

基于延度的寒冷地区沥青再生剂的靶向研制与性能分析

刘 鹏¹, 第海东², 王敬涛³, 韩方元⁴, 杨 浩³, 姚爱玲³

¹呼伦贝尔市公路管理局拉布大林公路养护管理处, 内蒙古 呼伦贝尔

²中交路桥建设有限公司, 北京

³长安大学特殊地区公路工程教育部重点实验室, 陕西 西安

⁴宁夏交通建设股份有限公司, 宁夏 银川

收稿日期: 2021年10月21日; 录用日期: 2021年11月7日; 发布日期: 2021年11月22日

摘 要

沥青路面再生技术已取得丰硕的研究成果, 但再生沥青混合料的低温性能仍不理想, 对寒冷地区, 这一问题更加突出。本文针对寒冷地区老化沥青的性能特点与再生需求, 使用呼伦贝尔地区提供的回收沥青混合料(RAP)作为老化沥青来源, 进行了适用于寒冷地区的沥青再生剂靶向研制。首先通过对老化沥青的组分和性能分析, 结合再生剂的研制目标, 选择了四种再生剂原材料; 然后基于10℃延度, 通过正交试验确定了再生剂的最佳配方为基础油A: 增塑剂B: 添加剂C: 石油树脂D = 100:30:3:1。在此研究的基础上, 建立了沥青老化时长与10℃延度的函数关系, 以及再生沥青延度与再生剂中增塑剂B含量的函数关系。研究结果表明: 研制的寒冷地区沥青再生剂对老化沥青再生效果好, 特别是低温性能显著提升, 再生沥青的10℃延度比原基质沥青还要优越; 根据沥青的不同老化程度以及再生沥青的目标延度, 可精准调控再生剂中增塑剂B的含量, 靶向精准设计再生剂配方, 在保证再生沥青性能的基础上, 达到降低生产成本的目的。

关键词

再生沥青, 再生剂, 靶向再生, 沥青延度, 寒冷地区

Targeting Development and Performance Analysis of Rejuvenating Agent in Cold Areas Based on Rejuvenated Asphalt Ductility

Peng Liu¹, Haidong Di², Jingtao Wang³, Fangyuan Han⁴, Hao Yang³, Ailing Yao³

¹Labu Dalin Highway Maintenance Management Office, Hulun Buir Highway Administration, Hulun Buir Inner Mongolia

文章引用: 刘鹏, 第海东, 王敬涛, 韩方元, 杨浩, 姚爱玲. 基于延度的寒冷地区沥青再生剂的靶向研制与性能分析[J]. 土木工程, 2021, 10(11): 1162-1171. DOI: 10.12677/hjce.2021.1011128

²Zhongjiao Road and Bridge Construction Co., Ltd., Beijing

³The Ministry of Education Key Laboratory of Highway Engineering in Special Areas, Chang'an University, Xi'an Shaanxi

⁴Ningxia Communications Construction Co., Ltd., Yinchuan Ningxia

Received: Oct. 21st, 2021; accepted: Nov. 7th, 2021; published: Nov. 22nd, 2021

Abstract

Asphalt pavement recycling technology has achieved fruitful research results, but the low-temperature performance of recycled asphalt mixture is still not ideal. This problem is even more prominent in cold regions. Aiming at the performance characteristics and regeneration needs of aging asphalt in cold areas, this paper uses recycled asphalt mixture (RAP) provided by Hulun Buir as the source of aging asphalt and conducts targeted development of asphalt rejuvenating agent suitable for cold areas. First, through the analysis of the components and performance of the aging asphalt, combined with the development goals of the rejuvenating agent, four rejuvenating agent raw materials were selected; then based on the 10°C ductility, the optimal formulation of the rejuvenating agent was determined as the base oil through orthogonal experiments. A: Plasticizer B: Additive C: Petroleum resin D = 100:30:3:1. On the basis of this research, the relationship between the aging time of asphalt and the ductility at 10°C was established, and the relationship between the ductility of the rejuvenated asphalt and the content of plasticizer B in the rejuvenating agent was established. The research results show that the developed asphalt rejuvenating agent in cold areas has a good regeneration effect on aging asphalt; especially the low-temperature performance is significantly improved. The 10°C ductility of the rejuvenated asphalt is superior to that of the original matrix asphalt; according to the different aging degrees of asphalt and the target extension of rejuvenated asphalt, the content of plasticizer B in the rejuvenated asphalt can be accurately controlled, and the formula of the rejuvenated asphalt can be designed precisely to reduce the production cost on the basis of ensuring the performance of rejuvenated asphalt.

Keywords

Rejuvenated Asphalt, Rejuvenating Agent, Targeted Regeneration, Asphalt Ductility, Cold Area

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

老化沥青中轻质组分的损失与转变,使得老化沥青的针入度变大、延度变差,同时,随着再生沥青混合料中沥青混合回收料(reclaimed asphalt pavement,以下简称RAP)掺量的增加,再生沥青混合料的低温性能逐渐变差。因此,对于高寒地区,更应重视再生剂对沥青与沥青混合料低温性能的影响。国外对再生剂的研究取得了丰富的成果,如美国的AE和ERA-C系列再生剂,主要由石油沥青质树脂或者高油沥青和特选石油沥青组成。Nigen [1]等人基于棕榈油和沥青研发了一种新型植物油再生剂。国内对再生剂的研究起步较晚,目前主要有抽出油、废油类与树脂油分合成类。其中抽出油、废柴油大部分属于轻

质油, 此类再生剂虽然可以降低老化沥青粘度, 但是由于其主要成分是轻质油分, 存在挥发性强, 高温下易分解, 抗老化性能较差等缺陷。而树脂合成类再生剂通过将粘度较高的树脂类物质添加到轻质油分中进行混溶、增粘、共聚, 可以有效的解决上述缺陷。于腾海[2]、余龙[3]等通过添加抗老化剂来增加再生剂的抗老化性。虽然国内外对再生剂有着较为广泛的研究, 但依然存在再生混合料低温性能较差的问题; 同时再生效果和耐久性能等也会因为旧路中老化沥青组分、性质的不同、气候区域不同而发生较大的变化。以呼伦贝尔为代表的高寒地区, 对再生沥青混合料的低温抗裂性有更高的要求。本文以呼伦贝尔国道 111 线尼尔基至腾克段一级公路工程为依托项目, 基于 10℃延度研发出寒冷地区的沥青再生剂, 并对此再生剂以及再生沥青的性能进行了分析; 同时考虑到降低成本, 研究了再生剂中价格最高且掺量最大的组分——增塑剂对再生剂性能的影响, 给出根据老化程度来动态调整再生剂组分用量的靶向再生剂组分确定方法, 实现可预测、可控制的老化沥青再生方法。对提高道路的使用性能、降低工程费用, 具有重要的理论指导意义和实用价值。

2. 老化沥青的获取

采用抽提-微孔滤膜真空减压过滤-蒸馏法[4]对呼伦贝尔国道 111 线尼尔基至腾克段的现场 RAP 中的老化沥青进行回收并测试, 为了便于在实验室获得与现场 RAP 中老化沥青老化状态相近的样品, 在实验室选用了 SK A-90 基质沥青进行压力老化、紫外老化以及旋转薄膜烘箱老化(以下简称 RTFOT)三种方式的老化试验, 发现经过 360 min RTFOT 的老化沥青与现场 RAP 的回收沥青性能接近, 具体试验结果见表 1。从表 1 可看出, 试验室 360 min RTFOTSK A-90 老化沥青与 RAP 老化沥青的延度以及黏度指标非常接近。因此选择 360 min RTFOT 的 SK A-90 老化沥青来替代 RAP 中的老化沥青进行本文的试验研究与分析。

Table 1. Performance indexes of aged asphalt and rejuvenated asphalt in RAP

表 1. 老化沥青与 RAP 中的回收沥青性能指标

技术参数	SK A-90 原沥青	试验室 360 min RTFOT 沥青	RAP 老化沥青
针入度(25℃)/(mm)	82.9	30	40
软化点/(℃)	51.0	66.5	59.0
延度(15℃, 5 cm/min)/(cm)	≥100	21	20
延度(10℃, 5 cm/min)/(cm)	70.0	4.0	3.9
粘度(135℃)/(Pa·s)	0.340	1.080	1.094

3. 再生剂原材料的选择

根据课题组对老化沥青四组分分析的结果, 发现在沥青老化过程中, 饱和分基本不变、芳香分减少、胶质减少、沥青质增加。因此, 在研制再生剂时选择主要补充芳香分和胶质的四种原材料, 包括基础油、增塑剂、添加剂和树脂。并通过每种材料对老化沥青的再生效果进行优选。

3.1. 基础油 A

采用糠醛抽出油作为基础油。因其芳香分含量较高, 可以补充老化沥青中芳香分的损失, 同时具有溶解沥青质、软化沥青[5] [6]的作用。试验初期选择了 3 种糠醛抽出油 1、2、3, 分别对其测试, 结果分析见表 2。

Table 2. Performance of base oil**表 2.** 基础油的性能

型号	闪点/(°C)	外观	运动粘度/(100°C cSt)	密度/(g/cm ³)	芳香分含量/(%)
1	215	墨绿色	14	1.01	74.5
2	205	棕红色	12	1.06	73.5
3	200	棕红色	16	1.12	60.5

通过比较基质沥青与老化沥青中芳香分的含量, 计算得出当基础油的掺量在 10%左右时, 基本可以恢复老化沥青缺失的芳香分, 因此将基础油的掺量初步定为 10%。针对寒冷地区, 将 10°C 延度作为再生沥青的控制指标[7], 基础油对老化沥青的再生效果见表 3 所示。

Table 3. Performance comparison of rejuvenated asphalt with different base oils**表 3.** 不同基础油再生沥青性能比较

型号	掺量 (%)	技术指标			
		针入度 25°C/(0.1 mm)	软化点/(°C)	延度 (10°C, 5 cm/min)/(cm)	粘度 (135°C)/(Pa·s)
1	0	27.2	66.5	4.0	1.080
	10	52.2	55.0	9.9	0.485
2	0	27.2	66.5	4.0	1.080
	10	46.2	53.0	8.5	0.576
3	0	27.2	66.5	4.0	1.080
	10	48.1	54.0	8.2	0.683

从表 3 中可以看出, 三种基础油均可以不同程度的恢复老化沥青的性能, 相比较而言, 1 号基础油对老化沥青的针入度、延度、粘度的再生效果最好。因此选择使用 1 号的基础油为再生剂的组成成分。

3.2. 增塑剂 B

考虑寒冷地区的特性, 再生剂的加入更应考虑改善再生沥青的低温抗裂性, 增强低温延展性, 因此需要在再生剂中添加增塑剂的成分。初步选择了增塑剂 1 与增塑剂 2 [8] [9], 在基础油中添加 20% [10] 的增塑剂来增强延度, 两种增塑剂对再生沥青延度增强的试验结果见表 4。

Table 4. Comparison of the effects of plasticizers**表 4.** 增塑剂的效果对比

型号	技术指标		
	针入度 25°C/(0.1 mm)	软化点/(°C)	延度(10°C, 5 cm/min)/(cm)
增塑剂 1	69.48	57.0	41.0
增塑剂 2	57.82	58.0	10.5

从表 1 和表 4 中可以看出, 两种增塑剂都提高了再生沥青的延度, 其中增塑剂 1 的效果更优于增塑

剂 2, 尤其是 10℃ 延度, 因此选择增塑剂 1 作为再生剂的增塑剂。

3.3. 添加剂 C

在具体应用中, 需要再生剂有良好的渗透性能以便快速地与旧沥青进行融合。添加剂 C, 可以很好地溶解软化沥青, 调和再生剂各组分之间的相容性, 使再生剂具有良好的渗透性能[11]。

3.4. 树脂 D

本研究通过添加石油树脂的方式补充老化沥青中胶质组分的损失, 并增强再生剂的高温稳定性以及储存稳定性[12]。在树脂类物质选择中, 虽然芳香烃类 C9 石油树脂具有相容性较好的优点, 但经试验发现芳香烃类 C9 树脂存在黏结性能较差、抗老化性不佳等缺点。经过比较, 选用了加氢 C9 树脂 D, 将树脂中原有的双键被破坏, 形成单键, 可以提高其耐候性、粘合性、稳定性等性能。

4. 再生剂的组成研究

4.1. 试验方案设计

再生剂的配方由抽出油 A + 增塑剂 B + 添加剂 C + 石油树脂 D 组成。抽出油 A 为主要组分, 作为基础比例, 定为 100, 根据沥青四组分分析结果, 并结合试验分析预估, 将增塑剂 B 的掺量初步定为基础油的 20%、25%、30%; 添加剂 C 由于其挥发性较强, 为控制再生剂质量损失与抗老化性能, 将其掺量定为基础油的 1%、2%、3%; 石油树脂 D 的掺量不能过多, 否则会影响再生沥青的延度, 将其掺量定为基础油的 1%、3%、5%。为确定最优配方, 设计了 3 因素(B、C、D) 3 水平(1、2、3)的正交试验[10], 见表 5。

在进行再生剂制备时, 首先将基础油搅拌加热到 120℃ 左右, 再加入石油树脂 D, 以 2000 r/min 高速剪切搅拌 10 min, 然后保持上述温度加入增塑剂 B 和添加剂 C, 继续剪切 10 min, 形成稳定的再生剂溶液。将各再生剂均以老化沥青质量的 10% 的比例加入到老化沥青中, 测试再生沥青的各性能指标, 分析各成分对沥青性能的影响, 测试结果见表 5 所示。

Table 5. Various composition schemes and test results of rejuvenated asphalt
表 5. 各种组成方案及再生沥青试验结果

序号	正交试验设计			再生沥青试验结果			
	增塑剂 B/(%)	添加剂 C/(%)	石油树脂 D/(%)	针入度 25℃/(0.1 mm)	软化点 /(℃)	延度(10℃, 5 cm/min)/cm	粘度 (135℃)/(Pa·s)
1	1 (20)	2 (2)	2 (3)	78.22	58.10	43.25	0.385
2	1 (20)	1 (1)	1 (1)	78.63	60.45	57.40	0.380
3	1 (20)	3 (3)	3 (5)	78.23	53.55	55.50	0.389
4	2 (25)	2 (2)	3 (5)	82.37	55.65	50.75	0.376
5	2 (25)	3 (3)	1 (1)	84.27	56.65	70.00	0.365
6	2 (25)	1 (1)	2 (3)	83.13	60.35	58.70	0.381
7	3 (30)	3 (3)	2 (3)	88.68	56.60	73.25	0.358
8	3 (30)	2 (2)	1 (1)	87.58	52.90	100.15	0.361
9	3 (30)	1 (1)	3 (5)	86.13	59.95	63.35	0.381

4.2. 正交试验结果分析

在正交设计试验中,有参数 K 值和 R 值, K_i 表示某一因素下第 i 水平状态下的结果之和, K_i 中数值最大的为某一因素下相应水平的最优水平。 R 表示极差,各因素的 K_i 中最大值与最小值之差,表示各因素对某一指标的影响大小。计算各因素下不同水平的 K 值与 R 值,见表 6 所示

Table 6. Visual analysis of orthogonal test results of rejuvenating agent

表 6. 再生剂正交试验结果直观分析

项目	统计参数	增塑剂 B	添加剂 C	石油树脂 D
粘度	K1	1155.50	1143.00	1106.50
	K2	1123.00	1123.00	1125.50
	K3	1100.50	1113.00	1147.00
	R	55.00	30.00	40.50
延度	K1	156.15	179.45	227.55
	K2	179.45	194.15	175.20
	K3	236.75	198.75	169.60
	R	80.60	19.30	57.95
软化点	K1	172.10	180.75	170.00
	K2	172.65	166.65	175.05
	K3	169.45	166.80	169.15
	R	3.20	14.10	5.90
针入度	K1	235.08	247.90	250.48
	K2	249.77	248.17	250.03
	K3	262.40	251.18	246.73
	R	27.32	3.28	3.75

通过对 R 值分析,几种组成对粘度、延度与针入度的影响程度从大到小是一致的,分别是增塑剂、石油树脂、添加剂;对软化点的影响程度从大到小分别是添加剂、石油树脂、增塑剂。并通过 K_i 可以看出,随着石油树脂含量的增加,粘度也越来越大,延度和针入度在逐渐减小,但软化点却先增加后减小;随着增塑剂含量的增加,粘度是在逐渐减小,延度和针入度在逐渐增大,软化点小幅减小;随着添加剂含量的增加,粘度软化点逐渐减小,延度和针入度逐渐增大。通过对上述试验结果进行分析,优选再生剂配方,考虑到寒冷地区的特点,以延度值为主要关注点,选择针入度较大、粘度较小、软化点合适的组合为最终组合,综合考虑给出优选组合为 B3C3D1,基础油 A:增塑剂 B:添加剂 C:石油树脂 D = 100:30:3:1。

5. 再生沥青性能分析

5.1. 再生剂的性能

通过试验,测出添加按上述优化后得出方案的再生剂的技术参数,结果见表 7,可以看出再生剂符合《公路沥青路面再生技术规范》(JTG/T 5521-2019) [13] RA-5 型再生剂的要求,同时具有良好的抗老化性能。

Table 7. Test results of rejuvenating agent
表 7. 再生剂检测结果

检测项目	60℃粘度 (mm ² /s)	闪点/(°C)	饱和分含量/(%)	芳香分含量/(%)	薄膜烘箱试验前 后黏度比/(%)	薄膜烘箱试验前 后质量变化/(%)
实测	628	231	19.2	75.9	1.8	-1.9
RA-5	176~900	≥220	≤30	实测记录	≤3	≥-4

5.2. 再生沥青的性能

5.2.1. 再生沥青的基本性能

对呼伦贝尔国道 111 线尼尔基至腾克段的回收沥青以及 SK A-90 360min RTFOT 老化沥青进行再生, 为了分析再生剂的有效性, 采用了老化沥青质量的 10% 再生剂掺量进行沥青再生, 再生沥青的三大指标试验结果见表 8。

Table 8. Regeneration effect of rejuvenating agent on different aged asphalt
表 8. 再生剂对不同老化沥青的再生效果

沥青种类		指标		
		针入度(25℃)/(0.1 mm)	软化点/(°C)	延度(10℃, 5 cm/min)/(cm)
RAP 沥青	原状	47.0	59.2	3.9
	再生	88.2	52.3	110
	基质	82.9	50.9	70.0
SK A-90	老化	27.2	66.8	4.0
	再生	81.7	52.8	105.0

从表 8 发现再生剂对老化沥青具有良好的再生效果, 再生沥青从老化状态回到了 90 号, 而且软化点和延度都已经超过了 SK A-90 基质沥青的性能, 尤其是延度远远优于基质沥青, 证明了再生剂对寒冷地区的沥青再生有着良好的适应性。

5.2.2. 再生沥青的老化性能

热再生沥青混合料与新沥青混合料一样, 同样需要关注抗老化性能, 而老化问题实际上是沥青的老化。接下来对再生 SK A-90 沥青进行了 163℃, 5 h 的 RTFOT 老化试验, 考察再生沥青抗老化性能, 其中再生剂用量占老化沥青用量的 10%, 试验结果见表 9。

Table 9. Aging test results of rejuvenated asphalt rotary film oven
表 9. 再生沥青旋转薄膜烘箱老化试验结果

测试指标	针入度 (25℃)/ (0.1mm)	残留针入 度比/(%)	软化点/(°C)	延度(10℃, 5cm/min) /(cm)	残留延度 (10℃, 5cm/min) /(cm)	粘度 (135℃)/(Pa·s)	粘度比/(%)	质量变化 /(%)
再生沥青	88.7		52.8	105.0		0.350		
RTFOT 老化后	55.2	62.2	57.2	38.2	38.2cm	0.476	1.36	-0.6
规范	-	≥57	-	-	≥8cm	-	-	±0.8

可以看出,再生沥青老化后,各指标均符合《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F-40-2004) [13]的要求,尤其是老化后的 10℃的延度远远超过规范要求,体现了再生剂具有较好的抗老化性能,更进一步说明了再生剂对寒冷地区的适应性。

6. 基于延度的再生剂配方靶向调整

从研制再生剂的再生效果来看,再生剂具有良好的再生性能。再生剂中增塑剂 B 含量对延度有着显著的作用。但是在几种原材料中增塑剂 B 的成本最高,并且再生剂中增塑剂 B 的含量占到了基础油的 30%。对于某些老化程度较轻的沥青,若采用这一固定的配方,再生后的沥青性能将远远超出了使用需求,会增加不必要的成本。为控制成本,本文以增塑剂 B 的含量为变量,基于沥青不同的老化程度(10℃延度)来调整再生剂组分的方法。因为 RTFOT 老化效果与实际应用中的自然老化有着较好的对应性[11] [12],同样沥青老化时间与沥青的粘度、延度有着良好的对应关系。本文以 SK A-90 沥青为例,在实验室得出了老化时间与延度的关系,见图 1,并拟合出函数关系式,见式 1。从相关系数可以看出拟合函数有着很好的拟合度。结合文献[11] [12]便可以间接得到路面实际使用年限与延度的关系,见表 10 所示。

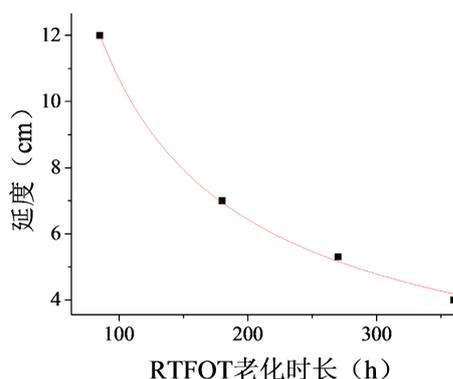


Figure 1. The relationship between ductility of aged asphalt and RTFOT aging time

图 1. 延度与 RTFOT 老化时长的关系

$$D = 310.411t^{-0.732}, R^2 = 0.9977 \quad (1)$$

(1)式中: D 为沥青延度, t 为老化时长, R 为拟合相关度

Table 10. The relationship between the 10℃ Ductility of SK A-90 and the pavement service time

表 10. SK A-90 的 10℃延度与路面使用时间的关系

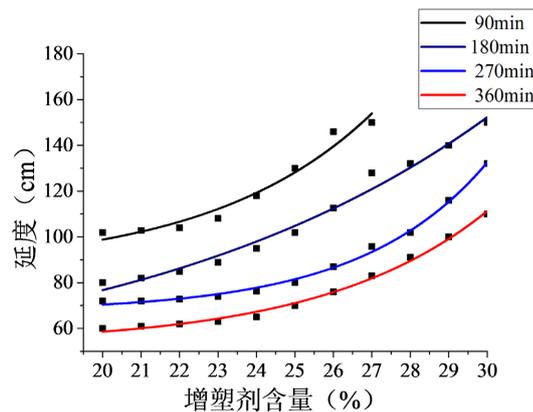
路面使用时间	施工老化	2~3 年	4~5 年	6 年
RTFOT 时长/(min)	90	180	270	360
延度(10℃, 5 cm/min)/(cm)	12.0	7.0	5.3	4.0

试验研究了对于不同老化时长下的老化沥青,在只改变再生剂中增塑剂 B 含量的再生沥青延度的恢复情况,分析不同老化时长下再生沥青延度与增塑剂 B 含量的关系,测试结果见表 11 与图 2。

由图 2 可以看出,不同老化时长下,再生沥青延度与增塑剂 B 含量有着较好的对应关系。对此,本文对其进行了函数拟合,发现指数函数 $y = y_0 + Ae^{(x-x_0)/t}$ 对其拟合度较好,不同老化时长下的拟合函数参数,见表 12 所示。

Table 11. The relationship between the ductility of SKA-90 rejuvenated asphalt and the content of plasticizer b under different aging time**表 11.** 不同老化时长下 SK A-90 再生沥青延度与增塑剂 B 含量的关系

增塑剂 B 含量/(%)	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
RTFOT 360 min	60	61	62	63	65	70	76	83	91	100	110
RTFOT 270 min	72	72	72.8	74	76.3	80	87	95.8	102	116	132
RTFOT 180 min	80	82	84.9	88.9	95	102	112.6	128	132	140	150
RTFOT 90 min	102	103	104	108	118	130	146	150			

**Figure 2.** The relationship between the ductility of rejuvenated asphalt at 10°C and the content of plasticizer b under different aging time**图 2.** 不同老化时长下再生沥青 10°C 延度与增塑剂 B 含量的关系**Table 12.** Fitting function parameters for different aging durations**表 12.** 不同老化时长的拟合函数参数

老化时长	参数	y_0	x_0	A	t	R^2
360 min		85.9158	15.5968	4.5266	4.2086	0.9370
270 min		36.0666	23.8934	20.4584	9.5257	0.9780
180 min		67.3447	17.5582	1.4587	3.2743	0.9947
90 min		52.9184	17.7525	3.34496	4.2829	0.9919

由上述分析可知, 根据某一种老化沥青与延度的关系曲线, 判断其老化程度或老化时间, 再结合延度与增塑剂 B 含量的关系, 即可靶向确定再生沥青目标延度所对应的再生剂增塑剂 B 的含量。这样不仅可以针对性地解决不同程度老化沥青的再生问题, 而且能够降低再生剂的造价。

7. 结论

1. 通过正交试验分析, 基于 10°C 的延度研制了寒冷地区再生剂的最优配方为基础油 A: 增塑剂 B: 添加剂 C: 石油树脂 D = 100:30:3:1。该再生剂符合 RA-5 型再生剂的技术参数, 而且对老化沥青具有很

好的渗透性。

2. 采用研制的再生剂再生的沥青具有优良的性能,尤其是老化后的 10℃的延度,甚至优于新基质沥青,体现了再生剂具有较好的抗老化性能和低温抗裂性,更进一步说明了再生剂对寒冷地区的适应性。

3. 根据老化沥青与延度的曲线,结合延度与增塑剂 B 含量的关系,即可靶向确定再生沥青目标延度所对应的增塑剂 B 的含量,再生沥青 10℃延度与增塑剂 B 含量呈指数函数的关系,回归式的相关系数在 0.93 以上。

基金项目

国家自然科学基金(52078048);含砂雾封层的材料基质优化、颗粒-浆体交互作用机理及抗滑性能表征项目。项目编号:中交路桥建设有限公司研究项目 ZLBF-2018-12。

参考文献

- [1] Nigen-Chaidron, *et al.* (2010) Rejuvenating Agent and Process for Recycling of Asphalt. US Patent No. 2010/0041798.
- [2] 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.
- [3] 余龙. 沥青热再生剂的研制及其应用[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆交通大学, 2016.
- [4] 李晋鹏, 郝润姝, 赵江勇, 等. 寒区 RAP 配合比优化设计及路用性能研究[J]. 内蒙古公路与运输, 2020, 177(3): 12-16.
- [5] Sun, B. and Zhou, X.-X. (2018) Diffusion and Rheological Properties of Asphalt Modified by Bio-Oil Regenerant Derived from Waste Wood. *Journal of Materials in Civil Engineering*, **30**, 04017274-1-8.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002138](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002138)
- [6] 杨乾隆. 糠醛裂化油沥青再生剂的开发研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 武汉轻工大学, 2013.
- [7] 沈金安. 沥青及沥青混合料路用性能[M]. 北京: 北京人民交通出版社, 2001.
- [8] 申万青. 增塑剂 DOA 改性沥青及混合料高低温性能研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2017.
- [9] 冉龙飞. 热、光、水耦合条件下 SBS 改性沥青老化机理研究及高性能再生剂开发[D]: [博士学位论文]. 重庆: 重庆交通大学, 2016.
- [10] 周艺, 何纯, 李泉, 等. 基础再生剂的制备与性能评价[J]. 公路, 2019, 64(5): 236-242.
- [11] 张瑜. 沥青的老化机理研究及再生剂开发[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆交通大学, 2013.
- [12] 聂鑫垚, 姚鸿儒, 李政, 等. C9 石油树脂对高黏度改性沥青性能的影响[J]. 石油学报(石油加工), 2019, 35(1): 176-182.
- [13] JTG/T 5521-2019, 公路沥青路面再生技术规范[S].