

# 汉堡车辙和 APA 车辙试验适用范围研究

杜荣耀<sup>1,2</sup>, 林有贵<sup>1,2\*</sup>

(1.广西交投科技有限公司, 广西 南宁 530000; 2.广西高速公路养护工程技术研究中心)

**摘要:**采用汉堡车辙和 APA 试验仪,成型不同集料压碎值的沥青混合料试件进行汉堡和 APA 车辙试验。试验结果显示:当集料压碎值大于 20%时,汉堡车辙试验导致集料压碎和磨耗;另外,现场取芯试验结果表明,当集料压碎值大于 20%,汉堡车辙试验结果和现场车辙不相符,而 APA 车辙试验在试验过程中未对集料产生压碎磨耗的现象,车辙试验结果和现场车辙试验深度符合。因此对于集料压碎值大于 20%沥青混合料的高温性能应采用 APA 车辙进行评价,集料压碎值小于 20%的沥青混合料可采用 APA 或汉堡车辙试验评价。

**关键词:**沥青路面;压碎值;汉堡车辙试验;APA 试验

## 1 引言

车辙是沥青路面的主要病害类型,严重影响公路的行驶舒适性和安全性,由于车辙处理方式一般是铣刨重铺,养护费用远远大于坑槽等病害的维修,因此沥青路面车辙的防治一直都是沥青路面研究的重点。车辙病害较多,一定程度上是由于现行试验规程规定的沥青混合料室内试验评价结果和现场性能相关性较差引起的。国内外众多的研究结果表明汉堡车辙试验作为一种评价沥青混合料高温抗车辙性能和水稳性能的试验方法,其评价结果与实际路用性能相关性较高,可以确保二者之间的一致性。

集料是沥青混合料的重要组成部分,占混合料整个体积 90%左右。韩雪等以沥青路面中面层为研究对象,探究了集料的压碎值、磨耗值对混合料路用性能的影响,研究结果显示集料的压碎值、磨耗值越大,沥青混合料的高温稳定性整体下降;谭积青采用沥青混合料 APA(沥青路面分析仪)车辙试验研究了压碎值分别为 23.6%和 16.3%的石灰岩和花岗岩对沥青混合料高温稳定性的影响,结果显示压碎值对试验结果没有明显的影响,采用动稳定度车辙试验评价了棱角性指标对沥青混合料稳定性的影响,结果显示棱角性指标对沥青混合料稳定性有显著影响;周焯研究了集料

针片状含量对沥青混合料抗剪强度、高温稳定性、水稳性的影响,结果表明:针片状颗粒含量对混合料性能的影响比较大,针片状颗粒容易断裂、混合料不容易压实、骨架结构的抗车辙能力下降、水稳性下降。JTG E20—2011《公路工程沥青与沥青混合料试验规程》中关于车辙试验的条文说明中提到汉堡车辙试验会导致集料破碎,影响试验结果,但未明确汉堡车辙试验适用范围。

该文采用汉堡车辙试验和 APA 试验仪,成型不同集料压碎值的沥青混合料试件进行汉堡和 APA 试验,通过分析试验结果界定汉堡车辙试验和 APA 试验评价沥青混合料高温的适用范围,以便指导汉堡车辙试验和 APA 试验。

## 2 汉堡车辙试验原材料

采用的集料主要为石灰岩、辉绿岩、闪长岩及玄武岩,其压碎值及针片状指标见表 1;细集料(粒径 $\leq 4.75$  mm)采用石灰岩轧制,砂当量为 71,矿粉采用石灰岩磨制。

沥青采用 SBS I—D 改性沥青,各项指标满足 JTG F40—2004《沥青路面施工技术规范》中技术指标的要求,沥青检测结果见表 2。

收稿日期:2019—07—23(修改稿)

基金项目:广西交通投资集团有限公司科研项目(编号:桂交科合智 2017—001 号)

作者简介:杜荣耀,男,硕士,工程师.E-mail:191604978@qq.com

\*通信作者:林有贵,男,博士,教授级高工.E-mail:lincoventry@qq.com

表 1 不同集料压碎值、针片状含量结果

集料编号	5~10 mm	10~20、10~15 mm		母材类型
	针片状/%	压碎值/%	针片状/%	
1	7.9	24.8	6.3	石灰岩
2	6.7	23.2	5.2	石灰岩
3	5.8	22.5	4.9	石灰岩
4	6.4	19.8	6.1	石灰岩
5	6.8	19.0	5.5	闪长花岗岩
6	6.3	13.8	5.1	闪长岩
7	5.6	10.0	4.4	玄武岩

3 汉堡车辙试验和 APA 试验方案

3.1 级配设计

研究采用 AC-20 级配及 AC-13 级配,而集料具有不同压碎值,沥青混合料级配设计原则是在保证马歇尔空隙率为 4%~5% 及 AC-20 的油石比为 4.3%、AC-13 的油石比为 4.8% 的前提下,级配应尽可能接近,以确保沥青混合料级配的变化和油石比对汉堡车辙试验结果的影响最小。试验共设计了 12 个级配,其中级配 1~8 为 AC-20 级配,级配 9~12 为 AC-13 级配,具体的级配见表 3。

表 2 SBS 改性沥青(I-D)技术指标

项目名称	单位	检测结果	规范要求	试验方法
针入度(25 ℃,100 g,5 s)	0.1 mm	46	40~60	T0604
针入度指数 PI		0.3	≥0	T0604
延度(5 cm/min, 5 ℃)	cm	22	≥20	T0605
软化点(环球法)	℃	76	≥60	T0606
动力黏度(135 ℃)	Pa·s	1.4	<3	T0620
闪点(TOC)	℃	280	≥230	T0611
溶解度(三氯乙烯)	%	99.86	≥99	T0607
弹性恢复(25 ℃)	%	89	≥75	T0662
表观相对密度		1.035	实测记录	T0603
离析(软化点差)	℃	0.5	≤2.5	T0661
旋转薄膜烘箱	质量损失	%	-0.201	≤±1.0
试验(163 ℃, 85 min)	针入度比	%	74	≥65
	延度(5 ℃)	cm	15	≥18

表 3 不同集料压碎值的设计级配

集料编号	级配编号	通过下列筛孔(mm)的质量百分率/%											
		26.5	19	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
1	1	100	94.2	81.3	66.7	54.1	33.3	24.1	17.2	10.9	8.3	6.9	5.2
	2	100	93.7	83.3	70.6	54.2	32.4	23.6	17.4	10.6	7.6	6.3	4.9
2	3	100	94.3	82.1	70.2	51.7	31.2	21.7	17.4	11.4	7.8	6.3	4.7
	4	100	94.0	81.3	68.9	49.9	30.2	21.9	16.5	12.7	8.6	5.5	4.3
3	5	100	92.8	80.5	70.4	53.7	31.9	24.2	20.0	14.1	11.0	8.4	6.3
	6	100	93.5	80.7	69.3	52.8	32.2	22.7	15.5	12.4	8.3	6.2	5.3
4	7	100	97.3	82.6	69.7	51.5	31.7	22.7	17.4	11.1	7.8	6.3	5.0
5	8	100	95.6	78.5	65.5	50.8	29.6	18.3	13.9	9.9	7.4	6.0	4.8
6	9	100	100	99.8	97.3	69.8	36.3	27.2	20.8	14.3	9.7	6.2	5.0
	10	100	100	99.8	97.2	68.5	32.6	24.4	18.6	12.8	8.6	5.5	4.2
7	11	100	100	100	96.3	71.0	36.5	25.1	18.1	12.6	9.5	7.8	6.0
	12	100	100	100	98.5	74.2	37.2	25.3	18.7	12.6	9.1	7.4	5.8

不同集料、不同级配马歇尔空隙率检测结果如表 4 所示。

表 4 不同集料、不同级配马歇尔空隙率测试结果

集料 编号	级配 编号	油石 比/%	毛体积相 对密度	理论最大 相对密度	空隙率/ %
1	1	4.3	2.426	2.549	4.8
	2	4.3	2.433	2.549	4.5
2	3	4.3	2.462	2.571	4.2
	4	4.3	2.444	2.568	4.8
3	5	4.3	2.443	2.556	4.5
	6	4.3	2.438	2.558	4.7
4	7	4.3	2.461	2.577	4.5
5	8	4.3	2.502	2.619	4.5
6	9	4.8	2.506	2.617	4.2
	10	4.8	2.506	2.619	4.3
7	11	4.8	2.467	2.585	4.6
	12	4.8	2.453	2.589	5.2

3.2 试验条件

采用的试验仪器为美国产 APA 试验仪,可以进行汉堡车辙试验和 APA 车辙试验,采用凹面钢轮加压于橡胶管、而橡胶管置于试件表面即为 APA 试验,平面钢轮直接加压于试件即为汉堡车辙试验。采用的试验指标参考国际常用的标准,汉堡车辙试验的具体试验条件如下:

- (1) 试验环境:50 ℃ 恒温水浴。
- (2) 加载方式:钢轮宽度 47 mm,荷重 716.7 N,轮压约 0.7 MPa。
- (3) 加载速度:42 次/min。
- (4) 试验终止条件:碾压次数达到 20 000 次或车辙深度达到 12.5 mm。

该文采用中国国内轮碾仪成型 300 mm×300 mm×62 mm 的方形试件,控制试件空隙率为 5%~6%,然后使用 150 mm 的钻芯机钻芯取样,将试件切割成规定尺寸后进行汉堡车辙试验,试验所需时间大约为 7.5 h,试验规程详见 APA 使用手册(文献[12])。试验结束后以最终车辙深度作为汉堡车辙试验结果。

4 汉堡车辙试验结果

对不同集料压碎值、不同级配成型的沥青混凝土试件进行汉堡车辙试验,以最终车辙深度作为汉堡车辙试验结果,检测结果见表 5,其中针片状含量是按照

粗集料的掺配比例进行计算的。表 5 的级配编号也是沥青混合料编号,对应于表 3、4 的级配编号。

表 5 汉堡车辙试验结果

集料 编号	级配 编号	压碎值/ %	粗集料针片 状含量/%	汉堡车辙 深度/mm	空隙率/ %
1	1	24.8	6.3	9.701	6.0
	2		6.3	9.633	5.6
2	3	23.2	5.2	6.421	5.3
	4		5.2	5.311	5.1
3	5	22.5	4.8	5.904	5.2
	6		4.8	4.771	5.9
4	7	19.8	5.7	4.280	5.4
5	8	19.0	5.4	3.650	5.9
6	9	13.8	5.4	2.281	4.9
	10		5.5	2.248	5.7
7	11	10.0	4.7	2.686	5.1
	12		4.8	2.827	5.7

由表 5 可知:混合料 1~6(压碎值≥20%)试件表面碎石被磨耗(水浴发白有石粉漂浮)、部分粗集料破碎,而且随着压碎值增大这种现象越严重;而混合料 7~12(压碎值<20%)则无碎石磨耗和压碎现象。表明带钢轮的汉堡车辙试验适用于压碎值小于 20%的硬质集料,而不适用于压碎值大于 20%的软集料。

从汉堡车辙试验后的试件来看,当集料压碎值为 24.8%时,试件表面集料压碎磨耗严重,且汉堡车辙试验过程中部分集料被磨耗成粉状颗粒,试验用水浑浊发白、漂浮白色石粉;随着压碎值的不断减小,试件表面集料的磨耗压碎现象也逐渐减轻,当集料压碎值为 19.8%和 19%时,汉堡车辙试验完成后仅试件表面存在集料轻微磨耗的现象,未见集料压碎,当集料压碎值为 13.8%时,汉堡车辙试验后试件表面未见集料被磨耗的现象。集料压碎值表征集料的坚硬程度,汉堡车辙试验由于使用钢轮,并且运行试件时间较长,达 7.5 h,所以集料的力学特性对汉堡车辙试验结果影响较大,JTG F40—2004《沥青路面施工技术规范》对于中下面层和上面层的集料压碎值要求分别为 28%、26%,该次试验最大压碎值为 24.8%,在相近沥青混合料级配、空隙率及相同油石比的情况下集料压碎值对汉堡车辙试验结果——车辙深度产生了较大的影响。显然,当集料压碎值大于 20%时,其混合料高温性能不应采用汉堡车辙试验。

分析表 5 可知:混合料 11 和 12 为异常值应予以

剔除,车辙深度与压碎值的回归关系见图 1。

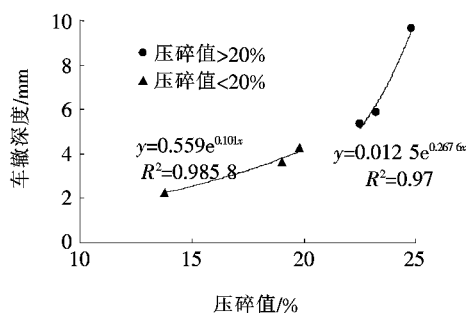


图 1 汉堡车辙深度与压碎值的关系

由图 1 可知:拟合曲线呈指数函数关系,两个回归式的相关性均大于 0.97,即高度相关。显然随着压碎值的减小,在相近级配、马歇尔空隙率及相同油石比的情况下,汉堡车辙深度不断减小。表明硬质粗碎石的棱角性发挥了作用,即压碎值越小材质越硬、粗集料棱角越不易磨损,混合料抗剪强度越高,反之粗集料压碎值越大材质越软、粗集料棱角越容易磨损,混合料抗剪强度越小。基于这一推断,可认为车辙深度的主要影响因素是混合料自身的抗剪强度,而集料磨损影响微小。由此可见,集料硬度对沥青混合料高温性能影响显著,其他条件相同时集料压碎值越小,其沥青混合料剪切强度越高,高温性能越好。

相似地,视混合料 9 和 10 为异常值予以剔除,车辙深度与针片状含量回归关系见图 2。

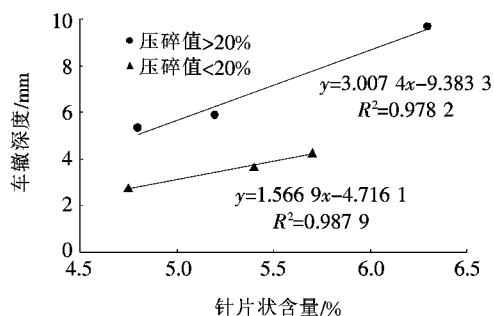


图 2 汉堡车辙深度与针片状含量的关系

由图 2 可知:① 拟合曲线呈线性函数关系,相关性大于 0.97,即高度相关。显然随着针片状含量的增加,在相近级配、马歇尔空隙率及相同油石比的情况下,汉堡车辙深度不断增加,主要原因是针片状颗粒干涉了集料颗粒排列,级配劣化,导致抗剪强度降低;② 针片状含量相同或相近时,硬质集料混合料的车辙深度明显小于软质集料混合料,一般小 2~3 mm,表明试验过程中软弱针片状颗粒容易被压碎,破碎集料劣化原级配,导致混合料抗剪强度降低,而硬质针片状颗

粒未被压碎,混合料集料保持了原级配,抗剪强度未降低。

综上可知,集料硬度对沥青混合料的抗车辙性能影响显著,工程实际中对于湿热地区(如广西地区)应尽可能采用辉绿岩、玄武岩等硬质集料,而避免采用石灰岩等软质集料。

## 5 现场芯样汉堡车辙和 APA 车辙试验

### 5.1 试验方案

研究采用 APA 车辙试验进行软集料沥青混合料抗车辙性能评价,同时还进行汉堡车辙试验,以再次验证上节结论的正确性。试验选取广西地区坛洛至百色高速公路 K690+770 下行段进行钻芯取样,该段已经通车运营 10 年,行车道右轮迹带车辙表面深度为 5 mm,中面层仅发生约 2 mm 变形。为了尽可能保证所取试样的性质接近车辙发生位置的沥青路面品质,取芯位置尽可能接近车辙发生位置但尽量避免车辙位置,所以在硬路肩标线位置取芯,采用中面层芯样分别进行汉堡车辙试验和 APA 车辙试验。施工时上面层采用辉绿岩碎石,压碎值为 12.6%;中面层和下面层为石灰岩碎石,压碎值为 25.3%。

### 5.2 试验条件

APA 沥青路面分析仪采用多功能轮辙试验仪,前身为乔治亚州轮辙试验仪,主要用于评估沥青混合料永久变形、疲劳开裂及水损,该试验采用的 APA 试验仪由美国生产,试验规程详见文献[12]。试验条件如下:

(1) 试验环境:50℃恒温水浴。

(2) 加载方式:凹形钢轮沿充气的橡胶管在试件上往复运动进行加载,胶管内压力 0.7 MPa,轮荷载 716.7 N。

(3) 试验终止条件:碾压次数达到 8 000 次或车辙深度达到 12.5 mm。

APA 试验试件为现场取芯的中面层试件,为石灰岩集料沥青混凝土,制作试件时切去上面层和多余的下面层加工成直径 150 mm、高 75 mm 的圆柱形试件。另外,对于汉堡车辙试验试件,在表面黏结了单一粒径 3~5 mm 的辉绿岩细集料,以减少钢轮对试件的磨损,然后进行汉堡车辙试验。辉绿岩粗集料压碎值为 13.2%,钢轮基本上不会对辉绿岩产生磨耗。

### 5.3 试验结果

对制作后的试件分别进行 APA 车辙试验和汉堡

车辙试验,APA试验结果:碾压8 000次后车辙深度为2.225 mm;汉堡车辙试验结果:4 374次荷载作用后中止试验,车辙深度达到12.5 mm。

实际现场沥青路面中面层未发生车辙,可见与APA车辙试验结果吻合,但是汉堡车辙试验结果却出现了与现场不符合的现象。虽然试验时在试件表面加铺了一层磨耗层,但汉堡试验钢轮仍对试件集料产生了较严重的压碎,汉堡车辙试验仅进行4 374次荷载作用车辙深度就达到12.5 mm。从试件可看出,试验后汉堡车辙试验箱内出现了集料粉尘颗粒的沉淀,这主要是由于集料压碎磨耗造成的,试验结果再次验证了汉堡车辙试验不适用于集料压碎值大于20%的混合料。APA车辙试验使用软橡胶管,和实际沥青路面运营中轮胎作用于路面原理较相似,在APA车辙试验过程中并未出现集料压碎磨耗的现象,因此APA试验适合于压碎值大于20%的软集料沥青混合料的抗车辙性能评价。

## 6 讨论

对于室内试验汉堡车辙深度的要求各个国家和地区不尽相同,德国汉堡地方规范规定,荷载作用20 000次对应的车辙深度值应不大于4 mm。美国各州之间也存在差异,如得克萨斯州、科罗拉多州、蒙大拿州等地区交通部门制定了适合本州实际情况的评价标准,汉堡车辙试验的最大车辙深度值统一规定为不大于12.5 mm,荷载作用次数根据沥青等级调整,文献[14]指出在采用HWTD评价混合料性能时,要求荷载作用20 000次对应的车辙深度值不大于20 mm。以上评价指标差别较大,经分析,其主要原因是对于不同压碎值集料均采用汉堡车辙试验,而不是根据集料压碎值选用APA试验。

对于APA车辙评价标准,美国NCHRP报告508研究采用从路面现场取芯,集料从芯样中抽提得到,选择与原有沥青相似的沥青与集料混合进行短期老化,成型车辙试件进行APA车辙试验,将APA车辙试验结果与现场车辙情况进行对比,提出了APA车辙控制标准:在交通量水平为 $30 \times 10^6$ 标准轴次及4PGSC(圆柱形试样,空隙率4%,PG分级高温温度,标准轮胎)的试验条件下APA车辙控制标准应小于3 mm。

文献[16]检测了广西7段高速公路,现场检测车辙深度,钻芯280个,使用路面芯样进行汉堡车辙和APA车辙试验,结果表明路面无车辙或轻微车辙时,

室内汉堡或APA车辙试验深度均小于4 mm。

## 7 结论

(1) 汉堡车辙试验适用于评价集料压碎值小于20%的沥青混合料的高温性能,对于集料压碎值大于20%的沥青混合料应采用APA车辙试验评价其高温性能。

(2) 采用现场石灰岩(压碎值25.3%,中面层)集料沥青路面芯样分别进行APA车辙试验和汉堡车辙试验,APA车辙试验车辙深度为2.225 mm,预测实际路面无车辙或轻微车辙,这一预测结果与实际路面相符;而汉堡试验车辙深度为12.5 mm,预测路面产生严重车辙,显然与实际不符,再次验证汉堡车辙试验不适用于集料压碎值大于20%的沥青混合料。

(3) 集料硬度对沥青混合料的抗车辙性能影响显著,集料压碎值越低其沥青混合料抗车辙性能越好。其主要原因是软质集料易被压碎,劣化原集料级配,进而导致混合料抗剪强度降低。因此,工程实践中为提高沥青混合料抗车辙性能,应尽可能采用辉绿岩、玄武岩等硬质集料,而避免采用石灰岩等软质集料。

(4) 集料针片状颗粒不利于混合料高温性能,其含量越大混合料车辙越深,主要原因是针片状颗粒干涉集料级配,降低混合料抗剪强度。

## 参考文献:

- [1] Colorado Department of Transportation. Comparison of the Hamburg Wheel Tracking Device and the Environmental Conditioning System to Pavements of Known Stripping Performance[R],1994.
- [2] Allen L.,Cooley Jr.,Loaded Wheel Testers in the United States: State of the Practice[R],2000.
- [3] Western Research Institute. HMA Moisture Sensitivity: Past,Present & Future, Tx DOT Experiences. Moisture Damaged Symposium[R],2002.
- [4] Qing Lu,Harvey J.T.,Evaluation of Hamburg Wheel Device Test by Laboratory and Field Performance Data[C]. The 85th Annual Meeting of the Transportation Research Board.Washington D.C.: American Society of Civil Engineers (ASCE),2006.
- [5] Williams C. R.,Powell B. D.,Comparison of Laboratory Wheel-Tracking Test Results to Wes Track Performance[C]. Presented at the 78th Annual Meeting of the Transportation Research Board.Washington,D.C.: American Society of Civil Engineers (ASCE),1999.

## 改良滨海盐渍土路基填料试验研究与工程应用

巩伟<sup>1</sup>, 焦淑贤<sup>2</sup>, 汪日灯<sup>1</sup>

(1.中交机场勘察设计院有限公司, 广东 广州 510230; 2.中交第四航务工程勘察设计院有限公司)

**摘要:** 针对罗伯茨国际机场盐渍土路基溶陷、盐胀、腐蚀等病害,开展不同石灰、粉煤灰掺量下盐渍土的击实、CBR及无侧限抗压强度试验研究。结果表明:石灰掺量一定时,改良盐渍土的最佳含水率随粉煤灰掺量的增加而升高,最大干密度随粉煤灰掺量的增加而减小;改良盐渍土无龄期下CBR均在31%以上,7d龄期下CBR均高于45%,石灰掺量大于6%时,盐渍土的CBR值不升反降;盐渍土的无侧限抗压强度随龄期不断增长,粉煤灰会抑制盐渍土的早期强度,而提升盐渍土的最终强度;经工程应用验证,采用石灰、粉煤灰改良盐渍土路基切实可行。

**关键词:** 滨海盐渍土; 路基改良; CBR值; 无侧限抗压强度; 试验研究

## 1 引言

罗伯茨国际机场路基主要为盐渍土,其工程特性受温度及湿度影响较大,主要表现为难于碾压、强度较低、水稳性差。当温度或湿度变化时,盐渍土易发生盐胀,使土体表层结构破坏和疏松,造成路面溶陷、盐胀、腐蚀等病害。对于机场这种具有特殊使用要求的工程,较小的盐胀或溶陷会导致机场道面形成错台、断板等危害,严重时影响飞机飞行安全,因此,对罗伯茨机场盐渍土地基进行改良具有重要工程意义。

盐渍土是一种具有环境敏感性的特殊土,其工程性质受到广大学者及工程人员的关注,主要集中在3

个方面:①对盐渍土工程性质的影响因素进行分析。钱晓明等通过正交试验研究了压实度、含水率、含盐量及冻融循环次数对硫酸盐渍土强度特性的影响,发现盐渍土的黏聚力受上述因素影响较大,而内摩擦角变化不明显;吴亚平等研究了颗粒级配对粗粒盐渍土溶陷特性的影响,表明级配类型中粗颗粒的占比增大时,粗颗粒的骨架作用会抑制溶陷的发生,溶陷量会随之减小;②利用室内试验及理论分析等手段揭示盐渍土盐胀变形机理。张俊等发现和田地区道面出现鼓胀、错台及断板的主要原因为道面结构层中的某一层发生了盐胀;张沛然等发现盐渍土在自然气候条件下的水—热场变化特征与盐胀变形规律,表明盐渍土可分为起步发展期、稳步发展期、快速发展期及塌陷变形发展

- \*\*\*\*\*
- [6] 韩雪,杜顺成,樊军.沥青路面矿料级配优化设计研究[J].四川理工学院学报(自然科学版),2017(4).
- [7] 谭积青.粗集料形态与沥青混合料级配组成虚拟力学试验的基础方法研究[D].华南理工大学博士学位论文,2006.
- [8] 周焯.粗集料针片状颗粒含量对沥青混合料性能的影响[J].交通标准化,2011(3).
- [9] JTG E20—2011 公路工程沥青与沥青混合料试验规程[S].
- [10] TG E42—2005 公路工程集料试验规程[S].
- [11] JTG F40—2004 公路沥青路面施工技术规范[S].
- [12] PAVEMENT TECHNOLOGY INC.(PTI).ASPHALT

- PAVEMENT ANALYZER USER,S GUIDE[Z],2011.
- [13] Mohammad L.N.,Elseifi M.A.,Raghavendra A.,et al. Hamburg Wheel—Track Test Equipment Requirements and Improvements to AASHTO T324[R],2015.
- [14] Alossta A.. Evaluation of Warm Mix Asphalt Versus Conventional Hot Mix Asphalt for Field and Laboratory—Compacted Specimens[D]. Arizona State University Master's Dissertation,2011.
- [15] 沈佳,王慧.APA车辙试验方法的研究进展[J].中外公路,2016(2).
- [16] 林有贵,杜荣耀,等.基于芯样的汉堡车辙试验广西地区沥青混合料抗车辙标准研究[R],2019.

收稿日期:2019-06-27(修改稿)

作者简介:巩伟,男,硕士,助理工程师. E-mail: 2543991632@qq.com