

文章编号:1671-8879(2020)01-0125-10

热阻沥青混合料研究进展

高志伟¹, 刘鲁清², 肖绪荡², 王朝辉², 穆 柯³

(1. 西藏民族大学 信息工程学院, 陕西 咸阳 712082; 2. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064;
3. 中交第一公路勘察设计研究院有限公司, 陕西 西安 710068)

摘 要:为进一步评价热阻沥青混合料路用性能及阻热降温功效,系统梳理了热阻沥青路面研究成果,明确了路用热阻集料常用种类及其关键技术指标,评价了其基本性能;基于热阻沥青混合料路用性能研究调查结果,采用数理统计分析方法,确定了热阻沥青混合料常用热阻集料使用粒径及应用方式,评价了热阻沥青混合料路用性能;基于热阻沥青混合料降温功效调查结果,梳理了其降温测试方式,分析了热阻沥青混合料阻热降温机理,对比评价了热阻沥青混合料降温功效。研究结果表明:路用热阻集料主要包括铝矾石类、陶制品、膨胀蛭石及多孔玄武岩;路用热阻集料导热系数均较小,但力学特性普遍较差;热阻沥青混合料中热阻集料常用应用方式主要包括等体积替换普通粗集料或细集料、层间设置热阻黏封层、路表加铺热阻薄层;相比普通沥青混合料,热阻沥青混合料路用性能变化较明显,其中陶制品类和铝矾石类热阻沥青混合料高温稳定性平均下降 10%~15%左右,多孔玄武岩和膨胀蛭石类热阻沥青混合料高温稳定性有上升趋势,而热阻沥青混合料的低温性能并无明显变化,但其水稳定性下降较显著;热阻沥青混合料中热阻集料替换普通集料方式应用时,试件 5 cm 厚度处降温幅度达 4℃~7℃,其中铝矾石类降温效果最为显著,达 6.2℃;陶制品虽能有效阻隔热量在沥青混合料中的传递,但会使热量在试件表层蓄积,导致试件表面温度升高。

关键词:道路工程;热阻集料;热阻沥青混合料;路用性能;降温

中图分类号:U411

文献标志码:A

DOI:10.19721/j.cnki.1671-8879.2020.01.013

Research progress of thermal resistance asphalt mixture

GAO Zhi-wei¹, LIU Lu-qing², XIAO Xu-dang², WANG Chao-hui², MU Ke³

(1. School of Information Engineering, Xizang Minzu University, Xianyang 712082, Shaanxi, China; 2. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 3. CCCC First Highway Consultants Co., Ltd., Xi'an 710068, Shaanxi, China)

Abstract: To further evaluate the pavement performance and heat-resistance and cooling effects of thermal-resistant asphalt mixture, the current research results on thermal-resistant asphalt pavements were sorted out systematically, the common types and key technical indicators of road thermal-resistant aggregates were defined, and the basic performance of road thermal-resistant aggregates was evaluated. The investigation results were based on the pavement performance of

收稿日期:2019-09-21

基金项目:交通运输部建设科技项目(201331849A270);西藏自治区自然科学基金项目(2016-ZR-15-26);

陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2014JM2-5045);陕西省青年科技新星项目(2018KJXX-033);

中央高校基本科研业务费专项资金项目(300102219314, 300102218304)

作者简介:高志伟(1984-),男,山西浑源人,副教授,工学博士,E-mail:gaozhiwy@163.com。

通讯作者:王朝辉(1980-),男,河南滑县人,教授,博士研究生导师,E-mail:wchh0205@163.com。

thermal-resistant asphalt mixture. Mathematical statistical analysis was used to determine the particle size and application mode of thermal-resistant aggregates commonly used in thermal-resistant asphalt mixture, and the pavement performance of the thermal-resistant asphalt mixture was evaluated. Based on investigation results of the cooling effect of thermal resistance asphalt mixture, the cooling test methods of thermal resistance asphalt mixture were carded, the thermal blocking mechanism of thermal resistance asphalt mixture were analyzed and the cooling efficiency of thermal resistance asphalt mixture were evaluated comparatively. The results show that road thermal-resistant aggregates mainly include bauxite, ceramics, expanded vermiculite and porous basalt. The thermal conductivity of road thermal-resistant aggregates are low, but their mechanical properties are generally poor. The common application modes of thermal-resistant aggregates in thermal-resistant asphalt mixture mainly include equal volume replacement of common coarse or fine aggregates, setting the thermal-resistant adhesive seal layer between layers, and paving the thermal-resistant thin layer on the road surface. Compared with ordinary asphalt mixture, the pavement performance of the thermal-resistant asphalt mixture has obvious differences. Among them, the high-temperature stability of ceramics and bauxite thermal resistance asphalt mixture decrease by about 10% to 15% on average. The high-temperature stability of porous basalt and expanded vermiculite in thermal-resistant asphalt mixtures tend to increase. However, the low-temperature performance of thermal-resistant asphalt mixture do not change significantly, although its water stability decrease significantly. When thermal-resistant aggregates are used in the thermal-resistant asphalt mixture instead of ordinary aggregates, the temperature drop of the specimen with thickness of 5 cm ranged from 4 °C to 7 °C. Bauxite has the most significant cooling effect, reaching 6.2 °C. Ceramics can effectively prevent heat transfer in the asphalt mixture, but will accumulate heat on the surface of the specimen, resulting in increased surface temperature. 4 tabs, 8 figs, 34 refs.

Key words: road engineering; thermal resistance aggregate; thermal resistance asphalt mixture; pavement performance; cooling

0 引言

沥青路面在夏季易出现车辙等高温病害,“主动”降温的热阻沥青路面具有较低的辐射吸收率和导热系数,可显著降低路面结构层温度,越来越受到专家学者青睐^[1-4]。20 世纪 50 年代,美国利用陶瓷等体积替换部分普通碎石集料制备热阻沥青混合料,研究混合料的自重及热阻性能变化规律^[2]。德国采用煅烧铝矾土集料代替普通碎石铺筑热阻路面,并通过减少沥青用量的方式,使煅烧铝矾土裸露,以提高热反射率,并使沥青路面温度降低 5 °C~8 °C^[3]。瑞典与挪威尝试使用轻型材料泡沫玻璃颗粒作为热阻集料应用于道路工程中,取得了良好的降温效果^[3-4]。近年来,中国学者针对热阻集料也进行了大量探索。王朝辉等为提高多孔页岩陶粒的路用性能并提升其阻热性能,优选 3 种有机处理剂,借助吸水率、筒压强度、控制筛孔通过率及磨耗值试

验,确定了不同处理剂最佳修饰工艺^[1]。李彩霞等确定了煅烧铝矾石在 AC-13 和 SMA-13 中的最佳掺量,并评价了混合料的阻热功效及路用性能^[5]。谭波等用陶瓷废料等体积替换部分集料,系统研究了混合料高温稳定性能、水稳定性能以及阻热降温功效^[6]。钱振东等将陶瓷应用于超薄磨耗层,使路面上下表面的温度差从 3.5 °C 增加到 8.9 °C,大幅降低了沥青混合料的导热系数^[7]。雷雨滋等利用高铝质耐火碎石作为热阻集料替代普通碎石设计热阻沥青路面,路表温度可降低 6.3 °C~8.0 °C,路面内部温度降低 5.2 °C~7.2 °C^[8]。丁京等研究得出陶瓷粉末沥青混凝土具有更低的导热系数,掺量(体积分数,下同)为 50% 的陶瓷沥青混合料会使路面 4 cm 深度处温度降低 4.42 °C^[9]。冯德成等将陶砂和硅藻土以热阻黏封层的形式应用于沥青路面的表面层和中面层之间,降低了中下面层沥青混合料的温度,提高了沥青路面高温稳定性^[10]。邹玲等用低导

热系数陶粒代替普通集料应用于路面结构中,显著降低了路面结构层内部温度^[11]。综上可知,目前国内外研究者在热阻沥青混合料级配优化、降温效果及路用性能评价等方面已开展了相关研究,并取得了一定成果,但关于常用热阻集料种类确定、评价指标以及应用方式尚不明确,热阻沥青混合料路用性能、阻热降温机理及功效评价仍需进一步探讨与研究。

因此,本文系统梳理目前热阻沥青路面研究成果,明确路用热阻集料常用种类及关键技术指标,评价其基本性能,确定热阻沥青混合料中常用热阻集料粒径及应用方式,对比评价热阻沥青混合料路用性能及阻热降温功效,以期为热阻沥青混合料进一步研究与应用奠定基础。

1 路用热阻集料及其性能评价

1.1 路用热阻集料及技术指标

热阻沥青路面是使用导热系数较小的热阻集料部分或全部替代普通集料,通过降低混合料整体的热物性参数,达到降低沥青路面温度的目的。因此,热阻集料的选择是热阻沥青混合料制备的关键。为得到满足沥青路面各项路用性能且具有显著阻热降温功效的热阻集料,系统梳理目前有关热阻沥青路面的研究得出,常用的热阻集料有:铝矾石类(煅烧

铝矾石、高铝质耐火碎石等)、陶制品(陶砂、陶粒、陶瓷等)、膨胀蛭石以及多孔玄武岩等,其中以陶制品与铝矾石类研究应用最多;除此之外,还有膨胀珍珠岩、粉煤灰漂珠^[2-34]。

热阻集料大部分为多孔矿物,路用技术指标较差,用于沥青混合料中会对混合料路用性能造成不利影响。为全面客观评价热阻集料的基本性能,参考中国《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2017)、《公路工程集料试验规程》(JTG E42—2005),并结合热阻集料自身特点,提出具有代表性的关键路用技术指标,结果如表 1 所示。

表 1 热阻集料关键路用技术指标
Tab. 1 Key road technical indexes of thermal resistance aggregate

类别	名称	试验方法
物理性质	表观密度	网篮法
	导热系数	防护热板法
	吸水率	网篮法
力学特性	压碎值	按规范步骤采用集料压碎值试验仪
	磨耗值	洛杉矶法
黏附特性	黏附性等级	水浸法/水煮法
加工特性	针片状含量	游标卡尺法

1.2 路用热阻集料技术性能评价

为对热阻集料进行合理的性能评价,系统梳理常用热阻集料的技术指标,详见表 2。

表 2 热阻集料关键路用技术指标及要求^[2-4,7-8,11-28]
Tab. 2 Key road use technical indexes and requirements of thermal resistance aggregate^[2-4,7-8,11-28]

序号	热阻集料	导热系数/ (W·(m·K) ⁻¹)	表观密度/ (g·cm ⁻³)	吸水率/%	压碎值/%	磨耗值/%	黏附性等级	针片状含量/%
1	煅烧铝矾石	0.050 0~0.100 0	2.75~2.85	≤5.00	21.0~25.0	20~30	4	6~20
2	高铝质耐火碎石	0.400 0~0.600 0	2.50~2.90	3.00~6.50	27.0~33.0	16~30	3、4	
3	陶粒	0.100 0~0.400 0	0.95~1.69	6.00~9.50	20.0~38.0	20~35	3、4	
4	陶瓷	0.500 0~1.800 0	2.25~2.35	≤3.00	21.0~25.0	14~21	2~4	33
5	膨胀蛭石	0.050 0~0.070 0	0.10~0.20	>100				≤5
6	多孔玄武岩	1.000 0~1.091 0	2.38~2.90	3.24~4.32	16.4~16.9		4	
7	粉煤灰漂珠	0.027 0~0.065 0	0.70~0.72	0.50				
8	膨胀珍珠岩	0.024 5~0.048 0	0.08~0.10					
规范中要求			≤2.60	≤2.00	≤26.0	≤28	5	≤15

1.2.1 铝矾石类

铝矾石类热阻集料主要包括煅烧铝矾石、高铝质耐火碎石等,其导热系数均较小,具有优良的阻热性能,且表观密度以及毛体积密度均与普通集料比较大。铝矾石类粗集料的压碎值、磨耗值及针片状含量均接近或超过规范要求的极限值,导致其集料的强度、抗冲击性能、抗磨耗能力较差。同时,铝矾石类材料的吸水率比普通集料大,过大的吸水率使得混合料在成型过程中需要较多的沥青并且影响

其水稳定性,对热阻沥青混合料的路用性能会产生严重的影响。

1.2.2 陶制品

陶粒、陶瓷等陶制品作为热阻集料,其导热系数较低,但压碎值和磨耗值偏高,过高的压碎值与针片状含量会影响混合料的高温稳定性。同时,与铝矾石类热阻集料相似,陶制品类热阻集料黏附性差、吸水率大,导致沥青混合料水稳定性下降。除此之外,陶制品类热阻集料的抗压强度、抗冲击性能和抗磨

耗性能也较差,对热阻沥青路面的使用品质和耐久性能产生较大影响,这是制约陶制品掺加到沥青混合料中的主要因素。

1.2.3 膨胀蛭石

膨胀蛭石的导热系数低,具有优良的阻热性能,在水泥砂浆中应用较广泛^[30],但其强度极差,筒压强度不足 1 MPa,理论上无法通过后期优化处理使其满足或接近相关规范要求,只能等体积替换少量的普通细集料用于沥青混合料中。

1.2.4 多孔玄武岩

多孔玄武岩结构内部封闭孔隙较多,相比普通集料,其导热系数较小。同时,由于多孔玄武岩表面构造粗糙、开口孔隙多,导致其与沥青胶浆的黏附性较好,并且多孔玄武岩集料与普通集料相比增大了集料间的摩阻力,一定程度上提高了沥青混合料的高温稳定性。多孔玄武岩力学性能较好^[31],并且微观纹理较丰富,对路面抗滑性能有利。综合分析认为,影响多孔玄武岩集料在道路工程中应用的最主要因素是吸水率。中国《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2017)中明确指出,对高速公路和一级公路沥青面层用粗集料的吸水率不大于 2%,但在得到主管部门批准的前提下对多孔玄武岩吸水率可放宽至 3%。

1.2.5 膨胀珍珠岩

膨胀珍珠岩具有优良的隔热保温效果^[32],但其强度较低,吸水率较高,不建议作为沥青混合料的骨架集料。根据已有研究可知,膨胀珍珠岩粉末可用于对沥青进行改性,以改善沥青的基本性能指标,并且若采用偶联剂或憎水剂对膨胀珍珠岩进行简单的表面处理^[33],可将其作为细集料或填料等体积替代部分细集料与矿粉,以发挥其优良的保温隔热属性,可显著降低沥青混合料的热物参数。

1.2.6 粉煤灰漂珠

在道路工程领域粉煤灰漂珠作为热阻集料应用于路面结构的研究较少。叶辉贤使用粉煤灰漂珠对沥青改性,使得沥青三大指标均显著降低,其中延度降低最为明显,掺量较大时沥青直接表现为脆断,但粉煤灰漂珠对降低沥青混合料的导热系数具有显著效果,导热系数降幅在 30% 左右,且孔隙率越小的级配降幅越大^[34]。王振军等研究发现,可优选粒径 75~100 μm 的漂珠作为细集料与填料用于沥青混合料中,试验结果表明,掺加多孔集料与粉煤灰漂珠的沥青混合料中部温度相比于普通沥青混合料低 13 ℃^[25]。

2 路用性能评价

2.1 热阻沥青混合料中热阻集料应用分析

目前,国外关于热阻沥青混合料的研究鲜有报道,本文对中国现有热阻沥青混合料研究进展进行了系统调查;并根据调查结果对热阻沥青混合料中热阻集料应用方式、油石比变化以及常用粒径进行了系统梳理,结果如图 1~图 4 所示。

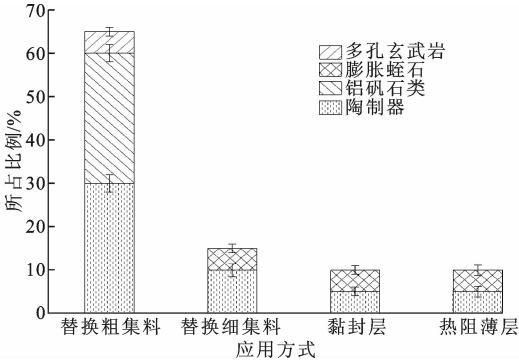


图 1 热阻沥青混合料中热阻集料应用方式^[2-4,7-26]

Fig. 1 Application methods of thermal resistance aggregate in thermal resistance asphalt mixtures^[2-4,7-26]

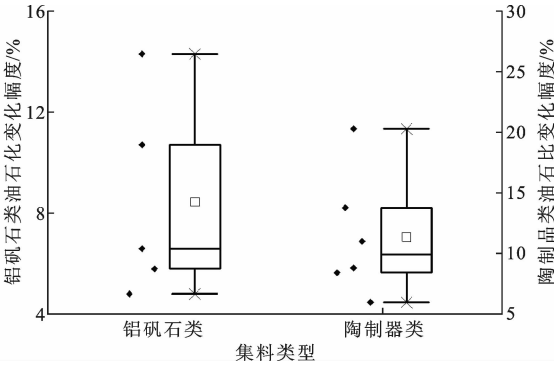


图 2 热阻沥青混合料与普通沥青混合料

油石比变化^[2,4,7,11,13-14,18-20,23-24]

Fig. 2 Changes of asphalt-aggregate ratios of thermal resistance asphalt mixtures compared with ordinary asphalt mixtures^[2,4,7,11,13-14,18-20,23-24]

分析图 1~图 4 可得如下结果。

(1)在热阻沥青混合料中掺加热阻集料会导致混合料最佳沥青用量的增加,其增量的大小与热阻集料种类、掺量以及混合料级配有关,平均增幅在 10% 左右。

(2)目前热阻沥青混合料中热阻集料的主要应用方式有:等体积替换普通粗或细集料、层间设置热阻黏封层、路表加铺热阻薄层等,其中以等体积替换普通集料的应用方式最为普遍。

(3)铝矾石类热阻集料常用粒径范围 4.75~16

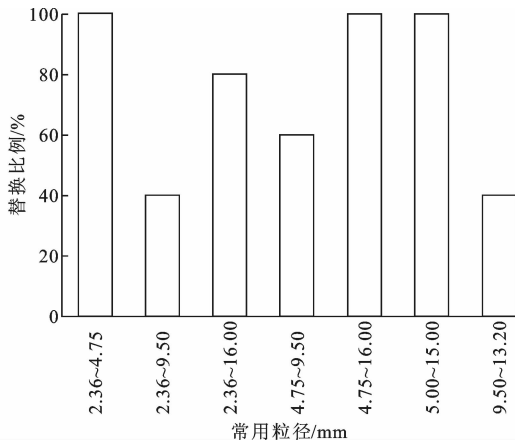


图 3 铝矾石类热阻集料常用粒径及其替换比例^[2,4,8,12-17]

Fig. 3 Common particle sizes and replacement ratios of aluminum vermiculite thermal resistance aggregate^[2,4,8,12-17]

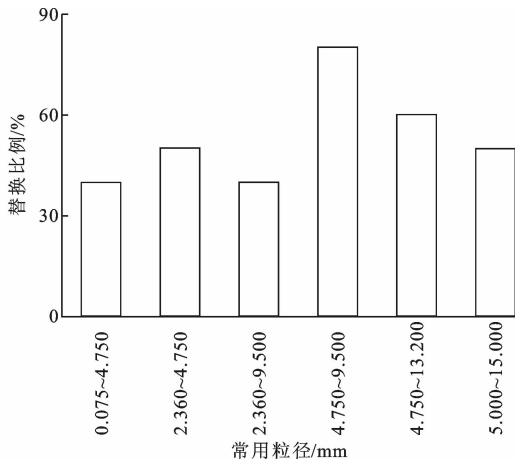


图 4 陶制品类热阻集料常用粒径及其替换比例^[7,11,13,18-21,23-24]

Fig. 4 Common particle sizes and replacement ratios of ceramics^[7,11,13,18-21,23-24]

和 9.5~13.2 mm。铝矾石类热阻集料以替换普通集料的应用方式用于 SMA-13、AC-13C 时,在满足路面使用性能的前提下其替换比例可达 80% 以上。

(4) 陶制品类热阻集料常以 4.75~9.5 和 0.075~4.75 mm 粒径范围最为普遍。相比于铝矾石类热阻集料,陶制品类热阻集料由于力学强度较差,吸水率与针片状含量大,掺量过大会显著影响沥青混合料的路用性能,因此用替换普通集料、热阻黏封层、路表加铺热阻薄层等应用方式时掺量宜较小,为 40%~50%。

2.2 热阻沥青混合料路用性能评价

不同热阻沥青混合料相比普通沥青混合料的各项路用性能指标变化情况见图 5、图 6。分析图 5、图 6 及相关文献^[2,4,8-26]可得如下结果。

(1) 热阻沥青混合料的高温性能受热阻集料路用性能与混合料温度敏感性两方面的影响。煅烧铝

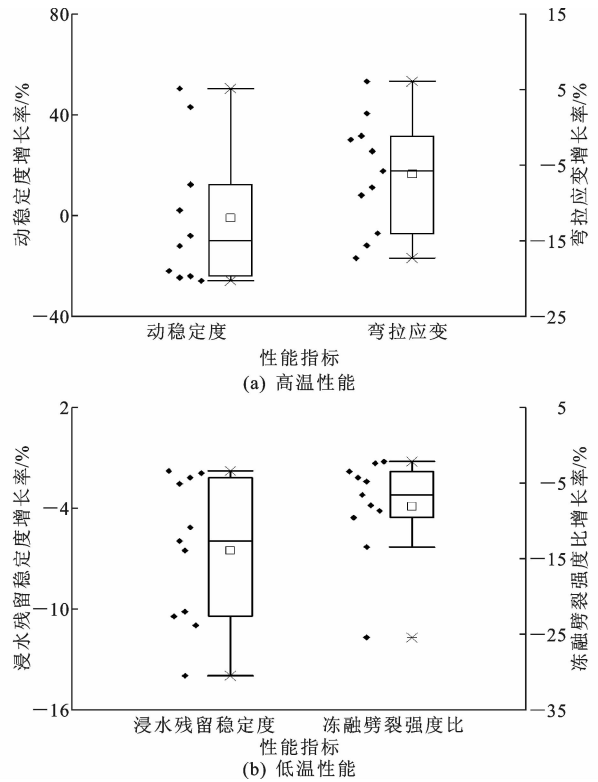


图 5 铝矾石类热阻沥青混合料路用性能增长率^[2,4,8,14-17]

Fig. 5 Growth rates of road performance of alunitic thermal resistant asphalt mixtures^[2,4,8,14-17]

矾石与膨胀蛭石的掺入可提高其高温稳定性能;陶粒与高铝质耐火碎石降低了高温性能,其中高铝质耐火碎石类热阻沥青混合料降幅较为明显;陶瓷因存在黏附性差、压碎值高、针片状含量大等问题,掺入沥青混合料中会使动稳定度明显下降。综合来看,陶制品类和铝矾石类热阻沥青混合料动稳定度平均下降 10% 左右,而多孔玄武岩和膨胀蛭石采用替换普通集料的应用方式时,热阻沥青混合料动稳定度提升约 20%。

(2) 热阻沥青混合料低温性能变化并不显著,其中高铝质耐火碎石、陶瓷与膨胀蛭石的掺入会小幅降低沥青混合料的弯拉应变,降幅约为 7.4%,而陶粒与煅烧铝矾石则可一定程度上改善混合料的低温性能。

(3) 不论是何种类型的热阻沥青混合料,热阻集料的掺入均会使沥青混合料的水稳定性下降,其中以陶制品与膨胀蛭石最为显著,主要原因是集料的吸水率高,与沥青的黏附性差。

综上可知,陶制品类和铝矾石类热阻沥青混合料应用时应注意改善其高温稳定性能;掺加高铝质耐火碎石、陶瓷及膨胀蛭石等集料的热阻沥青混合料应用时,应采取有效措施提升其抗低温性能;同时,应着重考虑增强其水稳定性能,建议通过对热阻

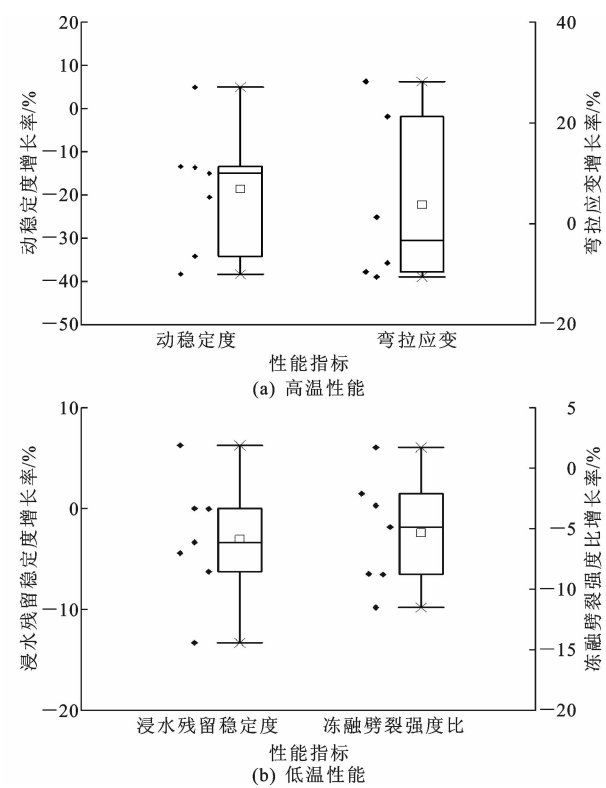


图 6 陶制品类热阻沥青混合料路用性能增长率^[7,11,13,18-20,23-24]

Fig. 6 Growth rates of road performance of ceramic thermal resistance asphalt mixtures^[7,11,13,18-20,23-24]

集料表面性能优化,从而改善集料的吸水率 and 与沥青的黏附性。

3 降温测试方法及功效评价

3.1 热阻沥青混合料降温测试方法

为选择合适的热阻沥青混合料降温测试方法,系统梳理已有研究成果^[2-4,13,18-19,22-23]可知,热阻沥青混合料的降温测试方法主要分为 3 种:第 1 种是热物参数法,通过测试热阻沥青混合料试件导热系数等热物参数,与普通沥青混合料进行对比,以此来

评价热阻沥青混合料的阻热降温功效;第 2 种是室内模拟法,在室内模拟 1 d 内太阳辐射的强度,并采用经过换算的等效光源对混合料试件进行室内照射,然后通过温度采集装置采集试件上下表面及不同深度处的温度,从而实现对混合料阻热降温效果的评价;第 3 种是室外试验法,在已铺筑试验路段的情况下,实测路面结构温度,若未铺筑试验路,可在室外特定试验场所铺筑小面积路面结构以达到评价热阻沥青路面降温效果的目的。3 种热阻沥青混合料常用降温测试方法见表 3。

目前,室内模拟法因为复现性强、操作简单、受外界干扰小,可模拟实际太阳辐射,实现对热阻沥青混合料阻热降温效果的具体量化等,已成为热阻沥青混合料阻热降温效果评价中最广泛使用的一种测试方法。室内模拟法所需热量一般由碘钨灯提供,因为碘钨灯的辐射光谱与太阳较为接近^[2-4]。试验过程中可将车辙板与测温箱体之间用具有保温隔热功效的泡沫板填充,碘钨灯安装于测温箱内部上方中心位置。室内模拟法降温效果的表征方式共分为 2 种:一种是利用温度传感器等测温装置;另一种是利用红外热像仪,通过传热图像表征不同时刻的温度变化。温度传感器可通过预埋或试件成型后钻孔等方式将温度探头植入试件不同深度处^[16]。试验所得数据由数据记录仪或温度巡检仪等采集,并导入计算机进行系统分析。但室内模拟试验与室外试验相比,存在试件尺寸较小,未能考虑路面内部温度的传递和自然状态下各种外界因素的影响等问题。现有研究结果^[23]表明,沥青混合料的导热系数等热物参数的测定综合考虑了混合料各组成材料的导热系数、各相(包括气相)相对含量、分布状态以及混合料的压实度等,故可从原理上证明室内模拟实验的准确性。

表 3 热阻沥青混合料常用阻热降温测试方法^[2-4,13,18-19,22-23]

Tab. 3 Thermal resistance cooling test methods for thermal resistance asphalt mixtures^[2-4,13,18-19,22-23]

测试方法		试件尺寸/mm	测温位置	方法优缺点
热物参数法 (导热系数)	稳态法	150(长)×150(宽)×40(厚)(要满足导热系数测试探头的规格)		计算简单,但耗时较长,需测量导热量和若干点温度
	非稳态法			计算较复杂,但耗时较短,仅需若干点温度随时间的变化
室内模拟法		300(长)×300(宽)×50(厚)或其他厚度	上下表面及不同厚度处具有代表性的点位	复现性强,室内模拟太阳辐射较稳定,但未考虑道路实际自然环境
室外试验法		尺寸较大(根据实际情况而定)	路表及不同结构厚度处具有代表性的点位	符合道路实际所受辐射、自然条件等,可信度高,但复现性差,易受天气状况的影响

3.2 热阻沥青混合料降温功效调查及评价

热阻沥青混合料相比普通沥青混合料的阻热降温效果,如表 4、图 7、图 8 所示。分析可得如下结果。

(1)当热阻集料采用替换普通集料的方式用于热阻沥青混合料中时,试件 5 cm 厚度处的降温效果为 4℃~7℃,其中铝矾石类热阻集料的降温效

表 4 热阻沥青混合料相比普通沥青混合料阻热降温效果调查^[2-4,7-26]

Tab. 4 Investigation on effect of heat resistance and temperature reduction of thermal resistance asphalt mixtures compared with common asphalt mixtures^[2-4,7-26]

热阻沥青混合料	热阻集料	应用方式		阻热降温效果/℃				备注
				上表面	4 cm 厚度处	5 cm 厚度处	10 cm 厚度处	
铝矾石类沥青混合料	煅烧铝矾石	AC-13		6.00~7.00		3.50		
		AC-13C		4.10		10.30		
		AC-13C	60%替换	2.72		6.10		
			100%替换	3.20		7.10		
	高铝质耐火碎石	SMA-13		10.50		5.70		2 cm 厚度处 3.4℃
		SMA-10 薄层罩面					1.80	
		SMA-13		6.30		5.20		
		SMA-13		6.00	6.50			
		SMA-13		0.90	1.00		1.00	
		SMA-13		6.80	7.50		6.30	
		SMA-13		4.10	4.90		3.60	
		普通 SMA	10%替换	6.55	6.06		5.54	
			20%替换	6.50	6.00		5.50	
			30%替换	6.40	5.64		4.90	
陶制品类沥青混合料	陶粒(陶砂)	SAC-10 磨耗层		—3.00		3.20		
		SMA-10 薄层罩面		—1.60				2 cm 厚度处 4.1℃ 8 cm 厚度处 6.0℃
		SMA-10 磨耗层		—2.60		3.60		
		AC-13C				6.80		
		陶粒薄层		5.80		5.00		
		黏封层					2.40	
	陶瓷	磨耗层						1 cm 厚度处 7.2℃ 7 cm 厚度处 8.3℃
		SMA-13		—2.20	5.80		8.40	
		SAC-10 磨耗层		—1.40		7.20		
多孔玄武岩沥青混合料	多孔玄武岩	AC-13		6.00		16.00		2.5 cm 厚度处 13℃
膨胀蛭石沥青混合料	膨胀蛭石	SMA-13		2.20		5.30		
		黏封层		1.20			1.60	
		热阻薄层						2 cm 厚度处 20.9℃ 7 cm 厚度处 12℃
		AC-13			1.80			

注:未特殊标明的试验所用试件均为 5 cm 标准车辙试件。

果较为显著,为 6.2℃,陶制品与膨胀蛭石的降温效果分别比铝矾石类低 21%与 15%。铝矾石类热阻集料的适宜掺量一般高于陶制品与膨胀蛭石,在相同掺量下,陶制品与膨胀蛭石的降温效果优于铝矾石类。

(2)当热阻集料采用替换普通集料的方式用于热阻沥青混合料中时,热阻集料种类对试件表面的降温效果有较大影响。其中,铝矾石类试件表面降温效果可达 6.6℃,膨胀蛭石为 2.2℃,而陶制品试

件则增温 2.2℃。分析认为,铝矾石类与膨胀蛭石具有较低的太阳辐射吸收率,热阻试件本身吸收的热量小于普通对照试件;而陶制品虽能有效阻隔热量在沥青混合料中的传递,但并不能明显减少混合料对外界热量的吸收,因此,导致热量在试件表层蓄积,表现为试件表面的温度升高。

(3)将陶砂或膨胀蛭石以黏封层的形式应用于沥青路面中时,黏封层下部的沥青混合料降温效果并不显著,为 1℃~3℃。

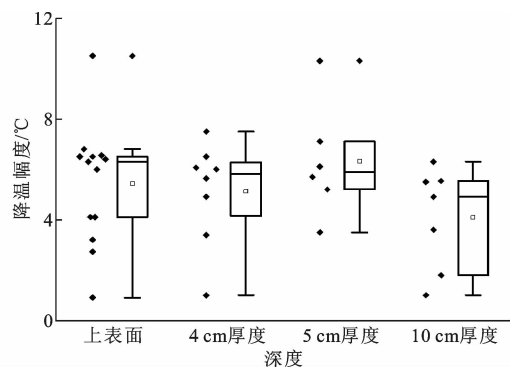


图 7 铝矾石类热阻沥青混合料结构各深度降温幅度^[2,4,8,12-17]

Fig. 7 Cooling range of alunite thermal resistance asphalt mixtures structure of each depth^[2,4,8,12-17]

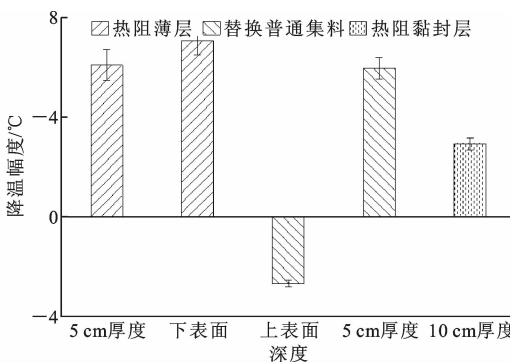


图 8 各种应用方式下陶制品热阻沥青混合料降温幅度^[7,10-11,13,18-24]

Fig. 8 Cooling range of ceramic thermal resistance asphalt mixtures under various application modes^[7,10-11,13,18-24]

(4)将陶粒、膨胀蛭石等热阻集料与适宜胶结材料拌和后作为热阻薄层铺于路表,可显著降低路面的内部温度,其中膨胀蛭石热阻薄层的 2 cm 厚度处降温效果可达 20 ℃。但由于热阻集料的力学性能较差,单纯使用热阻集料的热阻薄层路用性能很难满足规范要求,故建议在对承载能力没有过多要求的路面应用这种热阻薄层。

(5)热阻沥青混合料具有显著降低路面结构内温度的作用,其主要是热阻集料的化学组成、内部结构及构造等原因。例如,高铝质耐火碎石、多孔玄武岩、陶粒、陶砂等热阻集料内部含有大量非连通的闭口孔隙,膨胀蛭石集料结构内部含有许多细薄的叠片构成的层间充满空气的间隔层,这些闭口孔隙及间隔层的存在都具有显著降低沥青混合料内热量传递的效果。

4 结 语

(1)为评价热阻集料基本技术性能,提出导热系数、表观密度、吸水率、压碎值、磨耗值、黏附性等级、针片状含量等具有代表性的路用技术指标;热阻集

料因化学组成、内部结构及构造等导热系数较小,将其应用于沥青混合料中具有优良的阻热降温功效,但同时存在吸水率偏高、力学强度较差等缺陷。

(2)相比普通沥青混合料,热阻沥青混合料的最佳沥青用量平均增加 10%左右。热阻沥青混合料中热阻集料的主要应用方式有等体积替换普通粗或细集料、层间设置热阻黏封层、路表加铺热阻薄层等,其中以等体积替换普通集料的方式最为普遍。

(3)铝矾石类集料常以 60%或 40%的替换比例替换普通粗集料,常用粒径范围是 4.75~16 mm 或 9.5~13.2 mm;陶制品类热阻集料使用粒径范围是 0.075~4.75 mm 或 4.75~9.5 mm,常以 40%~50%的替换比例替换普通集料。除此之外,热阻黏封层、热阻薄层等应用方式也较常见。膨胀蛭石应用方式与陶制品类似,掺量一般在 50%以下,推荐粒径在 0.3~2.36 mm;多孔玄武岩推荐以 30%的比例替换 4.75~9.5 mm 范围内普通粗集料。

(4)陶制品类和铝矾石类热阻沥青混合料动稳定度平均下降 10%左右,多孔玄武岩和膨胀蛭石采用替换普通集料的方式时,动稳定度均有明显上升(约 20%),且热阻沥青混合料低温性能变化并不显著,但水稳定性普遍较差。

(5)热阻沥青混合料中热阻集料替换普通集料应用时,试件 5 cm 厚度处的降温效果为 4 ℃~7 ℃,陶制品与膨胀蛭石的降温效果分别比铝矾石类低 21%与 15%;试件表面处,铝矾石类降温效果可达 6.6 ℃,膨胀蛭石为 2.2 ℃,而陶制品试件由于热量在试件表层蓄积导致表面温度增加了 2.2 ℃;将陶制品或膨胀蛭石以黏封层的形式应用时,黏封层下部的沥青混合料降温效果并不显著,但以热阻薄层形式应用时降温效果较显著,其中膨胀蛭石降温效果可达 20 ℃。

(6)热阻沥青混合料具有优良的阻热降温功效,但其路用性能尤其是水稳定性较差,后续可对热阻集料表面性能优化进一步研究,以实现其基本性能及混合料路用性能的增强,从而为热阻沥青混合料的工程应用奠定基础。

参考文献:

References:

[1] 王朝辉,刘鲁清,韩晓霞,等.路用多孔页岩陶粒表面修饰优化[J].中国公路学报,2019,32(4):196-206.
WANG Chao-hui, LIU Lu-qing, HAN Xiao-xia, et al. Optimization of surface modification of porous ex-

- panded shale[J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, 32(4): 196-206.
- [2] 刘 佳. 热阻式路面材料研究[D]. 西安: 长安大学, 2009.
- LIU Jia. Study on the material of heat insulation pavement[D]. Xi'an: Chang'an University, 2009.
- [3] 杨凤雷. 蛭石在热阻路面中的应用研究[D]. 西安: 长安大学, 2015.
- YANG Feng-lei. Study on application of vermiculite in the thermal resistance pavement[D]. Xi'an: Chang'an University, 2015.
- [4] 李渊沅. 煅烧铝矾石热阻式沥青混合料性能研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2014.
- LI Yuan-yuan. Research on the performances of thermal resistance asphalt mixture containing calcined bauxite[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2014.
- [5] 李彩霞, 杨建华, 张 苛. 热阻式沥青混合料的隔热降温特性与路用性能评价[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2019, 51(3): 375-382, 395.
- LI Cai-xia, YANG Jian-hua, ZHANG Ke. Thermal insulation and cooling characteristics of thermal resistance asphalt mixture and evaluation of its pavement performance[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology: Natural Science Edition, 2019, 51(3): 375-382, 395.
- [6] 谭 波, 倪秋奕, 万靠靠. 陶瓷废料阻热沥青混合料路面性能分析[J]. 华侨大学学报: 自然科学版, 2019, 40(3): 324-330.
- TAN Bo, NI Qiu-yi, WAN Kao-kao. Pavement performance analysis of thermal resistant asphalt mixture with ceramic waste[J]. Journal of Huaqiao University: Natural Science, 2019, 40(3): 324-330.
- [7] 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.
- QIAN Zhen-dong, MENG Fan-qi, YANG Li-guang. Road performance and thermal insulation performance of asphalt mixture containing ceramic waste[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2015, 32(5): 19-24.
- [8] 雷雨滋, 郑南翔, 纪小平. 热阻沥青混合料的降温效果及路用性能评价[J]. 武汉理工大学学报, 2013, 35(11): 68-72.
- LEI Yu-zi, ZHENG Nan-xiang, JI Xiao-ping. Evaluation on temperature reduction and road performances of thermal resistance asphalt mixture[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2013, 35(11): 68-72.
- [9] 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.
- DING Jing, DING Jian-ming, LUO Sang. A simulation study of temperature field of ceramic asphalt pavement[J]. Journal of Transport Information and Safety, 2015, 33(5): 112-116.
- [10] 冯德成, 易军艳. 沥青路面热阻粘封层机理及性能研究[J]. 公路交通科技, 2009, 26(5): 1-5.
- FENG De-cheng, YI Jun-yan. Study on mechanism and performance of tack and seal coat of thermal resistance for asphalt pavement[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2009, 26(5): 1-5.
- [11] 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.
- ZOU Ling, ZHENG Nan-xiang, JI Xiao-ping. Study on thermal resistance performance of thermal resistance thin surface of asphalt mixture[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2014, 36(6): 41-46.
- [12] 周 虹. 铝矾石在隔热路面中的应用分析[J]. 湖南交通科技, 2018, 44(3): 96-98.
- ZHOU Hong. Application of bauxite in heat insulation pavement[J]. Hunan Communication Science and Technology, 2018, 44(3): 96-98.
- [13] 雷雨滋. 降解汽车尾气与缓减城市热岛效应的沥青混合料研究[D]. 西安: 长安大学, 2014.
- LEI Yu-zi. Research on the degradation of automobile exhaust and mitigation of urban heat island effect of bituminous mixture[D]. Xi'an: Chang'an University, 2014.
- [14] 张增平, 韩继成, 南晓粉, 等. 热阻式沥青路面组成及降温技术研究[J]. 筑路机械与施工机械化, 2016, 33(6): 75-78.
- ZHANG Zeng-ping, HAN Ji-cheng, NAN Xiao-fen, et al. Study on composition and cooling technology of heat resistant asphalt pavement[J]. Road Machinery and Construction Mechanization, 2016, 33(6): 75-78.
- [15] JIANG Y, YE Y, XUE J, et al. Thermal resistant stone mastic asphalt surface and its antirutting performance[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2018, 30(11): 06018019.
- [16] 袁自能. 缓解城市热岛效应沥青混合料性能试验分析[J]. 公路与汽运, 2016(1): 118-121.
- YUAN Zi-neng. Experimental analysis on performance of alleviating urban heat island effect asphalt mixture[J]. Highways & Automotive Applications, 2016(1): 118-121.
- [17] 孟宪金, 刘高启, 班孝义. 热阻沥青路面降温效果及作用机理[J]. 公路, 2018, 63(5): 7-11.

- MENG Xian-jin, LIU Gao-qi, BAN Xiao-yi. Research on the cooling effect and mechanism of heat resistance asphalt for pavement[J]. Highway, 2018, 63(5): 7-11.
- [18] 张鑫. 沥青路面热反射与热阻技术降温机理与应用研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
- ZHANG Xin. Research on heat reflection and thermal resistance technology of asphalt pavement cooling mechanism and its application[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011.
- [19] 王广伟. 热阻式超薄磨耗层的试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.
- WANG Guang-wei. Experimental research on the ultra-thin wearing course of thermal resistance function [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008.
- [20] 冯德成, 王广伟. 热阻式超薄磨耗层的应用研究[J]. 公路, 2009, 54(3): 62-65.
- FENG De-cheng, WANG Guang-wei. Research on application of ultra-thin wearing surface with thermal resistance function[J]. Highway, 2009, 54(3): 62-65.
- [21] WANG J, ZHANG Z, GUO D, et al. Study on cooling effect and pavement performance of thermal-resistant asphalt mixture [J/OL]. Advances in Materials Science and Engineering, 2018: 1-11 [2018-10-24]. <https://doi.org/10.1155/2018/6107656>
- [22] 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.
- ZHAO Qiu-hua. The experimental research on the material of the ceramic thermal resistance wearing course[D]. Xi'an: Chang'an University, 2012.
- [23] 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.
- REN Yong-li. Research on the performance of the mixtures of ceramic waste for the insulation layer of asphalt pavement[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2010.
- [24] 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.
- MENG Fan-qi, QIAN Zhen-dong, YANG Li-guang. Research on thermal insulating performance of ceramic asphalt concrete based on thermo-physical property [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2015, 32(11): 20-26.
- [25] 王振军, 王宇, 蒋玮, 等. 多孔集料沥青基复合材料的隔热功能[J]. 功能材料, 2011, 42(5): 827-830.
- WANG Zhen-jun, WANG Yu, JIANG Wei, et al. Insulating function of asphalt-based composites with porous aggregate[J]. Journal of Functional Materials, 2011, 42(5): 827-830.
- [26] 钟勇强, 黄晓明, 马涛, 等. 多年冻土区低导热沥青混合料设计与试验研究[J]. 建筑材料学报, 2013, 16(4): 716-719, 729.
- ZHONG Yong-qiang, HUANG Xiao-ming, MA Tao, et al. Design and experimental research of low thermal conductivity asphalt mixture in permafrost region[J]. Journal of Building Materials, 2013, 16(4): 716-719, 729.
- [27] TIAN K C, BAO F P, JIAN O. The laboratory evaluation of incorporating ceramsite into HMA as fine aggregates [J]. Construction & Building Materials, 2018, 186: 1239-1246.
- [28] 方小林, 宋俊, 郑云波, 等. 膨胀蛭石/酚醛阻燃保温复合材料的制备及性能[J]. 复合材料学报, 2016, 33(11): 2426-2435.
- FANG Xiao-lin, SONG Jun, ZHENG Yun-bo, et al. Preparation and performance of expanded vermiculite/phenolic flame retardant and insulation composites [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2016, 33(11): 2426-2435.
- [29] 王朝辉, 陈谦, 高志伟, 等. 浇注式沥青混凝土现状与发展[J]. 材料导报, 2017, 31(5): 135-145.
- WANG Chao-hui, CHEN Qian, GAO Zhi-wei, et al. Review on status and development of guss asphalt concrete[J]. Materials Review, 2017, 31(5): 135-145.
- [30] EL-GAMAL S M A, HASHEM F S, AMIN M S. Thermal resistance of hardened cement pastes containing vermiculite and expanded vermiculite[J]. Journal of Thermal Analysis & Calorimetry, 2012, 109(1): 217-226.
- [31] DELAN T, QIAO L X. Mechanical properties research base on porous basalt[J]. Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 19: 8295-8304.
- [32] WANG Z S, TU H C, GAO J X, et al. A novel building thermal insulation material: Expanded perlite modified by aerogel [C]//LI G F, HUANG Y, CHENG H. Advanced Materials Research. Berne: Trans Tech Publications, 2011: 507-512.
- [33] 王军, 张洪瑞. 膨胀珍珠岩改性沥青应用研究[J]. 公路, 2012(7): 253-255.
- WANG Jun, ZHANG Hong-rui. Study on application of expanded perlite modified asphalt [J]. Highway, 2012(7): 253-255.
- [34] 叶辉贤. 不同外掺剂对沥青混合料导热系数的影响[J]. 江西建材, 2016(5): 199-200.
- YE Hui-xian. Effect of different external admixtures on thermal conductivity of asphalt mixture[J]. Jiangxi Building Materials, 2016(5): 199-200.