

热再生沥青混合料低温蠕变行为及黏弹性分析

张强¹, 高学凯², 梁春雨³

(1. 山西省交通规划勘察设计院有限公司, 山西 太原 030032; 2. 黄土地区公路建设与养护技术交通行业重点实验室, 山西 太原 030032; 3. 吉林大学 交通学院, 吉林 长春 130022)

摘要:为探究再生剂对沥青混合料低温蠕变行为的影响,分别选用石油基与生物油基再生剂以9%、12%、15%掺量进行沥青三大指标试验确定其最佳掺量,并以最优掺量制备沥青混合料小梁试件,对沥青混合料回收料(RAP)、石油基再生沥青混合料(RAP+A)、生物油基再生沥青混合料(RAP+B)分别在-5℃条件及0.8、1.6、2.4 MPa应力水平下进行弯曲蠕变试验,基于Burgers模型分析其黏弹特性及蠕变行为。结果表明:石油基再生剂与生物油基再生剂均提高了老化沥青针入度、延度,降低了软化点,随着掺量的提高,再生剂的改善效果减弱,综合考虑经济与性能确定再生剂掺量为12%。再生剂改善了沥青混合料的黏弹性,相同应力水平下,两种再生剂均提升了沥青混合料稳态蠕变速率与应变大小,减少了应力松弛时间,提高了耗散能比,沥青混合料回收料的低温抗裂性能得到显著增强。随着应力水平的提高,沥青混合料稳态蠕变应变增加(蠕变速率降低),松弛时间减少,耗散能比增加,沥青混合料更易产生变形而释放内部存储的能量。

关键词: 热再生; Burgers模型; 蠕变速率; 松弛时间; 耗散能比

热再生是沥青路面固废回收利用的重要手段,可以治愈道路病害的同时实现路面材料的循环利用,具有显著的经济、社会和环境效益。然而,沥青混合料回收料经长期的光热老化,低温抗裂性变差,这是制约热再生技术推广的重要因素,也是专家学者们研究的重点问题^[1-3]。

顾兴宇^[4]等基于BBR与DSR试验,采用差别变量及主曲线法评价了再生沥青的低温抗裂性能;冯新军^[5]等采用Cryo-SEM从微观角度分析了再生沥青的低温断裂指数;曹青霞^[6]等以 $G-R$ 常数为指标,分析了3种不同再生剂对沥青低温抗裂性能的影响;耿九光、何兆益等^[7-9]采用低温弯曲破坏试验分析了不同掺量RAP、级配类型对再生沥青混合料低温性能的影响;陈静云、侯睿等^[10-11]对比分析了不同再生工艺,包括再生手段、拌和时间等对再生沥青混合料低温抗裂性的影响差异。

目前对再生沥青混合料的低温抗裂性的研究也多采用一般破坏性指标,而沥青混合料低温开裂是一个缓慢发展的过程,仅采用破坏性试验来评价其低温性能具有一定的局限性,无法反映其在整个开裂过程中

内部的力学行为规律。基于此,该文选用石油基再生剂、生物油基再生剂分别以9%、12%、15%的掺量进行沥青三大指标试验确定其最佳掺量,然后以最优掺量制备沥青混合料小梁试件并分别在0.8、1.6、2.4 MPa应力水平下进行弯曲蠕变试验,试验结果采用Burgers模型分析其黏弹特性及低温蠕变行为,对准确认识并客观评价再生沥青混合料低温抗裂性具有重要意义和应用价值。

1 原材料与试验方法

1.1 原材料

目前,再生剂按基础油分来源可分为石油基再生剂与生物油基再生剂,该文对两种不同类型再生剂的技术指标进行试验检测,结果如表1所示。其中A为重石油基再生剂、B为生物油基再生剂。沥青混合料回收料(RAP)来自山西某高速公路维修养护路段,其基础性能测试结果列于表2。新掺沥青采用SBS改性沥青,其技术指标列于表3。

收稿日期:2021-04-22

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:52008235);山西交控科技项目(编号:18-JKKJ-15)

作者简介:张强,男,大学本科,高级工程师。E-mail:372610734@qq.com

表 1 再生剂技术指标

项目	单位	测试结果		标准值
		A	B	
60℃动力黏度	mm ² /s	109	71	RA-1: 50~175
闪点	℃	241	276	≥220
饱和分含量	%	25.37	15.4	≤30
短期老化前后黏度比		0.9	1.2	≤3
短期老化前后质量变化	%	-1.0	-0.8	≤4, ≥-4

表 2 RAP 性能检验结果

材料	测试项目	单位	测试结果	标准值
RAP	含水率	%	0.33	实测
	沥青含量	%	4.3	实测
	砂当量	%	79	>55
RAP 中的 沥青	25℃针入度	0.1 mm	21.1	>20
	软化点	℃	67.5	实测
	10℃延度	cm	8.7	实测

表 3 SBS(I-C 型)改性沥青技术指标

25℃针入度/ (0.1 mm)	软化点/ ℃	5℃延度/ cm	相对 密度	黏附性/ 级
68	56.5	34.2	1.012	4

1.2 试验方案

研究试验方案如图 1 所示。首先,采用阿布森法从沥青混合料回收料(RAP)中抽提沥青,并分析 RAP 级配、沥青基本参数;然后,将两种再生剂分别以 9%、12%、15%的掺量制备再生沥青,并以 25℃沥青针入度、10℃延度以及软化点作为控制指标确定再生剂最佳掺量。

对 RAP 筛分后进行级配分析,掺入 15%新料以形成平滑的 S 形曲线,级配设计如图 2 所示。再生沥青混合料中沥青部分包含再生剂、RAP 中的沥青以及新掺入 SBS 改性沥青,以总油石比 4.5%~5.5%(间隔 0.5%)进行马歇尔试验确定混合料最佳油石比,并以最佳油石比成型车辙板,经 24 h 冷却后切割为

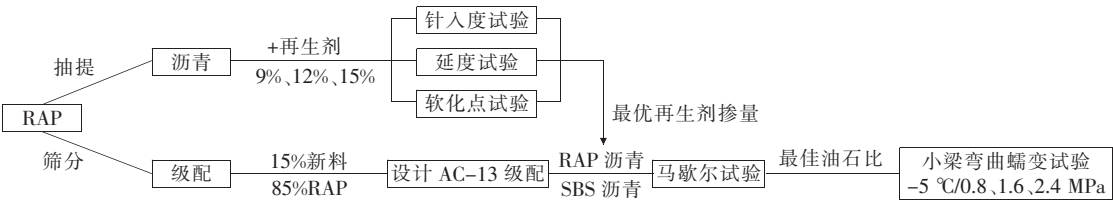


图 1 试验设计方案

250 mm×30 mm×35 mm 小梁试件。采用 UTM-130 设备,对沥青混合料回收料(RAP)、石油基再生沥青混合料(记作 RAP+A)以及生物油基再生沥青混合料(记作 RAP+B)分别进行小梁弯曲蠕变试验,试验温度为-5℃,荷载水平分别为 0.8、1.6、2.4 MPa,试验加载时间为 1 800 s,由配套计算机记录小梁挠度变化。

1.3 计算方法

由于设备记录的为小梁跨中挠度变化,因此需要对其梁底应变进行相应计算,小梁弯曲蠕变的加载示意图及应变计算方法如图 3 及式(1)~(3)所示^[12]。

$$\sigma_0 = \frac{3 \times L \times F_0}{2 \times b \times h^2} \times 10^{-6} \tag{1}$$

$$\epsilon(t) = \frac{6 \times h \times d(t)}{L^2} \tag{2}$$

$$\epsilon_s = \frac{\epsilon_2 - \epsilon_1}{(t_2 - t_1) / \sigma_0} \tag{3}$$

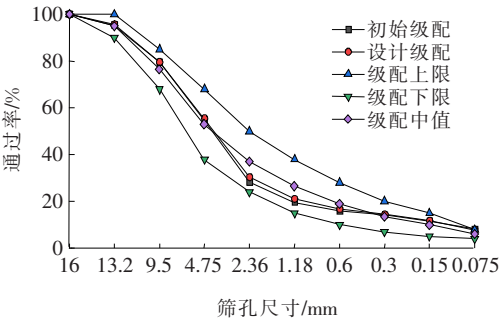


图 2 再生混合料设计级配

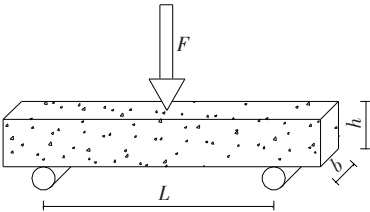


图 3 小梁弯曲蠕变载荷示意图

式中: σ_0 为试件的蠕变弯拉应力(MPa); $\epsilon(t)$ 为试件梁底的弯拉应变; $d(t)$ 为试件在加载过程中随时间 t 变化的跨中挠度(m); ϵ_s 为时间 t_1-t_2 阶段试件弯曲蠕变速率 $[(s \cdot \text{MPa})^{-1}]$ 。

2 试验结果分析

2.1 基础性能试验

两种类型再生剂在不同掺量下沥青的技术指标如表 4 所示。

表 4 不同掺量再生剂沥青技术指标

再生剂/%	25℃针入度/ (0.1 mm)		软化点/℃		10℃延度/cm	
	A	B	A	B	A	B
0	21.1	21.1	67.5	67.5	8.7	8.7
9	51.0	53.6	58.9	56.5	17.8	22.5
12	57.3	61.2	54.8	52.5	21.5	27.6
15	60.1	65.5	51.6	49.5	27.3	32.4

从表 4 可以看出:随着再生剂掺量的增加,再生沥青的针入度、延度升高,软化点下降,再生剂的掺入显著提高了沥青的延展性。两种再生剂对沥青性能的改善趋势一致,但改善的效果不同,相同掺量下,重石油基再生沥青软化点高而针入度、延度偏低,生物油基再生沥青则相反。随着掺量的增加,再生剂对沥青性能的改善效果减弱,综合考虑经济与使用性能,以 12% 作为再生剂最佳掺量并制备沥青混合料进行小梁弯曲蠕变试验研究。

2.2 蠕变试验

3 种沥青混合料在不同荷载下的蠕变曲线如图 4~6 所示。根据蠕变速率随时间的变化关系,沥青混合料的蠕变一般包含 3 阶段:第一阶段为减速阶段,即蠕变速率随时间而呈下降趋势;第二阶段为稳定阶段,即蠕变速率基本保持不变;第三阶段为蠕变加速阶段,即蠕变速率随时间而上升^[13]。其中第二阶段蠕变速率保持恒定,并可以反映出沥青混合料永久变形特征,相同应力水平下其值越大,表明其在相同时间内产生的应变越大,低温性能越好^[14],结合式(3),RAP、RAP+A 和 RAP+B 这 3 种沥青混合料在不同荷载水平下的稳定蠕变速率 ϵ_s 列于表 5。

从图 4~6 及表 5 可以看出:① 3 种沥青混合料的蠕变变形均随荷载的增加而显著增加,沥青混合料回收料及石油基再生沥青混合料在加载时间内均只出现

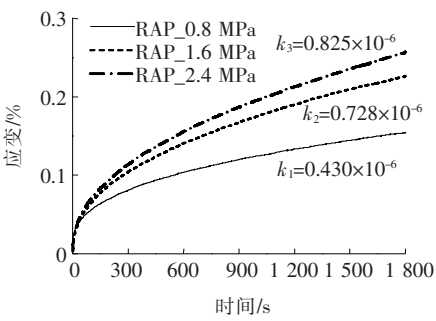


图 4 RAP 蠕变曲线

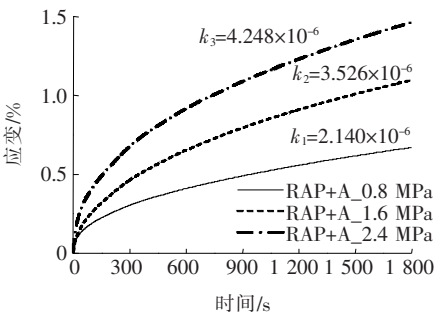


图 5 RAP+A 蠕变曲线

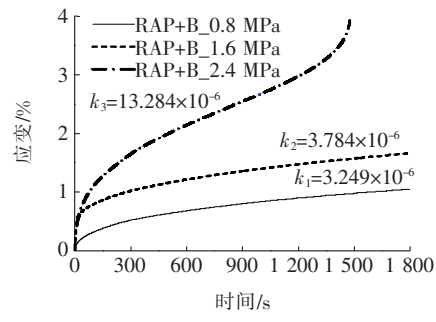


图 6 RAP+B 蠕变曲线

表 5 沥青混合料稳态蠕变速率 ϵ_s 计算结果

荷载水平/ MPa	蠕变速率/ $[10^{-6} \cdot (s \cdot \text{MPa})^{-1}]$		
	RAP	RAP+A	RAP+B
0.8	0.549	2.675	4.061
1.6	0.455	2.204	2.365
2.4	0.344	1.770	5.535

蠕变迁移期和稳定期,生物油基再生沥青混合料在 2.4 MPa 应力条件下出现了蠕变破坏期;② 在相同应力水平下,3 种沥青混合料的稳态蠕变速率和应变大小均为:RAP+B>RAP+A>RAP,说明再生剂的掺入提升了沥青混合料的低温变形能力,且生物油基再生剂低温抗裂效果优于石油基再生剂;③ 随着应力水平的提高,RAP、RAP+A 的稳态蠕变速率近似呈线性降低,而在第二阶段 RAP+B 稳态蠕变速率先降低

后升高,这主要是由于 RAP+B 过早进入蠕变破坏期导致。

3 结果与讨论

3.1 Burgers 模型

沥青混合料的变形特征是其内在黏弹性的外在表现,研究再生沥青混合料在低温蠕变过程中黏弹性变化有助于从本质上了解和解释其低温变形行为。基于 Burgers 模型可以得到沥青混合料的黏弹特性,也反映沥青混合料的蠕变及应力松弛行为,具体公式如式(4)、(5)所示^[15]。

$$J(t)=\frac{\varepsilon(t)}{\sigma_0} \tag{4}$$

$$J(t)=\frac{t}{\eta_1}+\frac{1}{E_1}+\frac{1}{E_2}(1-e^{-\frac{E_2}{\eta_2}t}) \tag{5}$$

式中: $J(t)$ 为蠕变柔量; E_1 、 E_2 、 η_1 、 η_2 分别为弹性模量和黏性系数。

3.2 再生沥青混合料低温抗裂性分析

3.2.1 松弛时间

采用 1stOpt 软件对沥青混合料蠕变行为进行非线性拟合,可以得到 Burgers 模型参数 E_1 、 E_2 、 η_1 、 η_2 ,根据模型参数可以得到沥青混合料在不同应力水平下的松弛时间 $\tau=\eta_1/E_1$,Burgers 模型拟合参数及松弛时间计算结果列于表 6。

松弛时间是表征材料内部应力随时间变化的一个重要参数,松弛时间越短,表明材料消散内部应力的速度越快,低温抗裂性越好^[16]。从表6可以看到:再生剂的掺入显著降低了沥青混合料松弛时间,在 0.8、1.6、2.4 MPa 的应力水平下,石油基再生沥青混合料的松弛时间分别减少 45%、12%、8%,生物油基再生沥青混合料松弛时间分别减少 51%、14%、61%。同时,随着应力水平的提高,3 种沥青混合料的松弛时间均逐渐下降,已有研究表明:应力与温度具有等效效应,即温度越高、应力越大,混合料的蠕变应变越大^[17],相应的松弛时间则越短。

表 6 Burgers 模型拟合结果

混合料 类型	荷载水 平/MPa	E_1 /MPa	E_2 /MPa	η_1 /(MPa·s)	η_2 /(MPa·s)	τ /s
RAP	0.8	2 546.85	1 476.30	2 042 622.69	362 923.51	802.02
	1.6	5 460.96	1 972.16	2 429 652.28	515 510.59	444.91
	2.4	8 081.16	2 679.50	3 095 221.38	697 788.44	383.02
RAP+A	0.8	909.68	353.81	396 139.91	90 027.96	435.47
	1.6	1 335.38	368.03	521 343.09	131 251.11	390.41
	2.4	1 601.23	424.31	563 805.02	101 170.74	352.11
RAP+B	0.8	706.12	186.45	276 105.55	40 852.05	391.02
	1.6	960.23	209.69	367 072.08	11 968.38	382.28
	2.4	1 101.16	235.93	163 016.25	18 062.72	148.04

3.2.2 耗散能

在 Burgers 模型中,弹簧和黏壶分别用来表征材料的储存和消耗的能力,Johansson 等^[18]通过模型参数建立了材料储存能 $W_s(t)$ 和耗散能 $W_d(t)$:

$$W_s(t)=\sigma_0^2[\frac{1}{E_1}+\frac{1}{2E_2}(1-2e^{-\frac{E_2}{\eta_2}t}+e^{-\frac{2E_2}{\eta_2}t})] \tag{6}$$

$$W_d(t)=\sigma_0^2[\frac{t}{\eta_1}+\frac{1}{2E_2}(1-e^{-\frac{2E_2}{\eta_2}t})] \tag{7}$$

耗散能比为耗散能与储存能的比值,也是反映材料应力松弛能力的一个重要指标。耗散能比越大,沥青混合料的低温抗裂性越好。从公式可以看出耗散能比是时间的函数,该文选取沥青混合料处于稳态蠕变阶段中的状态(该文取 1 000 s)进行对比,以此分析掺

入再生剂前后沥青混合料的低温性能变化情况,计算结果如表 7 所示。

从表 7 可以看出:再生剂的掺入提高了沥青混合料的耗散能比,意味着再生剂的掺入加快了沥青混合料中能量的耗散,这对于及时释放温缩应力是极为有利的。随着应力水平的提高,沥青混合料耗散能比呈上升趋势,说明混合料越容易释放沥青混合料内部储存的能量。

4 结论

(1) 石油基再生剂与生物油基再生剂均提高了老

表 7 耗散能比计算结果(1 000 s)

混合料 类型	应力水 平/MPa	W_s / MPa	W_d / MPa	W_d/W_s
RAP	0.8	0.000 46	0.000 22	0.478
	1.6	0.001 09	0.000 65	0.596
	2.4	0.001 74	0.001 08	0.620
RAP+A	0.8	0.001 57	0.000 91	0.580
	1.6	0.004 99	0.003 47	0.695
	2.4	0.010 18	0.006 80	0.668
RAP+B	0.8	0.002 59	0.001 72	0.664
	1.6	0.008 77	0.006 11	0.696
	2.4	0.017 44	0.012 24	0.702

化沥青针入度、延度,降低了软化点,当掺量超过12%,再生剂的改善效果减弱,应当综合考虑经济与性能确定再生剂掺量。

(2) 再生剂改善了沥青混合料的黏弹性能,相同应力水平下,两种再生剂的掺入均提升了沥青混合料稳态蠕变速率与应变大小,减少了应力松弛时间,提高了耗散能比,沥青混合料回收料的低温抗裂性能得到显著增强。

(3) 随着应力水平的提高,沥青混合料稳态蠕变阶段应变增加(蠕变速率降低),松弛时间减少,耗散能比增加,沥青混合料更易产生变形而释放内部存储的能量。

参考文献:

[1] Bowers B F, Huang B, Shu X, et al. Investigation of Reclaimed Asphalt Pavement Blending Efficiency through GPC and FTIR[J]. Construction and Building Materials, 2014, 50(1): 517—523.

[2] Fakhri M, Amosoltani E, Aliha M R M. Crack Behavior Analysis of Roller Compacted Concrete Mixtures Containing Reclaimed Asphalt Pavement and Crumb Rubber [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2017, 180: 43—59.

[3] 王瑞涛,刘红,曹东伟. 再生纤维增强沥青路面低温抗裂性能评价[J]. 中外公路, 2012, 32(6): 123—127.

[4] 顾兴宇,姜严旭,周洲,等. 再生沥青低温抗裂性能评价

[J]. 建筑材料学报, 2018, 21(3): 523—528.

[5] 冯新军,陈旺, Ali Mokhtari, 等. 利用 Cryo—SEM 和图像处理技术评价老化和再生沥青低温抗裂性的新方法[J]. 中外公路, 2018, 38(5): 203—208.

[6] 曹青霞,魏定邦,赵静卓,等. 基于 G—R 常数的再生沥青低温抗开裂性能研究[J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(3): 905—910.

[7] 耿九光,戴经梁,陈忠达. 热再生沥青混合料低温抗裂性能全程评价[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2008, 32(6): 1 029—1 032.

[8] 何兆益,陈龙,陈先勇,等. 厂拌热再生沥青混合料力学性能及应用研究[J]. 建筑材料学报, 2016, 19(5): 871—875, 914.

[9] 陈龙,朱建勇,何兆益,等. 厂拌热再生沥青混合料低温抗裂与水稳定性研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2017, 36(4): 39—45, 76.

[10] 陈静云,王峻,刘佳音. 高比例 RAP 热再生沥青混合料低温抗裂性能[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2013, 29(5): 782—787.

[11] 侯睿,黄晓明,李海军. 再生工艺对热再生沥青混合料低温抗裂性能的影响[J]. 公路交通科技, 2007, 24(3): 10—14.

[12] JTG E20—2011 公路工程沥青及沥青混合料试验规程[S].

[13] 李曙斌. 试验条件对沥青胶浆流变特性影响研究[J]. 中外公路, 2018, 38(5): 246—249.

[14] 程永春,毕海鹏,马桂荣,等. 纳米 TiO₂/CaCO₃—玄武岩纤维复合改性沥青的路用性能[J]. 吉林大学学报(工学版), 2018, 48(2): 460—465.

[15] 李波,张喜军,李剑新,等. 基于 Burgers 模型的硬质沥青低温性能评价[J]. 建筑材料学报, 2021, 24(5): 1 110—1 116.

[16] 黄文柯,张丽娟,张肖宁,等. 沥青混合料蠕变柔量转换为松弛模量的研究[J]. 交通科学与工程, 2015, 31(3): 7—12.

[17] 裴建中,张久鹏,王秉纲. 沥青混合料时间—应力—温度等效研究[J]. 建筑材料学报, 2011, 14(5): 639—644.

[18] Johansson L S, Isacsson U. Effect of Filler on Low Temperature Physical Hardening of Bitumen[J]. Construction & Building Materials, 1998, 12(8): 463—470.