

严寒地区玄武岩纤维沥青胶浆优化设计及机理研究

任秉龙

(山西省交通建设工程质量检测中心(有限公司),山西 太原 030032)

摘要:为改善严寒地区沥青胶浆的低温性能,该文选用3种长度、3种掺量的玄武岩纤维,3种普通沥青,研究纤维长度、掺量和沥青标号对纤维吸附沥青能力、纤维沥青低温最大拉力、纤维沥青低温应变能、纤维沥青冻融后锥入抗剪强度的影响。结果表明:纤维掺量对沥青的吸附能力影响最大;纤维长度对沥青的低温最大拉力、低温应变能影响最大;沥青标号对冻融后锥入抗剪强度影响最大;基于综合平衡法理论,纤维沥青胶浆最优方案为选用9 mm玄武岩纤维、110#普通沥青,纤维以7%的掺量拌和的纤维沥青胶浆在低温地区使用性能最优。

关键词:道路工程;玄武岩纤维沥青;优化设计;机理研究

对于年温差较大,低温时间长,积雪严重地区,为了提高沥青混合料的抗冻、抗温缩开裂能力,常采用改性沥青、高标号沥青等措施,尤其是在SBS改性沥青中添加纤维更为有效。如内蒙古兴安盟阿尔山市及周边,极端最低气温为 -45.7°C ,积雪期长达152 d,对沥青低温性能要求更为明显。玄武岩纤维作为一种无污染的天然矿物纤维,力学强度及其他性能稳定,很适合在寒冷、高海拔、常年积雪的地域使用。

目前,国内外研究人员对玄武岩纤维沥青的研究较多。张玉贞等认为,随粉胶比、纤维含量的增大,沥青胶浆的复数模量、车辙因子均呈增大的趋势,随温度的升高,沥青胶浆的温度敏感性能变强;熊刚等认为,玄武岩纤维对沥青混合料的高温抗车辙、低温抗裂性能、抗水损坏性能均有改善;胡志钊等认为,玄武岩纤维沥青混合料高温抗剪切变形能力和抵抗劈裂能力均高于木质素纤维;宋云祥等研究表明:沥青中添加玄武岩纤维后,原沥青中的自由沥青向结构沥青转化,提高了纤维沥青混合料的高温低温性能,但过多的纤维明显影响了混合料的施工工作性能;韦佑坡认为SBS改性沥青中添加玄武岩纤维后,纤维沥青的车辙因子明显提高,随玄武岩纤维的增加,表观黏度明显增加,且明显提高了沥青混合料的动态蠕变次数。以上研究主要考虑玄武岩纤维沥青的纤维含量、黏度,混合料的高低温性能、水稳定性能等方面,但在纤维沥青低温性能方面全面研究的较少,作用机理方面研究更少。

常规采用的针入度、延度、当量脆点等指标评价沥青胶浆的低温性能,但经验性太强,该文以玄武岩纤维对沥青的吸附能力、玄武岩纤维胶浆的低温最大拉力和低温应变能、冻融后锥入抗剪强度4个评价指标,以玄武岩纤维的长度、掺量、普通沥青的沥青标号为3个参数,采用四因素三水平正交试验,研究其参数的变化对玄武岩纤维胶浆低温性能的影响规律,同时得到低温性能最优的最佳组合,最后采用扫描电镜研究玄武岩纤维对普通沥青性能的改善机理。

1 试验材料与研究方法

1.1 试验材料

项目选用70#、90#、110#普通沥青,纤维选用6、9、15 mm玄武岩纤维,纤维质量掺量为4%、7%、10%;矿粉原材料为石灰岩,沥青、纤维指标见表1、2。纤维沥青胶浆制作时,选用粉胶比为1:2。制作方法为:将矿粉逐渐加入 $(160\pm 5)^{\circ}\text{C}$ 的普通沥青中,普通搅拌机搅拌均匀,再将经计算的纤维加入,进一步搅拌至无结团和缠绕即可。

1.2 沥青胶浆低温指标正交设计

对于低温多雪地区,通过改变纤维长度、掺量及沥青标号,研究沥青胶浆低温最大拉力和低温应变能、冻融后锥入抗剪强度、纤维对沥青的吸附能力。采用

$L_9(3^4)$ 正交表,其中四因素中的前三因素为纤维长度(A)、纤维掺量(B)、沥青标号(C),最后一因素选择空。三水平中,纤维长度:6、9、15 mm,纤维掺量:4%、7%、10%,沥青标号:70[#]、90[#]、110[#],三水平以1、2、3表示。

表 1 不同沥青技术指标

沥青类型	针入度(25℃)/ (0.1 mm)	软化点/ ℃	延度 (25℃)/cm	TFOT 老化后		
				质量损失/%	针入度比/%	延度(10℃)/cm
克炼 70 [#]	73.5	55.4	>100	0.045	71.4	22
克炼 90 [#]	98.6	45.5	>100	0.423	65.3	35
克炼 110 [#]	115.6	43.6	>100	0.232	56.4	36

表 2 玄武岩纤维技术指标

长度/mm	直径/ μm	弹性模量/MPa	极限抗拉强度/MPa	断裂应变/%
6、9、15	16	98	4 560	5.4

1.3 试验方法

1.3.1 板带拉伸试验

在玻璃板上将搅拌好的沥青制作板带拉伸试件,试件尺寸为长 12 cm、宽 8 cm、厚 0.5 cm,平行试验 3 次一组。采用 MTS 万能材料试验机开展纤维沥青的抗拉强度试验,将浇筑好的沥青板带夹持于 MTS 拉伸夹具中,在试验温度-20℃下保温 6 h 后,以拉伸速度 10 mm/min 试验,测试拉升过程中试件荷载变形曲线,曲线图中最大荷载用于计算沥青胶浆的低温最大拉力。由材料力学可知:材料被破坏时是内部存储的能量向外耗散的过程,并非应力或应变单一变量将材料破坏。所以,在低温情况下,低温应变能用于评价材料的开裂破坏应运而生,该文采用低温应变能评价低温积雪地区纤维沥青胶浆的低温性能,计算式为:

$$W = \int_0^{\delta_0} F d\delta \tag{1}$$

式中: F 为试件在某一时刻的应力(kPa); δ 为试件在某一时刻的应变; δ_0 为试件的最大应变; W 为试件的低温应变能。

1.3.2 沥青胶浆冻融锥入度试验

将针入度仪的针更换为重 226 g、锥角为 30°的圆锥体,同时采用大试样器皿盛装沥青,作为锥入度试验仪。将制备好的纤维沥青装入试模,冷却后,在-20℃下保温 3 h,再在 25℃水中保温 1 h,以此作为一次冻融循环,一共进行 4 次冻融循环,每组试件由 3 个试样组成。沥青冷却后,在 25℃的条件下,锥入时间为 5 s,计算冻融后锥入抗剪强度,抗剪强度 τ 计算公式

见式(2):

$$\tau = \frac{G \cos^2\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{\pi h^2 \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \tag{2}$$

式中: G 为试锤的作用荷载(kN); h 为锥入深度(m); α 为试锤的倾斜角度(°)。

1.3.3 纤维吸油量试验

将待测沥青分别称取 300 g,置于 3 个已知质量的 0.25 mm 网篮中,网篮下部接一铁盘,在 130℃的烘箱中,每隔 0.5 h,称网篮加剩余沥青及纤维的质量,计算沥青的剩余量(%),用于评价不同规格、用量的纤维吸油率。

2 试验结果与分析

2.1 正交试验结果与分析

对不同因素组合进行正交试验,试验表中 A、B、C 含义见前文 1.2 节,正交试验结果见表 3、4,纤维沥青胶浆最优方案见表 5。

正交试验的极差反映各参数对试验结果的影响严重程度,极差越大,此参数对试验结果的影响程度越大,反之越小。从表 4 可知:纤维掺量对沥青的吸附能力影响最大,纤维长度对沥青的低温最大拉力、低温应变能影响最大,沥青标号对冻融后锥入抗剪强度影响最大,所以在玄武岩纤维沥青设计过程中,纤维长度、纤维掺量影响程度更为明显,是设计重点。

表 3 沥青胶浆试验结果

试验 次数	因素					沥青的吸附能力 $r/\%$		低温最大	低温应变	冻融后锥入
	A	B	C	空列	试验方案	0.5 h	1.0 h	拉力 F/N	能 W/J	抗剪强度 τ/kPa
1	1	1	1	1	$A_1B_1C_1$	85.4	81.2	132.4	0.403	118.7
2	1	2	2	2	$A_1B_2C_2$	96.5	94.3	230.5	0.768	134.5
3	1	3	3	3	$A_1B_3C_3$	98.6	96.3	214.5	0.899	86.5
4	2	1	2	3	$A_2B_1C_2$	75.3	67.4	334.5	0.805	94.3
5	2	2	3	1	$A_2B_2C_3$	86.2	81.5	376.6	1.454	70.6
6	2	3	1	2	$A_2B_3C_1$	94.3	90.9	340.6	1.056	187.5
7	3	1	3	2	$A_3B_1C_3$	67.8	58.3	197.6	0.765	66.5
8	3	2	1	3	$A_3B_2C_1$	83.2	80.9	220.4	0.756	280.5
9	3	3	2	1	$A_3B_3C_2$	90.5	92.1	190.5	1.234	185.4

注:A:纤维长度;B:纤维掺量;C:沥青标号。

表 4 纤维沥青胶浆极差

影响因素	极差				
	纤维吸附沥青能力 $\gamma/\%$		低温最大	低温应变	冻融后锥入抗
	0.5 h	1 h	拉力 F/N	能 W/J	剪强度 τ/kPa
纤维长度	39.0	40.5	474.3	1.245	192.7
纤维掺量	54.9	72.4	163.0	1.216	206.1
沥青标号	10.3	17.7	95.3	0.903	363.1

表 5 纤维沥青胶浆最优方案

影响因素	最优方案				
	对沥青的吸附能 力(0.5 h)	对沥青的吸附 能力(1 h)	低温最大 拉力	低温应 变能	冻融后锥入抗 剪强度
纤维长度	A_1	A_1	A_2	A_2	A_3
纤维掺量	B_3	B_3	B_2	B_3	B_2
沥青标号	C_1	C_2	C_3	C_3	C_1

最优方案为在改变影响因素时,产生最优试验结果时对应的因素长度、掺量或沥青标号。玄武岩纤维对沥青的吸附能力不得过高,也不得过低,所以不采用沥青的吸附能力极值作为纤维最佳长度、最佳掺量的评价指标。该文采用表 5 中低温最大拉力、低温应变能、冻融后锥入抗剪强度评价各纤维参数的最佳值,以综合平衡法评价,纤维沥青胶浆最优方案为 $A_2B_2C_3$,即 9 mm 长玄武岩纤维、7%纤维掺量、110# 普通沥青拌和的纤维沥青胶浆低温性能最优。

2.2 对沥青吸附力的影响分析

对沥青吸附能力影响大的指标有纤维长度、纤维掺量,沥青标号对纤维吸收沥青的能力影响最小,而纤维掺量对沥青的吸附能力影响最大。不同纤维掺量时,纤维在沥青中的分散状态不同,纤维掺量越高,纤

维由于不能及时分散聚合为团的几率越高,纤维的比表面积使用率就越低,沥青对纤维的裹附能力下降,最终不能完全发挥出纤维对沥青的吸附能力。

2.3 对低温最大拉力、低温应变能的影响分析

沥青标号对纤维沥青低温最大拉力影响程度相对较小,而纤维长度对纤维沥青低温最大拉力影响最大。纤维沥青在低温板带拉升过程中,沥青和纤维形成三相共混体,纤维在沥青中起到加筋和阻裂的作用,可显著提高沥青的低温抗变形及抗开裂能力,但纤维在沥青中的不均匀分布,在拉升过程中会导致纤维的相对滑移,形成受拉薄弱面,最终导致应力集中破坏。

从低温应变能方面看,纤维掺量对低温应变能的影响略低于纤维长度,而纤维沥青的低温性能评价同时采用考虑应力、应变参数将更为全面。所以,为提高

纤维沥青的低温性能,首先应考虑纤维的长度,再考虑纤维的掺量,两参数考虑程度基本相同。

2.4 对冻融后锥入抗剪强度的影响分析

3 个参数对纤维沥青冻融后锥入抗剪强度的影响最为显著的为沥青标号,其次为纤维长度和掺量。在 25 ℃ 条件下,沥青表现为硬性、脆性,而沥青在锥入度试验时,经过 5 s 沉锥,锥体有足够的时间扎入纤维分布的沥青基体中,此时沥青的性能将表现更为重要。所以在考虑冻融后低温纤维沥青抗剪强度时,沥青类型选择将会优先。

3 玄武岩纤维与沥青的作用机理研究

玄武岩纤维及玄武岩纤维沥青的扫描电镜图像见图 1。

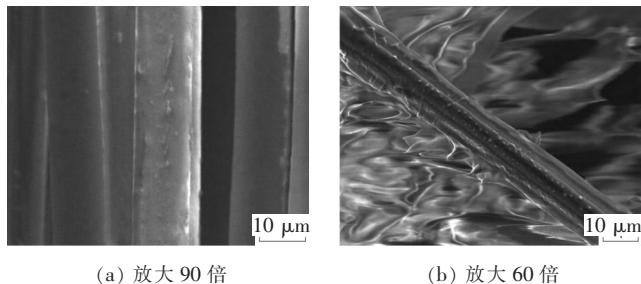


图 1 玄武岩纤维及其在沥青中的 SEM 图像

由图 1(a)可知:玄武岩纤维并非完全圆柱体,而是呈片状、扁圆状、柱体中线连续凹陷状,同时伴有不规则的突起或凹陷,此种结构的纤维,比表面积明显大于完全光滑圆柱体结构,沥青包裹后将会有更大的摩擦力,可大幅度增强纤维与沥青的黏结强度。由图 1(b)可知:玄武岩纤维与沥青包裹严实,表面界面浸润理论认为,两相之间的强度主要为两相的机械搭接和浸润吸附,对于非人为机械搭接的材料,其结构强度主要由浸润吸附实现。纤维表面的不均匀形状及表面凸起、凹陷明显增加了沥青在纤维表面的浸润效果,在宏观上表现为玄武岩纤维在沥青中具有极高的抗拔强度。

4 结论

(1) 纤维掺量对沥青的吸附能力影响最大,纤维

长度对沥青的低温最大拉力、低温应变能影响最大,而沥青标号对冻融后锥入抗剪强度影响最大,所以在玄武岩纤维沥青设计过程中,纤维长度、纤维掺量影响指标较多,是设计重点。

(2) 基于综合平衡法理论,纤维沥青胶浆最优方案为 $A_2B_2C_3$,即 9 mm 长玄武岩纤维、7% 掺量、110# 普通沥青拌和的纤维沥青胶浆在低温地区使用性能最优。

(3) 玄武岩纤维与沥青共混后,在扫描电镜 (SEM) 下,玄武岩纤维的表面凹凸及不规则的缺陷,使沥青的浸润更加充分,呈三维分布的玄武岩纤维与沥青的握裹力更加牢固。

参考文献:

- [1] 袁锦浪. 重冰冻区长寿命路面沥青混合料优化设计研究[D]. 长安大学硕士学位论文, 2012.
- [2] 何泰然. 严寒地区低碳小城镇规划研究[D]. 北京建筑大学硕士学位论文, 2017.
- [3] 金祖权, 高嵩, 侯保荣, 等. 玄武岩纤维增强路用混凝土力学与开裂性能[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2010(s2).
- [4] 吴萌萌, 李睿, 张玉贞, 等. 纤维沥青胶浆高低温性能研究[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2015(1).
- [5] 熊刚, 张航. 玄武岩纤维沥青混合料路用性能试验研究[J]. 公路交通技术, 2016(4).
- [6] 胡志钊, 陈州. 纤维沥青胶浆及沥青混合料路用性能试验研究[J]. 公路工程, 2014(4).
- [7] 宋云祥, 韦佑坡, 李玉梅, 等. 玄武岩纤维沥青胶浆的路用性能[J]. 公路交通科技, 2012(8).
- [8] 韦佑坡, 张争奇, 司伟, 等. 玄武岩纤维在沥青混合料中的作用机理[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2012(2).
- [9] 王书杰, 余秀兰, 王君. 基于 BBR 方法的沥青胶浆低温性能研究[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2018(3).
- [10] 王翠宏. 玄武岩纤维与布顿岩沥青复合改性沥青混合料性能及改性机理[J]. 公路工程, 2018(1).
- [11] 刘向杰. 玄武岩纤维沥青混合料路用性能研究[J]. 中外公路, 2018(5).
- [12] 郭寅川, 李震南, 申爱琴, 等. 玄武岩纤维沥青胶浆优化设计及机理分析[J]. 建筑材料学报, 2018(1).
- [13] 张红日. 玄武岩纤维与沥青粘结性对沥青混凝土的性能影响研究[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2018(2).