

文章编号: 0451-0712(2006)06-0137-11

中图分类号: U414.03

文献标识码: B

# 高速公路 SMA 混合料 配合比设计及路用性能研究

申爱琴<sup>1</sup>, 王 娜<sup>2</sup>

(1. 长安大学公路学院 西安市 710064; 2. 山东基建股份有限公司 济南市 250014)

**摘 要:** 针对京珠高速公路粤境北段路线纵坡大, 途经地区地形复杂、降雨量大、多雾且能见度差、夏季高温、冬季冰冻、交通量大且超载严重等恶劣条件, 采用 SBS 改性台湾沥青, 通过对改性沥青玛蹄脂性能分析、SMA 矿料级配优化、体积特征控制参数严格筛选, 从 19 种初试 SMA 混合料中优选出 7 种具有代表性的 SMA 混合料, 通过路用性能检验, 成功铺筑了试验段。

**关键词:** SMA 配合比设计; 改性沥青玛蹄脂; 矿料级配优化; 路用性能

京珠高速公路粤境北段(简称“京珠北”)北接京珠国道主干线湘境高速公路, 路线向东南横穿粤北山区, 路线全长 109.937 km, 是北京—珠海国道主干线的广东段。该路段位于粤北山区, 沿线地形复杂, 路线纵坡大, 长陡坡路段多, 夏季高温、冬季冰冻、降雨量大, 多雾且能见度差。同时, 该路段交通量大, 超、重车较多。这些条件说明京珠北沥青混凝土路面问题已超越于现行路面设计、施工规范所涵盖范围, 按现行有关规范进行设计、施工已难以充分保证今后路面良好的长期使用性能。

目前国际上主要采用 SMA 沥青混合料来解决高温稳定性和低温抗裂性、高温稳定性和疲劳性能以及抗滑性能和耐久性等路面性能的 3 大尖锐矛盾。国内外研究成果和实践表明, SMA 沥青混合料与其他沥青混合料相比具有较强的抗车辙能力和抗低温变形能力, 可大大改善混合料的水稳定性, 具有良好的抗滑性能和耐老化性能, 延长使用寿命。

因此, 针对京珠北山区高速公路所处的特殊地形、恶劣的气候条件和繁重的交通现状, 使用 SMA 作为沥青路面抗滑层, 重点解决该地区路面的水稳定性和抗滑性、高温稳定性和耐久性的矛盾, 兼顾路面低温抗裂性; 同时深入研究 SMA 沥青混合料配合比设计, 优化出适用于广东山区高速公路的 SMA 矿料级配组成; 系统研究山区特殊条件下 SMA 施工关

键技术, 提出山区高速公路 SMA 沥青路面施工指南, 不仅解决京珠北高速公路 SMA 设计及施工问题, 而且为其他山区高速公路的配合比设计和施工提供参考。

本研究在理论分析的基础上, 通过均匀设计法优化 SMA 矿料级配, 确保 SMA 形成骨架结构, 以提高 SMA 路面的高温稳定性; 以体积设计法为基础, 深入研究 SMA 体积特征参数及影响因素, 通过优化控制 SMA 空隙率等重要体积参数, 以满足 SMA 路面水稳定性要求; 为保证路面具有良好的抗滑性能, 对影响 SMA 路面构造深度的因素进行了深入研究, 确保 SMA 路面具有满足该地区特殊条件下的构造深度。此外, 还对改性沥青玛蹄脂性能进行了研究, 提出最佳粉胶比范围, 以保证所设计的 SMA 路面具有一定的低温抗裂性和抗疲劳性。通过多种 SMA 混合料路用性能研究分析, 推荐最优方案, 并成功铺筑了试验路, 对室内研究结果进行验证。

## 1 原材料性能测试分析

### 1.1 基质沥青及改性沥青

本路段沥青路面抗滑表层采用改性沥青。根据广东省进口沥青供应情况, 选取泰普克 AH-70 号和台湾 AH-70 号两种基质沥青并采用 3%、4% 和 5% SBS 分别对两种沥青改性, 然后进行性能比较。

根据试验结果,选用台湾 AH-70 号重交通沥青为基 质沥青进行现场改性;改性剂使用岳阳巴陵牌 SBS YH-791-H,剂量为5%。沥青指标见表1,改性剂指标 见表2。

表 1 沥青与改性沥青性能试验结果

项目		台湾 AH-70 号基质沥青		5 %SBS 改性台湾 AH-70 号沥青		试验方法
		技术标准	试验结果	技术标准	试验结果	
针入度 0.1 mm	25 C	60~80	64	≥40	47	T0604—2000
	15 C	实测纪录	19.2	实测纪录	21.8	
	30 C	实测纪录	105.1	实测纪录	70.9	
R		—	0.999 4	≥0.997	0.999 9	
T <sub>800</sub>		—	47.4	—	61.1	
T <sub>1.2</sub>		—	-9.4	—	-22.0	T0605—1993
针入度指数 PI		—	-1.392	≥+0.2	1.10	
延度/cm	15 C	≥100	>150	—	—	
	5 C	—	—	≥20	42.5	
软化点/℃		44~54	49.0	≥60	86	T0606—2000
溶解度/%		≥99.0	99.1	≥99.0	—	T0607—1993
含蜡量/%		≤3.0	2.57	≤3.0	—	T0615—2000
闪点/%		≥230	342	≥230	346	T0611—1993
密度 15℃/(g/cm <sup>3</sup> )		实测纪录	1.040	实测纪录	1.035	T0603—1993
粘附性	辉绿岩	≥5 级	3	≥5 级	5	T0616—1993
	石灰岩	≥5 级	—	≥5 级	5	
弹性恢复/%		—	—	≥70	96.8	T0662—2000
TFOT 后残留物	质量损失/%	≤0.8	0.034	≤1.0	0.018	T0609—1993
	针入度比/%	≥55	69.2	≥65	95.7	
	延度 25℃/cm	≥50	—	—	—	
	延度 15℃/cm	实测纪录	>150	—	—	
	延度 5℃/cm	—	—	≥15	29.2	
	软化点/℃	实测纪录	54	—	—	

表 2 岳阳巴陵牌 YH—791—H SBS 改性剂主要技术指标

项目	指标	项目	指标
分子量/万	12~14	扯断伸长率/%	≥700
外观	白或微黄	扯断永久变形/%	≤40
灰份/%	≤0.20	硬度,邵尔 A 度	75±7
挥发份/%	≤1.00	熔体流动速率 g/10 min	≥0.50
300%定伸应力/MPa	≥1.7		
拉伸强度/MPa	≥18.0	溶液粘度/cp	≥2 500

1.2 矿料

SMA 所用的石料为辉绿岩集料,集料规格为 13.2/19 mm、5/13.2 mm 和机制砂,矿粉为白云岩磨制的石粉。集料技术性能指标试验结果和筛分结

果见表 3 和表 4 所示。

表 3 辉绿岩集料物理、力学指标

指标		试验结果	指标		试验结果
压碎值/%		11.08	毛体积密度	13.2/19	2.879
磨耗值/%		13.85	g/cm <sup>3</sup>	5/13.2	2.860
冲击值/%		5.1	<0.075 mm	13.2/19	0.9
抗压强度/MPa		148	颗粒含量/%	5/13.2	0.9
磨光值/BPN		51	砂当量	机制砂	64.3
表观密度 g/cm <sup>3</sup>	13.2/19	2.948	针片状/%	13.2/19	3.9
	5/13.2	2.929		5/13.2	7.5
	机制砂	2.873	坚固性/%		<1.0
	矿粉	2.861	矿粉亲水系数		0.64

表 4 矿料筛分试验结果

材料	通过下列筛孔(mm)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
13.2/19 mm	100	87.9	54.5	12.5	1.5	0.9					0.9
5/13.2 mm			100	98.5	28.3	6.6	4.3	4.0	3.6	2.3	0.9
机制砂				100	99.9	73.4	46.0	37.7	24.6	18.6	11.1
矿粉								100	99.8	99.2	90.8

1.3 纤维技术性能指标

研究初选 3 种纤维,分别为德国 JRS 公司生产的木质素颗粒纤维 VIATOP 80 和木质素松散纤维 APBOCEL ZZ 8-1 以及美国杜邦公司生产的聚酯纤维博尼维(BoniFibers),通过改性沥青玛蹄脂试验结果分析,选择使用木质素颗粒纤维 VIATOP 80,其技术指标如表 5 所示。

表 5 VIATOP 80 木质素颗粒纤维技术指标

项目	指标	项目	指标
特性	灰色、圆柱状	平均颗粒厚度/mm	5±1
ARBOCEL ZZ 8/1 含量/%	79~84	松散密度/(g/l)	450±50
平均颗粒长度/mm	2~8	筛析(<3.55 mm)/%	≤5

1.4 水泥和抗剥落剂技术性能测试分析

由于基质沥青与上面层集料辉绿岩的粘附性达不到 5 级,必须使用外掺剂来提高沥青与集料之间的粘附性,本研究采用水泥替代一部分矿粉或直接使用抗剥落剂,以此改善沥青混合料的抗水损害能力。所用水泥为昌山水泥厂生产的粤海 32.5(R)水泥。用粘附性指标考察抗剥落剂对沥青与石料之间粘附性的改善作用,试验结果见表 6。根据试验结果,建议抗剥落剂掺量为 0.4%。水泥可以替代一部分矿粉使用,以增加与沥青的粘附性,而水泥对沥青混合料粘附性的改善作用还需通过混合料性能检验。

表 6 掺加抗剥落剂沥青与集料粘附性试验结果

抗剥落剂 剂量/%	加抗剥剂后沥青未老化		加抗剥剂后沥青 经过薄膜烘箱老化	
	台湾 AH-70 号沥青	台湾 AH-70 号 沥青+5% SBS	台湾 AH-70 号沥青	台湾 AH-70 号 沥青+5% SBS
不掺	3	5	—	—
0.3	4	5	—	—
0.4	5	5	4	5
0.5	5	5	—	—

2 改性沥青玛蹄脂试验设计及性能研究

2.1 改性沥青玛蹄脂配比设计

在 SMA 沥青混合料中,沥青玛蹄脂由矿粉、改性沥青和纤维组成,实际上是一种带纤维的沥青胶浆。现代胶浆理论认为以填料为分散相而分散在高稠度的沥青介质中的微分散系对混合料性能的影响最大。玛蹄脂的组成结构决定 SMA 沥青混合料的高温稳定性和低温变形能力。

本研究主要考察材料配比、纤维种类、粉胶比  $F$  及温度对沥青玛蹄脂性能的影响,并通过调整配比来探求沥青玛蹄脂对混合料的影响。为在更大的范围内研究与其他因素的关系,粉胶比  $F$  可在 1.0~2.1 范围内取 5 个比值:1.0、1.2、1.5、1.8 及 2.0,进行试验分析。掺加的纤维有 3 种:木质素颗粒纤维、木质素松散纤维和有机聚酯纤维。各种沥青玛蹄脂的配比用量见表 7。测定各纤维改性沥青玛蹄脂不同温度下的针入度、延度及软化点。试验方法参考《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTJ 052-2000)中沥青试验方法。

表 7 不同纤维沥青玛蹄脂组成

组成类型及比例	木质素颗粒纤维 沥青玛蹄脂	木质素松散纤维 沥青玛蹄脂	有机聚酯纤维 沥青玛蹄脂
矿粉与改性沥青 质量比(粉胶比 $F$ )	1:1.2:1.1.5:1.1.8:1.2.1:1	同左	同左
纤维掺量/%	2.26%木质素 颗粒纤维	1.70%木质素 松散纤维	1.92%有机 聚酯纤维

注:纤维在沥青玛蹄脂中的比例是以 SMA 沥青混合料油石比 6.0%为初试油石比进行换算得到的。

2.2 改性沥青玛蹄脂性能测试及分析

在制备沥青玛蹄脂过程中,将改性沥青加热到 160~170℃,矿粉要预热到 160℃。先加入纤维,采用乳化沥青剪切机(去掉剪切头,只起搅拌作用且不损伤纤维)不停地搅拌,徐徐放入预热好的矿粉,一边放一边不停地搅拌,防止矿粉沉淀或遇热沥青聚集成团。一般搅拌 30 min 为宜。将制备好的沥青玛蹄脂进行性能测定,试验结果分析将另文给出。试验结

果表明:纤维品种、粉胶比和温度与改性沥青玛蹄脂的各指标间均有一定相关性。利用相关性回归公式,可预估温度一定时,不同粉胶比的玛蹄脂延度,或预估粉胶比一定时,不同温度下的玛蹄脂延度,尤其是低温下的玛蹄脂延度,作为检验沥青混合料低温性能优劣的直接方法。综合考虑不同纤维改性沥青玛蹄脂的高温性能、低温性能和感温性,其粉胶比具有一个满足各性能的较佳范围。考虑到该地区特殊的气候、地形状况,建议 SMA 沥青玛蹄脂混合料粉胶比  $F$  取值范围为:

掺加木质素颗粒纤维时,  $1.6 \leq F < 2.1$ ;

掺加木质素松散纤维时,  $1.5 < F < 2.1$ ;

掺加有机聚酯纤维时,  $1.5 < F < 2.1$ 。

针对广东山区高速公路处于高温、多雨等恶劣的气候条件,沥青玛蹄脂必须具有良好的高温性能,以保证 SMA 沥青混合料的高温稳定性。根据改性沥青玛蹄脂试验结果,并考虑到经济性以及广东地区已铺装路面使用纤维的情况,最终推荐使用木质素颗粒纤维作为试验研究和试验路铺筑时采用的纤维类型,其掺量为整个沥青混合料质量的 0.4%。木质素颗粒纤维改性沥青玛蹄脂试验结果见表 8。

### 3 SMA 混合料矿料级配研究

#### 3.1 粗集料级配设计

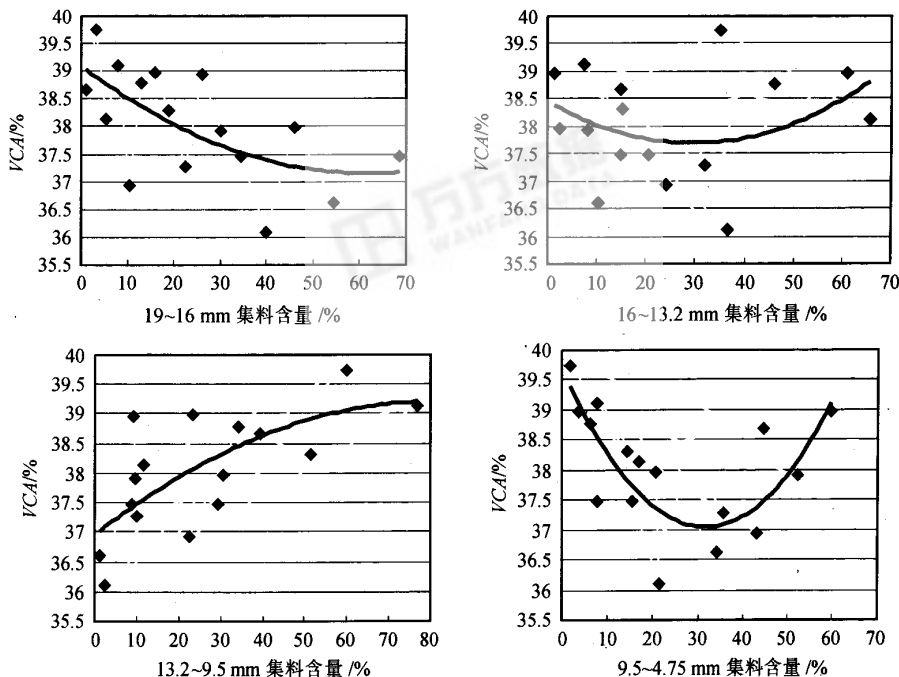


图 1 各档粗集料对 VCA 的影响

表 8 木质素颗粒纤维改性沥青玛蹄脂试验结果

指标		粉胶比 $F$				
		1.0	1.2	1.5	1.8	2.1
针入度 0.1 mm	15 C	10.13	9.22	7.17	7.47	8.27
	25 C	29.77	26.8	23.82	23.18	23.78
	30 C	40.07	41.93	34.86	32.97	32.53
$T_{800}/C$		61.1	58.7	58.6	61.0	63.6
$T_{1.2}/C$		-8.1	-5.2	-1.9	-3.4	-6.0
针入度指数 $PI$		-0.134	-0.655	-1.004	-0.606	-0.089
延度(5 cm/ min)/cm	5 C	1.4	1.1	1.0	0.8	0.5
	10 C	3.53	2.63	2.1	1.7	2.1
	15 C	6.73	5.33	4.03	3.7	3.5
	25 C	17.5	13.1	12.43	10.6	10.07
软化点/ $C$		89.5	90.75	93.5	99.85	100

粗集料是 SMA 沥青混合料的重要组成部分,它对 SMA 充分发挥其结构优点起关键作用。为了研究 SMA 级配中粗集料含量对骨架结构的影响,本试验主要应用了 16 水平 4 因素的均匀设计方法,对 SMA 沥青混合料粗集料骨架结构进行试验设计,以探求粗集料中每一档用量对骨架结构的影响。

通过均匀设计法设计的 16 种级配的干插捣试验和马歇尔击实试验,各级粗集料含量与骨架间隙率 VCA 的关系见图 1 和表 9。

表9 粗集料间隙率VCA与各档粗集料用量的相关分析

各档用量/%	回归方程	$R^2$	相关系数 $R$
19~16 mm 集料 用量( $X_1$ )	$VCA=0.000\ 5X_1^2-0.063\ 6\ X_1+39.104$	0.395 5	0.628 9
16~13.2 mm 集料 用量( $X_2$ )	$VCA=0.000\ 9X_2^2-0.051\ 6\ X_2+38.457$	0.107 9	0.328 5
13.2~9.5 mm 集料 用量( $X_3$ )	$VCA=0.000\ 3X_3^2+0.055\ 5\ X_3+36.959$	0.485 3	0.696 6
9.5~4.75 mm 集料 用量( $X_4$ )	$VCA=0.002\ 7X_4^2-0.168\ 4\ X_4+39.703$	0.601 6	0.775 6

从图1及表9中可发现: 13.2~9.5 mm 集料用量与VCA呈二次曲线增加趋势,因此若想得到较密实的粗集料骨架,应尽量减少此档集料使用。9.5~4.75 mm 集料含量与VCA的相关性最好。当该粒级集料用量占粗集料用量的比例为37.08%时,可使骨架间隙率VCA最小。因此为得到粗集料的密实骨架结构,级配设计时可取9.5~4.75 mm 集料含量占粗集料用量的37%左右,并尽量减少13.2~9.5 mm 集料含量,对于19~16 mm 集料含量可以采用经验值,而对16~13.2 mm 集料含量的限制很少,由此得到的粗集料级配见表10。

表 10 粗集料级配

筛孔/mm	19	16	13.2	9.5	4.75
通过率/%	100	94~92	63~55	37	0

### 3.2 细集料级配设计

为使细集料能有较大的凝聚力、密实度及较小的空隙率,可采用前苏联的 $k$ 法进行设计, $k$ 取0.7,细集料级配见表11。

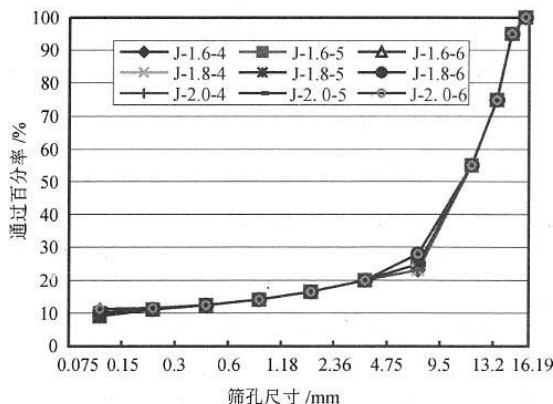


图2 SMA 初试级配

表 11 细集料级配

筛孔/mm	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
通过率/%	100	100	64	39	21	9	0

#### 4 SMA 混合料配合比设计

#### 4.1 初试级配设计

根据改性沥青玛蹄脂试验结果,采用木质素颗粒纤维作为 SMA 混合料配比设计研究使用的纤维种类,其改性沥青玛蹄脂的粉胶比  $F$  在  $1.6 \sim 2.1$  范围内高温、低温性能较好。由此可选用  $1.6$ 、 $1.8$  和  $2.0$  等 3 种粉胶比。结合均匀设计法得出的粗集料级配及  $k$  法设计的细集料级配,初选  $4.75 \text{ mm}$  通过率分别为  $23\%$ 、 $25\%$  及  $28\%$ ,固定对骨架空隙影响最为显著的  $4.75 \sim 9.5 \text{ mm}$  档集料的最佳用量(即占整个粗集料用量的  $37\%$  左右),从而确定不同粉胶比的 SMA 沥青混合料初试级配共 9 种。同时选用合同文件中值级配 J-7 进行对比。另外,从试验中发现对粗集料骨架结构空隙率产生显著影响的还有  $13.2 \sim 9.5 \text{ mm}$  这档集料的用量(相关系数  $0.69$ ),因此可以根据经验值固定  $13.2 \sim 9.5 \text{ mm}$  的用量,使  $9.5 \sim 4.75 \text{ mm}$  这档集料的用量发生变化,变化  $4.75 \text{ mm}$  通过率为  $23\%$ 、 $25\%$  和  $28\%$ ,采用 3 种粉胶比又形成 9 种初试级配。19 种级配见表 12 和图 2。

#### 4.2 初试级配沥青用量确定

初试沥青用量采用同济大学提出的 SMA 沥青混合料沥青合理用量的算法确定。19 种初试级配的初试沥青用量见表 13 所示。

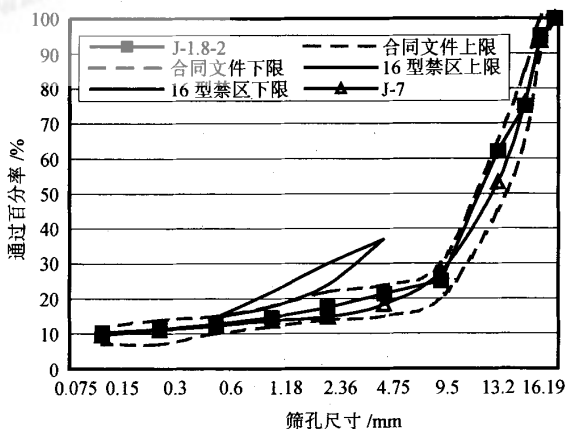




表.12 SMA-16 初试级配

级配类型	通过下列方筛孔(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
J-1.6-1	100	95	75	58.12	23	19.5	15.79	13.22	11.39	10.10	9.20
J-1.6-2	100	95	75	60.12	25	21.5	17.07	14.00	11.81	10.27	9.20
J-1.6-3	100	95	75	63.12	28	24.5	18.99	15.17	12.45	10.54	9.20
J-1.8-1	100	95	75	60.12	23	19.5	16.20	13.92	12.29	11.15	10.35
J-1.8-2	100	95	75	62.12	25	21.5	17.48	14.70	12.72	11.32	10.35
J-1.8-3	100	95	75	65.12	28	24.5	19.40	15.87	13.35	11.59	10.35
J-2.0-1	100	95	75	60.12	23	19.5	16.62	14.62	13.20	12.20	11.50
J-2.0-2	100	95	75	62.12	25	21.5	17.90	15.40	13.62	12.37	11.50
J-2.0-3	100	95	75	65.12	28	24.5	19.81	16.57	14.26	12.63	11.50
J-7	100	93.6	75.9	53.21	27.7	18.40	14.74	13.74	12.17	11.13	9.73
J-1.6-4	100	95	75	55	23	20	16.46	14.02	12.27	11.05	9.06
J-1.6-5	100	95	75	55	25	20	16.46	14.02	12.27	11.05	9.06
J-1.6-6	100	95	75	55	28	20	16.46	14.02	12.27	11.05	9.06
J-1.8-4	100	95	75	55	23	20	16.46	14.02	12.27	11.05	10.19
J-1.8-5	100	95	75	55	25	20	16.46	14.02	12.27	11.05	10.19
J-1.8-6	100	95	75	55	28	20	16.46	14.02	12.27	11.05	10.19
J-2.0-4	100	95	75	55	23	20	16.46	14.02	12.27	11.40	11.32
J-2.0-5	100	95	75	55	25	20	16.46	14.02	12.27	11.40	11.32
J-2.0-6	100	95	75	55	28	20	16.46	14.02	12.27	11.40	11.32

表 13 SMA-16 级配的初试沥青用量(计算法)

级配类型	J-1.6-1	J-1.6-2	J-1.6-3	J-1.8-1	J-1.8-2	J-1.8-3	J-2.0-1	J-2.0-2	J-2.0-3	J-7
油石比/%	5.78	5.95	6.0	5.9	6.1	6.1	6.0	6.1	6.2	6.0
级配类型	J-1.6-4	J-1.6-5	J-1.6-6	J-1.8-4	J-1.8-5	J-1.8-6	J-2.0-4	J-2.0-5	J-2.0-6	——
油石比/%	5.7	5.85	6.1	5.83	5.94	6.06	5.85	6.05	6.12	——

4.3 初试配比马氏试验结果及分析

以各级配计算所得的初试沥青用量为基础,上下浮动±0.3%,进行马歇尔试验,从而确定各SMA混合料(以S表示,与级配相区别)的最佳沥青用量及空隙率。试验结果见表14所示。

19种初试SMA混合料中,虽然均已形成骨架结构,但空隙率差异较大,考虑到该地区特殊的地理、气候及交通条件,选取空隙率范围为3.5%~4.0%作为设计目标。以SMA体积参数空隙率VV为3.5%~4.0%、VMA>17%、VFA为75%~85%及粗集料骨架间隙率 $VCA_{DRC}>VCA_{mix}$ 为控制指标,选取混合料S-1.6-3、S-1.8-2、S-2.0-2、S-7、S-1.6-6、S-1.8-5和S-2.0-5为SMA主级配混合料研究类型。并将以上所选7种混合料分别进行肯塔堡飞散试验和谢伦堡沥青析漏试验以检验沥青用量是否合理。

4.4 SMA主级配混合料配比确定

肯塔堡飞散试验和谢伦堡沥青析漏试验结果见

表15。

从表15中可以看出7种级配的SMA混合料的肯塔堡飞散试验和谢伦堡沥青析漏试验结果均远远小于规范要求值。因此用马歇尔法初步确定的沥青用量可以作为目标配合比设计的沥青用量,可按此沥青用量进行SMA沥青混合料7种级配的路用性能试验,并通过路用性能的对比,推荐最佳配合比,铺筑试验路。

5 SMA混合料路用性能检验及分析

7种SMA主级配混合料路用性能试验结果见表16和图3~图6所示。

从试验结果中可以看出:混合料S-1.8-5的动稳定度DS最高,60min车辙深度d最小,其抗车辙变形能力最强,水稳定性最好;混合料S-1.8-2的构造深度和摩擦系数最大,抗滑性能最好;混合料S-1.6-6的抗疲劳性能最好,其疲劳寿命对应力水平

表 14 SMA-16 初试级配混合料的物理指标汇总

SMA 混合料类型	最佳油石比 %	稳定度 kN	流 值 0.1 mm	密 度 g/cm <sup>3</sup>	理论密度 g/cm <sup>3</sup>	VV %	VMA %	VFA %	VCA <sub>mix</sub> %	VCA <sub>DRC</sub> %
S-1.6-1	5.8	6.05	24.5	2.475	2.608	5.1	18.9	73.0	38.6	43.53
S-1.6-2	6.0	6.25	23.1	2.495	2.614	4.6	18.5	75.3	39.8	43.49
S-1.6-3	6.1	7.21	26.3	2.509	2.609	3.8	17.8	78.5	41.8	43.23
S-1.8-1	6.0	6.78	25.3	2.492	2.612	4.6	18.5	75.2	38.2	43.58
S-1.8-2	6.1	6.85	26.8	2.504	2.606	3.9	17.9	78.1	39.4	43.32
S-1.8-3	6.1	7.54	27.5	2.524	2.611	3.3	17.4	80.9	41.5	43.30
S-2.0-1	6.0	7.51	29.2	2.514	2.610	3.7	17.7	79.2	37.7	43.62
S-2.0-2	6.1	7.47	28.8	2.514	2.609	3.6	17.7	79.4	39.3	43.54
S-2.0-3	6.2	8.03	31.9	2.519	2.611	3.5	17.6	79.9	41.7	43.33
S-7	6.0	9.29	30.9	2.519	2.616	3.8	17.7	78.6	40.3	42.64
S-1.6-4	5.8	7.43	24.6	2.505	2.625	4.6	18.3	75.0	37.8	44.01
S-1.6-5	5.9	7.96	24.5	2.510	2.625	4.4	18.2	75.9	39.3	44.02
S-1.6-6	6.0	9.81	26.7	2.519	2.624	4.0	17.8	77.5	41.5	44.03
S-1.8-4	5.9	8.47	25.4	2.521	2.625	4.0	17.8	77.8	37.4	44.01
S-1.8-5	6.0	9.1	26.3	2.527	2.624	3.7	17.6	79.0	38.9	44.02
S-1.8-6	6.1	9.42	27.8	2.542	2.624	3.1	17.1	81.8	41.0	44.03
S-2.0-4	5.95	9.29	26.6	2.518	2.625	4.1	17.9	77.3	37.5	44.01
S-2.0-5	6.0	9.1	26.3	2.532	2.624	3.5	17.4	79.9	38.8	44.02
S-2.0-6	6.1	9.26	24.6	2.535	2.623	3.4	17.3	80.5	41.2	44.03

表 15 肯塔堡飞散试验和谢伦堡析漏试验结果

配合比种类	油石比/%	析漏试验混合料损失/%	要求值 %	飞散试验(20℃)混合料损失/%	要求值 %
S-1.6-3	6.1	0.097	<0.1	3.5	<20
S-1.8-2	6.1	0.067		3.73	
S-2.0-3	6.1	0.073		4.91	
S-7	6.0	0.09		2.8	
S-1.6-6	6.0	0.08		2.98	
S-1.8-5	6.0	0.051		3.02	
S-2.0-5	6.0	0.053		3.37	

表 16 7 种 SMA-16 混合料的车辙试验结果

混合料类型	S-1.6-3	S-1.8-2	S-2.0-2	S-7	S-1.6-6	S-1.8-5	S-2.0-5
最佳油石比/%	6.1	6.1	6.1	6.0	6.0	6.0	6.0
动稳定度 DS/(次/mm)	5 888	6 848	6 702	8 438	6 176	9 034	7 236
60 min 车辙深度 d/mm	1.54	1.19	1.21	1.02	1.38	0.91	1.05
残留稳定度/%	82.6	85.7	84.1	84.4	73.7	82.4	80.3
冻融劈裂强度比/%	85.3	92.6	81.2	91.3	91.3	95.5	88.7
构造深度/mm	1.24	1.37	1.31	1.36	1.15	1.26	1.17
摩擦系数/BPN	56.9	58.7	53.7	55.8	53.7	56.7	50.9
渗水系数/(ml/min)	不透水	不透水	不透水	不透水	不透水	不透水	不透水
抗疲劳性能	k	654.79	365.93	306.9	474.35	1 333.21	663.59
	n	2.43	2.82	3.71	3.35	1.91	2.26
抗弯拉强度/MPa	9.90	8.05	9.65	10.58	10.21	6.27	8.72
破坏应变 $\epsilon_B/(\times 10^{-6})$	3 036	2 321	2 073	2 629	3 353	2 783	2 214
弯曲劲度模量 $S_B$ /MPa	3 360	3 563	5 185	3 591	2 833	3 328	4 046

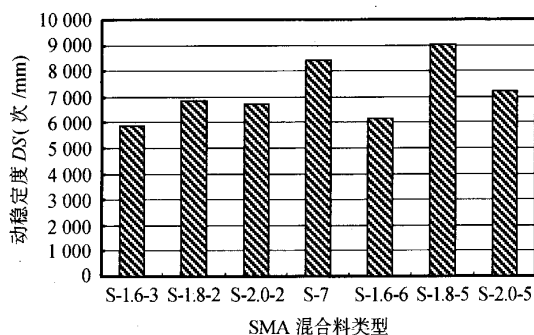


图3 不同级配的SMA-16混合料动稳定度

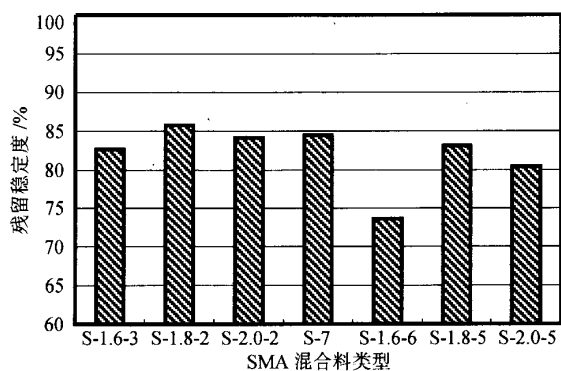
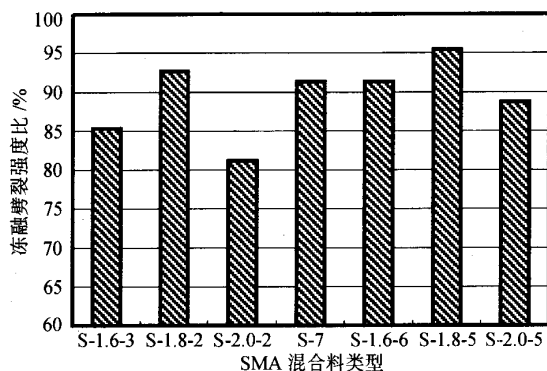
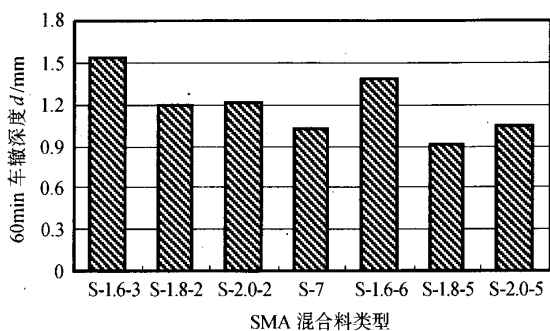


图4 残留稳定度与冻融劈裂强度试验结果

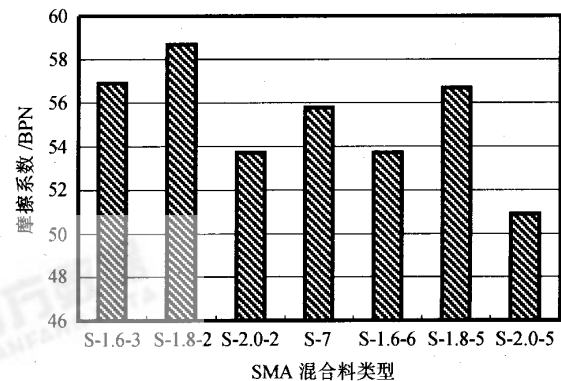
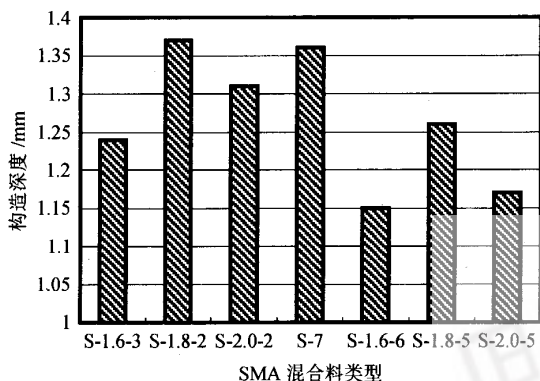


图5 构造深度与摩擦系数试验结果

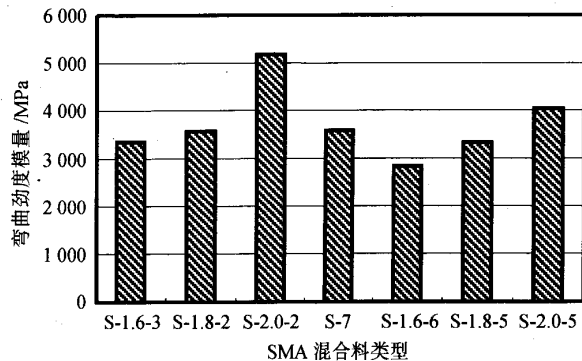
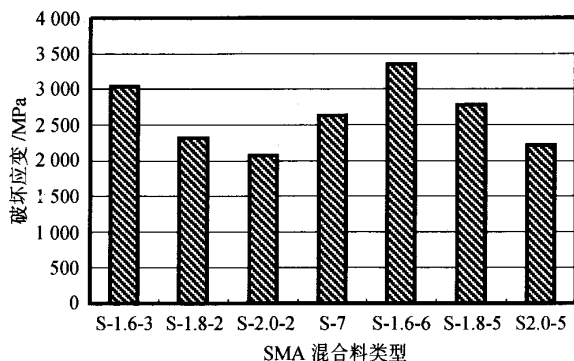


图6 低温弯曲试验结果



的变化不敏感;7 种级配混合料的低温抗裂性都达到规范的要求。混合料 S-1.6-6 的低温抗裂性能最好。考虑到京珠北山区高速公路特殊的气候、地形及交通条件,推荐使用高温性能和水稳定性最好的混合料 S-1.8-5。各因素对混合料性能的影响及分析另文给出。

6 试验路简介

6.1 试验路结构

2002 年 10 月 25 日在 K50+890~K51+240 右幅,按目标及热仓配比分别以 6.0%和 6.2%的油石比,铺筑了两段试验路。试验路路面结构见图 7。试验路铺筑结果见图 8。

4.5 cm 厚 SMA-16 型上面层
AC-20 I 型中面层
AC-25 II 型中面层
基层
土基

图 7 试验路路面结构

6.2 原材料及配比

考虑到本路段为国家公路交通主干线,交通量

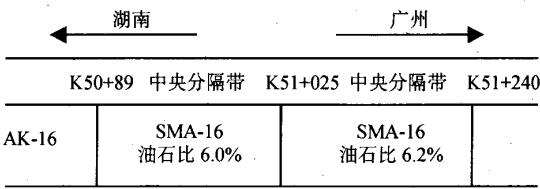


图 8 两段试验路布置

大、重车多以及所处山区特殊的地理、气候、地质和水文条件,在材料方面使用 5% SBS 改性沥青,提高整个混合料的高低温性能,并掺加 2% 的水泥提高石料与沥青的粘附性,以改善混合料抗水损害的能力,同时添加 0.4% 的颗粒状木质素纤维 (VIATOP 80)。在级配设计方面按照室内研究结果,选择了高温性能和水稳性能最优的级配 S-1.8-5,并用料场的统料进行配制;确定沥青用量时,在满足路用性能的前提下,尽可能使用较小的油石比,以避免该地区普遍存在的高温病害。根据室内确定的目标配合比和施工单位提供的热料筛规格 (4 个热筛孔径为: 22 mm、16 mm、9 mm、3 mm),对 4 个热仓料分别取样,经室内筛分、级配合成及密度试验,得出的生产配比见图 9。根据确定的热仓材料配比和目标配合比设计确定的两种沥青用量,按施工控制沥青用量范围 ( $\pm 0.3\%$ ) 进行马歇尔试验,试验结果见表 17。

表 17 SMA-16 生产配合比设计试验结果汇总

油石比 %	密度 g/cm <sup>3</sup>	空隙率 %	沥青体积百分率 %	矿料间隙率 %	沥青饱和度 %	稳定度 kN	流值 0.1 mm	残留稳定度 %	冻融劈裂强度比 %	动稳定度 次/mm
5.7	2.516	4.4	13.2	17.6	74.8	7.48	30.4	—	—	—
6.0	2.520	3.9	13.8	17.7	78.2	7.76	31.3	86.0	87.2	>6 000
6.2	2.532	3.1	14.3	17.5	82.1	8.97	31.6	92.6	97.9	>6 000
6.5	2.526	2.9	15.0	17.9	83.6	8.96	33.1	—	—	—
回归值 6.0	2.525	3.7	13.9	17.5	79.0	8.20	31.2	—	—	—
回归值 6.2	2.528	3.3	14.3	17.6	81.3	8.60	31.8	—	—	—
热仓集料配比	16/22 : 9/16 : 3/9 : <3 : 矿粉 : 水泥 = 30% : 36% : 15% : 9% : 8% : 2%								试验路油石比为 6.0%和 6.2%	

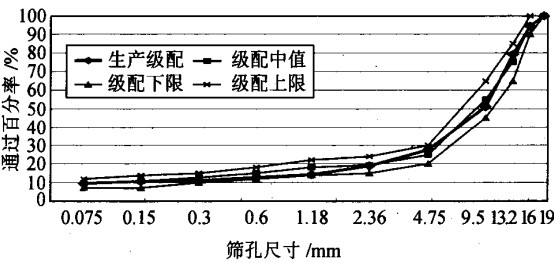


图 9 SMA-16 生产(热仓)合成级配曲线

6.3 试验路检测结果及分析

在铺筑试验路过程中,从现场取拌和楼拌制的混合料在室内进行了马歇尔试验、抽提试验。试验路竣工后在现场进行了切板(室内车辙试验用)、取芯、构造深度、摩擦系数等多项检测。检测结果表明现场切板的动稳定度大于 6 000 次/mm,表明混合料高温稳定性满足要求。构造深度检测结果均满足大于 1.0 的要求。压实度代表值大于 98%,现场空隙率小

于6.0,保证了路面的水稳定性。摆值结果偏小,这是由于SMA-16路面构造深度大,表面宏观空隙(开口空隙)大,测定摆值时滑块与路面实际接触面积小,且该试验路段正处于长直陡坡路段的下坡段,试验时沿行车方向测定摆值,也可能导致滑块在路面的实际滑动距离偏小,导致摩擦系数摆值测定结果偏小。

## 7 结论

本研究在借鉴国内外已有成果的基础上,针对京珠北高速公路恶劣的地形、气候及交通条件,通过对改性沥青玛蹄脂性能分析、SMA矿料级配优化、体积特征控制参数严格筛选,从19种初试SMA混合料中优选出7种具有代表性的SMA混合料,通过路用性能检验,成功铺筑了试验段。

通过大量的试验分析研究,可得到以下结论。

(1)纤维品种、粉胶比和温度对改性沥青玛蹄脂的各指标均有一定影响。沥青玛蹄脂的延度比沥青延度更能反映SMA沥青混合料的流变性能。综合考虑不同纤维改性沥青玛蹄脂的高温、低温和感温性,确定掺加木质素颗粒纤维时的最佳粉胶比为 $1.6 \leq F < 2.1$ 。

(2)均匀试验结果表明:为得到密实骨架结构,可取9.5~4.75 mm档集料用量占整个粗集料用量的37%左右,并尽量减少使用13.2~9.5 mm档集料。

(3)为保证京珠北SMA路面的高温稳定性,空隙率VV为3.5%~4.0%,并与其他体积特征参数要求 $VCA_{DRC} > VCA_{mix}$ 、 $VMA > 17\%$ 、 $75\% < VFA < 85\%$ 共同确定SMA的主级配。

(4)混合料S-1.8-5的动稳定度DS最高,其抗车辙变形能力最强,水稳定性最好;混合料S-1.8-2的抗滑性能最好;混合料S-1.6-6的低温性能及抗疲劳性能最好;7种级配混合料的低温抗裂性都达到规范的要求。考虑到京珠北山区高速公路特殊的气候、地形及交通条件,推荐使用高温性能和水稳定性最好的混合料S-1.8-5。

(5)SMA中采用2%水泥替代部分矿粉较掺加抗剥落剂更能提高其水稳性,而且经济,有利于环保。

(6)考虑到京珠北所处地区夏季高温,路面纵坡大,首要任务是保证路面的高温稳定性和水稳定性。通过试验路检测认为:室内目标空隙率可适当增大到4.5%,但必须保证98%的压实度条件下现场空隙

率控制在6%以内。生产配合比一定要严格控制关键筛孔4.75 mm和0.075 mm的通过率,使其与目标配合比尽量接近。

(7)SMA路面施工应加强碾压工序的紧密衔接,尤其是冬季低温期施工,更要注意压实过程的温度控制,减少初压时间,尽可能将复压时间提前。建议混合料摊铺后,直接使用振动压路机碾压,以保证路面的压实度。

(8)结合广东省SMA配合比设计和路面使用的经验教训,参考所铺筑试验路的检测结果认为此段SMA路面由于纵坡较大、夏季温度高,路面对抗剪切能力和高温稳定性要求较高,建议采用最佳油石比减少0.2%~0.3%(油石比为5.7%~5.8%)作为生产配比。

## 参考文献:

- [1] 沈金安,编著.改性沥青与SMA路面[M].人民交通出版社,1999.
- [2] Brown E R, ed. An Investigation of Stone Matrix Asphalt Mortars[M]. NCAT, 1996.
- [3] 王娜. 南方山区高速公路SMA配比设计及路用性能研究[D]. 长安大学硕士论文, 2003.
- [4] 付菁. 改性沥青SMA混合料路用性能与结构分析[D]. 西安公路交通大学硕士学位论文, 1998.
- [5] 赵可. SMA配合比设计方法、路用性能及施工技术研究[C]. 天津市市政工程研究院, 2002.
- [6] 申爱琴, 付菁. SMA混合料组成结构、强度机理及影响因素分析研究[J]. 西安公路交通大学学报, 1998, (10).
- [7] 申爱琴, 王江帅, 等. 改性沥青SMA及抗滑表层路用性能研究[J]. 中国公路学报, 1998, (7).
- [8] 申爱琴, 张争奇. 阿尔巴尼亚沥青SMA在山西灵石——霍州高速公路中的应用[J]. 石油沥青, 2001, (3).
- [9] 方开泰, 王元. 均匀设计与均匀设计表[M]. 北京科学出版社, 1994.
- [10] Brown E R, Haddock J E, Mallick R B, Lynn T A. Development of Mixtures Design Procedure for Stone Matrix Asphalt (SMA)[M]. NCAT, 1997.
- [11] Brown E R, Haddock J E. A Method Ensure Stone-on-Stone Contact in Stone Matrix Asphalt Paving Mixtures[M]. NCAT, 1997.
- [12] 蒋庆华. 沥青混合料低温性能与沥青路面抗裂技术研究[D]. 长安大学硕士学位论文, 2001.
- [13] 林绣贤. SMA目标配合比快速确定法[J]. 华东公路, 2001, (4).
- [14] 张肖宁, 郭祖怀, 等. 按体积法设计沥青混合料[J]. 哈尔滨工业大学学报, 1995, 128(2).

- [15] 申爱琴,蒋庆华,等. 矿料级配对沥青混合料路用性能影响[J]. 长安大学学报,2002,(11). 博士学位论文,2001.
- [16] 申爱琴. SBR改性克拉玛依沥青SMA混合料性能研究[J]. 内蒙古公路与运输,2001,(8). [18] 张宗涛. 沥青混合料级配优化的研究[D]. 长安大学硕士学位论文,2000.
- [17] 卢永贵. 沥青玛蹄脂碎石混合料研究[D]. 长安大学 [19] 沈金安. 解决高速公路沥青路面水损害早期损坏的技术途径[J]. 公路,2000,(5).

## Gradation Design of SMA Mixture in Jing-Zhu Expressway and Research on Road Performances

SHEN Ai-qin<sup>1</sup>, WANG Na<sup>2</sup>

(1. Highway College Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. Shandong Infrastructure Company, Jinan 250014, China)

**Abstract:** In the north of Jing-Zhu Expressway, there are many unfavorable features, such as large longitudinal grade of line, complicate topographic form, large precipitation, heavy fog and poor ability of sight, high temperature in summer, freezing in winter, heavy traffic and serious surcharge in passing area. Aiming at these, in this research SBS modified Taiwan asphalt is used. Furthermore, by analyzing performance of modified asphalt matrix, optimizing mineral aggregate gradation of SMA and selecting volumetric characteristic controlling indexes strictly, seven kinds of typical SMA mixtures are selected from 19 kinds of tentative mixtures. Then the road performances are tested. So the tested road is laid down successfully.

**Key words:** SMA gradation design; modified asphalt matrix; optimizing mineral aggregate gradation; road performance

### 超浅埋隧道施工取得技术突破

宁常高速茅山隧道主体工程全部结束。同济大学采用了先进的检测仪器,对隧道施工进行逐项检测,合格率达到100%,防水效果显著,几场大雨过后,未有渗漏现象。该隧道的安全建成为低山丘陵地区的超浅埋隧道施工提供了宝贵经验。

该隧道在施工过程中遇到了诸多困难;隧道最浅仅0.8 m,西隧道左线进口132 m,最大埋深仅为7.25 m,开挖后,洞顶草根、树根依稀可见;三车道大跨度(有效净宽15.65 m,开挖宽度17.33 m),超扁平(扁平度为0.553 m);地质构造复杂,隧道介于茅山东西活动断裂带之间,断层纵横交错,出现多处溶洞;围岩类别低,I类围岩达65%以上;生态环保要求高,为保护水系和生态环境,增加了60余m明洞,配削竹式洞门,融洞山一色,环境优美。

该隧道施工质量控制采用了多元体系,由施工单位自控,监理单位监控,特聘同济大学检测整体质量,监控观测由东南大学承担。从检测结果看,洞顶最大的沉降量仅为33 mm,有效地控制了隧道变形,为施工安全提供了可靠的保障。