

# 机制砂与沥青黏附性评价方法研究

熊宏玲

(青海省公路科研勘测设计院, 青海 西宁 810001)

**摘要:**为了评价机制砂与沥青的黏附性,通过采用湿轮磨耗试验和IPP图像处理技术,以采集的湿轮磨耗后试件表面数字图像为研究对象,根据磨耗区域内图像表面颜色的差异,利用IPP图像处理技术计算沥青膜的剥落面积,进而计算沥青膜剥落率 $\rho$ ,作为机制砂与沥青之间黏附性的评价指标,并研究湿轮磨耗试验的适用性、试验条件和机制砂与沥青黏附性等级的划分标准。结果表明:当磨耗时间为600 s、试验温度为20℃时,湿轮磨耗试验能够作为评价机制砂与沥青黏附性的试验方法。机制砂与沥青黏附性等级的划分标准为: $0 \leq \rho \leq 20\%$ ,黏附性为5级; $20\% \leq \rho \leq 40\%$ ,黏附性为4级; $40\% \leq \rho \leq 60\%$ ,黏附性为3级; $60\% \leq \rho \leq 80\%$ ,黏附性为2级; $80\% \leq \rho \leq 100\%$ ,黏附性为1级。

**关键词:**道路工程;机制砂;沥青;黏附性;湿轮磨耗试验;IPP图像处理技术;沥青膜剥落率

机制砂的物理性能优良,常作为细集料应用于高等级公路中。机制砂作为沥青混合料中的细集料,对沥青混合料的路用性能影响较大,尤其是与沥青的黏附性对沥青混合料水稳性能具有较大影响。JTG F40—2004《公路沥青路面施工技术规范》规定了沥青混合料中粗集料与沥青的黏附性标准,并未规定沥青混合料中细集料或机制砂与沥青的黏附性标准,且JTG E20—2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》中未规定细集料与沥青黏附性的试验方法。不少学者和专家对细集料和沥青的黏附性进行了研究。严家伋采用光电比色法评价细集料与沥青的黏附性,美国SHRP计划采用SHRP净吸附法评价细集料与沥青的黏附性,其原理与光电比色法相似,这两种试验方法操作复杂,对人员要求高,且试验时间较长;周卫峰采用甲苯溶剂对混合料进行洗涤,检测混合料上剩余的沥青含量,从而通过这种溶剂洗脱法检测细集料与沥青的黏附性,但该方法离散性较大。

为研究机制砂与沥青黏附性的评价标准,采用湿轮磨耗试验并对试验条件进行研究,以采集的湿轮磨耗后试件表面数字图像为研究对象,根据磨耗区域内图像表面颜色的差异,利用IPP图像处理技术计算沥青膜的剥落面积,进而计算沥青膜剥落率,将其作为机制砂与沥青黏附性的评价指标;根据沥青混合料水稳性能与沥青膜剥落率的相关性提出机制砂与沥青黏附

性等级的划分标准,以此作为评价机制砂性能的指标之一。

## 1 研究方案和原材料

### 1.1 研究方案

为研究机制砂与沥青黏附性的试验方法、评价指标和评价标准,采用湿轮磨耗试验进行研究。

(1) 提出机制砂与沥青黏附性的评价指标——沥青膜剥落率及其计算方法。

(2) 研究磨耗时间、水温对沥青剥落率的影响,确定湿轮磨耗试验的条件。

(3) 通过水煮法和不同集料组合的沥青混合料的水稳性能,分析研究湿轮磨耗试验的适用性。

(4) 根据湿轮磨耗试验和水煮法测得的机制砂与粗集料的沥青膜剥落率的相关性,提出机制砂与沥青黏附性分级标准。

### 1.2 原材料

(1) 沥青。为消除试验的差异性,研究中所进行的试验均采用两种沥青:SK90<sup>#</sup>道路石油沥青和壳牌SBS(I-C)改性沥青,其技术指标如表1、2所示。

(2) 集料。为消除试验的差异性,冻融劈裂试验中粗集料和机制砂(0~3 mm)采用3种岩质集料,粗集料岩质分别为辉绿岩、闪长岩、角闪岩,机制砂岩质

| 表 1 SK90 <sup>#</sup> 基质沥青技术指标 |        |       |        |
|--------------------------------|--------|-------|--------|
| 试验项目                           | 单位     | 实测值   | 技术标准   |
| 针入度(25 ℃,100 g,5 s)            | 0.1 mm | 82    | 80~100 |
| 软化点 $T_{R\&B}$                 | ℃      | 48.0  | ≥45    |
| 延度(5 cm/min,15 ℃)              | cm     | ≥100  | >100   |
| 闪点(COC)                        | ℃      | 320   | ≥245   |
| TFOT(163 ℃,300 min)            | %      | -0.05 | ≤±0.8  |
| 质量损失                           |        |       |        |

分别为石灰岩、辉绿岩、闪长岩,其主要技术指标如表 3、4 所示。

3 种不同岩性机制砂的主要化学成分含量见表 5。

| 表 2 SBS(I-C) 改性沥青技术指标 |        |       |      |
|-----------------------|--------|-------|------|
| 试验项目                  | 单位     | 实测值   | 技术标准 |
| 针入度(25 ℃,100 g,5 s)   | 0.1 mm | 60~80 | 72   |
| 软化点 $T_{R\&B}$        | ℃      | 87.5  | ≥55  |
| 延度(5 cm/min,5 ℃)      | cm     | 36    | ≥30  |
| 闪点(COC)               | ℃      | 328   | ≥230 |
| TFOT 弹性恢复(25 ℃)       | %      | 98    | ≥65  |
| (163 ℃, 300 min) 质量损失 |        |       |      |
|                       | %      | 0.006 | ≤1.0 |

(3) 矿粉  
试验采用石灰岩质矿粉,其主要技术指标见表 6。

| 表 3 粗集料技术指标 |         |       |       |       |       |       |
|-------------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 指标          | 单位      | 试验值   |       |       |       | 技术标准  |
|             |         | 石灰岩   | 辉绿岩   | 角闪岩   | 闪长岩   |       |
| 集料压碎值       | %       | 16.4  | 15.3  | 13.4  | 15.4  | ≤26   |
| 洛杉矶磨耗损失     | %       | 15.6  | 12.5  | 11.3  | 13.8  | ≤28   |
| 表观相对密度      |         | 2.654 | 2.906 | 2.987 | 2.812 | ≥2.60 |
| 针片状颗粒含量     | 混合料     | %     | 5.9   | 4.8   | 5.3   | 6.2   |
|             | >9.5 mm | %     | 4.7   | 3.6   | 4.2   | 4.9   |
|             | <9.5mm  | %     | 9.3   | 8.1   | 8.9   | 9.6   |

| 表 4 机制砂技术指标     |      |       |       |       |       |
|-----------------|------|-------|-------|-------|-------|
| 指标              | 单位   | 试验值   |       |       | 技术标准  |
|                 |      | 石灰岩   | 闪长岩   | 辉绿岩   |       |
| 表观相对密度          |      | 2.745 | 2.914 | 2.947 | ≥2.50 |
| 坚固性(>0.3 mm 部分) | %    | 7.2   | 6.5   | 6.6   | ≤12   |
| 亚甲蓝值            | g/kg | 3.2   | 3.6   | 4.3   | ≤25   |
| 棱角性(流动时间)       | s    | 39    | 42    | 41    | ≥30   |

| 表 5 机制砂主要化学成分 |                     |       |       |                                   |
|---------------|---------------------|-------|-------|-----------------------------------|
| 岩性            | SiO <sub>2</sub> /% | CaO/% | MgO/% | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /% |
| 石灰岩           | 5.0                 | 50.6  | 2.6   | 3.8                               |
| 辉绿岩           | 57.1                | 6.6   | 4.1   | 10.5                              |
| 闪长岩           | 53.0                | 7.2   | 4.6   | 13.4                              |

(4) 级配  
冻融劈裂试验采用 AC-13 沥青混合料,沥青混合料油石比采用 4.6%,其设计级配如表 7 所示;湿轮磨耗试验中沥青砂浆的油石比采用 9.0%,机制砂级配如表 7 所示。

| 表 6 矿粉技术指标    |                   |       |        |
|---------------|-------------------|-------|--------|
| 指标            | 单位                | 试验值   | 技术标准   |
| 表观密度          | g/cm <sup>3</sup> | 2.726 | ≥2.50  |
| 含水量           | %                 | 0.4   | ≤1.0   |
| <0.6 mm       | %                 | 100   | 100    |
| 粒度范围 <0.15 mm | %                 | 95.4  | 90~100 |
| <0.075 mm     | %                 | 85.3  | 75~100 |
| 亲水系数          |                   | 0.4   | <1     |
| 塑性指数          |                   | 2.0   | <4     |

表 7 混合料、集料级配

| 混合料<br>及集料 | 通过下列各筛孔(mm)的质量百分率/% |      |     |      |      |      |     |     |      |       |
|------------|---------------------|------|-----|------|------|------|-----|-----|------|-------|
|            | 16                  | 13.2 | 9.5 | 4.75 | 2.36 | 1.18 | 0.6 | 0.3 | 0.15 | 0.075 |
| AC—13      | 100                 | 94   | 71  | 44   | 34   | 20   | 15  | 12  | 8    | 4     |
| 机制砂        | —                   | —    | —   | 100  | 95   | 62   | 38  | 21  | 12   | 5     |

2 评价指标的提出

JTG E20—2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》根据粗集料表面沥青膜剥离面积百分率作为黏附性等级的分级依据,因此在研究机制砂与沥青的黏附性时,也采用沥青膜剥落率作为黏附性评价指标。

2.1 评价指标

采用沥青膜剥落率评价机制砂与沥青黏附性。沥青膜剥落率为沥青膜剥落面积与试件磨耗面积之比,其计算公式如(1)所示:

$$\rho=\frac{A_1}{A_2}\times100\%$$
 (1)

式中: $\rho$  为沥青膜剥落率(%); $A_1$  为沥青膜剥落区域面积; $A_2$  为试件磨耗区域面积。

2.2 沥青膜剥落率的计算方法

由于机制砂颗粒较小,机制砂表面沥青膜剥落区域更小,且形状不规则,采用常规的方法很难准确测量其面积。随着计算机技术的发展,Image—Pro Plus (IPP)图像处理软件能够分析形状各异的物体,且能精确计算其面积。因此利用 IPP 图像处理技术计算沥青膜剥落率,其原理为:机制砂表面沥青膜剥落区域的颜色成白色或灰白色,未剥落区域的颜色为黑色,IPP 图像处理软件能够计算出不同颜色区域的面积,从而得到沥青膜剥落区域的面积  $A_1$  和未剥落区域的面积  $A_0$ 。

$$\rho=\frac{A_1}{A_0+A_1}\times100\%$$
 (2)

3 湿轮磨耗试验条件研究

由于机制砂颗粒较小,水煮法不能测出其表面的沥青膜剥落面积。若无外力和水的作用,集料表面的沥青膜不会轻易剥落,因此在选择试验方法时应考虑其是否能施加荷载作用且试验条件与水环境相关。湿轮磨耗试验能够满足沥青膜剥落所需的条件,即荷载作用和水环境。磨耗时间能模拟荷载作用对集料表面

沥青膜的作用,水温对沥青膜剥落产生影响。因此通过研究磨耗时间与水温对沥青膜剥落率的影响规律确定湿轮磨耗试验的最佳条件。

3.1 磨耗时间对沥青膜剥落率的影响

采用石灰岩、辉绿岩、闪长岩机制砂成型试件,油石比为 9.0%,每种机制砂成型 3 组试件。磨耗时间为变量,分别设为 300、400、500、600、700、800 s,水温为 20℃。将试验后的试件风干、成像,利用 IPP 图像处理技术计算沥青膜剥落率,试验结果见表 8。

表 8 不同磨耗时间的沥青膜剥落率

| 机制砂<br>的类型 | 不同磨耗时间(s)下的平均沥青膜剥落率/% |      |      |      |      |      |
|------------|-----------------------|------|------|------|------|------|
|            | 300                   | 400  | 500  | 600  | 700  | 800  |
| 石灰岩        | 9.8                   | 13.4 | 16.8 | 18.7 | 19.0 | 19.2 |
| 辉绿岩        | 31.3                  | 35.4 | 39.5 | 42.1 | 42.7 | 42.9 |
| 闪长岩        | 19.8                  | 23.8 | 27.5 | 30.2 | 30.5 | 30.8 |

从表 8 可知:石灰岩、辉绿岩、闪长岩机制砂试件的沥青膜剥落率均随磨耗时间的增加而增大。当磨耗时间为 300~600 s 时,沥青膜剥落率增大速率较快;当磨耗时间为 600~800 s 时,沥青膜剥落率增大速率较为平缓,趋于稳定。

当湿轮磨耗试验时间为 600 s 时,沥青膜在有效的时间内剥落效果最好,因此,取湿轮磨耗试验的磨耗时间为 600 s。

3.2 水温对沥青膜剥落率的影响

基于上述研究,取湿轮磨耗试验时间为 600 s,进一步研究水的温度对沥青膜剥落率的影响。

采用石灰岩、辉绿岩、闪长岩机制砂成型试件,油石比为 9.0%,每种机制砂成型 3 组试件进行湿轮磨耗试验,磨耗时间为 600 s。将水温作为变量,分别设为 10、15、20、25、30℃。将试验后的试件进行风干,然后成像,利用 IPP 图像处理技术计算沥青膜剥落率,试验结果如表 9 所示。

从表 9 可得:当水温由 10℃增加到 30℃时,3 种试件的沥青膜剥落率分别增加了 1.7%、1.6%、2.0%,变化幅度较小。表明水的温度对沥青膜剥落率

表 9 不同水温的沥青膜剥落率

| 机制砂的<br>类型 | 不同水温(℃)下的沥青膜剥落率/% |      |      |      |      |
|------------|-------------------|------|------|------|------|
|            | 10                | 15   | 20   | 25   | 30   |
| 石灰岩        | 17.5              | 17.8 | 18.7 | 19.1 | 19.2 |
| 辉绿岩        | 40.3              | 41.5 | 42.1 | 42.3 | 41.9 |
| 闪长岩        | 28.7              | 29.6 | 30.2 | 30.5 | 30.7 |

影响很小,而且室温大约为 20 ℃,因此将湿轮磨耗试验中水的温度定为 20 ℃。

综上所述,湿轮磨耗试验的条件为:磨耗时间为 600 s,水的温度为 20 ℃。

4 湿轮磨耗试验的适用性分析

4.1 试验方案设计

为验证湿轮磨耗试验方法能有效评价机制砂与沥青的黏附性,从以下几方面进行验证。

(1) 采用表 7 的机制砂级配成型沥青砂浆试件,采用 SK90# 基质沥青,油石比采用 9.0%,利用湿轮磨耗试验方法测定石灰岩、辉绿岩、闪长岩机制砂试件的沥青膜剥落率;采用水煮法测定对应岩性粗集料(9.5~13 mm)与沥青的黏附性(采用图像处理技术计算沥青膜剥落率),研究二者之间的相关性。

(2) 分析沥青膜剥落率与沥青混合料水稳定性能的相关性。

(3) 水稳定性能试验:粗、细集料均采用石灰岩、辉绿岩、闪长岩,矿粉含量均为 4.0%,沥青混合料为 AC-13,油石比为 4.5%。沥青为 SBS 改性沥青,成型 9 组不同岩质的沥青混合料马歇尔试件,粗集料与机制砂含量、级配均保持一致,合成级配如表 7 中 AC-13 级配所示,进行冻融劈裂试验检测不同试件的残留强度比,并分析其与沥青膜剥落率的相关性。

4.2 试验结果分析

(1) 水煮法。不同粗集料的水煮法试验结果如表 10 所示。

表 10 不同粗集料的沥青膜剥落率

| 集料  | 沥青膜剥落率/% |      |      |
|-----|----------|------|------|
|     | 石灰岩      | 辉绿岩  | 闪长岩  |
| 机制砂 | 18.1     | 42.3 | 37.2 |
| 粗集料 | 0.8      | 9.6  | 5.5  |

从表 10 可知:采用水煮法测得的粗集料表面沥青膜剥落率,石灰岩最小,其次为闪长岩,辉绿岩最大。

采用湿轮磨耗试验测得的 3 种岩质机制砂表面沥青膜剥落率结果与采用水煮法测得的结果一致,表明此评价方法具有可行性。

(2) 不同集料组合的沥青混合料水稳定性能分析冻融劈裂试验结果见表 11。

表 11 不同集料的冻融劈裂试验结果

| 粗集料 | 不同机制砂的冻融劈裂试验残留强度比/% |      |      |
|-----|---------------------|------|------|
|     | 石灰岩                 | 辉绿岩  | 闪长岩  |
| 石灰岩 | 87.6                | 79.6 | 83.4 |
| 辉绿岩 | 81.6                | 76.3 | 77.2 |
| 闪长岩 | 83.5                | 76.8 | 78.4 |

由表 11 可得:当粗集料相同时,机制砂为石灰岩时沥青混合料的冻融劈裂试验残留强度比最大,水稳定性能最好,其次是闪长岩,机制砂为辉绿岩时沥青混合料的冻融劈裂试验残留强度比最小,水稳定性能最差。与湿轮磨耗试验的结果一致,因此湿轮磨耗试验作为评价机制砂与沥青黏附性的方法是可行的。

综上所述,湿轮磨耗试验能够评价机制砂与沥青的黏附性。

5 机制砂与沥青黏附性分级标准研究

JTG E20-2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》中根据粗集料表面沥青膜剥离面积百分率作为黏附性等级的分级依据,共分为 5 个等级:① 5 级,沥青膜剥落率接近 0;② 4 级,沥青膜剥落率为 0~10%;③ 3 级,沥青膜剥落率为 10%~30%;④ 2 级,沥青膜剥落率大于 30%;⑤ 1 级,集料裸露,沥青膜浮于水面。

根据表 9 的试验结果,研究由湿轮磨耗试验和水煮法测得的沥青膜剥落率的相关性,并进行回归分析,得到两者之间的回归方程,根据粗集料与沥青黏附性等级的分级标准划分机制砂与沥青的黏附性等级。

以石灰岩、闪长岩、辉绿岩 3 种岩石为对象,研究由湿轮磨耗试验测得的机制砂表面沥青膜剥落率与由水煮法测得的粗集料表面沥青膜剥落率的相关性。每种岩性集料粗集料与细集料的黏附性进行 3 组平行试验,然后进行回归分析,试验结果如图 1 所示。

由图 1 可知:粗集料表面沥青膜剥落率与机制砂表面沥青膜剥落率之间的回归方程如下:

$$y=0.013\ 3x^2-0.350\ 7x+2.700\ 7\tag{3}$$

式中: $x$ 为机制砂表面沥青膜剥落率(%); $y$ 为粗集料



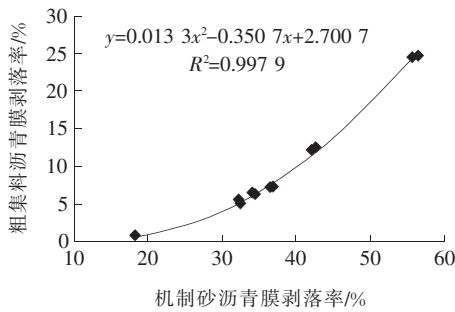


图 1 沥青膜剥落率的相关性

表面沥青膜剥落率(%)。

根据回归方程和粗集料黏附性等级的划分标准可得机制砂与沥青黏附性等级的划分标准(表 12)。

表 12 机制砂与沥青的黏附性等级划分

| 沥青膜剥落率 $\rho$ / % | 黏附性等级 / 级 |
|-------------------|-----------|
| [0,20)            | 5         |
| [20,40)           | 4         |
| [40,60)           | 3         |
| [60,80)           | 2         |
| [80,100]          | 1         |

6 结 论

采用湿轮磨耗试验和 IPP 图像处理技术评价机制砂与沥青的黏附性,提出机制砂与沥青黏附性等级的划分标准,以此作为机制砂选用的标准之一。

(1) 湿轮磨耗试验作为评价机制砂与沥青黏附性的试验方法,试验条件为磨耗时间 600 s,水温 20 ℃;沥青膜剥落率作为评价指标。

(2) 通过相应岩性粗集料与沥青的黏附性、沥青混合料的水稳定性性能试验也验证了该方法评价机制砂与沥青黏附性的可行性。

(3) 根据机制砂表面沥青膜剥落率与粗集料表面沥青膜剥落率的相关性,提出了机制砂与沥青黏附性等级的划分标准。

虽然该文中采用相关性研究机制砂与沥青黏附性等级的划分标准,但还需进一步研究机制砂与沥青黏附性等级对沥青混合料路用性能的影响,采用不同黏附性等级的机制砂铺筑试验段,从理论和实践上分析该评价方法的效果,进而为施工材料的选择提供指导意见。

参考文献:

[1] 严家伋. 光电分光光度法测定沥青与石料黏附性的研究[J]. 同济大学学报, 1978(4).

[2] Anthony D. Stakston, Hussain U. Bahia, and Jared J. Bushek. Effect of Fine Aggregate Angularity on Compaction and Shearing Resistance of Asphalt Mixtures[R]. Transportation Research Record, 2002.

[3] 李智, 苏冠宇. 基于揉搓磨耗试验机的沥青路面宏观轮廓试验研究[J]. 中外公路, 2018(6).

[4] 原宝盛, 安会善. 花岗岩沥青面层在旧水泥混凝土路面加铺改造中的应用研究[J]. 中外公路, 2017(2).

[5] 周卫峰. 沥青与集料界面粘附性研究[D]. 长安大学硕士学位论文, 2002.

[6] 房士伟. 机制砂在沥青混合料中的适应性研究[D]. 长安大学硕士学位论文, 2015.

[7] 韩海峰, 吕伟民. 细集料棱角性对沥青混合料性能的影响[J]. 同济大学学报, 2002(3).

[8] 魏文鼎, 冯德成, 赵银, 等. 细集料性质对沥青混合料体积特性影响分析[J]. 中外公路, 2011(6).

[9] 封晨辉. 沥青材料的粘度与粘附性研究[D]. 长安大学硕士学位论文, 2003.

[10] 张宜洛. 花岗岩沥青混合料水稳性解决措施研究[J]. 筑路机械与施工机械化, 2003(12).

[11] 张宜洛, 颜祖兴. 石灰、抗剥落剂对花岗岩沥青混合料水稳性影响的分析[J]. 交通标准化, 2003(9).

[12] 王大庆. 细集料几何特征参数的表征及对沥青混合料性能影响研究[D]. 哈尔滨工业大学博士学位论文, 2013.

[13] 赵岩. 沥青混合料细集料标准研究[D]. 河北工业大学硕士学位论文, 2010.

[14] 张宜洛, 颜祖兴. 不同细集料对沥青混合料性能影响研究[J]. 上海公路, 2010(4).