

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.201811017



陶瓷废料阻热沥青混合料 路面性能分析

谭波, 倪秋奕, 万靠靠

(桂林理工大学 广西建筑新能源与节能重点实验室, 广西 桂林 541004)

摘要: 为研究陶瓷废料在沥青路面阻热面层中的再生应用,以广西藤县陶瓷废料为研究对象,将陶瓷废料等体积替代部分集料形成陶瓷阻热面层.通过马歇尔试验、车辙试验评价陶瓷沥青混合料的高温稳定性;通过浸水马歇尔试验、冻融劈裂试验评价陶瓷沥青混合料的水稳定性;通过室内光照试验、路面温度场有限元模拟试验分析陶瓷沥青混合料的阻热性能.试验结果表明:陶瓷沥青混合料的高温性能和水稳性能良好,均能满足规范要求;陶瓷沥青混合料的阻热性能良好,选用合理的陶瓷掺配比例可显著提高沥青路面阻热性能;相比普通沥青路面,陶瓷掺量为 60% 的沥青路面在 4, 10, 18 cm 深度处的温度分别降低 3.9, 2.9, 2.0 °C, 上、中、下面层的阻热效果分别提高 6.7%, 15.9%, 17.8%, 可有效降低沥青面层的温度.

关键词: 沥青混合料; 阻热面层; 陶瓷废料; 路用性能; 阻热性能

中图分类号: U 414 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2019)03-0324-07

Pavement Performance Analysis of Thermal Resistant Asphalt Mixture With Ceramic Waste

TAN Bo, NI Qiuyi, WAN Kaokao

(Guangxi Key Laboratory of Building New Energy and Energy Conservation,
Guilin University of Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: In order to study the recycling application of ceramic wastes in asphalt pavement heat-resistant surface layer, the ceramic wastes of Tengxian County in Guangxi were taken as the research object. A portion of aggregates was replaced with ceramic wastes in equal volume to form ceramic heat-resistant surface layer. The high temperature performance of ceramic asphalt mixture was evaluated through Marshall test and rutting test. The water stability of ceramic asphalt mixture was evaluated by immersion Marshall test and freeze-thaw splitting test. The thermal resistance of ceramic asphalt mixture was analyzed through indoor lighting test and finite element simulation of pavement temperature field. Experimental results show that, the temperature performance and water stability of ceramic asphalt mixture are benign, which can meet the requirements of specifications. The thermal resistance of ceramic asphalt mixture is good, and the reasonable proportion of ceramic can improve the thermal resistance of asphalt pavement. Comparing with the ordinary asphalt pavement, the temperature at the depth of 4, 10 and 18 cm of asphalt pavement with 60% ceramics content decreases by 3.9, 2.9 and 2.0 °C respectively, and the thermal resistance of upper, middle and lower layers increases by 6.7%,

15.9% and 17.8% respectively, which effectively reduces the temperature of asphalt pavement.

Keywords: asphalt mixture; heat-resistant surface layer; ceramic waste; pavement performance; thermal resistivity

在高温时,沥青路面变形能力较强,在行车荷载的反复作用下,产生的塑性积累变形将导致车辙等问题.目前,工程中主要通过改性材料,即采用优质沥青^[1]与集料或采用骨架密实型级配来提高沥青路面的高温稳定性.然而,在复杂工况条件下,改性材料适应性较差,防治效果甚微,且增加工程造价.近年来,将阻热型材料应用于沥青路面可以提高路面阻热性能,已成为解决路面车辙等新思路^[2-3].在工业生产过程中,可产生大量陶瓷废料,将废弃陶瓷代替部分天然集料,不仅可以有效地降低沥青混合料的导热系数,提高路面阻热性能,还可以推动陶瓷废料的废物利用^[4-6].许多学者已经开展了陶瓷材料在沥青路面的应用研究. Aburkaba 等^[7]将陶瓷废渣粉末作为改性剂掺入沥青胶凝材料中,研究表明,陶瓷废渣粉末对高温性能有积极的影响,可提高沥青胶凝材料的抗永久变形能力.文献[8-13]开展陶粒沥青混合料阻热性能的试验研究,将陶粒代替部分集料掺入混合料中,发现掺加陶粒有助于减缓路表辐射热量向路面内部传递.任永利^[14]开展陶瓷废料在沥青路面的应用研究,不仅得出陶瓷废料沥青混合料可以降低路面温度,还给出满足路用性能和阻热性能要求的合适陶瓷掺量.钱振东等^[15]通过室内光照辐射试验测试陶瓷废料沥青混合料的降温效果,得出陶瓷废料沥青混合料可以有效地降低路面内部的温度.文献[16-17]通过数值模拟出陶瓷沥青混合料对路面结构的阻热效果,得出掺加陶瓷可有效地降低沥青路面温度.大量研究表明,将陶瓷废料应用于沥青混合料进行路面阻热降温是可行的.广西梧州市藤县中和陶瓷产业园每年在生产陶瓷过程中,产生大量废弃品,而陶瓷固体废弃物不仅不易处理,还污染环境.本文针对藤县陶瓷废料开展在沥青路面阻热面层中的再生应用研究,通过陶瓷废料沥青混合料高温性能试验、水稳性能试验评价基本路用性能;通过室内光照试验和基于有限元法建立路面温度场模型分析阻热效果.

1 试验部分

1.1 原材料

试验所用陶瓷废料来自广西藤县陶瓷产业园,经锤式破碎机破碎,筛分出粒径范围为 4.75~9.50 mm 的陶瓷集料.试验所用集料为石灰岩碎石,取自桂林当地石料厂,填料为石灰岩矿粉,沥青材料采用苯乙烯-丁二烯-苯乙烯嵌段共聚物(SBS)改性沥青(密度为 1.032 g·cm⁻³).陶瓷集料与石灰岩集料主要技术指标,如表 1 所示.表 1 中: ρ_s 为毛体积密度; γ_a 为表观密度; W 为吸水率; K 为压碎值; Q 为洛杉矶磨耗值.

表 1 陶瓷集料与石灰岩集料主要技术指标
Tab.1 Main technical indexes of ceramic aggregate and limestone aggregate

测试项目	陶瓷集料	石灰岩集料
$\rho_s/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	2.226	2.667
$\gamma_a/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	2.271	2.771
$W/\%$	0.680	0.440
$K/\%$	19.800	24.300
$Q/\%$	18.900	24.900

1.2 混合料矿料级配范围

公路等级拟为高速公路,沥青路面为上面层,结构层厚度为 4 cm.根据 JTG F40—2004《公路沥青路面施工技术规范》的要求,对热拌热铺密级配沥青混合料,一层沥青层的压实厚度不宜小于集料公称最大粒径的 2.5~3.0 倍.参考刘朝晖等^[18]的研究,上面层选用超薄沥青混合料 SAC-10,其矿料级配范围、中值、各级矿料的密度测定结果,如表 2 所示.表 2 中: S 为筛孔尺寸; R 为级配范围; M 为级配中值.

表 2 SAC-10 级配范围
Tab.2 SAC-10 gradation range

参数	S/mm								
	13.200	9.500	4.750	2.360	1.180	0.600	0.300	0.150	0.075
$R/\%$	100	95~100	25~35	20~28	15~23	12~20	10~16	8~12	6~10
$M/\%$	100	97.5	30.0	24.0	19.0	16.0	13.0	10.0	8.0
$\gamma_a/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	—	2.722	2.678	2.741	2.744	2.705	2.704	2.736	2.736

1.3 陶瓷沥青混合料马歇尔试验

将陶瓷集料按照掺量为 0%,20%,40%,60% 等体积替代设计级配中 4.75~9.50 mm 的粗集料,以制作陶瓷沥青混合料 CAC-10. 根据 JTG E20—2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》的要求,对不同陶瓷掺量的沥青混合料进行马歇尔试验,以确定最佳油石比. 试件尺寸为 101.6 mm×63.5 mm. 试验结果,如表 3 所示. 表 3 中: w 为陶瓷掺量; P_a 为最佳油石比; ρ_t 为最大理论密度; V_v 为空隙率; V_{MA} 为矿料间隙率; V_{FA} 为沥青饱和度; M_s 为马歇尔稳定度; F_L 为流值.

由表 3 可知:随着陶瓷掺量的增加,陶瓷沥青混合料的油石比逐渐增加,毛体积密度、最大理论密度逐渐减少,沥青饱和度、马歇尔稳定度、流值没有明显的变化规律.

表 3 陶瓷沥青混合料马歇尔试验结果
Tab. 3 Marshall test results of ceramic asphalt mixture

参数	$w/\%$				参数	$w/\%$			
	0	20	40	60		0	20	40	60
$P_a/\%$	4.900	4.900	5.300	5.400	$\rho_s/g \cdot cm^{-3}$	2.428	2.372	2.316	2.269
$\rho_t/g \cdot cm^{-3}$	2.513	2.463	2.390	2.349	$V_v/\%$	3.400	3.700	3.100	3.400
$V_{MA}/\%$	14.400	14.400	14.400	14.700	$V_{FA}/\%$	76.500	74.400	78.500	76.800
M_s/kN	10.630	11.650	11.170	10.840	F_L/mm	2.690	2.950	2.720	2.950

1.4 陶瓷沥青混合料车辙试验

沥青路面高温稳定性主要表现为车辙问题. 开展不同陶瓷掺量的沥青混合料车辙试验,以评价陶瓷沥青混合料的高温稳定性. 当试验温度为 60 ℃,轮压为 0.7 MPa,陶瓷掺量分别为 0%,20%,40%,60%时,动稳定度(D_s)分别为 8 531,8 878,4 985,4 866 次·mm⁻¹. 规范要求 $D_s \geq 2\,800$ 次·mm⁻¹.

由上述可知:随着陶瓷掺量的增加,动稳定度不断下降,高温性能明显下降;但当陶瓷掺量为 60%时,动稳定度仍能满足规范要求,为保证陶瓷沥青混合料的高温稳定性,推荐陶瓷掺量不大于 60%.

1.5 陶瓷沥青混合料水稳定性试验

水损害是沥青路面的主要病害之一. 对不同陶瓷掺量的沥青混合料开展浸水马歇尔试验、冻融劈裂试验,以评价陶瓷沥青混合料的水稳定性.

采用马歇尔试件,试验温度为 25 ℃,加载速率为 50 mm·min⁻¹. 试验结果,如表 4 所示. 表 4 中: S_0 为残留稳定度; R_0 为残留强度比.

由表 4 可知:随着陶瓷掺量的增加,浸

水马歇尔试验残留稳定度、冻融劈裂试验残留强度比均有所降低,但均满足规范要求,水稳定性良好.

由于桂林不属于冰冻地区,暂不考虑沥青混合料的低温收缩变形等病害. 因此,在基本路用性能良好的基础上,研究陶瓷掺量对路面阻热性能的有利影响.

2 陶瓷沥青混合料阻热性能试验

2.1 陶瓷沥青混合料热物性参数试验

试验采用稳态测试法测量沥青混合料的导热系数. 稳态测试法的工作原理是:当被测件内部的温度场达到热平衡时,通过测量试件单位面积的温度梯度和热流速度,求出材料的导热系数. 当陶瓷掺量分别为 0%,20%,40%,60%时,导热系数(λ)分别为 0.70,0.50,0.45,0.40 W·(m·℃)⁻¹.

由上述可知:随着陶瓷掺量的增加,陶瓷沥青混合料的导热系数逐渐降低,说明陶瓷的掺入可有效地提高沥青混合料的阻热性能.

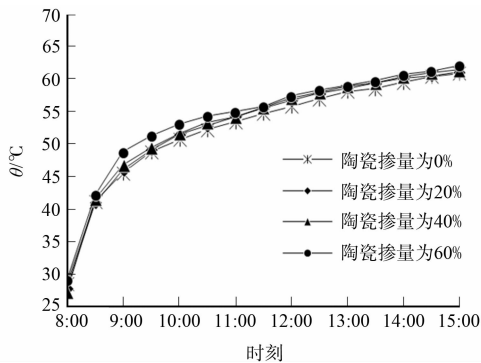
2.2 陶瓷沥青混合料阻热性能试验

采用室内光照辐射试验系统测试陶瓷阻热面层的阻热效果. 辐射光源为碘钨灯,功率为 300 W,热辐射能量充足,利用热电偶温度计采集温度. 分别制备 4 种陶瓷掺量为 0%,20%,40%,60%的陶瓷沥青混合料 CAC-10 上面层、沥青混合料 AC-20 中面层沥青路面的车辙试件,照射时间从 8:00 到 15:00

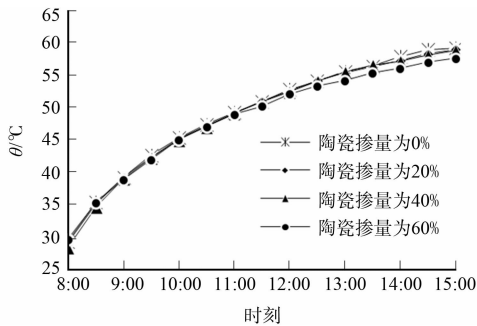
共 7 h. 试验过程中, 每半小时分别测量各试件上面层表面(0 cm)、中面层顶部(4 cm 深处)、中面层底部(10 cm 深处)的温度. 试验测量结果, 如图 1, 2 所示. 图 1, 2 中: θ 为温度; $\Delta\theta$ 温差.

由图 1(a), (b)可知: 上面层表面的温度随着陶瓷掺量的增加而升高, 但升高幅度较小, 这是由于随着陶瓷掺量的增加, 油石比升高, 沥青质量分数升高, 吸收的热量也增加; 在 4 cm 深度处, 温度随着陶瓷掺量的增加而降低, 这是由于陶瓷沥青混合料导热系数随着陶瓷掺量的增加而降低, 向下传递的热量逐渐减少, 这验证了陶瓷沥青混合料的阻热性能.

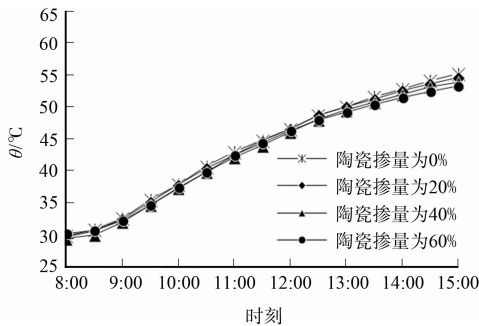
由图 1(b), (c)可知: 在光照前 3 h, 相比上表面温度, 各试件在 4 cm 深处的温度差距不明显; 在 3 h 之后, 不同陶瓷掺量的降温幅度逐渐增大, 达到高温时, 陶瓷掺量的试件在 4 cm 深处、10 cm 深处温度均显著降低, 说明陶瓷沥青混合料能有效降低路面结构温度, 减少热量在路面内部的积累, 从而有效解决路面的车辙问题.



(a) 上表面



(b) 4 cm 深处



(c) 10 cm 深处

图 1 陶瓷沥青混合料不同位置处的温度变化

Fig. 1 Temperature variation of ceramic asphalt mixture at different positions

由图 2 可知: 相比上表面温度, 4 cm 深处陶瓷掺量分别为 0%, 20%, 40%, 60% 的沥青混合料的最大降温幅度分别为 1.7, 2.1, 2.6, 4.5 °C, 最大降温幅度随着陶瓷掺量的增加而逐渐增大, 且陶瓷掺量为 60% 的降温幅度最大, 降温效果显著. 这说明陶瓷沥青混合料阻热性能随陶瓷掺量的增加而提高, 与普通沥青混合料相比, 陶瓷掺量为 60% 的沥青混合料阻热性能显著.

掺加陶瓷后, 沥青混合料的高温性能有所下降(节 1.4), 但其阻热性能显著提高(图 1, 2), 且陶瓷掺量为 60% 的沥青混合料的高温性能满足规范要求, 阻热性能显著. 因此, 合理选择陶瓷掺量既能保证沥青混合料的高温性能, 又能提高阻热性能, 节约成本, 说明陶瓷废料在沥青路面的应用是可行的.

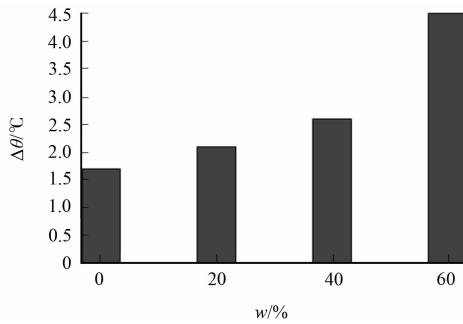


图 2 深度为 4 cm 的最大降温幅度

Fig. 2 Maximum cooling range at depth of 4 cm

3 基于有限元法的陶瓷沥青路面温度场模拟

基于有限元法建立路面温度场模型对比, 并分析普通沥青混合料(陶瓷掺量为 0%)与陶瓷沥青混合料(陶瓷掺量为 60%)路面结构温度分布, 研究陶瓷沥青混合料的阻热性能.

3.1 有限元计算模型及参数

由于沿路面行车方向温度分布比较均匀, 在道路横断面上建立沥青路面多层结构温度场进行瞬态传热分析. 路面宽 5 m, 陶瓷(普通)沥青路面各结构层从上向下依次为: 厚度为 4 cm 的 CAC-10(SAC-10); 厚度为 6 cm 的 AC-20; 厚度为 8 cm 的 AC-25; 厚度为 20 cm 的水泥稳定碎石; 厚度为 20 cm 的石灰粉煤灰稳定碎石; 厚度为 5 m 的土基. 应用 ANSYS 软件建立二维有限元热分析模型及网格划分, 如

图 3 所示.

模型单元采用热实体单元(Thermal Solid)中 4 节点四边形平面单元(Quad 4 node),编号为 PLANE55,单元行为按轴对称考虑. 沥青面层网格划分尺寸为 0.04 m,基层、底基层及土基为 0.1 m. 沥青路面温度场模拟考虑以传导的方式进行热传递.

基于陶瓷沥青混合料导热系数测试结果和室内光照试验结果,采用有限元法拟合上、中面层材料热物性参数. 当上层 面 CAC-10(SAC-10)、中面层的导入系数分别为 0.40(0.70), 0.80 $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$ 时,陶瓷沥青混合料的比热容(C)分别为 900(1 200),1 300 $\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$. 由于室内试验不可避免地存在系统误差,有限元拟合结果误差分析,如表 5 所示. 表 5 中: H 为深度; σ 为误差. 由表 5 可知:误差均在 $\pm 5\%$ 以内,说明热物性参数拟合结果是可行的. 其他模型参数参考其他学者研究成果综合选取,有限元计算模型参数,如表 6 所示. 表 6 中: ρ 为密度.

表 5 上面层和中面层热物性参数拟合结果误差分析

H/cm	$w=0\%$			$w=60\%$		
	试验结果/ $^\circ\text{C}$	拟合结果/ $^\circ\text{C}$	$\sigma/\%$	试验结果/ $^\circ\text{C}$	拟合结果/ $^\circ\text{C}$	$\sigma/\%$
4	35.3	34.7	-1.7	35.3	33.7	-4.5
10	30.7	31.1	1.3	30.6	31.0	1.3

表 6 有限元计算模型参数

参数	上面层		中面层	下面层	水泥稳定碎石	石灰粉煤灰稳定碎石	土基
	CAC-10	SAC-10					
$\lambda/\text{W} \cdot (\text{m} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$	0.40	0.70	0.80	1.05	1.21	1.25	1.28
$\rho/\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	2 269	2 428	2 430	2 420	2 470	2 470	1 810
$C/\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$	900	1 200	1 300	1 250	1 050	1 060	1 040

3.2 路面温度场有限元计算

模型的边界条件主要为土基底面的地温约束,当土基达到一定深度时,其温度基本保持常量. 取土基 5 m 深处的温度($15\text{ }^\circ\text{C}$)作为温度约束. 由于温度为变化荷载,将室内试验实测的试件上表面温度值作为热传导边界条件中的温度荷载,并施加于道路表面. 路表温度荷载,如表 7 所示.

表 7 路表温度荷载

时刻	8:00	8:30	9:00	9:30	10:00	10:30	11:00	11:30	12:00	12:30	13:00	13:30	14:00	14:30	15:00
$\theta/^\circ\text{C}$	28.5	41.2	45.5	48.8	50.7	52.2	53.4	54.7	55.8	57.0	58.1	58.5	59.5	60.4	60.9

由于温度荷载随时间变化而变化,对上述两种结构类型的路面温度场进行瞬态热分析. 将表 7 中荷载时间表划分荷载步,每一个时刻为一个荷载步. 由于路面结构模型中的初始温度分布是不均匀,且未知的,通过单荷载步的稳态热分析确定瞬态热分析前的初始温度. 稳态初始荷载为时刻 8:00 的温度值 $28.5\text{ }^\circ\text{C}$,地温约束为 $15\text{ }^\circ\text{C}$,结束时间设为 0.001 s,求解初始温度. 后续荷载步为瞬态求解,每一个荷载步时间为 1 800 s,设置为渐变荷载,每一时间子步为 100 s,设置自动时间步. 对于瞬态热分析问题,通过 ANSYS 提供的通用后处理器查看各个荷载步的列表输出结果,创建路径读取各结构层不同时刻的温度值,两种结构类型路面温度场的有限元计算结果,如图 4.5 所示.

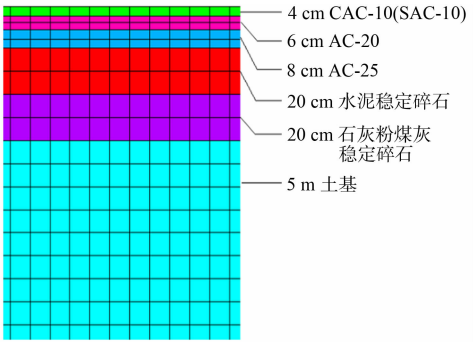
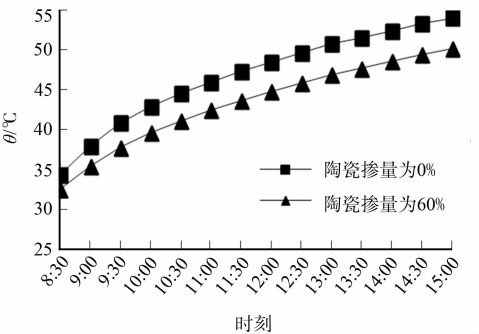


图 3 路面温度场有限元模型与网格划分
Fig. 3 Finite element model and mesh division of pavement temperature field



(a) 4 cm 深处

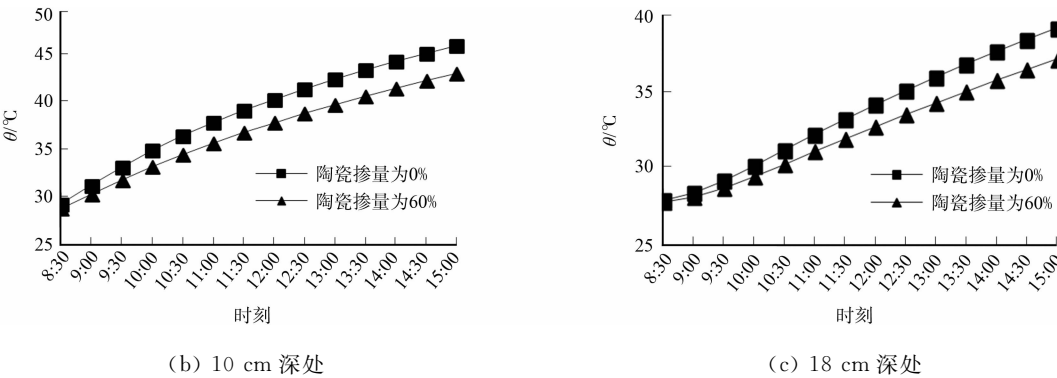


图 4 路面结构温度变化

Fig. 4 Pavement structure temperature variation

由图 4 可知:与普通沥青路面相比,陶瓷掺量为 60% 的沥青路面在深度为 4,10,18 cm 的温度均显著降低,说明路面温度场有限元计算结果与室内光照试验降温效果吻合,陶瓷沥青混合料可有效提高路面的阻热性能。

由图 5 可知:与普通沥青路面相比,陶瓷掺量为 60% 的沥青路面在深度为 4,10,18 cm 的温度分别降低了 3.9,2.9,2.0 °C,说明陶瓷掺量为 60% 的沥青混合料可以有效地降低沥青面层温度,减少路面内部温度的积累,从而有效地解决路面的车辙问题。

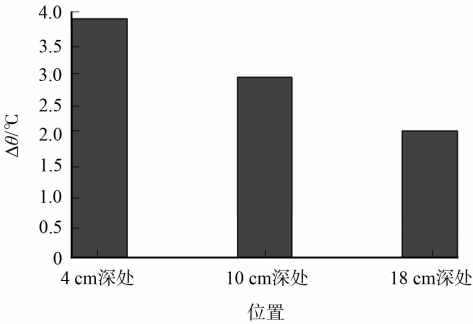


图 5 陶瓷掺量为 60% 的沥青路面降温效果

Fig. 5 Cooling effect of asphalt pavement with 60% ceramic content

陶瓷沥青路面阻热效果,如表 8 所示.表 8 中: θ_1, θ_2 分别为沥青分层上、下表面的温度; θ_{av} 为各分层平均温度,即沥青分层上、下表面温度的平均值; θ_0 为路面初始温度,28.5 °C; θ_1 为升高温度,即平均温度与路面初始温度的差值; θ_{HR} 为阻热温度,即普通沥青路面升高温度与陶瓷沥青路面升高温度的差值; f 为阻热系数,即阻热温度与普通沥青路面升高温度的比值。

表 8 陶瓷沥青路面阻热效果

Tab. 8 Thermal resistance of ceramic asphalt pavement

沥青分层	$w/\%$	$\theta_1/^\circ\text{C}$	$\theta_2/^\circ\text{C}$	$\theta_{av}/^\circ\text{C}$	$\theta_0/^\circ\text{C}$	$\theta_1/^\circ\text{C}$	$\theta_{HR}/^\circ\text{C}$	$f/\%$
上面层	0	60.9	54.0	57.4	28.5	28.9	1.9	6.7
	60	60.9	50.1	55.5	28.5	27.0		
中面层	0	54.0	45.8	49.9	28.5	21.4	3.4	15.9
	60	50.1	42.9	46.5	28.5	18.0		
下面层	0	45.8	39.2	42.5	28.5	14.0	2.5	17.8
	60	42.9	37.1	40.0	28.5	11.5		

由表 8 可知:相比普通沥青路面,陶瓷掺量为 60% 的沥青路面上表面向下传递的热量减少,上、中、下面层阻热效果分别提高了 6.7%,15.9%,17.8%,说明陶瓷沥青混合料可以有效地提高路面的阻热性能,陶瓷掺量为 60% 的沥青路面阻热效果显著。

4 结论

1) 通过开展陶瓷废料沥青混合料车辙试验可知,陶瓷掺量不大于 60% 的沥青混合料高温稳定性满足规范要求,高温性能良好;通过开展陶瓷废料沥青混合料浸水马歇尔试验、冻融劈裂试验可知,水稳定性满足规范要求,水稳性能良好. 试验验证了陶瓷废料应用于沥青路面的可行性。

2) 通过开展室内光照模拟太阳辐射试验可知,沥青路面降温效果随着陶瓷掺量的增加而提高,验证了陶瓷沥青混合料可有效提高沥青路面阻热性能,且陶瓷掺量为 60% 的沥青混合料阻热性能较为显著. 合理选择陶瓷掺量既能保证沥青混合料的高温性能,又能显著提高阻热性能,节约工程投资。

3) 通过开展路面温度场有限元模拟试验可知,阻热陶瓷沥青路面温度场的有限元计算结果与室内光照试验降温效果吻合.陶瓷掺量为 60%的沥青路面在深度为 4,10,18 cm 处分别降低了 3.9,2.9,2.0℃,上、中、下面层的阻热效果分别提高了 6.7%,15.9%,17.8%,这不仅有效地降低沥青面层温度,还显著地提高沥青路面阻热性能.

参考文献:

[1] 张文刚,丁龙亭,袁中玉. 2,6-二叔丁基对甲酚对 SBS 改性沥青抗老化性能的影响[J]. 华侨大学学报(自然科学版),2018,39(5):39-43. DOI:10.11830/ISSN.1000-5013.201801051.

[2] 张鑫. 沥青路面热反射与热阻技术降温机理与应用研究[D]. 黑龙江:哈尔滨工业大学,2011.

[3] 胡小文. 湿热地区刚性路面加铺沥青车辙防治技术[D]. 福州:福州大学,2016.

[4] 冯德成,张鑫,王广伟. 陶瓷热阻磨耗层材料开发及性能验证[J]. 公路,2010(11):151-155.

[5] 高坤. 掺陶瓷再生集料的沥青路面表面层性能研究[D]. 天津:河北工业大学,2015.

[6] 于智光,钱振东,杨理广. 利用陶瓷废料的环氧沥青混合料路用性能研究[J]. 公路,2016(1):188-191.

[7] ABURKABA E,MUNIANDY R. Experimental study of high temperature properties and rheological behavior of ceramic modified asphalt[J]. Social Science Electronic Publishing,2016,10(6):150-161.

[8] 邹玲,郑南翔,纪小平. 热阻沥青混合料薄层罩面阻热性能研究[J]. 武汉理工大学学报,2014,36(6):41-46. DOI:10.3963/j.issn.1671-4431.2014.06.009.

[9] 车天凯,潘宝峰,兰晶晶. 陶砂对沥青混合料性能影响的研究[J]. 新型建筑材料,2017,44(12):52-54. DOI:10.3969/j.issn.1001-702X.2017.12.015.

[10] 车天凯. 陶粒细集料沥青混合料性能的试验研究[D]. 大连:大连理工大学,2017.

[11] 赵秋华. 陶粒热阻式磨耗层材料试验研究[D]. 西安:长安大学,2012.

[12] 王广伟. 热阻式超薄磨耗层的试验研究[D]. 黑龙江:哈尔滨工业大学,2008.

[13] 王广伟,贾胜强. 陶瓷在超薄磨耗层中的应用研究[J]. 公路工程,2011,36(4):203-206. DOI:10.3969/j.issn.1674-0610.2011.04.051.

[14] 任永利. 陶瓷废料用于沥青路面隔热层混合料的性能研究[D]. 广州:华南理工大学,2010.

[15] 钱振东,孟凡奇,杨理广. 利用陶瓷废料的沥青混合料路用性能及隔热性能[J]. 公路交通科技,2015,32(5):19-24. DOI:10.3969/j.issn.1002-0268.2015.05.004.

[16] 孟凡奇,钱振东,杨理广. 基于热物性的陶瓷沥青混凝土阻热性能研究[J]. 公路交通科技,2015,32(11):20-26. DOI:10.3969/j.issn.1002-0268.2015.11.004.

[17] 丁京,丁建明,罗桑. 陶瓷热阻式沥青路面温度场仿真研究[J]. 交通信息与安全,2015,33(5):112-116. DOI:10.3963/j.issn1674-4861.2015.05.017.

[18] 刘朝晖,沙庆林. 超薄层沥青混凝土 SAC-10 矿料级配比较试验研究[J]. 中国公路学报,2005,18(1):7-13. DOI:10.3321/j.issn:1001-7372.2005.01.002.

(编辑: 李宝川 责任编辑: 黄晓楠 英文审校: 方德平)