

# 掺聚酯纤维对普通沥青混合料性能的影响研究

胡建福,徐建勇,袁 媛  
(浙江省交通规划设计研究院,杭州 310006)

**摘 要:** 应用 Superpave 沥青混合料设计方法,对掺聚酯纤维普通沥青混合料性能进行了系统的研究,并结合在 329 国道慈溪段畅通工程沥青路面中的应用,论证了聚酯纤维沥青混合料的路用性能,认为采用聚酯纤维加强沥青路面,是提高路面抗车辙能力、水稳定性和抗裂性能的一种有效措施。

**关键词:** 聚酯纤维沥青混合料;Superpave;高温稳定性;低温抗裂性;水稳定性

**中图分类号:** U414.75;U416.217

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1671-8798(2006)03-0197-05

## Affection Research on Performance of Asphalt Mixture Reinforced with Polyester Fiber

HU Jian-fu, XU Jian-yong, YUAN yuan

(Zhejiang Provincial Plan Design & Research Institute of Communications, Hangzhou, 310006, China)

**Abstract:** A systematic research is made on performance of polyester fiber-reinforced asphalt mixture with design method of Superpave asphalt mixture. Based on the application of polyester fiber-reinforced asphalt mixture to the pavement of Cixi Section of National Road 329, the pavement performance of polyester fiber-reinforced asphalt mixture is demonstrated. The research indicates that polyester fiber-reinforced asphalt mixture pavement is an effective measure to improve rutting resistance, water stability and crack resistance of pavement.

**Key words:** polyester fiber-reinforced asphalt mixture; superpave; high-temperature stability; low-temperature crack resistance; water stability

20 世纪 70 年代美国 Kapejo 公司开发研制了 BoniFibers(博尼维)路用工程纤维,经欧美国家近 30 年的应用、研究和观测,总结出博尼维可以改善沥青路面的高温稳定性和疲劳耐久性,并且具有低温抗裂和防止反射裂缝的性能,从而提高了沥青路面的使用寿命。我国在 20 世纪 90 年代末开始引进 BoniFibers 路用工程纤维,但由于其价格昂贵(10.5 万元/t 左右)而制约了其应用。为此,国内工程界从结合降低

建设投资和 提高沥青路面使用性能出发,探索国产化的路用工程纤维,聚酯纤维就是其中之一<sup>[1-4]</sup>。

目前,我国对纤维加强沥青路面的研究还不多,本文拟通过对掺聚酯纤维普通沥青混合料性能进行系统的研究,并结合在 329 国道慈溪段(K130+400~K140+210)畅通工程沥青路面中的应用,论证聚酯纤维沥青混合料的路用性能,为聚酯纤维加强沥青路面的推广应用提供参考。

收稿日期: 2006-06-05

作者简介: 胡建福(1965— ),男,浙江慈溪人,高级工程师,硕士,主要从事公路工程技术工作。

## 1 材料选择、性能检验和参数确定

### 1.1 沥 青

沥青的选择根据我国沥青路面气候分区图<sup>[5]</sup>,按夏炎热区(1-4区)选用埃索 AH-70 重交沥青,依据 JTJ 052-2000 对原样沥青进行检测,沥青质量满足 1-4 区 A 级技术指标,见表 1。

### 1.2 粗、细集料

在供料和接料过程中保持集料质量稳定和不同规格颗粒组成一致性,对混合料的级配一致性和沥

青混凝土技术性能稳定性非常重要,本研究选用上虞某公司产的玄武岩碎石和石屑,依据 JTJ 058-2000 检测,其质量指标均满足 JTJ F40-2004 中的相应技术要求,见表 2。

### 1.3 填料(矿粉)

采用经 0.075 mm 过筛处理后的石灰岩磨细粉作为填料,其质量指标见表 3。

### 1.4 聚酯纤维

聚酯纤维产地浙江,外观为白色长丝,单丝直径为 24.32  $\mu\text{m}$ ,断裂强度为 5.07 cN/dtex,断裂伸长

表 1 埃索 AH-70 道路石油沥青性能指标汇总

| 项目   | 25℃针入度<br>(0.1 mm) | 针入度指数 PI  | 软化点/<br>℃ | 10℃延度/<br>cm | 15℃延度/<br>cm | 蜡含量/<br>%  | 闪点/<br>℃   | 溶解度/<br>%   | 15℃密度/<br>( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ) | 质量变化/<br>% | 残留针入度比/<br>% | 10℃残留延度/<br>cm |
|------|--------------------|-----------|-----------|--------------|--------------|------------|------------|-------------|---|------------|--------------|----------------|
| 技术要求 | 60~80              | -1.5~+1.0 | $\geq 46$ | $\geq 15$    | $\geq 100$   | $\leq 2.2$ | $\geq 260$ | $\geq 99.5$ | 实测  | $\pm 0.8$  | $\geq 61$    | $\geq 6$       |
| 测定值  | 64                 | 0.91      | 50.5      | 24           | 198          | 1.0        | 331        | 99.5        | 1.039   | 0.1        | 64           | 7              |

表 2 粗、细集料性能指标

| 项 目                   | 粗集料质量指标     |            |             |              | 细集料质量指标     |           |
|-----------------------|-------------|------------|-------------|--------------|-------------|-----------|
|                       | 技术要求        | 37.4~16 mm | 4.75~9.5 mm | 2.36~4.75 mm | 技术要求        | 0~2.36 mm |
| 石料压碎值/%               | $\leq 26$   | 10.2       |             |              |             |           |
| 洛杉矶磨耗损失/%             | $\leq 28$   | 13.3       |             |              |             |           |
| 石料磨光值/PSV             | $\geq 42$   | 48         |             |              |             |           |
| 与沥青的黏附性/级             | 5           | 5          |             |              |             |           |
| 软石含量/%                | $\leq 3$    | 0.0        | 0.2         |              |             |           |
| 坚固性/%                 | $\leq 12$   | 0.1        | 0.4         | 0.4          | $\leq 12$   | 0.3       |
| 表观相对密度(25℃)           | $\geq 2.60$ | 2.952      | 2.958       | 2.982        | $\geq 2.50$ | 2.924     |
| 吸水率/%                 | $\leq 2.0$  | 1.06       | 1.31        | 1.84         | —           | 1.76      |
| 水洗法<0.075 mm 含量/%     | $\leq 1$    | 0.2        | 0.3         |              |             |           |
| 砂当量/%                 |             |            |             |              | $\geq 60$   | 80        |
| 棱角性(按 Superpave 要求)/% |             |            |             |              | $\geq 45$   | 47        |

表 3 矿粉性能指标

| 项目   | 表观密度/<br>( $\text{t} \cdot \text{m}^{-3}$ ) | 含水量/%    | 粒度范围/% |         |          | 外观    | 亲水系数 | 塑性指数 |
|------|---|----------|--------|---------|----------|-------|------|------|
|      |   |          | <0.6mm | <0.15mm | <0.075mm |       |      |      |
| 技术要求 | $\geq 2.50$                                 | $\leq 1$ | 100    | 90~100  | 75~100   | 无团粒结块 | <1   | <4   |
| 测定值  | 2.718                                       | 0.22     | 100    | 100     | 100      | 无团粒结块 | 0.81 | 3.2  |

率为 30.6%,熔点为 253℃,燃点为 556℃,吸油率为聚酯纤维质量的 4.56 倍,与 25℃水的相对密度为 1.324,掺量取沥青混合料总质量的 2.5%。

### 1.5 矿质混合料的级配确定

对于 AC-16F 细型密级配沥青混凝土,根据 JTJ F40-2004 矿料级配范围和关键性筛孔的要求(2.36 mm 通过率大于 38%),同时为了防止级配中细集料靠近最大理论密度线,造成 VMA 偏小、沥

青用量偏少,而使混合料因沥青用量微小变化造成很容易变得可塑的现象,按 Superpave 混合料级配的要求<sup>[6]</sup>避开限制区,确定的级配范围见表 4、图 1。

## 2 沥青混合料性能检验方法和参数确定

### 2.1 沥青混合料的施工温度确定

利用 Brookfield 旋转黏度计测定 135℃、150℃及 175℃下的表观黏度,绘制黏度-温度曲线(如图 2),



表4 矿质混合料的级配

| 级配   | 通过下列方孔筛(mm)的质量百分率/% |        |       |       |       |       |       |      |      |      |       |
|------|---------------------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|-------|
|      | 19                  | 16     | 13.2  | 9.5   | 4.75  | 2.36  | 1.18  | 0.6  | 0.3  | 0.15 | 0.075 |
| 规范范围 | 100                 | 90~100 | 76~92 | 60~80 | 34~62 | 20~48 | 13~36 | 9~26 | 7~18 | 5~14 | 4~8   |
| 拟定级配 | 上限                  | 100    | 92    | 75    | 60    | 48    | 36    | 26   | 18   | 13   | 6     |
|      | 下限                  | 100    | 90    | 80    | 64    | 51    | 32    | 24   | 16   | 9    | 5     |
|      | 中值                  | 100    | 95    | 86    | 69.5  | 55.5  | 34    | 25   | 17   | 11   | 5.5   |

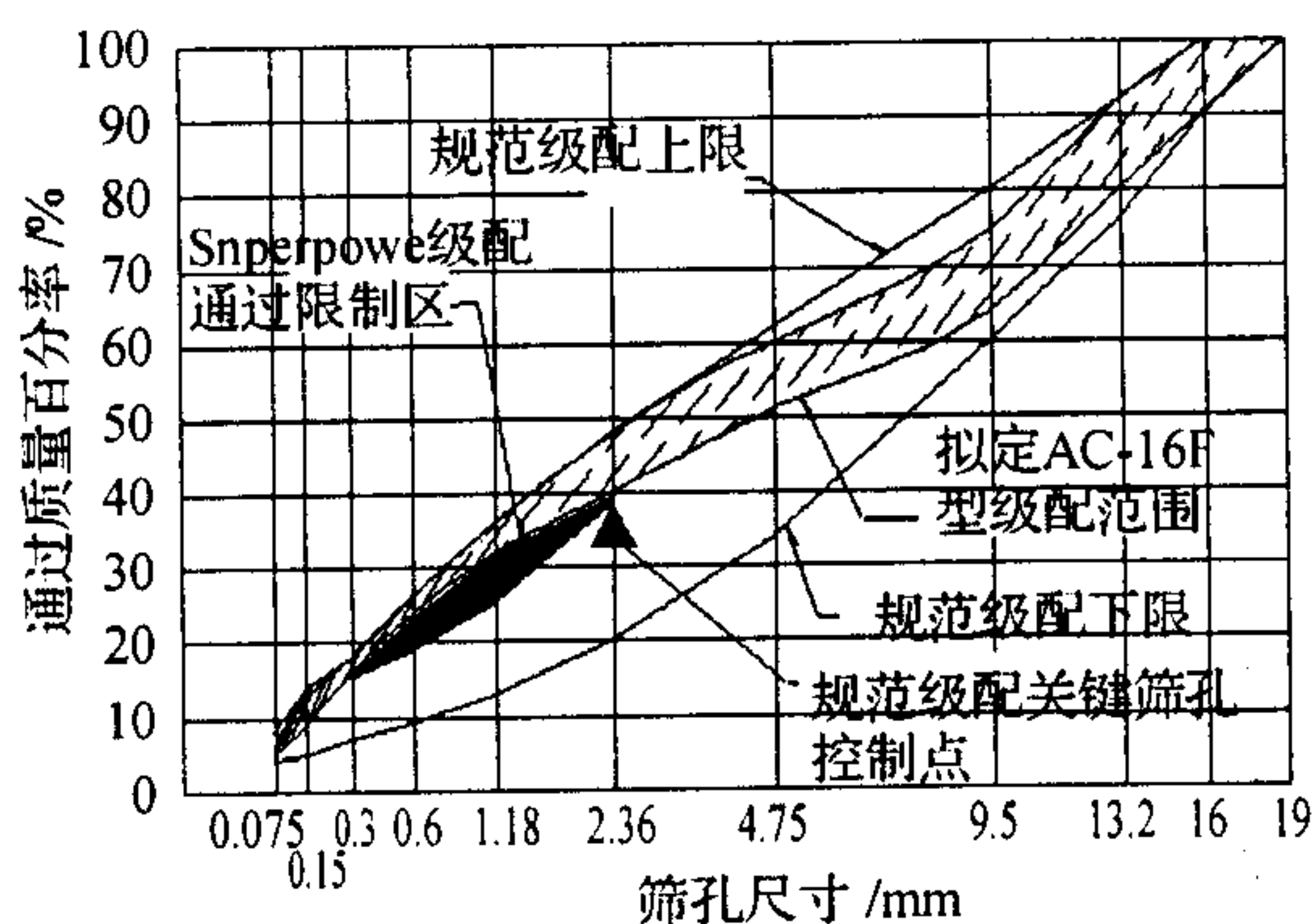


图1 级配分析图

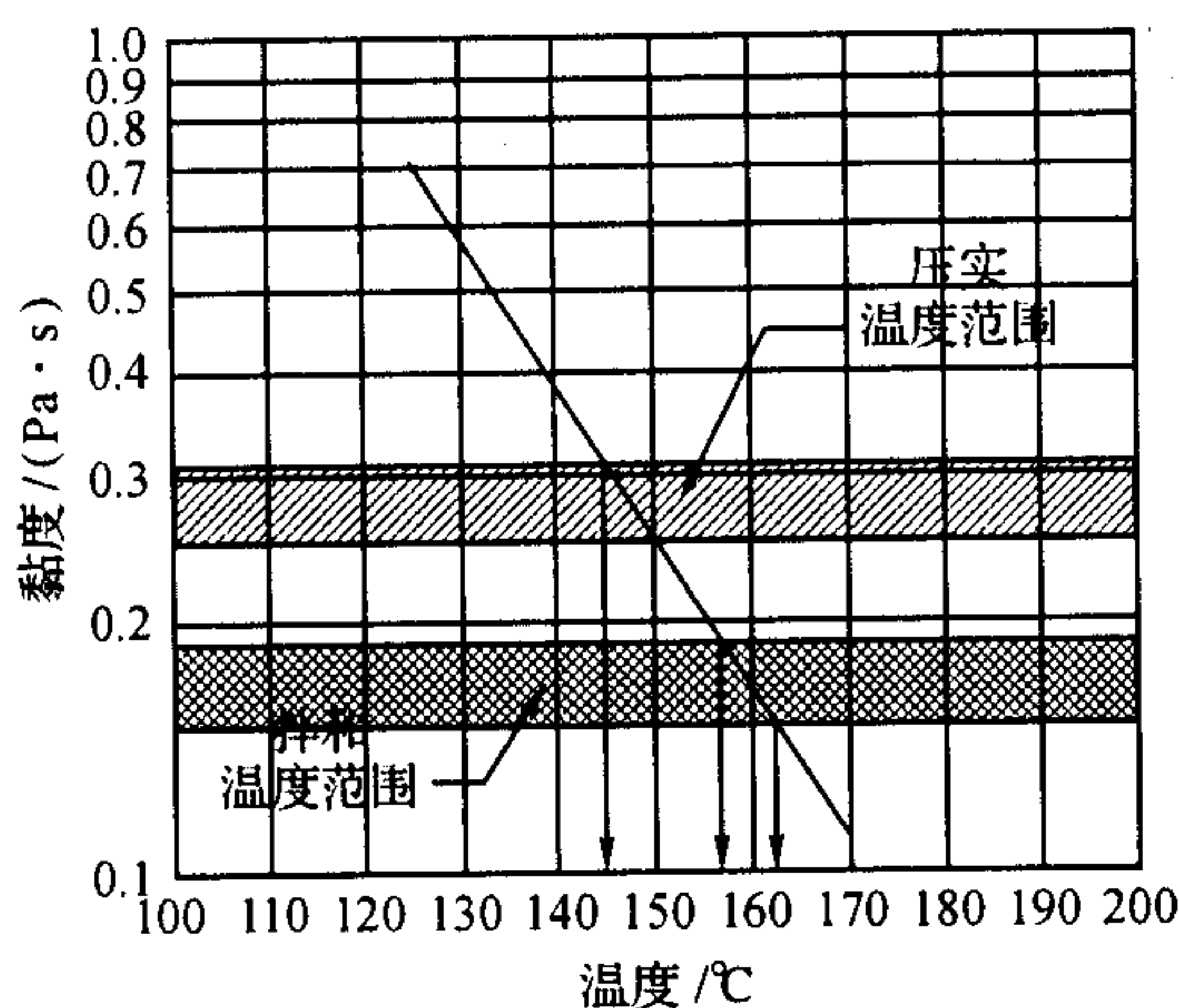


图2 由沥青结合料的黏温曲线确定施工温度  
确定沥青混合料最佳拌和温度为 157~162 °C, 最佳压实温度为 146~150 °C。

## 2.2 沥青混合料压实参数的确定

329 国道设计交通期望值在  $3 \times 10^6$  和  $30 \times 10^6$  单轴载之间,按 Superpave 混合料设计方法<sup>[6]</sup>,采用旋转压实(SGC)方法成型,旋转压实参数采用  $N_{ini}=8$  次,  $N_{des}=100$  次,  $N_{max}=160$  次。

## 2.3 沥青混合料最佳沥青用量的确定和性能检验

1)对选取的上、中、下限三种级配在不同的沥青用量下,采用旋转压实仪(SGC)制作沥青混合料试件,测定体积特性指标,确定最佳沥青用量。

2)在最佳沥青用量下,对沥青混合料按 JTJ 052—2000 进行马歇尔稳定度、浸水马歇尔、冻融劈裂、肯塔堡飞散、车辙、渗水和小梁弯曲试验,以测定

和比较沥青混合料的各项性能指标。

## 3 沥青混合料性能分析

### 3.1 沥青混合料体积特性

根据表 5 中沥青用量与 VV 的变化规律,按 Superpave 标准的要求,可以得到普通沥青混合料上限中值和下限制配最佳沥青用量分别为 4.64%、4.50%、4.44%,聚酯纤维沥青混合料上限、中值、下限制配分别为 4.71%、4.60%、4.65%,下限制配沥青用量增加 0.21%;同时对照表 5 结果发现,对同一材料和级配,旋转压实与马歇尔方法的差异较大,旋转压实方法的最佳沥青用量较小,旋转压实试件的骨架结构较好,马歇尔方法的骨架结构较差。

### 3.2 马歇尔稳定度和水稳定性

从表 6 的实验结果分析可得:

1)掺聚酯纤维沥青混合料马歇尔稳定度略有提高,但同时流值也相应增大,虽然马歇尔稳定度难以说明高温抗车辙能力,但这种变化规律反映了聚酯纤维的牵引作用。

2)沥青混合料的水稳定性有大幅度提高,如残留稳定度:中值级配从 90.8% 提高到 97.8%,下限制配从 94.5% 提高到 97.6%;冻融劈裂强度比:上限级配从 75.4% 提高到 84.2%,并且掺聚酯纤维后其冻融劈裂强度比趋势为下限>中值>上限。

3)沥青混合料肯塔堡飞散试验是评价由于沥青用量或黏结性不足,在交通荷载作用下,路面表面集料脱落而散失的程度,掺聚酯纤维沥青混合料标准飞散损失小于普通型沥青混合料(除中值级配不明显外),如下限从 6.9% 下降到 2.5%;同样浸水飞散损失:掺聚酯纤维型小于普通型,如上限从 9.7% 下降到 2.5%;并且掺聚酯纤维型飞散损失均在 2.0%~3.2% 之间。这种飞散损失的显著下降,说明掺聚酯纤维后改善了沥青胶结料对矿料的黏附性,起了加固作用,同时浸水飞散试验更进一步证明这种聚酯纤维对提高沥青混合料的水稳性有较大的贡献。

表 5 沥青混合料的体积特性

| 沥青用量/%                             |    | 3.5   | 4.0   |       | 4.5   |       | 5.0   |       | 5.5   |       | 6.0   |
|------------------------------------|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                                    |    | 不掺    | 不掺    | 掺     | 不掺    | 掺     | 不掺    | 掺     | 不掺    | 掺     | 不掺    |
| %G <sub>mm</sub> @N <sub>ini</sub> | 上限 | 83.7  | 85.9  | 87.3  | 88.0  | 88.0  | 89.5  | 88.4  | 89.0  | 88.7  | 90.4  |
|                                    | 中值 | 85.1  | 86.5  | 87.2  | 88.2  | 88.1  | 89.2  | 88.5  | 90.0  | 88.9  | 90.1  |
|                                    | 下限 | 85.4  | 87.0  | 86.8  | 88.6  | 87.9  | 90.1  | 88.6  | 90.6  | 89.4  | 91.5  |
| %G <sub>mm</sub> @N <sub>des</sub> | 上限 | 90.9  | 93.1  | 93.2  | 95.5  | 95.2  | 97.3  | 97.1  | 98.7  | 98.1  | 98.0  |
|                                    | 中值 | 91.8  | 93.6  | 93.7  | 96.0  | 95.6  | 97.2  | 97.4  | 98.3  | 98.1  | 98.2  |
|                                    | 下限 | 93.0  | 94.6  | 93.2  | 96.2  | 95.6  | 97.8  | 96.9  | 98.7  | 97.8  | 98.4  |
| 毛体积相对密度                            | 上限 | 2.482 | 2.520 | 2.501 | 2.563 | 2.534 | 2.591 | 2.561 | 2.563 | 2.569 | 2.588 |
|                                    | 中值 | 2.507 | 2.533 | 2.516 | 2.576 | 2.545 | 2.586 | 2.571 | 2.553 | 2.569 | 2.593 |
|                                    | 下限 | 2.538 | 2.562 | 2.505 | 2.583 | 2.548 | 2.604 | 2.561 | 2.567 | 2.565 | 2.597 |
| 最大理论相对密度                           | 上限 | 2.731 | 2.707 | 2.682 | 2.684 | 2.660 | 2.663 | 2.638 | 2.596 | 2.617 | 2.641 |
|                                    | 中值 | 2.731 | 2.706 | 2.684 | 2.683 | 2.662 | 2.661 | 2.640 | 2.598 | 2.619 | 2.641 |
|                                    | 下限 | 2.729 | 2.708 | 2.688 | 2.685 | 2.665 | 2.663 | 2.644 | 2.601 | 2.622 | 2.639 |
| 空隙率 VV/%                           | 上限 | 9.1   | 6.9   | 6.8   | 4.5   | 4.8   | 2.7   | 2.9   | 1.3   | 1.9   | 2.0   |
|                                    | 中值 | 8.2   | 6.4   | 6.3   | 4.0   | 4.4   | 2.8   | 2.6   | 1.7   | 1.9   | 1.8   |
|                                    | 下限 | 7.0   | 5.4   | 6.8   | 3.8   | 4.4   | 2.2   | 3.1   | 1.3   | 2.2   | 1.6   |
| 矿料间隙率 VMA/%                        | 上限 | 16.6  | 15.8  | 14.4  | 14.8  | 13.7  | 14.6  | 13.3  | 14.1  | 13.5  | 14.9  |
|                                    | 中值 | 15.8  | 15.3  | 14.0  | 14.4  | 13.4  | 14.6  | 13.0  | 14.5  | 13.6  | 14.7  |
|                                    | 下限 | 14.7  | 14.3  | 14.5  | 14.1  | 13.5  | 13.8  | 13.5  | 14.2  | 14.0  | 14.5  |
| 有效沥青饱和度 VFA/%                      | 上限 | 45.2  | 56.3  | 53.1  | 69.6  | 65.4  | 81.5  | 77.8  | 90.9  | 86.2  | 86.6  |
|                                    | 中值 | 48.1  | 58.3  | 55.3  | 72.1  | 67.3  | 80.8  | 80.0  | 88.2  | 85.9  | 87.8  |
|                                    | 下限 | 52.4  | 62.3  | 53.1  | 73.0  | 67.4  | 74.1  | 76.8  | 90.7  | 82.8  | 89.0  |

表 6 马歇尔稳定度和水稳定性

| 检测项目          | 技术要求  | 测定值   |       |       |        |       |       |
|---------------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|
|               |       | 普通型   |       |       | 掺聚酯纤维型 |       |       |
|               |       | 上限    | 中值    | 下限    | 上限     | 中值    | 下限    |
| 沥青用量/%        | —     | 4.64  | 4.50  | 4.44  | 4.71   | 4.60  | 4.65  |
| 毛体积相对密度       | 实测    | 2.542 | 2.549 | 2.554 | 2.547  | 2.548 | 2.547 |
| 空隙率 VV/%      | 4~6   | 5.1   | 5.1   | 4.9   | 4.0    | 4.1   | 4.4   |
| 矿料间隙率 VMA/%   | 见表注   | 15.6  | 15.2  | 15.0  | 13.5   | 13.4  | 13.8  |
| 有效沥青饱和度 VFA/% | 65~75 | 67.4  | 66.7  | 67.2  | 70.4   | 69.3  | 68.4  |
| 马歇尔稳定度/kN     | ≥8    | 22.71 | 18.45 | 17.70 | 27.66  | 19.36 | 18.39 |
| 流值/mm         | 1.5~4 | 3.48  | 3.43  | 3.32  | 3.77   | 3.77  | 3.80  |
| 残留稳定度/%       | ≥85   | 95.9  | 90.8  | 94.5  | 98.0   | 97.8  | 97.6  |
| 冻融劈裂强度比/%     | ≥75   | 75.4  | 81.0  | 84.2  | 83.0   | 84.6  | 86.2  |
| 飞散损失/%        |       | 9.1   | 3.2   | 6.9   | 2.0    | 2.9   | 2.5   |
| 浸水飞散损失/%      |       | 9.7   | 4.0   | 8.9   | 2.5    | 3.2   | 2.8   |

注：当 VV=4% 时，VMA≥13.5%；当 VV=5% 时，VMA≥14.5%。

3.3 高温稳定性和渗水性

1)车辙试验结果表明(见表 7),掺聚酯纤维 AC-16F 型沥青混合料级配上、中、下限的动稳定度分别为不掺聚酯纤维的 2.6、1.4 和 1.8 倍,车轮凹槽深度分别为不掺聚酯纤维沥青混合料的 0.64、0.77 和 0.69,高温稳定性显著提高;掺聚酯纤维沥青混合料高温稳定性趋势:下限>中值>上限,同时车辙凹槽深度:下限<中值<上限,这一趋势与不掺聚酯纤维的沥青混合料相同,说明下限级配最优。

表 7 高温稳定性和渗水性

| 检测项目   |    | 动稳定度 DS/<br>(次·mm <sup>-1</sup> ) | 60 min 时    | 渗水系数/<br>(mL·min <sup>-1</sup> ) |
|--------|----|-----------------------------------|-------------|----------------------------------|
|        |    |                                   | 轮槽深度/<br>mm |                                  |
| 普通型    | 上限 | 705                               | 4.588       | 6                                |
|        | 中值 | 1 381                             | 3.526       | 10                               |
|        | 下限 | 1 714                             | 3.214       | 15                               |
| 掺聚酯纤维型 | 上限 | 1 860                             | 2.940       | 5                                |
|        | 中值 | 1 959                             | 2.709       | 8                                |
|        | 下限 | 3 156                             | 2.204       | 11                               |



2)由于是细型密级配沥青混凝土,渗水系数本身比较小,渗水试验结果表明均能满足技术规范小于 120 mL/min 的要求,无论掺不掺聚酯纤维,渗水系数下限>中值>上限,但掺聚酯纤维的沥青混合料渗水系数有所下降,说明抗渗性有一定的提高。

3.4 低温抗裂性能

沥青混合料低温破坏应变均大于 2 000  $\mu\epsilon$ ,掺

聚酯纤维后沥青混合料低温抗裂性下上级配平均提高约 22%,上上级配平均提高约 35%,各类级配在特定饱和度下的抗弯拉强度和弯拉应变均大于相应的普通型沥青混合料,说明聚酯纤维增加了沥青混合料的应力分散作用,表现出更好的低温抗裂性能(见表 8)。

表 8 低温抗裂性能

| 技术指标                | 普通型   |       |       |       | 掺聚酯纤维型 |       |       |       |
|---------------------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|
|                     | 上限饱和度 |       | 下限饱和度 |       | 上限饱和度  |       | 下限饱和度 |       |
|                     | 75%   | 80%   | 75%   | 80%   | 75%    | 80%   | 75%   | 80%   |
| 抗弯拉强度/MPa           | 6.13  | 6.04  | 6.25  | 6.21  | 7.24   | 6.93  | 7.09  | 6.48  |
| 弯拉应变/ $\mu\epsilon$ | 2 690 | 2 674 | 3 023 | 2 709 | 3 645  | 3 619 | 3 677 | 3 360 |
| 破坏劲度模量/MPa          | 2 280 | 2 260 | 2 188 | 2 219 | 1 988  | 1 915 | 1 929 | 1 927 |

3.5 Superpave 的  $N_{max}$  验证

为了防止混合料在交通荷载下的过度压实,成为塑性体从而产生永久变形,Superpave 混合料设计方法规定在  $N_{max}$  下混合料的毛体积相对密度不超过最大相对理论密度的 98%,从而保证不会发生过度的压实,三种级配的 SGC 压实结果表明,当大于设计交通量过多时, $N_{max}=96\%\sim 98\%$ ,不会发生塑性破坏(见表 9)。

表 9 Superpave 的  $N_{max}$  验证结果

| 检测项目               | 普通型  |      |      | 掺聚酯纤维型 |      |      |
|--------------------|------|------|------|--------|------|------|
|                    | 上限   | 中值   | 下限   | 上限     | 中值   | 下限   |
| $\%G_{mm}@N_{ini}$ | 87.9 | 88.9 | 88.9 | 88.6   | 88.4 | 88.8 |
| $\%G_{mm}@N_{des}$ | 95.7 | 96.2 | 96.4 | 96.4   | 96.3 | 96.4 |
| $\%G_{mm}@N_{max}$ | 96.8 | 97.2 | 97.4 | 97.4   | 97.6 | 97.6 |

4 工程应用

在 329 国道慈溪段(K130+400~K140+210)畅通工程中,应用了本研究结果。采用掺聚酯纤维 AC-16F 型沥青混合料,开放交通半年以来,从业主反馈信息和现场踏勘情况看,已取得了成功效果,没有出现剥离等病害现象。尽管如此,对聚酯纤维沥青混凝土路面的长期效果,还需作进一步的观察,特别是在经受雨季和高低温考验后的情况更值得重视。

5 结 论

1)掺聚酯纤维后沥青用量宜按级配调整,比普通沥青混凝土有所增加,最大增加 0.2%左右。

2)聚酯纤维对普通沥青混合料高温稳定性有显著提高,动稳定度最低可提高 40%以上,车轮凹槽深度至少下降 23%,对 AC-16F 型沥青混合料下上级配更优。

3)聚酯纤维对普通沥青混合料的水稳性有大幅度提高,纤维的牵引作用明显增强了沥青混合料的整体黏结性,在交通荷载作用下,路面表面集料不易脱落而散失。

4)掺聚酯纤维的沥青混合料低温抗裂性提高 22%~35%,抗弯拉强度大于普通型沥青混合料,聚酯纤维的应力分散作用使沥青混合料表现出更好的低温抗裂性能。

5)聚酯纤维价格仅为 BoniFibers 纤维的四分之一,从工程经济角度出发,采用聚酯纤维是改善沥青混凝土路面长期耐久性的一种有效措施。

参考文献:

[1] 张勇强,罗乙. 聚酯纤维材料在沥青混凝土桥面铺装上的应用[J]. 公路,2003(5):117-118.  
[2] 陈华鑫,李宁利,胡长顺,等. 纤维沥青混合料料路用性能[J]. 长安大学学报,2004,24(2):1-6.  
[3] 吴少鹏,薛永杰,张登峰. 聚合物纤维改性沥青混凝土的研究[J]. 武汉理工大学学报,2003,25(12):47-49.  
[4] 马翔,倪富健,顾兴宇,等. 聚酯纤维沥青混合料料路用性能研究分析[J]. 公路交通科技,2006,23(1):24-27.  
[5] JTG F40—2004,公路沥青路面施工技术规范[S].  
[6] 贾渝. 高性能沥青路面 Superpave 技术实用手册[Z]. 江苏省交通科学研究院,2002.