

泡沫沥青混合料设计方法的试验研究

拾方治¹, 赫振华², 吕伟民¹, 徐 斌², 朱良 镨²

(1. 同济大学交通运输学院, 上海 200092; 2. 上海浦东路桥建设有限公司, 上海 200120)

摘要: 在国外, 泡沫沥青用于道路的再生十分普遍, 而这项技术在我国应用较少。本文结合国外有关研究, 提出了泡沫沥青混合料材料组成和设计原理, 并通过试验研究得出泡沫沥青用于稳定一定级配路面铣刨料(RAP材料)作为路面基层的可行性。通过分析不同养护方法、不同水泥用量及泡沫沥青用量与间接抗拉强度(劈裂强度)之间存在的关系, 得出了确定最佳沥青用量的控制指标。考虑到泡沫沥青混合料的力学特性对湿度有很强的依赖性, 初步得出一套基于水稳性的泡沫沥青混合料配合比设计方法。

关键词: 泡沫沥青混合料; 配合比设计; 水泥; 水稳性; 试验研究

中图分类号: U414

文献标识码: A

Design Method and Laboratory Research of Foamed Bitumen Mixture

SHI Fang-zhi¹, HE Zhen-hua², LV Wei-min¹, XU Bin², ZHU Liang-pu²

(1 School of Traffic & Transportation, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2 Shanghai Pudong Road & Bridge Construction Co. Ltd, Shanghai 200120, China)

Abstract: The application of foamed bitumen to pavement recycle is very popular abroad, but this technology is seldom used in China. Through laboratory research, the possibility of the application of foamed bitumen stabilized RAP (Recycled Asphalt Pavement) with certain gradation to base course is proved in this paper. Regarding some related research abroad, under the condition of dry or wet curing method, and different cement content, there is a certain relation between foamed bitumen content and ITS (Indirect Tensile Strength). From this, the optimum foamed bitumen content is determined. Further, in view of the dependence of mechanical characteristics of foamed bitumen mixture on humidity, a design method based on moisture susceptibility is put forward.

Key words: Foamed bitumen mixture; Gradation design; Cement; Moisture susceptibility; Laboratory research

0 引言

自1956年美国依阿华州立大学Ladis. H. Casanyi教授发现泡沫沥青可用于稳定土壤以后, 泡沫沥青作为一种新型的粘结剂而广泛应用于世界各国的道路建设中。由于泡沫沥青在形成过程中, 沥青的体积发生膨胀, 沥青的表观粘度降低, 沥青表面自由能增加, 这种状态下的沥青能够与冷湿集料进行较好的粘结, 从而得到一种性能优越的道路铺筑材料——泡沫沥青混合料。

近年来, 随着公路等级的提高及半刚性基层出现

的种种缺陷, 泡沫沥青混合料作为一种新型的基层材料, 越发显示了其优越性。由于其用途不同于一般的热沥青混合料, 因此对泡沫沥青混合料的配合比设计不能采用常规的热沥青混合料配合比设计方法。

本文应用德国Wirtgen公司生产的WLB10泡沫沥青试验机, 通过泡沫沥青混合料配合比试验, 对泡沫沥青混合料设计方法进行了探讨。

1 材料组成与设计原理

1.1 集料的选择

可用于泡沫沥青稳定的材料相当广泛, 但必须满

收稿日期: 2003-07-22

基金项目: 上海市建设与管理委员会《高等级公路泡沫沥青再生基层的开发研究》科技发展基金项目

作者简介: 拾方治(1977-), 男, 江苏徐州人, 博士研究生, 研究方向为道路工程材料。(shifz78@sohu.com)

足一定的级配要求。国外研究表明^[1]，用于不同公路等级的集料，其级配范围不同，如图 1 所示。且该研究认为，落在 A 区域的集料是适合泡沫沥青稳定的，且适合重交通道路；若落在 B 区域，则说明材料中细集料含量偏多，适用于轻交通道路，可加入适当的粗集料将级配调整至区域 A；区域 C 的材料因缺少细集料使得泡沫沥青稳定效果变差，通过加入适当的细集料或粉煤灰，以改善稳定效果。不同研究机构对级配范围的界定略有差异，但普遍认为 0.075mm 以下集料含量对泡沫沥青混合料特性有显著影响，一般建议控制在 5%~20% 范围。

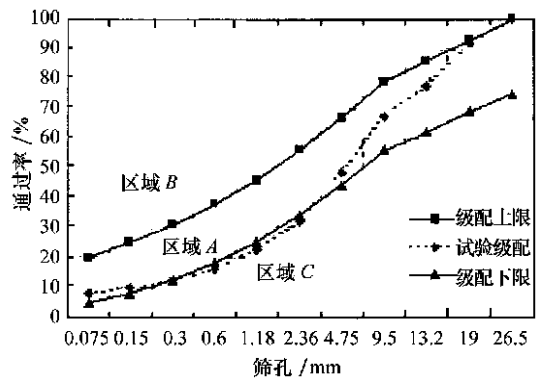


图 1 泡沫沥青混合料级配范围

1.2 沥青发泡

在拌制泡沫沥青混合料之前，应对所选用的沥青进行发泡特性试验，用以确定沥青的最佳发泡条件，如发泡温度和发泡用水量等。

1.3 最佳拌和用水量的确定

泡沫沥青混合料在拌和与压实时需要加入一定的水，以保证较好的拌和效果与压实度。水在此主要有以下几个作用^[1]：

- (1) 促进集料结团的分解；
- (2) 在拌和过程中有利于沥青的扩散；
- (3) 在集料基体间充当润滑剂。

然而，过多的水将会影响压实效果及混合料的强度。因此在拌和和压实过程中必须确定一个最佳用水量。

有关确保最佳拌和与压实效果的最佳用水量各文献有着不同的建议，本试验采用以下经验公式^[2]：

$$W_{\text{add}} = W_{\text{omc}} - W_{\text{moist}} - W_{\text{reduce}} \tag{1}$$

$$M_{\text{water}} = \frac{W_{\text{add}}}{100} \times (M_{\text{sample}} + M_{\text{cement}}) \tag{2}$$

其中， W_{add} 为需要加入集料中的含水量，%； W_{omc} 为最佳含水量，%； W_{moist} 为集料中的含水量，%； W_{reduce} 为水分的散失量，其值取 $0.3 \times W_{\text{omc}} - 0.6$ ，%； M_{water}

为需加入水的质量，g； M_{sample} 为集料的干质量，g； M_{cement} 为需加入水泥的质量，g。

1.4 试件的制作与养护

将混合料按规范要求拌和并制成标准的马歇尔试件，试件击实后在室温下养生 24h 后脱模，再置于 40℃ 的通风烘箱中进一步养生 72h，以确保混合料中不含水份。

1.5 控制指标的确定

路面基层在行车荷载的反复作用下，主要承受竖向压应力及水平拉应力作用。混合料中集料的骨架支撑作用基本能满足其实际需要。工程实践表明，泡沫沥青混合料基层材料往往是由于基层底部抗拉强度（或粘结强度）不足而开裂。试验证明^[3]，沥青混合料和各种半刚性基层材料的劈裂强度与弯拉强度具有一定的相关关系，而劈裂试验比梁的弯拉试验具有简单/方便，且更接近路面结构受力状态，考虑到泡沫沥青作为柔性基层材料，其特性与沥青混合料有一定的相似性，因此采用间接抗拉强度（ITS 值）作为混合料设计的控制指标。

1.6 指标的测定

1.6.1 测定步骤

标准的间接抗拉强度试验需要测试试件在干燥和浸水两种条件下的 ITS 值。在试验过程中，试件的垂直变形速率恒为 50mm/min，通过测量试件的最大破坏荷载以确定 ITS 值。步骤如下：

- (1) 在测试之前，将养生好的试件在室温下放置 1 夜。
- (2) 在十字对称的 4 个方向量测每个试件的高度并计算其高度平均值。
- (3) 量测每个试件的直径。
- (4) 在测试之前，将试件置于 $(25 \pm 1)^\circ\text{C}$ 的恒温空气浴中至少 1h，但不超过 2h；从恒温空气浴中取出试件，将其放到加载装置上。
- (5) 将试件安放稳定，使上下压条在试件的垂直端面上居中、平行；将转换板放置在上压条上并使整套装置与下面压头居中对齐。

(6) 以 50mm/min 的速度向试件施加荷载，直至最大荷载。加载过程中不能有震动，记录荷载 P ，准确到 0.1kN。

1.6.2 测定浸水试件的 ITS 值

在测试前要采取以下措施：

- (1) 将养生过的试件放入真空干燥器中并将其浸入 $(25 \pm 1)^\circ\text{C}$ 的水中。
- (2) 使真空干燥器的真空度达到 50mmHg，维持

(60±1) min。若没有真空干燥器，则在 (25±1)℃ 温度下浸水 24h。

1.6.3 ITS 值的计算

利用以下公式计算各试件的 ITS 值，准确到 1kPa。

ITS=2*P/(pi*h*d) (3)

式中，ITS 为间接抗拉强度，kPa；P 为最大荷载，kN；h 为试件的平均高度，m；d 为试件的直径，m。

对于某一含量沥青，ITS 的残留比 ITS_{ret} 定义如下

ITS_{ret}=ITS_{wet}/ITS_{dry} (4)

式中，ITS_{wet} 为浸水养护试件的 ITS 值；ITS_{dry} 为干养护试件的 ITS 值。

1.7 设计沥青用量的确定

在同一坐标轴上绘制所有试件（干燥和浸水）的 ITS-沥青含量（加入的沥青）关系曲线。选取浸水试件的最大 ITS 值所对应的沥青含量作为沥青含量的设计值，用于泡沫沥青混合料的设计。

2 试验研究

2.1 集料

试验采用的集料 80% 为路面铣刨料 RAP (Recycled Asphalt Pavement)，另外 20% 为加入的新骨料 (0~4.75mm) 和矿粉，0.075mm 以下集料含量则控制在 8% 左右，并尽量满足图 1 中区域 A 的级配范围。所得试验级配如图 1 所示。从图中可看出，所选试验级配中细集料略少，这主要是新料和 RAP 材料中细集料偏少的结果，其实这与实际工程中往往细集料偏少的情况一致，因此也认为该级配符合要求。

根据加入普通硅酸盐水泥用量的不同将集料分成 3 大类，其水泥含量分别为 0%、1% 和 1.5%。由于矿粉和水泥颗粒几乎全部小于 0.075mm，因此对于水泥用量的变化只需相应调整矿粉用量即可，该调整对

级配曲线几乎无影响。

2.2 沥青

采用韩国 70 # 沥青拌制泡沫沥青混合料，根据先前对其进行的发泡特性试验，确定其最佳发泡条件如表 1。

表 1 韩国 70 # 沥青最佳发泡条件

沥青	发泡温度/℃	发泡用水量/%	膨胀率/倍	半衰期/s
韩国 70 #	150	1.5	11	12

在该发泡条件下，对上述 3 种不同水泥含量的集料分别采用 1%、2%、3%、4% 和 5% 的泡沫沥青，制得不同沥青含量的混合料试样。

2.3 最佳拌和用水量

3 种不同水泥含量的混合料击实试验结果和最佳用水量如表 2 所示。

表 2 击实试验结果和最佳用水量

水泥用量/%	最佳含水量/%	最大干容重/g·cm ⁻³	最佳用水量/%
0	6.7	2.170	5.29
1	6.5	2.190	5.15
1.5	6.2	2.220	4.94

搅拌机具有两种速度，在室温 25℃ 左右将料倒入拌和桶，采用低速档拌和均匀，然后缓慢注入所需的最佳用水量（水温在 25℃ 左右），接着变换搅拌机至高速档，拌和同时喷洒泡沫沥青。喷洒结束继续拌和约 30s，再将泡沫沥青混合料移至一密闭容器中存放，成型马歇尔试件（每面击实 75 次）。

2.4 养护

按照上述 1.4 节中所述方法进行养护，湿试件则还需在 (25±1)℃ 温度下浸水 24h。

2.5 试验结果

3 组不同水泥含量试件经过干湿养护后，其间接抗拉强度 (ITS) 随沥青用量变化关系如图 2~图 4，不同水泥用量下干湿 ITS 对比关系如图 5、图 6 所示，不同水泥用量下残留 ITS 对比关系如图 7。

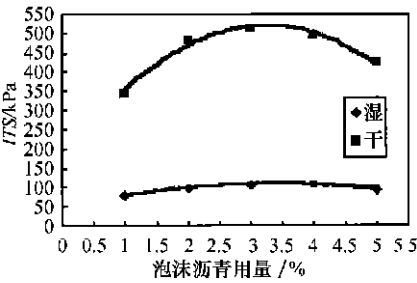


图 2 未加入水泥时泡沫沥青用量与干湿 ITS 变化关系

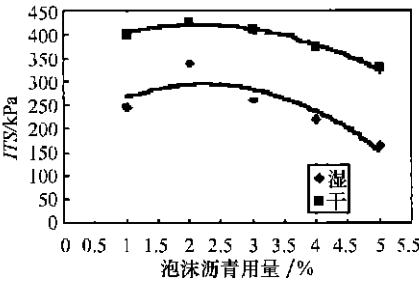


图 3 加入 1% 水泥时泡沫沥青用量与干湿 ITS 变化关系

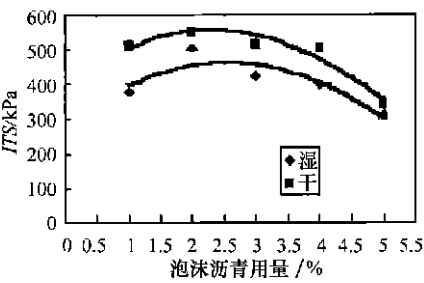


图 4 加入 1.5% 水泥时泡沫沥青用量与干湿 ITS 变化关系

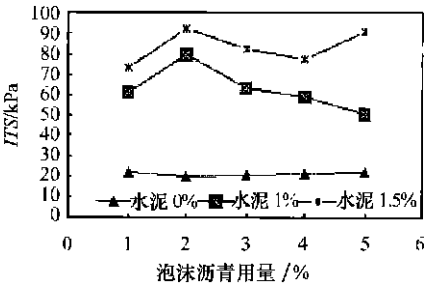
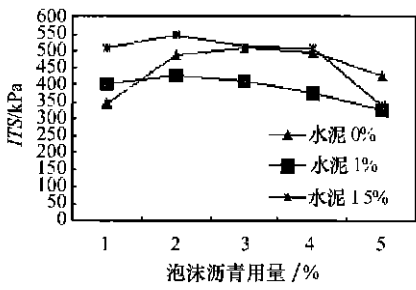
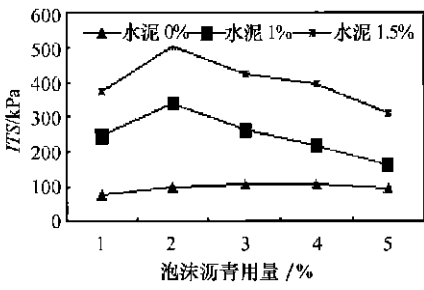


图 5 不同水泥用量下湿 ITS 对比关系 图 6 不同水泥用量下干 ITS 对比关系 图 7 不同水泥用量下残留 ITS 对比关系

结果表明:

(1) 对于马歇尔击实试件, 无论是干燥养护还是湿养护, 随泡沫沥青用量增加, ITS 存在一最大值。而且对于干湿两种养护条件, 最大 ITS 分别对应的泡沫沥青用量相差不大。

考虑到拌和和压实时要加入一定的水, 以利于拌和并得到最大压实度。但在养生过程中, 这些水分将逐渐蒸发, 强度进一步增强, 此时混合料中会留下空隙从而易使水分进入, 导致水损坏。因此, 在进行混合料设计时必须考虑拌和用水量的影响, 拌和用水量过大不仅会导致较大的空隙率, 而且需要更长的养护时间。因此在控制空隙率指标上, 泡沫沥青混合料要比热拌沥青混合料复杂, 需要控制沥青用量和拌和用水量两个参数, 本课题将在后续研究工作中探讨。目前根据国外经验, 混合料最佳沥青含量选择在对浸水试件 ITS 最大值处的沥青用量。从图 2~图 4 可以得出 3 组料 (即未加水泥、1%水泥和 1.5%水泥) 最佳泡沫沥青用量分别为 3.5%, 2.5%, 2%。由此可见, 随着水泥用量的增加, 最佳泡沫沥青用量减少。

(2) 从 3 组干燥养护试件的 ITS 结果可看出, 对于泡沫沥青稳定 RAP 材料, 其不同泡沫沥青用量下 ITS 值在 0.3~0.55MPa, 最大值在 0.42~0.55MPa 之间, 满足我国现行《公路沥青路面设计规范》有关基层材料设计参数的要求。由此说明, 泡沫沥青再生混合料可作为一种新型基层材料, 用于我国高等级公路建设。

(3) 图 5~图 6 表明, 无论采用何种养护条件, 泡沫沥青混合料中加入水泥, 其强度可得到较大提高, 尤其对湿试件的强度提高更为明显。

(4) 从图 7 看出, 未加水泥时, 试件残留 ITS 值

很低, 只有 20%~30%左右; 加入 1%水泥残留 ITS 值提高至 60%左右; 水泥增至 1.5%, 残留 ITS 达到 80%以上。因此可得出, 水泥作为一种填料, 可大大提高泡沫沥青混合料的水稳性。这也是配合比设计中选择最大湿 ITS 值对应泡沫沥青用量作为设计用量的主要原因。

3 结论

(1) 本文提出了基于泡沫沥青水稳性的配合比设计方法, 虽然该方法不能完全基于这种材料其它特性所决定的最佳油量, 但就目前来讲, 它仍可作为实验室和工程应用的主要指导依据。

(2) 与热拌沥青混合料及半刚性材料相比较, 由于泡沫沥青用量与水泥填料用量都比较低, 所以温度变化对泡沫沥青混合料的影响程度要比对典型热拌沥青混合料和半刚性材料的影响要小。

(3) 泡沫沥青混合料的力学特性对湿度有很强的依赖性, 混合料的水敏感性应作为确定最佳沥青用量的控制依据。此外, 加入一定量的水泥不仅可提高混合料的强度, 还可大大提高泡沫沥青的水稳性。

参考文献:

[1] A Nataatmadja. Transportation Research Board 80th Annual Meeting [C]. 2001-01: 7-11
[2] 德国维特根公司. 维特根冷再生手册 [S]. 2001
[3] 邓学钧, 黄晓明. 路面设计原理与方法 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2001.
[4] 吕伟民, 等. 应用泡沫沥青铺筑道路基层 [J]. 上海公路, 2003 (1): 15-16
[5] Lee D Y. Treating Marginal Aggregates and Soil with Foamed Asphalt [J]. Association of Asphalt Paving Technologists, 1981, 50.