

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2021.01.057

## 玻璃纤维长度对不同级配沥青混合料路用性能影响研究

周强

(湖南交通国际经济工程合作有限公司, 湖南 长沙 410000)

**摘要:**为改善沥青混合料的路用性能,选用价格低廉、增韧效果强、取材方便的玻璃纤维来改善沥青混合料的黏附性。该文选取高速公路上、中、下面层常用级配:SMA-13、SUP-20、SUP-25,分别在其中掺入0.2%掺量,3、6、9、12 mm 4种长度的玻璃纤维,研究玻璃纤维长度对不同级配沥青混合料路用性能的影响规律。试验结果表明:掺加不同长度玻璃纤维均可提升沥青混合料的各项路用性能,其中高温稳定性、抗疲劳性能以及低温抗开裂性受玻璃纤维长度影响较为明显。通过灰色关联分析发现掺加6 mm 玻璃纤维的 SMA-13 沥青混合料路用性能增强效果最佳;掺加9 mm 玻璃纤维的 SUP-20 沥青混合料路用性能增强效果最佳;掺加12 mm 玻璃纤维的 SUP-25 沥青混合料路用性能增强效果最佳。即随着沥青混合料级配中公称最大粒径的增加,掺入的玻璃纤维最佳长度也随之增大。

**关键词:**道路工程;玻璃纤维;沥青混合料;路用性能;灰色关联分析

沥青路面具有行车舒适、建养方便、可回收利用等优点,在中国高速公路建设工程中逐渐得到广泛应用。但在经济迅速发展伴随而来的重交通荷载影响下,许多沥青混凝土路面出现明显的路面损坏,严重降低了路面的使用性能及寿命。在传统的沥青混合料中掺入玻璃纤维,可以达到改善沥青混合料路用性能、减少养护次数及费用的明显效果。

玻璃纤维属于一种无机纤维材料,具备质轻量大、价格低廉、高强耐久等特征,是作为沥青混合料合适的外掺剂。目前,中国学者已对玻璃纤维沥青混凝土开展过相关研究,其中结论有:在 AC-13 型沥青混合料中,玻纤的最佳掺量为0.2%左右。但关于玻纤长度对不同公称最大粒径、不同级配沥青混合料各项路用性能的影响等方面研究较少。基于此,该文针对性地选取高速公路常用级配:SMA-13、SUP-20、SUP-25 级配,掺入0.2%不同长度的玻璃纤维,研究玻纤长度对其路用性能的影响规律。最后通过灰色关联分析,确定掺入 SMA-13、SUP-20、SUP-25 级配沥青混合料中玻璃纤维的最佳长度。

## 1 原材料及矿料级配

### 1.1 试验材料

该文选用 SBS 改性沥青作为沥青胶结料,其技术

指标见表1;粗细集料均选用石灰岩,填料选用由石灰岩磨细制备而成的矿粉,各指标见表2;选用短切无碱原丝玻璃纤维,其技术指标如表3所示。

表1 SBS 改性沥青主要技术指标

检测指标	单位	检验结果	规范要求	试验方法
针入度(25℃)	0.1 mm	72	60~80	T0604
软化点	℃	63	55	T0606
延度(5 cm/min, 5℃)	cm	47	30	T0605
针入度指数 $PI$		0.5	-0.4~1.0	T0604
溶解度(三氯乙烯)	%	99.7	99	T0607
闪点	℃	330	230	T0611

表2 矿粉主要技术指标

指标	单位	检验结果	规范要求
视密度	$\text{g}/\text{cm}^3$	2.732	$\geq 2.50$
含水量	%	0.232 2	$\leq 1$
粒度范围	$<0.6 \text{ mm}$	100	100
	$<0.15 \text{ mm}$	97.2	90~100
	$<0.075 \text{ mm}$	77.8	70~100
亲水系数		0.600	$< 1$

收稿日期:2020-03-12

作者简介:周强,男,高级工程师.E-mail:1229069193@qq.com

表 3 玻璃纤维技术指标		
指标	单位	测试值
纤维长度	mm	3、6、9、12
单丝直径	$\mu\text{m}$	6
抗拉强度	MPa	3 300
熔点	$^{\circ}\text{C}$	1 500
极限拉伸应变	%	3.5
相对密度		2.51

### 1.2 矿料级配

所选级配的各筛孔通过率见表 4~6。

## 2 玻璃纤维长度对沥青混合料路用性能影响试验研究

### 2.1 高温稳定性

不同级配沥青混合料车辙试验结果如图 1 所示。

表 4 SMA-13 沥青混合料设计级配										
级配	通过下列筛孔(方孔筛:mm)的质量百分率/%									
	16.0	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
上限	100	100	75.0	34.0	26.0	24.0	20.0	16.0	15.0	12.0
下限	100	90.0	50.0	20.0	15.0	14.0	12.0	10.0	9.0	8.0
中值	100	95.0	62.5	27.0	20.5	19.0	16.0	13.0	12.0	10.0
设计级配	100	94.61	66.87	31.3	26.24	21.22	16.47	12.81	11.54	10.23

表 5 SUP-20 沥青混合料设计级配											
级配控制项		通过下列筛孔(方孔筛:mm)的质量百分率/%									
		26.5	19	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.075
控制点	最小	—	90.0	0	—	—	23.0	—	—	—	2.0
	最大	—	100	90.0	—	—	49.0	—	—	—	8.0
限制区	最小	—	—	—	—	—	34.6	22.3	16.7	13.7	—
	最大	—	—	—	—	—	34.6	28.3	20.7	13.7	—
设计级配		100	91.5	81.2	64.8	41.5	22.7	14.2	9.5	6.2	4.3

表 6 SUP-25 沥青混合料设计级配												
级配控制项		通过下列筛孔(方孔筛:mm)的质量百分率/%										
		31.5	26.5	19	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.075
控制点	最小	—	90.0	0	—	—	—	19.0	—	—	—	1.0
	最大	—	100	90.0	—	—	—	45.0	—	—	—	7.0
限制区	最小	—	—	—	—	—	39.5	26.8	18.1	13.6	11.4	—
	最大	—	—	—	—	—	39.5	30.8	24.1	17.6	11.4	—
设计级配		100	98.5	81.4	69.8	56.5	35.7	19.6	12.3	8.9	6.5	5.3

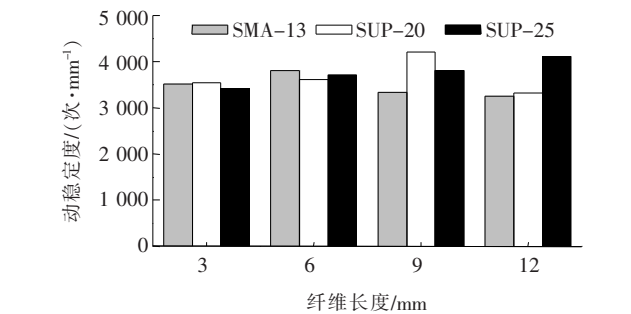


图 1 车辙试验结果

由图 1 可知:不同长度的玻璃纤维均可明显提高沥青混合料高温稳定性。其中 6 mm 长度的玻璃纤维对 SMA-13 级配的动稳定度提高最明显;且随着纤维长度的继续增加,其动稳定度逐渐降低。尤其当玻璃纤维长度增加到 12 mm 时,SMA-13 级配沥青混合料的动稳定度甚至低于掺加 3 mm 玻璃纤维的沥青混合料,远低于掺加 6 mm 玻璃纤维的沥青混合料。9 mm 长度的玻璃纤维对 SUP-20 级配的动稳定度提高最明显;且随着纤维长度的继续增加,其动稳定度逐

渐降低。尤其当玻璃纤维长度增加到 12 mm 时, SUP-20 级配沥青混合料的动稳定度甚至低于掺加 3 mm 玻璃纤维的沥青混合料。12 mm 长度的玻璃纤维对 SUP-25 级配的动稳定度提高最明显; 且随着纤维长度减小, 其动稳定度逐渐降低。原因是玻璃纤维具有自身硬度大、较高的弹性模量和有一定的断裂延伸率的优点, 掺入沥青混合料中的不同长度玻璃纤维均能在空间中形成三维网状结构, 能够以微加筋的形式有效抑制行车荷载作用下即将滑移的集料, 提高其温度稳定性。由于不同级配沥青混合料的公称最大粒径也有所差异, 所掺入的玻璃纤维长度要与公称最大粒径相匹配, 过短的玻璃纤维不能绑住其中的粗集料, 过长的玻璃纤维则会在沥青胶浆中聚成一团, 无法起到有效的加筋作用。

## 2.2 低温抗裂性

不同级配沥青混合料的破坏应变结果见图 2。

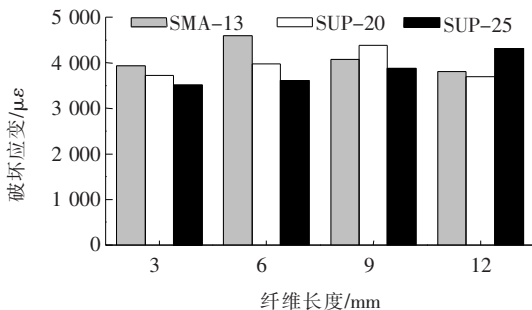


图 2 低温弯曲试验结果

由图 2 可知: 不同长度的玻璃纤维均可明显提高沥青混合料低温抗裂性。其中 6 mm 长度的玻璃纤维对 SMA-13 级配沥青混合料的低温抗裂性提高最明显; 且随着纤维长度的继续增加, 沥青混合料的低温抗裂性逐渐降低。尤其当玻璃纤维长度增加到 12 mm 时, SMA-13 级配沥青混合料的低温抗裂性甚至低于掺加 3 mm 玻璃纤维的沥青混合料, 远低于掺加 6 mm 玻璃纤维的沥青混合料。9 mm 长度的玻璃纤维对 SUP-20 级配沥青混合料的低温抗裂性提高最明显; 且随着纤维长度的继续增加, 沥青混合料的低温抗裂性逐渐降低。尤其当玻璃纤维长度增加到 12 mm 时, SUP-20 级配沥青混合料的低温抗裂性甚至低于掺加 3 mm 玻璃纤维的沥青混合料。12 mm 长度的玻璃纤维对 SUP-25 级配沥青混合料的低温抗裂性提高最明显; 且随着纤维长度减小, 沥青混合料的低温抗裂性逐渐降低。原因是玻璃纤维的弹性模量远高于沥青, 掺入沥青混合料后相当于提高了沥青胶浆的弹

性成分比例, 能够较好地分散传递应力, 掺入玻璃纤维能够有效抑制低温条件下裂缝的产生与发展, 再加上玻璃纤维的加筋作用, 因此纤维长度对其影响较大。

## 2.3 水稳定性

为研究不同级配沥青混合料的水稳定性, 针对沥青混合料展开冻融劈裂试验, 得到结果如图 3 所示。

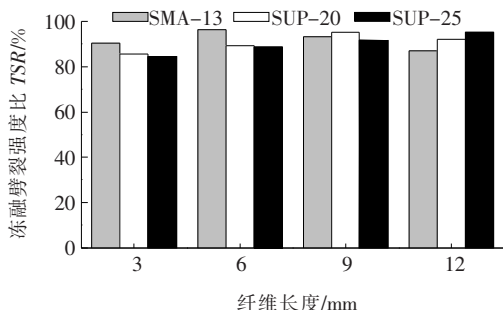


图 3 冻融劈裂试验结果

由图 3 可知: 不同长度的玻璃纤维均可明显提高沥青混合料水稳定性。其中 6 mm 长度的玻璃纤维对 SMA-13 级配沥青混合料的冻融劈裂强度比提高最明显; 且随着纤维长度的继续增加, 沥青混合料的冻融劈裂强度比逐渐降低。尤其当玻璃纤维长度增加到 12 mm 时, SMA-13 级配沥青混合料的冻融劈裂强度比甚至低于掺加 3 mm 玻璃纤维的沥青混合料。9 mm 长度的玻璃纤维对 SUP-20 级配沥青混合料的冻融劈裂强度比提高最明显; 且随着纤维长度的继续增加, 沥青混合料的冻融劈裂强度比逐渐降低。尤其当玻璃纤维长度增加到 12 mm 时, SUP-20 级配沥青混合料的冻融劈裂强度比甚至低于掺加 3 mm 玻璃纤维的沥青混合料。12 mm 长度的玻璃纤维对 SUP-25 级配沥青混合料的冻融劈裂强度比提高最明显; 且随着纤维长度减小, 沥青混合料的冻融劈裂强度比逐渐降低。这是由于玻璃纤维的比表面积极其巨大, 可以吸附大量的沥青有效增加粗集料的沥青膜厚度, 同时又使得沥青胶浆的黏性增大, 因而玻璃纤维可以有效提高沥青混合料的水稳定性, 且纤维长度对其影响较小。

## 2.4 抗疲劳性能

为探讨不同级配沥青混合料的抗疲劳性能, 针对沥青混合料展开疲劳试验, 得到结果如图 4 所示。

由图 4 可知: 不同长度的玻璃纤维均可明显提高沥青混合料抗疲劳性能。其中 6、9 mm 长度的玻璃纤维对 SMA-13 级配沥青混合料的疲劳寿命提高明显; 且随着纤维长度的继续增加, 沥青混合料的疲劳寿

命逐渐降低。尤其当玻璃纤维长度增加到 12 mm 时, SMA-13 级配沥青混合料的疲劳寿命甚至低于掺加 3 mm 玻璃纤维的沥青混合料, 远低于掺加 6、9 mm 长度玻璃纤维的沥青混合料。9、12 mm 长度的玻璃纤维对 SUP-20、SUP-25 级配沥青混合料的疲劳寿命提高明显, 远高于掺加 3、6 mm 长度玻璃纤维的沥青混合料。且随着纤维长度减小, 沥青混合料的疲劳寿命逐渐降低。原因是玻璃纤维能够延长沥青胶浆的疲劳寿命。法国道路工作者研究认为沥青混合料的疲劳开裂主要是由于沥青胶浆的开裂或损伤引起的, 疲劳裂缝在胶浆中产生发展。玻璃纤维的弹性模量远高于沥青, 掺入沥青混合料后, 相当于提高了沥青胶浆的弹性成分比例, 从而增强了沥青胶浆的抗疲劳性能。另外, 玻璃纤维分散在沥青混合料中互相搭接形成三维空间网络, 能抑制部分疲劳裂缝发展, 同时玻璃纤维可有效分散应力集中, 一定程度地削弱了应变能积累, 从而增强沥青混合料的韧性。

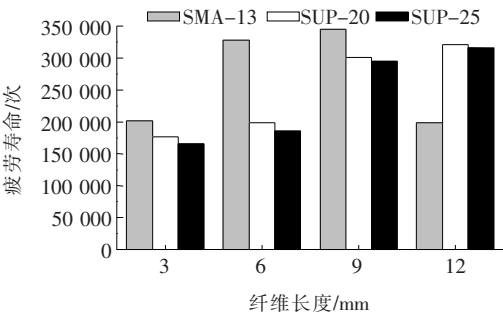


图 4 弯曲疲劳试验结果

3 灰色关联分析

为探讨 SMA-13、SUP-20、SUP-25 级配沥青混合料的最佳玻璃纤维长度, 试验基于灰色关联分析对沥青混合料路用性能下各玻璃纤维长度的影响程度进行比较, 得出各级配沥青混合料的玻璃纤维长度最优选择。灰色关联分析是一种衡量各因素间关联程度的常用方法, 通过对各因素发展趋势及权重进行对比, 计算出指标值与因素的关联程度并进行排序, 即可得到影响指标值的主次要因素。

3.1 构建矩阵

通过对上述 4 种不同玻璃纤维长度构建方案集 A, 则方案集  $A = \{A_1, A_2, A_3, A_4\}$ 。由于每种玻璃纤维长度对应 4 个试验指标, 则指标集  $B = \{\text{动稳度, 破坏应变, 冻融劈裂强度比, 疲劳寿命}\}$ 。建立各级配的方案集 A 与指标集 B 矩阵 X, 则  $X = (x_{ij})_{m \times n}$ ,  $x_{ij}$

表示 i 方案中的 j 试验指标。列优选矩阵, 可得到不同级配的矩阵 X:

$$\begin{aligned} X_{\text{SMA-13}} &= \begin{pmatrix} 3\ 514 & 3\ 931 & 90.43 & 201\ 953 \\ 3\ 812 & 4\ 598 & 96.30 & 328\ 564 \\ 3\ 337 & 4\ 073 & 93.21 & 345\ 514 \\ 3\ 259 & 3\ 812 & 86.97 & 198\ 571 \\ 3\ 545 & 3\ 716 & 85.53 & 176\ 548 \end{pmatrix} \\ X_{\text{SUP-20}} &= \begin{pmatrix} 3\ 617 & 3\ 978 & 89.31 & 198\ 653 \\ 4\ 213 & 4\ 398 & 95.17 & 301\ 476 \\ 3\ 326 & 3\ 695 & 92.14 & 321\ 743 \\ 3\ 417 & 3\ 514 & 84.43 & 165\ 497 \end{pmatrix} \\ X_{\text{SUP-25}} &= \begin{pmatrix} 3\ 712 & 3\ 613 & 88.70 & 185\ 796 \\ 3\ 815 & 3\ 877 & 91.58 & 295\ 564 \\ 4\ 117 & 4\ 312 & 95.07 & 315\ 675 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

3.2 规范化矩阵

为了便于比较排序, 依次将各级配矩阵内的指标进行无量纲化、归一化处理, 使得各试验指标量纲统一化, 便于比较排序。

评价指标数据一般可分为成本型和效益型两类, 其中成本型指标的数值越小表征效果越好, 而效益型则反之。

(1) 成本型指标:

$$y_{ij} = (\max x_j - x_{ij}) / (\max x_j - \min x_j), j = 1, 2, \dots, n \tag{1}$$

(2) 效益型指标:

$$y_{ij} = (x_{ij} - \min x_j) / (\max x_j - \min x_j), j = 1, 2, \dots, n \tag{2}$$

式中:  $\max x_j$ 、 $\min x_j$  分别为 j 试验指标中的最大、最小值。

由于指标集 B 均表现为效益型指标, 因此选用式 (2) 分别计算各级配的正规范化矩阵 Y:

$$\begin{aligned} Y_{\text{SMA-13}} &= \begin{pmatrix} 0.46 & 0.15 & 0.37 & 0.02 \\ 1.00 & 1.00 & 1.00 & 0.88 \\ 0.14 & 0.33 & 0.67 & 1.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \end{pmatrix} \\ Y_{\text{SUP-20}} &= \begin{pmatrix} 0.25 & 0.03 & 0.00 & 0.00 \\ 0.33 & 0.40 & 0.39 & 0.15 \\ 1.00 & 1.00 & 1.00 & 0.86 \\ 0.00 & 0.00 & 0.69 & 1.00 \end{pmatrix} \\ Y_{\text{SUP-25}} &= \begin{pmatrix} 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.42 & 0.12 & 0.40 & 0.14 \\ 0.57 & 0.45 & 0.67 & 0.87 \\ 1.00 & 1.00 & 1.00 & 1.00 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

3.3 权重确定

确定评价指标的熵,定义第  $j$  个评价指标的熵  $H_j$ :

$$H_j = -k \sum_{i=1}^m f_{ij} \ln(f_{ij}), j = 1, 2, \dots, n \tag{3}$$

$$f_{ij} = \frac{y_{ij}}{\sum_{i=1}^m y_{ij}}, k = \frac{1}{\ln m}$$

且假定  $f_{ij} = 0$  时,  $f_{ij} \ln f_{ij} = 0$ 。

则熵权可表示为:

$$W_j = \frac{1 - H_j}{n - \sum_{j=1}^n H_j} \tag{4}$$

参照式(3)计算出各指标的熵  $H_j$ :

$$H_{SMA-13} = [0.62, 0.60, 0.74, 0.54]$$

$$H_{SUP-20} = [0.65, 0.49, 0.745, 0.66]$$

$$H_{SUP-25} = [0.75, 0.61, 0.74, 0.65]$$

参照式(4)计算出各指标的熵权  $W_j$ ,同时构造各级配的熵权矩阵  $W_j$ :

$$\begin{aligned} W_{SMA-13} &= \begin{pmatrix} 0.25 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.27 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.17 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.31 \end{pmatrix} \\ W_{SUP-20} &= \begin{pmatrix} 0.14 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.13 \end{pmatrix} \\ W_{SUP-25} &= \begin{pmatrix} 0.2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.31 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.21 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.28 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

3.4 优化选择

(1) 求属性矩阵

选用式(5)分别将各级配的矩阵  $Y$  规格化成属性矩阵  $R$ :

$$R = Y \times W_j \tag{5}$$

则有:

$$\begin{aligned} R_{SMA-13} &= \begin{pmatrix} 0.12 & 0.04 & 0.06 & 0.01 \\ 0.25 & 0.27 & 0.17 & 0.27 \\ 0.04 & 0.09 & 0.11 & 0.31 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \end{pmatrix} \\ R_{SUP-20} &= \begin{pmatrix} 0.03 & 0.01 & 0.00 & 0.00 \\ 0.05 & 0.08 & 0.04 & 0.02 \\ 0.14 & 0.20 & 0.10 & 0.11 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.13 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R_{SUP-25} &= \begin{pmatrix} 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.08 & 0.04 & 0.08 & 0.04 \\ 0.11 & 0.14 & 0.14 & 0.24 \\ 0.20 & 0.31 & 0.21 & 0.28 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

(2) 求理想点

理想点  $P$ :

$$P = [p_1, p_2, p_3, \dots, p_n]$$

式中:  $p_j = \max\{r_{ij} | i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n\}$ 。

即在矩阵  $R$  中选出理想点  $P$ :

$$\begin{aligned} P_{SMA-13} &= [0.25, 0.27, 0.17, 0.31]; P_{SUP-20} = \\ &[0.14, 0.20, 0.10, 0.13]; P_{SUP-25} = [0.20, 0.31, \\ &0.21, 0.28] \end{aligned}$$

(3) 求距离

计算每个方案到理想点距离  $L$ :

$$L = [l_1, l_2, \dots, l_m]$$

式中:  $l_i = \sqrt{\sum_{j=1}^n (r_{ij} - p_j)^2}$ , 其中  $i = 1, 2, \dots, m$ 。

计算得:

$$L_{SMA-13} = [0.41, 0.04, 0.28, 0.51]^T$$

$$L_{SUP-20} = [0.27, 0.2, 0.02, 0.29]^T$$

$$L_{SUP-25} = [0.51, 0.4, 0.21, 0]^T$$

从 SMA-13 级配看:  $L_2 < L_3 < L_1 < L_4$  (综合路用性能:  $6\text{ mm} > 9\text{ mm} > 3\text{ mm} > 12\text{ mm}$ ); 从 SUP-20 级配看:  $L_3 < L_2 < L_1 < L_4$  (综合路用性能:  $9\text{ mm} > 6\text{ mm} > 3\text{ mm} > 12\text{ mm}$ ); 从 SUP-25 级配看:  $L_4 < L_3 < L_2 < L_1$  (综合路用性能:  $12\text{ mm} > 9\text{ mm} > 6\text{ mm} > 3\text{ mm}$ )。

4 结论

(1) 掺加 3、6、9、12 mm 4 种长度玻璃纤维均可以明显提高沥青混合料的各项路用性能,其中高温稳定性、低温抗开裂性、抗疲劳性能受玻璃纤维长度影响较大。

(2) 由灰色关联分析发现,不同长度玻璃纤维对不同混合料提升效果不同,推荐在 SMA-13 级配中使用 6 mm 长度的玻璃纤维,在 SUP-20 级配中使用 9 mm 长度的玻璃纤维,在 SUP-25 级配中使用 12 mm 长度的玻璃纤维。

(3) 不同级配沥青混合料所掺入的最佳玻璃纤维长度存在明显差异,随着沥青混合料级配中公称最大粒径的增加,掺加的玻璃纤维最佳长度也随之增大。

参考文献:

[1] 张杰. 玻璃纤维沥青混凝土的性能及配合比设计研究