

# Research on the Performance and Design Method of Warm Asphalt Mixture

Fei Huang<sup>1</sup>, Hao Ju<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Nanjing Highway Construction Department, Nanjing

<sup>2</sup>Urban Roads Research Center of Nanjing, Nanjing

Email: vivian\_jh@163.com

Received: Nov. 23<sup>rd</sup>, 2012; revised: Dec. 26<sup>th</sup>, 2012; accepted: Jan. 8<sup>th</sup>, 2013

**Abstract:** In this paper, research is carried out on the compaction characteristics, design methods and performance of the surfactant class warm mix technology. Warm mix asphalt molding methods and performance evaluation are focused. AC, SMA, UTA and SUP are chosen with ordinary asphalt and modified asphalt to evaluate performance of warm mixture respectively.

**Keywords:** Surfactant; Warm Asphalt; Design Method; Pavement Performance

## 温拌沥青混合料设计方法与路用性能研究

黄菲<sup>1</sup>, 居浩<sup>2</sup>

<sup>1</sup>南京市公路建设处, 南京

<sup>2</sup>南京市城市道路建设项目储备中心, 南京

Email: vivian\_jh@163.com

收稿日期: 2012年11月23日; 修回日期: 2012年12月26日; 录用日期: 2013年1月8日

**摘要:** 针对表面活性类温拌技术的压实特性、设计方法以及性能开展了研究, 重点确定了温拌沥青混合料的成型方法和性能评价等方面内容。选择 AC、SMA、UTA 和 SUP 四类级配和普通沥青、改性沥青两种胶结料进行温拌沥青混合料性能对比分析。

**关键词:** 表面活性; 温拌沥青; 设计方法; 路用性能

### 1. 引言

表面活性类 Evotherm 温拌技术是用一种特殊的表面活性浓缩液, 可以在常温下保存。该方法施工工艺与热拌沥青混合料基本一致。用于生产这种温拌沥青混合料的温拌剂, 这些添加剂能够提高沥青与集料的裹附能力, 提高混合料的施工和易性以及粘聚能力。浓缩液的水分在与高温集料拌和过程中就以水蒸气的形态释放出去。拌和完毕的温拌沥青混合料从外观上看其裹附和颜色与热拌沥青混合料没有什么差别<sup>[1]</sup>。

2005年交通部公路科学研究院、北京市政路桥建

材集团有限公司和同济大学等单位合作开始开展研究温拌沥青混合料。起初研究的是乳化沥青温拌沥青混合料, 同年10月, 在北京国道110支线成功实施了我国第一条温拌沥青混合料试验路。一次为开端, 温拌技术在我国的研究应用逐步推广, 以基于表面活性剂的温拌沥青混合料占绝大部分。与国外的研究和国外的发展一样, 我国基于表面活性剂的温拌沥青混合料也经历了两个发展阶段, 即乳化沥青温拌法和浓缩液温拌法, 浓缩液温拌出现后, 乳化沥青温拌法就不再使用了。

表面活性类 Evotherm 温拌技术是用一种特殊的

乳化沥青来实现温拌，可以在 80℃ 左右保存，该种乳化沥青含有 70% 左右的沥青。该方法施工工艺与热拌沥青混合料基本一致。用于生产这种乳化沥青的乳化剂中含有一些添加剂，这些添加剂能够提高沥青与集料的裹附能力，提高混合料的施工和易性以及粘聚能力。乳化沥青中的水分在与高温集料拌和过程中就以水蒸气的形态释放出去。拌和完毕的温拌沥青混合料从外观上看其裹附和颜色与热拌沥青混合料没有什么差别。

Evotherm 温拌沥青技术，其核心是采用物理和化学一起作用的手段，增加沥青混合料的施工操作性，在完成混合料成型后，这些物理和化学添加剂并不对路面使用性能构成负面影响。由于 Evotherm 温拌添加剂独特的功能，使得沥青在拌和的过程中得到充分的分散，在沥青内部形成独特的水膜润滑结构，很好地实现了在较低温度下的拌和及碾压功能。

本文围绕 Evotherm 温拌沥青混合料的设计和性能开展研究，重点确定温拌沥青混合料的成型方法和性能评价等方面内容。选择 AC、SMA、UTA 和 SUP 四类级配和普通沥青、改性沥青两种胶结料进行温拌沥青混合料性能对比分析；采用现行规范中常规的性能指标评价温拌沥青混合料的路用性能。

## 2. 温拌沥青混合料压实特性研究

沥青混合料的压实特性是指其在施工碾压和使用过程中体积参数的变化程度和稳定性，它反映了混合料碾压的难易程度。采用 AFG2CS 旋转压实仪成型试件，该方法能较好的模拟现场压实，并能评价混合料在碾压过程中的体积变化状况。通过分析碾压次数、压实温度、拌和温度及温拌剂剂量对混合料体积指标的影响来反映其压实特性，这对现场施工具有重要的指导意义。

### 2.1. 试件成型

温拌沥青混合料在工作温度上有别于常规热拌沥青混合料，为探究温度对温拌及热拌压实特性的影响，根据研究需要，设定不同的拌和温度及压实温度。温拌沥青混合料试件成型步骤如下：1) 集料预热温度为 150℃，改性沥青预热温度为 165℃；2) 粗、细集料按设计级配要求称其质量，在盛样盘中混合均匀，置于已设定好温度的烘箱里预热 4 小时；3) 将集料倒

入预热至设计拌和温度的拌和锅内，用拌铲将集料拉成一斜面，露出拌和锅底部，加入定量的改性沥青到此位置，将称量好的 DAT 浓缩液倒入沥青液面上，见图 1；4) 拌和 1.5 min，加入矿粉，再拌和 1.5 min；5) 将拌和好的混合料装入盛样盘，放入烘箱，在压实温度下老化 2 小时；6) 旋转压实成型。

### 2.2. 成型温度的选择

温拌沥青混合料与热拌沥青混合料相比，由于掺入了温拌添加剂，对混合料中沥青与石料的界面起到一定的润滑作用，在适当降低沥青混合料压实温度的情况下，可以使得温拌混合料的性能等级达到热拌混合料的品质。

沥青混合料旋转压实成型温度通常用粘温曲线来确定，压实温度对应的胶结料年度为  $0.28 \pm 0.03$  Pa.s，然而对于改性沥青，此粘度范围并不适用，通常压实温度不低于 115℃，具体工程应用中压实温度必须由试验和经验确定<sup>[2]</sup>。

对于温拌沥青混合料，为确定其压实温度，本为进行室内成型温度试验，间隔 10℃ 从 120℃ 降至 80℃，通过试验结果的体积指标确定其适宜的压实温度。试验结果见表 1 和图 2。

### 2.3. 压实次数对体积指标的影响

温拌及热拌沥青混合料成型时沥青用量均采用 5.1%，在旋转压实成型过程中，电脑自动监控试件的高度，通过计算可得出不同旋转次数对应的试件压实度。绘制压实度与旋转次数的半对数坐标曲线图。当拌和温度为 150℃，压实温度分别为 80℃、140℃ 时，混合料的压实曲线如图 3 所示。

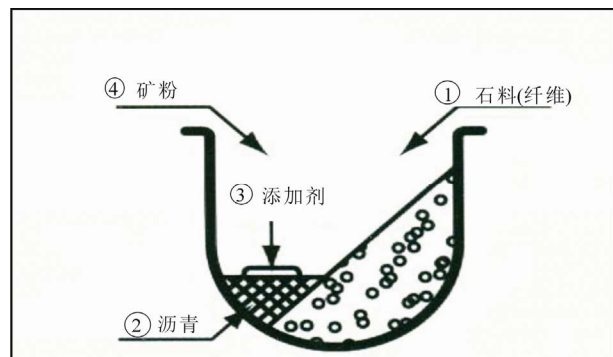


Figure 1. Order of material addition  
图 1. 材料添加顺序

Table 1. Volume statistics of warm mixture under different compaction temperature  
表 1. 不同压实温度下温拌混合料体积指标

| 成型温度(°C)   | 80  | 90  | 100 | 110 | 120 |
|------------|-----|-----|-----|-----|-----|
| 马氏击实孔隙率(%) | 7.3 | 5.9 | 5.6 | 5.6 | 5.7 |
| 旋转压实孔隙率(%) | 6.2 | 5.1 | 4.9 | 4.9 | 5   |

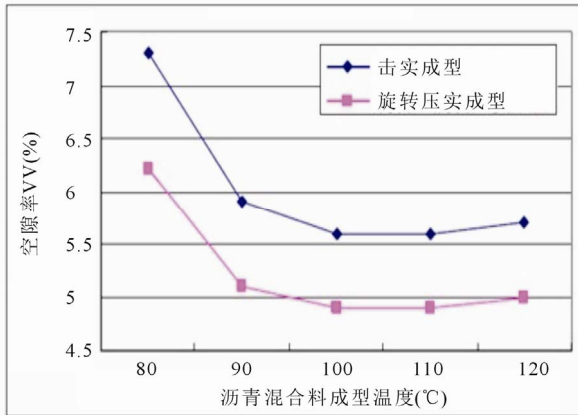


Figure 2. Experimental results under different compaction temperatures  
图 2. 不同压实温度实验结果

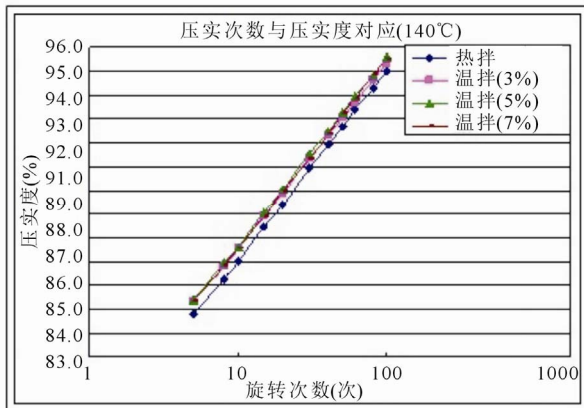
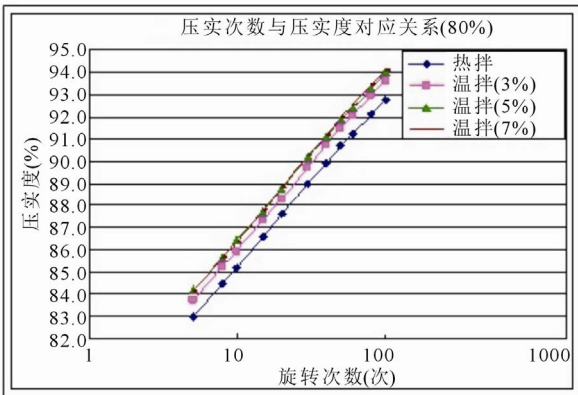


Figure 3. Curve for mix compaction  
图 3. 混合料压实曲线

压实曲线反映了沥青混合料从初始压实次数  $N_{ini} = 8$  次到设计压实次数  $N_{des} = 100$  次的压实度变化过程，即反映了混合料施工现场碾压过程的压实特性，由图 3 看出：

1) 在压实次数与压实度半对数曲线图中，随着压实次数的增加，混合料的压实度呈线性增长，且温拌与热拌沥青混合料压实度增长的速率大致相同。

2) 相同的压实次数，温拌与热拌沥青混合料相比，其压实度高于热拌沥青混合料，即在同一碾压温度和压实功作用下，温拌沥青混合料更容易被压实，施工时和易性更好。

3) 压实温度改变，温拌与热拌沥青混合料的压实度之差也随之改变，图中压实温度为  $140^{\circ}\text{C}$  时，温拌与热拌沥青混合料的压实曲线比压实温度为  $80^{\circ}\text{C}$  时更为接近。也就是压实温度越低，温拌沥青混合料容易被压实的这种特性更加明显。

4) 对于温拌沥青混合料，不同的温拌剂掺量，其压实度差异性不大，3%温拌剂掺量压实度略低于 5% 及 7%。

#### 2.4. 压实温度对体积指标的影响

温拌及热拌沥青混合料成型时沥青用量均采用 5.1%。当成型温度为  $140^{\circ}\text{C}$ 、 $120^{\circ}\text{C}$ 、 $100^{\circ}\text{C}$ 、 $80^{\circ}\text{C}$  时，分别测定成型后试件的毛体积密度，计算空隙率，结果见表 2、图 4。

分析表 2 及图 4，可以得到：

1) 无论是温拌还是热拌沥青混合料，随着压实温度的升高，其空隙率均呈现明显的下降趋势。压实温度对混合料空隙率影响较大，施工过程中应严格控制。

2) 温拌沥青混合料的空隙率曲线均在热拌混合料曲线之下，也就是，达到相同的空隙率，温拌沥青混合料的压实温度均低于热拌混合料。这是因为，温拌沥青混合料在拌和、压实过程中，DAT 添加剂内含

Table 2. Porosity results of asphalt mixture  
表 2. 沥青混合料空隙率结果

| 混合料类型    | 热拌沥青混合料 |     |     |     |     | 温拌沥青混合料 |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|----------|---------|-----|-----|-----|-----|---------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|          |         |     |     |     |     | 3%      |     | 5%  |     | 7%  |     |     |     |     |     |     |     |
| 沥青用量(%)  | 5.1     |     |     |     |     | 5.1     |     | 5.1 |     | 5.1 |     | 5.1 |     | 5.1 |     | 5.1 |     |
| 拌和温度(°C) | 165     |     |     |     |     | 150     |     | 150 |     | 150 |     | 150 |     | 150 |     | 150 |     |
| 压实温度(°C) | 150     | 140 | 120 | 100 | 80  | 140     | 120 | 100 | 80  | 140 | 120 | 100 | 80  | 140 | 120 | 100 | 80  |
| 空隙率(%)   | 4.5     | 5.0 | 5.9 | 6.6 | 7.2 | 4.6     | 5.4 | 5.7 | 6.4 | 4.4 | 5.3 | 5.4 | 6.0 | 4.4 | 5.3 | 5.5 | 5.9 |

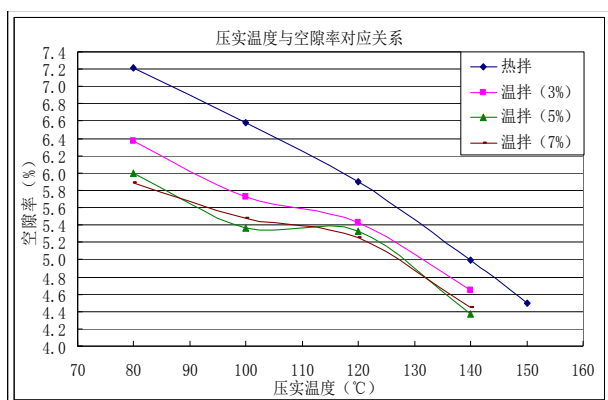


Figure 4. Compaction temperature vs. porosity  
图 4. 压实温度与空隙率

的化学包与水在热石料作用下，充分分散并形成润滑结构，降低了石料之间的摩阻力，使石料之间位置的调整更加容易，从而降低了混合料的空隙率，继而实现混合料工作温度的下降。

3) 对图 3 中的四条曲线进行三次多项式拟合，回归公式及相关系数见表 3。

高速公路 AC-13C 型沥青混合料的空隙率规范要求 4%~6% 之间，粗略推算，温拌沥青混合料比热拌沥青混合料压实温度下降幅度值见表 4。

在规范规定的空隙率范围内，温拌沥青混合料与热拌沥青混合料相比，可实现压实温度 7°C~40°C 的降低。压实温度的降低，意味着燃料消耗降低，沥青路面施工对环境的负面影响随之减小。

4) 不同温拌剂剂量对温拌沥青混合料的压实温度降低的幅度不同，5% 和 7% 剂量的比 3% 降温效果好，但也不是随着剂量的增大，降温效果无限制的加大，从图中可以看出 5% 和 7% 的降温效果相当。

5) 对于热拌沥青混合料来讲，图中的曲线具有较高的斜率，但是对于温拌沥青混合料来讲，在温度为 100°C~120°C 之间时，曲线有一个比较明显的平缓段，

这个平缓段对于沥青混合料在低温条件下的压实特性具有重要意义。当采用了温拌技术以后，在低温条件下，沥青混合料在较宽的温度范围内，压实特性对于温度不再敏感，从而可以延长低温施工的有效压实时间。

### 2.5. 拌和温度对体积指标的影响

压实温度对于温拌沥青混合料的体积指标起着至关重要的作用，而拌和温度对体积指标是否有影响，我们通过下面试验进行验证。

当温拌剂剂量为 5%，沥青用量为 4.85%，拌和温度为 145°C、135°C、125°C，压实温度为 135°C (130°C、120°C)、110°C、95°C 时分别成型试件，测得空隙率见表 5。

当拌和温度为 125°C 时，温拌沥青混合料非常粘稠，难以搅拌均匀，考虑到施工和易性，温拌沥青混合料的拌和温度不得低于 125°C<sup>[3]</sup>。

表 5 可以看出，虽然拌和温度不同，但在同一压实温度下，温拌沥青混合料的空隙率几乎相同，可以说，压实温度是决定混合料空隙率大小的主要因素，而拌和温度是保证压实温度的前提条件。

拌和温度是保证压实温度的前提条件，考虑到温拌沥青混合料的施工和易性，拌和温度不得低于 125°C。

### 3. 温拌剂对温拌沥青混合料性能影响分析

为评价温拌剂对沥青混合料的性能有何影响，本文选择的最常用的 SBS 改性沥青 AC-13 混合料，通过掺加 3%、5% 和 7% 温拌剂的温拌沥青混合料以及热拌沥青混合料从体积指标、高温性能、低温性能和水稳定性等方面进行对比分析，以此研究温拌剂对于沥青混合料性能的影响。

**Table 3. Regression equations and coefficients**  
**表 3. 曲线回归公式及相关系数**

| op     | 回归公式   | 相关系数   |
|--------|--|--------|
| 热拌     | $V_v = -1E-06T^3 + 0.0003T^2 - 0.0494T + 10.004$ | 0.9999 |
| 温拌(3%) | $V_v = -2E-05T^3 + 0.0056T^2 - 0.6199T + 28.93$  | 1      |
| 温拌(5%) | $V_v = -3E-05T^3 + 0.0101T^2 - 1.0921T + 44.513$ | 1      |
| 温拌(7%) | $V_v = -3E-05T^3 + 0.0101T^2 - 1.0921T + 44.513$ | 1      |

注：表中  $V_v$  表示为空隙率，单位：%；T 表示为温度，单位：℃。

**Table 4. Statistics about compaction temperature reduction for warm mix asphalt mixture**  
**表 4. 温拌沥青混合料压实温度降低幅度**

| 混合料类型  | 空隙率   |     |       |
|--------|-------|-----|-------|
|        | 4%    | 5%  | 6%    |
| 温拌(3%) | 10.5℃ | 7℃  | 28.5℃ |
| 温拌(5%) | 15.5℃ | 9℃  | 37℃   |
| 温拌(7%) | 13℃   | 10℃ | 40℃   |

**Table 5. Porosity of warm mix asphalt mixture**  
**表 5. 温拌沥青混合料空隙率**

| 拌和温度(℃) | 压实温度(℃)  |     |     |
|---------|----------|-----|-----|
|         | 130(135) | 110 | 95  |
| 145     | 6.2      | 6.6 | 7.6 |
| 135     | 6.2      | 6.5 | 7.7 |
| 125     | -        | -   | -   |

### 3.1. 体积指标

热拌沥青混合料和不同温拌剂产量的温拌沥青混合料体积指标试验结果见表 6。

由表 6 可见：

1) 随着温拌剂剂量的增加，混合料的空隙是逐渐减少的，即使是成型温度下降，其压实性仍较热拌更优，在同样的压实功作用下能得到更好的密实度。有关研究表明，沥青混合料空隙率每增加 1%，路面寿命减少 10%。由此可见温拌沥青混合料期望能延长沥青路面的使用寿命<sup>[4]</sup>。

2) 马歇尔试验的稳定度和流值，是沥青混合料设计中常用的技术指标。马歇尔试验结果显示，温拌混合料的稳定度低于热拌沥青混合料，流值则基本一致。需要说明的是，马歇尔稳定度和流值的力学意义不明确，其与路用性能的关联性一直受到质疑，温拌沥青混合料马歇尔指标略低于热拌沥青混合料，并不

代表其相应使用性能的降低，而可能与温拌的沥青老化相对较轻有关。

### 3.2. 高温性能

采用轮碾法成型长 300 mm、宽 300 mm、厚 50 mm 板状试件，按 JTJ052-2000《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》中规定，将试件放置 48 h 后进行车辙试验，评价其高温稳定性能，试验温度为 60℃，轮压为 0.7 MPa。车辙结果见表 7。

由表 7 可见：

1) 不管是温拌还是热拌沥青混合料，其动稳定度均远远超过规范要求，且温拌与热拌沥青混合料的动稳定度值相差不大，在-7%~3%范围内波动，因此，认为温拌沥青混合料的高温性能与热拌沥青混合料相当。

2) 随着温拌剂掺量的增加，温拌沥青混合料的动稳定度值有所增加，但不明显。

Table 6. Experimental results of volume Index  
表 6. 体积指标试验结果

| 混合料类型 | 热拌沥青混合料 | 温拌沥青混合料 |      |      | JTGF40-2004 技术要求 |
|-------|---------|---------|------|------|------------------|
|       |         | 3%      | 5%   | 7%   |                  |
| 空隙率   | 5.1     | 4.6     | 4.0  | 3.9  | 3~5              |
| VMA   | 14.9    | 14.7    | 14.6 | 14.4 | ≥14              |
| 稳定度   | 10.5    | 10.2    | 9.9  | 9.8  | ≥8               |
| 流值    | 23.1    | 24.1    | 21.8 | 21.4 | 15~40            |

Table 7. Experimental results of rutting test  
表 7. 车辙试验结果

| 混合料类型      | 热拌沥青混合料 | 温拌沥青混合料 |      |      | JTGF40-2004 技术要求 |
|------------|---------|---------|------|------|------------------|
|            |         | 3%      | 5%   | 7%   |                  |
| 动稳定度(mm/次) | 6592    | 6151    | 6351 | 6786 | ≥2500            |

### 3.3. 低温性能

采用轮碾法成型长 300 mm、宽 300 mm、厚 50 mm 板状试件，并切割成 250 mm × 30 mm × 35 mm 小梁，进行低温弯曲试验，评价其低温抗裂性能，试验温度在 -10℃、加载速率为 50 mm/min。低温弯曲试验结果见表 8。

由表 8 可见：

1) 热拌及温拌沥青混合料的破坏应变均满足规范要求，温拌与热拌沥青混合料的破坏应变值相差不大，在 1%~2% 范围内波动，认为两种青混合料的低温抗裂性能相当。

2) 不同温拌剂掺量的温拌沥青混合料其低温性能与热拌沥青混合料相差不大。

### 3.4. 水稳定性能

水稳定性能测试采用冻融劈裂试验和浸水马歇尔试验两种方法。

#### 3.4.1. 浸水马歇尔试验

按 JTJ052-2000《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》中规定，将成型好的马歇尔试件放入 60℃ 恒温水槽中，保温 48 小时与保温半小时的马歇尔试件稳定度相比较，得到马歇尔残留稳定度，具体数据见表 9。

由表 9 可见：

1) 温拌沥青混合料的残留稳定度值远远大于热

拌沥青混合料。

2) 对于温拌沥青混合料，其残留稳定度值随着温拌剂掺量的不同，呈现明显的抛物线趋势，5% 掺量时性能最优。

#### 3.4.2. 冻融劈裂试验

按 JTJ052-2000《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》中规定，冻融劈裂试件先在 -18℃ ± 2℃ 下保温 16 小时，放入 60℃ 恒温水槽中保温 24 h，并与未冻融试件一同放入 25℃ 恒温水槽中保温 2 h 后，测定并计算劈裂强度比。冻融劈裂试验的试验条件较浸水马歇尔试验来说更为苛刻，从而能准确评价混合料的水稳定性能。

DAT 添加剂包含改善沥青与石料粘附力的成分，从表 10 也可看出，热拌沥青混合料的水稳性不及温拌沥青混合料，这同表 9 的结果一致。此外，DAT 添加剂对沥青混合料的水稳性具有改善效果，但掺量并不是越多越好，掺量为 5% 时混合料的水稳性能最优。

## 4. 不同级配类型温拌沥青混合料性能影响分析

针对不同的城市道路建设和改造养护需求(旧路改造养护，新建道路和长达隧道)，分别对温拌沥青混合料的级配组成进行研究，确定合理的级配。温拌沥青混合料的级配组成设计主要基于国内外和课题组已有 UTA、SUP 和 SMA 相关的研究成果。研究的温拌沥青混合料类型选择当前温拌沥青应用的主要场

Table 8. Experimental results of low temperature bending test  
表 8. 低温弯曲试验结果

| 混合料类型                 | 热拌沥青混合料 | 温拌沥青混合料 |         |         | JTGF40-2004 技术要求 |
|-----------------------|---------|---------|---------|---------|------------------|
|                       |         | 3%      | 5%      | 7%      |                  |
| 抗弯拉强度(MPa)            | 8.554   | 8.557   | 9.853   | 9.935   | -                |
| 破坏应变( $\mu\epsilon$ ) | 2550.26 | 2576.81 | 2582.10 | 2597.37 | $\geq 2500$      |
| 破坏劲度模量(MPa)           | 3395.95 | 3505.87 | 3861.83 | 3865.98 | -                |

Table 9. Experimental results of immersion Marshall test  
表 9. 浸水马歇尔试验结果

| 混合料类型    | 热拌沥青混合料 | 温拌沥青混合料 |      |      | JTGF40-2004 技术要求 |
|----------|---------|---------|------|------|------------------|
|          |         | 3%      | 5%   | 7%   |                  |
| 残留稳定度(%) | 85.7    | 90.7    | 96.7 | 91.4 | 85               |

Table 10. Experimental results of the freeze-thaw splitting test  
表 10. 冻融劈裂试验结果

| 混合料类型     | 热拌沥青混合料 | 温拌沥青混合料(不同掺量) |      |      | JTGF40-2004 技术要求 |
|-----------|---------|---------------|------|------|------------------|
|           |         | 3%            | 5%   | 7%   |                  |
| 冻融劈裂强度(%) | 80.1    | 81.5          | 86.4 | 82.6 | 80               |

合, 有 UTA-10.0、SUP-13 和 SMA-13 三种, 本文对以上 3 种级配分别进行热拌和温拌沥青混合料性能试验, 试验结果见表 11。

三种级配温拌混合料的空隙率均比热拌混合料基本一致, 无较大变化。对于残留稳定度性能和 TSR 性能, 三种级配的温拌混合料均比热拌混合料有所提高, UTA10 提高幅度较大。对于动稳定度性能, 除 UTA10 外, 其他三种级配的温拌混合料均比热拌混合料有所提高, 但 UTA10 的高温性能在所有级配类型中是最好的, 即使是有所降低的温拌混合料也比其他级配的混合料都要高出很多。

从以上分析可以看出, 温拌沥青混合料对于以上三种级配的混合料性能至少与热拌混合料相当, 温拌混合料可以很好应用于各种级配类型的沥青混合料中。

## 5. 胶结料对温拌沥青混合料性能影响分析

沥青在贮存、运输、施工及使用过程中, 由于长时间暴露在空气中, 在环境因素如受热、氧气、阳光和水的作用下, 会发生一系列的挥发、氧化、聚合, 乃至沥青内部结构发生变化, 同时发生性质变化, 导致路用性能劣化的过程<sup>[4]</sup>。沥青老化是一个逐渐发生

的过程, 它的速率直接影响路面的使用寿命, 因而是影响沥青路面耐久性的主要因素。为评价胶结料对于温拌沥青混合料的性能有何影响。试验选取的 90#普通沥青和 SBS 改性 AC-13 混合料进行混合料性能对比分析, 90#普通沥青和 SBS 改性沥青指标见表 12 和表 13。

根据马歇尔设计方法, 确定热拌沥青混合料 AC-13 的最佳沥青用量为 5.0%。在该沥青用量下, 对热拌和温拌两种沥青混合料进行性能对比研究。试验结果见表 14。

从试验结果可以看出:

1) 改性和普通温拌沥青混合料的空隙率比其相对应热拌沥青混合料均有所减少, 改性温拌混合料的空隙率下降幅度比普通温拌混合料要大, 改性温拌混合料可以更好的提高沥青混合料的密实度。

2) 改性和普通温拌沥青混合料的冻融劈裂强度比也优于热拌沥青混合料, 因为采用的温拌剂(乳化剂)有效成分在成型完毕后会向沥青与石料界面位置转移, 起到类似抗剥落剂的作用, 能大大改善集料与沥青的粘附性能, 减少沥青膜被水分置换的机率。采用温拌技术后, 对于改性温拌混合料和普通温拌混合料提高混合料水稳定性能大体相当。

**Table 11. Volume indicators and performance comparison of warm mix hot mix asphalt mixture with different level**  
**表 11. 不同级配温拌热拌沥青混合料体积指标和性能对比**

| 类型       | 空隙率(%) | 残留稳定度(%) | TSR(%) | 动稳定度(次/mm) |
|----------|--------|----------|--------|------------|
| UTA10(热) | 3.6    | 92       | 85     | 7781       |
| UTA10(温) | 3.5    | 98       | 91.6   | 6133       |
| SUP13(热) | 4.0    | 87.5     | 87.6   | 4428       |
| SUP13(温) | 4.0    | 88.7     | 85.5   | 4865       |
| SMA13(热) | 3.9    | 96.7     | 88.1   | 5131       |
| SMA13(温) | 3.9    | 97.0     | 92.4   | 5384       |

**Table 12. Performance of 90# ordinary asphalt**  
**表 12. 90#普通沥青性能指标检测结果**

| 项目                 | 单位     | 普通沥青  | 普通沥青 + 温拌剂 | 规范要求      | 试验方法  |
|--------------------|--------|-------|------------|-----------|-------|
| 针入度(100 g, 5 s)25℃ | 0.1 mm | 80.5  | 79.3       | 80~100    | T0604 |
| 针入度指数 PI           | -      | -0.22 | -0.16      | -1.5~+1.0 | T0604 |
| 延度 15℃             | Cm     | >100  | >100       | ≥100      | T0605 |
| 软化点 TR&B           | ℃      | 50.3  | 55.1       | ≥45       | T0606 |
| 运动粘度 135℃          | Pa.s   | 0.538 | 0.521      | -         | T0625 |

**Table 13. Performance of SBS modified asphalt**  
**表 13. SBS 改性沥青性能指标检测结果**

| 项目                 | 单位     | 改性沥青 | 改性沥青 + 温拌剂 | 规范要求  | 试验方法  |
|--------------------|--------|------|------------|-------|-------|
| 针入度(100 g, 5 s)25℃ | 0.1 mm | 73.2 | 72.8       | 60~80 | T0604 |
| 针入度指数 PI           | -      | 0.15 | 0.17       | ≥-0.4 | T0604 |
| 延度 5℃              | cm     | 44.5 | 42.1       | ≥30   | T0605 |
| 软化点 TR&B           | ℃      | 73.7 | 74.4       | ≥55   | T0606 |
| 运动粘度 135℃          | Pa.s   | 1.5  | 1.38       | ≤3    | T0625 |
| 离析, 软化点差           | %      | 2.1  | 2.0        | ≤2.5  | T0661 |
| 弹性恢复 25℃           | cm     | 88.3 | 88.9       | ≥65   | T0662 |

**Table 14. Main performance of warm mix AC-13 and hot-mix AC-13**  
**表 14. 温拌 AC-13 与热拌 AC-13 的主要性能**

| 项目             | 热拌 AC-13 | 温拌 AC-13 | 规范要求  | 热拌改性 AC-13 | 温拌改性 AC-13 | 规范要求  |
|----------------|----------|----------|-------|------------|------------|-------|
| 空隙率(%)         | 3.8      | 3.1      | 3~5   | 5.1        | 3.9        | 3~5   |
| 矿料间隙率 VMA(%)   | 14.6     | 14.1     | ≥14   | 14.9       | 14.4       | ≥14   |
| 马歇尔稳定度(KN)     | 8.9      | 8.4      | ≥8    | 10.5       | 9.8        | ≥8    |
| 冻融劈裂强度比 TSR(%) | 76       | 80       | ≥75   | 81         | 87         | ≥80   |
| 动稳定度(次/mm)     | 900      | 1500     | ≥1000 | 3160       | 4600       | ≥2800 |



3) 沥青混合料的结构强度除了与结合料(形成粘聚力)性质有关外,其集料形成的骨架(形成摩擦角)也相当重要,其中结合料贡献约 30%,集料占 70%。尤其对于骨架型沥青混合料来说,集料形成的骨架作用对高温稳定性至关重要。在相同的沥青用量和压实功作用下,温拌沥青混合料更易压实,骨架结构更趋坚固,沥青膜也较厚粘聚力更强,从而具有更好的抗车辙变形能力。此外,温拌混合料粗细料互相粘连,不易发生厚度和水平方向的集料离析,有利于均衡骨架的形成。同时,表面活性类温拌添加剂的抗剥落作用也可起到提高抗车辙能力的作用。温拌剂对于改性沥青混合料高温性能提高幅度大于普通沥青混合料。

## 6. 结语

温拌沥青混合料可以应用于热拌沥青混合料所有的混合料类型和路面结构层,直接接受环境及荷载的作用,这就要求它应具备不低于热拌沥青混合料的使用性能。通过温拌热拌沥青混合料性能比较分析和温拌沥青混合料压实特性研究,得到以下结论:

1) Evotherm 温拌沥青混合料配比设计时,试件成型温度不能低于 110℃。

2) 拌和温度是保证压实温度的前提条件,考虑到温拌改性沥青混合料的施工和易性,拌和温度不得低于 125℃。

3) 温拌沥青混合料的有效压实时间比热拌沥青混合料长。随着温拌剂掺量的增加,有效压实时间延长,施工工艺宜做相应调整。

4) 相同条件下(级配、沥青用量、压实温度、压实功),Evotherm 温拌沥青混合料比热拌沥青混合料

更容易压实。

5) 对于 AC-13C 改性沥青混合料,在规范规定的空隙率范围内,温拌沥青混合料与热拌沥青混合料相比,可实现压实温度 7℃~40℃的降低。

6) 相比于热拌沥青混合料,温拌剂掺量不同,其混合料降温幅度不同,考虑到经济因素,5%掺量时降温效果最优。

7) 温拌剂掺量不同对混合料的高温及低温性能并没有太大的影响,而对于水稳性能影响较大,其中当掺量为 5%时,混合料的水稳性能最优。

8) 温拌沥青混合料对于 AC-13、UTA-10、SUP-13、SMA-13 四种级配的混合料性能至少与热拌混合料相当,温拌沥青可以很好应用于各种级配类型的沥青混合料。

9) 改性温拌混合料的空隙率下降幅度比普通温拌混合料要大,可以更好的提高沥青混合料的密实度,改性沥青温拌混合料和普通沥青温拌混合料提高混合料水稳性能大体相当,温拌剂对于改性沥青混合料高温性能的提高幅度要大于普通沥青混合料。

## 参考文献 (References)

- [1] 秦永春. 基于表面活性剂的温拌沥青混合料的设计及相关性能研究[D]. 上海: 同济大学交通学院, 2009.
- [2] 中华人民共和国行业标准. 公路工程沥青与沥青混合料试验规程[S]. 北京: 北京人民交通出版社, 2011.
- [3] 陶卓辉, 杜群乐. Evotherm 温拌沥青混凝土工作原理及低温施工[J]. 2008, 25(4): 115-117, 121.
- [4] 陶卓辉, 黄文元. 沥青温拌技术改善碾压原理及其在低温季节应用[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2008, S1: 18-20.