

高温下橡胶沥青胶浆特性及矿料级配优化分析

凌天清, 肖川, 夏玮, 武立超

(重庆交通大学土木建筑学院, 重庆 400074)

摘要:为改善橡胶沥青混合料的高温性能,提出以橡胶沥青胶浆和矿料级配为主要研究对象的优化思路。通过室内试验,首先研究粉胶比对橡胶沥青胶浆抗车辙因子和相位角的影响;然后结合橡胶沥青的特异性,对其橡胶沥青混合料的矿料级配进行选择 and 调整,将动稳定性和相对变形作为混合料高温性能评价指标,得出优化后的矿料级配。研究表明,提高橡胶沥青混合料高温稳定性的措施有:适当调整粉胶比,控制在1.2左右为宜;以水泥取代矿粉作为混合料的填料;以传统SMA级配为基础,对混合料级配作出调整,适当降低填料比例,能够实现橡胶沥青混合料高温稳定性的优化。

关键词:道路工程;橡胶沥青;沥青胶浆;粉胶比;矿料级配;高温性能

中图分类号:U416.217 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2010)05-0047-05

Characteristics of Asphalt-Rubber Mortar and Aggregate Gradation Optimization Based on High Temperature Condition

LING Tian-qing, XIAO Chuan, XIA Wei, WU Li-chao

(School of Civil Engineering and Architecture, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, P. R. China)

Abstract: To improve the performance of asphalt-rubber mixture under high temperature, an optimal proposal was put forward which selected asphalt-rubber mortar and aggregate gradation as the main objects. According to experimental tests, the anti-rutting factors and phase angles of asphalt mortar was studied with different ratios of filler bitumen. And then, with the characteristics of asphalt-rubber, the optimal gradation was presented by means of the adjustment of aggregate gradation which chose dynamic stability and relative deformation as value indexes. The results shew that asphalt-rubber mixtures would show an optimal high temperature performance if the following measures can be taken: (1) making an adjustment of ratio of filler bitumen to about 1.2; (2) replacing mineral powder with cement; (3) making an adjustment of aggregate gradation and lower the proportion of mineral powder based on SMA.

Key words: road engineering; asphalt-rubber; asphalt mortar; ratio of filler bitumen; aggregate gradation; high temperature properties

近年来,橡胶沥青材料以其优异的路用性能和显著的环保意义而受到社会各界的广泛关注^[1-4]。室内试验研究结果表明,各种目数及掺量的胶粉均能不同程度地提高沥青的高温性能指标,从胶结材料的角度来看,橡胶沥青具备很好的高温性能指标。

但是,将橡胶沥青材料应用到筑路工程中发现:由于橡胶沥青与矿料在嵌挤过程中相互干扰,加之橡胶沥青混合料的劲度模量较低,变形量大,在车辆反复作用下橡胶沥青路面车辙明显^[5-6];在生产施工过程中,胶粉颗粒会继续发育、溶胀,橡胶沥青处于一种

收稿日期:2009-12-14

基金项目:交通运输部西部交通建设科技项目(200931881478)

作者简介:凌天清(1962-),男,教授、博士生导师,主要从事路基路面工程研究,(E-mail)lingtq@163.com。

不稳定状态,难以有效保障其混合料的高温稳定性^[7-8]。此外,各国对于橡胶沥青的应用体系并不统一^[2-3],在橡胶沥青混合料的矿料级配,以及沥青用量与矿粉添加量等方面差别较大,给橡胶沥青混合料的高温性能带来很大的变异性。橡胶沥青路面的高温性能成为阻碍橡胶沥青推广应用的一个难题。

该文综合考虑橡胶沥青及混合料的材料特性,选择橡胶沥青胶浆以及矿料级配作为研究对象,分析橡胶沥青胶浆的粉胶比变化以及矿料的不同级配类型对橡胶沥青混合料高温路用性能的影响规律,以使橡胶沥青混合料具备稳定、优异的高温性能。

1 橡胶沥青胶浆性能

对橡胶沥青胶浆性能的研究,就是将沥青与矿料中的填料均匀混合形成的胶结料作为影响沥青混合料性能重要的一相,通过粉胶比,即 0.075 mm 以下部分矿粉质量与沥青质量比不断变换,以动态剪切流变试验(DSR 试验),分析各评价指标在高温下的变化规律,确定橡胶沥青与填料的合理比例。

1.1 橡胶沥青胶浆的制备

1.1.1 材料性质和组成 综合道路等级、原材料价格、施工难易程度等因素,结合橡胶沥青室内对比试验,确定以 SK70# 沥青为母体基质沥青,内掺 20% 的 30 目橡胶粉,制得橡胶沥青。其性能指标如表 1 所示。

沥青胶浆中的填料分别选用重庆拉法基水泥有限公司生产的 P.O32.5R 普通硅酸盐水泥和重庆当地的石灰石矿粉,2 种填料均满足橡胶沥青混合料用矿粉质量要求^[8]。

表 1 橡胶沥青指标检测结果

| 检验项目 | 检测结果 | 技术要求 ^[8] | 试验方法 |
|-----------------------------|------|---------------------|-------|
| 180℃粘度/(Pa·s) | 2.8 | 2.5~5.0 | T0625 |
| 软化点(R&B)/℃ | 67.6 | >65 | T0606 |
| 针入度(25℃,100 g,5 s)/(0.1 mm) | 50.4 | 30~70 | T0604 |
| 弹性恢复(25℃)/% | 78 | ≥60 | T0662 |

1.1.2 橡胶沥青胶浆的制备方法 橡胶沥青胶浆制备的关键在于保证填料与橡胶沥青的充分融合,结合橡胶沥青自身材料特性,拟定制备方法:先按文献^[8]规定的方法制备橡胶沥青;然后将在烘箱中已烘至 110℃ 的填料按不同粉胶比加入橡胶沥青中,在 180℃ 下均匀搅拌 30 min 后,立刻浇注样品于试模中,进行后续相关性能测试。为使沥青胶浆均匀混合,保证混合质量,每次制得的橡胶沥青胶浆样品需大于 200 mL。

1.2 橡胶沥青胶浆动态剪切流变试验

橡胶沥青和填料(水泥或矿粉)的粉胶比从 0 开始,以 0.4 为步长,取 0、0.4、0.8、1.2、1.6 共 5 个不同的变化值,配制不同的橡胶沥青胶浆,进行动态剪切流变试验分析,优化粉胶比取值范围,提高胶浆的高温稳定性。

DSR 试验采用美国 BOHLIN 公司生产的动态剪切流变仪进行。试样直径为 25 mm,厚度为 1 mm,震荡速度为 10 rad/s,大约 1.59 Hz,试验方法为 AASHTO 标准 T 315-04,选择抗车辙因子 $G^*/\sin\delta$ 和相位角 δ 作为橡胶沥青胶浆的性能评价指标,试验结果见表 2。

表 2 橡胶沥青胶浆动态剪切流变试验结果

| 项目 | | 64℃ | | 70℃ | | 76℃ | |
|----------|---------|------------------|------------------------------|------------------|------------------------------|------------------|------------------------------|
| | | $\delta/(\circ)$ | $(G^*/\sin\delta)/\text{Pa}$ | $\delta/(\circ)$ | $(G^*/\sin\delta)/\text{Pa}$ | $\delta/(\circ)$ | $(G^*/\sin\delta)/\text{Pa}$ |
| 基质沥青 | 粉胶比 0 | 86.2 | 1 528.5 | 88.0 | 590.9 | — | — |
| 纯橡胶沥青 | 粉胶比 0 | 67.6 | 5 503.5 | 69.7 | 3 262.1 | 72.8 | 2 021.2 |
| 水泥橡胶沥青胶浆 | 粉胶比 0.4 | 68.1 | 6 935.0 | 70.7 | 4 413.3 | 72.6 | 2 808.2 |
| | 粉胶比 0.8 | 67.3 | 8 110.6 | 71.5 | 5 524.9 | 73.1 | 3 354.3 |
| | 粉胶比 1.2 | 67.9 | 9 323.5 | 71.4 | 6 219.8 | 73.6 | 3 869.7 |
| | 粉胶比 1.6 | 68.5 | 9 605.1 | 70.9 | 6 473.4 | 73.2 | 4 098.7 |
| 矿粉橡胶沥青胶浆 | 粉胶比 0.4 | 68.3 | 6 327.0 | 70.7 | 3 892.1 | 73.3 | 2 343.9 |
| | 粉胶比 0.8 | 68.4 | 7 464.2 | 71.2 | 4 803.0 | 72.7 | 2 800.1 |
| | 粉胶比 1.2 | 67.7 | 8 499.7 | 70.8 | 5 610.9 | 72.2 | 3 345.3 |
| | 粉胶比 1.6 | 68.1 | 8 803.3 | 70.6 | 5 861.2 | 72.9 | 3 661.8 |

抗车辙因子 $G^*/\sin\delta$ 越高,表明材料高温时的

流动变形越小,抗车辙能力越强,采用它作为反映沥

青材料的永久变形性能的指标。橡胶沥青胶浆抗车辙因子的变化见图1。

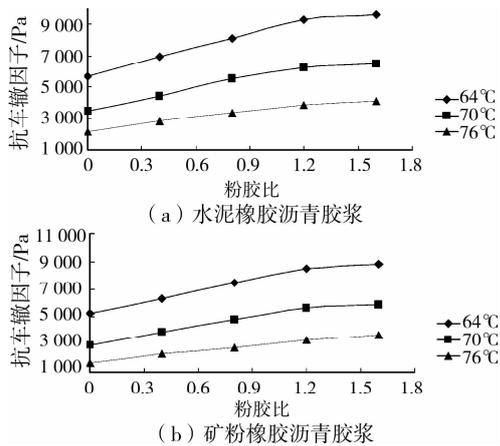


图1 橡胶沥青胶浆抗车辙因子的变化

通过表2和图1,可以看出:

1)橡胶沥青相比基质沥青而言,高温性能得到明显改善。同时,在以水泥和石灰岩矿粉为填料的橡胶沥青胶浆动态剪切流变试验中,不同种类橡胶沥青胶浆的抗车辙因子不同,但其变化曲线相似,说明不同种类填料制得的橡胶沥青胶浆虽然高温稳定性有差异,但是其随粉胶比变化的规律是一致的。

2)随着粉胶比的提高,抗车辙因子 $G^*/\sin\delta$ 显著提高。其原因可能是橡胶沥青与填料充分混合的过程中,在填料表面形成一层扩散结构膜,提高了沥青胶浆中结构沥青的比例,提高其粘结力和稳定性,从而显著改善了橡胶沥青胶浆的高温性能。

3)在相同粉胶比情况下,随温度不断提高,橡胶沥青胶浆的抗车辙因子迅速下降,说明橡胶沥青沥青胶浆作为一种以填料为分散相,均匀分散在高稠度橡胶沥青沥青介质中的材料,具备明显的感温性能,高温劲度随温度升高而下降。同时,温度越高,沥青胶浆高温稳定性随粉胶比提高的幅度越小。

4)在相同温度下,橡胶沥青胶浆的抗车辙因子提高幅度,随粉胶比的提高逐渐降低。当粉胶比超过1.2后,橡胶沥青胶浆的高温性能处于较高水平,其高温性能的提升趋势逐渐趋于平缓。这是由于粉胶比过大,导致矿粉用量过多,难以均匀分散,加之沥青用量不足,无法充分裹覆填料,影响了胶结料高温稳定性的提高。

5)水泥+橡胶沥青所得胶浆的抗车辙因子在各种温度下均高于矿粉+橡胶沥青制得的胶浆。可以看出,水泥作为高活性材料,具备更强的吸附力和稳定性,因此对橡胶沥青胶浆高温性能的改善作用强于矿粉。

相位角 δ 是反映沥青胶浆粘性成分和弹性成分相对值的一个指标。 δ 越大,表明材料的粘性成分越多,抗车辙能力越弱。橡胶沥青胶浆相位角的变化见图2。

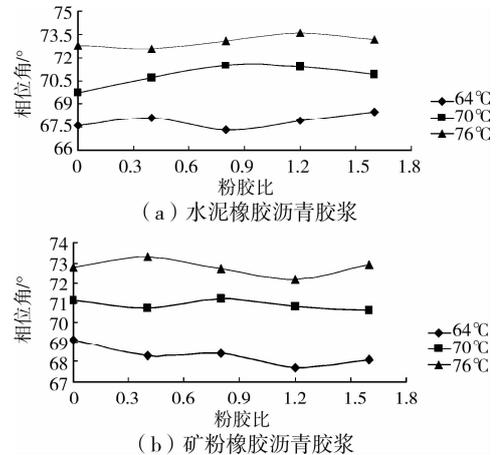


图2 橡胶沥青胶浆相位角的变化

通过表2和图2,可以看出:

1)母体基质沥青加入橡胶粉制得的橡胶沥青的相位角 δ 明显减小,表明橡胶沥青的弹性成分明显提高,弹性性能很好。以橡胶沥青作为混合料的胶结材料,使得沥青混凝土在较高的使用温度下,具有较大的弹性阶段的工作能力,从而减少剩余变形积累,减缓车辙的产生和发展。

2)不同粉胶比的沥青胶浆通过动态剪切流变试验发现,其相位角基本不变,说明粉胶比对沥青胶结料的粘弹性影响较小,粉胶比的变化基本不改变橡胶沥青胶浆的流变性能。

3)在相同粉胶比情况下,随着温度的提高,相位角 δ 逐步提高,说明橡胶沥青胶浆也体现出粘弹性变换的流变学特性。

综合而言:粉胶比的提高对橡胶沥青胶浆抗车辙能力有显著增强,但对沥青胶浆的粘弹性的影响作用不明显。同时,粉胶比对于橡胶沥青高温性能的提高并不是越高越好,过高的粉胶比不仅对高温性能提高作用不显著,还会使混合料各组成材料相互干涉,影响混合料施工和易性以及压实成型效果。并且,考虑到橡胶沥青中胶粉颗粒的存在,应适当降低粉胶比,控制在1.2以内为宜。另外,采用水泥代替矿粉作为填料有助于提高高温稳定性。

2 橡胶沥青混合料级配优化

研究表明^[10],沥青混合料的高温抗车辙能力60%依赖于矿质集料颗粒的嵌锁作用,40%取决于沥青结合料的粘结作用。合理的级配类型,往往能

形成嵌挤骨架结构,体现出较高的抗车辙能力。文章将结合橡胶沥青的材料特性,以高温性能为重点,对橡胶沥青混合料的级配进行选择和优化。

2.1 级配类型的选择

相对于常规改性剂(SBS,SBR等),橡胶粉颗粒较粗,从结构上看会在一定程度上影响沥青混合料中矿料的嵌挤状态。为适应橡胶沥青的特性,在橡胶沥青的级配选择上通常需要减少细集料和矿粉的比例,使矿料间隙率 VMA 增大,为橡胶沥青提供足够的填充空间,避免嵌挤过程中发生干涉作用,影响混合料的稳定性。

研究选择断级配 AR-AC-13(亚利桑那州橡胶沥青混合料级配^[2]),SMA-13(传统沥青玛蹄脂碎石混合料)和 AC-13(传统连续密级配)3种级配进行对比试验,从中选择出使得橡胶沥青混合料高温稳定性最好的级配类型。级配曲线对比见图 3。

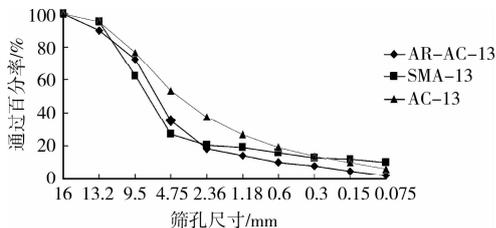


图 3 级配曲线对比

采用室内的车辙试验是橡胶沥青混合料高温稳定性的主要评价方法,采用动稳定度和相对变形双重的控制指标,目的是强化对混合料高温性能的控制^[8],对比试验结果见表 3^[9]。

表 3 不同级配组成的橡胶沥青混合料车辙试验结果

| 混合料类型 | 油石比/% | 动稳定度/(次·mm ⁻¹) | | 相对变形/% | |
|----------|-------|----------------------------|--------|--------|------|
| | | 测试值 | 技术要求 | 测试值 | 技术要求 |
| AR-AC-13 | 7.5 | 1 721 | ≥3 500 | 4.3 | ≤3.1 |
| SMA-13 | 6.2 | 3 219 | ≥3 000 | 2.9 | ≤3.4 |
| AC-13 | 4.5 | 1 480 | ≥1 000 | 5.2 | ≤7.7 |

注:参考交通部《橡胶沥青及混合料设计施工技术指南》^[8]中关于重载交通与特重交通橡胶沥青路面高温性能的要求,确定橡胶沥青混合料(如 AR-AC-13 或 AR-OSMA-13)动稳定度技术要求为 3 500次/mm,相对变形指标由动稳定度与相对变形的回归关系选定为 3.1%。以橡胶沥青为胶结料的传统 SMA-13 与传统 AC-13 依然采用《公路沥青路面施工技术规范》中的技术要求^[11]。

从试验结果可以看出:

1)以橡胶沥青作胶结料的 SMA-13 高温稳定性最好,美国亚利桑那州断级配 AR-AC-13 次之,传统连续密级配 AC-13 混合料的高温稳定性最差。

2)试验结果验证了传统连续密级配 AC-13 这

种悬浮-密实型混合料不适合橡胶沥青材料特性的发挥,会导致橡胶沥青混合料难以充分压实成型,没有为橡胶沥青胶结料提供足够的变形空间,高温性能不佳。

3)AR-AC-13 断级配主要是通过增加高粘度橡胶沥青结合料用量,减少细集料,特别是矿粉用量,增加矿料间隙率,提高骨架结构作用,从而提高路用性能。但是,在本次试验过程中,这种典型的“S”型断级配类型并没有达到预想的效果,高温稳定性依然不足。其原因可能是缺乏矿粉填料,即粉胶比过低而造成橡胶沥青混合料的高温性能不足,但也不排除是由于原材料性能差异,以及各工艺条件(橡胶沥青生产工艺、压实成型效果等)而导致混合料高温性能达不到要求。

4)相对 AR-AC-13 橡胶沥青混合料而言,按照 SMA-13 级配中值成型的橡胶沥青混合料,矿粉添加量明显增加,相应降低了沥青用量,在高温车辙试验中表出良好的高温稳定性能。但是其试验指标还不能够完全满足橡胶沥青混凝土在高等级道路中应用的要求(动稳定度≥3 500 次/mm),仍需要改善与提高。

综合试验结果,采用 SMA-13 进行橡胶沥青混合料高温性能优化研究。

2.2 AR-SMA-13 级配优化调整

研究以《公路沥青路面施工技术规范》(JTGF40-2004)^[11]中的规定的细粒式沥青玛蹄脂碎石混合料 SMA-13 级配范围为基础,合理选择影响因素,对 AR-SMA-13 混合料级配进行优化研究。

主要考虑以下几方面:1)充分发挥 SMA 骨架优势,尽量控制粗集料比例不变,这样既保持了 SMA 原有的良好骨架性质,又达到简化试验影响因素的目的;2)通过沥青胶浆性能的研究,得知橡胶沥青的粉胶比范围与普通 SMA(1.6~1.8 左右)^[10]相比明显减小。因此需对传统 SMA 填料比例进行调整;3)2.36 mm 筛孔作为 SMA-13 矿料的关键性筛孔,其变化对沥青混合料各体积参数的影响作用并不显著,可有效减小体积指标变异性对试验结果的影响,便于试验规律的总结。

综上所述,研究选择 0.075 mm 与 2.36 mm 2 档筛孔进行级配调整,将 0.075 mm 筛孔的通过率由级配中值 10% 调整为 8% 和 6%,对应改变了 2.36 mm 的通过率,即 4.75~2.36 mm 与矿粉 2 档料的比例,其他各粒径的比例仍然符合 SMA-13 的规范中值。8% 矿粉比例表示为级配 I,6% 矿粉比例的表示为级配 II,见表 4。

2.3 AR-SMA-13 最佳油石比确定

橡胶沥青以 SK70# 沥青为母体基质沥青,内掺 20% 的 30 目橡胶粉生产制得,其性能见表 1;粗集料为玄武岩,为增强橡胶沥青与矿料的粘附性,细集料采用石灰岩;填料采用 P. O32. 5R 普通硅酸盐水

泥。马歇尔试验结果见表 5。

2.4 高温性能检验

结合马歇尔试验分别确定的 3 种级配的最佳油石比,分别成型车辙试件,进行对比试验,检验调整后的混合料高温性能,试验结果见表 6。

表 4 矿料级配调整

| 级配类型 | 通过下列筛孔(mm)的质量百分率/% | | | | | | | | |
|-------|--------------------|------|------|------|------|-----|-----|------|-------|
| | 13.2 | 9.5 | 4.75 | 2.36 | 1.18 | 0.6 | 0.3 | 0.15 | 0.075 |
| 级配中值 | 95 | 62.5 | 27 | 20.5 | 19 | 16 | 13 | 12 | 10 |
| 级配 I | 95 | 62.5 | 27 | 18.5 | 17 | 14 | 11 | 10 | 8 |
| 级配 II | 95 | 62.5 | 27 | 16.5 | 15 | 12 | 9 | 8 | 6 |

表 5 橡胶沥青混合料最佳油石比的确定

| 级配类型 | 最佳油石比 | 毛体积密度 | VV/% | VMA/% | VFA/% | 稳定度/kN | 流值/mm |
|-------|-------|-------|------|-------|-------|--------|-------|
| 级配中值 | 6.2 | 2.435 | 4.2 | 17.1 | 75.4 | 7.94 | 2.63 |
| 级配 I | 6.4 | 2.444 | 4.3 | 17.5 | 75.4 | 8.02 | 2.31 |
| 级配 II | 6.5 | 2.437 | 4.1 | 17.6 | 76.7 | 8.21 | 2.57 |

表 6 高温性能对比试验结果

| 混合料类型 | 油石比/% | 动稳定度/(次·mm ⁻¹) | | 相对变形/% | |
|--------------|-------|----------------------------|--------|--------|------|
| | | 测试值 | 技术标准 | 测试值 | 技术标准 |
| AR-SMA-13 | 6.2 | 3 219 | | 4.3 | |
| AR-SMA-13 I | 6.4 | 3 688 | ≥3 500 | 2.9 | ≤3.1 |
| AR-SMA-13 II | 6.5 | 3 275 | | 5.2 | |

注:AR-SMA-13 为规范级配中值得到的混合料,AR-SMA-13 I 与 AR-SMA-13 II 对应采用表 5 的级配 I 和级配 II。

从对比试验结果来看,经过优化的 AR-SMA-13 I 即调整矿粉比例为 8% 的混合料具备最好的高温稳定性,它能够满足橡胶沥青混凝土在高等级道路中应用的高温稳定性要求。说明适当调整 SMA 级配类型,既保证了 AR-SMA-13 的骨架特性,又适应了橡胶沥青的材料特性,优化 AR-SMA-13 的高温性能是可行的。

3 结论

通过试验研究与分析,可得出以下结论:

1) 填料可明显改善橡胶沥青胶浆的高温性能,但填料比例不是越高越好,过高的粉胶比不仅对高温性能提高作用不显著,还会影响混合料施工和易性及碾压成型效果,橡胶沥青胶浆的粉胶比在 1.2 左右能保证其高温性能;

2) 由于水泥是具有高活性的碱性材料,以它作为填料,对橡胶沥青胶浆高温性能的改善作用强于矿粉。橡胶沥青混合料可用水泥代替矿粉,以提高混合料的高温稳定性;

3) 橡胶沥青胶浆作为一种粘弹性材料,其相位角 δ 不会随粉胶比变化而发生改变,即填料的增加

不会改变橡胶沥青胶浆的粘弹性质;

4) 就高温性能的研究来看,AR-SMA-13 的高温稳定性最好,断级配 AR-AC-13 次之,传统密级配 AC-13 最差。

5) 基于 SMA 混合料级配,适当调整 AR-SMA-13 混合料的规范级配,可优化得到 AR-OSMA-13 级配,改善橡胶沥青混合料的高温稳定性。

参考文献:

- [1] 杨志峰,李美江,王旭东. 废旧橡胶粉在道路工程中的应用的历史和现状[J]. 公路交通科技, 2005, 22(7): 19-22.
YANG ZHI-FENG, LI MEI-JIANG, WANG XU-DONG. The history and status of rubber powder used in road-building [J]. Journal of Material in Civil Engineering, 2005, 22(7): 19-22.
- [2] 孙祖望,陈飙. 橡胶沥青技术应用指南[M]. 北京: 人民交通出版社, 2007.
- [3] 王旭东,李美江,路凯冀,等. 橡胶沥青及混凝土应用成套技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2008.
- [4] JUNAN SHEN, SERJI AMIRKHANIAN. The influence of crumb rubber modifier (CRM) microstructures on the high temperature properties of

- CRM binders [J]. The International Journal of Pavement Engineering, 2005, 6(4): 265-271.
- [5] THOMAS BENNERT, ALI MAHER, JOSEPH SMITH. Evaluation of Crumb Rubber in Hot Mix Asphalt[R]. 2004.
- [6] HORODECKA R, KALABINSKA M, PILAT J, et al. Utilization of scrap rubber for bitumen and asphalt concrete mod in Poland [C]//Asphalt Rubber 2000- Proceeding, Portugal, 2000: 273-285
- [7] Rubber Pavement Association. How to sell asphalt-rubber, marketing workshop [G]. Paradise Valley, Arizona, 2000.
- [8] 交通部公路科学研究院. 橡胶沥青及混合料设计施工技术指南[M]. 北京: 人民交通出版社, 2008.
- [9] 夏玮. 废胶粉改性沥青及沥青混合料路用性能研究 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2009.
- [10] 路学元, 张素云, 郑南翔, 等. 沥青胶浆(SMA)实验方法与评价指标研究[J]. 合肥工业大学学报: 自然科学版, 2006, 29(7): 894-897.
- LU XUE-YUAN, ZHANG SU-YUN, ZHENG NAN-XIANG, et al. Study on test methods of SMA mortar and its evaluation indexes [J]. Journal of Hefei University of Technology: Natural Science Edition, 2006, 29(7): 894-897.
- [11] JTG F40-2000 公路沥青路面施工技术规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- [12] 张争奇, 张卫平, 李平. 沥青混合料粉胶比[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2004, 24(5): 7-10.
- ZHANG ZHENG-QI, ZHANG WEI-PING, LI PING. Ratio of filler bitumen of asphalt mixture[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2004, 24(5): 7-10.
- [13] 吴玉辉. 矿粉含量对沥青胶浆性能的影响研究[J]. 公路交通科技, 2008, 25(9): 35-38.
- WU YU-HUI. Research of influence of performance of asphalt mortar with different slag contents[J]. Journal of Material in Civil Engineering, 2008, 25(9): 35-38.
- [14] 刘丽, 郝培文, 肖庆一, 等. 沥青胶浆高温性能及评价方法[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2007, 27(5): 30-34.
- LIU LI, HAO PEI-WEN, XIAO QING-YI, et al. High temperature properties and evaluation method of asphalt mortar [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2007, 27(5): 30-34.
- [15] 武立超. 橡胶沥青在 SMA 中的应用[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2009.
- [16] State of California Department of Transportation, Asphalt Rubber Usage Guide[M]. 2003.
- [17] GOEDON AIREY, MUJIBUR RAHMAN. The influence of crude source and penetration grade on the interaction of crumb rubber and bitumen [C]//Asphalt Rubber 2003-Proceeding, 2003. 12
- [18] 吕伟民, 孙大权. 沥青混合料设计手册[M]. 北京: 人民交通出版社, 2007.

(编辑 胡英奎)