

DOI:10.20035/j.issn.1671-2668.2023.03.021

# 矿料级配对 SMA-10 沥青磨耗层技术性能影响研究

曾双强

(广州新粤交通技术有限公司, 广东 广州 510663)

**摘要:** 将 2.36 mm 筛孔作为关键筛孔,在规范设定的 20%~32%通过率范围内设计 13 种 SMA-10 矿料级配方案,研究 2.36~4.75 mm 集料含量对 SMA-10 混合料体积指标的影响;从 13 种级配方案中选取 5 组具有代表性的级配进行路用性能试验,结果显示,与未掺加 2.36~4.75 mm 集料的混合料相比,2.36~4.75 mm 集料含量为 4.0%时,SMA-10 混合料的动稳定度提高 19.1%,车辙深度降低 5.1%,最大弯拉应变提高 10.0%,残留稳定度提高 15.4%,冻融劈裂抗拉强度比提高 10.9%,路用性能优良。

**关键词:** 公路;矿料级配;SMA-10 沥青磨耗层;路用性能

中图分类号:U418.6

文献标志码:A

文章编号:1671-2668(2023)03-0094-04

抗滑磨耗层厚度是传统沥青罩面厚度的 1/3~1/2,不仅可缩短工期,降低对人们生产、生活的影响,还能大幅减少沥青和石材用量,降低工程造价<sup>[1]</sup>。同时,超薄磨耗层作为一种路面结构,不仅可以用于旧路面养护翻新,修复中轻度开裂、表面松散和抗滑性损失严重的路面,还可作为新建道路的抗滑层<sup>[2]</sup>。间断级配沥青玛蹄脂碎石混合料(SMA)中粗骨料比例大,粗骨料彼此嵌挤形成较大碎石骨架强度和构造深度<sup>[3-5]</sup>,同时较高的矿粉和沥青含量填充结构内部空隙,结构整体稳定性强,高温抗车辙、低温抗裂、抗滑与耐久能力强<sup>[6]</sup>。本文设计 13 种 SMA-10 矿料级配方案,研究关键筛孔 2.36 mm 通过率和 2.36~4.75 mm 集料含量对 SMA-10 沥青混合料技术性能的影响。

## 1 原材料

### 1.1 沥青结合料

沥青胶结料采用中国石化生产的 SBS(I-D)改

性沥青,其主要技术指标(见表 1)符合规范要求。

表 1 SBS 改性沥青的主要技术指标

技术指标	试验结果	技术要求
针入度(25℃,100 g,5 s)/(0.1 mm)	51	40~60
延度(5℃,5 cm/min)/cm	30	≥20
软化点/℃	76.0	≥60
运动黏度(135℃)/(Pa·s)	1.9	≤3
弹性恢复(25℃)/cm	87.5	≥75

### 1.2 集料

粗集料采用玄武岩碎石,采用反击式破碎机生产,表面洁净无杂质,形状规整;细集料也采用玄武岩碎石。粗细集料的物理、力学指标分别见表 2、表 3,均符合规范要求。

填料采用矿粉,由石灰石研磨而成,表面洁净无杂质,干燥,无结块团粒,其物理、力学指标(见表 4)满足规范要求。

表 2 粗集料的主要技术指标

集料粒径/mm	压碎值/%	洛杉矶磨耗值/%	堆积密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	表观相对密度	吸水率/%	针片状颗粒含量/%	坚固性/%
13.20	17	19	1 610	2.741	0.37	7	9
9.50	16	18	1 600	2.782	0.64	6	9
4.75	—	17	1 580	2.812	1.55	6	7
2.36	—	15	1 520	2.885	2.15	—	6
技术要求	≤26	≤28	—	≥2.6	≤2	≤15	≤12

表3 细集料的主要技术指标

技术指标	试验结果	技术要求
表观相对密度	2.902	≥2.5
坚固性(>0.3 mm)/%	15	≥12
含泥量(<0.075 mm)/%	1.2	≤3
砂当量/%	67	≥60
棱角性(流动时间)/s	54	≥30

表4 矿粉的主要技术指标

技术指标	试验结果	技术要求
表观相对密度	2.680	≥2.50
含水量/%	0.05	≤1
通过率/%	<0.600 mm	100
	<0.150 mm	95
	<0.075 mm	88
亲水系数	0.8	<1
塑性指数	3.7	<4

## 2 SMA-10 配合比设计

在 SMA-10 级配设计上,《公路沥青路面施工技术规范》设定 4.75 mm 筛孔通过率为 28%~60%,该粒径集料这么大的筛分范围很大程度上增加了设计难度。借鉴以往设计经验,以 2.36 mm 筛孔作为关键筛孔,该筛孔推荐通过率为 20%~32%,设计 13 种矿料级配,其中:级配 1~7 为以粒径 ≥2.36 mm 的粗集料、粒径 <2.36 mm 的细集料含量比例 68:32 为基准,粗集料含量以 2% 幅度减小的间断级配;级配 8~13 采用增加 2.36~4.75 mm 集料含量的方法设计(见表 5)。除 2.36 mm、4.75 mm 筛孔通过率发生变化外,其他筛孔通过率变化不大。

按最佳油石比 6.0%,采用 13 种矿料级配方案分别成型 SMA-10 混合料试件进行体积指标测试,结果见表 6。

表5 SMA-10 矿料级配设计方案

级配方 案编号	下列筛孔(mm)的通过率/%								
	13.200	9.500	4.750	2.360	1.180	0.600	0.300	0.150	0.075
级配 1	100.0	97.4	32.0	32.0	23.2	21.5	14.3	12.6	9.3
级配 2	100.0	97.5	30.0	30.0	22.7	21.2	14.5	12.1	9.5
级配 3	100.0	97.7	28.0	28.0	22.3	20.6	13.7	11.6	9.1
级配 4	100.0	97.5	26.0	26.0	23.1	19.7	14.1	11.8	8.5
级配 5	100.0	97.2	24.0	24.0	22.5	21.7	15.3	12.4	8.7
级配 6	100.0	97.6	22.0	22.0	22.5	19.2	13.5	11.2	8.9
级配 7	100.0	97.7	20.0	20.0	23.1	19.7	13.7	11.5	8.6
级配 8	100.0	97.5	34.0	32.0	23.3	19.7	14.3	10.8	9.2
级配 9	100.0	97.4	36.0	30.0	22.7	20.5	13.7	11.2	9.7
级配 10	100.0	97.8	38.0	28.0	23.4	21.2	14.2	11.3	9.5
级配 11	100.0	97.5	36.0	32.0	23.8	20.8	13.5	10.7	8.8
级配 12	100.0	98.1	40.0	32.0	22.5	21.4	13.7	12.3	8.6
级配 13	100.0	97.8	44.0	32.0	23.9	21.1	14.1	11.6	9.1

表6 SMA-10 混合料试件的体积指标

级配方 案编号	矿料间隙率/%	空隙率/%	粗集料间 隙率/%	骨架间隙率/%	沥青饱和度/%	理论密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )	毛体积密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )
级配 1	18.3	3.48	35.36	41.37	81.0	2.452	2.451
级配 2	18.6	3.51	35.64	41.45	81.1	2.448	2.453
级配 3	18.9	3.55	36.21	41.55	81.2	2.438	2.456
级配 4	19.5	3.64	36.52	41.72	81.3	2.434	2.458

续表6

级配方案编号	矿料间隙率/%	空隙率/%	粗集料间隙率/%	骨架间隙率/%	沥青饱和度/%	理论密度/ ( $g \cdot cm^{-3}$ )	毛体积密度/ ( $g \cdot cm^{-3}$ )
级配 5	19.7	3.67	36.89	41.94	81.4	2.422	2.462
级配 6	20.3	3.74	37.27	42.31	81.6	2.401	2.463
级配 7	20.8	3.79	37.55	42.59	81.8	2.377	2.465
级配 8	17.5	3.32	35.23	40.74	81.0	2.536	2.448
级配 9	17.6	3.37	35.77	40.85	80.9	2.544	2.453
级配 10	18.8	4.22	43.44	43.31	77.6	2.442	2.465
级配 11	17.1	3.24	34.86	40.21	81.1	2.558	2.441
级配 12	18.1	3.67	37.17	42.72	79.7	2.531	2.461
级配 13	19.6	4.44	43.71	43.63	77.3	2.402	2.468

由表 6 可知:

(1) 按级配 1~7 间断级配设计的 SMA-10 混合料的各项技术指标均满足规范要求,以 2% 的幅度减少 2.36 mm 筛孔通过率, SMA-10 混合料的骨架间隙率和粗集料间隙率增大,且粗集料间隙率小于骨架间隙率。随着 2.36 mm 筛孔通过率的降低,混合料中粒径  $< 2.36$  mm 的细集料含量减少,粒径  $> 2.36$  mm 的粗集料含量增大,低细集料含量无法很好地填充粗集料骨架结构空隙,因而骨架间隙率和粗集料间隙率增大。粗集料间隙率小于骨架间隙率,说明粗集料骨架结构状态稳定,尚未被细集料拉开空隙,也说明试件成型时压实功可以很好地将 SMA-10 混合料捣实。

(2) 增加 2.36~4.75 mm 集料含量, SMA-10 混合料的粗集料间隙率和骨架间隙率先减小后增大; 2.36~4.75 mm 集料含量小于 8% 时, SMA-10 的各项技术性能符合规范要求; 继续增加其含量,空隙率超过规范要求,且粗集料间隙率大于骨架间隙率,表明 2.36~4.75 mm 集料含量太高会对粗集料产生干涉,骨架密实结构遭到破坏,粗集料间隙被扩大,且混合料无法通过机械捣实, SMA-10 混合料的路用性能下降。粗集料间隙率、骨架间隙率与 2.36~4.75 mm 集料含量的关系见图 1。

(3) 受限于目前的碎石生产工艺,碎石生产厂家很难彻底将 2.36~4.75 mm 碎石排除并在热料拌和时完全筛除该档集料,可能会加重离析,出现沥青料外溢现象。对比级配 1~7 和级配 8~13 的试验结果,除级配 10 和级配 13 外,提高 2.36~4.75 mm 集料含量有助于提高混合料的密实度,表现为矿料

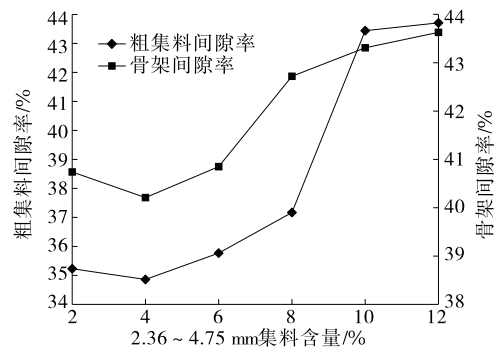


图 1 粗集料间隙率、骨架间隙率与 2.36~4.75 mm 集料含量的关系

间隙率、空隙率、骨架间隙率、粗集料间隙率降低,理论密度增大,毛体积密度减小;降低粒径  $< 2.36$  mm 的细集料含量可以增大沥青饱和度。沥青饱和度为沥青结合料占粗集料空隙的体积比,在一定范围内其值越大,表示沥青填充效果越好,沥青对集料的包裹状态越好。

### 3 路用性能试验研究

综合考虑 13 种级配 SMA-10 混合料的体积指标及《公路沥青路面施工技术规范》对 4.75 mm 筛孔通过率的设定范围(28%~60%),选定具有代表性的级配 1、级配 8、级配 11、级配 9、级配 12(2.36~4.75 mm 集料含量分别为 0、2.0%、4.0%、6.0%、8.0%)进行路用性能试验。

#### 3.1 抗车辙性能

按规范要求,分别以级配 1、级配 8、级配 11、级配 9、级配 12 成型 SMA-10 混合料标准车辙板试件,在 0.7 MPa 标准轴载、60 °C 试验温度下进行车辙试验,试验结果见表 7、图 2。

表7 不同级配 SMA-10 混合料车辙试验结果

级配方案编号	动稳定度/(次·mm <sup>-1</sup> )	车辙深度/mm
级配1	5 672	1.311
级配8	6 085	1.282
级配11	6 754	1.244
级配9	6 522	1.295
级配12	6 076	1.574

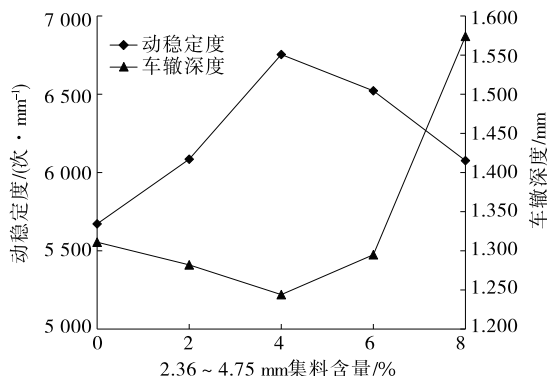


图2 动稳定度、车辙深度与2.36~4.75 mm 集料含量的关系

由表7、图2可知:5组级配中,级配11的动稳定度最大、车辙深度最小,抗车辙性能最好。2.36~4.75 mm 集料含量低于4%时,SMA-10混合料的动稳定度呈直线增大、车辙深度呈直线下下降,其含量每增加2%,动稳定度提高7%,车辙深度下降2%。说明在一定范围内时,随着2.36~4.75 mm 集料含量的增加,SMA-10混合料的高温稳定性和抗车辙能力提高。2.36~4.75 mm 集料含量高于4%时,SMA-10混合料的动稳定度下降,车辙深度增大,高温稳定性降低,抗车辙能力变差。2.36~4.75 mm 集料含量低于4%时,2.36~4.75 mm 集料作为细集料能很好地填充粗骨料的结构空隙,改善集料级配,从而提高集料骨架的稳定性,混合料稳定性随之提高;2.36~4.75 mm 集料比表面积大,能更好地与沥青形成沥青胶浆,增大沥青与集料的接触面积,沥青裹覆在其表面形成沥青薄膜,沥青的胶凝能力提高,混合料结构更稳定。2.36~4.75 mm 集料含量超过4%时,过多的细集料对粗集料产生干涉,骨架密实结构遭到破坏,混合料稳定性降低。

### 3.2 低温抗裂性能

成型长×宽×高为300 mm×100 mm×50 mm的不同级配SMA-10混合料小梁试件进行低温三点弯曲试验,试验结果见图3。

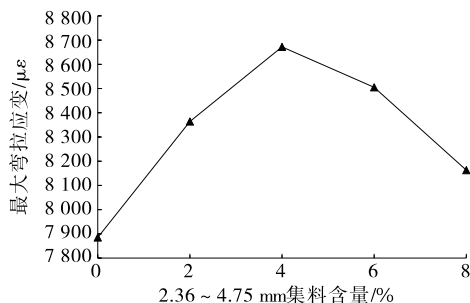


图3 最大弯拉应变与2.36~4.75 mm 集料含量的关系

由图3可知:相比其他几组级配,级配11的低温抗裂性能最好。2.36~4.75 mm 集料含量低于4%时,随着其含量的增大,SMA-10混合料的最大弯拉应变增大,说明试件脆性降低,抗裂性能增强;2.36~4.75 mm 集料含量高于4%时,随着其含量的增大,SMA-10混合料的最大弯拉应变快速下降,但都高于7 000  $\mu\epsilon$ ,满足规范要求。

### 3.3 抗水损害性能

成型不同级配SMA-10混合料标准圆柱体试件进行冻融劈裂试验,分析不同级配SMA-10混合料的抗水损害性能,试验结果见图4。

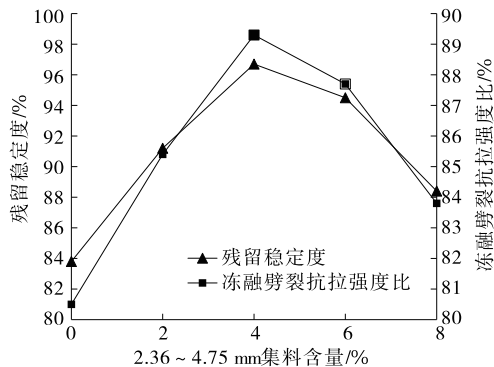


图4 残留稳定度、冻融劈裂抗拉强度比与2.36~4.75 mm 集料含量的关系

由图4可知:掺加2.36~4.75 mm 集料的SMA-10混合料的抗水损害性能均优于不掺加2.36~4.75 mm 集料的SMA-10混合料。2.36~4.75 mm 集料含量为4%(级配11)时,SMA-10混合料的残留稳定度和冻融劈裂抗拉强度比最大,与不掺加2.36~4.75 mm 集料的SMA-10混合料相比,分别提高15.4%、10.9%,抗水损害性能最好;2.36~4.75 mm 集料含量大于4%时,SMA-10混合料的抗水损害性能虽然呈下降趋势,但冻融循环后试件的劈裂抗拉强度比都大于75%,抗水损害性能好。

(下转第117页)

- [3] 于天来,李海生,黄巍,等.预应力钢丝绳加固钢筋混凝土梁桥抗剪性能[J].吉林大学学报(工学版),2019,49(4):1134—1143.
- [4] 薛素铎,石光磊,庄鹏.SMA 复合摩擦阻尼器性能的试验研究[J].地震工程与工程振动,2007,27(2):145—151.
- [5] LAGOUDAS D C, BO Z H, QIDWAI M A. A unified thermodynamic constitutive model for SMA and finite element analysis of active metal matrix composites[J]. Mechanics of Composite Materials and Structures, 1996, 3(2):153—179.
- [6] AURICCHIO F, TAYLOR R L. Shape-memory alloys: Modelling and numerical simulations of the finite-strain superelastic behavior[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1997, 143(1/2):175—194.
- [7] PATOOR E, EBERHARDT A, BERVEILLER M. Micromechanical modelling of superelasticity in shape memory alloys[J]. Journal De Physique IV, 1996, 6: 277—292.
- [8] AURICCHIO F, MARFIA S, SACCO E. Modelling of SMA materials: Training and two way memory effects[J]. Computers & Structures, 2003, 81(24/25):2301—2317.
- [9] 邓宗才,李庆斌.形状记忆合金混凝土轴心构件的变形特性[J].清华大学学报(自然科学版),2002,42(11):1544—1547.
- [10] 李清鑫,刘小燕,张华,等.裂缝宽度的提取及在桥梁承载力评估中的应用研究[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2020,17(1):60—64.
- [11] 肖勇刚,熊晨.组合加固法在钢筋混凝土 T 型梁桥中的应用[J].交通科学与工程,2021,37(2):36—40.
- [12] 张恒,罗雷.某连续刚构桥体外预应力加固后承载力评估[J].公路与汽运,2022(6):122—126.
- [13] 张旺.预应力钢绞线加固损伤梁抗剪性能试验研究[D].西安:西安理工大学,2019.

收稿日期:2022-03-02

\*\*\*\*\*

(上接第 97 页)

#### 4 结论

本文将 2.36 mm 作为关键筛孔,在规范设定 20%~32%筛孔通过率范围内设计 13 种矿料级配,研究矿料级配对 SMA-13 沥青混合料技术性能的影响,主要结论如下:

(1) 完全筛除 2.36~4.75 mm 集料,随着 2.36 mm 筛孔通过率的降低,级配 1~7 SMA-10 混合料的粗集料间隙率、骨架间隙率增大,且粗集料间隙率小于骨架间隙率。

(2) 增加 2.36~4.75 mm 集料含量(级配 8~13),2.36~4.75 mm 集料含量<8%时,SMA-10 混合料的各项技术性能都满足规范要求;2.36~4.75 mm 集料含量>8%时,空隙率>4,不满足规范要求,且粗集料间隙率大于骨架间隙率。2.36~4.75 mm 集料含量太高,会对粗集料产生干涉,骨架密实结构遭到破坏,粗集料间隙被扩大,且混合料无法通过机械捣实,SMA-10 混合料路用性能下降。

(3) 级配 11 SMA-10 混合料(2.36~4.75 mm 集料含量为 4%)具有优异的路用性能,与未掺加 2.36~4.75 mm 集料的混合料相比,其动稳定度提高 19.1%,车辙深度降低 5.1%,最大弯拉应变提高 10.0%,残留稳定度提高 15.4%,冻融劈裂抗拉强度

比提高 10.9%。

#### 参考文献:

- [1] HUM J, LI L H, PENG F X. Laboratory investigation of OGFC-5 porous asphalt ultra-thin wearing course[J]. Construction and Building Materials, 2019, 219:101—110.
- [2] CHAN S, LANE B, KAZMIEROWSKI T, et al. Pavement preservation: A solution for sustainability[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2011, 2235(1):36—42.
- [3] 虞将苗,杨倪坤,于华洋.道路高性能沥青超薄磨耗层技术研究与应用现状[J].中南大学学报(自然科学版),2021,52(7):2287—2298.
- [4] CHEN D H, SCULLION T. Very thin overlays in texas[J]. Construction and Building Materials, 2015, 95:108—116.
- [5] 郑健龙,吕松涛,刘超超.长寿命路面的技术体系及关键科学问题与技术前沿[J].科学通报,2020,65(30):3219—3227.
- [6] 龙翔,许志东,张新,等.高黏高弹改性乳化沥青性能评价及超黏磨耗层应用研究[J].公路与汽运,2022(4):54—57+62.

收稿日期:2022-06-05