基于“白加黑”罩面的改进型 UTAC 功能设计与应用*

李智，姚泽瑞
（华南理工大学 土木与交通学院，广东 广州 510641）

摘要：基于广东汕汾（汕头—汾水关）高速公路 6 cm 双层“白加黑”罩面结构的表层材料设计需求，提出采用 2 cm 改进型薄层沥青砼（UTAC）作为表层的技术方案。改进型 UTAC 通过改进 UTAC 粗骨料规格及加工工艺，引入主骨料填充（CAVF）级配设计方法，采用断级配设计理念及 PG82 高性能沥青，在确保高温、抗滑性能的基础上，突出抗反射裂缝性能设计。试验结果表明，改进型 UTAC 可较好地满足“白加黑”工程需求。

关键词：公路；“白加黑”路面；薄层沥青砼（UTAC）；主骨料填充（CAVF）；抗反射裂缝

中图分类号：U418.6 **文献标志码：**A **文章编号：**1671－2668(2021)05－0095－05

水泥路面在中国早期修建的高速公路中被大量采用。随着技术的不断进步，行车舒适性更好的沥青路面被广泛应用。加之早期修建的水泥路面的结构性能和行驶功能已不同程度下降，严重影响道路的行车安全性与舒适性，对其实施“白加黑”技术措施势在必行。限于桥梁净空、中小桥承载力及养护成本等因素的限制，“白加黑”技术的厚度越来越薄，并希望采用 2 层施工方案，以获得较好的平整度。基于调平等考虑，下面层要厚些，表面层应薄些，同时表层材料既要参与罩面结构承载功能，又要求其具有优良的抗滑性能、耐水损害性能及突出的抗反射裂缝性能等。薄层沥青砼（UTAC）是一种性价比突出的养护罩面材料，具有优良的路用性能和施工性能，可实现相对较薄的加铺厚度。谭忆秋等针对 UTAC－10 进行相关试验，评价了其低温时的表面性能；孔令元对京珠（北京—珠海）高速公路广珠（广州—珠海）段 AR－UTAC－10 橡胶沥青磨耗层通车多年后路面性能进行检测评价，结果表明其抗裂强度较优；李振等也证明了 UTAC－10 在城市道路养护工程中的适用性；王阔利用 UTAC－10 对沥青路面常见车辙病害进行了相关研究；文献[14－17]对表层加铺的超薄磨耗层进行了性能评价和分析，证明了其适用性。大多数学者只是从路用性能方面对薄层加铺进行研究，鲜有对 UTAC 薄层加铺的抗反射裂缝性能进行研究。该文针对“白加黑”路面的技术特点及广东高温多雨的气候特征，在原有 UTAC－10 的基础上，对集料和加工技术进行改进，采用 CAVF（主骨料填充）级配设计方法，开展改进型断级配密实骨架型 UTAC 的多性能需求设计与性能评价研究。

1 薄层“白加黑”的表层技术需求

对于特定的水泥路面，沥青加铺层结构越厚，越有利于实现按功能设计各加铺层，使其获得理想的路用性能。但考虑到经济因素及旧路状况等因素，小于 10 cm 的薄层加铺技术方案被普遍应用。针对广东省汕汾（汕头—汾水关）高速公路“白加黑”项目，经综合论证，采用 6 cm 沥青加铺厚度设计方案。

结构性能相对良好的普通路段采用一层 6 cm AC－16 罩面技术方案，但对于软基严重及旧水泥路面错台、断板、换版、局部修补等病害相对突出的路段，还需进一步提升罩面结构的抗反射裂缝等综合性能。为此，提出采用 2 cm UTAC（表层）＋4 cm FAC－16（富沥青混合料）的双层结构罩面技术方案。首先，2 层加铺材料都具有较高的沥青用量，其抗反射裂缝能力更好；其次相对于 AC－16，FAC－16 的级配骨架特性更突出，高温、耐水损害等路用性能更优良。UTAC－10 以其良好的路用性能，已在广东高等级公路“黑加黑”项目和隧道加铺工程（公称粒径 9.5 mm，最小加铺厚度 2.5 cm）中积累了 10 多年的应用经验。但对于“白加黑”项目和 2 cm 的罩面结构尚需进行技术改进，特别是迫切需要提升沥青（胶浆）性能和优化沥青用量，改进粗骨料规格与加工质量，完善级配设计方法，进而更好地平衡

* **基金项目：**国家自然科学基金资助项目（51378233）；广东省交通运输厅科技项目（2014－02－003；2016－02－003）

其高温性能和抗滑性能与耐水损坏性能和抗反射裂缝能力之间的矛盾。

2 改进型 UTAC 设计

2.1 原材料

基于该项目的重载交通情况及所在地区高温多雨的气候特点，在以往常用 PG76 改性沥青的基础上提升沥青性能等级，采用 PG82 SBS 改性沥青。

集料选择广东省优质抗滑辉绿岩石料。为获得良好的粗集料颗粒形态并实现 2 cm 薄层加铺厚度(厚度应大于等于 2.5 倍公称粒径)，在常规鄂破＋锥破＋反击破(或整形)三级破碎工艺的基础上，选择专门的规格毛料(10～15 mm)进一步实施反击破碎，加工成颗粒方正的 5～8 mm 规格料。同时为控制颗粒形态加工质量，在现有针片状(长细比 3∶1)技术指标的基础上，提出 2∶1 针片状评价指标。研究表明，针片状颗粒含量超过 15%时，沥青混合料的空隙率增大，水稳定性和抗疲劳性能降低；针片状颗粒含量超过 20%时，沥青混合料的高温稳定性降低；针片状颗粒含量为 30%～40%时，混合料性能不满足工程设计和规范要求。基于此，提出 5～8 mm 规格料 3∶1 针片状≤12%、2∶1 针片状≤15%的要求。粗集料性能检测结果见表 1。

表 1 粗集料针片状指标检测结果

项目		技术要求	检测结果
压碎值/%		≤18	9.6
洛杉矶磨耗/%		≤20	10.7
相对视密度		≥2.6	2.961
吸水率/%		≤2	0.47
针片状含量/%	3∶1	≤12	7.9
	2∶1	≤15	10.2
小于 0.075 mm 颗粒含量/%		≤1	0.1
磨光值		≥42	47

2.2 级配设计

UTAC－10 主要基于规范的级配设计思路与部分成功经验完成级配设计，对于 2 cm UTAC，其加铺结构内部压应力、剪应力更突出，其材料的路用性能设计特别是级配设计尤为关键。为此，引用 CAVF 法进行混合料级配设计。

CAVF 法的设计思路是实测主骨架矿料空隙率，计算其空隙体积，使细集料体积、沥青体积和混合料设计空隙体积的总和等于主骨架的空隙体积，从而确定细集料、沥青用量。为避免细集料对主骨料的干涉，采用间断级配，获得优良的抗滑性能，特别是丰富的抗滑构造和优良的路表构造连通性。

先按式(1)确定粗骨料空隙率 VCA_{DRC}，试验结果为 36.8%。

$$VCA=\left(1-\frac{d_{sc}}{d_{tc}}\right)\times 100\% \tag{1}$$

式中：d_{sc}为粗骨料紧装密度；d_{tc}为粗骨料表观密度。

再预先确定 3 个变量(沥青用量、矿粉用量的质量百分率及空隙率)的设计初值，通过式(2)、式(3)计算得到其余 2 个变量(粗、细集料的质量百分率)。基于提高材料抗反射裂缝能力的需要，初选沥青油石比为 6%。为稳定沥青，确定粉胶比为 1.33，进而确定矿粉比约为 8%。基于更大抗滑构造的考虑，空隙率初选 5%。计算得到粗集料用量为 77.2%、细集料用量为 14.6%、矿粉用量为 8.2%，最终确定沥青用量(油石比)为 5.8%、空隙率为 4.9%。

$$q_c+q_f+q_p=100 \tag{2}$$

$$\frac{q_c}{100d_{sc}}(VCA-V_{vs})=\frac{q_f}{d_{tf}}+\frac{q_p}{d_{tp}}+\frac{q_a}{d_a} \tag{3}$$

式中：q_c、q_f、q_p、q_a分别为粗集料、细集料、矿粉及沥青的质量百分率；V_{vs}为沥青混合料设计目标空隙率；d_{tf}、d_{tp}分别为细料、矿粉的表观密度；d_a为沥青的密度。

根据粗、细集料的百分含量与粗、细集料的组成，计算得到改进型 UTAC 的级配(见表 2)。马歇尔试验结果(见表 3)显示体积指标理想，其中 $VCA_{min}=33.1\%<VCA_{DRC}$。

表 2 改进型 UTAC 的级配组成

筛孔尺寸/mm	通过率/%	筛孔尺寸/mm	通过率/%
9.50	100.0	0.600	14.7
8.00	93.5	0.300	12.5
4.75	28.8	0.150	10.4
2.36	22.8	0.075	8.4
1.18	17.6		

表 3 马歇尔试验结果

项目	试验值
油石比/%	5.8
理论相对密度	2.651
实测毛体积相对密度	2.52
空隙率/%	4.9
矿料间隙率/%	17.1
饱和度/%	71.0
VCA_{min}/%	33.1
稳定度/kN	11.8

2.3　性能验证

为验证改进型 UTAC 的路用性能，结合“白加黑”工程技术要求及广东地区高温多雨的气候条件，进行高温车辙、浸水马歇尔与冻融劈裂、抗滑和冲击韧性等试验，并与 UTAC－10 和 AC－16（沥青品质相同）进行比较。

2.3.1　高温稳定性

采用车辙试验评价改进型 UTAC 的高温稳定性，为突出高温和重载交通需要，采用 70 ℃试验条件，试验结果见图 1。

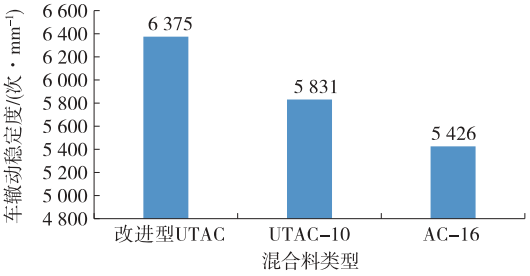


图 1　混合料车辙试验结果

由图 1 可知：改进型 UTAC 的动稳定度为 6 375 次/mm，与 UTAC－10 及 AC－16 相比提高明显，具有较好的高温稳定性。

切面图像的细观结构显示：改进后级配中粗集料较多，呈现单一粒径均匀分布效果，骨架结构的密实性和嵌挤状态更理想。

2.3.2　抗水损害能力

采用浸水马歇尔试验和冻融劈裂试验评价改进型 UTAC 的抗水损害性能，试验结果见图 2～3。

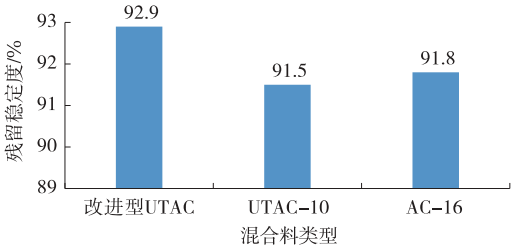


图 2　混合料浸水马歇尔试验结果

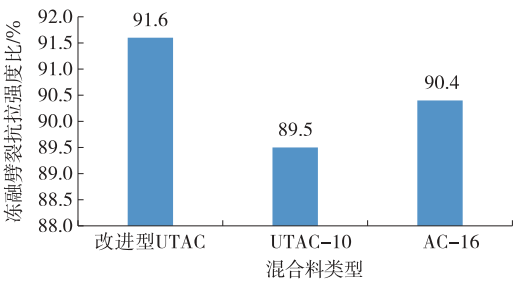


图 3　混合料冻融劈裂试验结果

由图 2～3 可知：改进型 UTAC 混合料浸水 48 h 后的残留稳定度为 92.9%，冻融劈裂抗拉强度比为 91.6%，与 UTAC－10 和 AC－16 相比提升明显，其抗水害能力得到改善。

2.3.3　抗滑性能

采用车辙板试件开展构造深度和标准摆式仪法试验评价改进型 UTAC 的抗滑性能，试验结果见图 4～5。

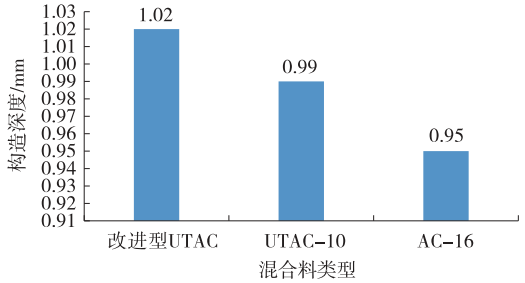


图 4　混合料构造深度试验结果

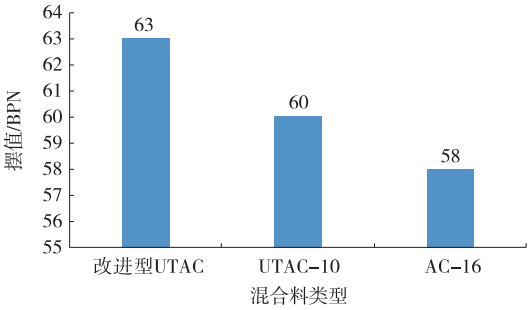


图 5　混合料摆值试验结果

由图 4～5 可知：改进型 UTAC 混合料的构造深度为 1.02 mm，摆值摩擦系数为 63 BPN，与 UTAC－10 和 AC－16 相比提高明显，表明其抗滑性能理想。

2.3.4　抗反射裂缝性能

沥青混合料作为典型的黏弹性材料，其细观结构微元体的应力－应变曲线在加载与卸载的过程中呈现不同的路径，形成闭合的环状曲线（见图6），称

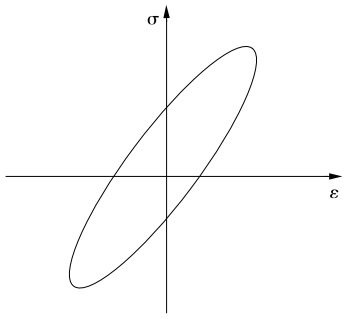


图 6　沥青混合料滞后环线

之为滞后环线，该曲线的面积代表材料在一次加载、卸载过程中总的能量积累。另一方面，车轮荷载快速滚动作用于路面，在沥青加铺层裂缝位置表现为明显的冲击荷载。测出沥青混合料试件在冲击荷载作用下断裂的应力－应变曲线，即可利用应力－应变曲线下的面积（能量）评价材料的抗断裂能力。根据文献[13]，在冲击荷载作用下，应力－应变曲线所包围的阴影面积称为冲击韧性（见图 7），其值越大，材料抵抗反射裂缝的能力越强。

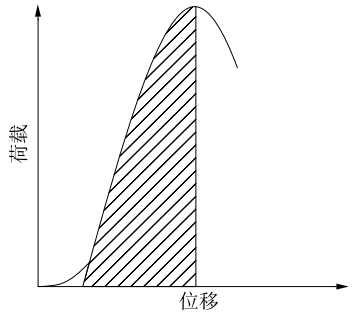
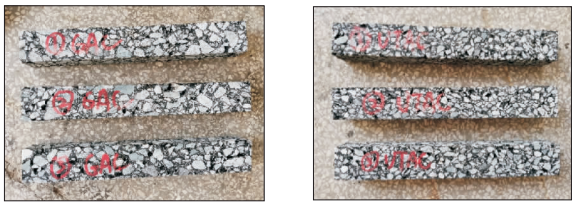


图 7 沥青混合料冲击韧性曲线

为评价改进型 UTAC 抵抗反射裂缝的能力，进行冲击韧性试验，选择 AC－16 进行对比。通过振动成型试验制作加厚的车辙板试件，采用双面锯切割为 250 mm×30 mm×35 mm 小梁，恒温至试验温度，再进行三点弯曲试验，获得荷载－跨中挠度曲线，计算冲击韧性。每种级配制作 3 根小梁（见图 8），用游标卡尺量取试件跨中及两支点断面的尺寸，两支点断面尺寸之差均小于 2 mm，满足规范要求。



（a）改进型UTAC （b）AC-16

图 8 小梁试件

采用 MTS810 万能材料试验机进行试验，图 9 为部分荷载－跨中挠度曲线。通过 Origin 软件对荷载－跨中挠度曲线进行积分，从零加载开始到小梁开裂破坏荷载出现为止，曲线与 X 轴围成的面积即为小梁的冲击韧性值（见表 4）。

由表 4 可知：由于级配最大公称粒径不同，AC－16 的破坏荷载与改进型 UTAC 相比具有优势；在冲击韧性方面，改进型 UTAC、AC－16 小梁的冲击韧性平均值分别为1529、1 112 N·mm，改进型

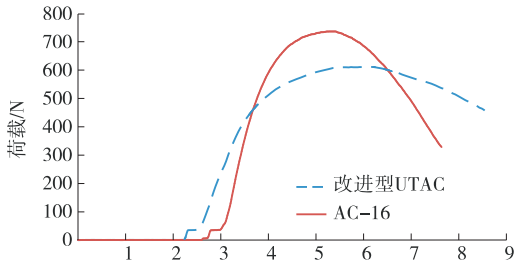


图 9 荷载－跨中挠度曲线

表 4 混合料冲击韧性试验结果

级配类型	试件号	冲击韧性/(N·mm)	破坏荷载/N
改进型 UTAC	1	1 324	539.2
	2	1 741	613.0
	3	1 522	565.6
AC－16	1	1 115	819.8
	2	1 275	738.4
	3	947	652.6

UTAC 的冲击韧性提高 37.5%，优于 AC－16。

3 工程应用

2019 年底，依托广东省汕汾高速公路水泥路面养护罩面专项工程，针对路面结构补强及换板率相对偏大的路段（BK2508＋852—BK2504＋640），设计采用 4 cm FAC－16＋2 cm 改进型 UTAC（表层）的结构组合方案，铺筑 4.212 km 试验路。工后对试验段进行质量跟踪检测，路面行车舒适性明显改善，通车近 1 年后，未见坑槽、车辙病害，路表黑亮，沥青膜未见明显脱落（见图 10），抗滑性能检测结果（见表 5）理想。

图 10 改进型 UTAC 的施工效果

表 5 改进型 UTAC 的工后检测结果

时间	构造深度/mm	摆值/BPN	横向力系数
开放交通	1.02	63.0	—
通车 1 个月	1.01	65.1	68.6
通车 3 个月	0.98	62.3	57.9

4 结论

根据 6 cm 薄层“白加黑”项目的 2 cm 表层功能

需要和广东高温多雨气候特点，对原材料加工和混合料级配设计方法等进行改进，开展 UTAC 技术相关研究。主要研究内容及结论如下：

（1）从原材料加工入手，改进粗骨料加工工艺，确定采用 10～15 mm 档料作为加工 5～8 mm 规格料的毛料及三级破碎工艺＋改进反击破碎的破碎工艺，提高主骨料颗粒形态指标 3∶1 针片状的标准为≤12%，并增设要求更高的指标 2∶1 针片状≤15% 的标准，进一步减少针片状颗粒含量，提高主骨料颗粒强度。

（2）基于原有 UTAC 级配情况，采用断级配理念和 CAVF 级配设计方法优化 UTAC 级配，间断 3～5 mm 规格料（冷料比例为零），可获得理想的体积特性。

（3）采用高性能 PG82 SBS 改性沥青，并进行对比试验，验证改进型 UTAC 混合料的高温性能、抗水损坏性能、抗滑性能、抗反射裂缝性能均比 UTAC－10 及 AC－16 有明显改善。

（4）对 UTAC 级配的改进适用于“白加黑”路面的表层加铺，且为适应广东气候提高沥青品质与含量，能满足薄层“白加黑”表层罩面技术需要，其材料加工工艺及设计方法可供同类项目借鉴。改进方式适用于薄层加铺，但由于改进型 UTAC 具有较强的针对性，其他环境条件下沥青面层是否可采用该改进型 UTAC 作为薄层“白加黑”表层罩面技术养护路面需进一步研究。

参考文献：

[1] 胡浩.广东省路面大修工程白加黑关键技术研究[D].广州：华南理工大学，2014.

[2] 蔡舒岚.旧水泥路面检测评价及加铺沥青面层技术研究[D].西安：长安大学，2007.

[3] 何志敏.复合改性 UTAC 薄层罩面在北京高速公路中的应用[J].中外公路，2018，38(2)：75－79.

[4] 谭忆秋，姚李，王海朋，等.超薄磨耗层沥青混合料评价指标[J].哈尔滨工业大学学报，2012，44(12)：73－77.

[5] 孔令元，曾辉.京珠高速广珠段沥青路面薄层罩面长期性能评价[C]//中国公路学会养护与管理分会，招商局重庆交通科研设计院有限公司，重庆万桥交通科技发展有限公司.中国公路学会养护与管理分会第九届学术年会论文集.北京：中国公路学会养护与管理分会，2019：7.

[6] 李振，王春明，刘涛，等.超薄罩面混合料 UTAC－10 在城市道路中的应用[J].市政技术，2016，34(1)：27－30.

[7] 王阔.小粒径薄层罩面修复车辙的关键技术研究[D].西安：长安大学，2012.

[8] 延西利，艾涛，黄爱民，等.白加黑路面结构的黏结与防裂力学分析计算[J].中外公路，2015，35(6)：57－60.

[9] 邹桂莲，张肖宁，王绍怀，等.富沥青混合料的 CAVF 法设计[J].公路，2002(3)：76－79.

[10] 宋伟，赵尚传，殷福新，等.粗集料针片状颗粒含量对混凝土工作性及力学性能影响的研究[J].公路交通科技(应用技术版)，2007(11)：94－97.

[11] 谢兆星，李鼎乐，韩森，等.针片状颗粒含量对沥青混合料性能的影响[J].建筑材料学报，2007，10(6)：736－739.

[12] 张肖宁，王绍怀，吴旷怀，等.沥青混合料组成设计的 CAVF 法[J].公路，2001(12)：17－21.

[13] 邹桂莲，张肖宁，王绍怀.应用冲击韧性评价沥青混合料抵抗反射裂缝能力的研究[J].公路，2004(10)：119－122.

[14] 祝轩.超薄罩面层沥青混合料设计与路用性能研究[D].广州：广州大学，2019.

[15] YAN Y H，LIU Z，GAO J X，et al.Bonding characteristics analysis of ultra-thin overlay of asphalt pavement layer[J].Applied Mechanics and Materials，2012，178－181：1245－1249.

[16] MUSTY H，HOSSAIN M.Performance of ultra-thin bituminous overlays[C]//Second Transportation and Development Congress.Orlando，Florida，United States，2014：692－701.

[17] SOOHYOK I，TAESUN Y，YONG-RAK K，et al.Evaluation of thin-lift overlay pavement preservation practice：mixture testing，pav-ement performance，and lifecycle cost analysis[J].Journal of Transportation Engineering，Part B：Pavements，2018，144(3)：04018037.

[18] 徐显炼.UTAC10 在水泥路面平整度改善工程中的应用[J].广东公路交通，2011(3)：36－39.

[19] 李世伟.UTAC－10 施工技术在深汕西隧道施工中的应用[J].西南公路，2011(3)：107－109.

[20] 陈云耀，李睿.热拌薄层 AC－5 沥青混合料体积参数及矿料级配范围研究[J].公路与汽运，2018(6)：79－84.

[21] 尹昌宇，孙杨勇，韩亚芳，等.薄层环氧铺装材料病害成因分析与改进[J].公路与汽运，2018(4)：155－158.

[22] 邓乃铭.基于泡沫沥青温拌再生沥青混合料基体的半柔性路面路用性能研究[D].广州：广州大学，2020.

[23] 罗立红.高性能沥青混合料设计与路用性能研究[D].天津：河北工业大学，2006.

收稿日期：2021－01－04