

回收沥青瓦在沥青路面再生应用中的研究进展

马峰¹, 邢海鹏¹, 卢现林²

(1. 长安大学公路学院, 陕西 西安 710064)

(2. 长安大学材料学院, 陕西 西安 710064)



马峰

摘要: 为了将建筑行业所产生的大量废旧沥青瓦材料再生应用于道路建设中, 促进循环利用, 阐述了利用回收沥青瓦再生沥青混合料的可行性及相应再生方法, 综述了回收沥青瓦改性沥青胶结料的粘度、抗车辙和低温抗开裂等性能以及回收沥青瓦再生沥青混合料的路用性能, 指出未来进一步的研究建议。现有研究表明, 沥青瓦改性沥青胶结料表现出更好的抗车辙性和低温性能, 且低沥青瓦含量对其低温抗裂性能并未有明显影响, 沥青瓦改性后因胶结料粘度提高而出现的硬化问题可通过引入生物改性技术来消除。回收沥青瓦材料加入沥青混合料中能有效降低脆化温度, 提高混合料的抗车辙性能、抗疲劳开裂性及水稳定性。采用发泡工艺和添加剂可将回收沥青瓦材料再生技术与温拌技术相结合, 从而表现出良好的环境和经济效益, 为我国环保型路面研究提供了参考价值。

关键词: 道路工程; 回收沥青瓦; 循环利用; 沥青混合料; 路用性能

中图分类号: U414 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2018)04-0304-05

Advances on the Application of Recycled Asphalt Shingles (RAS) in Asphalt Pavement Recycling

MA Feng¹, XING Haipeng¹, LU Xianlin²

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

(2. School of Materials Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: In order to reuse a large number of waste recycled asphalt shingles (RAS) material generated by construction industry, and promote the recycling of waste RAS, feasibility and recycling method about application RAS in recycling asphalt mixture are expounded. The viscosity, rutting resistance, and low temperature cracking resistance of RAS modified binder are reviewed. Furthermore, pavement performance of reclaimed asphalt mixture by RAS, and environmental as well as economic benefits are also reviewed. In addition, the existing problems and further research advice are proposed in this paper. Existing researches show that RAS modified binder exists better rutting resistance and low temperature performance, low temperature cracking performance is no evidently deteriorated at low RAS content. Moreover, the increasing viscosity and stiffening problem caused by RAS can be eliminated by introducing bio-binder. After RAS is mixed into asphalt mixture, the stiffness, rutting resistance, fatigue cracking resistance and moisture susceptibility are improved effectively. Through adopting foaming technology and additives, the workability of warm mix asphalt mixture recycled by RAS can be improved. The integration of RAS recycling technology with warm mix asphalt (WMA) is more environment friendly and economic, and can provide practical significance for environmental pavement engineering researches.

Key words: road engineering; RAS; recycling; asphalt mixture; pavement performance

1 前言

如今, 公路交通建设中所用的沥青材料大部分仍是

取自石油沥青, 但随着建设事业的迅速发展, 过度开采和使用已使石油资源面临枯竭, 从而在公路建设中逐渐暴露出石油沥青供应不足的矛盾。据相关统计, 美国每年约产生 1000 万吨的废弃屋面瓦和 100 万吨人造屋面瓦废料^[1]。每个屋面沥青瓦约含有 40% ~ 55% 的矿物集料和平均含量为 30% 的沥青含量, 如果相关部门能将这部分沥青材料进行循环利用, 每年则可节省约 11 亿美元^[2]。根据中国建筑防水协会统计资料显示, 2013 年我

收稿日期: 2017-02-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(51108038, 51108039); 陕西省科技项目(2013KW24, 2013kjxx-94)

第一作者: 马峰, 男, 1978年生, 博士, 教授, Email: mafeng@chd.edu.cn

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.2018.04.08

国沥青瓦产量约为 3446 万平方米,主要为玻纤胎沥青瓦^[3]。根据我国《玻纤胎沥青瓦技术规范》(GB/T 20474-2006)^[4]所述相关规格要求进行估算,我国每年沥青瓦产量为 15 万吨以上且呈现迅速增长的态势。屋面沥青瓦材料含有较高含量的沥青,如若这些沥青材料不经处理,不仅会对环境造成极大负担,而且也是一种资源浪费。原油市场的价格波动使沥青胶结料的成本大幅提升,而沥青瓦处理加工技术的进步对沥青瓦材料用于沥青路面创造了良好的市场条件^[5,6]。因而对废旧沥青瓦材料进行回收再生利用具有良好的经济效益和环境效益。

早在 20 世纪 90 年代就开始涌现出许多回收沥青瓦材料用于沥青混合料及其诸多性能的相关研究^[7-9]。这些研究初步将回收沥青瓦材料用于沥青混合料中,并对产生的沥青瓦改性沥青混合料的路用性能进行一定的试验研究,从而证实了废旧沥青瓦材料用于再生沥青混合料的可行性。近些年许多国家已经实现了将废旧沥青瓦材料用于再生沥青混合料中,并形成一定规模,甚至出台了沥青瓦材料再生沥青混合料的相关规定与规范^[10,11]。基于回收沥青瓦材料再生沥青混合料良好的环境效益和经济效益,本文综述了回收沥青瓦沥青混合料再生方法及其性能,为回收沥青瓦用于再生沥青混合料的生产实践提供参考。

2 回收沥青瓦及其再生方法

2.1 回收沥青瓦

沥青瓦是美国、加拿大等国最受欢迎的屋面防水建材,占据屋面建材市场的三分之二左右^[12]。沥青瓦具有易于安装、质量轻、成本低及维护要求低等优点,近些年来其在国际屋面建材市场占有较高比重。目前我国国内所生产的沥青瓦主要是玻纤胎沥青瓦,此种沥青瓦含有约 20% ~ 40% 沥青、40% ~ 70% 骨料颗粒和 1% ~ 25% 的纤维^[13]。回收沥青瓦大部分是从屋顶工程承包商中回收的拆除后的沥青瓦,而此种来源的沥青瓦往往含有较多的杂质,包括粘带有房屋木屑、用于固定的铁钉或进行胶粘的纸屑等,而这些杂质可通过专用沥青瓦粉碎机将沥青瓦粉碎至所需粒径,同时通过磁铁吸引和鼓风等处理环节清除废旧沥青瓦中所含有的铁钉、木屑、纸屑等杂质^[14,15]。由于玻纤胎沥青瓦近些年才被普遍推广应用,而早些年所生产使用的沥青瓦因采用纤维素纤维和纸质添加物,能够吸收更多的沥青,故在沥青瓦的回收过程中最好将其分类以使资源高效利用^[11]。

2.2 回收沥青瓦的再生方法

回收沥青瓦的再生方法主要分为两类:一类是将回收沥青瓦粉碎至指定粒径后直接与新沥青、新骨料及一

些添加剂拌合;另一类是从破碎后的沥青瓦材料中提取沥青,再将该沥青与改性剂或再生剂进行混合用来拌合沥青混合料。

在大多数的研究中,回收沥青瓦再生技术往往与热拌和温拌沥青混合料制备工艺相结合。因温拌降低了沥青混合料的拌合温度和压实温度从而减少了能源消耗和夯实量,故而温拌技术与回收沥青瓦相结合具有更高的经济环境效益^[16]。近些年来,也有许多科研和生产人员将温拌技术和回收沥青瓦材料相结合进行研究并取得了许多成果^[16-20]。

热拌沥青混合料的沥青瓦再生方法主要分为干拌和湿拌两种方法^[21]。一种是将分类回收的沥青瓦进行粉碎,通常最大粒径为 12.5 ~ 19.0 mm,通过干法将其作为骨料添加至混合料中,借助拌合过程中的高温环境使沥青瓦中的老化沥青与新沥青进行混合;另外一种是将回收沥青瓦材料研磨至超细粒子(80% 以上通过 200 号 0.075 mm 筛)与沥青在高温条件下进行混合后再与骨料进行拌合,即为湿拌法。NAHB^[10]和 Foo 等^[22]通过具体试验得出最佳的回收沥青瓦添加量为 5% 左右。

温拌沥青混合料的沥青瓦再生方法主要通过发泡技术和添加剂来实现^[23]。根据 ASTM D2172 和 ASTM D5404 对回收沥青瓦材料中的沥青进行提取和修复,常用甲苯-乙醇为萃取化学溶剂,粘接剂和骨料被离心机充分分离后,再进行蒸发和净化^[11,24]。Zearley^[25]最早提出阶段性萃取方法,这种方法假设集料外包装的沥青为分层结构,用沥青溶剂进行阶段性萃取,之后 Huang 等^[26]和 Bowers 等^[27]也证实了这种萃取方法的可行性。Zhang 等^[28]和 Zhao 等^[29]也证实此萃取方法可更高效地提取沥青瓦中的沥青。

由于沥青瓦生产过程中需吹入氧气使沥青胶结料氧化,并且沥青瓦在使用过程中还会进一步老化,因而提取出的沥青需要与新沥青或再生剂进行混合以平衡沥青瓦在老化过程中所损失的软质沥青组分^[11]。将改性后的提取沥青加热至 135 °C 后通过发泡机注入冷水进行发泡,再与新骨料进行拌合。另一种方法是向沥青中添加生物有机类、蜡类改性剂或其他化学添加剂,以降低拌合所需温度或提高沥青对骨料的包裹效果、混合料的工作性和黏附性等^[24,30,31]。

由于回收沥青瓦具有丰富的沥青、规则的棱角性、纤维素或玻璃纤维,其还可用作冷补材料。将沥青瓦粉碎至 12.7 mm 大小并与骨料、沥青或混合乳剂进行拌合产生冷补材料^[7,12]。目前英、美两国已有许多公司批量生产回收沥青瓦冷补产品,使回收沥青瓦材料在道路冷补材料生产领域得以推广^[32]。

3 性能分析

3.1 RAS 沥青胶结料性能分析

3.1.1 粘度

Oldham 等^[1]根据 ASTM D4402 所述标准,用布氏旋转粘度仪对沥青瓦改性后的沥青胶结料试样和生物改性后的沥青瓦改性胶结料试样进行粘度测试,测试时纺锤速度分别设定为 5, 10, 20, 25, 50 和 100 r/min。通过旋转粘度测试数据可看出,沥青瓦改性沥青胶结料在不同温度下均表现出随沥青瓦掺量增加而胶结料粘度提高的趋势,随着温度的升高,沥青瓦对沥青胶结料粘度的影响也随之减小。此外,引入生物改性技术可明显降低沥青瓦改性胶结料的粘度,削弱沥青瓦改性胶结料因粘度提高而出现的硬化问题。

3.1.2 抗车辙性能

Oldham 等^[1]根据 ASTM D7175-08 标准,分别在 40, 46, 52, 58, 64, 70 和 76 °C 测定温度下,分别选取角频率为 0.001, 0.1, 0.11, 1, 1.1, 5, 10 和 25 rad/s 进行动态剪切流变试验(DSR)。将沥青瓦改性胶结料加热至 150 °C 后注入试模(直径 25 mm, 深 1 mm)中,冷却至室温后置于 DSR 震荡板上,设定上下震荡板间距为 1000 μm 进行测试。通过测试结果可以看出,在所有设定的角频率下,沥青胶结料的复变模量 G^* 随沥青瓦含量增加而增加。通过复变剪切模量主曲线可看出,角频率较低时,随着沥青瓦含量的增加,沥青瓦对基质沥青复变模量的影响愈趋明显,而生物改性技术的引入可明显降低沥青瓦改性胶结料在高频率下的复变模量。抗车辙因子($G/\sin \delta$ 值)可用来表征胶结料的抗车辙性能,通过 DSR 试验数据可得,沥青瓦改性胶结料试件的抗车辙因子明显提高,表明沥青瓦改性胶结料表现出更好的抗车辙等永久变形性能。

3.1.3 低温及抗裂性能

Oldham 等^[1]根据欧洲试验标准 CEN/TS 15936 进行三点弯曲试验来表征沥青瓦改性沥青胶结料的低温抗裂性能。将试验模具在 60 °C 下预热 10 min 后,将沥青瓦改性沥青胶结料加热至 150 °C 注入模具中,并用 25 μm 厚的聚四氟乙烯薄膜切割成小梁,冷却至室温后进行倒模。测试时以 0.01 mm/s 的加载速率对试件进行加载,直到试件发生脆裂破坏或达到 4 mm 挠度时再终止试验。测试时所选取的测试温度应处于脆性断裂温度和延性状态温度之间,从而确定极限开裂温度(LCT)。通过测试数据可以看出,沥青瓦含量增加到 40% 前,胶结料的极限开裂温度并未有明显变化。

Oldham 等^[1]还通过直接拉伸试验(DTT)对沥青瓦改性胶结料的低温性能进行研究。将沥青瓦改性胶结料试

样加热至 150 °C 后注入模具中,室温条件下养护 60 min。冷却箱设定试验温度(-12 °C 和 -18 °C)后,需持续 60 min 后再进行试验。根据 ASTM D6723-12 标准,通过对试件进行拉伸来确定沥青胶结料的破坏应变和破坏应力。DTT 试验最终可确定两个参数,即断裂能和延度。通过试验结果可看出,对低沥青瓦含量的试件,胶结料的破坏应变有小幅提升,但随沥青瓦含量进一步增加,破坏应变随之降低。沥青瓦改性胶结料的断裂能峰值出现在 5% 沥青瓦含量处,之后随沥青瓦含量增加,断裂能随之降低。延度是评价沥青瓦改性胶结料低温性能的另一个重要指标,可通过一定时间内胶结料 DTT 试验拉伸应变长度变化计算得到。通过延度测试结果可看出,在 -12 °C 测试温度下,沥青瓦改性胶结料的延度峰值出现在 5% 沥青瓦含量处,之后随沥青瓦含量增加而降低;而在 -18 °C 测试温度下,沥青瓦改性胶结料的延度略有提高,峰值出现在 15% 沥青瓦含量处。因此,对于较低含量的沥青瓦改性胶结料而言,在较高温度下其延度改善效果更加明显。

3.2 RAS 改性沥青混合料性能分析

3.2.1 低温性能

Arnold 等^[13]制备含有 0%, 2.5%, 5.0%, 7.5%, 10% 和 12.5% 沥青瓦含量的混合料试件,并在 3 种不同温度(120, 155, 200 °C)进行拌合制件。根据 ASTM D7313 进行盘装紧凑拉伸试验(DCT)来评价含有不同 RAS 含量沥青混合料试样的断裂特性。分别对 DCT 试验后试件断裂的两部分进行声发射试验(AE),沥青混合料的脆化温度可通过降温冷却(15 °C 到 -50 °C)过程中 AE 测试试件的声发射响应量记录来估算出。通过 DCT 试验可观察到随着 RAS 含量的降低,试件的断裂能也随之降低。掺入氧化的 RAS 材料导致混合料的刚度更高且更易碎,从而表现出更低的断裂能。但因其刚度及最大断裂荷载的提高可推测出掺入 RAS 对其高温性能有益。AE 试验表明,很小成分的沥青瓦添加量能明显提高沥青混合料的脆化温度,而更高的拌合温度能够降低 RAS 再生沥青混合料的脆化温度。

3.2.2 抗车辙性能

Sengoz 等^[8]对含有 1% 沥青瓦材料和不含沥青瓦材料的热拌沥青混合料试件进行车辙试验。该车辙试验采用 LCPC 路面车辙试验仪对试件分别进行 100, 300, 1000, 3000, 10000, 30000 和 50000 次循环加载测试。试验结果表明,10000 次循环加载测试后,掺有 1% 沥青瓦材料的沥青混合料试件仅有 4 mm 的车辙深度,而未掺有沥青瓦材料的沥青混合料试件则产生 16 mm 的车辙深度。含有 1% 沥青瓦的沥青混合料试件车辙深度经 30000 次循环加

载后其极限车辙深度仅为 7.5 mm。Buss 等^[16]对回收沥青瓦再生温拌沥青混合料试件分别进行动态模量测试、重复加载永久变形试验,结果表明温拌技术并不会改变混合料的动态模量,掺入沥青瓦材料可提高混合料的流变值。

以上研究表明,回收沥青瓦材料可有效提高沥青混合料的刚度以及抵抗车辙等永久变形能力。尤其是与温拌技术相结合的情况下,由于拌合温度降低,加入沥青瓦材料会使混合料的流变值有明显提升。

3.2.3 抗疲劳开裂性能

根据 AASHTO T321 标准^[33]规定的四点小梁弯曲试验来表征混合料的疲劳开裂性能。Buss 等^[16]将制备好的孔隙率为 $(7 \pm 0.5)\%$ 的试件,在 19.5 ~ 20.5 °C 下养护 2 h 以上,并在相同温度下进行测试。在测试时控制动荷载半正弦波频率为 10 Hz,通过控制应变水平(350, 450, 525, 650, 800 和 1000 微应变)来回生成每种混合料关于应变和疲劳循环次数之间的疲劳曲线。Buss 等^[16]还通过半圆弯拉试验对沥青瓦温拌混合料的低温开裂敏感性进行研究,测试时裂缝口张开位移保持在 0.0005 mm/s 的速率,通过绘制荷载线性位移曲线来计算断裂韧性和断裂能。试验结果表明,沥青瓦会对混合料的低温疲劳开裂性能产生一定的消极影响,提高沥青混合料的低温开裂敏感性,但由于沥青瓦中含有一定比例的纤维材料可提高混合料的抗拉强度,从而使沥青混合料表现出更好的抗疲劳开裂性能。

3.2.4 水稳定性

根据 AASHTO T324 标准^[33]规定的汉堡车辙试验来表征混合料的水稳定性。Im 等^[34]制备了孔隙率为 $(7 \pm 1)\%$ 的热拌沥青混合料试件,将其置于 50 °C 水浴条件下 30 min 再进行汉堡车辙试验。采用线性可变差分传感器来控制试件的车辙深度,直到车辙深度为 12.5 mm 或循环加载 20000 次后才停止试验。Buss 等^[16]采用冻融劈裂强度比(TSR)和汉堡车辙试验来评价温拌沥青混合料的水稳定性,一般要求干湿强度比在 80% 以上的 TSR 值才算及格。对沥青瓦再生混合料道路进行钻芯提取试样(直径为 4 英寸和 6 英寸),进行汉堡车辙试验前先对 4 英寸试样进行 IDT 间接拉伸强度试验来计算 TSR 值,汉堡车辙试验通过剥离拐点来测得混合料的水稳定性。通过所得试验数据可以看出,随着沥青瓦添加量的增加,试样的 TSR 值呈现降低趋势,但汉堡车辙试验数据则显示,随着回收沥青瓦添加量的增加,试样的抗车辙性和水稳定性均有所改善。

4 环境与经济效益分析

美国的沥青瓦回收公司通常收取 30 到 60 美元每吨

的处理费用,沥青瓦的回收受到建设地点与沥青瓦回收站间的运输距离、垃圾填埋场或处理场的回收处理费用影响,回收商可以直接从屋面建筑承包商手中回收沥青瓦,以减少承包商的废物处理费用(5 到 20 美元)^[12]。美国相关研究表明,回收的沥青瓦含有 15% ~ 35% 的沥青粘结剂,回收利用沥青瓦材料每年可节省 11 亿美元,降低美国不可再生能源消耗,帮助解决城市附近废物处理问题^[7]。由于沥青瓦中含有一定量的纤维和聚合物,可提高沥青混合料的强度和刚度,降低沥青混合料中纤维和聚合物的添加量从而降低成本^[7]。回收利用沥青瓦材料还可降低新沥青用量,为公路建设行业带来良好的经济效益。

温拌沥青混合料技术能够降低拌合及压实温度,减少燃料花费和夯实量,具有更低的环境负荷^[16]。生产商将温拌技术和可再生沥青瓦技术相结合可以减少新沥青用量、节约燃料成本,适应更长的施工季节和延长路面养护时间,从而降低成本造价^[16]。相关研究表示^[35],回收沥青瓦再生温拌混合料用于道路建设中可减少道路建设温室气体总排放量的 9% ~ 12%,达到节能减排的效果。

5 RAS 再生进一步研究方向

从上述内容可知,回收沥青瓦再生技术具有经济、环保等优点,但目前此方面研究还尚处于初步发展阶段,需进一步对其进行深入研究,主要包括以下几个方面:

(1) 在较冷环境中,对含有沥青瓦混合料的现场拌合制备工艺或添加剂需进一步研究,使沥青瓦中的氧化沥青与新沥青进行更充分混合;

(2) 对回收沥青瓦材料再生路面研究仅限于宏观性能评价,应进一步从微观层次进行改性机理的研究;

(3) 回收沥青瓦再生技术多集中于国外研究中,所采用的技术规范、相关设备和仪器、评价方法等均与我国有所差异,未来应主要根据我国道路技术规范及相关设备仪器对此项技术开展进一步研究。

6 结语

屋面沥青瓦含有较为丰富的矿物集料和较高的沥青含量,对废旧沥青瓦材料进行回收再生利用具有良好的社会效益。本文介绍了回收沥青瓦材料的破碎除杂处理,以及与热拌和温拌沥青混合料技术相结合的再生方法,综述了回收沥青瓦改性沥青胶结料的粘度、抗车辙和低温抗裂性能,以及回收沥青瓦再生后沥青混合料的路用性能。回收沥青瓦改性胶结料具有更好的永久变形及低温性能,尤其在低沥青瓦含量的情况下,胶结料的低温延度值

明显提高而且对低温抗裂性能的影响并不明显。回收沥青瓦再生的沥青混合料表现出更高的刚度、抗车辙性能和水稳定性。虽然沥青瓦的添加会降低混合料的开裂敏感性,但因回收沥青瓦材料中含有一定比例的纤维,往往使混合料表现出良好的抗疲劳开裂性能。

回收沥青瓦再生沥青混合料技术降低了废旧沥青瓦的回收处理成本和不可再生能源的消耗,可以帮助解决建筑垃圾的处理问题。回收沥青瓦材料中的沥青、集料和纤维又可降低沥青混合料的生产成本。尤其是回收沥青瓦再生技术与温拌技术相结合能够降低拌合及压实温度,减少燃料花费和夯实量,具有更低的环境负荷,适应更长的施工季节,延长路面养护时间,能够实现较好的节能减排效果和经济效益。此外,还介绍了回收沥青瓦再生技术进一步的研究方向,指出其现场拌合制备工艺及部分性能需要深入研究并改善,可为其在我国路面行业的研究与生产实践提供借鉴。

参考文献 References

- [1] Oldham D, Fini E H, Abulebdeh T. *Transportation Research Board 93rd Annual Meeting*[C]. Washington D C: TRB, 2014: 131–135.
- [2] Gevrenov J. Utilization of recycled asphalt shingles in not-mix asphalt [R]. Missouri; Missouri Department of Transportation, 2008.
- [3] Yang Bin (杨 斌), Zhu Zhiyuan (朱志远), Hong Xiaomiao (洪晓苗), et al. *China Building Waterproofing* (中国建筑防水) [J], 2016, 11: 36–39.
- [4] GB/T 20474–2006. *Asphalt Shingles Made from Glass Felt*(玻纤胎沥青瓦) [S]. 2006.
- [5] Hughes C S. Uses of Waste Asphalt Shingles in HMA—State of the Practice, Special Report 179 [R]. Lanham, Maryland: National Asphalt Pavement Association, 1997.
- [6] Hansen K. Guidelines for the Use of Reclaimed Asphalt Shingles in Asphalt Pavements, IS–136 [R]. Lanham, Maryland: National Asphalt Pavement Association, 2006.
- [7] Hassan M M. *Journal of Materials in Civil Engineering*[J], 2014, 26(4): 748–754.
- [8] Sengoz B, Topal A. *Construction & Building Materials*[J], 2005, 19(5): 337–346.
- [9] Falchetto A C, Moon K H, Wistuba M P. *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board* [J], 2016, 2574(2574): 83–91.
- [10] Dan Krivit and Associates. Recycled Tear-off Shingles Road Construction Demonstration in the Town of Hassan[R]. Minnesota: Minnesota Local Road Research Board, 2007.
- [11] Cascione A A, Williams R C, Yu J. *Construction & Building Materials* [J], 2015, 101(1): 628–642.
- [12] Marasteanu M, Austin J, Moon K H. Recycling Asphalt Roofing Shingles into Paving Materials[R]. Upper Marlboro, Georges: NAHB Research Center, 2012.
- [13] Arnold J W, Behnia B, McGovern M E, et al. *Construction & Building Materials*[J], 2014, 58(10): 1–8.
- [14] Elseifi M A, Salari S, Mohammad L N, et al. *Journal of Materials in Civil Engineering*[J], 2012, 24(11): 1403–1411.
- [15] Austin J. *Dissertation for Master*[D]. Minnesota: University of Minnesota, 2011.
- [16] Buss A, Cascione A. *Construction & Building Materials*[J], 2014, 61(61): 1–9.
- [17] Nazzari M D, Mogawer W, Kaya S, et al. *Journal of Materials in Civil Engineering*[J], 2014, 26(7): 388–388.
- [18] Shu X, Huang B, Shrum E D, et al. *Construction & Building Materials*[J], 2012, 35(10): 125–130.
- [19] Zhao S, Huang B, Shu X, et al. *Transportation Research Record* [J], 2012, 2294: 98–105.
- [20] Zhao S, Huang B, Shu X, et al. *Construction & Building Materials* [J], 2013, 44(3): 92–100.
- [21] Hassan M M. *Journal of Materials in Civil Engineering*[J], 2014, 26(4): 748–754.
- [22] Foo K Y, Hanson D I, Lynn T A. *Journal of Materials in Civil Engineering*[J], 1999, 11(1): 15–20.
- [23] Zhao S, Huang B, Shu X, et al. *Journal of Materials in Civil Engineering*[J], 2015, 28(2): 145–153.
- [24] Buss A, Williams R C, Schram S. *Construction & Building Materials* [J], 2015, 77(4): 50–58.
- [25] Zearley L J. Penetration Characteristics of Asphalt in a Recycled Mixture[R]. AMES, IOWA: IOWA Department of Transportation, 1979.
- [26] Huang B, Li G, Vukosavljevic D, et al. *Transportation Research Record*[J], 2005, 1929(1929): 37–45.
- [27] Bowers B F, Huang B, Shu X, et al. *Construction & Building Materials*[J], 2014, 50(50): 517–523.
- [28] Zhao S, Huang B, Shu X, et al. *Materials & Design*[J], 2016, 89: 1161–1170.
- [29] Zhao S, Huang B, Shu X. *Construction & Building Materials* [J], 2015, 82(9): 184–191.
- [30] Ma Feng (马 峰), Li Xiaotong (李晓彤), Fu Zheng (傅 珍). *Materials Review*(材料导报) [J], 2015(13): 93–97.
- [31] Zhao S, Huang B, Shu X, et al. *Journal of Materials in Civil Engineering*[J], 2015, 28(2), 1–9.
- [32] Grodinsky C, Plunkett N, Surwilo J. Performance of Recycled Asphalt Shingles for Road Applications[R]. Montpelier, VT: Vermont Agency of Natural Resources, 2002.
- [33] AASHTO T324. *AASHTO Provisional Standards*[S]. 2010.
- [34] Im S, Zhou F, Lee R, et al. *Construction & Building Materials*[J], 2014, 53(4): 596–603.
- [35] Hamilton B. Analysis of Recycling of Asphalt Shingles in Pavement Mixes from a Life Cycle Perspective[R]. Denver, Colorado: U. S. Environmental Protection Agency, Region 8, 2013.

(编辑 吴 锐 惠 琼)