

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2023.01.010

沥青路面厂拌热再生技术使用效果分析与评价

杨彦海,崔宏,杨野,钱百通

(沈阳建筑大学 交通工程学院,辽宁 沈阳 110168)

摘要:为了评价厂拌热再生技术的实际应用效果,该文依托辽宁省厂拌热再生技术实体工程,通过测定路面芯样的体积指标、沥青含量、级配组成与强度等指标对厂拌热再生路面材料的使用状况、技术性能及施工工艺等进行分析与研究。结果表明:在中等以上交通量条件下,厂拌热再生路面材料的强度特性、高温稳定性以及低温抗裂性均能满足沥青路面的正常使用要求;厂拌热再生路面整体性能比普通热拌沥青混合料路面衰减速度更快,路面再生5~6年后将需要进行小修或中修。因此,在中等以下交通量条件下,厂拌热再生技术具有良好的实际应用效果,是实现沥青路面养护与维修可持续发展的一种有效方法。

关键词:道路工程;沥青路面;厂拌热再生技术;应用效果评价;性能衰减

中图分类号:U416.2

文献标志码:A

0 引言

沥青路面再生技术是将回收沥青路面材料(RAP)循环利用,重新铺筑成满足路用性能要求的新路面的整套技术。该技术具有废旧资源利用充分、矿料设计易于控制以及再生混合料性能良好等优势^[1-2],已经广泛应用于中国国内沥青路面的养护方案中^[3],并积累了大量工程经验。近年来,国内外学者从环境影响、施工工艺以及使用性能等方面对沥青路面厂拌热再生技术进行了全面而综合的分析与研究。沥青路面在初次铺筑以及再生过程中都将产生能耗与有害物质排放,厂拌热再生混合料在生产过程中产生的总能耗以及有害物质明显少于普通热拌沥青混合料。此外,一定范围内的RAP掺量提高能有效增强节能减排效果^[4-6],但对再生混合料的疲劳性能与抗裂性产生负面影响^[7],此时RAP加热温度的适当升高能够增强再生混合料的疲劳性能以及提高拌和效率^[8-10],添加一定量的玻璃纤维能有效抑制再生混合料的开裂行为^[11]。复合再生方式,即同时掺加不同比例的新、旧SBS改性沥青与再生剂能够显著改善再生沥青的低温性能^[9,12]。对于再生

技术的施工工艺,将再生剂与RAP先拌和完成后再与新集料和新沥青拌和,此种工艺顺序能使再生混合料更加均匀、密实^[8]。总体上,RAP、再生剂等添加量合理时,厂拌热再生沥青混合料可以满足沥青路面的水稳定性、高温稳定性、低温性能与抗老化性等性能要求^[13-14]。目前,针对厂拌热再生技术的施工工艺及路用性能等方面的研究已经取得了一定的成果,但对于实际应用效果评价研究远未成熟,限制了沥青路面再生技术的发展与应用。

本文在对辽宁省厂拌热再生技术实体工程调研的基础上,分析调研路段路面破损状况与路面整体性能衰减规律,基于室内试验,从材料组成及配比、技术特性与施工工艺角度对厂拌热再生技术实际应用效果进行综合评价与分析,以期为沥青路面养护工作提供借鉴与参考。

1 调研路段概况

1.1 厂拌热再生路段

调研路段确定的基本依据为辽宁省历年厂拌热再生工程表,参考历年路面性能评定数据选择路面性能接近平均水平的路段作为调研对象。再生调研

收稿日期:2021-11-06

基金项目:辽宁省特聘教授专项(编号:Z2218056);沈阳市城乡建设局重点研发项目(编号:SYJW2019008)

作者简介:杨彦海,男,博士,教授.E-mail:yangyanhai163@126.com

路段交通等级涵盖中到特重,公路等级为一级和二级,气候分区包括二区和三区,路龄为1~7年,再生层位主要为下面层。

1.2 非再生路段

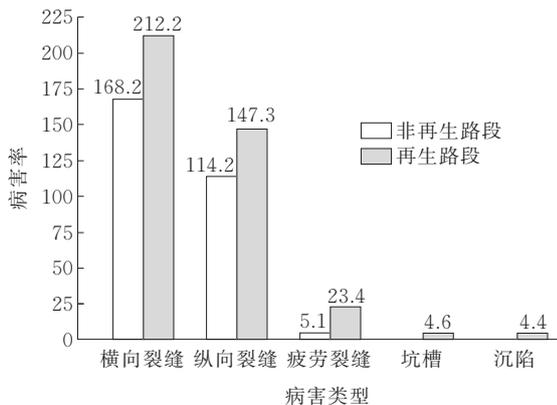
非再生路段为普通热拌沥青混合料铺筑,其交通量、交通等级、结构环境参数、路基以及基层情况等尽可能与研究路段(厂拌热再生路段)保持一致。非再生路段交通等级涵盖轻到特重,公路等级均为二级,气候分区包括一区、三区、四区,路龄为1~7年。

2 路面使用状况评价分析

针对厂拌热再生与非再生路面,从路面病害、路面内部破损以及路面整体性能衰减等方面对调研路段的使用状况进行分析与评价。

2.1 路面病害状况

在实体工程调研的基础上,对厂拌热再生及非再生调研路段的病害情况进行汇总分析,结果见图1。



注:横向、纵向裂缝病害率单位为m/km,其余病害率单位均为m²/km。

图1 调研路段路面病害汇总

由图1可知:整体上,厂拌热再生路段与非再生路段的主要路面病害类型相似。所有调研路段中,最突出的病害均为开裂,其类型主要为横向裂缝、纵向裂缝以及疲劳裂缝。厂拌热再生路段开裂情况明显比非再生路段严重,并且二者差别较大。对于坑槽及沉陷病害,所有调查路段均处于较低水平。此外,调研过程中未发现松散及波浪拥包等其他病害。

2.2 路面内部破损特征

对于沥青路面,现场芯样状态能够表征调研路

段路面内部病害特征。研究分别对路肩以及行车道处的路面进行钻芯取样,直观地分析路面结构内部病害发生的严重程度及层位,考察厂拌热再生材料的性能状态。厂拌热再生路段典型芯样特征如图2所示。

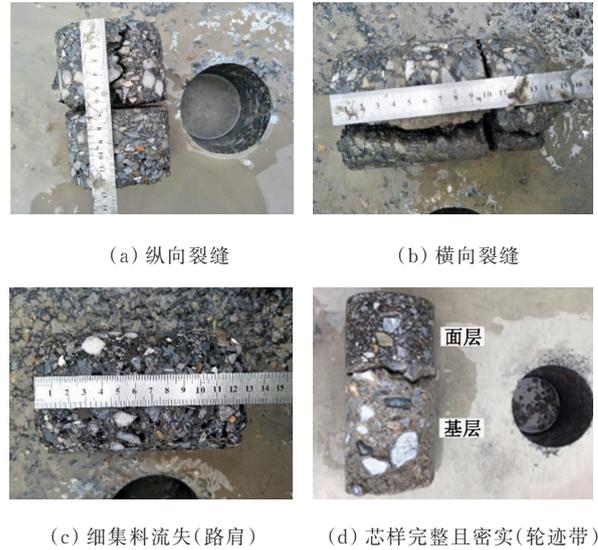


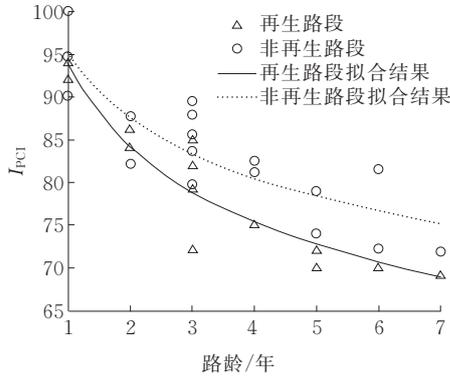
图2 厂拌热再生路段典型芯样特征

由图2可知:整体上,多数病害均集中在面层内部,基层状态良好,未见显著的结构破坏。横向裂缝一般贯穿面层,部分位置延伸至基层;在轮迹带处,纵向裂缝大多自上而下发展。最为突出的问题为部分再生层存在细料缺失、空隙较大的现象,原因在于施工温度过低,混合料压实困难,降水沿路表裂缝更易渗入结构层,在车辆荷载的反复作用下不断冲刷结构层材料,最终导致细料的缺失。对于正常施工路段,再生层内部芯样完整密实且表面光滑,整体上表现良好。同时,随着路龄增长,面层与基层的层间结合逐渐衰减,部分路段出现面层与基层分离现象。

2.3 路面整体性能衰减规律

采用幂函数拟合非再生路段与再生路段 I_{PCI} (路面状况指数)衰减趋势,并分析 I_{PCI} 衰减特征。厂拌热再生技术用于下面层时,中等以上交通量不同路段 I_{PCI} 平均值随路龄的变化趋势如图3所示。

由图3可知:应用于下面层时,厂拌热再生路面整体性能普遍低于非再生路段,并且二者具有一定差距。对于 I_{PCI} 衰减速度,再生路段大于非再生路段,但二者衰减特点较为接近。根据相关规范^[15-16]可以判断:对于非再生路段,路龄在1~4年时, I_{PCI} 均大于

图3 I_{PCI} 衰减特征

81,属优等水平以上,路面仅进行日常维护即可;在5~7年时, I_{PCI} 逐渐降低,保持在71~80范围内,属良级水平,路面需要进行小修。对于再生路段,路龄在1~2年时, I_{PCI} 均大于81,属优等水平以上,仅需进行日常维护;在3~5年时, I_{PCI} 逐渐降低,保持在71~80范围内,属良级水平,路面需进行小修;从第6年开始,再生路面 I_{PCI} 从良级水平逐渐降低至中级水平,低于规范规定的路面维修临界值($I_{PCI}=70$)。此时,路面状况即将进入次状态,路面需要进行小修或者中修以维持沥青路面的正常使用。此外,个别再生路段在路龄为5年时, I_{PCI} 已经接近路面维修临界值,路面状况已经进入次状态。因此,在中等以上交通量条件下,厂拌热再生技术方案的路面维修时间为5~6年。

3 混合料质量评价分析

通过对不同路段的芯样进行室内试验,可直接获取路面材料在实际应用状态下的材料参数实测值,主要包括:混合料的体积指标、矿料级配、沥青含量以及力学参数。将试验所得的再生混合料材料参数与规范值或非再生混合料材料参数对比,从高温、低温和常温等方面评价实体工程中厂拌热再生材料的性能。

3.1 体积指标

对调研路段行车道与路肩位置钻芯取样,分别进行毛体积相对密度试验与理论最大相对密度试验^[17],测试结果如表1所示。

由表1可知:厂拌热再生路段路肩与行车道空隙率分别为10.6%和8.4%,而非再生路段路肩与行车道空隙率分别为7.0%和6.3%,再生路段空隙率大于

表1 厂拌热再生和非再生路段芯样体积指标

取芯位置		毛体积相对密度	理论最大相对密度	空隙率/%
再生路段	行车道	2.389	2.554	8.4
	路肩	2.282	2.553	10.6
非再生路段	行车道	2.393	2.557	6.3
	路肩	2.379	2.558	7.0

非再生路段。与辽宁省地方标准^[18]中的规范值(3%~5%)相比,再生路段与非再生路段的空隙率总体上偏大,其原因在于施工温度过低,混合料未得到充分压实。此外,无论是再生路段还是非再生路段,行车道毛体积相对密度均大于路肩毛体积相对密度,相应的行车道空隙率均小于路肩空隙率,说明车辆荷载对行车道产生了显著的压密作用。

3.2 沥青含量与级配组成

根据相关规范^[19],采用燃烧炉法测定再生混合料的沥青含量,不同路段沥青含量如图4、5所示。

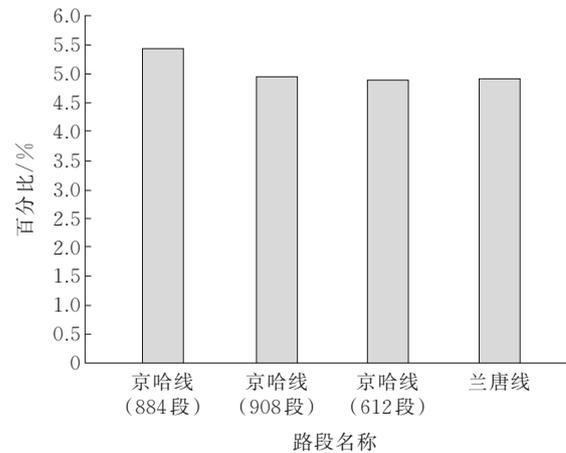


图4 厂拌热再生路段油石比

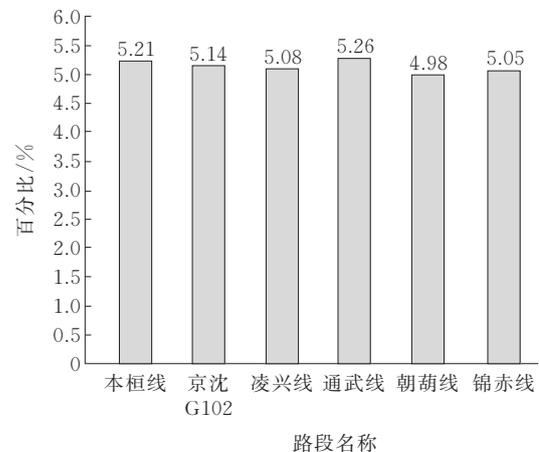


图5 非再生路段油石比

由图4、5可知:总体上,厂拌热再生路段和非再生路段的油石比分别为4.90%~5.44%、4.98%~5.26%,二者油石比相差不大,沥青含量相对稳定,用量较为合理。再生和非再生混合料油石比平均值分别为4.80%、5.12%,即再生路段的油石比普遍比非再生路段偏小,这也是造成再生路段整体性能低于非再生路段的原因之一。

根据相关规范^[19],通过将燃烧后的混合料进行筛分获得其级配组成,部分路段级配曲线如图6所示。

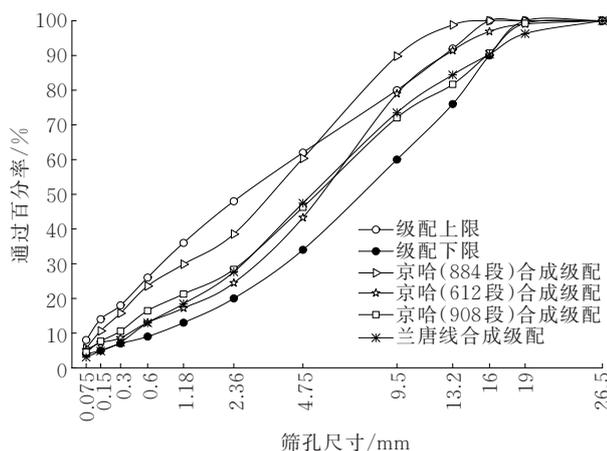


图6 部分再生路段级配曲线

图6中,再生路段的级配上下限取自《沥青路面厂拌热再生技术指南》(DB 21T 1847—2010)^[18]的下面层设计要求。由图6可知:大部分再生路段的集料通过百分率与规范值相差不大,说明再生技术的级配控制良好。个别路段合成级配曲线超出级配范围,如京哈(884段)较大粒径的筛孔通过率超过级配设计上限,造成这种现象的主要原因是取芯过程中粗集料被切割或者车辆荷载作用使得粗集料破碎,级配显著变细,进而导致筛孔通过率变大。

3.3 高温贯入强度

采用单轴贯入强度试验^[20]得到的高温贯入强度来衡量厂拌热再生路面高温稳定性。将试件和压头一同置于温度(60±0.5)℃的烘箱中,保温5~6 h。试验过程中保持加载速率1 mm/min,选用直径为28.5 mm的小压头。试验结果如表2所示。

由表2可知:总体上,再生路段高温贯入强度大于非再生路段,但二者相差不大,主要原因为热再生混合料中含有部分老化沥青,使得混合料的抗压强度偏高。此外,不论是再生路段还是非再生路段,行车道高温贯入强度均高于路肩高温贯入强度,其原

表2 芯样单轴贯入强度试验结果

取芯位置	试件编号	高温贯入强度/MPa	平均值/MPa
再生路段	行车道	1: 0.76 2: 0.81	0.77
	路肩	1: 0.72 2: 0.68	0.69
	行车道	1: 0.71 2: 0.69	0.70
非再生路段	路肩	1: 0.68	0.68

因在于行车道经历了较多的行车碾压作用,芯样较为密实,因而强度较大。普通沥青混合料高温贯入强度规范值^[20]为0.4~0.7 MPa,相对而言,再生路段与非再生路段高温贯入强度均处于较高水平,近似为普通沥青混合料规范值的上限。因此,再生混合料的高温稳定性能够满足正常使用要求。

3.4 劈裂抗拉强度

沥青混合料劈裂试验根据相关规范^[17]进行。控制试验温度分别为常温(15℃)及低温(-10℃),劈裂试验结果如表3所示。

表3 厂拌热再生混合料劈裂试验结果

取芯位置	试件编号	低温劈裂抗拉强度/MPa	平均值/MPa	常温劈裂抗拉强度/MPa	平均值/MPa
热再生路段	1	2.94		1.00	
	2	2.61	2.79	1.09	1.62
	3	2.77		2.14	
热再生路段	4	2.84		2.25	
	路肩	1: 2.34 2: 1.63	1.99	0.88 0.64	0.76
非再生路段	1	2.95		0.92	
	2	2.58	2.92	0.86	0.98
	3	2.94		0.90	
非再生路段	4	3.22		1.23	
非再生路段	1	3.81	3.35	1.22	1.19
	2	2.89		1.16	

由表3可知:就行车道处低温劈裂抗拉强度而言,厂拌热再生路段与非再生路段相当;而对于常温劈裂抗拉强度,厂拌热再生路段显著大于非再生路段,说明在低温以及常温条件下,厂拌热再生材料能够满足沥青路面正常使用时的力学性能要求。同

时,无论是低温条件还是常温条件,厂拌热再生路段路肩处的劈裂抗拉强度显著低于行车道处,而非再生路段路肩处的劈裂抗拉强度显著大于行车道处。这种现象说明,厂拌热再生行车道经历了显著的压密作用使得强度增大,压密作用影响大于行车道的疲劳作用,导致路面强度提高;而非再生路段行车道压密效果不显著,承受较多的疲劳作用,导致路面强度降低。此外,非再生路段行车道与路肩处劈裂抗拉强度的变化规律与高温贯入强度相反,说明荷载压密作用和疲劳作用对沥青混合料不同性能的影响存在显著差异。因此,采用沥青混合料室内试验从不同力学性能、路用性能的角度评价厂拌热再生技术的实际应用效果是必要的。

4 再生技术施工工艺

4.1 典型路段施工工艺

(1) 昌图京哈线

再生混合料由RAP、新集料、新沥青和矿粉组成。旧料为铁岭市昌图县铁阜高速公路的铣刨料,新料石灰岩来源于昌图下二台,其粒径分为3档:10~20 mm、5~10 mm、石屑,沥青为盘锦A级90°道路石油沥青。混合料配合比为RAP:(10~20 mm):(5~10 mm):石屑:矿粉=28:15:32:23:2,最佳沥青用量为4.7%。再生混合料拌和采用间歇式拌和设备,拌和过程中温度控制情况为:新料180℃,旧料160℃,沥青160℃,拌和165℃,出料150℃。摊铺温度不低于130℃,采用全幅摊铺。摊铺完成后,在混合料温度不低于125℃时采用振动式压路机静压3遍,在混合料温度不低于100℃时采用振动式压路机振动压实两遍,在混合料温度不低于75℃时采用轮胎压路机压实两遍,碾压完成且待路面温度低于50℃开放交通。

(2) 锦州京哈线

再生混合料由RAP、再生剂、新集料、新沥青和矿粉组成。新添加的5档新集料粒径分别为10~20 mm、5~15 mm、5~10 mm、3~5 mm、0~3 mm,新沥青为基质沥青。配合比为RAP(0~10 mm):RAP(10~15 mm):(10~20 mm):(5~15 mm):(5~10 mm):(3~5 mm):(0~3 mm):矿粉=22:15:37:4:9:3:7:3,再生剂用量为7.0%,最佳沥青用量为

4.6%。采用间歇式拌和设备对再生混合料进行拌和,再生料的生产施工与普通热拌料相同,碾压完成且待路面温度低于50℃开放交通。

(3) 辽阳兰唐线

再生混合料由RAP、新集料和新沥青组成,其中RAP掺量为30%。旧料来自沈营线铣刨料,新料来源于辽阳小市,新沥青产自盘锦。采用间歇式拌和设备对再生混合料进行拌和,并且在拌和过程中不添加任何再生剂。再生料的生产施工方式与普通热拌料相同,碾压完成且待其表面温度低于50℃开放交通。

4.2 再生技术施工工艺评价及建议

由典型路段施工工艺可知:RAP掺量一般不超过30%;矿料分档比较明确,部分路段采用再生剂,部分路段直接掺加RAP;厂拌热再生混合料与普通热拌沥青混合料的施工工艺类似,但也存在差异。与辽宁省地方标准^[18]及相关规范^[21]相比,主要差别在于:①部分路段并未严格执行RAP料仓数量应不少于两个的分档要求;②温度控制不严格。厂拌热再生沥青混合料出厂温度、摊铺温度与压实温度均宜比普通热拌沥青混合料高5~10℃。部分路段RAP出厂温度过高,但压实温度偏低,导致再生混合料压实困难,总体上空隙率偏大,这与室内试验研究结果一致。

建议对RAP料中沥青老化程度进行严格检验,若不满足要求,则应采用再生剂;另一方面需严格按照相关标准控制拌和、摊铺与碾压温度,保证压实效果和均匀性。同时对旧料进行破碎筛分,并至少分为两档。

5 结论

(1) 厂拌热再生路面整体性能衰减速度比普通热拌沥青混合料快,但二者差距不大。在路龄为5年时,厂拌热再生路面 I_{PCI} 将接近路面维修临界值($I_{PCI}=70$);从第6年开始,路面状况逐渐进入次状态,需要进行小修或者中修。因此,厂拌热再生沥青路面在中等以上交通量条件下通车5~6年后应进行适当维修。

(2) 厂拌热再生路段行车道以及路肩处高温贯入强度平均值分别为0.77 MPa、0.69 MPa,近似为普

通沥青混合料规范值的上限。因此,厂拌热再生混合料的高温稳定性能满足沥青路面正常使用要求。

(3) 厂拌热再生路段行车道及路肩处低温劈裂抗拉强度平均值分别为 2.79 MPa、1.99 MPa,行车道及路肩处常温劈裂抗拉强度平均值分别为 1.62 MPa、0.76 MPa。厂拌热再生路段在行车道处的低温劈裂抗拉强度与非再生路段相当,而劈裂抗拉强度显著大于非再生路段,说明厂拌热再生材料能够满足沥青路面正常使用时的力学性能要求。

(4) 对于低温劈裂抗拉强度、常温劈裂抗拉强度以及高温贯入强度,厂拌热再生路段行车道处强度均大于路肩处。说明车辆荷载对混合料产生一定的压密作用,使强度提高。

参考文献:

- [1] XIAO F P, SU N Y, YAO S L, et al. Performance grades, environmental and economic investigations of reclaimed asphalt pavement materials[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 211:1299-1312.
- [2] 高莉,朱浩然,蔡海泉. 沥青路面再生技术环境效益定量评价[J]. *中外公路*, 2016, 36(4):23-27.
- [3] 杨彦海,杨野. 公路路面养护技术[M]. 沈阳:东北大学出版社,2018.
- [4] 张争奇,张苛,姚晓光,等. 厂拌热再生技术能耗与排放量化分析[J]. *江苏大学学报(自然科学版)*, 2015, 36(5): 615-620.
- [5] 毕连居,赵博,蔡海泉,等. 沥青路面热再生技术环境效益分析研究[J]. *重庆交通大学学报(自然科学版)*, 2017, 36(11):44-47.
- [6] 柴明明,李明,齐桂才,等. 就地热再生沥青路面建设期碳排放分析[J]. *公路交通科技*, 2016, 33(10): 148-151, 158.
- [7] MOON K H, FALCHETTO A C, WANG D, et al. Experimental investigation on fatigue and low temperature properties of asphalt mixtures designed with reclaimed asphalt pavement and taconite aggregate[J]. *Transportation Research Record*, 2019, 2673(3):472-484.
- [8] 王雪莲,胡林,黄晓明. 沥青路面厂拌热再生工艺关键技术研究[J]. *中外公路*, 2019, 39(1):210-214.
- [9] LIU Y, WANG H, TIGHE S L, et al. Effects of preheating conditions on performance and workability of hot in-place recycled asphalt mixtures[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 226:288-298.
- [10] 俞志龙. 厂拌热再生沥青混合料路用性能及施工工艺研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2013.
- [11] ZIARI H, ALIHA M R M, MONIRI A, et al. Crack resistance of hot mix asphalt containing different percentages of reclaimed asphalt pavement and glass fiber [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 230:117015.
- [12] 周志刚,孙宁,杨文灿,等. 厂拌热再生 SBS 改性沥青优化设计方法研究[J]. *公路交通科技*, 2017, 34(11):15-22.
- [13] 刘乐. 广西地方公路沥青路面厂拌热再生方法研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2013.
- [14] 柴子钦. 大掺量 RAP 厂拌热再生沥青混合料路用性能研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2017.
- [15] 交通部公路科学研究院. 公路沥青路面养护技术规范: JTG 5142—2019[S]. 北京:人民交通出版社股份有限公司,2019.
- [16] 交通部公路科学研究院. 公路技术状况评定标准: JTG 5210—2018[S]. 北京:人民交通出版社股份有限公司,2018.
- [17] 交通部公路科学研究院. 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.
- [18] 辽宁省交通科学研究院,辽宁省交通厅公路管理局,辽宁石油化工有限公司. 沥青路面厂拌热再生技术指南: DB 21/T 1847—2010[S]. 北京:人民交通出版社,2010.
- [19] 交通部公路科学研究院. 公路工程集料试验规程: JTG E42—2005[S]. 北京:人民交通出版社,2005.
- [20] 中交公路规划设计院. 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.
- [21] 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.