

# 再生沥青混合料路用性能研究

王明刚<sup>1</sup>, 孙静<sup>2</sup>

(1.林同棧国际工程咨询(中国)有限公司, 重庆市 401121; 2.重庆能源职业学院)

**摘要:** 针对 AC-25 型再生沥青混合料和新拌沥青混合料,通过劈裂强度试验、间接拉伸试验和三轴重复荷载试验对比分析了掺加 30%旧料的再生沥青混合料与新拌沥青混合料的路用性能。研究结果表明:在相同温度时,再生沥青混合料的劈裂强度和劲度模量均比新拌沥青混合料要大,水平变形略低。依据间接拉伸疲劳试验,新拌 AC-25 型沥青混合料的疲劳性能要优于再生 AC-25 型沥青混合料。建立了新拌和再生 AC-25 型沥青混合料的应力疲劳方程和应变疲劳方程,其拟合相关系数之平方均大于 0.91,相关性较好。在温度 60℃、相同应力水平下,再生 AC-25 沥青混合料的永久应变小于新拌 AC-25 型沥青混合料,再生沥青混合料的抗永久变形性能优于新拌沥青混合料。建立了新拌和再生 AC-25 型沥青混合料在重复荷载作用下的黏弹性力学模型,相关系数达 0.99。

**关键词:** 道路工程; 再生沥青混合料; 劈裂强度; 疲劳性能; 永久变形

再生沥青混合料(RAP)是一种循环利用的资源,应用于高等级公路上,最主要的问题是疲劳性能和永久变形。文献[5]研究表明新加沥青的标号较高制备的再生混合料试件具有较好的疲劳性能;文献[6]建立

了再生沥青混合料虚应变能释放率和疲劳寿命的关系方程,并随着 RAP 掺量的增加,其疲劳性能下降;文献[7]建立了温拌再生沥青混合料的疲劳应变方程,其疲劳寿命大于普通热拌沥青混合料。目前相关文献研

由图 3 可知:3 种混合料试件的动稳定度随聚合磷酸掺量的增加而逐渐增大,说明聚合磷酸能够有效提高试件的高温性能。克拉玛依 70# 沥青混合料、70# A 级道路石油沥青混合料、弘润 70# 沥青混合料中聚合磷酸的最佳添加剂量分别为 1.25%、1.25%、1.00%。3 种不同的沥青混合料,聚合磷酸在最佳添加剂量条件下,其试件的高温性能最优的是弘润 70# 改性沥青混合料,动稳定度性能类似于试件的 Marshall 残留稳定度。

## 4 结论

(1) 聚合磷酸能够有效提高沥青混合料的水稳定性、抗老化性能和高温性能。

(2) 添加聚合磷酸的克拉玛依 70# 沥青混合料,在添加剂量为 1.25%时,试件的残留稳定度、劈裂强度比和动稳定度均达到最优性能。

(3) 添加聚合磷酸的弘润 70# 沥青混合料,在掺

量为 1.00%时,试件的残留稳定度增长率和动稳定度增长率达到最大值;在掺量为 1.25%时,试件的劈裂强度比降低率达到最大值。

(4) 在多雨地区,沥青路面建议采用克拉玛依 70# 沥青,且聚合磷酸的添加剂量为 1.25%;在夏季高温或者交通量较大的路段,建议采用弘润 70# 沥青,且聚合磷酸掺量为 1.00%。

## 参考文献:

- [1] 宋小金,樊亮.多聚磷酸与 SBS 复合改性沥青混合料的路用性能研究[J].中外公路,2016(4).
- [2] 丁海波,周刚,王火明.多聚磷酸对沥青化学组分与路用性能的影响[J].中外公路,2014(4).
- [3] 余文科.多聚磷酸改性沥青的研究[D].重庆交通大学硕士学位论文,2011.
- [4] 张增平,贾猛,魏龙,等.多聚磷酸改性沥青的研究进展[J].中外公路,2016(2).
- [5] JTG E20-2011 公路工程沥青及沥青混合料试验规程[S].

收稿日期:2018-04-10

基金项目:河北省高等学校科学技术研究重点项目(编号:ZD2017226);河北省科技计划项目(编号:16211249)

作者简介:王明刚,男,硕士,高级工程师.E-mail:35561568@qq.com

究再生沥青混合料的疲劳性能较多,而对再生沥青混合料的永久变形性能研究报道较少。该文以 AC-25 型再生沥青混合料为基础,通过劈裂强度试验、间接拉伸试验和三轴重复荷载试验对比分析新拌沥青混合料和再生沥青混合料的劈裂强度、疲劳性能和永久变形等路用性能,为再生沥青混合料的应用提供指导和参考。

## 1 试验准备

### 1.1 原材料

采用中海 AH-70# 沥青,其技术性能指标满足规范规定要求。粗集料为碱性石灰岩,细集料为石灰岩石屑。填料采用碱性石灰岩矿粉。其技术性能指标均满足规范规定要求。

### 1.2 配合比

设计新拌 AC-25 型沥青混合料和再生 AC-25 型沥青混合料,其中再生沥青混合料掺旧料的量为 30%。级配曲线如图 1 所示。

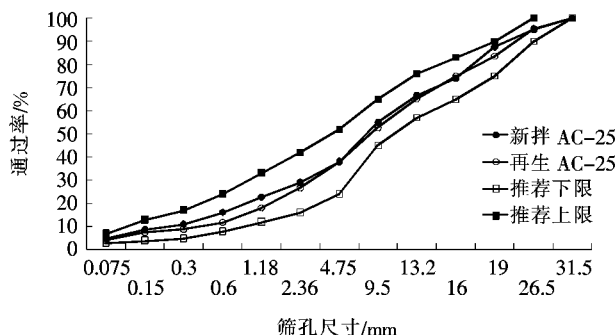


图 1 沥青混合料级配曲线

通过马歇尔试验确定了新拌 AC-25 型沥青混合料的最佳油石比为 3.9%;通过抽提试验测得旧沥青混合料中沥青含量为 4.2%,以 90# 沥青作为新加沥青再生旧沥青混合料,提升路用性能。根据式(1)计算得新沥青比例为 0.682。掺加 30%旧料的再生沥青混合料的最佳油石比为 4.2%。

$$\lg \lg \eta_{\text{mix}} = (1-\alpha) \lg \lg \eta_{\text{old}} + \alpha \lg \lg \eta_{\text{new}} \quad (1)$$

式中: $\eta_{\text{mix}}$ 为混合后沥青 60℃的黏度(Pa·s); $\eta_{\text{old}}$ 为旧沥青 60℃的黏度(Pa·s); $\eta_{\text{new}}$ 为新沥青 60℃的黏度(Pa·s); $\alpha$ 为新沥青比例。

## 2 力学性能

劈裂强度是评价沥青混合料力学性能的重要指

标,同时也是沥青路面结构设计重要的技术参数。

劈裂试验采用圆柱体试件,旋转压实法成型,试件直径 101.6 mm、高(40±2) mm。试验温度 10、20 和 30℃。加载速率 50 mm/min。压条宽度  $\alpha = 12.7$  mm。劈裂试验可以较准确地测量试件的垂直变形  $y_T$ ,但测量试件中部水平变形时存在一定困难,不同试验条件下的试件水平变形  $x_T$ 、劲度模量按式(2)、(3)计算:

$$x_T = \frac{y_T(0.135 + 0.5\mu)}{1.794 - 0.0314\mu} \quad (2)$$

$$S_T = P \frac{0.27 + \mu}{hx_T} \quad (3)$$

式中: $y_T$ 为垂直变形(mm); $\mu$ 为泊松比; $P$ 为破坏荷载(N); $h$ 为试件高度(mm)。

劈裂试验计算公式采用的泊松比如表 1 所示。

表 1 劈裂试验泊松比

试验温度/℃	泊松比 $\mu$	试验温度/℃	泊松比 $\mu$
10	0.25	30	0.45
20	0.35		

不同温度下试件的劈裂强度、水平变形、劲度模量分别如图 2~4 所示。

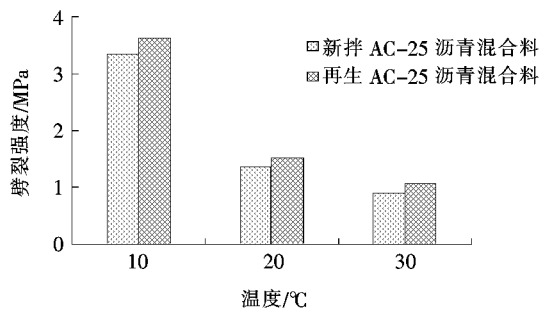


图 2 劈裂强度试验结果

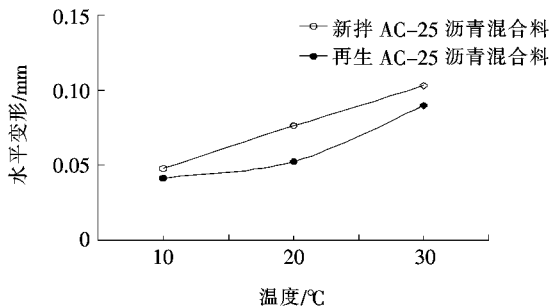


图 3 劈裂试验水平变形

由图 2~4 可知:在温度 10、20 和 30℃时,掺加 30%旧料的再生 AC-25 型沥青混合料的劈裂强度和

劲度模量均较新拌沥青混合料大,水平变形略低。在温度 10、20 和 30 °C 时,再生 AC-25 型沥青混合料的劈裂强度分别提高了 8.3%、10.9% 和 18.7%,劲度模量分别提高了 25.9%、61.6% 和 36.2%。该现象主要是由于再生沥青混合料比新拌沥青混合料更加硬脆,掺入 30% 旧料后使再生混合料的劲度模量增大,故劈裂强度增大、试件变形降低。

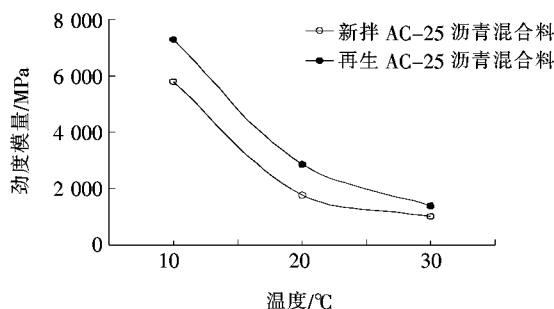


图 4 劈裂试验劲度模量

### 3 疲劳性能

疲劳破坏是沥青路面最主要的破坏形式,因此,非常有必要进一步对比分析再生沥青混合料(RAP)与新拌沥青混合料的疲劳性能。间接拉伸试验适用于测定一定温度和加载频率条件下沥青混合料的疲劳性能。该文间接拉伸疲劳试验所用的设备为 CRT-NU14 气动伺服试验机。

#### 3.1 试验方案

##### 3.1.1 荷载加载模式

沥青混合料室内疲劳试验加载模式包括应力控制和应变控制两种。研究表明:当基层刚度较大或者路面厚度较小时,沥青混合料的受力状态与应变控制模式下相近,反之,与应力控制模式下相近。由于该文研究主要针对高速公路沥青路面结构,面层较厚,故采用应力控制模式作为荷载加载模式。

##### 3.1.2 加载波形和加载频率

研究表明:半正弦波加载波形更接近于路面的实际受力状态,且加载频率越高,材料的疲劳寿命越长。加载频率为 10 Hz 时,试件受力状态接近于车辆行驶速度 65 km/h。故该文选择的加载波形为半正弦波,加载频率为 10 Hz。

##### 3.1.3 应力水平

应力水平是沥青混合料的疲劳寿命至关重要的影响因素。随着应力水平的增大,沥青混合料的疲劳寿命不断减少。为了更接近路面的实际受力情况,该文

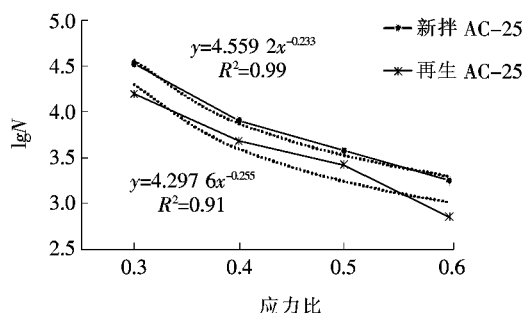
选取应力比为 0.3、0.4、0.5、0.6。

#### 3.1.4 试验温度

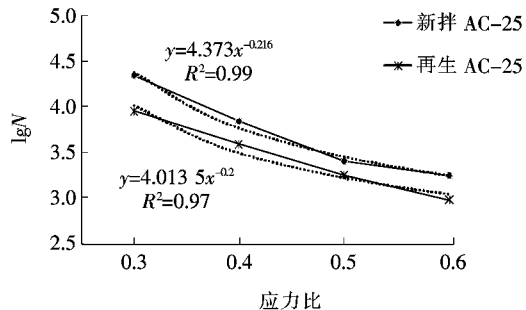
沥青混合料是一种典型的黏弹性材料,其力学特性对荷载作用时间和温度具有较强的依赖性。为了更好地揭示沥青混合料的疲劳性能,应合理选择试验温度。研究表明:15 °C 疲劳试验能够较好地反映沥青的黏弹塑性。该文试验温度为 10、20 和 30 °C,覆盖了更宽的路面温度。

#### 3.2 试验结果

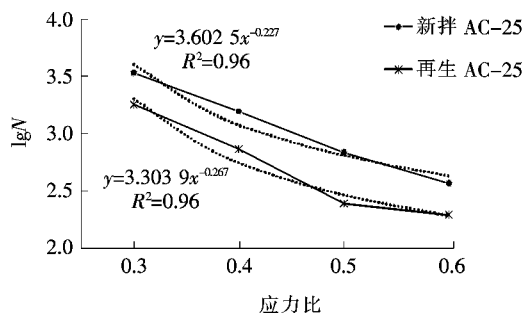
参加 30% 旧料的 AC-25 型再生沥青混合料与新拌沥青混合料的疲劳试验结果如图 5 所示。



(a) 10 °C



(b) 20 °C



(c) 30 °C

图 5 不同温度时沥青混合料疲劳曲线

选用经典的应力疲劳方程,如式(4)所示。结合图 5,建立不同温度下新拌和再生 AC-25 型沥青混合料的疲劳方程,相关系数最小值为 0.91,从而可以预测不同应力、不同温度情况下的疲劳寿命:

$$N = K \left( \frac{1}{\sigma_0} \right)^n \quad (4)$$

式中:  $N$  为荷载作用次数(次);  $\sigma_0$  为应力(MPa);  $K$ 、 $n$  为拟合参数。

由图 5 可知:在相同温度下,新拌 AC-25 型沥青混合料的疲劳性能要优于再生 AC-25 型沥青混合料。

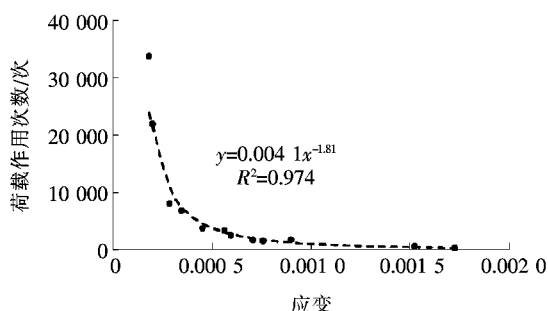
为了更好地分析再生沥青混合料的疲劳性能,该文同时进行了应变疲劳方程的研究。采用经典的应变疲劳方程如式(5)所示。根据线弹性理论中的胡克定律可推导出水平方向最大应变方程如式(6)所示。

$$N = K \left( \frac{1}{\epsilon} \right)^n \quad (5)$$

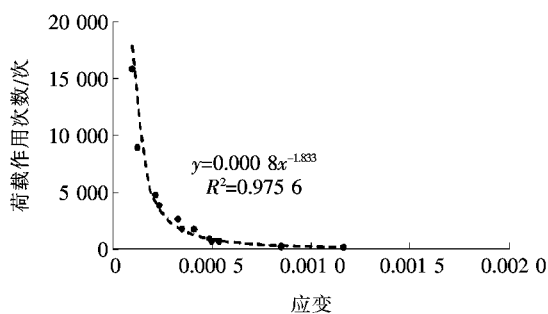
$$\epsilon = \frac{x_T(1+3\mu)}{\pi R(0.27+\mu)} \quad (6)$$

式中:  $\epsilon$  为水平应变;  $R$  为截面半径(mm)。

根据式(5)计算的水平最大应变和试验得到的疲劳寿命,绘制新拌和再生 AC-25 型沥青混合料的应变疲劳曲线(图 6)。



(a) 新拌 AC-25 型沥青混合料



(b) 再生 AC-25 型沥青混合料

图 6 应变疲劳方程

由图 6 可知:沥青混合料应变疲劳方程消除了温度的影响,疲劳应变方程呈现较高的相关性,为沥青路面不同温度下疲劳寿命预估提供了支撑。

#### 4 永久变形性能

永久变形是沥青路面最主要的病害之一,严重降

低路面的服务质量,威胁行车安全。该文通过三轴重复加载试验分析新拌和再生 AC-25 型沥青混合料的永久变形性能。

三轴重复加载试验采用圆柱体试件,采用旋转压实仪(SGC)搓揉成型,钻芯取样后直径 100 mm,高度 150 mm。试验温度为 60 ℃,围压为 138 kPa,加载波形为半正弦波,轴向加载频率为 1 Hz,加载时间为 0.1 s,荷载间歇时间为 0.9 s。试验之前,采用预应力 15 kPa 进行预压,取荷载作用次数为 10 000 次或永久应变为 5%时试验停止。

在温度 60 ℃时不同偏应力下新拌和再生 AC-25 型沥青混合料永久应变曲线如图 7 所示。

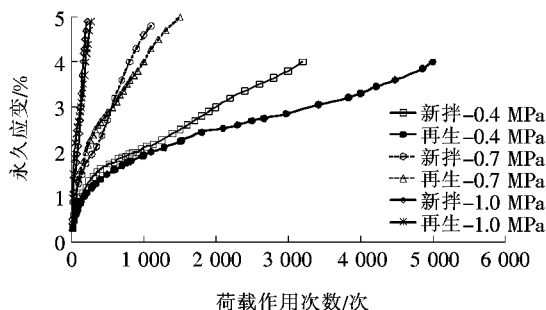


图 7 60 ℃时新拌和再生 AC-25 型沥青混合料永久应变曲线

由图 7 可知:新拌和再生沥青混合料均随着荷载作用次数的增多,永久应变逐渐增大;相同沥青混合料在温度 60 ℃下,均随着应力水平的增大,永久应变增大;在温度 60 ℃、相同应力水平下,再生 AC-25 沥青混合料的永久应变小于新拌 AC-25 型沥青混合料。由此可见,再生沥青混合料的抗永久变形性能要优于新拌沥青混合料。

重复荷载作用下沥青混合料黏弹性力学模型,如式(7)所示。

$$\epsilon_{P,N} = \sigma_0 P_0 (1 - e^{-0.2 P_2 N}) + \sigma_0 P_3 (1 - e^{-P_4 N}) \quad (7)$$

式中:  $\epsilon_{P,N}$  为永久应变;  $\sigma_0$  为偏应力(MPa);  $N$  为荷载作用次数(次);  $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_3$ 、 $P_4$  为拟合参数。

采用式(7)对图 7 中的试验数据进行拟合,采用 1stOpt15 软件进行拟合,可得 60 ℃时新拌和再生 AC-25 型沥青混合料黏弹性力学模型拟合参数,结果如表 2 所示。

新拌和再生 AC-25 型沥青混合料黏弹性力学模型拟合曲线和实测曲线对比分别如图 8、9 所示。

由表 2、图 8、9 可知:新拌和再生 AC-25 型沥青混合料黏弹性力学模型拟合曲线和实测曲线吻合较好,相关系数达 0.99,该模型能够精确地表达沥青混合料永久变形的规律,可用于沥青路面永久变形的计算

表 2 沥青混合料黏弹性力学模型拟合参数

混合料 类型	偏应力/ MPa	拟合参数				相关系 数 $R$
		$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$	
新拌 AC-25	0.4	$7.34 \times 10^8$	$1.47 \times 10^{11}$	3.11	$1.06 \times 10^{-2}$	0.99
	0.7	1.27	$1.26 \times 10^{-1}$	42.98	$1.31 \times 10^{-4}$	0.99
	1.0	$9.42 \times 10^8$	$1.14 \times 10^{-10}$	0.33	$2.18 \times 10^8$	0.99
再生 AC-25	0.4	3.18	$3.75 \times 10^{-2}$	17.47	$9.13 \times 10^{-5}$	0.99
	0.7	27.04	$6.59 \times 10^{-4}$	2.39	$1.18 \times 10^{-2}$	0.99
	1.0	$8.32 \times 10^8$	$7.69 \times 10^{-11}$	1.41	$4.52 \times 10^{-2}$	0.99

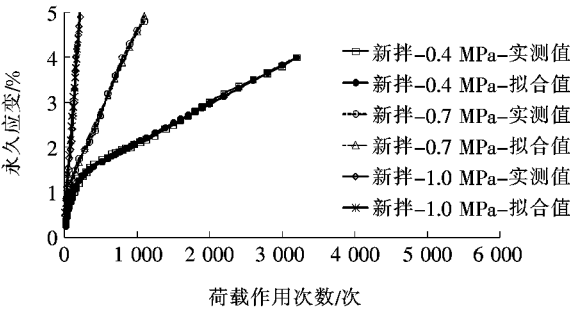


图 8 新拌 AC-25 型沥青混合料黏弹性力学模型拟合曲线和实测曲线对比

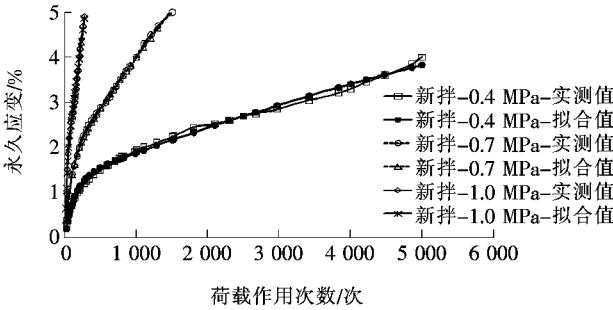


图 9 再生 AC-25 型沥青混合料黏弹性力学模型拟合曲线和实测曲线对比

与预估。

5 结论

(1) 在相同温度时,再生沥青混合料的劈裂强度和劲度模量均比新拌沥青混合料要大,水平变形略低。再生 AC-25 型沥青混合料比新拌 AC-25 型沥青混合料的劈裂强度、劲度模量分别提高了 10%~20% 和 25%~60%。

(2) 依据间接拉伸疲劳试验,在温度 10、20 和 30

℃下,新拌 AC-25 型沥青混合料的疲劳性能要优于再生 AC-25 型沥青混合料。建立了新拌和再生 AC-25 型沥青混合料的应力疲劳方程和应变疲劳方程,其拟合相关系数  $R^2$  均大于 0.91,相关性较好。

(3) 在温度 60 ℃、相同应力水平下,再生 AC-25 型沥青混合料的永久应变小于新拌 AC-25 型沥青混合料。再生沥青混合料的抗永久变形性能要优于新拌沥青混合料。

(4) 建立了新拌和再生 AC-25 型沥青混合料重复荷载作用下的黏弹性力学模型,相关系数达 0.99,可为再生沥青混合料路面永久变形预估提供参考。

参考文献:

[1] 肖庆一,张靖洁,李宁利,等.100%RAP 的温拌再生沥青混合料的路用性能研究[J].中外公路,2017(3).

[2] 查旭东,闵斌,宋微.RAP 掺量对热再生沥青混合料性能影响分析[J].长沙理工大学学报:自然科学版,2013(4).

[3] 董文龙,杨群,黄文元.美国沥青路面回收旧料(RAP)利用的行业调查[J].中外公路,2014(3).

[4] 张志祥,吴建浩.再生沥青混合料疲劳性能试验研究[J].中国公路学报,2006(2).

[5] 李明欣,王选仓.新加沥青标号对高掺量 RAP 再生混合料强度及疲劳性能的影响[J].长安大学学报:自然科学版,2017(3).

[6] 王超,张金喜.沥青结合料疲劳失效定义与失效准则[J].北京工业大学学报,2015(10).

[7] 杨丽英,谭忆秋,董雨明,等.温拌再生沥青混合料的疲劳性能[J].公路交通科技,2012(10).

[8] 赵毅,梁乃兴,秦旻,等.PR-Module 改性沥青混合料力学性能[J].长安大学学报:自然科学版,2015(4).

[9] 赵毅,梁乃兴,舒国明,等.沥青路面永久变形预估研究[J].建筑材料学报,2016(6).