凝土垃圾材料提高了混合料的最佳沥青用量.

分析图 6(b)和图 6(c)可得,随着微纳米砖混凝土垃圾材料掺量的增加混合料的弯拉应变和劲度模量并没有一直向有利方向变化:其中弯拉应变先增大后减小,在掺量 10%左右出现峰值,而相应的劲度模量先减小后增大,在掺量 10%时最低.这表明微纳米砖混凝土垃圾材料虽然可以增强沥青混合料的低温抗裂性,但掺量不宜过大.原因是掺量太大时,颗粒分布不均,会产生团聚现象,反而干扰了沥青与集料的黏结,导致混合料塑性降低^[4].

因此,综合考虑微纳米砖混凝土垃圾改性沥青及其混合料的试验结果,选取微纳米砖混凝土

垃圾改性沥青最佳掺配比为 10%.

3.4 沥青混合料的水稳定性

3.4.1 浸水马歇尔试验 表 8 为部分马歇尔混合料试件的体积指标,表 9 为基质沥青混合料和最佳掺量 10%时微纳米砖混凝土垃圾改性沥青混合料的浸水马歇尔试验检测数据.

表 8 部分混合料体积指标

Tab. 8 Part mixture volume index

混合料类型	序号	VV/%	VMA/%	VFA/%
基质沥青	1	7.2	16.9	57.3
	2	6.5	16.2	60.0
	3	7.1	16.7	57.8
改性沥青	4	6.4	16.1	60.5
	5	6.3	16.0	60.8
	6	6.8	16.5	58.8

表 9 混合料浸水马歇尔试验结果

Tab. 9 Results of water-immersed Marshall experiment

混合料类型	浸水 0.5 h 后 稳定度/kN	浸水 48 h 后 稳定度/kN	残留稳定 度/%
基质沥青	11.545	9.547	82.69
改性沥青	12.330	11.900	96.51

根据表 9 数据可以分析出,无论浸水时间长短,微纳米砖混凝土垃圾改性沥青混合料的稳定度均高于基质沥青混合料.但残留稳定度方面,微纳米砖混凝土垃圾改性沥青混合料相对于基质沥青混合料明显提高,提高幅度达 13.8%.这表明微纳米砖混凝土垃圾材料能够显著降低混合料浸水造成的强度衰减,提升沥青混合料抵抗水损害的能力.

3.4.2 冻融劈裂试验 表 10 为基质沥青混合料和最佳掺量 10%时微纳米砖混凝土垃圾改性沥青混合料冻融劈裂试验检测数据.

表 10 混合料冻融劈裂试验结果

Tab. 10 Results of freeze-thaw split test of mixtures

混合料类型	未冻融劈裂 强度/MPa	冻融后劈裂 强度/MPa	劈裂 强度比/%
基质沥青	0.806	0.570	70.72
改性沥青	0.669	0.634	94.76

根据表 10 数据分析可得,与浸水马歇尔试验结论一致,微纳米砖混凝土垃圾改性沥青混合料的冻融劈裂强度比相较于基质沥青混合料的劈裂强度比有明显增大,涨幅达 24%.可见参加砖混凝土垃圾微纳米颗粒后沥青混合料经过冻融处理

强度损失很小. 试验表明微纳米砖混凝土垃圾材料可显著提高沥青混合料的水稳定性. 这是由于砖混凝土垃圾微纳米颗粒极大的表面积可以更有效和沥青结合, 减少游离的沥青成分, 使得集料表面裹覆更多的沥青, 有助于加大沥青与矿料间相互黏结, 增强整体混合料抵抗水损害的能力^[19].

4 结 论

(1) 改性沥青的针入度、软化点、135℃黏度、DSR 试验以及改性沥青混合料的车辙试验结果表明, 微纳米砖混凝土垃圾材料对沥青及其混合料的高温稳定性有明显增强, 使混合料更加密实、整体性更强, 可有效减少道路车辙破坏现象发生.

(2) 综合改性沥青延度试验和其混合料的弯曲蠕变试验结果可得, 微纳米砖混凝土垃圾材料掺量并不是越大越好, 掺量过大会导致沥青低温性能下降. 综合数据可得, 微纳米砖混凝土垃圾改性沥青最佳掺量为 10%. 在此比例时, 不仅改性沥青的低温性能降低较少, 而且其混合料的抗裂性得到改善.

(3) 冻融劈裂试验和浸水马歇尔稳定度试验表明, 微纳米砖混凝土垃圾材料能够明显增强沥青混合料抵抗水损害的能力, 使得沥青与集料黏结更紧密, 混合料强度不易衰减, 显著增强混合料的水稳定性.

(4) 微纳米砖混凝土垃圾材料对沥青和沥青混合料性能均有良好改善效果, 既可以做到再生利用、节约资源, 又可提高其路用性能.

参 考 文 献:

- [1] 惠小艳. 微/纳米材料改性沥青的制备及其性能研究 [D]. 西安: 长安大学, 2018.
HUI Xiaoyan. Preparation and properties of micro/nanomaterials modified asphalt [D]. Xi'an: Chang'an University, 2018. (in Chinese)
- [2] 王相彬. 微纳米粒子改性沥青的制备与性能研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
WANG Xiangbin. Preparation and properties of micro-nano particle modified asphalt [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015. (in Chinese)
- [3] 孙 杰. SiC 纳米改性沥青及其混合料性能试验研究 [D]. 长沙: 长沙理工大学, 2017.
SUN Jie. Experimental study on properties of SiC nano-modified asphalt and its mixtures [D]. Changsha: Changsha University of Science and Technology, 2017. (in Chinese)
- [4] 张贤康. 硅藻土材料对沥青混合料性能的影响 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2008.
ZHANG Xiankang. Effect of diatomite on performance of asphalt mixtures [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2008. (in Chinese)
- [5] LIU Xu, LIU Wanqiu, WANG Shuyin, *et al.* Performance evaluation of asphalt mixture with nanosized volcanic ash filler [J]. **Journal of Transportation Engineering, Part B-Pavements**, 2018, **144**(3): 04018028.
- [6] YAO Hui, YOU Zhanping, LI Liang, *et al.* Performance of asphalt binder blended with non-modified and polymer-modified nanoclay [J]. **Construction and Building Materials**, 2012, **35**: 159-170.
- [7] 谢朝阳. 高 RAP 掺量 SMC 常温再生沥青混合料性能研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2018.
XIE Chaoyang. Research on properties of recycled asphalt mixture with high RAP content and SMC at room temperature [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018. (in Chinese)
- [8] 赵纪飞. 建筑垃圾再生材料作为路基填料的适用性研究 [D]. 西安: 长安大学, 2017.
ZHAO Jifei. The applicability of the construction waste recycled materials as subgrade filling [D]. Xi'an: Chang'an University, 2017. (in Chinese)
- [9] 卢 珊. 建筑垃圾再生骨料混凝土路缘石的抗冻性研究 [D]. 淮南: 安徽理工大学, 2018.
LU Shan. Study on frost resistant of construction waste recycled aggregate concrete curbs [D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2018. (in Chinese)
- [10] 方 涛, 文 华, 刘 颖, 等. 水泥稳定建筑垃圾骨料配合比研究 [J]. **混凝土与水泥制品**, 2018(8): 89-92.
FANG Tao, WEN Hua, LIU Ying, *et al.* Study on mixture ratio of cement stabilized construction waste aggregate [J]. **China Concrete and Cement Products**, 2018(8): 89-92. (in Chinese)
- [11] 水中和, 潘智生, 朱文琪, 等. 再生集料混凝土的微观结构特征 [J]. **武汉理工大学学报**, 2003(12): 99-102.
SHUI Zhonghe, PAN Zhisheng, ZHU Wenqi, *et al.* Microscopic structural features of the recycled aggregate concrete [J]. **Journal of Wuhan University of Technology**, 2003(12): 99-102. (in Chinese)
- [12] HU Kui, CHEN Yujing, NAZ F, *et al.* Separation studies of concrete and brick from construction and demolition waste [J]. **Waste Management**, 2019, **85**: 396-404.
- [13] LI Shujun, LI Qiuyi, ZHAO Xiaolong, *et al.*

Experimental study on the preparation of recycled admixtures by using construction and demolition waste [J]. *Materials*, 2019, **12**(10): 1678.

[14] BASSANI M, TEFA L, COPPOLA B, *et al.* Alkali-activation of aggregate fines from construction and demolition waste: Valorisation in view of road pavement subbase applications [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, **234**: 71-84.

[15] 王玉峰. 纳米改性沥青及其性能的研究 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2017.

WANG Yufeng. Study on nano modified asphalt and its properties [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2017. (in Chinese)

[16] 中华人民共和国交通运输部. 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, 2001.

Ministry of Transport of the People's Republic of China. Standard Test Methods of Bitumen and Bituminous Mixtures for Highway Engineering; JTG E20-2011 [S]. Beijing: China Communications Press, 2001. (in Chinese)

[17] 陈乔旭. 火山灰、橡胶粉、SBS 复合改性沥青制备及路用性能 [D]. 长春: 吉林大学, 2018.

CHEN Qiaoxu. Preparation and pavement performance of volcanic ash, rubber powder and SBS composite modified asphalt [D]. Changchun: Jilin University, 2018. (in Chinese)

[18] 刘 超. 纳米蒙脱土(OMMT)/SBS 改性沥青流变特性研究 [D]. 大连: 大连海事大学, 2016.

LIU Chao. Study on rheological properties of OMMT/SBS modified asphalt [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2016. (in Chinese)

[19] 姚 辉. 微纳米材料改性沥青结合料与混合料性能研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2012.

YAO Hui. Performance research of micro- and nano-modified asphalt binders and mixtures [D]. Changsha: Central South University, 2012. (in Chinese)

Study of road performance of micro-nano brick and concrete waste modified asphalt and its mixture

ZHANG Chen¹, XU Hui², SHANG Weigong³, HAN Sen^{* 1}

(1. Highway School, Chang'an University, Xi'an 710064, China;
2. Gansu Provincial Highway Administration, Lanzhou 730000, China;
3. Shaanxi Traffic Construction Maintenance Engineering Co., Ltd., Xi'an 710064, China)

Abstract: In order to improve the pavement quality requirements and reduce the waste of waste asphalt materials year by year, the fine parts of bricks and concrete in construction waste are crushed, grinded and processed into micro-nano scale, and as a modifier added to the matrix asphalt. Utilizing the special functions of nanomaterials, asphalt performance is improved and the amount of asphalt is reduced. The penetration, ductility, softening point, viscosity and dynamic shear rheological (DSR) test are used to test and verify the high and low temperature properties of modified asphalt. The rutting test, low temperature bending creep test, freeze-thaw splitting test and water-immersed Marshall test are used to verify the high and low temperature performance and water stability of the modified asphalt mixture. The experimental results show that the micro-nano bricks and concrete waste materials in the modified asphalt mixture can effectively improve its high temperature performance and have the best effect at 10% blending ratio. In the mixture, the micro-nano bricks and concrete waste materials can significantly improve its high temperature stability and water stability, and the dynamic stability is improved by 60.2%, and the residual stability and splitting strength ratio are increased by 13.8% and 24%, respectively. It can be seen that micro-nano bricks and concrete waste can effectively improve the road performance of asphalt and its mixture.

Key words: road engineering; modified asphalt; micro-nano material; brick and concrete waste; road performance