

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2023.05.040

水基聚合物SRX级配碎石的性能评价

张平¹,张宏江²,邓荣升³

(1.中交第一公路勘察设计研究院有限公司,陕西 西安 710000;2.陕西交控产业发展集团有限公司,陕西 西安 710075;3.同济大学 土木工程学院,上海市 200092)

摘要:为探讨水基聚合物SRX(Solution Road Soilfix)级配碎石是否可以在基层中使用,该文通过室内成型试验方法,研究水基聚合物SRX级配碎石的最佳SRX用量、力学特性、水稳定性、温缩性能、高温稳定性等。结果显示:水基聚合物SRX级配碎石的最佳SRX用量建议取0.5%;SRX用量每提高0.25%, R_{CBR} (加州承载比)、抗压强度分别至少提高6.6%、9.8%;水基聚合物SRX级配碎石属于柔性基层材料;回弹模量、动稳定度随SRX用量的增加而增大;建议SRX聚合物基层在路面结构设计验算时,0.5%SRX用量的动态模量取值600~650 MPa;在-20~20℃范围内,温缩系数随着温度的升高呈先减小后增大的趋势;在-10~0℃范围内温缩系数达到最小;随着冻融循环次数、浸水时间的逐渐增大, R_{CBR} 最大降幅不超过4.8%;研究结果显示水基聚合物SRX级配碎石具有较高的回弹模量、力学强度、动稳定度、较好的水稳定性及较小的温缩系数,说明水基聚合物SRX级配碎石可以在基层中推广与使用。

关键词:水基聚合物SRX;级配碎石; R_{CBR} ;路用性能

中图分类号:U414

文献标志码:A

0 引言

半刚性基层是中国高等级道路路面基层采用的主要结构形式,但在路面使用前期,半刚性基层沥青路面在温度、湿度、荷载等因素单独或共同耦合影响下,极易引起反射裂缝、车辙、疲劳开裂等问题。虽然目前中国相关学者针对此类问题进行了深度的研究,但这些病害问题始终没有得到有效解决^[1]。近年来,国外采用的全厚式沥青路面和柔性基层沥青路面日益受到重视。然而由于受到环境、政策和建设投资的制约,全厚式沥青路面在中国的应用受到严重的影响。柔性基层中的级配碎石基层由于强度模量小、容易引发塑性变形等缺点,使其很难在中国日益增长的交通条件下得到广泛应用。

SRX聚合物材料是近年来国外研发的一种新型道路材料,它是经过不同类型压力敏感性树脂和高强抗老化树脂优化组合而成的一种新型聚合物溶液,是有别于沥青、水泥的一种新型道路材料,主要组成物质是 $-\text{[CH}_2\text{CCH}_2\text{-COOCH}_2\text{CH}_3\text{]}_n-$,该材

料可有效地预防和解决车辙、反射裂缝、疲劳开裂等问题^[2]。从2008年开始,先后在中国部分地区铺筑了水基聚合物SRX稳定材料基层试验路,如北京市东礼路、云南省德宏自治州腾陇高速清平互通立交C、D匝道、辽宁省抚顺市木柞线、新疆维吾尔自治区石河子市东七路、重庆市丰都县湛亭路等,经过几年的回访、监测、对比,均取得了明显优于同等条件下水泥稳定碎石基层的使用效果。目前中国学者对SRX聚合物材料进行了一定的研究,但研究成果较少。蒋亚军等^[3]基于垂直振动成型方法,以最大抗压强度作为强度设计指标,提出了SRX聚合物稳定碎石的骨架密实级配;何丽红等^[4]从材料自身方面对SRX聚合物溶液进行研究;范同前等^[5]对SRX聚合物稳定材料进行研究,确定SRX聚合物稳定材料的养生条件;朱洪洲等^[6]分析了不同因素对SRX聚合物稳定材料基层的强度影响规律。中国研究成果对SRX聚合物材料在中国沥青路面基层中的运用具有一定的推动作用,但水基聚合物SRX基层材料在中国目前还处于验证与研究的前期阶段。此外,中国相关学术成果大都是基于半刚性基层材料的设计指

收稿日期:2023-07-10(修改稿)

作者简介:张平,男,大学本科,高级工程师.E-mail:775177625@qq.com

标对其进行性能评价,部分试验结果相差较大。目前对于水基聚合物SRX稳定材料是属于柔性基层材料还是半刚性基层材料尚无定论。基于此,本文分别从柔性基层和半刚性基层两种设计理念出发,通过一系列室内试验对水基聚合物SRX级配碎石的性能进行评价,对水基聚合物SRX基层材料是否适用于路面基层进行验证,并为路面结构设计验算提供动态模量参考值。

1 试验材料

1.1 SRX 聚合物溶液

SRX 聚合物溶液由 Romix International Ltd 公司

生产提供,其具体物理技术指标见表1。

表1 SRX 溶液的物理技术指标

密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	固含量/%	沸点/ $^{\circ}\text{C}$	黏稠度/cps	pH
1.02	31.2	97	81.1	9

1.2 集料

粗细集料均选用广西壮族自治区东兴市生产的石灰岩,相关性能指标均可以满足规范要求。本文级配选取水基聚合物SRX公司推荐的最大粒径37.5 mm A级配^[7]以及《公路路面基层施工技术细则》(JTG/T F20—2015)中推荐的最大粒径31.5 mm的B级配(骨架密实)^[8]。两种级配设计的结果见表2。

表2 混合料设计级配

级配类型	通过下列筛孔(mm)的质量百分率/%														
	37.5	31.5	26.5	19	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075	
A	100	95	87	72.5	66.5	61	52.5	37.5	29		17	13		3.5	
B		100		77			43	27	22		11.5			1.5	

2 配合比

2.1 最佳含水率

参考《土工试验规程》(JTG E40—2007)^[9]中重型击实试验确定水基聚合物SRX级配碎石的最佳含水率、最大干密度。根据表2所示的设计级配,分别采用2%、3%、4%、5%、6% 5种不同的含水率。水基聚合物SRX用量暂取0.5%,采用重型击实方法制备 $\phi 152 \text{ mm} \times 120 \text{ mm}$ 试件进行重型击实试验。试验结果如表3所示。

表3 水基聚合物SRX级配碎石的最大干密度和最佳含水率

级配类型	最大干密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	最佳含水率/%
A	2.3	4.1
B	2.4	4.3

2.2 最佳SRX用量

R_{CBR} 、抗压强度分别是衡量常见的粒料类非整体性基层材料、无机结合料稳定类基层材料力学强度的主要指标。通过搜集查阅水基聚合物SRX材料资料及试验发现,水基聚合物SRX稳定材料具有一定整体性,且整体性效果强于级配碎石,但弱于传统的

水泥稳定类材料,所以本文对水基聚合物SRX级配碎石分别进行CBR、抗压强度试验。

采用表2所示级配和表3所示的最佳含水率,分别采用干集料质量的0%、0.25%、0.5%、0.75%、1.0%、1.25% 6种不同水基聚合物SRX用量,采用重型击实、静压成型两种方法分别制备 $\phi 152 \text{ mm} \times 120 \text{ mm}$ 、 $\phi 150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$ 试件。 $\phi 152 \text{ mm} \times 120 \text{ mm}$ 试件50 $^{\circ}\text{C}$ 烘箱养护6 d后浸水4 d进行CBR试验, $\phi 150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$ 试件50 $^{\circ}\text{C}$ 烘箱养护6 d后浸水1 d进行抗压强度试验。试验结果如图1、2所示。

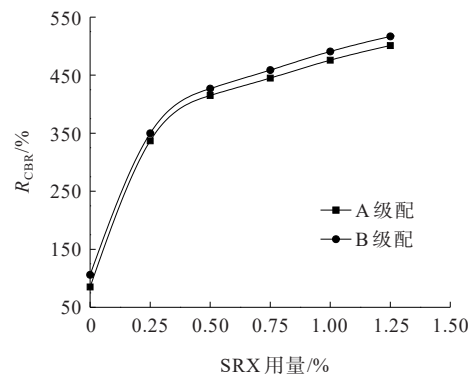


图1 SRX用量对 R_{CBR} 值的影响

从图1、2可以看出:两种级配型水基聚合物SRX碎石的 R_{CBR} 、抗压强度均随SRX用量的逐渐增加而

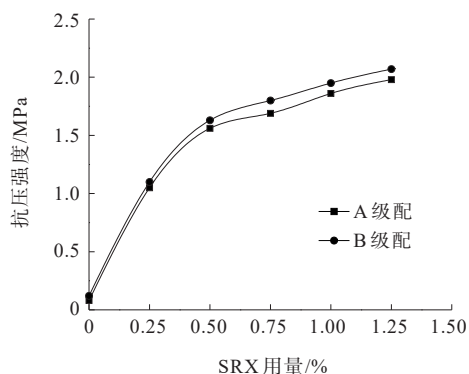


图2 SRX用量对抗压强度的影响

增大,且强度增幅均越来越小。同等条件下,B级配型的 R_{CBR} 、抗压强度均大于A级配。抗压强度和 R_{CBR} 随SRX用量的变化曲线在0~0.5%掺量范围内增幅最大,当SRX用量超过0.5%后增幅越来越缓。此外当SRX用量达到0.5%时,A、B两种级配的 R_{CBR} 较大,分别为415%、428%,但抗压强度值一般。同时考虑到道路安全性、经济性等条件,继续提高SRX用量,对 R_{CBR} 和抗压强度的提高作用已不太显著,且工程经济性较低。因此本文建议水基聚合物SRX级配碎石的最佳SRX用量取0.5%。

3 水基聚合物SRX级配碎石的路用性能

在道路使用过程中,温度、荷载、雨水等因素的长期相互作用会对道路的使用寿命产生至关重要的影响。所以对水基聚合物SRX级配碎石的路用性能评价必不可少。基于此,采用表2所示两种级配和表3所示的最佳含水率,SRX用量取0.5%、0.75%,主要从力学特性、水稳性、温缩性能、高温稳定性4个方面进行评价。

3.1 力学特性

3.1.1 力学强度

从图1、2可以看出:水基聚合物SRX级配碎石的 R_{CBR} 、抗压强度均随SRX用量的逐渐增加而增大,且强度增幅均越来越小。SRX用量每提高0.25%,其 R_{CBR} 、抗压强度分别至少提高6.6%、9.8%。当SRX用量达到0.5%时,A、B两种级配的 R_{CBR} 较大,分别为415%、428%,远大于一般级配碎石的 R_{CBR} 值。而相对于传统的水泥稳定级配碎石,其抗压强度值较小,仅为1.52 MPa、1.64 MPa,且抗压强度试件在养护过程中有部分剥落现象,说明级配碎石和

SRX聚合物充分拌和、压实成型后具有一定的整体强度,但整体性不如传统的水泥稳定级配碎石,也从侧面显示水基聚合物SRX级配碎石既有级配碎石粒料类材料的特性又有无机结合料稳定材料的整体性能。

3.1.2 回弹模量

回弹模量是衡量基层材料抗变形能力大小的重要指标,也是路面结构设计验算的主要参数。基于此,本文对水基聚合物SRX级配碎石分别进行动态三轴压缩试验、单轴压缩模量试验。

(1) 静态模量

参考《公路沥青路面设计规范》(JTG D50—2017)^[10]中测定无机结合料稳定类材料模量的试验方法,采用静压成型方法制备150 mm×150 mm试件,50℃烘箱养护6 d后在压力机上进行单轴压缩模量试验。试验结果见表4。

表4 不同SRX用量下静态模量试验结果

级配类型	SRX用量/%	静态模量/MPa
A级配	0.50	316
	0.75	352
B级配	0.50	358
	0.75	411

由表4可以看出:随着SRX用量增大,水基聚合物SRX级配碎石的静态模量逐渐提高。同等条件下,B级配型静态模量值大于A级配型。当SRX用量从0.5%增加至0.75%,静态模量至少可提高11.4%。当SRX用量为0.5%时,静态模量大于310 MPa。

(2) 动态模量

参考《公路沥青路面设计规范》(JTG D50—2017)^[10]中测定粒料类材料模量的试验方法,采用振动压实成型方法制备150 mm×300 mm试件,50℃烘箱养护6 d后在三轴试验仪上进行试验。试验结果见表5。

表5 不同SRX用量下动态模量试验结果

级配类型	SRX用量/%	动态模量/MPa
A	0.50	603
	0.75	641
B	0.50	652
	0.75	695

由表5可以看出:随着SRX用量的增大,水基聚合物SRX级配碎石的动态模量逐渐提高。同等条件

下,B级配型动态模量值大于A级配。当SRX用量从0.5%增加至0.75%,其动态模量至少可提高6.3%。当SRX用量为0.5%时,其动态模量大于600 MPa。在工程实际中,动态模量能较好反映基层材料在实际使用过程中的受力状态,所以本文建议SRX聚合物基层在路面结构设计验算时,0.5%SRX用量的动态模量值取600~650 MPa。

3.2 温缩性能

半刚性基层沥青路面在使用早期,由于半刚性基层的收缩问题导致其过早地产生反射裂缝。水基聚合物SRX级配碎石在低温条件下会产生一定的体积收缩,拉应力在低温体积收缩过程中逐渐增大,在一定的时间周期后会致基层发生温缩裂缝。因此对水基聚合物SRX级配碎石进行温缩特性评价必不可少。基于此,本文参考《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》(JTGE51—2009)^[11]中测定温缩系数的试验方法,制备150 mm×150 mm×550 mm大梁试件,50℃烘箱养护6 d后在收缩仪上进行试验。同时水泥用量采用0.5%,制备A、B两种级配的相同尺寸试件,养生7 d后进行试验。试验结果分别如图3、表6所示。

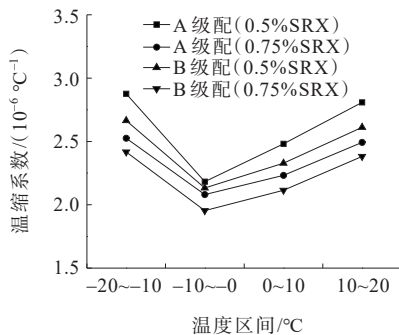


图3 不同温度范围内温缩系数的变化

表6 -20~-10℃范围内温缩系数对比

级配类型	温缩系数/($10^{-6} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$)	
	0.5%SRX	0.5%水泥
A	2.9	4.8
B	2.6	4.3

由图3可以看出:在-20~20℃范围内,随着温度的升高,水基聚合物SRX级配碎石的温缩系数呈先减小后增大的趋势。在-10~0℃范围内温缩系数达到最小,在-20~-10℃范围内温缩系数达到最大,最大值仅为 $2.9 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 。结合表6可知:在

-20~-10℃范围内,水基聚合物SRX级配碎石的温缩系数远小于传统的水泥稳定级配碎石。结果表明水基聚合物SRX级配碎石在低温条件下可抵抗收缩开裂问题。

3.3 水稳定性

水损害是影响道路使用寿命的关键因素之一,雨水通过路面空隙、层间接触等薄弱部位向面层、基层内部等继续渗透,基层材料在雨水浸泡和车辆荷载的单独或共同作用下,导致基层脱空,引发行车问题。基于此,本文主要采用冻融循环试验、浸水试验测定其 R_{CBR} ,通过 R_{CBR} 值的变化评价其水稳定性。

3.3.1 冻融循环

制备 $\phi 152 \text{ mm} \times 120 \text{ mm}$ 试件在50℃烘箱养护6 d后,冻融循环次数分别取0、10次、20次、30次、40次、50次,测定其 R_{CBR} 。其中记 $R_{\text{CBR后}}/R_{\text{CBR前}}$ 为残留强度比, $R_{\text{CBR前}}$ 为冻融循环次数为0时的 R_{CBR} , $R_{\text{CBR后}}$ 为冻融循环次数分别为10次、20次、30次、40次、50次时的 R_{CBR} 。试验结果如表7所示。

表7 冻融循环试验结果

SRX用量/%	级配	不同冻融循环次数(次)下的($R_{\text{CBR后}}/R_{\text{CBR前}}$)/%				
		10	20	30	40	50
0.50	A	99.3	98.3	97.3	96.1	95.4
	B	99.1	98.1	97.4	96.5	95.6
0.75	A	98.9	98.2	97.5	96.4	95.5
	B	98.9	98.3	97.2	96.1	95.2

从表7可以看出:随着冻融循环次数的增加,水基聚合物SRX级配碎石的 R_{CBR} 逐渐减小。冻融循环次数30次时, R_{CBR} 最大降幅为2.8%;冻融循环次数50次时, R_{CBR} 最大降幅为4.8%。

3.3.2 浸水试验

制备的 $\phi 152 \text{ mm} \times 120 \text{ mm}$ 试件在50℃烘箱养护6 d后,浸水时间分别为0、4 d、8 d、12 d,测定其 R_{CBR} 。其中记 $R_{\text{CBRd}}/R_{\text{CBR0}}$ 为残留强度比, R_{CBR0} 为浸水时间为0时的 R_{CBR} , R_{CBRd} 为浸水时间分别为4 d、8 d、12 d的 R_{CBR} 。试验结果见表8。

由表8可以看出:随着浸水时间的增加,水基聚合物SRX级配碎石的 R_{CBR} 逐渐降低。浸水时间4 d时, R_{CBR} 最大降幅为1.5%;浸水时间12 d时, R_{CBR} 最大降幅为3.1%。

表 8 浸水条件下试验结果

SRX用量/ %	级配	不同浸水时间(d)下的($R_{CBRd}/$ R_{CBR0})/%		
		4	8	12
		0.50	A	98.6
	B	98.5	97.8	97.3
0.75	A	98.8	97.7	97.0
	B	98.9	98.1	97.4

综上所述,随着冻融循环次数、浸水时间的逐渐增加,水基聚合物 SRX 级配碎石的 R_{CBR} 降低幅度均较小,最大降低幅度不超过 4.8%,其整体强度变化较小。结果显示水基聚合物 SRX 级配碎石具有较好的水稳定性。分析原因是级配碎石与 SRX 聚合物拌和、成型压实后,在级配碎石的表面形成具有一定厚度的有机膜,在浸水或冻融循环条件下使其在一定时间范围内保持良好的整体性,从而可以抵抗水损害问题。

3.4 高温稳定性

车辙是半刚性基层沥青路面面临的主要病害之一,也是影响道路使用寿命的关键因素之一。在夏季,气温较高,当基层材料高温稳定性较差时,易引发拥包、车辙、坑槽、推移等病害。所以评价水基聚合物 SRX 级配碎石的高温稳定性必不可少^[12-16]。基于此,本文参考《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG D50—2011)^[17]中车辙试验方法,试验压力采用 0.7 MPa,制备的 300 mm×300 mm×100 mm 试件在 50℃烘箱养护 6 d 后在车辙仪上进行试验。试验结果见表 9。

表 9 不同 SRX 用量下的动稳定度试验结果

级配类型	SRX用量/%	动稳定度/(次·mm ⁻¹)
A	0.50	36 539
	0.75	40 696
B	0.50	41 038
	0.75	45 352

从表 9 可以看出:随着 SRX 用量增大,水基聚合物 SRX 级配碎石的动稳定度逐渐提高。同等条件下,B 级配动稳定度值大于 A 级配。当 SRX 用量从 0.5% 增加至 0.75%,动稳定度至少可提高 11.4%。

当 SRX 用量不小于 0.5% 时,其动稳定度较大,不小于 36 000 次/mm,几乎不发生车辙病害。分析水基聚合物 SRX 级配碎石能产生如此好高温稳定性的主要原因为: $-\text{[CH}_2\text{CCH}_2\text{-COOCH}_2\text{CH}_3\text{]}_n-$ 是 SRX 聚合物的主要组成物质,该物质抵抗高温性能较好。结果说明水基聚合物 SRX 级配碎石具有较强的高温稳定性。

综上所述,水基聚合物 SRX 级配碎石试件成型效果比传统水泥稳定类材料差,试件养护过程中伴有部分剥落现象,且现场试验路钻芯取样整体性差,结合本文试验研究结果,笔者认为水基聚合物 SRX 级配碎石更倾向于柔性基层材料范畴。加入水基聚合物 SRX 溶液是对传统柔性基层材料性能的提升,但没有改变其属于柔性基层材料的性质。

4 结论

(1) 水基聚合物 SRX 级配碎石的强度随 SRX 用量的增加而增大,SRX 用量在 0~0.5% 范围内,抗压强度和 R_{CBR} 增幅最大;考虑到工程经济性与安全性等因素,建议最佳 SRX 用量采用 0.5%。

(2) SRX 用量每提高 0.25%,水基聚合物 SRX 级配碎石的 R_{CBR} 、抗压强度分别至少提高 6.6%、9.8%。

(3) 水基聚合物 SRX 级配碎石的回弹模量随 SRX 用量的增加而增大;SRX 聚合物基层在路面结构设计验算时,建议 0.5%SRX 用量的动态模量取值 600~650 MPa。

(4) 在 -20~20℃ 范围内,水基聚合物 SRX 级配碎石的温缩系数随着温度的升高呈先减小后增大的趋势;在 -10~0℃ 范围内温缩系数达到最小,在 -20~-10℃ 范围内温缩系数达到最大;水基聚合物 SRX 级配碎石在低温条件下可抵抗收缩开裂问题。

(5) 随着冻融循环次数、浸水时间的逐渐增加,水基聚合物 SRX 级配碎石的 R_{CBR} 降低幅度均较小, R_{CBR} 最大降低幅度不超过 4.8%,其整体强度变化较小;水基聚合物 SRX 级配碎石具有较好的水稳定性。

(6) 水基聚合物 SRX 级配碎石的动稳定度随着 SRX 用量增加而增大;动稳定度不小于 36 000 次/mm,

几乎不发生车辙病害;水基聚合物SRX级配碎石具有较强的的高温稳定性。

(7) 水基聚合物SRX级配碎石属于柔性基层材料。

参考文献:

- [1] 周基,蔡强,田琼. 70年中国公路路基路面病害研究现状与发展趋势:基于CNKI 1949—2019年文献的知识图谱分析[J]. 中外公路, 2020, 40(3): 60-66.
- [2] 杜洪新. SOILFIX 高分子聚合物稳定柔性基层试验研究[D]. 北京:北京建筑工程学院, 2012.
- [3] 蒋应军,张邹羿,陈浙江,等. SRX 稳定碎石骨架密实级配及路用性能[J]. 建筑材料学报, 2017, 20(2): 215-221.
- [4] 何丽红,邓稳,朱洪洲,等. SRX 水基聚合物材料性能研究[J]. 应用化工, 2020, 49(4): 881-884.
- [5] 范同前,董丁明,路光辉,等. SRX 稳定级配碎石试件的养生条件及合理掺量[J]. 土木工程与管理学报, 2020, 37(5): 57-61.
- [6] 朱洪洲,朱真景,何磊,等. SRX 聚合物稳定级配碎石强度的影响因素[J]. 公路, 2019, 64(11): 57-64.
- [7] Romix International Ltd 公司. Q/T.ROM001-2008 路用水基-聚合物(SRX-VR 系列)柔性道路结构设计标准(修订版)[S], 2010.
- [8] 交通运输部公路科学研究院. 公路路面基层施工技术细则:JTG/T F20—2015[S]. 北京:人民交通出版社股份有限公司, 2015.
- [9] 交通运输部公路科学研究院. 公路土工试验规程:JTG E40—2007[S]. 北京:人民交通出版社, 2007.
- [10] 中交路桥技术有限公司. 公路沥青路面设计规范:JTG D50—2017[S]. 北京:人民交通出版社股份有限公司, 2017.
- [11] 交通运输部公路科学研究院. 公路工程无机结合料稳定材料试验规程:JTG E51—2009[S]. 北京:人民交通出版社, 2009.
- [12] 周强. 玻璃纤维长度对不同级配沥青混合料路用性能影响研究[J]. 中外公路, 2021, 41(1): 284-289.
- [13] 查睿,赵延庆,付国志,等. 水基聚合物稳定碎石路用性能研究[J]. 中外公路, 2021, 41(3): 338-342.
- [14] 刘攀,盛兴跃,郝增恒,等. 聚合物复合改性沥青种类对浇注式沥青混合料 GA10 性能的影响[J]. 中外公路, 2022, 42(5): 167-171.
- [15] 郭广磊,孙世强,李颖,等. 钢纤维和聚合物乳液对混凝土力学性能及微观结构特征影响研究[J]. 中外公路, 2023, 43(3): 259-264.
- [16] 林有贵,栗晖,易强,等. 在役沥青路面基层地聚物注浆补强技术研究[J]. 中外公路, 2020, 40(2): 46-52.
- [17] 交通运输部公路科学研究院. 公路工程沥青与沥青混合料试验规程:JTG E20—2011[S]. 北京:人民交通出版社, 2011.