

就地热再生沥青混合料配合比设计及性能评价

姚宏达¹, 侯雷¹, 王琳², 董昭³, 徐书东^{3*}, 柳久伟³

¹山东瑞泰公路工程有限公司, 山东 滨州

²山东高速股份有限公司, 山东 济南

³山东省交通科学研究院, 山东 济南

Email: *842631849@qq.com

收稿日期: 2020年10月2日; 录用日期: 2020年10月20日; 发布日期: 2020年10月27日

摘要

针对就地热再生沥青混合料级配变异性大、不确定因素多等特点, 论文基于室内试验对就地热再生沥青混合料的再生剂合理掺量、配合比设计方法、路用性能评价等进行系统研究, 以完善就地热再生沥青混合料的配合比设计及性能评价体系。研究表明当再生剂掺量为8%时, 回收沥青关键技术指标能够恢复到原有性能; 根据就地热再生沥青混合料的材料特性, 提出应将新集料与沥青预拌再与铣刨料拌和的方式, 通过析漏指标控制预拌料的沥青用量为2.5%, 基于马歇尔试验法确定再生沥青混合料外掺沥青用量为0.6%; 基于室内试验表明, 就地热再生沥青混合料具有良好的高温性能和水稳定性, 但其低温抗裂性能较差; 依托试验路的铺筑对现场再生沥青混合料进行汉堡车辙试验, 研究表明混合料剥落点大于10,000次, 碾压20,000次的最大变形量均小于7 mm, 具有良好的水敏感性和高温抗车辙性能。

关键词

就地热再生, 沥青混合料, 配合比设计, 路用性能

Mix Proportion Design and Performance Evaluation of Hot Recycling Asphalt Mixture

Hongda Yao¹, Lei Hou¹, Lin Wang², Zhao Dong³, Shudong Xu^{3*}, Jiuwei Liu³

¹Shandong Ruitai Highway Engineering Co., Ltd., Binzhou Shandong

²Shandong Hi-Speed Company Limited, Jinan Shandong

³Shandong Transportation Research Institute, Jinan Shandong

Email: *842631849@qq.com

Received: Oct. 2nd, 2020; accepted: Oct. 20th, 2020; published: Oct. 27th, 2020

*通讯作者。

文章引用: 姚宏达, 侯雷, 王琳, 董昭, 徐书东, 柳久伟. 就地热再生沥青混合料配合比设计及性能评价[J]. 土木工程, 2020, 9(10): 1086-1098. DOI: 10.12677/hjce.2020.910113

Abstract

In view of the characteristics of *in-situ* geothermal recycled asphalt mixture, such as large variability of gradation and many uncertain factors, based on indoor test, this paper systematically studies the reasonable amount of recycled agent, mix proportion design method and road performance evaluation of *in situ* geothermal recycled asphalt mixture, so as to improve the mixture ratio design and performance evaluation system of *in situ* geothermal recycled asphalt mixture. The research shows that when the content of recycling agent is 8%, the key technical indexes of recycled asphalt can be restored to the original performance; according to the material characteristics of geothermal recycled asphalt mixture, the new aggregate and asphalt premixed and milled material should be mixed, and the asphalt content of the ready mixed material should be controlled to 2.5% through the leakage index. Based on the Marshall test method, the asphalt consumption of recycled asphalt mixture is determined. Based on the indoor test, it is found that the *in-situ* recycled asphalt mixture has good high-temperature performance and water stability, but its low-temperature crack resistance is poor; relying on the paving of the test road, the Hamburg rutting test is carried out on the recycled asphalt mixture on site, and the research shows that the maximum deformation of the mixture after 20,000 times of rolling is less than 7 mm and the stripping point of the mixture is more than 10,000 times, and the maximum deformation is less than 7 mm after 20,000 times of rolling and high temperature rutting resistance.

Keywords

Hot In-Place Recycling, Asphalt Mixture, Mix Design, Road Performance

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着我国交通事业的迅速发展,全国公路网不断完善,但由于自身设计原因及交通荷载的作用,大量沥青路面使用性能逐渐下降,陆续进入维修养护期。传统的铣刨重铺方式不仅会产生大量铣刨料,污染环境而且浪费资源,与国家提出的“资源节约型社会”发展理念相悖,由此而生的沥青路面再生技术越来越受到人们的关注。同时,交通运输部在《“十三五”公路养护管理纲要》中,明确指出2020年我国要争取实现高速公路、国省道路废旧路面材料回收率分别达到100%和98%,循环利用率分别达到95%和80%以上的目标[1][2][3]。目前废旧路面材料再利用技术主要可分为就地热再生、厂拌热再生、就地冷再生、厂拌冷再生四种,其中冷拌再生混合料性能相对较差,厂拌热再生废旧材料利用率相对较低,相比于其他再生方法,就地热再生技术具有旧路面材料利用率高,工期短、开放交通快,混合料路用性能好,投资少、效益高等独特的优势,应用前景广阔[4][5][6]。

对于沥青混合料的再生技术国内外研究学者已从混合料级配设计、路用性能评价方法、施工工艺等方面进行了深入研究,并颁布了多部规范指导再生沥青混合料的材料组成设计及施工质量控制[7],见表1。

Sabahfar、LU等通过刚度、永久变形、水稳定性等指标研究了再生剂掺量及沥青和再生剂的拌合顺序对就地热再生沥青混合料的性能影响[8][9],宋金利、张益对就地热再生沥青混合料的配合比设计方法

及施工工艺进行了研究[10],戴合理分析了就地热再生技术在处治沥青路面车辙病害方面的优势[11],Hsu基于生命周期理论分析了就地热再生沥青混合料的生态效益[12]。就地热再生材料由于铣刨料级配变异性大、不确定因素多等特点,极易出现级配设计不合理、混合料离析严重等问题,影响再生沥青混合料的路用性能。针对就地热再生沥青混合料的材料特性,论文基于室内试验,分析了再生剂掺量对回收沥青关键指标的影响规律,提出就地热再生沥青混合料的配合比设计方法,进而对其路用性能及应用效果进行评价。

Table 1. Domestic and foreign specifications for asphalt mixture recycling (Guide)

表 1. 国内外沥青混合料再生规范(指南)

时间	国家	规范
1966	前苏联	沥青混凝土废料再生利用技术的建议
1979	前苏联	旧沥青混凝土再生混合料技术准则
1981	美国	路面废料再生指南
1981	美国	沥青路面热拌再生技术手册
1981	联邦德国	热拌再生沥青混凝土施工规范
1983	美国	沥青路面冷拌再生技术手册
1983	英国	热拌再生沥青混凝土基本规范
1984	日本	路面废料再生利用技术指南
1994	联邦德国	再生沥青混凝土施工指南
2001	美国	美国沥青再生指南
2008	中国	公路沥青路面再生技术规范

2. 原材料技术指标

2.1. 铣刨料

就地热再生技术能够实现废旧铣刨料的 100%利用,铣刨料原级配对混合料性能有着重要影响。论文所用铣刨料为某市政工程路段,原路面级配为 AC-13,对铣刨料进行抽提筛分试验可知原路面级配如表 2 所示,混合料级配曲线见图 1。

Table 2. Screening test of milling material

表 2. 铣刨料筛分试验

筛孔(mm)	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075	沥青含量
抽提前(%)	100	95.1	78.6	55.9	29.8	22.3	17.7	11.7	9.3	6.3	4.3
抽提后(%)	100	96.4	83.5	62.8	45.2	36.9	22.6	17.5	13.4	10.7	
级配上限	100	100	85	68	50	38	28	20	15	8	
级配下限	100	90	68	38	24	15	10	7	5	4	

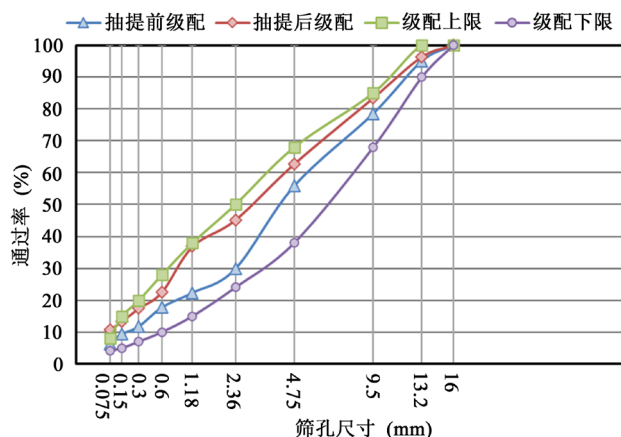


Figure 1. Grading curve of RAP

图 1. 铣刨料级配曲线

由表 2 可知, 铣刨料抽提前后级配会发生显著衰变, 主要是由于沥青的裹附作用, 使集料颗粒形成一个整体, 铣刨料级配偏粗, 对铣刨料抽提后, 细集料从粗集料颗粒表面剥离, 混合料级配发生衰变。由图 1 可知, 原路面级配偏细, 接近规范级配的上限, 其中 0.075 mm 筛孔通过率超出了规范范围, 容易导致路面发生泛油、车辙等病害。

2.2. 新集料

根据原路面筛分结果应在铣刨料中掺加适量粗骨料, 以保证混合料的高温稳定性。所用新集料为玄武岩, 其物理技术指标见表 3。

Table 3. Physical index of new aggregate

表 3. 新集料物理指标

物理技术指标	单位	技术要求	试验方法	集料规格	
				10~20	5~10
毛体积密度	g/cm ³	实测值	T 0304-2005	2.882	2.908
表观密度	g/cm ³	实测值		2.932	2.948
针片状含量	%	≤15	T 0312-2005	6.13	5.76
压碎值	%	≤26	T 0316-2005	12.08	
吸水率	%	实测值	T 0304-2005	0.65	0.86
磨耗值	%	≤28	T 0317-2005	9.76	

2.3. 回收沥青

沥青路面在服务期限内经受阳光、自然环境的作用, 沥青会发生不同程度的老化, 影响混合料的路用性能。论文通过阿布森法从铣刨料中回收旧沥青, 对其关键技术指标进行检验, 回收沥青技术指标见表 4。

Table 4. Technical index of recycled asphalt

表 4. 回收沥青技术指标

检测指标	针入度(25℃, 100g, 5s)/0.1 mm	延度(5 cm/min, 5℃)/cm	软化点(环球法)/℃	布氏粘度(135℃)/pa·s
试验结果	22	6	76	2.366

2.4. 新沥青

混合料施工过程中应加入适量新沥青，以增加混合料沥青膜厚度，保证再生沥青路面的耐久性。论文所用新沥青为 SBS 改性沥青，参照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》[13]对沥青进行相关技术指标试验，试验结果见表 5。

Table 5. Technical index of SBS modified asphalt
表 5. SBS 改性沥青技术指标

检测项目	技术要求	试验结果
针入度(25℃, 5 s, 100 g)/0.1 mm	60~80	71
延度(5 cm/min, 5℃, cm)	≥20	32
软化点(℃)	≥55	64.2
布氏粘度(135℃, Pa·s)	≤3	1.932
	质量损失(%)	≤±1.0
旋转薄膜老化试验 (163℃, 85 min)	针入度比(25℃, %)	≥60
	延度(5℃, cm)	≥20

3. 再生剂掺量

沥青老化主要是因为沥青的组分发生迁移，沥青内的溶质和溶剂参数失衡，导致沥青性能发生改变。通过在沥青中添加再生剂，使沥青的组分恢复到原有水平，可以实现沥青的再生[14][15][16]。研究表明沥青老化是因为沥青中的轻质油分受热挥发，破坏了沥青的结构硬化，改变了沥青结构的链接，导致沥青变质。通过添加再生剂，可以补充老化沥青中挥发的轻质组分，恢复沥青的原有性能。

为了确定再生剂的合理掺量，论文分别向回收沥青中添加 2%、4%、6%、8%、10%的再生剂，并分别进行相关技术指标测试，试验结果见表 6，沥青技术指标变化趋势见图 2~5。

Table 6. Technical index of recycled asphalt under different recycled agent content
表 6. 不同再生剂掺量条件下回收沥青技术指标

再生剂掺量(%)	0	2	4	6	8	10	技术要求
针入度(25℃, 100 g, 5 s)/0.1 mm	22.2	33.4	47.7	59.3	64.5	69.2	60~80
延度(5 cm/min, 5℃)/cm	6.5	11.4	20.1	26.7	33.3	37.9	≥30
软化点(环球法)/℃	76.5	73.6	69.4	67.7	64.1	62.4	≥55
布氏粘度(135℃)/pa·s	2.366	2.312	2.209	2.135	2.008	1.965	≤3

由下图可知，随再生剂掺量的增加，回收沥青针入度、延度指标逐渐增加，软化点和布氏粘度略微减小，表明添加再生剂后回收沥青的原有性能逐渐恢复，当再生剂掺量大于 8%时，满足《公路沥青路面施工技术规范》[17]对改性沥青技术指标要求，同时考虑工程经济指标，确定铣刨料再生剂掺量为 8%。

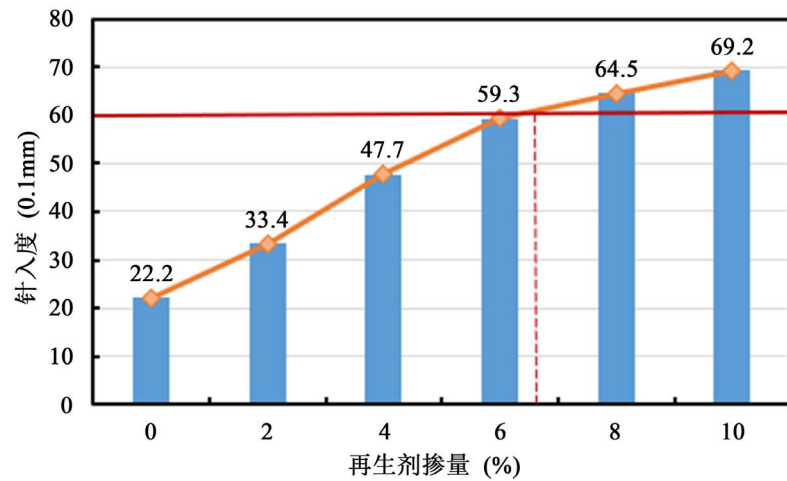


Figure 2. Variation law of penetration of recycled asphalt

图 2. 回收沥青针入度变化规律

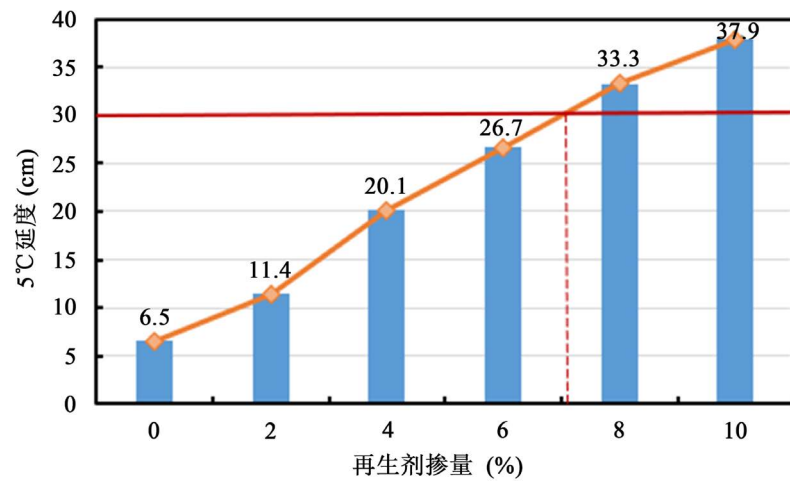


Figure 3. Variation of ductility of recycled asphalt

图 3. 回收沥青延度变化规律

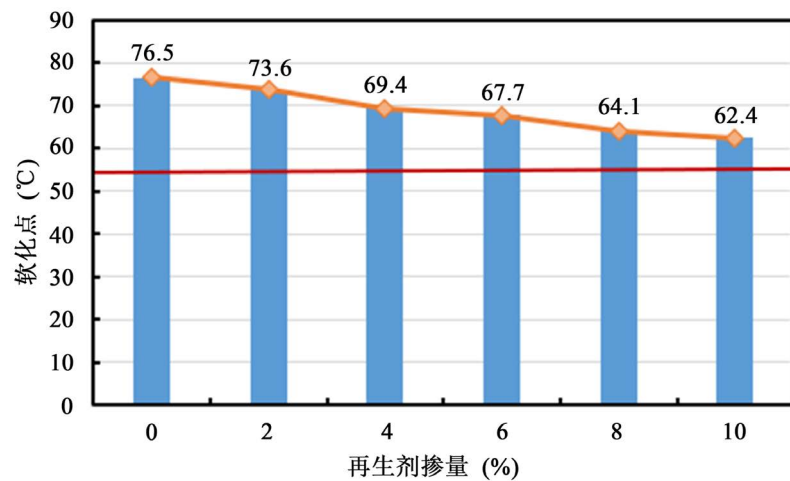


Figure 4. Variation of softening point of recycled asphalt

图 4. 回收沥青软化点变化规律

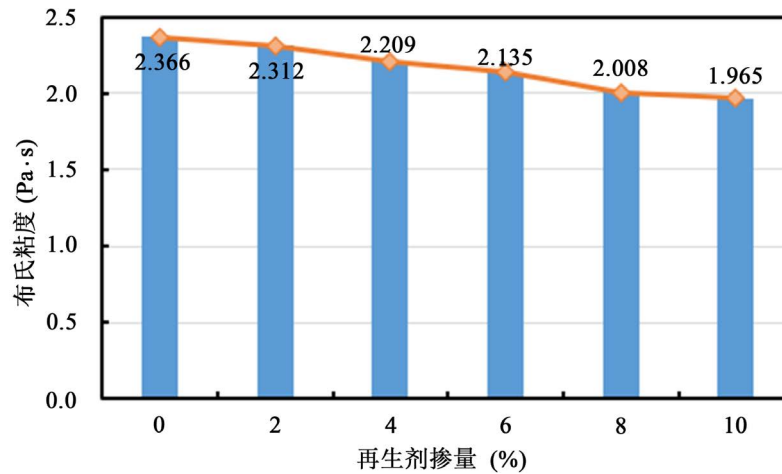


Figure 5. Variation of Brinell viscosity of recycled asphalt
图 5. 回收沥青布氏粘度变化规律

4. 就地热再生混合料配合比设计

4.1. 级配设计

铣刨料在服务期限内经受行车荷载和自然环境的作用, 集料棱角性会受到不同程度的磨损, 在铣刨料拌和过程中加入适量的新集料, 可以有效改善混合料的级配组成, 增强混合料间的摩阻力, 改善混合料性能。根据原路面铣刨料筛分结果掺入 15% 的新集料(由 10~15 mm、5~10 mm、矿粉组成)进行混合料级配设计, 确定最终合成级配如表 7 所示, 级配曲线见图 6。

4.2. 预拌料

根据就地热再生沥青混合的材料特性, 其拌和方式也区别于传统的热拌沥青混合料。就地热再生沥青混合料拌和时, 应先将新集料与沥青进行提前预拌, 然后再与铣刨料拌和, 预拌料新加沥青以混合料析漏指标控制。预拌时新集料加热温度为 185℃~190℃, 先将新集料干拌然后加入沥青湿拌, 最后加入矿粉拌合均匀, 将拌合均匀的预拌料置于 170℃~180℃ 的烘箱中保温备用。根据工程经验以 2.5% 为初定沥青用量, 以 0.3% 为间隔上下各浮动两个沥青用量进行析漏试验, 试验结果如图 7 所示。

根据《公路沥青路面施工技术规范》要求, 沥青混合料析漏不宜大于 0.1, 同时由图 7 可知, 当沥青用量为 2.5% 时, 混合料析漏损失出现拐点, 由此确定预拌料最佳沥青用量为 2.5%。

Table 7. AC-13 design grading

表 7. AC-13 设计级配

筛孔(mm)	掺量	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
新集料级配	15	99.7	81.0	45.6	6.1	4.1	4.1	4.1	4.1	3.9	3.2
RAP 料级配	85	100	96.4	83.5	62.8	45.2	36.9	22.6	17.5	13.4	10.7
合成级配	-	100	94.1	77.8	54.3	39.0	32.0	19.8	15.5	12	9.6
级配上限	-	100	100	85	68	50	38	28	20	15	8
级配下限	-	100	90	68	38	24	15	10	7	5	4

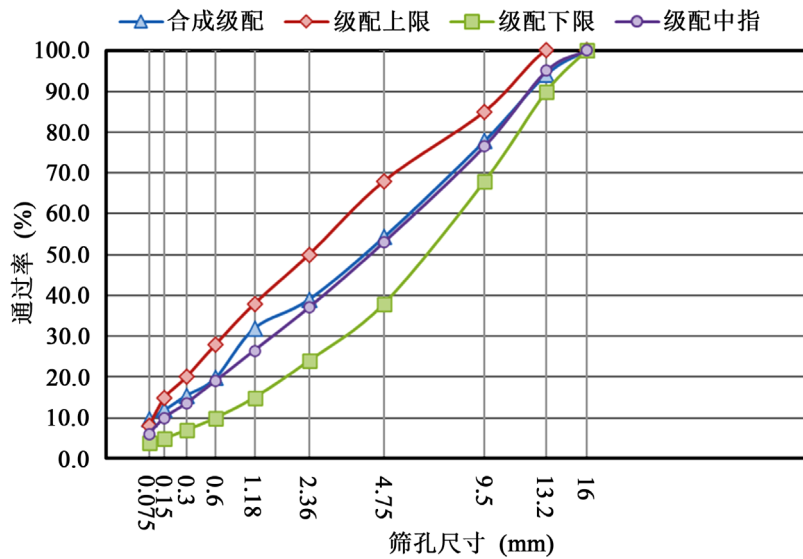


Figure 6. AC-13 design grading curve

图 6. AC-13 设计级配曲线

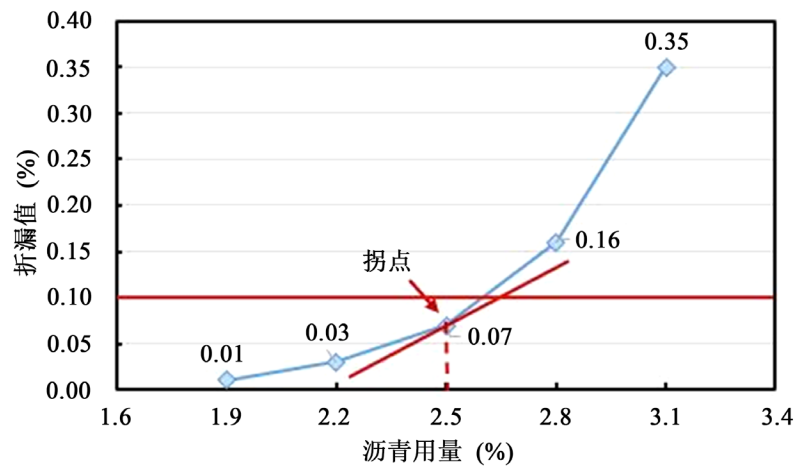


Figure 7. Drainage test of ready mixed materials

图 7. 预拌料析漏试验

4.3. 最佳沥青用量

就地热再生混合料室内成型较为繁琐,混合料成型先将铣刨料与再生剂和温拌剂拌和,基于上述研究成果再生剂掺量为铣刨料中沥青用量的 8%,温拌剂掺量为再生剂质量的 10%,拌合温度为 150℃~155℃,拌和时间为 90 s,拌合完成后应闷料 2 min,然后将保温的预拌料放入拌锅继续拌合 90s,最后加入新沥青与混合料拌和均匀。加入的新沥青以 0.6%为预估最佳沥青用量,以 0.3%为间隔上下各浮动两个沥青用量分别成型马歇尔试件,并测定其体积指标如表 8 所示,确定最佳沥青用量见图 8。

基于马歇尔试验法以目标空隙率对应的沥青用量为 OAC_1 ,以各项指标均符合技术要求的沥青用量范围中值为 OAC_2 确定就地热沥青混合料外掺最佳沥青用量为 0.6%。

5. 就地热再生混合料路用性能评价

沥青路面在服务期限内要为车辆提供优质持久的服务,要求混合料具有良好的路用性能。论文分别

对再生沥青混合料进行车辙试验、低温小梁弯曲试验、冻融劈裂试验、浸水马歇尔试验和汉堡试验以评价就地热再生沥青混合料的高温稳定性、低温抗裂性能和水稳定性。

Table 8. Volume index of mixture
表 8. 混合料体积指标

沥青用量(%)	毛体积密度(g/cm ³)	空隙率(%)	矿料间隙率(%)	饱和度(%)	稳定度(KN)	流值(mm)
0.0	2.399	6.4	15.1	57.4	12.8	2.6
0.3	2.428	5.2	15.3	66.1	13.8	3.1
0.6	2.445	4.3	15.0	71.0	14.1	3.7
0.9	2.456	3.8	15.1	74.8	13.2	4.1
1.2	2.462	3.4	15.2	77.8	12.6	4.9

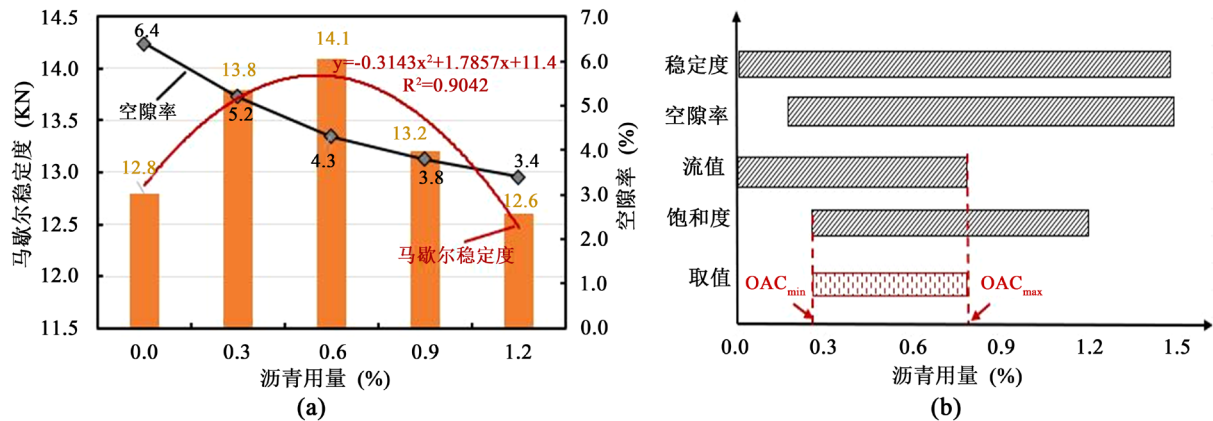


Figure 8. Determination of optimum asphalt content. (a) Asphalt content of OAC₁; (b) Asphalt content of OAC₂
图 8. 预拌料析漏试验。(a) OAC₁ 沥青用量; (b) OAC₂ 沥青用量

5.1. 高温稳定性

车辙试验通过模拟实际车轮荷载在路面行走造成沥青混合料发生塑性变形而行成车辙，被广泛用来评价沥青混合料的高温稳定性。论文在 60℃ ± 1℃，0.7 ± 0.05 MPa 的条件下对就地热再生沥青混合料进行车辙试验，试验结果如表 9 所示，混合料车辙曲线见图 9。研究表明混合料动稳定度远远高于规范规定值，具有良好的高温稳定性。

Table 9. Mixture rutting test
表 9. 混合料车辙试验

	45 min 变形(mm)	60 min 变形(mm)	动稳定度(次/mm)	变异系数	平均值(次/mm)
1	1.56	1.68	5250.0		
2	1.50	1.62	5625.0	9.12	5419.9
3	1.97	2.09	5384.6		

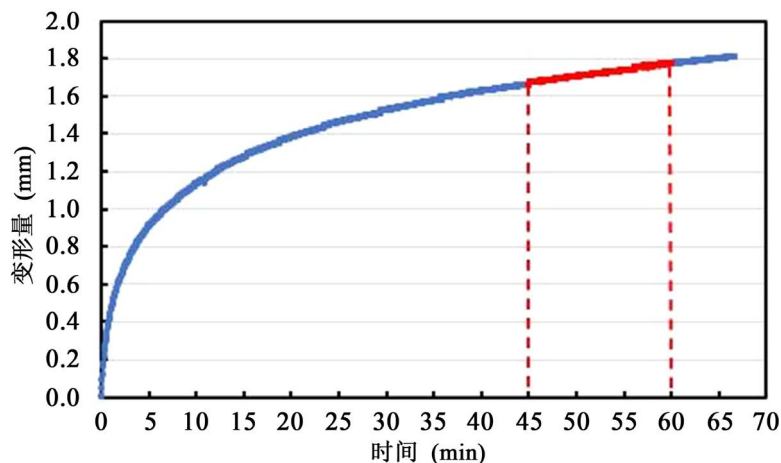


Figure 9. Curve chart of mixture rutting test

图 9. 混合料车辙试验曲线图

5.2. 水稳定性

水的存在是导致沥青路面发生病害的重要原因，水分的浸入会降低沥青与集料间的粘附性，导致集料与沥青发生剥离，从而造成松散剥落病害的发生，因此具备良好的水稳定性是保证沥青混合料发挥良好路用性能的重要评价指标。分别对就地热再生沥青混合料进行冻融劈裂试验和浸水马歇尔试验以评价混合料的水稳定性，试验结果见表 10。

Table 10. Water stability test of mixture

表 10. 混合料水稳定性试验

试验项目	冻融劈裂试验			浸水马歇尔试验		
	未冻融劈裂强度(MPa)	冻融劈裂强度(MPa)	冻融劈裂强度比(%)	未浸水劈裂强度(MPa)	浸水劈裂强度(MPa)	残留稳定度(%)
1	1.65	1.36		1.71	1.53	
2	1.56	1.27		1.68	1.49	
3	1.75	1.38	81.3	1.60	1.39	89.2
4	1.69	1.41		1.65	1.51	
平均值	1.66	1.35		1.66	1.48	
规范值	-		≥75	-		≥80

研究表明，就地热再生沥青混合料水稳定性与传统的热拌沥青混合料无异，能够较好的抵抗水损害，保证沥青路面发挥良好的路用性能。

5.3. 低温抗裂性能

沥青混合料作为一种弹塑体，在低温条件下会发生体积收缩，当材料收缩到一定程度体积不能发生继续改变则会产生温度应力，当温度应力大于材料的抗拉强度时则会产生裂缝，造成沥青路面病害。论文通过弯曲破坏试验在 -10°C 的温度环境中对小梁试件进行单点加载，从而评价混合料的低温抗裂性能，试验结果如表 11 所示，混合料低温破坏曲线如图 10 所示。研究表明就地热再生沥青混合料低温性能较差，在季节性冰冻地区易发生低温开裂病害。

Table 11. Low temperature test of mixture
表 11. 混合料低温试验

试件编号	RB 抗弯拉强度(MPa)	最大弯拉应变($\mu\epsilon$)	SB 弯曲劲度模量(MPa)
1	7.562	2456.11	3079.01
2	7.072	2112.71	3347.33
3	7.284	2421.77	3007.58
4	6.687	2224.53	3006.18
5	7.055	2523.52	2795.61
6	7.089	2479.37	2859.22
平均值	7.125	2369.67	3015.82
规范要求	-	≥ 2500	-

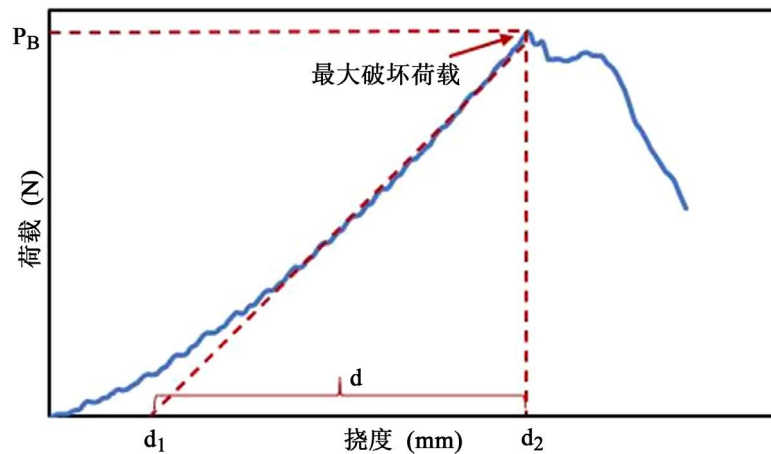


Figure 10. Low temperature bending test of mixture
图 10. 混合料低温弯曲试验

5.4. 水热稳定性

汉堡轮辙试验是目前评价沥青混合料水敏感性和抗车辙性能最苛刻的试验，被广泛用来评价沥青路面现场混合料的路用性能。汉堡轮辙试验通过计算沥青混合料的轮辙深度和变形曲线的特征可以直接判定沥青混合料的水稳定性和抗车辙性能，美国科罗拉多州交通部提出当混合料剥落点低于 10,000 次混合料水稳定性较差，当碾压 20,000 次后的最大变形大于 10 mm 混合料容易产生车辙病害。

论文基于试验路的铺筑，在试验路段随机取芯样进行汉堡车辙试验，以评价现场就地热再生沥青混合料的水稳定性及抗车辙性能，试验结果如表 12 所示，混合料汉堡车辙曲线见图 11，混合料汉堡试验前后试件对比见图 12。

Table 12. Rutting test of mixture Hamburg
表 12. 混合料汉堡车辙试验

标号	空隙率	碾压 10000 次变形量, mm	碾压 20000 次变形量, mm	拐点	备注
1#	4.52	4.14496	6.2484	16,666	AC-13
2#	4.71	3.36709	5.1387	13,333	

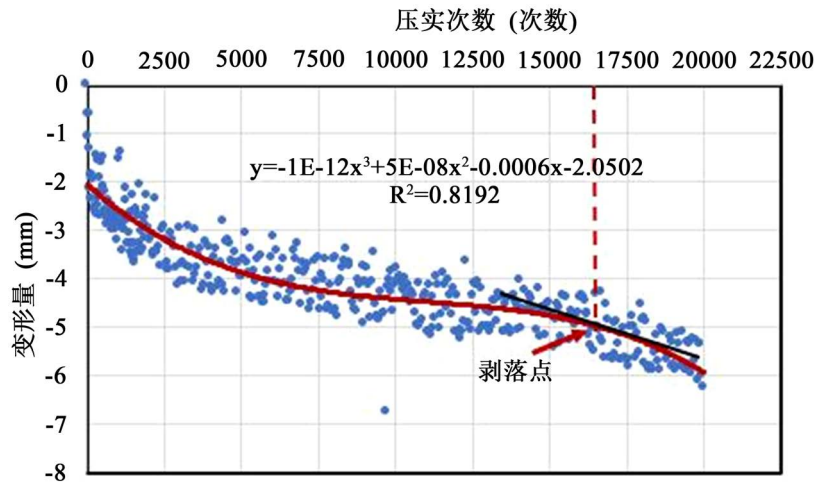


Figure 11. Curve chart of mixture Hamburg rutting test

图 11. 混合料汉堡车辙试验曲线图



Figure 12. Comparison of Hamburg rutting test before and after. (a) Hamburg rut specimen before test; (b) Hamburg rutting specimen after test

图 12. 汉堡车辙试验前后对比图。(a) 试验前汉堡车辙试件；(b) 试验后汉堡车辙试件

研究表明，现场芯样试件剥落拐点大于 10000 次，且混合料最大变形均小于 10mm，表明就地热沥青混合料具有良好的水稳定性和抗车辙性能，能够较好的满足沥青路面的性能要求。

6. 结论

1) 通过沥青三大指标试验(针入度、延度、软化点)和布氏粘度试验分析了再生剂掺量对回收沥青技术指标的影响规律，研究表明当再生剂掺量为 8%时，回收沥青能够较好到恢复到沥青原有性能。

2) 根据就地热再生沥青混合的材料特性，提出混合料应先将新集料预拌然后与再生混合料拌合的方式，通过控制混合料的析漏指标确定预拌料沥青掺量为 2.5%，基于马歇尔试验法确定再生沥青混合料外掺沥青用量为 0.6%。

3) 基于室内车辙试验、低温小梁弯曲试验、冻融劈裂试验、浸水马歇尔试验研究表明，就地热再生沥青混合料具有良好的高温性能和水稳定性，但其低温抗裂性能较差，季节性冰冻地区易发生低温开裂病害。

4) 依托试验路的铺筑, 通过汉堡车辙试验对试验路芯样的水稳定和抗车辙性能进行验证, 就地热再生混合料的剥落点大于 10,000 次, 碾压 20,000 次后的最大变形量小于 10 mm, 表明就地热再生沥青混合料具有良好的水稳定性和高温抗车辙性能。

参考文献

- [1] 郭平, 李艳, 马庆伟. 加铺型就地热再生沥青混合料的配合比设计与路用性能研究[J]. 筑路机械与施工机械化, 2015, 32(10): 67-69+73.
- [2] 张娟, 郭云锋, 郭平. 就地热再生沥青混合料配合比设计研究[J]. 石油沥青, 2015, 29(4): 25-28.
- [3] 姚彪, 师阳. 就地热再生沥青混合料配合比优化设计[J]. 兰州工业学院学报, 2019, 26(4): 40-46.
- [4] 胡宗文, 孙宏伟, 马士杰. SBS 改性沥青 SMA 混合料的路用性能研究[J]. 公路交通科技, 2012, 29(12): 29-34.
- [5] 黄艳. 就地热再生技术在 SMA-13 路面中的应用研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆交通大学, 2019.
- [6] 仰建岗, 姚玉权, 孙晨. 不同工况对就地热再生沥青混合料性能的影响[J]. 公路交通科技, 2019(10): 12-24.
- [7] 甄龙年. 就地热再生技术在老化沥青路面中的应用研究[D]: [硕士学位论文]. 秦皇岛: 燕山大学, 2017.
- [8] Sabahfar, N. (2016) Effect of Asphalt Rejuvenating Agent on Aged Reclaimed Asphalt Pavement and Binder Properties. Kansas State University, Manhattan.
- [9] Hafeez, I., Ozer, H. and Al-Qadi, I.L. (2014) Performance Characterization of Hot In-Place Recycled Asphalt Mixtures. *Journal of Transportation Engineering*, **140**, 1-9. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)TE.1943-5436.0000679](https://doi.org/10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000679)
- [10] 张威地. 就地热再生沥青混合料路用性能及其耐久性研究[D]: [硕士学位论文]. 苏州: 苏州科技大学, 2019.
- [11] 苏卫国, 庄旭青, 伍勇辉. 沥青路面就地热再生加热影响因素实验分析[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2019, 44(3): 821-833.
- [12] Fakhri, M. and Amoosoltani, E. (2017) The Effect of Reclaimed Asphalt Pavement and Crumb Rubber on Mechanical Properties of Roller Compacted Concrete Pavement. *Construction and Building Materials*, **137**, 470-484. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.01.136>
- [13] 李福普, 李闯民, 编. JTGE20-2011 公路工程沥青及沥青混合料试验工程[S]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
- [14] 彭齐腾. 就地热再生沥青再生剂研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆交通大学, 2018.
- [15] 刘琳, 高及阳. 就地热再生路面中再生沥青的研究[J]. 公路工程, 2011, 36(3): 38-41+53.
- [16] Sultan, S.A. and Guo, Z.Y. (2016) Evaluating the Performance of Sustainable Perpetual Pavements Using Recycled Asphalt Pavement in China. *International Journal of Transportation Science and Technology*, **5**, 200-209. <https://doi.org/10.1016/j.ijtst.2017.01.001>
- [17] 中华人民共和国交通部. JTGF40-2004 公路沥青路面施工技术规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.