

文章编号:1007-6735(2013)01-0071-06

# 旧沥青混合料对泡沫沥青冷再生混合料性能的影响

李秀君, 周维维, 李梦晨

(上海理工大学 环境与建筑学院, 上海 200093)

**摘要:** 在分析旧沥青混合料(RAP)特性及其在混合料中作用的基础上,研究泡沫沥青冷再生混合料旧沥青老化程度、旧沥青含量以及铣刨料的掺量等对再生混合料性能的影响.研究得出,在同一泡沫沥青用量下,旧沥青老化越严重,其混合料的空隙率越大,劈裂强度和水稳性越差.但旧沥青老化严重的铣刨料,其 60℃ 稳定度相对较高,说明高温性能增强.此外,在某一固定的泡沫沥青用量下,RAP 掺量越多,混合料的空隙率越大,高温稳定性、水稳性越差.研究表明:RAP 掺量并不是越多越好,如本文研究的泡沫沥青冷再生混合料为使抗拉性能及水稳性满足中等以上交通公路要求,RAP 掺量不宜超过 77%.为使 60℃ 稳定度满足重交通公路要求,RAP 掺量不宜超过 70%.

**关键词:** 泡沫沥青; 冷再生混合料; 旧沥青混合料; 劈裂强度; 水稳性

**中图分类号:** U 416.27      **文献标志码:** A

## Influence of RAP on Performance of Cold Recycling Mixtures with Foamed Asphalt

LI Xiujun, ZHOU Weiwei, LI Mengchen

(School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

**Abstract:** Based on the analysis of RAP properties and the effect of RAP on the mixture, the influence of aging degree of asphalt, the asphalt content and percent of RAP in cold recycling mixtures with foamed asphalt on the performance of recycling mixtures was investigated. It is found that with the same content of foamed asphalt the more aged the waste asphalt, the bigger the air voids and the worse the ITS and water resistance. But the mixture containing RAP in which the waste asphalt is aged more seriously owns higher stability at 60℃, which indicates a better high-temperature performance. In addition, with a fixed content of foamed asphalt, the more the content of RAP, the bigger the air voids of the mixture, and the worse the high-temperature stability and water resistance. The results show that it is not good to have RAP as much as possible. In order to let the tensile properties and water resistance meet the requirements of heavy traffic, the content of RAP should not exceed 77%. In order to let the stability meet the requirement of heavy traffic, the content of RAP should not exceed 70%.

**Key words:** foamed asphalt; cold recycling mixture; RAP(recycled asphalt pavement); ITS(indirect tensile strength); water resistance

截至目前,泡沫沥青的主要用途是能够对旧沥青混合料(recycled asphalt pavement, RAP)进行重新再生利用.大量研究表明,在一定程度上,矿质混合料的性能是沥青混合料性能的核心.对于高温性能而言,有研究认为,30%取决于沥青,而70%取决于矿质混合料<sup>[1]</sup>.因此,对于泡沫沥青冷再生混合料性能影响来讲,旧沥青混合料的性能也势必起到十分关键的作用.

虽然在应用实践中,已初步认识到旧沥青混合料不是传统冷再生认为的仅仅起到“黑石头”的作用,但是国内外众多研究都很少涉及这部分内容,这主要源于对旧沥青混合料作用认识不够重视,以及对其研究具有相对复杂性.由于对旧沥青混合料的认识都是基于经验,缺乏必要的理论依据,因此制约了泡沫沥青冷再生混合料的合理使用.为了解决这一关键技术问题,本文将根据 RAP 中沥青的老化程度、RAP 中沥青含量、RAP 掺量等关键特征对再生后混合料性能的影响进行研究,并试图根据泡沫沥青冷再生混合料性能要求,提出允许掺入的 RAP 最大量.

## 1 RAP 中旧沥青在再生过程中的作用

RAP 是由专用设备(就地再生机、路面铣刨机等),将旧沥青路面面层(有时会含有少量基层)铣刨、破碎后得到的具备一定级配的旧沥青混合料,也称铣刨料.由于旧沥青混合料中组成的多样性、沥青的老化和集料的磨损, RAP 会表现出与新集料不同的材料特征.在众多再生工程中, RAP 往往被看作“黑石头”,认为 RAP 中的老化沥青与新沥青没有相互作用.但在应用过程中,往往会发现泡沫沥青再生旧沥青面层材料的成型效果(表面光滑度、致密性等)要好于泡沫沥青再生沥青面层材料和基层材料的混合物.图 1 中为某道路泡沫沥青再生基层施工 7 天后的芯样,两芯样的回收料用量均为 80%.其中,图 1(a)中试件的回收料包括 30% 二灰材料,图 1(b)中试件的回收料均为旧沥青面层材料.显然,图 1(b)中再生混合料芯样完整、密实,外观与热拌沥青混合料近似,说明旧沥青在混合料中发挥了一定的粘结作用.而图 1(a)芯样表面粗糙、松散、密实性差,这是源于其加入二灰材料后,较多的二灰材料粉尘粘附在新旧沥青表面,削弱了新沥青及部分旧沥青的粘结作用,使得混合料密实性受到影响.由此说明 RAP 中的部分旧沥青与旧沥青、旧沥青与新沥青发生了相互作用,旧沥青在一定程度下充当着

粘结料的角色.



(a) 添加30%二灰材料的芯样 (b) 没有添加半刚性材料的芯样

图 1 泡沫沥青冷再生混合料芯样比较

Fig.1 Contrast of core samples of cold recycling mixtures with foamed asphalt

此外,有关老化沥青与新结合料的相互作用程度,美国联邦公路局及其 Surperpave 专家工作组起草了 Surperpave 热拌沥青路面施工技术规范,其中包括了 RAP 的使用准则<sup>[2]</sup>.在这个 RAP 使用准则中,认为 RAP 用量少于 15% 时, RAP 中的老化沥青可看作“黑石头”,即 RAP 中的老沥青对混合料性能没什么影响;如果 RAP 用量在 16%~25% 时,选用的新结合料等级比不考虑 RAP 时的沥青低一个 PG (performance grade) 等级,即认为部分老沥青发挥了粘结作用; RAP 含量在 25% 以上时,基质沥青的等级需要根据相应的拌和图表来确定.

文献[3]研究发现,热再生过程中再生剂与老沥青不是物理意义上的结合,而是相互发生了一定化学作用,因此引进了一个相互作用系数建立了 NVR (normalized viscosity ratio) 模型来预估再生剂用量.试验发现,采用该模型预估的 RAP 用量比只考虑再生剂填充在回收沥青中的 AI (asphalt institute) 法更为合理<sup>[3-4]</sup>.

但是,对于冷再生技术,再生剂(新沥青)的选择取决于再生剂与老化沥青交互作用的时温效应.在环境温度下,再生剂的再生过程是一个缓慢的物理化学作用的过程.再生剂与老化沥青之间的反应速度与再生剂类型、老化沥青性能、老化沥青含量及力学作用(例如拌和、压实以及交通和气候条件)有关.而且,再生剂与老化沥青的反应并不是在整个混合料中同时发生,而是从它们之间的界面开始.此外,混合料的性能如强度、稳定度等会随水分和挥发性物质的蒸发而发生变化.因此,确定冷再生混合料养护后的力学性能要比简单确定混合物的相容性更为重要.从而,以旧沥青混合料掺量及旧沥青混合料中沥青的老化程度入手,研究其对泡沫沥青冷再生混合料性能的影响,对于理解再生剂与旧沥青、旧沥青与旧沥青之间的相互作用,以及指导泡沫沥青冷再

生混合料的合理使用具有重要意义.

2 RAP 对泡沫沥青冷再生混合料性能的影响

2.1 RAP 中旧沥青老化程度的影响

2.1.1 原材料与混合料组成

为研究 RAP 中旧沥青老化程度对泡沫沥青冷再生混合料性能的影响,本文选用两种不同来源的沥青路面回收料,且均为沥青面层 RAP,分别定义为 RAP-1、RAP-2. RAP-1 来自浙江某泡沫沥青厂拌再生工程,面层材料使用了 5 年;RAP-2 来自河南某高速公路厂拌再生工程,面层材料使用了 10 年.

采用高速离心法和旋转蒸发器法对两种沥青路面回收料进行抽厘和沥青回收试验,测得两种 RAP 中沥青含量分别为 4.9% 和 4.7%. 从两种不同年限对应的路面材料中回收得到的沥青 (recovered bitumen binder, RBB) 分别记为 RBB-1、RBB-2. 对这两种回收沥青进行针入度 (25℃, 100 g, 5 s)、软化点和粘度测定,试验结果列于表 1.

由表 1 看出,使用了 5 年的回收料的沥青老化程度明显低于使用了 10 年的回收料,尤其前者的

60℃ 粘度几乎是后者的一半.

表 1 回收沥青常规指标  
Tab.1 General index of recovered bitumen

| 沥青类别  | 针入度/0.1mm | 软化点/℃ | 60℃ 粘度/(Pa·s) |
|-------|-----------|-------|---------------|
| RBB-1 | 45        | 65    | 19 960        |
| RBB-2 | 22        | 68    | 36 400        |

相关研究认为泡沫沥青在再生混合料过程中,用 RAP 级配代替 RAP 真实级配是可行的<sup>[5-6]</sup>. 因此本文在研究 RAP 特性对泡沫沥青冷再生混合料性能影响时不再考虑级配的影响.

用于发泡的沥青采用壳牌 70 号沥青,其最佳发泡条件为:沥青温度 160℃,用水量为 3%;对应发泡效果为:膨胀率 13,半衰期 10 s.

采用泡沫沥青对 RAP-1、RAP-2 两种沥青回收料进行再生,为了分析 RAP 中旧沥青老化程度对再生混合料性能的影响,两种再生混合料的沥青用量与级配应保持一致,即均采用 2.5% 的泡沫沥青用量,集料组成为 73.5% 的沥青面层 RAP 和 1.5% 的水泥,然后分别再加入一定级配的新集料,使得两种 RAP 再生后混合料级配相同. 两种 RAP 的级配及最终混合料级配如表 2 所示.

表 2 RAP 及再生混合料级配 (%)  
Tab.2 Graduations of RAP and recycling mixture(%)

| 矿料名称  | 筛孔孔径/mm |       |       |       |       |       |      |      |      |      |      |      |      |       |
|-------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
|       | 37.50   | 31.50 | 26.50 | 19.00 | 16.00 | 13.20 | 9.50 | 4.75 | 2.36 | 1.18 | 0.60 | 0.30 | 0.15 | 0.075 |
| RAP-1 | 100     | 100   | 92.3  | 75.0  | 63.9  | 53.5  | 37.6 | 20.0 | 8.4  | 5.3  | 3.6  | 2.6  | 1.6  | 0.7   |
| RAP-2 | 100     | 98.7  | 98.0  | 95.5  | 92.0  | 86.5  | 73.5 | 48.8 | 28.0 | 13.8 | 6.7  | 2.2  | 1.0  | 0.5   |
| 混合料   | 100     | 98.7  | 97.1  | 93.0  | 87.3  | 79.6  | 68.3 | 51.2 | 37.2 | 25.5 | 20.2 | 14.4 | 9.5  | 5.5   |

2.1.2 混合料性能测定与分析

对两种不同使用年限的 RAP 进行泡沫沥青冷再生,随后测定两种再生混合料试件的物理力学指标,包括 25℃ 干、湿劈裂强度 (ITS)、60℃ 稳定度、空隙率及 20℃ 抗压回弹模量,试验结果见图 2 及图 3~5(见下页).

由图 2 可见,RAP-1 对应的泡沫沥青冷再生混合料的干、湿劈裂强度均高于 RAP-2 对应的再生混合料,尤其湿劈裂强度高出后者近 9%,残留强度比 (TSR) 也稍高于后者. 再由图 4(见下页)可看出, RAP-1 对应的泡沫沥青冷再生混合料空隙率小于 RAP-2 对应的再生混合料. 这是由于 RAP-1 使用年限比 RAP-2 使用年限短. 结合表 1 看出,前者旧沥青粘度明显小于后者,说明 RAP-2 使用年限

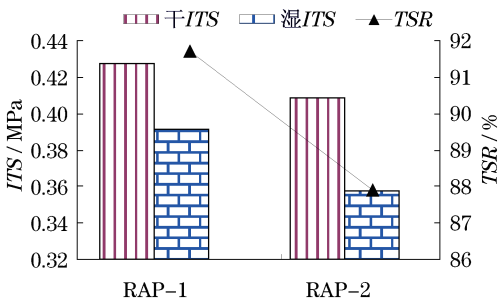


图 2 两种再生混合料 ITS 及 TSR  
Fig.2 ITS and TSR of recycling mixtures

相对较长,其沥青老化严重. 旧沥青与泡沫沥青相互作用程度较低,部分老化沥青在短期内不能发挥粘结作用,使得混合料空隙率相对较高. 相反, RAP-1

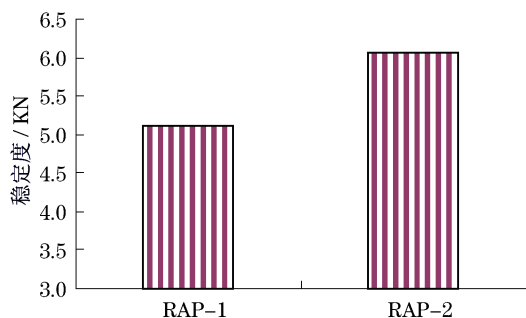


图3 两种再生混合料稳定度

Fig.3 Stability of recycling mixtures

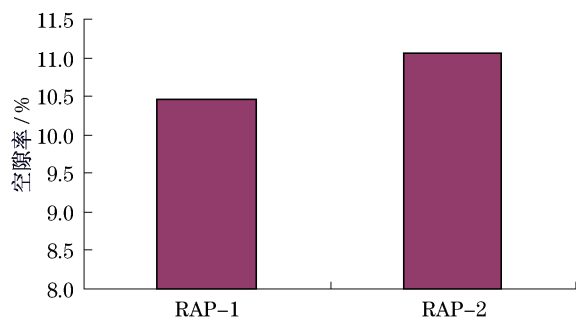


图4 两种再生混合料空隙率

Fig.4 Air voids of recycling mixtures

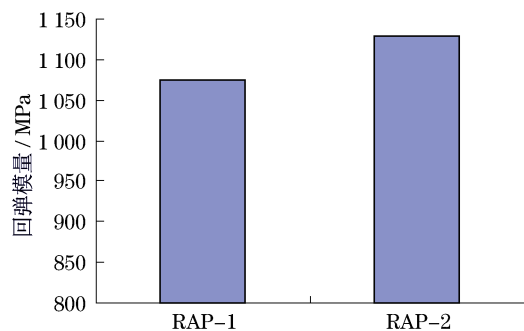


图5 两种再生混合料回弹模量

Fig.5 Modulus of resilience of recycling mixtures

使用年限相对较短,仅为5年,沥青老化程度较低,在再生过程中旧沥青还能发挥一定的粘结作用,使得泡沫沥青冷再生混合料空隙率相对较低,劈裂强度和水稳性相对较高。

由于20℃抗压回弹模量是沥青路面结构设计的重要参数,因此本文测定了两种RAP对应的再生混合料的回弹模量,试验结果如图5所示。由图5看出,RAP-1对应的再生混合料20℃抗压回弹模量明显小于RAP-2对应的混合料,这是由于RAP-1中沥青老化程度没有RAP-2严重,RAP中沥青粘度越低,对应再生混合料的模量越小。

为分析RAP中沥青老化程度对再生混合料高

温性能的影响,本文测定了两种再生混合料60℃稳定度,试验结果见图3。由图3看出,RAP-1对应的再生混合料的稳定度低于RAP-2对应混合料的近17%。究其原因,一是源于RAP-1中的旧沥青含量略高于RAP-2,较多的沥青含量使得马歇尔稳定度减小;二是由于RAP-1中旧沥青老化的程度相对较轻,而RAP-2部分沥青老化严重,使得再生后马歇尔稳定度较高。

由此可见,RAP中旧沥青的老化程度及旧沥青用量对泡沫沥青冷再生混合料的性能有一定影响。在同一泡沫沥青用量下,旧沥青老化越严重,其混合料的空隙率越大,劈裂强度和水稳性越差。但旧沥青老化严重的RAP,其60℃稳定度相对较高,说明高温性能增强。此外,旧沥青老化程度越高的RAP对应的再生混合料抗压回弹模量越大。因此,在实际工程应用中,前期路况调查时,需要考察旧沥青路面的使用年限及老化程度,对于使用年限较久、沥青老化严重的旧沥青混合料不宜再进行泡沫沥青再生应用或者不适宜用于特重及重交通道路,否则其路用性能较差,不能满足使用要求。

## 2.2 RAP 掺量的影响

### 2.2.1 材料与混合料组成

为进一步分析沥青路面回收料对泡沫沥青冷再生混合料性能的影响,本文在保证混合料级配基本不变、泡沫沥青用量相同的情况下,对RAP掺量分别为0%、30%、70%及100%的泡沫沥青冷再生混合料进行了性能测定与分析。所用RAP级配如表2中的RAP-2,混合料最终级配同表2。仍采用壳牌AH-70沥青,泡沫沥青用量恒定为2.5%,水泥用量为1.5%。

由于RAP干密度与新集料干密度相差较大,而混合料在拌和过程中的最佳拌和用水量必须根据击实试验测定的最佳含水量确定,因此对上述4种RAP掺量下的混合料进行击实试验,测得最佳含水量和最大干密度如图6所示。由图6可看出,泡沫沥青冷再生混合料的最佳含水量随RAP掺量的增加而增加,最大干密度则随着RAP掺量的增加而减小。

### 2.2.2 混合料性能测定与分析

对4种不同掺量的RAP进行泡沫沥青冷再生,对再生混合料按规范要求测定混合料的物理力学指标,如空隙率、25℃干、湿劈裂强度、60℃稳定度,并回归各测定指标值与RAP掺量的函数关系,试验结果见图7~10。

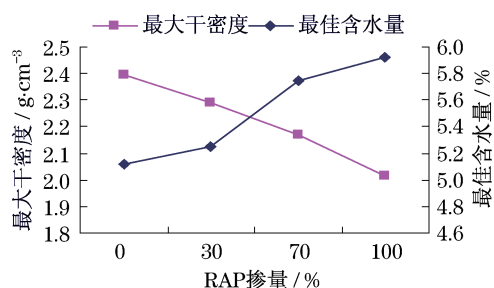


图6 RAP 掺量对击实结果的影响

Fig.6 Influence of the content of RAP on compaction

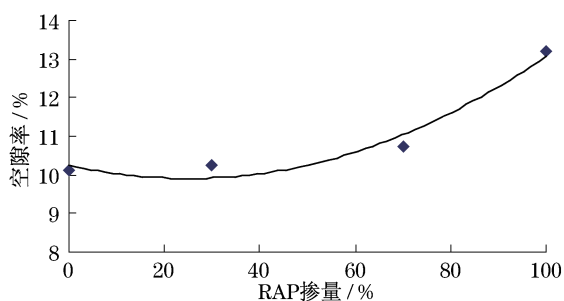


图7 RAP 掺量与空隙率的关系

Fig.7 Relation between the content of RAP and air voids

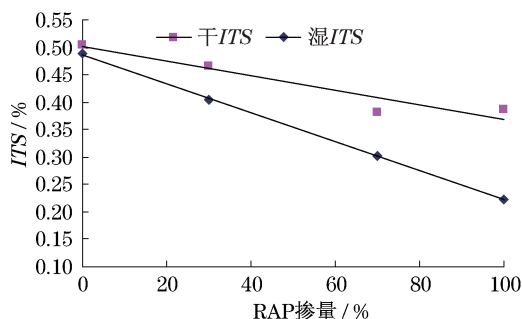


图8 RAP 掺量与 ITS 的关系

Fig.8 Relation between the content of RAP and ITS

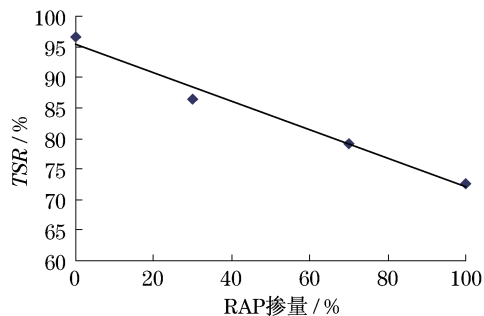


图9 RAP 掺量与 TSR 关系

Fig.9 Relation between the content of RAP and TSR

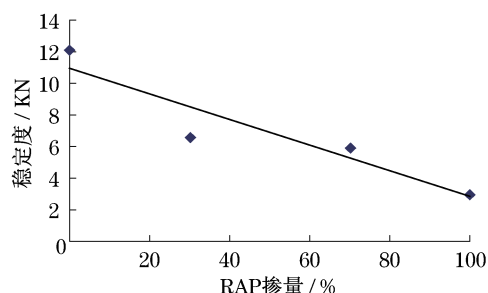


图10 RAP 掺量与稳定度关系

Fig.10 Relation between the content of RAP and stability

## a. 对抗拉性能及水稳性影响

根据图7可看出,泡沫沥青冷再生混合料的空隙率随着沥青路面RAP掺量的增加而增大,尤其当RAP掺量从70%递增到100%时,递增幅度更大.空隙率与RAP掺量具有二次抛物线关系.由于RAP中老化沥青常温下劲度较高,流动性差,混合料不易压实致密,所以再生混合料中RAP掺量越多,混合料空隙率越高.

由于高含量RAP具有较高的空隙率,由图8~9可见其水稳性相对较差.泡沫沥青冷再生混合料的干、湿劈裂强度及残留强度比与RAP掺量有较好的线性关系,它们随着沥青面层RAP掺量的增加而降低,干湿ITS及TSR与RAP掺量相关公式分别如下式(1)~(3).

$$ITS_{dry} = -0.0013x + 0.5004 \quad (1)$$

$$ITS_{wet} = -0.0026x + 0.4858 \quad (2)$$

$$TSR = -0.1564x + 95.692 \quad (3)$$

式中:  $ITS_{dry}$  为 25℃ 干劈裂强度, MPa;  $ITS_{wet}$  为 25℃ 湿劈裂强度, MPa; TSR 为残留强度比, %;  $x$  为再生混合料中RAP掺量, %

根据式(1)~(3)可计算出,当RAP掺量为100%时,25℃干、湿劈裂强度分别为0.3149 MPa和0.2258 MPa,残留强度比为80.05%,与浙江省地方标准《公路泡沫沥青冷再生路面设计与施工技术规程》(DB33/T 715—2008)(以下简称《规程》)中的要求值相比,显然只能满足中等以下交通公路而不能满足中等以上交通公路的要求.

为使泡沫沥青冷再生混合料25℃干、湿劈裂强度及残留强度比均满足中等以上交通公路要求,将《规程》中干劈裂强度要求值0.4 MPa及残留强度比75%分别代入式(1)和式(3),计算得出RAP掺量分别为77.2%、87.6%,两者取低值为77%.

因此,根据本文研究的结果,认为在进行泡沫沥青冷再生混合料配合比设计时,应考虑再生混合料的使用场合,对RAP最大掺量进行控制.例如,基于本文所研究的混合料,建议泡沫沥青冷再生混合料抗拉性能及水稳性满足中等以上交通公路要求时,RAP掺量不能超过77%.

#### b. 对高温稳定性影响

由图10可见,60℃稳定度随着RAP掺量的增加显著降低,两者有较好的线性相关关系,相关公式如式(4).

$$S = -0.0809x + 10.941 \quad (4)$$

式中: $S$ 为60℃稳定度,KN; $x$ 为再生混合料中沥青面层RAP掺量,%.

由于RAP中含有较多旧沥青,这些旧沥青在常温下流动性差,但在60℃超常温下逐渐软化,使得混合料稳定度降低.由此也说明RAP中的旧沥青不能简单看成“黑石头”,而应当看作部分粘结料.当RAP掺量较高时,应适当降低泡沫沥青的用量,否则泡沫沥青冷再生混合料的高温性能会削弱.尤其当泡沫沥青再生层铺筑完后在其上铺筑热拌沥青混合料时,再生层将间接加热并再次压实,若沥青用量过高,混合料将过早出现车辙、波浪等早期损坏.

为使泡沫沥青冷再生混合料60℃稳定度满足重交通公路要求,将常温下成型时的泡沫沥青冷再生混合料稳定度要求值5.0KN代入式(4),计算得出RAP掺量为73.4%.为使泡沫沥青冷再生混合料60℃稳定度满足中等交通道路要求,将稳定度要求值4.0KN代入式(4),计算得出RAP掺量为85.8%.

因此,为使该文中研究的泡沫沥青冷再生混合料60℃稳定度满足重交通公路要求,沥青面层RAP掺量不能超过70%;为满足中等交通公路要求,泡沫沥青冷再生混合料中RAP用量不能超过85%.

### 3 结 论

本文基于两种使用年限不同、旧沥青老化程度不同的RAP,分析了RAP中旧沥青老化程度、旧沥

青含量、RAP掺量等对泡沫沥青冷再生混合料性能的影响,主要结论如下:

a. 试验研究表明,在同一泡沫沥青用量下,RAP中旧沥青老化越严重,其混合料的空隙率越大,劈裂强度和水稳性越差,但60℃稳定度及抗压回弹模量相对较高;RAP中旧沥青含量越多,再生混合料高温稳定性越差.

b. 泡沫沥青冷再生混合料中RAP掺量对混合料性能有较大影响,在某一固定的泡沫沥青用量下,RAP掺量越多,混合料的空隙率越高,高温稳定性、水稳性越差.

c. 针对本文采用的旧沥青混合料及固定的级配,研究得出为使该泡沫沥青冷再生混合料抗拉性能及水稳性满足重交通公路要求,RAP掺量不宜超过80%.为使泡沫沥青冷再生混合料60℃稳定度满足重交通公路要求,RAP掺量不宜超过70%;为满足中等交通公路要求,RAP掺量不宜超过85%.

#### 参考文献:

- [1] 赵永利. 沥青混合料的结构组成机理研究[D]. 南京: 东南大学, 2005.
- [2] Superpave Mixture Expert Task Group. Guidelines for the design of superpave mixtures containing reclaimed asphalt pavement(RAP)[S]. Washington D C: Federal Highway Administration, 1997.
- [3] Chen J S, Huang C C, Chu P Y, et al. Engineering characterization of recycled asphalt concrete and aged bitumen mixed recycling agent [J]. Journal of Materials Science, 2007, 42(23): 9867-9876.
- [4] Loizos A, Papavasiliou V, Plati C. Early-life performance of cold-in-place pavement recycling with foamed asphalt technique[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2007(2005): 36-43.
- [5] 栗关裔. 泡沫沥青冷再生技术的应用研究[D]. 上海: 同济大学, 2008.
- [6] 肖杰. 乳化沥青冷再生混合料设计方法与使用性能研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2007.