

DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.2020.11.008

高速公路加铺热拌超薄磨耗层级配设计研究

唐豹¹, 邓攀²

(1. 深圳高速公路股份有限公司, 广东 深圳 518000; 2. 广东清连公路发展有限公司, 广东 清远 511500)

摘要: 热拌超薄磨耗层是公路预防性养护的有效技术之一, 基于某高速超薄磨耗层预防性养护工程, 对不同级配进行路用性能试验研究。结果表明, 不同级配混合料孔隙率随着 2.36 mm 筛孔通过率的增加而降低, 细集料和矿粉均会填充混合料孔隙而且矿粉的填充效果为细集料的 3 倍。随着超薄磨耗层级配由粗变密, 混合料马歇尔稳定度增加, 肯塔堡飞散损失降低, 疲劳寿命下降, 采用矿粉作为填料的混合料性能显著优于细集料。相关性分析结果表明, 超薄磨耗层混合料马歇尔稳定度, 飞散损失以及疲劳性能与孔隙率存在较好的相关性, TSR 结果与沥青膜厚度存在较好的相关性。超薄磨耗层的设计需要充分考虑孔隙率与沥青膜厚度指标。

关键词: 超薄磨耗层; 级配; 孔隙率; 路用性能

中图分类号: U418.6

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2020)11-0026-05

0 引言

公路预防性养护^[1]是指路面在出现中轻微病害时, 对道路进行有计划地养护维修, 从而使路面保持在一个较高的服务水平。与传统的公路养护维修相比, 预防性养护具有时效快, 周期短, 养护效果明显等特点^[2], 充分利用原有路面的结构基础, 着重改善路面功能, 提高行车舒适性并且增路面强耐久性。随着我国公路里程尤其是高速公路里程的不断增长, 预防性养护将是公路管理工作的重中之重。

目前公路工程当中常用的预防性养护技术手段包括: 稀浆封层、微表处、雾封层、含砂雾封层、碎石封层、薄层罩面以及超薄磨耗层等等。其中稀浆封层/微表处^[3,4]是乳化沥青/改性乳化沥青冷拌冷铺技术, 施工完成需要较长时间才能开放交通, 而且路面行车噪声较大。雾封层以及含砂雾封层^[5,6]仅能用于沥青路面的预防性养护, 对于水泥路面、桥面等并不适用。碎石封层的养护效果受施工工艺影响很大, 而且路面施工完成需要形成强度才能开放交通。薄层罩面^[7,8]是一种层厚为 2~2.5 cm 的沥青混凝土结构层, 适用于水泥或沥青路面的养护改造, 加铺后的路面几乎与新建沥青路面相同, 然而薄层罩面加铺前需要将原路面铣刨 2 cm 深度, 不仅降低了施工的效率, 也增加了养护成本。超薄磨耗层^[9-11]与薄层罩面相似, 也是一种沥青混凝土结构层, 然而其厚度非常薄, 一般为 0.8~1.5 cm, 超薄磨耗层可有效改善原路面平

整度, 提高行车舒适性, 提升抗滑能力, 同时也具备快速施工以及快速开放交通的特点, 是公路预防性养护首选的技术方案。

超薄磨耗层典型的施工厚度为 1.2 cm^[10], 为保证其使用功能性, 磨耗层混合料需要独特的级配结构。为了实现 1.2 cm 的结构层厚度, 混合料级配的最大公称粒径不宜超过 5 mm。小粒径沥青混合料, 面临的最大问题是抗滑性不够, 因此需要做成大孔隙, 使用开级配的混合料结构来增加路面的抗滑特性。而一般情况下开级配混合料容易出现耐久性不足的情况, 因此在磨耗层混合料设计过程中需要充分考虑如抗松散性能以及水稳定性等耐久性方面的性能。

项目高速自 2011 年通车至今已有 9 年时间, 目前道路整体结构完好但水泥路面抗滑性不足, 结合养护工程计划采用超薄磨耗层进行养护加铺, 用以改善路面抗滑性, 减缓路面病害的发生, 延缓路面裂缝的发展, 提高路面的行驶质量和服务水平。论文针对某高速超薄磨耗层级配展开相关研究, 用于指导预防性养护的设计施工。

1 材料与试验

1.1 材料

1.1.1 沥青

本研究所选沥青取自项目高速超薄磨耗层养护加铺项目, 为广州大象超薄路面技术开发有限公司生产的薄层专用改性沥青, 沥青的基本指标见表 1。

1.1.2 集料

研究所选集料取自广州市政沥青拌和站, 为超

收稿日期: 2020-06-22

作者简介: 唐豹(1982—), 男, 学士, 高级工程师, 从事高速公路养护管理工作。

表1 薄层用特种改性沥青指标

试验项目	检测结果	技术要求	测试方法
车辙因子 $G^*/\sin \delta$ (88℃)/kPa	3.2	≥ 1.0	T0628—2011
针入度(25℃, 100 g, 5s)/0.1 mm	41	35—70	T 0604—2011
软化点(TR&B)/℃	103	≥ 95	T 0606—2011
延度(5℃, 5 cm/s)/cm	41.6	≥ 30	T 0605—2011
闪点/℃	335	≥ 260	T 0611—2011
60℃动力黏度 /Pa·s	>580 000	$\geq 400 000$	T 0620—2000
170℃黏度 /Pa·s	1.1	<3	T 0625—2011
离析, 48 h 软化点差/℃	1.3	<2.5	T 0661—2011
TFOT 后残留物			
质量变化 /%	0.04	≤ 1	T 0609—2011
针入度比(25℃)/%	96	≥ 70	T 0604—2011
延度(5℃, 5 cm/s)/cm	33	≥ 15	T 0605—2011

薄磨耗层混合料生产基地,按照规格分为 3~5 mm, 0~3 mm 和矿粉,其中 3~5 mm 和 0~3 mm 集料为辉绿岩,而矿粉为石灰岩研磨加工而成,三种集料的筛分结果见表 2。

表2 各档集料筛分结果

筛孔尺寸 /mm	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
通过	3~5	100.0	96.2	5.1	2.5	1.7	1.3	1.2
百分	0~3	100.0	100.0	89.3	70.1	47.8	31.4	25.1
率 /%	矿粉	100.0	100.0	100.0	100.0	98.9	95.3	88.6

1.1.3 级配方案设计

由于超薄磨耗层要做成开级配结构,因此在级配方案上,主要以 3~5 粗集料形成的骨架结构为主,细集料和矿粉起到填充作用,通过调整三档原料的比例,来调试不同的级配方案。由于细集料中含有部分泥灰,与沥青拌和后无法与沥青结合形成胶浆从而降低混合料的水稳定性,因而填料主要以矿粉为主,级配设计将包含仅用矿粉做填料的方案。考虑到目前国内有些拌和楼没有矿粉添加系统的情况,因而拟定一组不含矿粉的级配方案。几种级配方案中各档料所占比例见表 3,不同级配方案的各筛孔通过率见表 4。

表3 混合料集料组成

集料	各档料占比 /%					
	级配 1	级配 2	级配 3	级配 4	级配 5	级配 6
3~5	95	90	85	80	93	85
0~3	0	5	10	15	0	15
矿粉	5	5	5	5	7	0

1.2 混合料准备与试件成型

研究参照某高速超薄磨耗层预养护施工项

表4 混合料集配情况

筛孔尺 寸/mm	通过百分率 /%					
	级配 1	级配 2	级配 3	级配 4	级配 5	级配 6
9.5	100	100	100	100	100	100
4.75	96.4	96.6	96.8	97.0	96.5	96.8
2.36	9.8	14.0	18.3	22.5	11.7	17.7
1.18	7.4	10.7	14.1	17.5	9.3	12.6
0.6	6.6	8.9	11.2	13.5	8.5	8.6
0.3	6.2	7.7	9.2	10.7	8.2	5.8
0.15	5.9	7.1	8.3	9.5	7.8	4.8
0.075	5.4	6.4	7.3	8.3	7.1	3.9

目,选用 7.0%的油石比,外掺 0.3%的聚酯纤维作为增韧剂。混合料拌和与成型温度均为 180℃,圆柱体试件采用旋转压实成型,直径为 100 mm,高度为 63.5 mm,四点弯曲疲劳试验用小梁试件尺寸为 50 mm×63.5 mm×380 mm,通过 Roller Compactor 轮碾成型机成型的大板切割而成。研究过程中每组试验准备三个平行试件,试验结果取平均值,并以图中误差棒来代表数据浮动情况。

1.3 试验方法

1.3.1 常规性能试验

本研究中混合料常规性能试验包括孔隙率测试,马歇尔稳定度试验,肯塔堡飞散试验以及冻融劈裂试验(TSR),以上试验参照既有规范《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)进行,此处不再赘述。

1.3.2 沥青膜厚度计算

沥青膜厚度计算方法参照规范《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2004)中 OGFC 混合料设计方法关于沥青膜沟渍计算公式,如下:

$$S = (2 + 0.02a + 0.04b + 0.08c + 0.14d + 0.3e + 0.6f + 1.6g) / 48.74 h = P_b / S$$

式中: S 为混合料中集料的总表面积; a, b, c, d, e, f, g 分别为 4.75 mm, 2.36 mm, 1.18 mm, 0.6 mm, 0.3 mm, 0.15 mm, 0.075 mm 筛网通过率百分数; P_b 为混合料的油石比; h 为沥青膜厚度。

1.3.3 四点弯曲小梁疲劳试验

本研究所用四点弯曲疲劳小梁试验用于评价混合料的疲劳抗裂性,试验温度为 15℃,加载模式为应变控制,最大应变选取 750 $\mu\epsilon$,初始劲度模量为加载第 50 次的劲度模量值,试验终止条件为混合料劲度模量衰减至初始劲度模量的 20%,疲劳评判标准选用 ASTM D7460 中推荐的归一化最大模量次数积,即 N_{FM} 方法。

2 试验结果分析

2.1 孔隙率与沥青膜厚度

上述六种级配混合料的孔隙率与沥青膜厚度结果见图1,级配1到级配4由于0~3mm细集料用量不断增多,因而混合料的孔隙率逐渐下降,从25.5%下降到18.2%,对于级配5和级配6,两者孔隙率比较接近,均在22%左右,说明矿粉和填料均能起到填充孔隙的作用。而沥青膜厚度变化规律在级配1向级配4变化过程中化趋势与孔隙率变化趋势相同,而级配5与级配6存在较大差异,说明矿粉和细集料对混合料集料比表面积贡献存在不同。

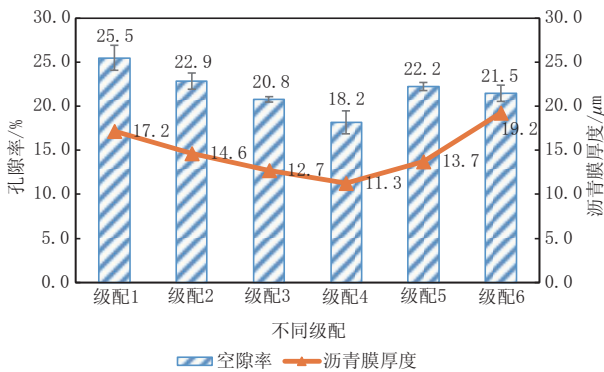


图1 不同级配混合料空隙率与沥青膜厚度关系

本研究所用粗集料为3~5mm规格,最大公称粒径为4.75mm,因而对于上述六种级配混合料来讲,级配中粗细集料分界筛孔为2.36mm,为探究各级配2.36mm筛网通过率与孔隙率之间的关系,对两者进行相关性分析,结果见图2。可以发现,随着各级配的236mm筛网通过率逐渐增大,混合料的孔隙率逐渐减小,两者存在很好的线性相关关系,相关系数 $R^2=0.8787$,即对于最大公称粒径为4.75mm的超薄磨耗层混合料来讲,通过率的关键筛孔为2.36mm,在磨耗层级配设计过程中可通过控制2.36mm筛孔的通过率从而控制混合料的孔隙率。

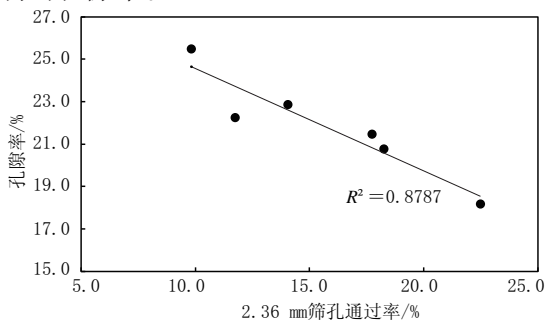


图2 混合料空隙率与2.36mm筛孔通过率的关系

由于超薄磨耗层混合料一共由3~5mm,0~3mm和矿粉三档集料组成,根据表3中不同级配

方案的各档料配比以及图1中各级配混合料的孔隙率测试结果,构建三元一次方程组,如下:

$$\begin{cases} 95a+0b+5c=25.5 \\ 90a+5b+5c=22.9 \\ 85a+10b+5c=20.8 \\ 80a+15b+5c=18.2 \\ 93a+0b+7c=22.2 \\ 85a+15b+0c=21.5 \end{cases}$$

式中: a, b, c 为每档料占比对孔隙率贡献系数,上述三元一次方程组一共有3个未知数,然而有6个方程,属于超静定方程组,根据迭代法求出上述方程组最优解,结果为: $a=0.2853, b=-0.1578, c=-0.4656$ 。贡献系数的工程意义为,对于3~5mm粗集料,每增加1%的用量,混合料孔隙率增加0.2853,对于0~3mm细集料,每增加1%的用量,混合料孔隙率降低0.1578,而对于矿粉每增加1%的用量,混合料孔隙率降低0.4656,可以发现矿粉对混合料孔隙率降低所占的比重约为0~3mm细集料的3倍,也就是说通过调节矿粉的用量来调整混合料孔隙率要比调节细集料更有效。

在表3中六种级配的基础上,各档料进行小范围内变动时,混合料的孔隙率可用公式进行计算。其中, VV 为混合料孔隙率, x, y, z 分别为3~5mm, 0~3mm和矿粉用量比(%)。

根据公式计算出六种级配的孔隙率结果与实测孔隙率结果差异见表5。可以发现,计算出的孔隙率与实测值比较接近,存在少量偏差,然而整体偏差幅度不大。对于项目高速热拌超薄磨耗层预养护项目,在油石比为7%的条件下,可根据上述公式计算混合料目标孔隙率。

表5 混合料空隙率计算与实测结果差异

孔隙率	级配1	级配2	级配3	级配4	级配5	级配6
实测值/%	25.5	22.9	20.8	18.2	22.2	21.5
计算值/%	24.8	22.6	20.3	18.1	23.3	21.9
差值/%	0.7	0.3	0.5	0.1	-1.1	-0.4
变异系数Cov/%	2.75	1.31	2.40	0.55	-4.95	-1.86

2.2 马歇尔稳定度

不同级配混合料的马歇尔稳定度试验结果见图3,可以发现,随着0~3mm细集料的增加,级配1到级配4混合料的马歇尔稳定度逐渐增加,当细集料用量占比超过10%时,混合料的马歇尔稳定度结果大于4kN,满足超薄磨耗层设计。对于级配5,由于矿粉用量提高至7%,混合料的稳定度也超过4kN,而对于级配6,由于仅用细集料作为填料,混合料的稳定度较小。流值结果变化趋势

与稳定度变化趋势类似,即随着稳定度增加,流值也呈现出上升的趋势,混合料整体流值结果在40左右。

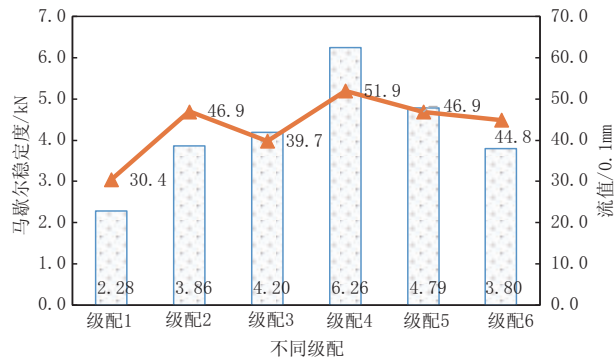


图3 不同混合料马歇尔稳定度试验结果

2.3 肯塔堡飞散

肯塔堡飞散试验评价的是混合料的抗松散性能,由于超薄磨耗层是一种功能性的磨耗层,因而混合料的抗松散性能尤为重要。上述六种级配混合料的肯塔堡飞散结果见图4,结果显示,随着级配由粗变密,磨耗层混合料的飞散损失越来越小,级配1和级配2混合料飞散结果均在8%左右,而级配3和级配4飞散结果均小于6%,相对来说,混合料中0~3mm细集料的用量在10%以上可保证混合料的抗松散性能。对于级配5和级配6,可以发现矿粉作为填料的效果要优于细集料作为填料的效果,说明从抗松散角度来考虑,在混合料级配设计过程中要充分保证矿粉的用量。

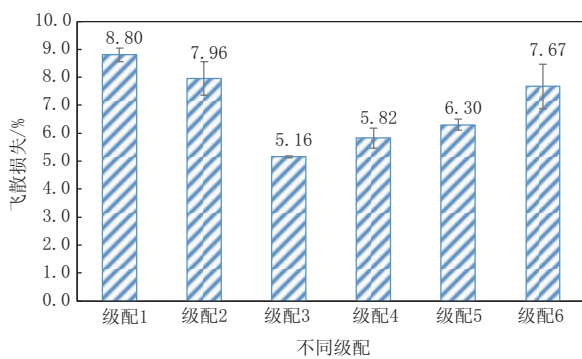


图4 不同级配混合料肯塔堡飞散结果

2.4 TSR 结果

TSR 评价的是混合料的抗水损害能力,几种不同级配混合料的冻融劈裂试验结果见图5。可以发现在级配1到级配4混合料的原样劈裂强度和冻融劈裂强度均在逐渐增长,表明混合料由粗变密的过程劈裂强度是逐渐增大的。对于级配5和级配6,混合料原样劈裂强度比较接近,而冻融劈裂强度相差较大。TSR 结果表明,随着级配变密,级配1到级配4的TSR 结果出现浮动,其中级配3的TSR 结果小于80%,而其他三种级配均在

80%以上,可能是由于实验误差造成的。而级配5的TSR 结果远高于级配6,说明矿粉作为填料对于混合料的抗水损害能力要远大于细集料作为填料的混合料。

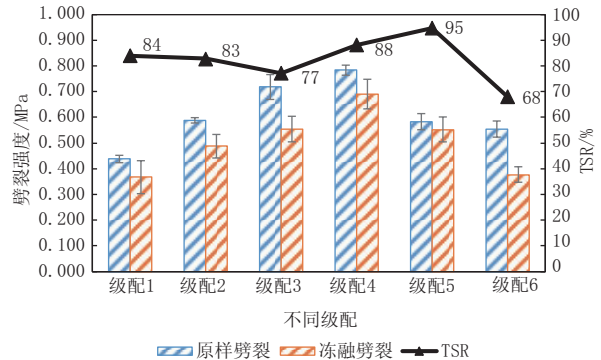


图5 不同级配混合料冻融劈裂试验结果

2.5 四点弯曲疲劳

薄层应用于水泥路面、桥面时,需要考虑抗裂性。采用四点弯曲疲劳小梁试验来评价混合料的抵抗疲劳开裂性能,结果见图6。可以发现,对于级配2到级配4混合料,随着细集料的用量不断增加,混合料的疲劳寿命逐渐降低,而级配1到级配4混合料的劲度模量不断增大,说明混合料逐渐变硬。级配5混合料的疲劳寿命最大远高于级配6,说明其抗裂性能最佳。疲劳试验结果表明多用矿粉可有助于增加混合料的抗开裂能力。

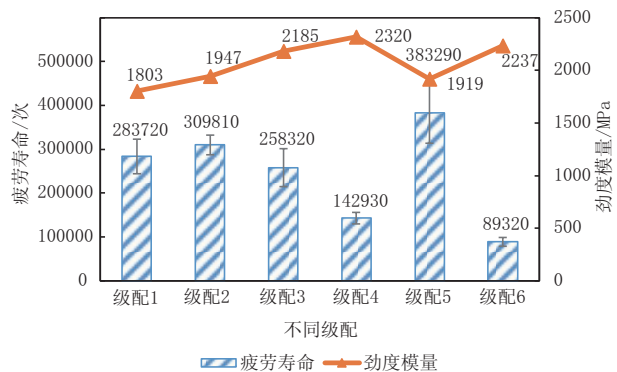


图6 不同级配混合料疲劳试验结果

2.6 相关性分析

为了研究热拌超薄磨耗层混合料路用性能和孔隙率以及沥青膜厚度之间的关系,对不同级配下的试验结果进行相关性分析,相关系数结果见表6。可以发现混合料的马歇尔稳定度,飞散损失以及疲劳性能与孔隙率的相关性要高于与沥青膜厚度的相关性,说明在设计过程中可通过控制孔隙率指标来更好地使混合料性能满足要求,而TSR 相关性分析结果表明,与孔隙率相关系数为0,而与沥青膜厚度相关系数为0.3817,因而在设计阶段可以通过控制沥青膜厚度来是磨耗层混合料满足水稳定性要求。

表6 超薄磨耗层混合料性能指标与体积指标相关性分析

性能指标	相关系数 R2	
	孔隙率	沥青膜厚度
马歇尔稳定度	0.843 2	0.542 5
TSR	0.000 0	0.381 7
飞散损失	0.614 5	0.585 7
劲度模量	0.822 0	0.074 9
疲劳寿命	0.265 1	0.070 5

3 结 论

基于高速水泥加铺热拌超薄磨耗层预防性养护施工项目,对超薄磨耗层级配进行相关研究并进行路用性能评价,根据研究内容得出以下结论:

(1)超薄磨耗层混合料孔隙率与级配中 2.36 mm 通过率呈现明显的负相关关系,随着 2.36mm 通过率增加,混合料的孔隙率逐渐降低,2.36mm 为超薄磨耗层混合料级配关键筛孔。

(2)超薄磨耗层混合料孔隙率随着粗集料用量增加而增大,随着细集料以及矿粉用量增加而减小,其中矿粉对于混合料孔隙填充效果约为细集料的 3 倍。

(3)随着级配由粗变密,超薄磨耗层混合料的马歇尔稳定度增加,飞散损失降低,疲劳寿命降低,表明抗松散性能提高,抗开裂能力下降。矿粉作为填料的超薄磨耗层混合料路用性能各方面均要优于细集料作为填料的混合料,建议实际工程

中保证矿粉的用量。

(4)超薄磨耗层混合料马歇尔稳定度,飞散损失以及疲劳性能与孔隙率存在较好的相关性,TSR 结果与沥青膜厚度存在较好的相关性,在超薄磨耗层设计阶段需严格把控孔隙率与沥青膜厚度指标。

参考文献:

- [1] 何本万,卢静.公路预防性养护时机的确定方法探讨[J].交通科技,2011(1):86-89.
- [2] 何光兵.高速公路沥青路面预防性养护研究[D].陕西西安:长安大学,2012.
- [3] 龙海辉,诸葛文杰,胡浩.沥青路面预防性养护新技术[J].华东公路,2010(1):7-9.
- [4] 傅香如.稀浆封层和微表处施工技术研究[D].陕西西安:长安大学,2006.
- [5] 张春.喷砂雾封层技术在高速公路预防性养护中的应用[J].华东公路(3):77-78.
- [6] 司诺.雾封层技术在公路预防性养护中的应用[J].西部交通科技,2017(2):25-28.
- [7] 宋阳.Novachip 超薄磨耗层在高速公路预防性养护中的应用研究[D].广东广州:华南理工大学,2016.
- [8] 胡志涛,牛晓霞.Novachip 超薄磨耗层在高速公路沥青路面预防性养护工程中的应用[J].广东公路交通(3):5-8.
- [9] 赵立疆.微表处和超薄磨耗层在高速公路预防性养护中的对比分析[J].交通运输研究,2012(15):138-142.
- [10] 陈名旺,李本亮,何创,等.新型 1.2cm 超薄罩面用于隧道水泥加铺的实践与评价[C].中国公路学会养护与管理分会第九届学术年会,2019.
- [11] 刘宁,李本亮,吴增毅,等.热拌超薄沥青路面在市政道路养护中的应用[J].智能城市,2019(14):49-50.

(上接第 25 页)



图 15 竣工通车照片一



图 16 竣工通车照片二

进行了多断面的方案比选,充分考虑到人行及非机动车的通行需求进行断面布置,兼顾了各种交

通需求的通行效率及安全,为同类型道路拓宽的断面布置方案提供参考。