

砂岩用于高速公路沥青路面面层可行性研究

楼建敏¹,孟宪东¹,宋致科¹,赵立东²,白巨龙¹,赵胜利¹,朱继双²

(1.中信建设有限责任公司,北京市 100027;2.中路交建(北京)工程材料技术有限公司,北京市 100176)

摘要:为探究砂岩在高速公路沥青路面面层应用的可行性,该文对比分析砂岩与石灰岩集料的物理力学指标,从级配类型、沥青种类及集料岩性方面研究沥青混合料的高温性能、低温性能和水稳定性能。结果表明:洁净规整的砂岩集料合成的沥青混合料路用性能满足现行规范要求;同时沥青中外掺1%抗剥落剂的砂岩沥青混合料的综合路用性能有一定提高。

关键词:道路工程;砂岩;室内试验;黏附性;路用性能

中图分类号:U416.2

文献标志码:A

Feasibility of Sandstone Used in Asphalt Pavement of Expressways

LOU Jianmin¹, MENG Xiandong¹, SONG Zhike¹, ZHAO Lidong²,

BAI Julong¹, ZHAO Shengli¹, ZHU Jishuang²

(1.CITIC Construction Co., Ltd., Beijing 100027, China;2.China Highway (Beijing) Engineering

Materials Technology Co., Ltd., Beijing 100176, China)

Abstract: In order to explore the feasibility of applying sandstone in the asphalt pavement of expressways, the physical and mechanical indexes of sandstone and limestone aggregate were compared, and the high temperature performance, low temperature performance, and water stability of asphalt mixture were studied from the aspects of grading type, asphalt type, and aggregate lithology. The results show that the road performance of asphalt mixture synthesized by clean and regular sandstone aggregate meets the requirements of current specifications. At the same time, the comprehensive road performance of sandstone asphalt mixture with 1% anti-stripping agent has been improved.

Keywords: road engineering; sandstone; indoor test; adhesion; road performance

0 引言

沥青与集料的黏附过程可分为物理吸附和化学吸附两种,其中化学吸附是沥青与集料表面形成化学键产生化学键结合力,使得沥青与集料黏结牢固^[1]。从化学性质方面的酸碱反应分析,沥青材料呈酸性,若石料呈碱性则与沥青结合更牢固。因此在实际工程应用中,沥青面层多采用石灰岩、玄武岩以及辉绿岩等碱性或中性集料,主要原因在于碱性集料与沥青有较好的黏附性^[2]。然而随着公路的大规模建设,石材的大量应用,优质碱性集料因过度开采

而逐渐减少,导致中国众多省份公路建设所用集料价格不断上升,建设成本也逐年攀升。另外优质的碱性集料在中国范围分布并不均匀,中国不少工程项目为寻求优质集料,不惜跨省甚至跨国选购,长距离运输和本身集料的高价格使得沥青路面工程造价居高不下,因此如何合理利用当地现有资源同时保证工程质量成为当前众多专家学者研究的主要课题之一^[3-7]。

砂岩是一种沉积岩,主要由直径0.05~2 mm的砂粒胶结而成,其结构稳定,包含硅、钙、黏土和氧化铁等成分,呈现红色或淡褐色^[8-9]。砂岩化学组成主

收稿日期:2023-12-21(修改稿)

基金项目:中信建设项目(编号:KT-21-28)

作者简介:楼建敏,男,大学本科,高级工程师.E-mail:loujm@citic.com

要为SiO₂和Al₂O₃,其中SiO₂含量最大,平均含量为78.66%,属于酸性集料,其质地致密坚硬,耐磨性好,能满足混合料的密级配设计,同时中国砂岩石料储量丰富,能较易做到就地取材,使用成本较低^[10-12]。因此科学合理地验证砂岩沥青混合料的路用性能,使其应用于公路沥青面层具有广阔的前景。

近年来,中国道路工程方面的专家学者对砂岩集料应用于沥青路面做了不少探索和尝试。郭明哲^[13]研究表明:经先进碎石加工设备与严格工艺控制,砂岩集料与SBS改性沥青的黏附性可以达到5级,通过原材料检测和试验段铺筑验证,砂岩粗集料可用作SMA沥青路面面层使用;王金国^[14]研究红砂岩上面层AC-13C添加抗剥落剂沥青混合料配合比设计方案,在京藏高速银川段铺筑试验路段,通过现场检测显示各项指标均满足设计及规范要求,施工完成的红砂岩AC-13C路面路用性能良好。

综上所述,在缺少优质集料或运输成本较高的情况下,砂岩用作路用沥青混合料的粗集料具有可行性和现实意义^[15-17]。同时查阅相关文献得知不同地区砂岩性能差异性较大,因此针对本地区砂岩集料与沥青黏附性不足以及现行规范中黏附性等

级评价受人为因素影响过大的问题,本研究采用紫外分光光度法测定集料表面沥青膜的剥落率来评定其黏附性,从级配类型、沥青种类及集料岩性方面对比研究砂岩及石灰岩沥青混合料的高温稳定性、低温抗裂性能和水稳定性,进而验证砂岩沥青混合料应用于高速公路沥青路面面层的可行性。

1 试验用原材料及沥青混合料级配类型

1.1 原材料

试验所用集料采用某地的红砂岩、青砂岩以及石灰岩,填料采用石灰岩矿粉,依据试验规程^[18-19]对其各项指标进行了试验检测,结果如表1、2所示;试验所用基质沥青为韩国SK90#道路石油沥青,改性沥青为市场常规SBS改性沥青,依据现行规范对其各项指标进行了试验检测,结果如表3、4所示。

表1 矿粉性能试验结果

Table 1 Test results of aggregate performance				
项目	含水率/ %	表观密度/ (g·cm ⁻³)	亲水系数	塑性指数
测试结果	0.21	2.732	0.630	3.42
指标要求	≤1	≥2.5	<1	<4

表2 集料性能试验结果

Table 2 Test results of mineral powder performance

项目	表观相对密度				吸水率/%				针片状含量/%			压碎 值/%	洛杉矶 磨耗/%	坚固 性/%	磨光值	与SBS改 与90#基质	
	15~25	10~15	5~10	3~5	15~25	10~15	5~10	3~5	15~25	10~15	5~10					性沥青的	沥青的黏
	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm					黏附性/级	附性/级
红砂岩	2.702	2.701	2.706	2.711	1.62	1.61	1.45	1.83	5.8	5.9	6.9	18.1	13.6	5.4	47	5	3
石灰岩	2.741	2.730	2.735	2.728	0.21	0.27	0.32	0.29	3.4	5.2	14.1	21.9	19.0	2.4	40	5	5
青砂岩	2.713	2.715	2.717	2.669	0.70	0.80	0.90	1.10	6.1	9.0	4.2	21.8	16.8	5.5	48	5	3
指标要求	≥2.60				≤2.0				≤12			≤26	≤28	≤12	≥40(湿润区)	≥4(湿润区)	≥3(半干区)

表3 基质沥青试验结果

Table 3 Test results of base asphalt

项目	针入度(25℃)/ (0.1 mm)	延度 (10℃)/cm	延度 (15℃)/cm	软化点/ ℃	质量变化/ %	残留针入度比 (25℃)/%	残留延度 (10℃)/cm
检测结果	86	>100	>100	47.0	-0.036	79.9	21
技术指标要求	80~100	≥30	≥100	≥44	≤±0.8	≥57	≥8

表 4 SBS 改性沥青试验结果

Table 4 Test results of SBS modified asphalt

项目	针入度(25℃)/ (0.1 mm)	延度 (5℃)/cm	软化点/ ℃	质量变化/ %	残留针入度比 (25℃)/%	残留延度 (5℃)/cm
检测结果	65	38	88.0	-0.015	80.2	23
技术指标要求	50~80	≥30	≥70	≤±1.0	≥65	≥20

由表 2 可知:压碎值、坚固性、洛杉矶磨耗损失以及磨光值指标方面,红砂岩显著优于青砂岩及石灰岩;与基质沥青黏附性方面,石灰岩显著优于砂岩;集料密度方面,砂岩密度略小于石灰岩。

抗剥落剂采用 HK-3 型沥青抗剥落剂,产品指标参数如表 5 所示。

表 5 HK-3 型抗剥落剂规格参数

Table 5 Specification parameters of HK-3 anti-stripping agent

活性物含 量/%	外观	分解温 度/℃	pH 值检测	密度/ (g·cm ⁻³)
>98	棕色黏稠液体	>400	碱性	1.015

1.2 级配类型

本次试验沥青混合料从级配类型、沥青种类及集料岩性方面考虑,采用了红砂岩、石灰岩、青砂岩 3 种不同的集料,SBS 改性沥青、90[#]基质沥青、90[#]基质沥青+抗剥落剂(外掺 1%)3 种不同结合料,混合料类型分别采用 AC-13C、AC-20C,混合料代码编号如表 6 所示。

表 6 不同集料沥青混合料代码编号

Table 6 Code number of asphalt mixture for different aggregates

混合料 类型	AC-13C		AC-20C	
	代码	名称	代码	名称
1	GH-13	改性沥青红砂岩	GH-20	改性沥青红砂岩
2	GS-13	改性沥青石灰岩	GS-20	改性沥青石灰岩
3	GQ-13	改性沥青青砂岩	GQ-20	改性沥青青砂岩
4	JH-13	基质沥青红砂岩	JH-20	基质沥青红砂岩
5	JS-13	基质沥青石灰岩	JS-20	基质沥青石灰岩

砂岩与石灰岩 AC-13C、AC-20C 的合成级配曲线如图 1、2 所示。

2 紫外分光光度法测定砂岩与沥青的黏附性

由于砂岩沥青混合料最主要的问题在于水稳定

性差,沥青与集料的黏附性试验用来反映沥青混合料水稳定性能的优劣。同时现行规范测定集料与沥青黏附性方法为水煮法或水浸法,以上两种方法需经验丰富的试验人员目测后进行黏附等级评定,受人为因素影响较大,对黏附性评定的灵敏性较差。因此为了定量评价沥青在有水情况下与砂岩集料的黏附性,本文采用紫外分光光度法测定沥青与集料黏附性。

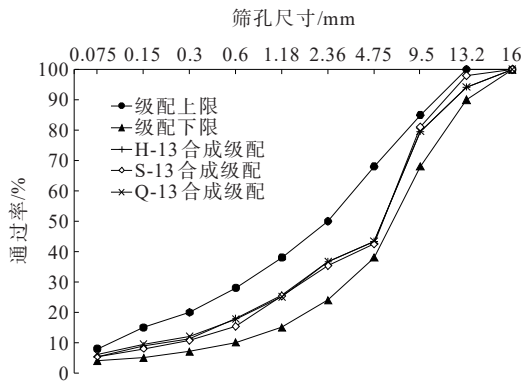


图 1 不同集料 AC-13C 合成级配曲线

Figure 1 AC-13C composite grading curve of different aggregates

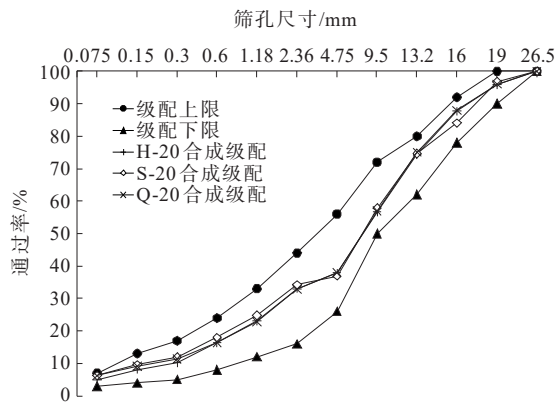


图 2 不同集料 AC-20C 合成级配曲线

Figure 2 AC-20C composite grading curve of different aggregates

紫外分光光度法测定集料与沥青黏附性的原理是基于美国 SHRP 净吸附法,SHRP 净吸附法的原理

是在矿料、水及沥青的体系中,水与矿料的吸附能力要大于沥青与矿料的吸附能力,在水对沥青的置换作用下,沥青与矿料会脱离吸附,进一步会使溶液中的沥青质量浓度发生变化,测量沥青质量浓度变化率进而得出矿料与沥青的剥落率或吸附率。

2.1 确定最大吸收波长及工作曲线

本次试验主要设备为紫外可见光光度计(图3),试验集料为2.36~4.75 mm洗净干燥的红砂岩、石灰岩和青砂岩;胶结料为90#基质沥青、90#基质沥青+抗剥落剂及SBS改性沥青,其中抗剥落剂掺量为沥青的1%(下同)。分别对90#基质沥青、90#基质沥青+抗剥落剂和SBS改性沥青进行全波长扫描,发现在波长287 nm处,出现最大吸收峰。所以,试验中均采用 $\lambda_{\max}=287\text{ nm}$ 。配制4个已知质量浓度为0.004 g/L、0.008 g/L、0.012 g/L、0.016 g/L的沥青-甲苯溶液,利用UV-2550分别测定其光密度,绘制曲线如图4所示。



图3 紫外分光光度计

Figure 3 Ultraviolet spectrophotometer

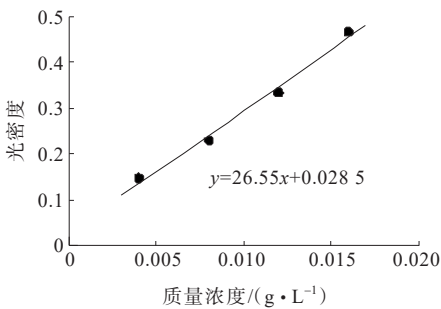


图4 287 nm 波长沥青-甲苯溶液标准曲线

Figure 4 Standard curve of 287 nm wavelength asphalt-toluene solution

2.2 剥落率的测定及结果分析

2.36~4.75 mm 集料洗净烘干至恒重,冷却15 min后备用。取质量浓度0.04 g/L的沥青-甲苯溶液2 mL后加入8 mL甲苯稀释,确定最大吸收波长 λ_{\max} ,测定其光密度 A_{α} ;取10 g烘干集料,加入盛有100 mL

的0.04 g/L 沥青-甲苯溶液的容量瓶中,在恒温25 ℃条件下,振荡6 h后取2 mL溶液,加入8 mL甲苯稀释至10 mL后测定其光密度 A_{β} ;然后再向容量瓶中加入2 mL水,振荡2 h后,取2 mL重复上述步骤稀释至10 mL,测定其光密度 A_{γ} 。

起始沥青吸附量的计算公式:

$$W_a = \frac{A_{\alpha} - A_{\beta}}{\epsilon \times l} \times V_0$$
 (1)

水置换(剥离)后吸附量的计算公式:

$$W_b = \frac{A_{\alpha} - A_{\gamma}}{\epsilon \times l} \times V_1$$
 (2)

剥落率的计算公式:

$$R_s = \frac{W_a - W_b}{W_a} = 1 - \frac{A_{\alpha} - A_{\gamma}}{A_{\alpha} - A_{\beta}} \times \frac{V_1}{V_0}$$
 (3)

式中: V_0 为沥青-甲苯溶液的体积100 mL; V_1 为水置换后沥青-水-甲苯溶液的体积98 mL; ϵ 为摩尔吸光系数; l 为石英比色皿宽度。

得到不同岩石与90#基质沥青、90#基质沥青+抗剥落剂(外掺1%)、SBS改性沥青的剥落率如表7所示。

表7 不同岩石与90#基质沥青、90#基质沥青+抗剥落剂(外掺1%)、SBS改性沥青的剥落率

Table 7 Stripping rates of different rocks and 90# matrix asphalt, 90# matrix asphalt+anti-stripping agent (external addition 1%), and SBS modified asphalt

沥青类型	岩石类型	A_{α}	A_{β}	A_{γ}	剥落率
90#基质沥青	石灰岩	0.221	0.209	0.210	0.102
	红砂岩	0.226	0.203	0.216	0.574
	青砂岩	0.218	0.182	0.207	0.701
90#基质沥青+ 抗剥落剂	红砂岩	0.219	0.198	0.202	0.207
	青砂岩	0.223	0.184	0.201	0.447
SBS改性沥青	石灰岩	0.229	0.216	0.216	0.020
	红砂岩	0.221	0.189	0.195	0.204
	青砂岩	0.216	0.183	0.199	0.495

由表7可以得出:对于基质沥青,石灰岩剥落率为10.2%,红砂岩和青砂岩剥落率分别为57.4%和70.1%;对于SBS改性沥青,石灰岩剥落率为2%,红砂岩和青砂岩剥落率分别为20.4%和49.5%。对于基质沥青添加1%抗剥落剂后,红砂岩和青砂岩剥落率分别为20.7%和44.7%,表明添加1%抗剥落剂后,两种不同砂岩与沥青的黏附性均可明显提升,抗剥落率可降低30%左右。

3 砂岩沥青混合料的高低温及水稳定性能

集料采用红砂岩、石灰岩、青砂岩 3 种,结合料采用 SBS 改性沥青、90[#]基质沥青、90[#]基质沥青+抗剥落剂(外掺 1%) 3 种;级配类型采用 AC-13C 和 AC-20C。

3.1 高温稳定性能

在夏季高温和重复行车荷载作用下,具有黏弹塑性的沥青混合料材料会产生永久性变形,进而导致公路沥青路面车辙等病害,影响行车安全性和舒适性,本次采用车辙试验评价不同集料沥青混合料的高温稳定性。车辙试验按照现行规范 T0719—2011 试验方法进行,每种沥青混合料成型 3 个试件,测试结果变异系数不大于 20%,混合料动稳定度检测结果如图 5 所示。

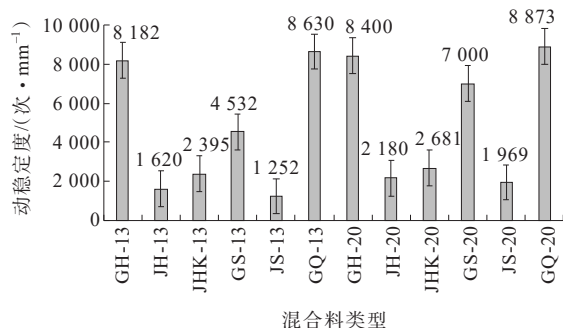


图 5 沥青混合料动稳定度对比

Figure 5 Comparison of dynamic stability of asphalt mixture

由图 5 可知:

(1) 各类沥青混合料动稳定度均满足夏炎热区沥青混合料规范^[20]要求,说明该类砂岩可用于沥青路面面层。

(2) 在动稳定度指标表现方面,改性沥青混合料显著优于基质沥青混合料;AC-20C 混合料优于 AC-13C。

(3) 在动稳定度指标方面,砂岩明显优于石灰岩;红砂岩沥青混合料在添加抗剥落剂后,动稳定度明显提高,其中对于 AC-13 混合料提高约 47%, AC-20C 混合料提高约 22%。

(4) 动稳定度指标优劣排序如下,AC-13C 沥青混合料:GQ-13>GH-13>GS-13>JHK-13>JH-13>JS-13;AC-20C 沥青混合料:GQ-20>GH-20>GS-20>

JHK-20>JH-20>JS-20。

3.2 低温抗裂性能

公路沥青路面在每天温度变化和每年不同季节温度变化下会产生温度应力,尤其冬季温度骤降,产生较强的温度收缩应力。在反复的温缩应力下,沥青混合料会产生温度疲劳裂缝,进而导致一系列路面病害。本次研究不同沥青混合料的低温性能采用低温弯曲试验。每种类型切割 4 个小梁弯曲试件按照现行规范 T0715—2011 进行试验,混合料低温弯曲破坏应变结果如图 6 所示。

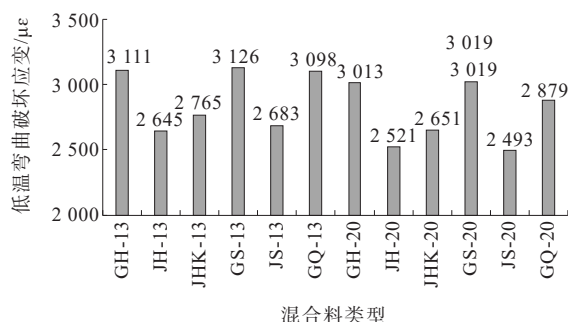


图 6 沥青混合料低温弯曲试验破坏应变对比

Figure 6 Comparison of failure strain of asphalt mixture in low temperature bending test

由图 6 可知:

(1) 各类沥青混合料的低温性能指标均满足现行规范冬寒区的要求。

(2) 在使用同种沥青情况下,采用砂岩或石灰岩组成的混合料低温弯曲指标相差不大。

(3) 红砂岩的沥青混合料在添加抗剥落剂(外掺 1%)后低温弯曲指标会有一定提高,表明添加抗剥落剂可以提高其低温性能,但整体对其影响较小。

3.3 水稳定性能

在水汽的不断侵蚀下,沥青与集料的黏结性不断下降,进而会导致沥青混合料松散,加之车辆行驶作用会在道路表面形成不同程度的坑槽,最终造成路面水损坏。中国高等级公路有效服务时间普遍达不到设计使用年限,其中水损坏是造成沥青路面早期损坏的主要原因之一。本次试验采用浸水马歇尔试验(T0709—2011)以及冻融劈裂试验(T0729—2000)评价沥青混合料水稳定性能,每种类型试验成型 16 个马歇尔试件,试验结果如图 7、8 所示。

由图 7、8 可知:

(1) 同种沥青条件下,在残留稳定性和残留强度

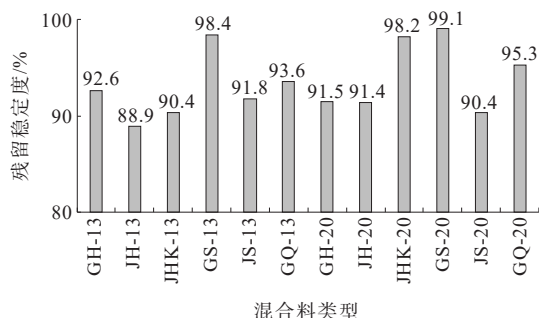


图7 沥青混合料浸水马歇尔试验残留稳定度

Figure 7 Residual stability of asphalt mixture in water immersion Marshall test

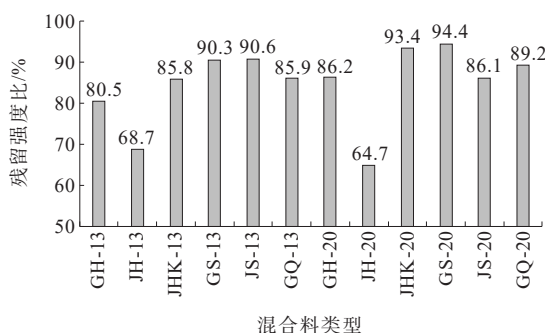


图8 沥青混合料冻融劈裂试验的残留强度比

Figure 8 Residual strength ratio of asphalt mixture in freeze-thaw splitting test

比指标方面,砂岩沥青混合料显著低于石灰岩,其中基质沥青的红砂岩混合料冻融劈裂强度比不满足现行规范的最低要求值(70%)。

(2) 红砂岩基质沥青混合料在外掺1%抗剥落剂后,残留稳定度和残留强度比明显提高,增长幅度约为30%,同时均可满足现行规范的要求值(残留稳定度 $\geq 85\%$,残留强度比 $\geq 80\%$)。

(3) SBS改性沥青混合料残留稳定度比较顺序:GS-13>GQ-13>GH-13, GS-20>GQ-20>GH-20;基质沥青混合料残留稳定度比较顺序:JS-13>JHK-13>JH-13, JHK-20>JH-20>JS-20。

(4) SBS改性沥青混合料残留强度比较顺序:GS-13>GQ-13>GH-13, GS-20>GQ-20>GH-20;基质沥青混合料残留强度比较顺序:JS-13>JHK-13>JH-13, JHK-20>JS-20>JH-20。

4 结论

(1) 通过紫外分光光度法测定,砂岩与基质沥青的黏附性剥落率为55%~70%,外掺1%抗剥落剂

后,砂岩与基质沥青的剥落率可降低至20%~45%。

(2) 对于试验用红砂岩的水稳定性指标不满足现行规范的技术要求值(浸水马歇尔试验残留稳定度 $\geq 85\%$,冻融劈裂试验的残留强度比 $\geq 80\%$),但外掺1%抗剥落剂的红砂岩基质沥青混合料,残留稳定度和残留强度比显著提高,增长幅度约为30%,同时其他路用性能也均有所提高,可应用于沥青面层。

(3) 对于试验用青砂岩而言,青砂岩沥青混合料(不掺加抗剥落剂)的路用性能可满足中国规范技术要求。

参考文献:

References:

- [1] 刘黎萍,卢青兵,余颖,等.布敦岩沥青与粗集料黏附性能评价方法[J].建筑材料学报,2019,22(4):666-672.
LIU Liping, LU Qingbing, YU Ying, et al. Evaluation method of adhesion between Buton rock asphalt and coarse aggregate[J]. Journal of Building Materials, 2019, 22(4): 666-672.
- [2] 沙庆林.高速公路沥青路面早期破坏现象及预防[M].北京:人民交通出版社,2001.
SHA Qinglin. Early damage phenomenon of expressway asphalt pavement and its prevention[M]. Beijing: China Communications Press, 2001.
- [3] 杨涛.广西砂岩沥青混凝土路用性能研究[D].重庆:重庆交通大学,2018.
YANG Tao. Study on road performance of Guangxi sandstone asphalt concrete[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2018.
- [4] 袁广学,陈黎,王林均,等.废弃混凝土和砖块混合物用作柔性路面材料的弹性模量预测[J].中外公路,2022,42(1):199-205.
YUAN Guangxue, CHEN Li, WANG Linjun, et al. Elastic modulus prediction of waste concrete and brick mixture as flexible pavement materials[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2022, 42(1): 199-205.
- [5] 岳志才,陈阳,王起龙,等.寒冷地区结构物用C40砂岩碎石混凝土耐久性能研究[J].中外公路,2023,43(5):219-225.
YUE Zhicai, CHEN Yang, WANG Qilong, et al. Research on durability of C40 sandstone gravel concrete in cold areas [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2023, 43(5): 219-225.

- [6] 钱健,周琳,杨建冬,等.不同纤维改性石灰土的力学特性研究[J].中外公路,2022,42(5):203-208.
QIAN Jian, ZHOU Lin, YANG Jiandong, et al. Study on mechanical properties of lime soil modified by different fibers[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2022, 42(5): 203-208.
- [7] 彭冲.纳米偏高岭土对混凝土耐久性能的影响[J].中外公路,2022,42(3):242-247.
PENG Chong. Effect of nano-metakaolin on durability performance of concrete[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2022, 42(3): 242-247.
- [8] 河海大学《水利大辞典》编辑修订委员会.水利大辞典[M].上海:上海辞书出版社,2015.
Editorial and Revision Committee of Water Conservancy Dictionary of Hohai University. Dictionary of water conservancy[M]. Shanghai: Shanghai Dictionary Publishing House, 2015.
- [9] 朱江.岩石与地貌[M].重庆:重庆大学出版社,2014.
ZHU Jiang. A field guide to rocks & landforms[M]. Chongqing: Chongqing University Press, 2014.
- [10] 李明婷.基于表面能理论的沥青与集料粘附性研究[D].重庆:重庆交通大学,2017.
LI Mingting. Research on adhesion between asphalt and aggregate based on surface energy theory[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2017.
- [11] 陈垚宏.抗剥落剂对酸性集料沥青混合料性能的影响研究[D].重庆:重庆交通大学,2012.
CHEN Yaohong. Research of anti-stripping influence on acidic aggregate asphalt mixture performance[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2012.
- [12] 李广科.不同岩性粗集料在沥青路面中的应用[J].筑路机械与施工机械化,2019,36(12):39-45.
LI Guangke. Application of coarse aggregates with different lithology in asphalt pavement[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2019, 36(12): 39-45.
- [13] 郭明哲.高速公路采用砂岩碎石铺筑SMA沥青路面试验检测分析[J].建筑监督检测与造价,2017,10(2):51-55.
GUO Mingzhe. Test and analysis of SMA asphalt pavement with sandstone gravel paving[J]. Supervision Test and Cost of Construction, 2017, 10(2): 51-55.
- [14] 王金国.红砂岩AC-13C沥青混合料在京藏高速银川段应用研究[J].公路交通科技(应用技术版),2014,10(12):85-88.
WANG Jinguo. Study on application of red sandstone AC-13C asphalt mixture in Yinchuan section of Beijing-tibet expressway[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development (Applied Technology Edition), 2014, 10(12): 85-88.
- [15] 杨涛,郑健龙,谢博,等.凝灰岩沥青混合料高温和水稳定性性能试验研究[J].公路交通科技,2016,33(3):1-6.
YANG Tao, ZHENG Jianlong, XIE Bo, et al. Experimental research on high-temperature performance, low-temperature performance and water stability of tuff asphalt mixture[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2016, 33(3): 1-6.
- [16] 曾宪文,傅建军.砂岩粗集料用于沥青混凝土表面层的研究[J].西部交通科技,2014(8):14-18.
ZENG Xianwen, FU Jianjun. Research on the application of sandstone coarse aggregate in the surface layer of asphalt concrete[J]. Western China Communications Science & Technology, 2014(8): 14-18.
- [17] 孔令云.水界高速公路石灰岩、砂岩试验路段研究[J].公路交通技术,2008(S1):46-49.
KONG Lingyun. Study on limestone, sand stone road segment of Shuijiang-Jieshi expressway[J]. Technology of Highway and Transport, 2008(S1): 46-49.
- [18] 交通部公路科学研究所.公路工程集料试验规程:JTG E42—2005[S].北京:人民交通出版社,2005.
Highway Science Research Institute of the Ministry of Transportation. Test code for highway engineering: JTG E42—2005[S]. Beijing: China Communications Press, 2005.
- [19] 交通部公路科学研究所.公路工程沥青及沥青混合料试验规程:JTG E20—2011[S].北京:人民交通出版社,2011.
Highway Science Research Institute of the Ministry of Transportation. Test code for asphalt and asphalt mixture of highway engineering: JTG E20—2011[S]. Beijing: China Communications Press, 2011.
- [20] 交通部公路科学研究所.公路沥青路面施工技术规范 JTG F40—2004[S].北京:人民交通出版社,2004.
Highway Science Research Institute of the Ministry of Transportation. Technical specification for construction of highway asphalt pavement: JTG F40—2004[S]. Beijing: China Communications Press, 2004.