

文章编号:1005-0523(2012)06-0035-05

## 温拌排水沥青混合料目标配合比研究

车常伟,陈景雅,陈俊,高晓月

(河海大学土木与交通学院,江苏 南京 210098)

**摘要:**以常州市温拌排水沥青混合料OGFC-13为对象,确定温拌排水沥青混合料目标配合比。首先采用马歇尔设计方法确定热拌条件下目标空隙率为20%的OGFC-13设计级配和最佳沥青用量,并以所得结果在温拌条件下成型20%空隙率的OGFC-13马歇尔试件。对温拌OGFC-13进行马歇尔稳定度试验、谢伦堡沥青析漏试验、肯塔堡飞散试验和车辙试验,以检验温拌排水沥青混合料目标配合比的正确性,通过比较温拌和热拌沥青混合料的实验数据,检验热拌沥青混合料马歇尔设计方法是否适用于温拌沥青混合料。

**关键词:**温拌排水沥青混合料;配合比设计;最佳油石比;试验验证

**中图分类号:**U416.217

**文献标志码:**A

随着我国公路的快速发展,对路面的功能提出了更高的要求<sup>[1]</sup>,排水沥青路面具有表面不积水,雨天抗滑性能好和吸音降噪等功能,是一种高质量的环保型路面<sup>[2]</sup>,得到国内外越来越多的路面设计者的青睐,各地也相继进行了一些排水沥青路面试验路段的建设<sup>[3]</sup>。而以“低能耗、低污染、低排放”为基本特征的低碳经济时代的到来,研究者又提出了温拌技术,温拌排水沥青混合料作为一种高节能、低排放、环境友好的新型沥青混合料,温拌沥青混合料已经得到世界范围内的高度重视<sup>[4-6]</sup>。

美国各州普遍采用的设计方法与热拌沥青混合料的配合比设计方法基本相同,即以热拌沥青混合料的最佳油石比作为温拌沥青混合料的最佳油石比,在不同温度下成型试件,以空隙率为设计参数来确定最佳压实温度<sup>[7]</sup>。

目前我国用于HMA(热拌沥青混合料)的设计方法主要有马歇尔设计法、Superpave设计法和GTM设计法等。而WMA(温拌沥青混合料)的设计基本是沿用HMA的设计方法,包括马歇尔设计法和Superpave设计法<sup>[8-9]</sup>。

本文主要研究常州市环湖路温拌排水沥青混合料OGFC-13的目标配合比,采用马歇尔设计法,研究确定温拌排水沥青混合料的目标配合比方法,为温拌排水沥青混合料的目标配合比设计提供一定的参考价值。

### 1 原材料

本次研究所使用的粗、细集料为玄武岩集料,矿粉为丹徒高资石料加工厂生产的石灰岩矿粉,沥青为江阴泰富沥青有限公司生产的高粘沥青,聚酯纤维由常州普拉斯化工有限公司生产。

#### 1.1 沥青

本次研究所使用的沥青为高黏沥青,它的各项指标均满足试验规范<sup>[10]</sup>的要求,可以用于本次研究的原

收稿日期:2012-12-06

作者简介:车常伟(1987—),男,硕士研究生,研究方向为道路与轨道工程。

材料,其各项指标在此不做过多的叙述。

1.2 粗细集料和矿粉

本研究所使用的集料为玄武岩,其中:玄武岩 1#料规格为 0~3 mm、玄武岩 2#料规格为 3~5 mm、玄武岩 3#料规格为 5~10 mm、玄武岩 4#料规格为 10~15 mm,各种集料及矿粉的检测均满足试验的要求,各种集料及矿粉的筛分结果如表 1 所示。

| 表 1 集料筛分百分数                            |          |      |      |      |      |      |      |      |      |       |
|----------------------------------------|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| Tab.1 The percent of aggregate sieving |          |      |      |      |      |      |      |      |      | %     |
| 集料类型                                   | 方筛孔尺寸/mm |      |      |      |      |      |      |      |      |       |
|                                        | 16       | 13.2 | 9.5  | 4.75 | 2.36 | 1.18 | 0.6  | 0.3  | 0.15 | 0.075 |
| 1#料                                    | 100      | 81.4 | 13.4 | 0.7  | 0.7  | 0.7  | 0.7  | 0.7  | 0.7  | 0.7   |
| 2#料                                    | 100      | 100  | 97.7 | 12.4 | 1.0  | 0.9  | 0.9  | 0.9  | 0.9  | 0.9   |
| 3#料                                    | 100      | 100  | 100  | 98.2 | 12.9 | 3.6  | 1.3  | 1.0  | 1.0  | 1.0   |
| 4#料                                    | 100      | 100  | 100  | 100  | 86.5 | 51.7 | 30.0 | 15.2 | 10.5 | 6.6   |
| 矿粉                                     | 100      | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  | 99.8 | 99.7 | 91.8  |

2 集料配合比设计

根据混合料的筛分试验结果,确定热拌 OGFC-13 的三组级配为 A,B,C(如表 2 所示),各种级配通过率如表 3 所示。

| 表 2 集料级配设计               |          |          |          |         |
|--------------------------|----------|----------|----------|---------|
| Tab.2 Aggregat gradation |          |          |          | %       |
| 级配类型                     | 1#料百分比含量 | 2#料百分比含量 | 3#料百分比含量 | 矿粉百分比含量 |
| A                        | 26.5     | 51.0     | 3.5      | 4.5     |
| B                        | 38.5     | 44.0     | 0.0      | 4.0     |
| C                        | 38.0     | 47.5     | 1.0      | 3.0     |

| 表 3 各类级配通过百分率                          |          |      |      |      |      |      |     |     |      |       |
|----------------------------------------|----------|------|------|------|------|------|-----|-----|------|-------|
| Tab.3 The pass rate of every gradation |          |      |      |      |      |      |     |     |      | %     |
| 项目                                     | 方筛孔尺寸/mm |      |      |      |      |      |     |     |      |       |
|                                        | 16       | 13.2 | 9.5  | 4.75 | 2.36 | 1.18 | 0.6 | 0.3 | 0.15 | 0.075 |
| 级配 A                                   | 100      | 95.1 | 75.9 | 28.9 | 18.2 | 12.8 | 9.5 | 7.4 | 6.7  | 5.8   |
| 级配 B                                   | 100      | 92.8 | 65.6 | 23.2 | 16.4 | 11.6 | 8.7 | 6.7 | 6.1  | 5.2   |
| 级配 C                                   | 100      | 92.9 | 66.0 | 20.6 | 13.0 | 9.2  | 6.9 | 5.3 | 4.8  | 4.2   |
| 级配上限                                   | 100      | 100  | 80   | 30   | 22   | 18   | 15  | 12  | 8    | 6     |
| 级配下限                                   | 100      | 90   | 60   | 12   | 10   | 6    | 4   | 3   | 3    | 2     |

由表 3 的试验合成级配可以看出级配 A,B,C,均满足沥青混合料级配范围,所以,级配 A,B,C 可以作为设计级配。按照规范的规定,经计算级配 A 的初始沥青用量为 6.1%,级配 B 的初始沥青用量为 5.5%,级配 C 的初始沥青用量为 4.5%,三组级配聚酯纤维添加量均为混合料质量的 0.25%,按照规范及 OGFC-13 热拌沥青混合料室内拌和及成型温度,双面各击实 50 次制作马歇尔试件,采用体积法测定试件的空隙率、并测定试件的马歇尔稳定度、流值等指标,试验结果如表 4 所示。

表4 热拌排水沥青混合料各级配试验结果

Tab.4 Results of hot mix porous asphalt mixture at all levels

| 级配类型 | 沥青用量/% | 稳定度/kN | 流值/0.1 mm | 空隙率/% | 毛体积相对密度 | 计算理论相对密度 |
|------|--------|--------|-----------|-------|---------|----------|
| A    | 6.1    | 5.5    | 41.3      | 15.0  | 2.207   | 2.595    |
| B    | 5.5    | 6.4    | 42.6      | 21.0  | 2.072   | 2.624    |
| C    | 4.5    | 5.2    | 38.4      | 27.2  | 1.943   | 2.669    |

为保证路面的路用性能,压实度不能太高,亦不能太低,定为18%~25%之间,由表4的试验结果可以看出,级配A,B,C的稳定度均大于3.5满足施工规范<sup>[11]</sup>要求,级配C的空隙率大于要求的上限25%,级配A的空隙率小于要求的下限18%,结合工程经验选择级配B为设计级配。

3 最佳油石比的确定

根据B的设计级配,按照5种油石比(4.3%,4.8%,5.3%,5.8%,6.3%),聚酯纤维掺加量分别为混合料质量的0.25%,双面各压实50次制作马歇尔试件,并进行空隙率、肯塔堡飞散损失、马歇尔稳定度等相关指标试验。

根据空隙率、马歇尔稳定度试验、谢伦堡沥青析漏试验和肯塔堡飞散试验结果分别绘制稳定度、空隙率、析漏损失、飞散损失与油石比的关系曲线,从曲线上得出满足规范规定指标要求的油石比范围,如图1~图5所示。

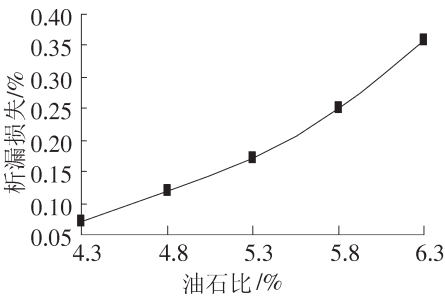


图1 油石比与析漏损失关系图

Fig.1 The relation of asphalt content and condensate drain loss

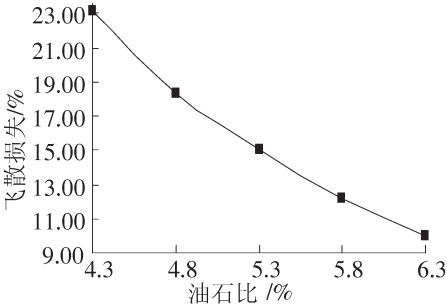


图2 油石比与飞散损失关系图

Fig.2 The relation of asphalt content and cantabro loss

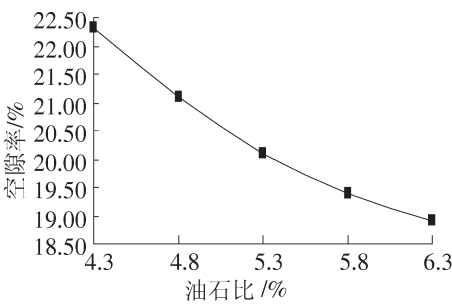


图3 油石比与空隙率关系图

Fig.3 The relation of asphalt content and void content

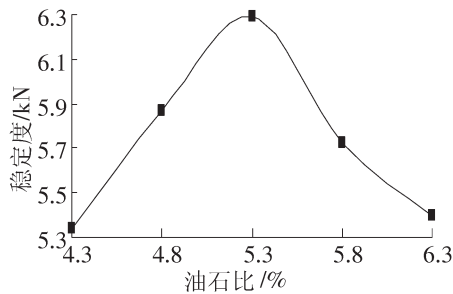


图4 油石比与稳定度关系图

Fig.4 The relation of asphalt content and stability

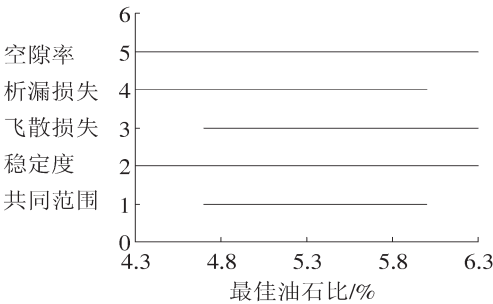


图5 空隙率、析漏损失、飞散损失、稳定度与油石比的关系

Fig.5 The relation of asphalt content and condensate drain loss

由图1~图5得出各项指标均满足要求的油石比范围为4.7%~6.0%,其中值为5.35%。由图3可得油石比为5.35%时空隙率为19.9%,与期望空隙率20%差值为0.1%,满足规范规定的空隙率与期望空隙率的差值不宜超过±1%的要求。考虑当地的气候条件及工程特点取最佳油石比为5.4%。

4 GFC-13热拌沥青混合料性能试验验证

进行最佳油石比下的马歇尔试验、谢伦堡沥青析漏试验、肯塔堡飞散试验和车辙试验来验证OGFC-13热拌沥青混合料的性能。其试验结果如表5~表7所示。

表5 马歇尔试验结果  
Tab.5 The results of Marshall test

| 混合料类型     | 油石比/% | 稳定度/kN | 流值/0.1 mm | 空隙率/% | 毛体积相对密度 | 计算理论相对密度 |
|-----------|-------|--------|-----------|-------|---------|----------|
| 热拌OGFC-13 | 5.4   | 6.16   | 55.4      | 19.8  | 2.117   | 2.64     |

表6 谢伦堡析漏试验、肯塔堡飞散试验结果  
Tab.6 The results of condensate drain and Cantabro test

| 混合料类型     | 油石比/% | 析漏损失/% | 肯塔堡飞散损失/% |
|-----------|-------|--------|-----------|
| 热拌OGFC-13 | 5.4   | 0.2    | 14.8      |

表7 动稳定度试验结果  
Tab.7 The result of dynamic stability test

| 混合料类型     | 油石比/% | 车辙动稳定度/(次·mm <sup>-1</sup> ) | 要求     | 变异系数/% |
|-----------|-------|------------------------------|--------|--------|
| 热拌OGFC-13 | 5.4   | 4 442                        | ≥3 000 | 2.80   |

由试验结果可以看出级配B的热拌沥青混合料马歇尔试验的空隙率为19.8%,与期望空隙率20%差值为0.2%,满足规范规定的空隙率与期望空隙率的差值不宜超过±1%的要求。谢伦堡析漏试验的析漏损失、肯塔堡飞散试验的飞散损失以及动稳定度试验的结果都满足施工规范<sup>[1]</sup>所规定的实验值,所以,级配B和油石比5.4%即为热拌沥青混合料的目标配合比和最佳油石比。将实验所得的目标配合比和最佳油石比用在温拌沥青混合料进行试验。

5 GFC-13温拌沥青混合料试验

本部分主要根据热拌沥青混合料的试验结果,对于温拌沥青混合料决定采用油石比5.4%,温拌剂掺量为沥青质量的2.5%的OGFC-13温拌沥青混合料按照室内拌合及成型温度(如表8所示)制作马歇尔试件,测定毛体积密度、空隙率、稳定度、流值等指标,结果如表9所示。

表8 OGFC-13温拌沥青混合料室内拌和及成型温度  
Tab.8 The temperature of warm mix asphalt mixture mixing and compaction

| 集料(包括矿粉)加热温度 | 沥青加热温度 | 混合料拌和温度 | 试模预热温度 | 成型温度 | 沥青加热温度 |
|--------------|--------|---------|--------|------|--------|
| 160          | 170    | 160     | 160    | 155  | 160    |

表9 马歇尔试验结果  
Tab.9 The result of Marshall test

| 混合料类型     | 油石比/% | 稳定度/kN | 流值/0.1 mm | 空隙率/% | 毛体积相对密度 | 计算理论相对密度 |
|-----------|-------|--------|-----------|-------|---------|----------|
| 温拌OGFC-13 | 5.4   | 6.0    | 56.2      | 20.6  | 2.096   | 2.640    |

从表9的实验结果可以看出,空隙率为20.6%满足与期望空隙率20%差值为0.6%,满足规范要求,稳定

度大于3.5 kN也满足规范要求,对温拌OGFC-13沥青混合料进行性能试验研究,采用油石比为5.4%,温拌剂掺量为沥青质量的2.5%的温拌OGFC-13沥青混合料按照表8室内拌合及成型温度进行谢伦堡沥青析漏试验、肯塔堡飞散试验、车辙试验检验温拌OGFC-13沥青混合料的性能,试验结果如表10和表11所示。

表 10 谢伦堡析漏试验、肯塔堡飞散试验结果  
Tab.10 The results of Orenburg asphalt analyze leakage and Kentucky Fort

| 混合料类型     | 油石比/% | 析漏损失/% | 肯塔堡飞散损失/% |
|-----------|-------|--------|-----------|
| 温拌OGFC-13 | 5.4   | 0.2    | 15.6      |

表 11 动稳定度试验结果  
Tab.11 The result of dynamic stability test

| 混合料类型     | 油石比/% | 车辙动稳定度/(次·mm <sup>-1</sup> ) | 要求/(次·mm <sup>-1</sup> ) | 变异系数/% |
|-----------|-------|------------------------------|--------------------------|--------|
| 温拌OGFC-13 | 5.4   | 3 992                        | ≥3 000                   | 3.5    |

从表11可以看出温拌排水沥青混合料的析漏损失和飞散损失比热拌排水沥青混合料的析漏损失和飞散损失略有提高,但是其数值的波动范围满足沥青混合料施工规范的要求且都满足规范要求(析漏损失小于0.3%,肯塔堡飞散损失小于20%)。从表12中可以看出温拌沥青混合料的动稳定度比热拌沥青混合料的动稳定度低,但是也满足规范规定的动稳定度大于等于3 000 次·mm<sup>-1</sup>的要求。由实验结果可以判断热拌OGFC-13沥青混合料的目标配合比设计方法即马歇尔设计方法,适用于温拌OGFC-13沥青混合料的目标配合比设计。

6 结论

通过混合料级配调试以及试验结果的分析,表明所设计的温拌OGFC-13排水沥青混合料的性能均满足《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40-2004)的要求,本研究主要通过热拌沥青混合料马歇尔设计方法确定温拌沥青混合料的级配和最佳油石比,并进行性能试验,所得的结论主要有:

- 1) 本研究得到了温拌OGFC-13排水沥青混合料的目标配合比,并进行了相关的性能试验验证。
- 2) 热拌沥青混合料的配合比设计的方法适用于温拌沥青混合料配合比设计,热拌沥青混合料的最佳油石比能作为温拌沥青混合料的最佳油石比。
- 3) 由性能实验数据的分析可知,在相同的级配条件下,温拌沥青混合料的性能指标比热拌沥青混合料略逊一筹,且空隙率会略微提高,但是,各项指标均能满足热拌沥青混合料的技术要求。

参考文献:

[1] 王高永. 多孔沥青混凝土路面的调研分析[J]. 国外建材科技,2008,29(5):4-6.

[2] 王旭东. 低噪声沥青路面结构设计研究[J]. 公路交通科技,2003(1):33-37.

[3] ZAUMANIS M, JANSEN J, HARITONOV V, et al. Development of calculation tool for assessing the energy demand of warm mix asphalt[J]. Procedia-Social and Behavioral Sciences,2012,48:163-172.

[4] 徐世法,严彬,季节,等. 高节能低排放型温拌沥青混合料的技术现状与应用前景[J]. 公路,2005(7):195-198.

[5] 林波,李玉龙. 大空隙排水沥青路面配合比设计与实施[J]. 公路工程,2008,33(2):111-113.

[6] 文思源,苏明,叶奋. 温拌布敦岩沥青混合料路用性能研究[J]. 华东交通大学学报,2011,28(1):48-51.

[7] 袁光权,王瑞林,高全明. 温拌沥青混合料配合比设计研究及性能评价[J]. 山西建筑,2012,38(12):126-127.

[8] 黄文通,王端宜,王邵怀,等. 排水层沥青混合料设计与透水性能评价[J]. 石油沥青,2003,17(4):53-55.

[9] 许菲菲,刘黎萍,唐海威,等. 温拌沥青混合料与热拌沥青混合料性能对比[J]. 公路工程,2009,34(3):73-75.

[10] 中华人民共和国行业标准. 公路工程沥青及沥青混合料试验规程(JTGE20-2011) [S]. 北京:人民交通出版社,2011.

[11] 中华人民共和国行业标准. 公路沥青路面施工技术规范(JTG F40-2004)[S]. 北京:人民交通出版社,2004.

(下转第53页)

- [2] 王艺,陈辉,李明. 高速列车制动盘制动过程数值模拟设计与研究[J]. 机械,2008,35(3):82-85.
- [3] 赵海燕,张海泉,汤晓华. 快速列车制动热过程有限元分析[J]. 清华大学学报,2005,45(5):588-592.
- [4] 马思群,兆文忠,谢素明,等. 列车制动盘热耦合过程的数值仿真[J]. 机械设计与制造,2003(4):71-72.
- [5] 卢奕志,刘永明. 车轮与曲线钢轨接触的有限元分析[J]. 华东交通大学学报,2011,28(5):18-22.
- [6] 苏航,季怀中,张永权. 高速列车车轮钢摩擦热致相变的计算机模拟[J]. 金属学报,2004(9):909-914.
- [7] 齐万明. 轮轨热接触耦合问题的有限元分析[D]. 大连:大连交通大学,2009:11-18.
- [8] 冯大建. 地铁车转向架构架的疲劳强度分析[C]//上海:Altair 2010 HyperWorks技术大会论文集,2010:1-5.

## The Analysis of Elastic Wheels on Compression-shear Urban Rails

Wang Yang

(The Urban Mass Transit & Railway Research Institute, Tongji University, Shanghai 201804, China)

**Abstract:** To explore the effects of wheel/rail contact temperature rise on elastic wheels in operation, this paper firstly established the elastic wheel/rail three-dimensional thermal contact coupling finite element model, then adopted the heat transfer calculation method on the basis of the overall input heat flux and convection heat transfer calculation model, and finally analyzed the temperature distribution nearby elastic wheels of the vehicles at the designed speed of 100 km/h under three conditions, such as in full slip brake, creep brake and operation. The results showed that in the skid brake and long time smooth running process, the equilibrium temperature of all parts of the elastic wheels is in allowable temperature range; when in the whole sliding process of emergency braking, wheel/rail temperature increased sharply, which would lead to tread wear and accelerate the wheel elastic element aging.

**Key words:** elastic wheel; finite element method; heat transfer analysis

(上接第39页)

## A Study on the Target Mix Ratio of Warm Porous Mix Asphalt

Che Changwei, Chen Jingya, Chen Jun, Gao Xiaoyue

(College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** This paper tries to study the target mix proportion of warm porous mix asphalt, taking the warm porous mix asphalt OGFC-13 in Changzhou as the experiment object. First, the Marshall method is adopted to determine the design gradation of OGFC-13 with 20% target porosity and the optimum asphalt content under the condition of hot-mix OGFC-13 design gradation. Then the relevant result is applied to mold the OGFC-13 Marshall specimens of 20% porosity under the warm mix condition. Finally the validity of the target mix proportion of the warm mix OGFC-13 is verified through Marshall stability test, Orenburg asphalt leakage test, Kentucky Fort flying test and rutting tests. According to data comparison between warm and hot mix asphalt, the study finds out whether the Marshall method of the hot mix asphalt is suitable for warm mix asphalt.

**Key words:** warm porous mix asphalt; mix proportion design; the best ratio of asphalt and aggregate; experimental verification