

# 玄武岩纤维与木质素纤维复合 SMA 路用性能试验研究<sup>\*</sup>

许庆祥, 刘朝晖, 柳力, 张允宝

(长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410004)

**摘要:** 为进一步提高 SMA(沥青玛蹄脂碎石)路面的耐久性和使用品质,在 SMA 沥青混合料中掺入不同比例复配的玄武岩纤维和木质素纤维,采用马歇尔试验方法确定不同复配比例下 SMA 的最佳油石比,通过车辙试验、浸水马歇尔试验、冻融劈裂试验和低温弯曲试验研究复合纤维 SMA 沥青混合料的路用性能。结果表明,与单一纤维 SMA 相比,复合纤维 SMA 的高温稳定性、水稳定性和低温抗裂性均有提升;木质素纤维和玄武岩纤维的复配比为 1:1 时复合 SMA 的综合路用性能最佳。

**关键词:** 公路;木质素纤维;玄武岩纤维;复合纤维 SMA;路用性能

中图分类号:U416.217

文献标志码:A

文章编号:1671-2668(2017)02-0088-05

SMA(沥青玛蹄脂碎石)采用间断级配,属于骨架密实结构沥青混合料,具有粗集料多、矿粉多、沥青结合料多、细集料少、掺加纤维增强剂及材料要求高等特点,既保持了大孔隙排水路面表面功能好的优点,又可克服其耐久性差的特点,兼具嵌挤和密实型混合料的长处。

玄武岩纤维属于矿物纤维,由纯天然玄武岩矿石经过 1 600 ℃ 高温熔融后拉丝而成,具有非常好的高温稳定性及比其他纤维更好的力学性能和更高的强度。木质素纤维属于植物纤维,是一种絮状有机纤维,由于其加工处理温度高达 250 ℃,其具有很好的化学和高温稳定性,不溶于一般溶剂,且具有较好的耐酸碱腐蚀性,对人体和自然环境无不良影响。在工程实际中,由于玄武岩纤维特殊的表面结构,沥青混合料的油石比较小,玄武岩纤维高强度的优点难以发挥出来,严重影响沥青路面的强度和阻水效果;木质素纤维的吸油率大,但由于其自身具有吸水能力强的特点,沥青混合料水稳定性难以得到保证。为了发挥两种纤维各自的特点,该文将不同复配比例的玄武岩纤维和木质素纤维掺入沥青混合料中,研究复合纤维 SMA 沥青混合料的路用性能。

## 1 原材料

(1) 沥青。采用壳牌 SBS 改性沥青 I-D,其性能技术指标见表 1,满足规范的要求。

表 1 SBS 改性沥青的主要技术指标

检测项目	技术要求	检测结果
针入度(25 ℃,100 g,5 s)/ (0.1 mm)	30~60	51.4
延度(5 ℃,5 cm/min)/cm	≥20	25.8
软化点(R&B)/℃	≥70	76.1
密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	实测	1.025
弹性恢复(25 ℃)/%	≥85	92
闪点(COC)/℃	≥230	300
溶解度(三氯乙烯)/%	≥99	99.5
质量损失/%	±1.0	0.18
RTFOT 后 残留针入度比(25 ℃)/%	≥65	82
延度(5℃)/cm	≥15	17.6

(2) 集料。粗集料采用江西萍乡的辉绿,岩其性能技术指标见表 2。细集料采用湖南湘乡的石灰

表 2 粗集料的主要技术指标

技术指标	技术要求	试验结果
石料压碎值/%	≤25	21.3
洛杉矶磨耗损失/%	≤28	17
视密度/(t·m <sup>-3</sup> )	≥2.60	2.985
吸水率/%	≤2.0	0.86
与沥青的粘附性/级	≥4	5
针片状颗粒含量/%	≤15	8.4
石料磨光值/BPN	≥42	60

<sup>\*</sup> 基金项目:国家自然科学基金资助项目(51678078)

岩,其技术性能指标见表 3。粗、细集料的技术性能均满足规范的要求。

表 3 细集料的主要技术指标

技术指标	技术要求	试验结果
视密度/(t·m <sup>-3</sup> )	≥2.50	2.69
坚固性/%	≥12	21
砂当量/%	≥55	73
塑性指数/%	无	2.5
粗糙度(流动时间)/s	实测	48

(3) 矿粉。采用由湖南湘乡的石灰岩磨细而成的矿粉,其性能技术指标见表 4,满足规范的要求。

表 4 矿粉的主要技术指标

技术指标	技术要求	试验结果
视密度/(t·m <sup>-3</sup> )	≥2.5	2.75
含水量/%	≤1	0.5
粒度范围/%		
<0.6 mm	100	100
<0.15 mm	90~100	95
<0.075 mm	75~100	85
外观	无团粒,不结块	合格
亲水系数	≤1	0.51
塑性指数/%	≤4	2.6

(4) 纤维。采用的玄武岩纤维和木质素纤维的性能技术指标见表 5,满足规范的要求。

表 5 纤维的主要技术指标

技术指标	玄武岩纤维	木质素纤维
直径/μm	14	46
长度/mm	6	1.5
密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	2.75	0.91
熔点/℃	1 050	180
吸湿率/%	0.07	13
抗拉强度/MPa	3 000~4 800	<300
弹性模量/GPa	90	3
断裂延伸率/%	3	20

2 复合纤维 SMA 组成设计

2.1 玄武岩纤维 SMA 沥青混合料级配及油石比

采用沥青面层常用的 SMA-13 级配,依据 JTG F40-2004 进行设计。初始纤维采用玄武岩纤维,掺量为沥青混合料质量的 0.4%,合成级配曲线见图 1,级配组成见表 6。以 6.0%为初始油石比,采用马歇尔试验方法确定最佳油石比,结果见表 7。

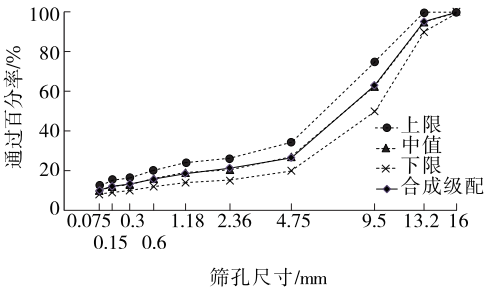


图 1 玄武岩纤维 SMA-13 沥青混合料的合成级配

表 6 玄武岩纤维 SMA-13 沥青混合料的级配

级配类型	下列筛孔(mm)的通过率/%									
	0.075	0.15	0.3	0.6	1.18	2.36	4.75	9.5	13.2	16
上限	12.0	15.0	16.0	20.0	24.0	26.0	34.0	75.0	100.0	100
中值	10.0	12.0	13.0	16.0	19.0	20.5	27.0	62.5	95.0	100
下限	8.0	9.0	10.0	12.0	14.0	15.0	20.0	50.0	90.0	100
合成级配	10.1	12.2	13.2	15.8	18.5	21.3	26.5	63.0	95.3	100

表 7 玄武岩纤维 SMA-13 沥青混合料马歇尔试验结果

油石比 OAC/%	毛体积相 对密度	理论最大 相对密度	空隙率/%	矿料间 隙率/%	沥青饱 和度/%	稳定 度/kN	流值/ (0.1 mm)
5.7	2.558	2.667	4.1	16.5	75.2	10.14	25.9
6.0	2.564	2.655	3.4	16.5	79.2	10.42	29.8
6.3	2.554	2.643	3.4	17.1	80.3	10.18	31.4

根据表 7,分析得玄武岩纤维 SMA—13 沥青混合料的最佳油石比为 5.98%,对应的空隙率为 3.4%,矿料间隙率为 16.5%,沥青饱和度为 79.1%,均符合规范要求。

## 2.2 复合纤维 SMA 沥青混合料油石比

以上述玄武岩纤维 SMA 沥青混合料的级配及油石比为基础,将玄武岩纤维和木质素纤维以不同复配比例掺入沥青混合料中,复配后的总纤维掺量保持 0.4%不变,通过马歇尔试验确定其最佳油石比,并与只掺木质素纤维和只掺玄武岩纤维的 SMA

沥青混合料进行对比。玄武岩纤维和木质素纤维的复配方式分为 3 种,分别为木质素纤维 0.1%+玄武岩纤维 0.3%、木质素纤维 0.2%+玄武岩纤维 0.2%、木质素纤维 0.3%+玄武岩纤维 0.1%,即复配比例(木质素纤维:玄武岩纤维)分别为 1:3、1:1、3:1。只掺木质素纤维和只掺玄武岩纤维沥青混合料的复配比例分别为 4:0、0:4。复合纤维 SMA 沥青混合料的马歇尔试验结果见表 8,根据试验结果确定的最佳油石比见表 9,其空隙率变化趋势见图 2。

表 8 不同复配比例时 SMA 沥青混合料马歇尔试验结果

复配比例	油石比 OAC/%	毛体积相 对密度	理论最大 相对密度	空隙率/%	矿料间 隙率/%	沥青饱 和度/%	稳定 度/kN	流值/ (0.1 mm)
1:3	5.58	2.543	2.679	5.1	16.9	69.8	9.24	24.3
	5.78	2.557	2.670	4.2	16.6	74.7	9.47	26.7
	5.98	2.561	2.662	3.8	16.6	77.1	9.98	28.4
	6.18	2.555	2.655	3.8	16.9	77.5	9.77	29.5
	6.38	2.539	2.647	4.1	17.6	76.7	9.45	30.4
1:1	5.58	2.534	2.673	5.2	17.2	69.7	9.12	22.4
	5.78	2.538	2.665	4.8	17.2	72.3	9.35	23.1
	5.98	2.552	2.657	4.0	16.9	76.6	9.63	25.5
	6.18	2.546	2.649	3.9	17.2	77.4	9.41	27.8
	6.38	2.541	2.641	3.8	17.6	78.4	9.05	28.2
3:1	5.58	2.533	2.668	5.1	17.2	70.6	8.87	22.7
	5.78	2.538	2.660	4.6	17.2	73.3	8.93	23.2
	5.98	2.551	2.652	3.8	16.9	77.5	9.26	24.9
	6.18	2.565	2.644	3.0	16.6	82.0	9.33	26.6
	6.38	2.558	2.636	3.0	17.0	82.6	8.98	29.3
4:0	5.58	2.518	2.663	5.4	17.7	69.2	8.55	21.4
	5.78	2.521	2.655	5.0	17.7	71.5	8.74	22.9
	5.98	2.532	2.647	4.3	17.5	75.2	9.13	25.8
	6.18	2.548	2.639	3.4	17.2	79.9	9.43	30.1
	6.38	2.545	2.631	3.3	17.4	81.2	9.15	31.7

由表 9 可知:随着木质素纤维在混合料中所占比例的增大,复合纤维 SMA 沥青混合料的最佳油石比逐渐增大,这是因为木质素纤维比玄武岩纤维具有更大的比表面积,纤维本身的粘附性使其吸附沥青的数量更大,纤维被更多的沥青包裹。

由图 2 可知:随着木质素纤维在混合料中所占

比例的增大,复合纤维 SMA 沥青混合料的空隙率呈现先增大后减小的趋势。这是由于木质素纤维比玄武岩纤维更易成团,无法和沥青混合均匀,在沥青用量较小时会产生较大的空隙率;而当木质素纤维用量继续增加时,沥青用量也逐渐加大,纤维与沥青更易形成胶浆,充分地填充在沥青混合料的空隙中,

表 9 复合纤维 SMA 沥青混合料最佳油石比及马歇尔体积指标

复配比例	油石比 OAC/%	空隙率/%	矿料间 隙率/%	沥青饱 和度/%
0 : 4	5.98	3.4	16.5	79.4
1 : 3	6.02	3.8	16.6	77.1
1 : 1	6.06	3.9	17.0	77.1
3 : 1	6.12	3.2	16.7	80.8
4 : 0	6.17	3.4	17.2	79.9

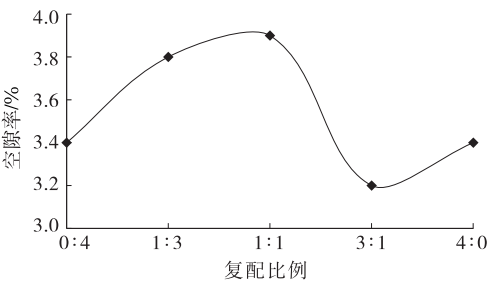


图 2 不同复配比例 SMA-13 沥青混合料空隙率变化趋势  
空隙率减小;在复配比例为 1 : 1 时空隙率最大。

3 复合纤维 SMA 的路用性能

3.1 高温稳定性

沥青路面高温稳定性是指沥青混合料在交通荷载反复作用下抵抗永久变形的能力。车辙是沥青路面最常见的破坏形式之一。采用温度 60 ℃、轮胎压力 0.7 MPa 条件下的车辙试验评价不同复配比例 SMA 沥青混合料的高温稳定性,试验结果见表 10。

表 10 不同复配比例 SMA-13 沥青混合料车辙试验结果

复配比例	动稳定度/ (次·mm <sup>-1</sup> )	复配比例	动稳定度/ (次·mm <sup>-1</sup> )
0 : 4	11 780	3 : 1	9 643
1 : 3	11 064	4 : 0	8 752
1 : 1	10 476		

由表 10 可知:随着 SMA 沥青混合料中木质素纤维所占比例的增大,混合料的高温性能逐渐降低,但均远高于规范要求(>3 000 次/mm),说明复合纤维 SMA 沥青混合料能有效提高路面的高温稳定性,玄武岩纤维对 SMA 沥青混合料高温性能的提升更明显。

3.2 水稳定性

沥青路面使用过程中,在车辆反复动态荷载作

用下,水渗入沥青混合料内部使沥青与集料的粘结力逐渐下降,沥青膜从石料表面脱落,导致沥青路面出现坑槽、推挤变形等损坏。水损坏是沥青路面的主要病害之一。根据 JTG E20—2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》,沥青混合料的水稳定性通过浸水马歇尔试验和冻融劈裂试验来评价。不同复配比例 SMA-13 沥青混合料水稳定性试验结果见图 3。

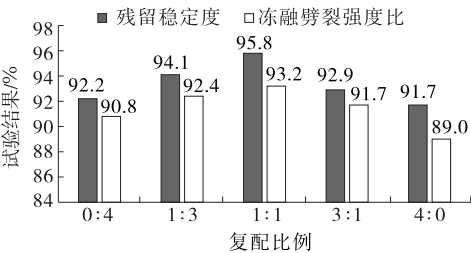


图 3 不同复配比例 SMA-13 沥青混合料  
水稳定性试验结果

由图 3 可知:浸水马歇尔试验和冻融劈裂试验结果具有近似的规律,在复配比例为 1 : 1 时,残留稳定度和冻融劈裂强度比达到峰值,表明当木质素纤维和玄武岩纤维以 1 : 1 的比例进行复配并掺入 SMA 沥青混合料中时混合料的水稳定性最强,相比于只掺木质素纤维和只掺玄武岩纤维的 SMA 沥青混合料,其残留马歇尔稳定度分别提高 3.6 % 和 4.1 %,冻融劈裂强度比分别提高 2.4 % 和 4.2 %。只掺木质素纤维的沥青混合料的水稳定性略差于只掺玄武岩纤维的沥青混合料,原因在于木质素纤维比玄武岩纤维具有更强的吸水性,更易降低沥青膜与集料的粘附性,减弱混合料的水稳定性。

3.3 低温抗裂性

沥青路面的低温开裂主要有两种形式:一种是由于气温骤降,沥青层内产生的应力大于混合料的极限抗拉强度而导致裂缝;另一种是沥青混合料经受长时间的温度循环,应力松弛性能下降,极限拉应变逐渐变小,从而产生温度疲劳裂缝。根据 JTG E20—2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》,采用低温弯曲试验评价不同复配比例 SMA 沥青混合料的低温抗裂性,试验结果见表 11。

由表 11 可知:不同复配比例 SMA 沥青混合料的最大弯拉应变均满足规范要求(>2 800 με),随着混合料中木质素纤维所占比例的增大,SMA 沥青混合料的最大弯拉应变逐渐增大,低温抗裂性逐渐增强;复合纤维 SMA 沥青混合料的最大弯拉应变

表 11 不同复配比例 SMA—13 沥青混合料  
低温弯曲试验结果

复配比例	抗弯拉强度/MPa	最大弯拉应变/ $\mu\epsilon$	弯曲劲度模量/MPa
0 : 4	11.43	3 380.4	3 381.9
1 : 3	10.31	3 502.1	2 942.9
1 : 1	10.28	3 557.6	2 889.1
3 : 1	10.16	3 569.4	2 845.4
4 : 0	9.78	3 634.2	2 691.1

均高于只掺玄武岩纤维的沥青混合料,其低温抗裂性优于玄武岩纤维 SMA 沥青混合料。

#### 4 结论

(1) 玄武岩纤维对 SMA 沥青混合料高温稳定性的提升比木质素纤维更明显;随着混合料中木质素纤维所占比例的增大,混合料的高温稳定性呈现下降趋势,复合纤维 SMA 沥青混合料的高温性能优于木质素纤维 SMA 沥青混合料。

(2) 当木质素纤维和玄武岩纤维以 1 : 1 的复配比例掺入 SMA 沥青混合料中时,混合料的水稳定性最强。

(3) 随着木质素纤维在混合料中所占比例的增大,混合料的低温抗裂性逐渐增强,复合纤维 SMA 沥青混合料的低温抗裂性优于玄武岩纤维 SMA 沥青混合料。

(4) 木质素纤维和玄武岩纤维的复配比例为 1 : 1 时,复合纤维 SMA 沥青混合料的路用性能最佳,能有效提高 SMA 路面的使用性能。

#### 参考文献:

- [1] 黄卫.大跨径钢桥面铺装设计理论与方法[M].北京:中国建筑工业出版社,2006.

- [2] 肖鹏,吴帮伟,徐亚,等.使用不同纤维的 SMA 路用性能试验研究[J].中外公路,2014,34(2).
- [3] 王安.玄武岩纤维 SMA—13 的路用性能研究与应用[D].长沙:长沙理工大学,2013.
- [4] 杨洋,马宝国,韩森.沥青玛蹄脂碎石混合料(SMA)的组成及路用性能分析[J].公路交通科技,2012,8(5).
- [5] E R Erbrown, J E Haddock, R B Mallick, et al. Development of a mixture design procedure for stone matrix asphalt(SMA)[R].NCAT Report No97—3,1997.
- [6] Fitzgerald R L. Novel applications of carbon fiber for hot mix asphalt reinforcement and carbon-carbon performs[D].Michigan: Michigan Technological University, 2000.
- [7] 杨红辉,袁宏伟,郝培文,等.木质素纤维沥青混合料路用性能研究[J].公路交通科技,2003,20(4).
- [8] 韩伟华.复合改性纤维沥青混合料路用性能研究[D].西安:长安大学,2007.
- [9] 陈明星,张俊,郝培文.复合纤维沥青胶浆性能与混合料高温性能研究[J].公路工程,2014,39(3).
- [10] 赵丽华.玄武岩纤维对沥青混合料影响机理的研究[D].大连:大连理工大学,2013.
- [11] 赵丽华,徐刚.矿物纤维对沥青混合料路用性能影响及机理分析[J].公路工程,2013,38(1).
- [12] 刘福军.玄武岩纤维沥青混合料路用性能研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2010.
- [13] 樊江涛.长陡坡路段复合纤维 SMA 沥青混合料路用性能研究[D].重庆:重庆交通大学,2014.
- [15] 向宇,刘朝晖,柳力.偶联改性玄武岩纤维细观特性及性能研究[J].公路与汽运,2016(1).
- [16] 付智.玄武岩纤维和外加剂在我国长寿命公路混凝土路面工程中应用新技术[A].第二届公路工程混凝土与外加剂应用技术研讨会报告集[C].2015.
- [17] 王明林.浅谈木质素纤维与聚酯纤维对 SMA 路用性能影响的试验[J].黑龙江交通科技,2009(9).

收稿日期:2016—10—17

(上接第 87 页)

- 动态模量研究[J].建筑材料学报,2013,16(2).
- [8] JTG E20—2011,公路工程沥青及沥青混合料试验规程[S].
- [9] Witczak M W, Bari J. Development of a master curve ( $E^*$ ) database for lime modified asphaltic mixtures [R]. Arizona State University, 2004.
- [10] Medani T O, Huerman M, Molenaar A A A. On the computation of master curves for bituminous mixes [A]. 3rd Euro Bitumen Congress[C]. 2004.

- [11] 林志坤.TLA 改性沥青应用研究及路面性能预估分析[J].公路与汽运,2015(4).
- [12] 王伟.TLA/SBS 复合改性沥青胶结料的抗老化性能[J].交通科学与工程,2013,29(4).
- [13] 谭敬敏.TLA 改性沥青在广肇高速公路中的应用研究[J].公路与汽运,2011(5).
- [14] 曹贵.SBS 改性沥青质量控制技术及应用研究[D].西安:长安大学,2015.

收稿日期:2016—09—27