

泡沫沥青混合料冷再生技术

凌天清^a, 何亮^a, 马育^b

(重庆交通大学 a. 土木学院, 重庆 400076; b. 化学教研室, 重庆 400076)

摘要:根据国内外最新研究成果,介绍了沥青发泡原理及特性并对其影响因素分别从宏观和微观角度进行了分析,探讨了泡沫沥青混合料的设计方法,最佳拌和用水量试验,养生条件对泡沫沥青混合料的影响,实验室检测方法,力学特性的研究及其影响因素。文中列举了沥青发泡技术在一些温拌沥青混合料中的应用,提出并分析了泡沫沥青今后发展的几个重要问题,包括泡沫沥青混合料设计与评价方法,发泡剂的研制与选择,泡沫沥青改性及其工艺改进方法。

关键词:泡沫沥青; 泡沫沥青混合料; 冷再生; 设计方法; 性能研究

中图分类号: TU528.42 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2009)01-0141-06

A Cold Recycling Technique for Foamed Bitumen Mix

LING Tian-qing^a, HE Liang^a, MA Yu^b

(a. School of Civil Engineering and Architecture; b. Department of Chemistry, Chongqing Jiaotong University, Chongqing, 400074, P. R. China)

Abstract: Based on the latest research, we introduce asphalt foaming principles and their characteristics and analyze the influencing factors from macro and micro perspectives. The methods of designing foamed bitumen mixture, the optimum mixing water content, the influence of curing conditions, laboratory testing methods, mechanical characteristics, and the influencing factors of foamed bitumen mixture are discussed. We outline some new asphalt foaming technologies used in warm mix asphalt. Viewpoints regarding the development of foamed bitumen are put forward by analyzing the design and the evaluation methods of foamed bitumen mixture, the development and the selection of asphalt foaming additive, the improvement of the manufacture techniques of foamed asphalt, and the technology of modified asphalt foaming.

Key words: foamed bitumen; foamed bitumen mixture; cold recycling; design method; characteristics study

1956年,美国 Iowa 州大学的 Ladia H. Csanyi 教授在实验室研究利用水蒸汽发泡沥青,并首次将泡沫沥青应用于道路稳定土基层。沥青发泡膨胀后,体积增大 10~15 倍,粘度大为降低,与冷湿集料裹覆良好。1968年,澳大利亚的 Mobil Oil 公司以冷水替代热蒸汽,使沥青发泡技术更加经济实用。1990年以后,泡沫沥青用于冷再生在美国,澳大利亚,新西兰,南非得到广泛应用^[1-4]。近来,国外很多单位研究了沥青发泡技术在温拌沥青混合料技术中

的应用,如 WAM-Foam 温拌技术,Aspha-min 沸石微发泡沥青降粘技术和低能量沥青 LEA (Low Energy Asphalt) 技术^[5]。

我国于 1991 年开始对泡沫沥青经行尝试性研究。2002年,同济大学的吕伟民等在上海修筑的试验路段取得了良好的效果^[6]。近来,同济大学等承担的泡沫沥青冷再生课题,其成果在沥青发泡适用范围,冷再生沥青混合料组成设计和施工技术上都具有创新^[7]。

收稿日期:2008-08-30

基金项目:西部交通建设科技项目(200631881478)

作者简介:凌天清(1946-),男,重庆交通大学教授,博士生导师,主要从事公路路基路面结构设计方法与筑路材料研究,
(E-mail) lingtq@163.com。

本文根据当前国内外泡沫沥青冷再生最新研究成果,对沥青发泡、再生沥青路面材料(RAP 材料)、评价指标、压实方法、养生方法、实验室测试方法、混合料的路用性能等方面都做了详细的分析和介绍,并探讨了存在的问题和发展方向。

1 沥青发泡特性研究

1.1 沥青发泡原理

沥青发泡的基本过程是当冷水滴与高温沥青(140 °C 以上)接触时,水转化成蒸汽,形成大量气泡,使沥青的体积发生膨胀。整个过程仅仅是沥青暂时的物理变化。泡沫沥青的特性一般用膨胀率和半衰期来表征。南非 Jenkins 教授提出了发泡指数的概念,这是一种利用能量储存的观点,将膨胀率和半衰期综合在一起来评价沥青发泡效果^[8]。不过许多专家建议仍以膨胀率和半衰期作为选择沥青最佳发泡条件的指标,而以发泡指数作为检验指标^[6]。

1.2 发泡影响因素

沥青的发泡性能受诸多因素的影响,其中重要的因素如下:

1)加水量:增加发泡用水量可以增加泡沫的大小,使膨胀率增大。但泡沫体积增大会减少沥青薄膜的厚度,使得泡沫不稳定导致半衰期的减少。

2)沥青种类:通常要求使用针入度 80~150(0.1 mm)的沥青来发泡,较硬的沥青会产生较差质量的泡沫,从而导致沥青分散效果变差。杨虎荣等人对不同粘度沥青发泡性能进行了比较,得到的结论是绝大部分低粘度沥青的膨胀率小于高粘度沥青的膨胀率,而半衰期却大多截然相反^[9]。可知沥青由于其组成不同,发泡效果也不尽相同,由此说明沥青的发泡特性在某种程度上要受到其组分的影响,尤其是要受到那些由沥青组分决定的物理性质,如不同温度下的粘度和导热系数等的影响^[10]。

3)沥青的温度:同济大学拾方治等人的研究表明沥青发泡前在达到可发泡温度后,沥青发泡特性与发泡温度无必然联系,这与温度越高发泡性能越好的结论不符^[6]。温度越高虽然有越利于产生泡沫,但将使沥青表观粘度和沥青膜弹性降低,对膨胀率和半衰期都不利。

4)压力:沥青和水通过小直径的门口注入发泡室。增加输送管道的压力可使这些门口的液体更容易分散(成雾状),从而改善泡沫的均匀性。然而何桂平最近在香港理工大学做的研究显示,空气压力对发泡沥青的衰变曲线影响不大^[11]。

5)添加剂:表面活性剂的起泡性可以用其降低

沥青的表面张力的能力来表征,根据液体压力与曲率的关系 Laplace 公式,液体表面张力降低有利于泡沫的稳定,对于表面粘度较大的沥青而言,降低其表面张力的能力越强,越有利于产生泡沫。此外,在沥青泡沫中粘度和密度较大的沥青与气体之间存在着水膜,表面活性剂的存在有利于水膜在沥青表面的均匀分布与定向排列,使气泡更稳定^[12]。

1.3 可接受的发泡特性

目前对于发泡性能尚无明确的数值标准,无论取高膨胀率还是较长的半衰期,均不如两者都适当时的效果好。膨胀率大于 10 倍,同时半衰期不低于 12 s,是现在普遍接受的条件。事实上泡沫沥青的本质就是要降低沥青粘度,提高沥青与集料的粘附性,壳牌沥青手册中指出沥青的粘度在 0.2~0.55 Pa·s 时可满足与集料拌和的条件。一般能满足进行有效拌和的最小发泡倍数为 4,而泡沫沥青再生要与 RAP 料持续拌和 30 s,也就是希望在这 30 s 内能得到更持久的低粘度沥青。优质发泡条件并不是一个定值,因为这同时需要 2 个因素确定,并要通过混合料力学实验来检验,所以同济大学最近的报告里提出以沥青的“合适发泡条件”代替“最佳发泡条件”^[7]。

1.4 发泡特性用于温拌沥青混合料^[5]

1.4.1 Aspha-min 沸石微发泡沥青降粘技术

Aspha-Min 是德国 Eurovia Services 公司的产品,它是内部有着较大孔隙的硅酸盐沸石(Zeolite),呈白色粉末状,遇热 85~182 °C 时含有约 21% 的水分就释放出来。当它与热的集料拌和时出现了薄薄的水汽,就产生了沥青泡沫,最终生成 WAM。其拌和温度在 130~145 °C。

1.4.2 WAM-Foam 温拌技术

WAM-Foam 是由位于英国伦敦的壳牌国际石油公司和位于挪威奥斯陆的 Kolo-Veidekke 公司共同开发的产品。该方法的第一阶段是将温度为 100~120 °C 的软质结合料加入到集料中进行拌和以达到良好裹附。在第二阶段,将极硬的结合料泡沫化后加入到预裹附的集料中。这样,软质结合料和泡沫化的硬质结合料都起到降低结合料粘度的作用从而实现良好的工作性。混合料的摊铺和碾压在 80~90 °C 温度下完成。

1.4.3 低能量沥青 LEA(Low Energy Asphalt)技术

最近出现的来自法国 Fairco 的 LEA 技术,是依靠湿冷的沙子(细集料)搅拌到 120~160 °C 干燥的覆盖有热沥青的粗集料里,水汽从集料里逸出并激发出泡沫,泡沫化的沥青完全拌和并覆盖了集料最

终形成 WAM 混合料。它的摊铺碾压温度在 70~90 ℃,而且易于操作,改进了操作工的生产条件,降低了约 30% 的能耗,减少了 80% 的尘埃。

2 泡沫沥青混合料设计

2.1 集料级配设计

由于泡沫沥青与集料混合时,主要散布于细料(特别是粒径小于 0.075 mm)的表面,形成粘有大量沥青的细料填缝料,粗集料表面基本没有形成沥青膜,与热拌沥青混合料的沥青在粗细集料表面完全裹附不同,因此,泡沫沥青混合料中要有足够的细集料,通常情况下,0.075 mm 以下颗粒含量为 5%~20% 时稳定效果更好,更易于泡沫沥青的分散,充分发挥其胶接作用。此外,拾方治的试验发现 2.36mm 以下材料的通过率对混合料强度的形成具有重要影响^[6]。Sakr 和 Manke 的研究还显示,粗骨料之间的嵌锁比沥青胶浆的粘性对混合料的影响程度大。为此,研究者提出了采用颗粒指数描述集料的棱角特性,规定了颗粒指数大于 10 才能获得较好性能的泡沫沥青混合料^[13]。一般级配应尽量贴近参考级配曲线图 1 中值并控制 0.075 mm 通过率不低于 5% 的原则,细料不足的可以加入适当细集料或粉煤灰,改善稳定效果^[6]。

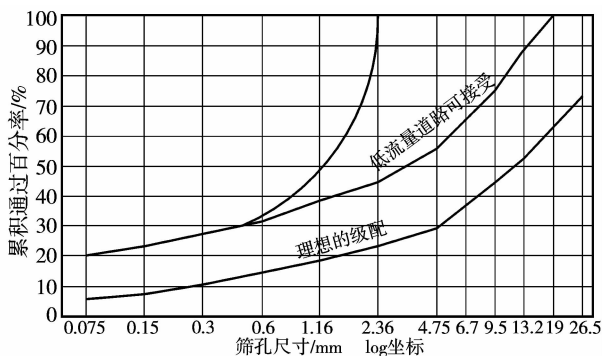


图 1 用于泡沫沥青混合料的级配方框图

同时考虑到增加泡沫沥青冷再生料的早期强度和增强其抗水损坏的能力,一般可加入 0.5%~1.5% 的水泥,石灰或消石灰,但通常不超过 2.0%,否则会影响混合料疲劳特性,而且在经济上也不划算。根据材料塑性指数的试验结果,可以参考表 1 选择活性填料的种类^[6]。

表 1 活性填料的选择

塑性指数	<10	10~16	>16
活性填料	水泥 (1%~1.5%)	石灰 (1.5%~2.5%)	消石灰预处理后再稳定

2.2 试件成型方法

一般采用击实法成型标准的马歇尔试件,南非 Stellenbosch 大学在研究中以 150 mm 直径的试件代替 100 mm 直径的试件,并取得良好效果^[14]。但也有人认为集料最大粒径小于 20 mm 宜制成直径 100 mm 的,若大于 20 mm 则制成 150 mm 的试件。新西兰 Canterbury 大学 Mofreh F. Saleh 在研究中分别用旋转压实仪,马歇尔击实仪,振动成型机进行成型实验,得出了不同的最佳含水量和最大毛体积密度,并分析出这主要取决于压实效果和压实过程中集料的排列顺序^[15]。近年来,国外实验室制备试件普遍采用旋转压实仪,可获得更低的空隙率和最佳含水量,并认为这种方法更真实地模拟了现场的压实情况。空隙率和含水量控制对混合料的性能相当重要,空隙率过大,混合料的抗水损能力差,易过早老化,这会加速集料与粘结料的剥离,最终导致路面破坏。泡沫沥青混合料拌和时也可以对集料进行加热,这有助于沥青在混合料中的分散与大集料的沥青裹覆。法国 Vincent Gaudfroy 教授的课题组指出提高集料温度可提高沥青膜品质,提高混合料和易性与抗剥落性^[16]。这一点在 Iowa 州立大学 Hosin 副教授的调查研究中得到了肯定,他发现当达到合适的发泡条件后,泡沫沥青混合料湿 ITS(浸水劈裂强度)的主要影响因素为 RAP 料的温度,进一步提高沥青发泡品质对混合料作用不大^[17]。Jenkins 等人的研究表明在混合料拌和时,掺加热水明显有助于沥青的分散和沥青裹覆集料^[18]。

2.3 最佳拌和水量的确定

Gaudfroy 认为集料的初始含水量对沥青膜品质会产生重要影响,在拌和过程中,水使沥青分散并一起混合均匀,也同时限制了沥青与集料的结合力^[16]。

国外对确定拌和水量的方法进行了众多研究。混合料中水和沥青共同起润滑作用,因此混合料达到最大压实效果时,实际需水量随沥青用量的增加而减少。借鉴乳化沥青混合料最佳总液体概念,Castedo Franco 和 Wood 在泡沫沥青混合料中也引入了总液体含量的概念。并认为总流质(水+沥青)含量大约等于最佳含水量 OMC 时,可以达到最佳压实度^[6]。

Sakr 和 Manke 在其研究中提出了泡沫沥青混合料达到最大密度时含水量计算公式如式(1),该公式考虑了采用修订 AASHTO 方法测定的 OMC,

填料的含量(PF)和沥青含量(BC)三个因素,变量为混合料最大压实含水量(MMC)。

$$MMC=8.92+1.48OMC+0.4PF-0.39BC \quad (1)$$

从式(1)可以看出,OMC比MMC高出约10%~20%。为了防止风干混合料过份耗时,Sakr和Manke建议在拌和混合料及压实时均采用MMC控制含水量,用此方法得到的混合料的性能并无显著差别^[13]。

《维特根冷再生技术手册》中也有确定拌和用水量的方法和经验公式,并采用重型击实试验确定最佳含水量和最大干密度^[19]。

最近新西兰的研究者先通过试验得出的最佳含水量,再针对最佳含水量取5个不同含水量在估计泡沫沥青最佳含量下制成试件,测其毛体积密度和动态回弹模量,以此来直接确定最佳拌和水量^[15]。

目前国外进行的研究,只是通过实验给出了最佳用水量的范围,而对于影响这些取值范围的重要因素没有相关结论。

2.4 设计沥青用量的确定

泡沫沥青混合料与普通热沥青混合料重要的区别是泡沫沥青与集料接触后,与细集料裹附并形成粘度较大的“马蹄脂”填充粗骨料空隙。沥青胶浆的粘度对混合料的稳定性有重要影响,因此沥青与填料用量比是一个重要参数。

Iowa州立大学的Yongjoo Kim研究员最近发现RAP料上残余沥青越硬越需要更多的泡沫沥青,而高残留沥青含量并不意味着泡沫沥青需要量会减少,而且含有较多硬性残留沥青的RAP料成型后抗松散性能较差^[20]。同时,Hosin副教授指出随着RAP料温度的增加,混合料的最佳沥青含量会减少。这是因为RAP温度的增加有利于泡沫沥青在混合料中的分布,使之形成更为均匀的胶粘结构^[17]。

设计沥青用量一般选择浸水劈裂强度最大时的胶结料用量^[21-22],Maccarrone教授建议干燥和浸水的劈裂强度分别应该在200 kPa和100 kPa以上。一般说来,试验时材料的受力状态越接近路面结构真实工作环境,所得到的参数越具有客观性。而我国在试验时,材料试件的受力状态基本上是静态的,没有考虑材料在动态荷载作用下的动态性能。目前国外主要是测试试件的干燥和浸水的动态劈裂模量与动态蠕变模量^[6]。

2.5 养生条件

泡沫沥青混合料的力学特性与养护方式存在一

定的关系。Gaudefroy教授认为混合料的残留水含量是导致其力学性能低于HMA的重要因素^[16]。Ruckel等人的研究显示,养生过程中湿度对泡沫沥青混合料的最终强度有主要的影响。以往研究多采用室内60℃烘箱养生3d的方法,养生结果使混合料的含水量稳定在0%~4%的水平,养生强度约是通车约一年左右的现场路面强度。但是因60℃养生条件高于普通沥青软化点,结合料发生老化,沥青的分布也会发生变化。现普遍的做法是试件击实后在室温下养生24h后脱模,再置于40℃通风烘箱内再养护72h,湿试件则还需在25℃下浸水24h^[23-24]。最近南非采用平衡含水量下的养生试验,试件在室温中养生24h,然后用塑料袋密封于40℃烘箱中养生48h,这样养生的目的在于模拟现场的平衡含水量,其值一般介于2.5%~6%之间,并认为由此得到的劈裂强度(ITS)可较准确地推导出无侧限抗压强度(UCS)和浸水劈裂强度两个指标,另外还可单独用来确定混合料设计中最佳泡沫沥青用量^[14]。Mofreh F. Saleh认为烘箱养护不适用于水泥改性混合料的情况,因为它阻止了水泥的水化反应,严重影响了混合料的最终强度,在研究中他们选择两种混合料的试件压实后直接脱模,在19℃下(室温)养护7d^[15]。而澳大利亚Griffith大学工学院的作法是28d室温(25℃)空气养护,从其得到的数据来看,7d之后水泥改性试件回弹模量仍在持续增长,在28左右趋于平缓。根据澳大利亚的施工经验,泡沫沥青最终强度的形成可以持续1年^[25]。

3 泡沫沥青混合料的力学性能研究

初步设计级配确定后,一般还需对其进行各项力学性能试验,包括马歇尔稳定度试验、车辙试验、无侧限抗压强度试验及回弹模量试验。对于不满足设计要求性能的,可以通过调整泡沫沥青再生材料的级配和沥青用量等方法重新设计。

泡沫沥青混合料的强度特性与含水量密切相关,因为该类混合料的沥青用量相对较少,而空隙率较高。Mofreh F. Saleh等人在最近的与HMA相同级配的泡沫沥青混合料对比实验中,发现沥青的感温性对发泡性能没有直接联系,但对泡沫沥青混合料的感温性有一定影响,但均低于HMA;而经过5d的浸水试验证明其水稳定性非常良好,且残余刚度指数IRS(浸水回弹模量/原回弹模量)高于HMA规范要求^[26-27]。为了提高混合料的水稳定

性,首先需要改善混合料的级配,级配不好是导致混合料水稳定性差的重要原因。其次必须采用较大的沥青用量,另外也可以加入水泥作为填料来改善材料的水稳定性。

澳大利亚曾采用现场材料进行了混合料梁式试件疲劳测试(简支梁中间点加载),结果显示养生后的试件疲劳性能在某种程度上高于常规沥青混合料,但变异性相当大。昆士兰交通部门曾采用 Image Flats 的材料进行泡沫沥青混合料车辙试验,压实后 24 h 试验结果是 10 000 次试验的车辙深度仍小于 1 mm^[28]。Mofreh F. Saleh 的试验显示泡沫沥青混合料的高温抗车辙性比 HMA 更强,而且其浸水 CBR 值也高于干燥的相同级配未经处治集料的 CBR 值^[26]。

4 问题和今后的发展

1)目前国内外对于泡沫沥青冷再生混合料的设计大多是采用修正马歇尔试验法。属于基于性能的设计方法如 Superpave 方法等较常规经验方法更合理^[29]。而受力状态更接近路面结构真实工作环境的材料力学实验也是一个需要研究的课题。

2)研制合适的发泡剂对制造优质发泡沥青有重要影响,此外,合适的发泡剂还可能和旧集料表面发生化学作用,生成较强的化学键,大大加强结构沥青层的粘结强度。

3)泡沫沥青改性相应也会提高混合料性能。维特根公司以前试验过用 SBS、PE 等改性沥青制作泡沫沥青,由于其粘度太大,并没有成功得到应用。废旧橡胶轮胎粉作为外掺剂价格便宜,但是同样面临一个高粘度问题。通过提高发泡温度可以降低粘度,橡胶粉掺量也影响其粘度,但热拌橡胶沥青指南要求橡胶粉掺量为沥青的 1/4,所以橡胶粉改性泡沫沥青工艺是一个需要解决的问题。

德国生产的 Sasobit 是一种新型的聚烯烃类沥青普适添加剂。它可以显著提高沥青的高温性能及在 60℃ 下的粘度,同时降低其在 135℃ 下的粘度;降低感温性;显著提高路面的抗变形能力;显著改善沥青混合料的施工和易性,保持沥青的低温性能不变,降低能量消耗,提高工效^[30]。笔者认为其正好可以克服普通高粘度改性沥青给泡沫沥青带来的施工工艺上的困难。

4)用于温拌沥青混合料:是泡沫沥青应用的一个新的发展方向。相对于 HMA,施工温度降低,但

WMA 却具备和 HMA 一样的施工和易性和路用性能。

参考文献:

- [1] HE GUI-PING, WONG WING-GUN. Laboratory study on permanent deformation of foamed asphalt mix incorporating reclaimed asphalt pavement materials[J]. Construction and Building Materials, 2007, 21: 1809-1819.
- [2] VAN DE VEN, M. F. C, JENKINS, K. J. Development of (half-) warm foamed bitumen mixes: state of the art[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2007, 8(2):163-175.
- [3] YONGJOO KIM, HOSIN "DAVID" LEE. Development of mix design procedure for cold in-place recycling with foamed asphalt[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2006, Jan./Feb.:116-124.
- [4] MICHAEL ERIC BIENVENU. Design and Analysis of Cold-Recycled Mixtures[D]. North Carolina: North Carolina State University, 1997.
- [5] WAYNE JONES. Warm mix asphalt pavements: Technology of the future[J]. Asphalt Magazine, Fall 2004:8-11.
- [6] 拾方治,马卫民. 沥青路面再生技术手册[M]. 北京: 人民交通出版社,2006.
- [7] 同济大学,杭州市公路局. 泡沫沥青冷再生技术的应用研究[R]. 2007.
- [8] JENKINS, K. J., M. F. C. VAN DE VEN, et al. Characterization of foamed bitumen[C]. (CAPSA'99), 1999.
- [9] 杨虎荣,何桂平,韩海峰. 不同粘度沥青的发泡性能比较和机理分析[J]. 公路,2004(6): 107-112. YANG HU-RONG, HE GUI-PING, HAN HAI-FENG. Effect of bitumen viscosity on foamability[J]. Highway, 2004(6): 107-112.
- [10] MOFREH F. SALEH. Effect of rheology on the bitumen foamability and mechanical properties of foam bitumen stabilised mixes[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2007, 8 (2): 99-110.
- [11] HE GUI-PING, WONG WING-GUN. Decay properties of the foamed bitumen[J]. Construction and Building Materials, 2006, 20: 866-877.
- [12] 赵国玺. 表面活性剂物理化学[M]. 北京: 北京大学出版社,1984.
- [13] SAKR H. A., Manke P. G.. Innovations in oklahoma foam mix design procedures [J]. Transportation Research Record, 1985, 1034: 26-34.

- [14] ASPHALT ACADEMY. Interim Technical Guideline: The Design and Use of Foamed Bitumen Treated Materials[M]. Technical Guideline 2, Pretoria, South Africa, 2002.
- [15] MOFREH F. SALEH. New Zealand Experience with Foam Bitumen Stabilization [C]. Submitted for Presentation at the 2004 Annual TRB Meeting and for Publication in the TRB Record Series, 2004.
- [16] VINCENT GAUDEFROY. Laboratory Investigations of The Mechanical Performance of Foamed Bitumen Mixes Using Half-Warm Aggregates [C]. 2007 Transportation Research Board Annual Meeting Washington D. C., 2007.
- [17] HOSIN "DAVID" LEE, YONGJOO KIM. Influences of binder and RAP temperatures and foaming water content on cold in-place recycling mix design process using foamed asphalt [J]. Airfield and Highway Pavements, 2006(11): 377-387.
- [18] JENKINS, K. J., J. L. A., DE GROOT, et al. Half-warm foamed bitumen treatment, a new process. In: 7th conference on asphalt pavements for Southern Africa. Victoria Falls, Zimbabwe[C]. CAPSA, 1999: 41-571.
- [19] WIRTGEN GROUP. Wirtgen Cold Recycling Manual [M]. 2004.
- [20] YONGJOO KIM, HOSIN "DAVID" LEE, MICHAEL HEITZMAN. Validation of new mix design procedure for cold in-place recycling with foamed asphalt [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2007 (11): 1000-1010.
- [21] CHIU, C, LEWIS, AJ. A study on properties of foamed asphalt treated mixes [J]. Journal of Testing and Evaluation, 2006, 34 (1): 90-95.
- [22] M. HOUSTON, F. LONG. Correlations Between Different Its and Ucs Test protocols for Foamed Bitumen Treated Materials[C]. (CAPSA'04), 2004: 117.
- [23] RUCKEL P J, ACOTT S. M., BOWERING R. H.. Foamed asphalt paving mixtures: preparation of design mixes and treatment of test specimens [C]. Transportation Research Record, 1982: 88-951.
- [24] HE GUI-PING, WONG WING-GUN. Effects of moisture on strength and permanent deformation of foamed asphalt mix incorporating RAP materials [J]. Construction and Building Materials, 2006(6): 30-40.
- [25] A. NATAATMADJA. Transportation Research Board 80th Annual Meeting[C]. 2001: 7-11.
- [26] MOFREH F. SALEH. Effect of Aggregate Gradation, Type of Mineral Fillers, Bitumen Grade and Source on the Mechanical Properties of Foamed Bitumen Stabilized Mixes [C]. Submitted for Presentation at the 2004 Annual TRB Meeting and for Publication in the TRB Record Series, 2004.
- [27] PENGCHENG FU, JOHN T. HARVEY. Temperature sensitivity of foamed asphalt mix stiffness: field and lab study [J]. International Journal of Pavement Engineering, 2007, 8 (2): 137-145.
- [28] RAMANUJAM J M, JONES J D. Characterization of foamed bitumen stabilization [C]. Proceedings Road System and Engineering Technology Forum 2000, Old Department of Main Roads, Bardonia, Australia, 2000: 1-23.
- [29] 谭忆秋, 董泽蛟, 曹丽萍, 等. 应用 Superpave 体积设计法设计冷再生沥青混合料 [J]. 公路交通科技, 2005, 22(3): 31-34.
- TAN YI-QIU, DONG ZE-JIAO, CAO LI-PING, et al. Designing cold recycled asphalt mixtures with superpave volumetric design method [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2005, 22 (3): 31-34.
- [30] 张锐, 黄晓明, 赵永利, 等. 加入新型添加剂的沥青混合料路用性能研究 [J]. 公路交通科技, 2006(11): 27-30.
- ZHANG RUI, HUANG XIAO-MING, ZHAO YONG-LI, et al. Research on pavement performances of asphalt mixtures modified with new type additives [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2006(11): 27-30.

(编辑 陈蓉)