

再生沥青混合料级配组成设计 以及路用性能研究

姜维亮¹, 汲平², 王鑫洋², 李沛钊^{3*}

¹山东高速集团有限公司建设管理分公司, 山东 济南

²山东高速工程检测有限公司, 山东 济南

³山东大学, 山东 济南

Email: *844746446@qq.com

收稿日期: 2021年5月2日; 录用日期: 2021年5月16日; 发布日期: 2021年5月28日

摘要

废旧沥青混合料(RAP)回收利用是近年来沥青路面可持续发展和经济有效发展的热点问题。通过使用合适的再生剂可以恢复铣刨料中旧沥青的高低温流变性能和力学性能。本文通过用自主开发的再生剂与市售再生剂制备再生沥青混合料并进行车辙试验、低温弯曲试验、浸水马歇尔试验、冻融劈裂试验和四点弯曲疲劳试验对再生沥青混合料的高低温性能、水稳定性、疲劳性能进行评价。试验结果表明所研制的再生剂能较好地恢复铣刨料的路用性能。在铣刨料中掺入自主研发的再生剂会降低混合料的动稳定度, 提高沥青混合料的最大弯拉应变、残留稳定性和冻融劈裂强度比, 这说明自主研发的再生剂改善了铣刨料中旧沥青的流变性能, 同时再生沥青混合料的耐久性也得到了较大改良。与所选的市售再生剂相比, 使用自主研发的再生剂能改善再生沥青混合料的路面性能。

关键词

沥青, 老化, 再生剂, 再生沥青混合料, 路用性能

Study on Gradation Composition Design and Road Performance of Recycled Asphalt Mixture

Weiliang Jiang¹, Ping Ji², Xinyang Wang², Peizhao Li^{3*}

¹Shandong High Speed Group Co., Ltd. Construction Management Branch, Jinan Shandong

²Shandong High Speed Engineering Testing Co., Ltd., Jinan Shandong

³Shandong University, Jinan Shandong

Email: *844746446@qq.com

*通讯作者。

Received: May 2nd, 2021; accepted: May 16th, 2021; published: May 28th, 2021

Abstract

Recycling of waste asphalt mixture (RAP) is a hot issue in sustainable and economic development of asphalt pavement in recent years. The high and low temperature rheological properties and mechanical properties of the old asphalt in milling materials can be restored by using appropriate regenerating agents. In this paper, the high and low temperature performance, water stability and fatigue performance of recycled asphalt mixture were evaluated through rutting test, low temperature bending test, soaking Marshall test, freeze-thaw splitting test and four-point bending fatigue test. The test results show that the regenerating agent developed can better restore the road performance of milling material. Incorporating a self-developed regenerant into the milling material will reduce the dynamic stability of the mixture and increase the maximum flexural strain, residual stability and freeze-thaw splitting strength ratio of the asphalt mixture. This shows that the self-developed regenerant has improved the rheological properties of the old asphalt in the milling material, and the durability of the recycled asphalt mixture has also been greatly improved. Compared with the selected commercial recyclers, the self-developed recyclers can improve the pavement performance of recycled asphalt mixture.

Keywords

Asphalt, Aging, Rejuvenator, Recycled Asphalt Mixture, Road Performance

Copyright © 2021 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

热拌沥青混合料是由集料、矿粉和沥青搅拌混合而成的一种主要的路面铺装材料[1]。随着工业化和城市化的快速发展,越来越多的公路急需养护与维修。沥青路面随着服役时间的增长,铣刨料中的旧沥青逐渐发生老化并最终失去路用性能[2]。为保证道路正常的通行能力,需要对老化的废旧沥青路面进行铣刨并重新铺设路面材料。铣刨产生的废旧沥青混合料(RAP)可以按照适当地添加比例并通过一定的再生工艺重复利用。相关研究表明再生沥青混合料与新拌沥青混合料相比老化速度更快,因此再生沥青混合料主要应用在道路基层、路肩和农村道路上。在以可持续发展为导向的政策引领下,铣刨料的再利用可以降低成本以及保护环境[3]。

由于使用时间长,RAP中的沥青已经高度老化,沥青中轻质组分含量降低并导致沥青混合料的刚度提高,最终导致沥青混合料的脆性。在制备再生沥青混合料过程中,RAP利用比例越高产生的经济效益便会越高[4]。但是在再生沥青混合料中,老化沥青含量过高会对混合料低温性能、水稳定性、疲劳性能等产生不利的影响[5]。因此,为了提高再生沥青混合料中RAP材料的用量,在制备再生沥青混合料过程中加入再生剂,可以保证再生沥青混合料的性能恢复到新拌沥青混合料性能相当的水平。在某些情况下,再生剂也被称为软化剂,它通常含有较高比例的轻质组分,可以有效地补充老化沥青中缺失的轻质组分并恢复老化沥青的路用性能[6]。

虽然在再生沥青混合料制备过程中使用再生剂有许多优点,但也存在一些问题。由于再生沥青的化学组成和胶态结构与基质沥青不同,导致再生沥青混合料的长期性能可能受到影响。有研究发现,再生沥青的老化速度比基质沥青更快[7]。此外,还有学者研究考察了再生剂对再生沥青混合料性能的影响,但是研究得出的结论并不一致。这是因为,再生剂的研发与使用应该从原路面所用的材料入手,对沥青、集料来源及铣刨料的性质进行研究后制备或选用合适的再生剂才能更高效地对 RAP 材料重复利用[8]。

本文对山东滨莱高速养护过程中铣刨产生的 RAP 料沥青含量、级配组成进行了分析。采用了自主研发的再生剂及市售再生剂研究了 RAP 料掺量为 35% 和 50% 的再生沥青混合料路用性能。对其抗永久变形、抗低温开裂、抗疲劳等性能进行了评价。并以此为依据对两种再生剂的再生效果做出了评价[9]。

2. 试验材料

2.1. RAP 料

研究中使用废旧沥青混合料来自于山东滨莱高速公路某路段的中下面层铣刨料,对铣刨料进行筛分,根据粒径不同将其分成三部分: 0~2.36 mm、2.36~13.2、13.2~26.5。采用燃烧炉法在 540℃ 条件下对各档废旧沥青混合料中旧沥青含量进行测试并对其级配组成进行了分析。表 1 为各档 RAP 中的旧沥青含量结果。

Table 1. Asphalt content of RAP aggregates in various grades

表 1. 各档 RAP 集料沥青含量

集料	燃烧前质量/g	燃烧后质量/g	沥青含量
0~2.36	2257.2	2090.8	7.37%
2.36~13.2	1583	1512.6	4.45%
13.2~26.5	2117.1	2029.3	4.15%

2.2. 沥青

本文采用德国 infratest 公司的 20~1120 型自动沥青抽提仪提取 RAP 中的老化沥青。首先将三氯乙烯按照一定配比掺入铣刨料中,充分反应 10 h 以上,之后再抽提,这样可以使得抽提时旧沥青更容易从铣刨料中剥离出来。本文试验中采用的齐鲁 70# 基质沥青为由华瑞道路材料有限公司提供。按照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG D50-2011)对两种沥青进行常规性能分析。两种沥青的基本性能指标如表 2 所示,回收沥青性能指标显示,回收沥青老化程度较高。

Table 2. Basic performance index of matrix asphalt

表 2. 基质沥青基本性能指标

沥青类型	基质沥青	回收沥青
针入度(25℃)/0.1mm	68.3	28.6
延度(10℃)/cm	40.1	0
延度(15℃)/cm	大于 150	9.2
软化点/℃	48.2	53.9
135℃粘度/Pa·s	0.450	1.050

2.3. 再生剂

文中使用了 R1、R2 两种再生剂,其中 R1 型沥青再生剂是本文中所述自主研发再生剂。再生剂 R2

为市售常用的一种再生剂，作为对照对 R1 型再生剂的再生性能进行评价。按照《公路沥青路面再生技术规范》(JTG F41-2008)对两种再生剂进行常规性能分析。再生剂的基本物理化学性能见表 3。

Table 3. Basic performance index of matrix asphalt

表 3. 基质沥青基本性能指标

再生剂类型	R1	R2
15℃密度	0.931	0.936
闪点/℃	241	237
60℃粘度/Pa·s	0.450	1.050

2.4. 新集料与矿粉

研究中所用新集料来自山东省文祖石灰采石场。根据相关试验规范对粗集料、细集料及石灰岩粉的物理性能测试。试验结果如表 4~6 所示。

Table 4. Coarse aggregate performance index

表 4. 粗集料性能指标

性能指标	测试结果	规范要求
粗集料表观密度/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	2.729	≥ 2.60
吸水率/%	0.42	≤ 2
洛杉矶磨耗损失/%	21.5	≤ 30
软石含量/%	1.5	≤ 5

Table 5. Fine aggregate performance index

表 5. 细集料性能指标

性能指标	测试结果	规范要求
细集料表观密度/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	2.729	≥ 2.50
砂当量/%	73	≥ 60
坚固性(>0.3 mm 部分)/%	1.6	≤ 12

Table 6. Mineral powder performance index

表 6. 矿粉性能指标

性能指标	测试结果	规范要求
矿粉表观密度/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	2.75	≥ 2.50
含水量/%	0.1	≤ 1

3. 再生沥青混合料级配设计与沥青用量确定

3.1. 级配设计

再生沥青混合料的组成中除了普通集料，还有铣刨料和再生剂等独有的组成成分，所以再生沥青混合料的结构和成分比普通沥青混合料更加难以研究，再生沥青混合料的路用性能受到多种因素的影响，比如铣刨料的掺量、再生剂的物理化学性能、再生沥青混合料的级配组成以及掺量等因素。为了提高再

生沥青混合料的路用性能，需要设计最优的再生沥青混合料级配组成[10]。

同时，对于铣刨料的掺入量，本文的研究选择掺入 35%的铣刨料和 50%的铣刨料，分别设计了两种铣刨料掺量下的再生沥青混合料级配组成，沥青混合料的级配类型选择 AC20，级配范围选择规范《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40-2004)中的 AC-20 级配范围，本文设计的再生沥青混合料的级配曲线见图 1 及图 2。

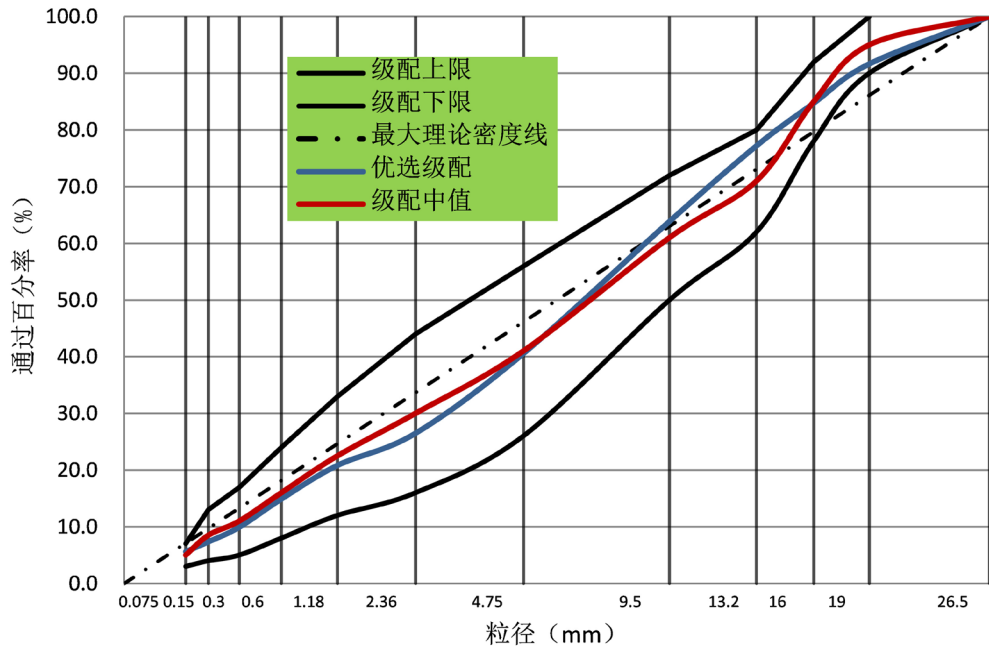


Figure 1. Recycled asphalt mixture grading curve (35%)

图 1. 再生沥青混合料级配曲线(35%)

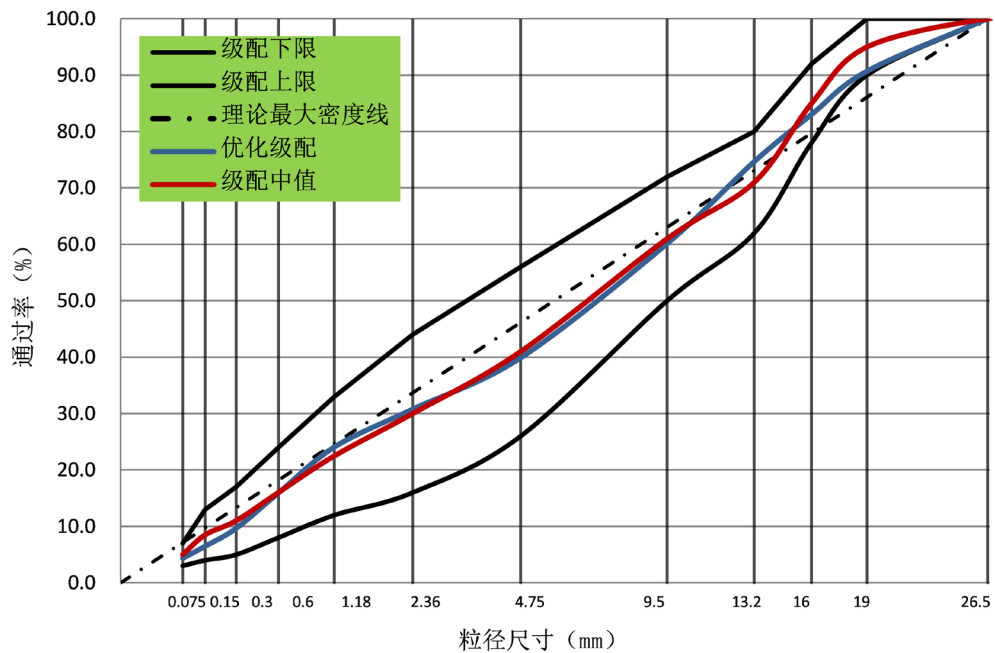


Figure 2. Recycled asphalt mixture grading curve (50%)

图 2. 再生沥青混合料级配曲线(50%)

3.2. 最佳沥青用量确定

3.2.1. 掺入 35% 铣刨料的再生沥青混合料最佳沥青用量的计算

本文选用 3.6%、4.1%、4.6%、5.1%、5.6% 五个级别的总沥青用量制作马歇尔试件，并对马歇尔试件进行马歇尔体积参数测定，计算得到五组试件的毛体积密度、空隙率、沥青饱和度和矿料间隙率，试验结果如表 7 所示。

Table 7. Performance index of recycled asphalt mixture with 35% RAP content
表 7. RAP 掺量 35% 再生沥青混合料性能指标

沥青用量	毛体积密度	理论最大密度	空隙率	VMA	VFA	稳定度	流值
3.6	2.38	2.58	7.24	14.29	49.36	10.21	3.22
4.1	2.41	2.56	5.59	13.81	59.51	10.58	3.57
4.6	2.42	2.54	4.28	13.64	68.65	11.21	3.88
5.1	2.42	2.52	3.67	14.11	73.99	10.82	4.64
5.6	2.42	2.51	3.15	14.64	78.49	10.63	5.51

从图中取毛体积密度最大值 a_1 、稳定度最大值 a_2 、空隙率中值 a_3 、沥青饱和度中值 a_4 取平均值

$$OAC_1 = (a_1 + a_2 + a_3 + a_4) / 4 = 4.61$$

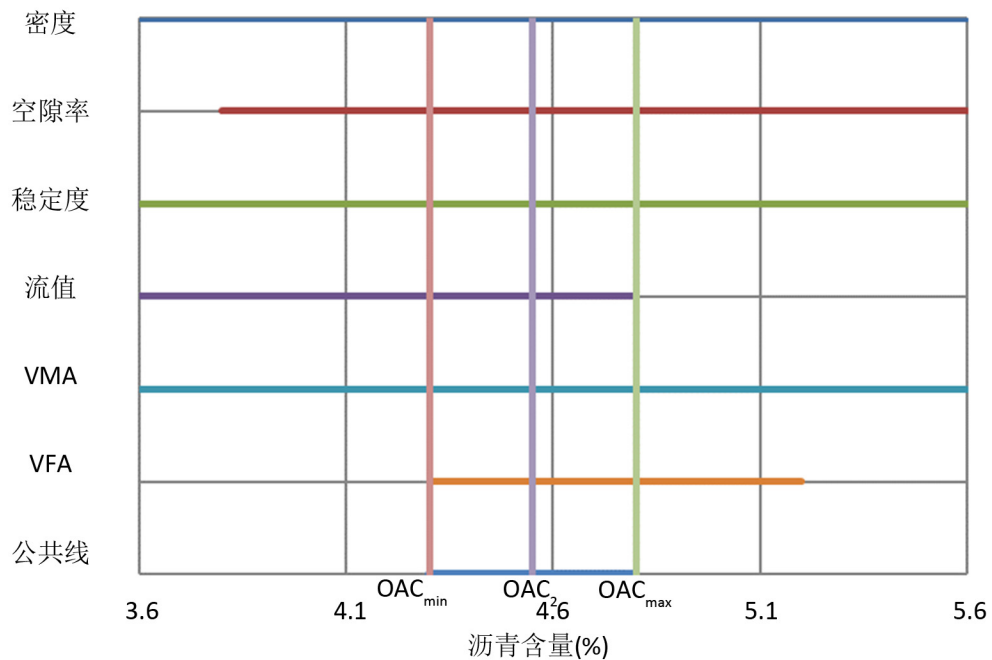


Figure 3. Repeat range of each indicator (35%)

图 3. 各指标重复范围(35%)

从图 3 中取各个参数符合规范设计要求的沥青用量上下限 OAC_{min} 与 OAC_{max} 的中值 $OAC_2 = 4.55$ ；计算得最佳沥青用量 $OAC = (OAC_1 + OAC_2) / 2 = 4.58\%$ 。因此最终确定 RAP 掺量为 35% 的 AC-20 再生沥青混合料最佳沥青用量取 4.6%。

3.2.2. 掺入 50% 铣刨料的再生沥青混合料最佳沥青用量的计算

本文选用 3.6%、4.1%、4.6%、5.1%、5.6% 五个级别的总沥青用量制作马歇尔试件，并对马歇尔试件进行马歇尔体积参数测定，计算得到五组试件的毛体积密度、空隙率、沥青饱和度和矿料间隙率，试验结果如表 8 所示。

Table 8. Performance index of recycled asphalt mixture with 50% RAP content

表 8. RAP 掺量 50% 再生沥青混合料性能指标

沥青用量	毛体积密度	理论最大密度	空隙率	VMA	VFA	稳定度	流值
3.6	2.38	2.58	7.69	15.38	50.00	11.32	2.86
4.1	2.40	2.56	6.01	14.85	59.53	11.85	3.13
4.6	2.41	2.54	4.66	14.53	67.93	12.03	3.52
5.1	2.41	2.52	3.89	15.06	74.17	11.48	4.10
5.6	2.39	2.51	3.43	15.78	78.26	10.92	4.69

从图中取毛体积密度最大值 a_1 、稳定度最大值 a_2 、空隙率中值 a_3 、沥青饱和度中值 a_4 取平均值得

$$OAC_1 = (a_1 + a_2 + a_3 + a_4) / 4 = 4.65$$

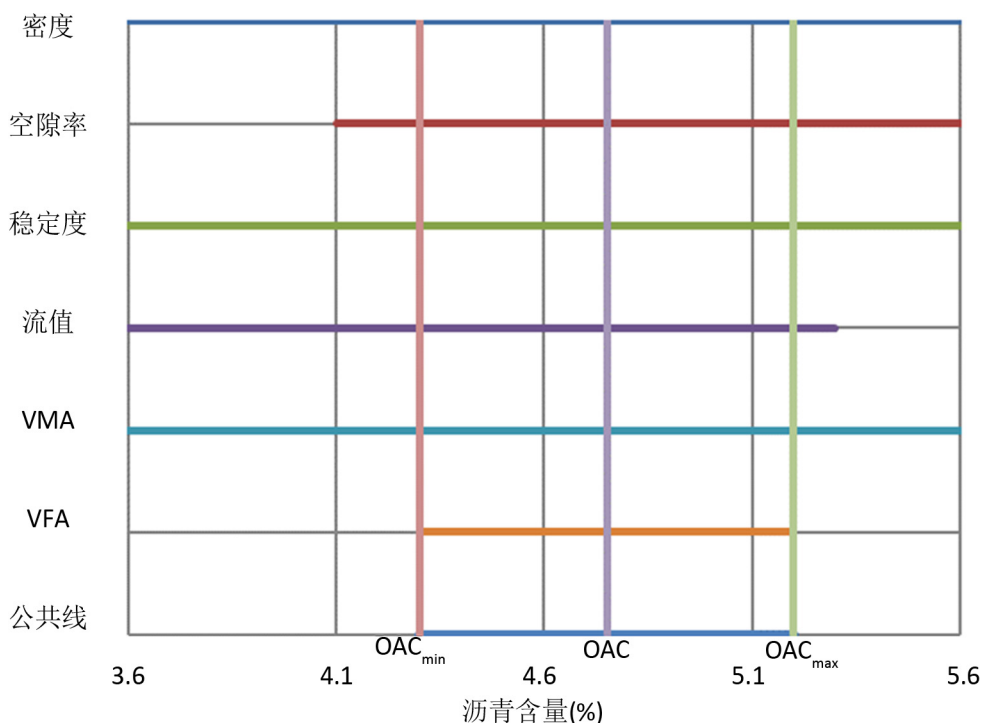


Figure 4. Repeat range of each indicator (35%)

图 4. 各指标重复范围(35%)

从图 4 中取各项指标符合技术标准的沥青用量范围 OAC_{min} 与 OAC_{max} 的中值 $OAC_2 = 4.75$ ；计算得最佳沥青用量 $OAC = (OAC_1 + OAC_2) / 2 = 4.7\%$ 。因此最终确定 RAP 掺量为 50% 的 AC-20 再生沥青混合料最佳沥青用量取 4.7%。

4. 再生沥青混合料路用性能研究

沥青混合料级配设计按 AC-20 进行。选用耐老化型再生剂(A)对旧料掺量为 35%、50%的两种沥青混合料(A35、A50)进行了再生沥青混合料性能试验,耐老化再生剂掺量为 10%。同时选取市场再生剂(B)对旧料掺量为 35%、50%的两种沥青混合料(B35、B50)进行对照试验,用来验证耐老化再生剂对废旧沥青混合料的再生效果,对再生沥青混合料的路用性能进行评价。

4.1. 高温稳定性

对同一沥青混合料进行两次平行车辙实验取平均值作为试验结果,试验结果如图 5 所示。

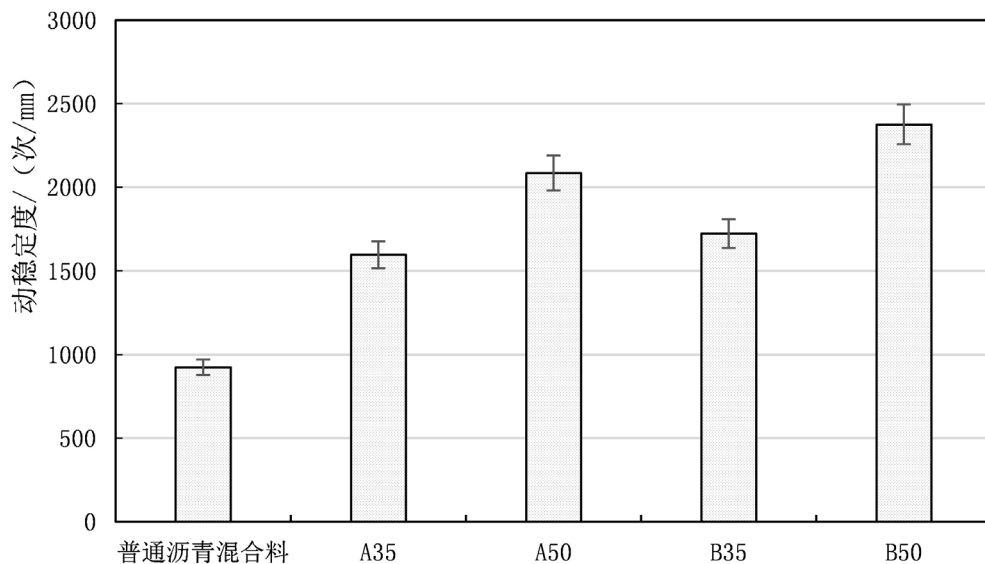


Figure 5. Recycled asphalt mixture dynamic stability
图 5. 再生沥青混合料的动稳定度值

按照规范要求,普通 AC20 沥青混合料的动稳定度不能小于 800 次/mm。由图 5 可知,按照本文设计的级配制备的普通沥青混合料动稳定度值大于 800 次/mm,这说明本文设计的级配满足沥青路面 AC20 沥青混合料的使用要求,同时,使用本研究研发的再生剂制备的铣刨料掺量为 35%和 50%的再生沥青混合料的动稳定度值相比 AC20 沥青混合料的动稳定度有极大提升,分别提高了 74%和 130%,这说明 A35 和 A50 这两种沥青混合料的高温抗车辙性能要高于普通沥青混合料。这是由于沥青混合料在路面的长期服役过程中,沥青逐渐发生老化,导致沥青混合料模量更大,高温条件下抵抗永久变形的能力更强,这也是导致 A50 沥青混合料的动稳定度要高于 A30 沥青混合料的动稳定度的原因,铣刨料掺量从 35%增加到 50%后,再生沥青混合料的动稳定度增加了 32%。

同时可以看出,B35 沥青混合料和 B50 沥青混合料的动稳定度要分别大于相同铣刨料掺量的 A35 和 A50 沥青混合料,这说明使用市场购买的再生剂(B)制备的沥青混合料的高温抗车辙能力更强,但是这说明我们自主研发的再生剂对铣刨料的改性效果更好,减小了再生沥青混合料的劲度,从而降低了再生沥青混合料的高温抗永久变形的能力。

4.2. 低温抗裂性

本文按照《公路工程沥青及沥青混合料实验规程》(T 0715-2011)中规定的方法进行低温弯曲试验。试验结果如图 6 所示。

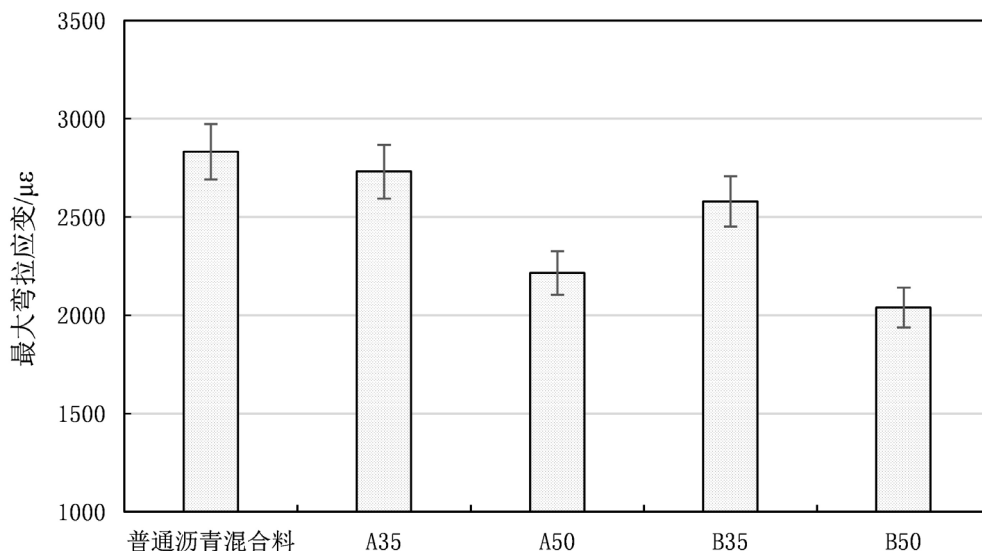


Figure 6. Test results of low temperature crack resistance of recycled asphalt mixture

图 6. 再生沥青混合料低温弯拉试验结果

按照规范要求, 普通 AC20 沥青混合料的最大弯拉应变不能小于 2000。由图 6 所示, 按照本文设计的级配制备的普通沥青混合料最大弯拉应变大于 2000, 这说明本文设计的级配满足沥青路面 AC20 沥青混合料的使用要求, 同时, 使用自主研发的再生剂 A 制备的两种再生沥青混合料(A35、A50)的最大弯拉应变均满足规范要求, 其中, A35 再生沥青混合料的低温性能基本达到了普通沥青混合料的水平, 这是因为再生剂恢复了老化沥青的性能, 提高了沥青胶浆的力学性能, 从而提高了再生沥青混合料的低温抗裂性能[11]。同时, A35 再生沥青混合料的最大弯拉应变要大于 A50 再生沥青混合料, 在使用相同再生剂的条件下, 再生沥青混合料的低温性能指标受 RAP 料掺量的影响较大。这是因为铣刨料中的沥青老化后, 铣刨料的低温性能会大幅下降, 所以铣刨料掺量的增加会降低再生沥青混合料的低温抗裂性能, 而再生剂对于老化沥青的再生效果是有一定局限性的, 随着铣刨料掺量的增加, 再生剂对于再生沥青混合料路用性能的影响逐渐减弱[12]。旧料掺量越高的混合料, 低温性能越差, 这是因为旧料掺量较高时, 再生剂难以对全部的老化沥青进行充分再生, 老化沥青的存在使得再生沥青混合料的低温性能恢复受到限制。

同时, 从两种再生剂制备的再生沥青混合料的最大弯拉应变值来看, 铣刨料掺量一定时, 使用再生剂 B 制备的再生沥青混合料最大弯拉应变要小于使用再生剂 A 制备的再生沥青混合料, 这说明再生剂 A 对铣刨料的再生效果要大于再生剂 B, 这与上一节对再生沥青混合料高温性能的研究中得到的结论一致。

4.3. 水稳定性

本文按照《公路工程沥青及沥青混合料实验规程》(T 0709-2011)中规定的方法进行浸水马歇尔试验与冻融劈裂强度试验。实验结果如图 7、图 8 所示。

按照规范要求, 普通 AC20 沥青混合料的马歇尔残留稳定度值不能小于 80%, 冻融劈裂强度比不能小于 75%。如图 7、图 8 所示, 按照本文设计的级配制备的普通沥青混合料马歇尔残留稳定度和冻融劈裂强度比均满足规范要求, 这说明本文设计的级配满足沥青路面 AC20 沥青混合料的水稳定性使用要求。本文中制备的再生沥青混合料的水稳定性比起普通沥青混合料有所下降, 这是因为再生沥青混合料中有铣刨料的存在, 铣刨料本身的级配不均匀, 并且离散型较大, 会使得再生沥青混合料级配无法严格贴合设计级配, 影响再生沥青混合料的水稳定性; 而且, 旧路面在服役过程中, 表面往往会附着许多杂质与

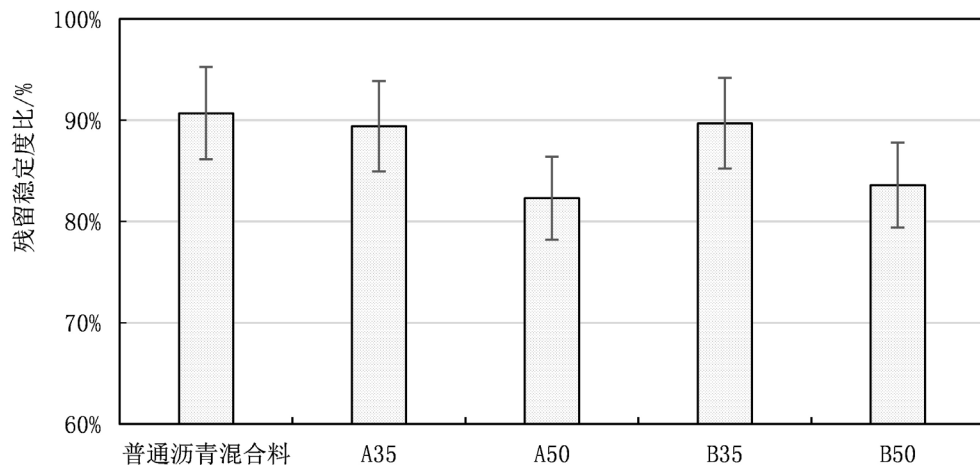


Figure 7. Marshall test results of water immersion of reclaimed asphalt mixture

图 7. 再生沥青混合料浸水马歇尔试验结果

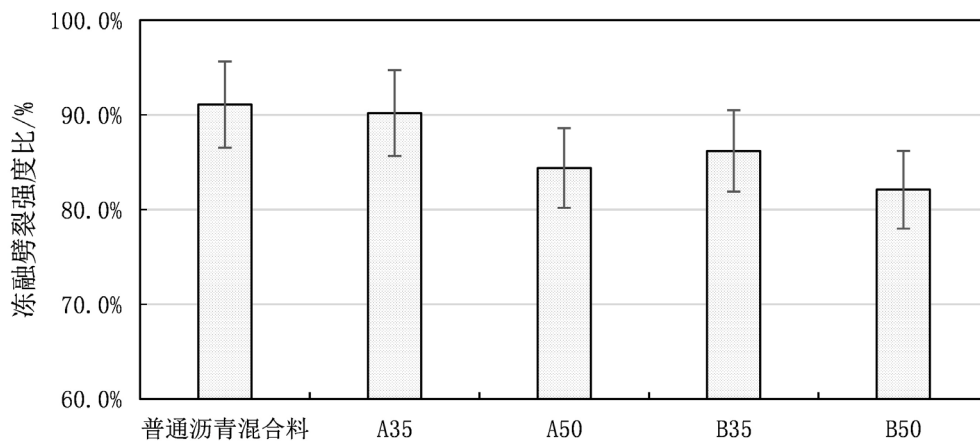


Figure 8. Freeze-thaw splitting test results of recycled asphalt mixture

图 8. 再生沥青混合料冻融劈裂试验结果

灰尘, 这会对旧沥青与石料的粘附性能有较大的影响, 从而也会影响再生沥青混合料的水稳定性[13]。此外, 由于 AH-70 沥青与再生剂相比粘度较大, 其本身含有的芳香烃等轻质组分并不是很高, 无法对 RAP 中的老化沥青进行再生, 新旧沥青之间会存在一个较为薄弱的接触面, 因此, 在受到外力及水的作用时, 会很快产生破坏。同时, 随着铣刨料掺量的增加, 使用再生剂 A 制备的沥青混合料残留稳定度值和冻融劈裂强度比均发生了一定程度的降低, 这说明再生沥青混合料的水稳定性随着铣刨料含量的增加而变差, 这也验证了铣刨料对沥青混合料水稳定性机理的解释。当铣刨料含量为 35% 时, 使用再生剂 A 制备的再生沥青混合料的抗水损害性能基本达到了普通沥青混合料的水平。

对比 A35、A50、B35、B50 四种再生沥青混合料, 可以看出, 铣刨料掺量一定时, 使用再生剂 A 制备的再生沥青混合料的残留稳定度值和冻融劈裂强度比要大于再生剂 B 制备的再生沥青混合料, 这说明再生剂 A 对于再生沥青混合料水稳定度的优化程度要高于再生剂 B, 这说明了自主研发的再生剂 A 的再生效果要优于市场购买的再生剂 B。再生剂 A 与再生剂 B 相比粘度较高, 因此其温度敏感性低, 再生剂 A 在对老化沥青再生的同时, 也能使得新旧沥青之间性能更加牢固稳定的链接。在旧料掺量相同, 使用的 A、B 两种再生剂, 虽然都能对旧料中的老化沥青起到有效的软化作用, 再生剂 A 更加会提高沥青胶结料与集料的粘附性, 从而改善再生沥青混合料水稳定性。

4.4 疲劳性能

根据之前的研究发现,较少掺量铣刨料的再生沥青混合料性能更好,同时考虑到四点弯曲疲劳试验加载时间过长,试验过程较为繁琐,故本研究选择两种使用再生剂 A 和 B 的铣刨料含量为 35% 的再生沥青混合料,四点弯曲疲劳试验结果如图 9 所示。

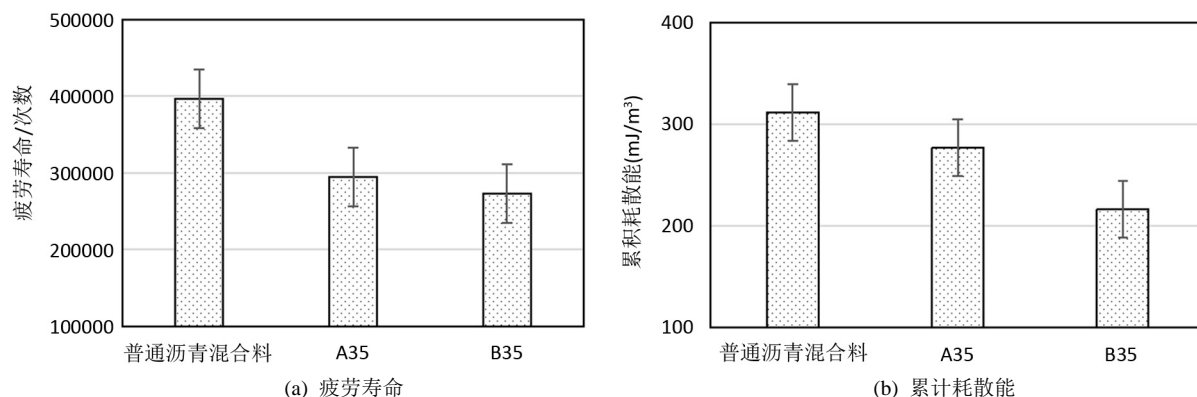


Figure 9. Four-point bending fatigue test results of recycled asphalt mixture

图 9. 再生沥青混合料四点弯曲疲劳试验结果

普通 AC20 沥青混合料的疲劳寿命和累积耗散能要高于 A35、B35 两种再生沥青混合料,这代表铣刨料会对沥青混合料的疲劳性能造成不良影响。这是因为铣刨料已经在沥青路面的长期服役过程中,路用性能和力学性能逐渐下降,即使添加了再生剂对铣刨料中的旧沥青进行再生,但是对旧沥青的性能的恢复依然无法达到使用之前的强度。

同时可以看出, A35 再生沥青混合料的疲劳寿命和累积耗散能比 B35 再生沥青混合料的高,分别提高了 7.9% 和 27%,这说明了 A35 的疲劳性能比 B35 的好,验证了自主研发的再生剂 A 的再生效果强于市场上的再生剂 B。

5. 结论

1) 使用本研究研发的再生剂制备的铣刨料掺量为 35% 和 50% 的再生沥青混合料动稳定度比普通沥青混合料的动稳定度有极大提高,分别提高了 74% 和 130%,这说明 A35 和 A50 这两种沥青混合料的高温抗车辙性能要高于普通沥青混合料。同时,铣刨料掺量从 35% 增加到 50% 后,再生沥青混合料的动稳定度增加了 32%,高铣刨料掺量会进一步提高沥青混合料的高温稳定性。

2) 使用自主研发的再生剂 A 制备的再生沥青混合料低温性能基本达到了普通沥青混合料的水平。同时, A35 再生沥青混合料的最大弯拉应变要大于 A50 再生沥青混合料,这是因为铣刨料中的沥青老化后,铣刨料的低温性能会大幅下降,所以铣刨料掺量的增加会降低再生沥青混合料的低温抗裂性能。

3) 本文中 35% 和 50% 铣刨料制备的再生沥青混合料水稳定性均达到了沥青路面的使用要求,其中铣刨料掺量为 35% 的再生沥青混合料的水稳定性基本达到了普通沥青混合料的水平。

4) 本文中 35% 和 50% 铣刨料制备的再生沥青混合料疲劳性能均要差于普通沥青混合料的疲劳性能,但 A35 再生沥青混合料的疲劳寿命和累积耗散能比 B35 再生沥青混合料的高,分别提高了 7.9% 和 27%,这说明自主研发的再生剂 A 的再生效果强于市场上的再生剂 B,恢复铣刨料的疲劳性能效果更强。

5) 通过高温性能、低温性能、水稳定性、疲劳性能可以看出,自主研发的再生剂 A 的改性效果要优

于市场上的再生剂 B。

参考文献

- [1] 宋立宏. 如何对沥青路面进行分类和改善[J]. 世界家苑, 2011(8): 46.
- [2] 张东方. 再生剂在热再生过程中的作用机理及评价方法[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆交通大学, 2017.
- [3] 肖庆一, 王振波, 朱俊慧, 等. 再生剂对高掺 RAP 再生沥青混合料性能的影响[J]. 交通科学与工程, 2017, 33(1): 4-8+40.
- [4] 卢晶晶. 基于旧沥青分类分级方法的再生沥青混合料性能研究[D]: [硕士学位论文]. 扬州: 扬州大学, 2015.
- [5] 季节. 再生沥青及其混合料路用性能的评价技术[D]: [博士学位论文]. 上海: 同济大学, 2007.
- [6] 刘忠根, 金亚龙, 王文斌. 沥青混合料厂拌热再生技术探讨[J]. 北方建筑, 2018, 3(4): 55-58.
- [7] 闫旭亮. 内蒙古地区高速公路就地热再生应用研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2011.
- [8] 邢彦青. 沥青陶粒混凝土性能研究[D]: [硕士学位论文]. 青岛: 中国海洋大学, 2009.
- [9] 王晓华. 沥青路面再生剂研制及性能分析[C]/ISSA 全球大会暨国际沥青路面维修养护技术研讨会. 太原: 中国公路学会, 2006.
- [10] 冯新军, 郝培文, 查旭东. TLA 改性沥青及混合料的路用性能研究[J]. 公路, 2007(5): 161-166.
- [11] 李荣冕. 再生沥青混合料旧料掺量研究[J]. 科学之友, 2008(5): 43-44.
- [12] 曾梦澜, 陈伟, 朱艳贵, 等. 布敦岩沥青湿法工艺掺量对改性沥青混合料性能的影响[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2018, 45(11): 99-106.
- [13] 于腾海. 一种耐老化沥青再生剂研发及性能研究[D]: [硕士学位论文]. 济南: 山东大学, 2018.