

文章编号:1005-0523(2019)04-0048-09

就地热再生沥青混合料水稳定性非线性分析

仰建岗,姚玉权,郭 彧,蒋 煜

(华东交通大学交通运输与物流学院,江西 南昌 330013)

摘要:就地热再生开放性施工,施工温度不稳定,级配、沥青性质不均匀,使得路面质量受碾压温度、再生剂、温拌剂3种因素的影响较大,其突出的问题为路面水稳定性,主要表征的指标为冻融劈裂抗拉强度、劈裂抗拉强度、冻融劈裂抗拉强度比。通过采用正交试验方法,利用极差与方差分析计算3种因素影响的程度,回归出非线性模型评价因素与水稳定性的变化规律。结果表明:碾压温度对冻融劈裂抗拉强度、劈裂抗拉强度指标的影响程度最高,再生剂次之,温拌剂最小,而再生剂对冻融劈裂抗拉强度比指标的影响程度最高,温拌剂次之,碾压温度最小。并提出了采用交叉模型作为回归碾压温度、再生剂、温拌剂与水稳定性指标关系的模型,可用于实测现场实际的碾压温度,估算再生剂及温拌剂的最佳掺量,以保障再生沥青路面水稳定性满足要求。

关键词:沥青路面;就地热再生;水稳定性;正交试验;非线性分析

中图分类号:U416.2

文献标志码:A

沥青路面采用就地热再生技术可以一次性实现对一定范围内沥青路面表层病害进行处治,具有施工进度较快、交通影响低、100%利用原路面废旧材料的优点^[1-2]。但是,就地热再生后沥青路面路用性能受旧沥青路面材料(reclaimed asphalt pavement, RAP)特性、碾压温度、外加剂等因素影响较大,而这些因素不容易稳定均匀而使得再生沥青路面性能出现偏差。因此,相对于常规沥青混凝土,就地热再生沥青混凝土对施工控制的要求更高。

徐静,刘加平等^[3]分析了不同类型的再生剂与就地热再生沥青混合料路用性能的变化规律;郭乃胜,尤占平等^[4]认为再生剂对温拌再生沥青混合料的低温抗裂性能和水稳定性有显著改善作用;岳秀梅^[5]分析了不同再生剂对(styreneic block copolymers, SBS)老化沥青及热再生混合料性能的影响,得到了再生剂用量与沥青组分及劲度模量的变化规律;Tran N^[6]评估了再生剂对高RAP和(reclaimed asphalt shingles, RAS)混合物的长期路用性能的影响;Zaumanisa M^[7]研究了2种用量下的6种再生剂对再生沥青路面性能等级的影响;Farooq M A^[8]研究了最佳再生剂用量下温拌再生沥青混合料马歇尔指标的变化;Sabouri M^[9]评估了温拌再生沥青混合料的性能,并与具有相同RAP量的热拌沥青混合料的性能进行比较。综上所述,目前国内外在材料组成方面的单因素或双因素对再生沥青混合料性能的影响研究较多,而从材料和施工等环节的多因素对再生沥青混合料性能的综合影响规律性研究较少。

再生沥青混合料路用性能中关键问题是其水稳定性,其影响因素有级配、旧料性质,更主要的还是碾压温度、再生剂、温拌剂等。为了更好地探析再生沥青混合料在材料组成与施工工艺等方面水稳定性路用性能变化规律,有必要基于碾压温度、再生剂、温拌剂等因素,采用多指标正交试验、极差分析和非线性回归分析再生沥青混合料水稳定性的变化规律,从而建立影响因素与水稳定性的回归模型,提出以水稳定性为控制目标的碾压温度、再生剂和温拌剂的控制方法。

收稿日期:2018-10-12

作者简介:仰建岗(1979—),男,高级工程师,博士,研究方向为沥青路面养护技术研究。

1 试验设计及试验方法

1.1 试验设计

采用正交试验设计方法^[10-11],对碾压温度、再生剂、温拌剂3种因素的3种水平,确定了9种试验方案,测定了试件的空隙率、马歇尔稳定度、劈裂抗拉强度。根据碾压温度(A)、再生剂(B)、温拌剂(C)3个因素,模拟施工中各关键因素可能出现的变化范围,确定影响因素A的3个水平为 A_1 、 A_2 、 A_3 ,因素B、C以此类推。采用沥青抽提法对沥青路面上面层热耙松得到的RAP料进行老化程度分析,以沥青三大指标评价沥青的老化程度,同时测定再生剂及温拌剂等指标,结果见表1。考虑到再生剂用量为RAP掺量的0%~2%,温拌剂用量为再生沥青混合料中旧沥青总量的0%~6%。因此,确定影响因素A的水平为110℃(A_1)、130℃(A_2)、150℃(A_3),影响因素B的水平为0%(B_1)、1%(B_2)、2%(B_3),影响因素C的水平为0%(C_1)、3%(C_2)、6%(C_3)。其次,根据影响因素的水平及正交试验设计原则制作 $L_9(3^3)$ 型正交表,详见表2。最后,按照试验规程^[12],每种方案制作用于马歇尔试验的试件4个,劈裂试验的试件8个。

表1 原材料试验结果
Tab.1 Raw material test results

原材料	试验项目	结果
旧沥青	25℃针入度/mm	32
	5℃延度/cm	13
	软化点/℃	69
	动力粘度/(Pa·s)	1 624
再生剂	物力形态	淡黄色液体
	25℃密度/(g/cm ³)	0.815
	25℃比重	0.96
	20℃粘度/(Pa·s)	600~800
	类型	H
温拌剂	pH值	9.5±1
	胺值/(mg/g)	400~560
	固含量/%	≥9.5

表2 正交试验方案
Tab.2 Orthogonal test scheme

试验方案	因素水平			具体参数		
	A(碾压温度/℃)	B(再生剂/%)	C(温拌剂/%)	A(碾压温度/℃)	B(再生剂/%)	C(温拌剂/%)
1	1	1	1	110	0	0
2	1	2	2	110	1	3
3	1	3	3	110	2	6
4	2	1	2	130	0	3
5	2	2	3	130	1	6
6	2	3	1	130	2	0
7	3	1	3	150	0	6
8	3	2	1	150	1	0
9	3	3	2	150	2	3

1.2 试验材料与试件成型

试验采用的再生沥青混合料由上面层热耙松得到的RAP料、新沥青混合料(AC-13)、再生剂、温拌剂和SBS改性沥青拌和而成。其中,采用泉南高速石吉段上面层热耙松料作为RAP料,江西省泰和县玄武岩作为外加新料,江苏舒伯特公司RA-102型再生剂,Evotherm温拌剂。外加SBS改性沥青用量为总沥青用量与老化沥青、再生剂、温拌剂的差值;再生剂与温拌剂用量按照表2中各方案设计用量控制;再生沥青混合料的最大公称粒径为13.2mm。

根据贝雷法公称最大粒径的0.22倍确定再生沥青混合料级配的第I控制筛孔粒径为4.75mm^[13-15],试验采用10%新料添加比例设计合成级配,合成级配如图1所示。以粗、细集料的分形维数描述级配,得到粗、细集料的分形维数为2.500 6,2.523 5^[16-17]。根据设计级配,按照技术规范^[18],确定再生沥青混合料的最佳沥青含量,得到再生沥青混合料的最佳沥青含量为4.67%,外加新沥青混合料最佳沥青含量为5.12%。

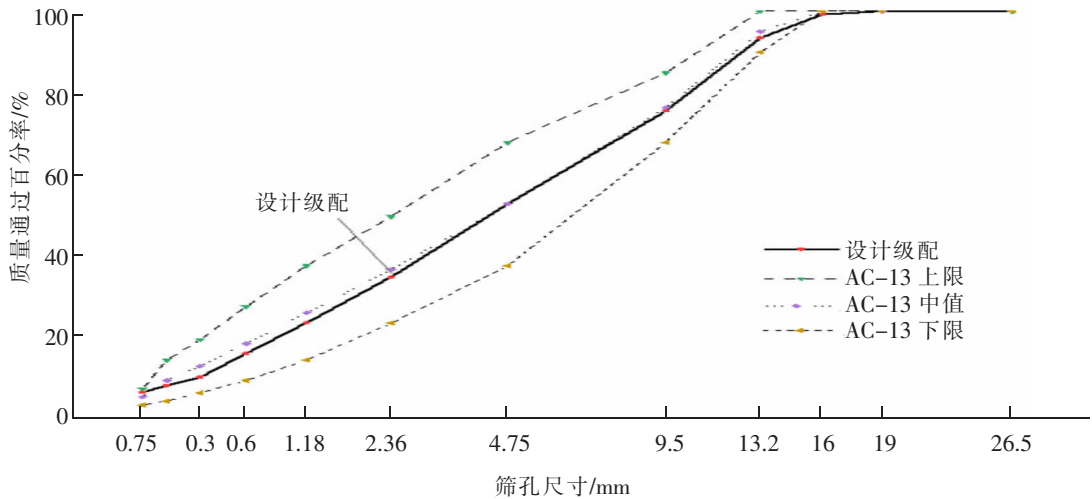


图1 合成级配曲线

Fig.1 Synthetic grading curve

1.3 试验方法

1) 压实沥青混合料密度试验(表干法):参照试验规程^[12],采用压实沥青混合料密度试验(表干法),将每种方案的马歇尔试件分别测定毛体积相对密度、空隙率等指标。

2) 沥青混合料冻融劈裂试验:参照试验规程^[12],采用沥青混合料冻融劈裂试验,将每种方案4个冻融试件与4个未冻融试件分别测算劈裂抗拉强度,并计算冻融试件与未冻融试件的劈裂抗拉强度比值。

2 试验结果及讨论

根据试验方案制作试件,试验得到其空隙率、冻融劈裂抗拉强度、劈裂抗拉强度、冻融劈裂抗拉强度比,结果见表3。

表3 空隙率及水稳定性指标的试验结果
Tab.3 Test results of air voids and moisture stability index

试验方案	试验指标			
	空隙率/%	冻融劈裂抗拉强度/MPa	劈裂抗拉强度/MPa	冻融劈裂抗拉强度比/%
1	6.80	1.55	1.64	94.51
2	5.98	1.34	1.43	93.71
3	5.48	1.22	1.31	93.13
4	6.00	1.45	1.68	86.31
5	5.61	1.61	1.78	90.45
6	5.32	1.45	1.46	99.32
7	5.21	1.98	2.09	94.74
8	5.34	1.57	1.77	88.70
9	4.22	1.56	1.68	92.86

表3表明,空隙率在110℃碾压温度下不满足规范^[18]要求。为分析3种因素对水稳定性指标的影响程度,需要采用极差与方差分析法量化分析各因素的影响程度。同时,为了分析各因素变化对冻融劈裂抗拉强度、劈裂抗拉强度、冻融劈裂抗拉强度比的影响规律,需要建立非线性回归模型进行分析。

2.1 极差与方差分析

计算各指标下3个关键因素的极差,结果见表4。其中,关键因素的极差越大,表示该因素对水稳定性的性能指标影响越大,反之影响越小。

表4 试验指标的极差分析结果
Tab.4 Results of range analysis of test indicators

因素	极差分析	A(碾压温度/°C)	B(再生剂/‰)	C(温拌剂/‰)
空隙率	极差	1.163 3	1.000 0	0.416 7
	最优水平	A ₃	B ₃	C ₂
	主次顺序	A > B > C		
冻融劈裂抗拉强度	极差	0.333 3	0.250 0	0.153 3
	最优水平	A ₃	B ₁	C ₁
	主次顺序	A > B > C		
劈裂抗拉强度	极差	0.386 7	0.320 0	0.130 0
	最优水平	A ₃	B ₁	C ₃
	主次顺序	A > B > C		
冻融劈裂抗拉强度比	极差	1.758 1	4.148 6	3.218 3
	最优水平	A ₁	B ₃	C ₁
	主次顺序	B > C > A		

表4中极差及主次顺序评定结果表明:就空隙率、冻融劈裂抗拉强度、劈裂抗拉强度指标,3种因素影响程度相似,由高到低依次为碾压温度、再生剂和温拌剂;就冻融劈裂抗拉强度比指标,其影响顺序由高到低依次为再生剂、温拌剂和碾压温度。

为分析各因素水平对试验结果影响的波动情况,将试验结果同时采用方差分析方法进行处理。为定量评价各因素显著性水平,分别采用0.1,0.05和0.01进行评价。假设因素A的F值为 F_A , n_1 和 n_2 分别表示影响因素和误差的自由度。则:当 $F_A > F_{0.01}(n_1, n_2)$ 时表示A因素的水平变化对试验结果影响极显著,计作“+++”;当 $F_{0.01}(n_1, n_2) > F_A > F_{0.05}(n_1, n_2)$ 时表示A因素的水平变化对试验结果影响显著,计作“++”;当 $F_{0.05}(n_1, n_2) > F_A > F_{0.1}(n_1, n_2)$ 时表示A因素的水平变化对试验结果有一定影响,计作“+”;当 $F_{0.1}(n_1, n_2) > F_A$ 时表示A因素的水平变化对试验结果影响不显著。

本次试验的影响因素自由度 $n_1=2$,误差自由度 $n_2=2$ 。查F分布表可知 $F_{0.01}(2, 2)=99.01$, $F_{0.05}(2, 2)=19.0$, $F_{0.1}(2, 2)=9.0$ 。计算各指标下3个关键因素的方差,结果见表5。

表5 试验指标的方差分析结果
Tab.5 Results of variance analysis of test indicators

方差来源	试验指标	偏差平方和	自由度	F值	显著性
空隙率	A	2.070	2	118.823	+++
	B	1.537	2	88.241	++
	C	0.324	2	18.598	+
	误差	0.017	2	--	--
冻融劈裂抗拉强度	A	0.169	2	2.958	不显著
	B	0.095	2	1.670	不显著
	C	0.035	2	0.618	不显著
	误差	0.057	2	--	--
劈裂抗拉强度	A	0.225	2	11.332	+
	B	0.154	2	7.777	不显著
	C	0.028	2	1.427	不显著
	误差	0.020	2	--	--
冻融劈裂抗拉强度比	A	5.925	2	0.092	不显著
	B	28.595	2	0.445	不显著
	C	15.604	2	0.243	不显著
	误差	64.227	2	--	--

比较表4与表5得到极差分析结果与方差分析结果一致。分析3种因素对各指标的影响情况发现碾压温度、再生剂、温拌剂对空隙率影响均显著,而冻融劈裂抗拉强度、劈裂抗拉强度、冻融劈裂抗拉强度比指标中,仅有碾压温度对劈裂抗拉强度指标有一定影响,其他均影响不显著。

2.2 非线性回归模型的建立

用 x_1, x_2, x_3 表示碾压温度、再生剂与温拌剂,用 y_1, y_2, y_3 表示冻融劈裂抗拉强度、劈裂抗拉强度、冻融劈裂抗拉强度比。采用二次回归方程建立数学模型^[19-20],模型主要包括常数项、一次项、交叉项和平方项,数学关系见式(1)

$$y = b_0 + \sum_{j=1}^p b_j x_j + \sum_{i < j} b_{ij} x_i x_j + \sum_{j=1}^p b_{jj} x_j^2 \quad (1)$$

式中: b_0, b_j, b_{ij}, b_{jj} 表示回归系数; b_0 表示常数项; b_j 表示一次项系数; b_{ij} 表示交叉项系数; b_{jj} 表示平方项系数。

由于模型中待估计的参数有 q 个,需要进行的试验次数应不少于 q 次,计算公式见式(2)

$$q = 1 + C_p^1 + C_p^2 + C_p^3 = C_{p+2}^1 \quad (2)$$

本次研究的变量个数 $p=3$,采用公式(2)计算得到确定所有变量需要进行的试验次数不应小于10次。由于正交试验设计的试验次数为9次,因此不能建立完全二次模型进行回归分析。分别对表6中的冻融劈裂抗拉强度、劈裂抗拉强度、冻融劈裂抗拉强度比数据进行拟合,拟合模型分别选择二次回归方程中的线性、交叉、纯二次回归模型,并采用最小二乘法计算模型中的回归系数,以拟合优度(R^2)与剩余标准差(S)进行模型的可靠性评价,选择最优模型。剩余标准差的计算公式见式(3)

$$S = \sqrt{\frac{Q}{f_Q}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n-2}} \quad (3)$$

式中: Q 表示残差平方和; f_Q 表示残差自由度。

为便于回归分析,采用对数函数对温度数据进行预处理,计算见式(4)

$$x_1 = \ln(T) \quad (4)$$

式中: T 表示施工中实际监测的碾压温度。

计算冻融劈裂抗拉强度、劈裂抗拉强度、冻融劈裂抗拉强度比分别在线性、交叉、纯二次回归模型中的 R^2 与 S ,结果见表6。

表6 拟合优度(R^2)与剩余标准差(S)计算结果

Tab.6 Calculation results of goodness of fit (R^2) and residual standard deviation (S)

性能指标	模型	R^2	S
冻融劈裂抗拉强度	线性	0.750	0.133 6
	纯二次	0.840	0.169 0
	交叉	0.937	0.105 7
劈裂抗拉强度	线性	0.919	0.083 3
	纯二次	0.954	0.099 6
	交叉	0.956	0.096 7
冻融劈裂抗拉强度比	线性	0.204	0.042 7
	纯二次	0.423	0.057 4
	交叉	0.978	0.011 2

表 6 表明,各项性能指标采用交叉模型得到的拟合优度最高,剩余标准差最小。因此通过构造交叉模型对影响因素和评价指标进行回归分析,得到回归模型

$$y_1 = -1.034 0 + 0.546 1 \times x_1 + 3.588 3 \times x_2 - 2.464 8 x_3 - 0.753 6 \times x_1 \times x_2 + 0.501 0 x_1 \times x_3 + 0.023 1 \times x_2 \times x_3 \quad (5)$$

$$y_2 = -2.833 6 + 0.948 1 \times x_1 + 1.058 1 \times x_2 - 1.181 6 x_3 - 0.250 0 \times x_1 \times x_2 + 0.241 5 x_1 \times x_3 + 0.018 3 \times x_2 \times x_3 \quad (6)$$

$$y_3 = 1.928 9 + 0.209 6 \times x_1 + 1.513 8 \times x_2 - 0.791 9 x_3 - 0.301 8 \times x_1 \times x_2 + 0.160 3 x_1 \times x_3 + 0.002 6 \times x_2 \times x_3 \quad (7)$$

2.3 各因素的作用分析

受设备作业和外界环境影响,就地热再生的碾压温度在一定范围内作为实时记录数据。因此,有必要根据碾压温度的不同,而对应调整再生剂以及温拌剂用量,以确保就地热再生沥青路面目标水稳定性。将碾压温度分 110,130,150 ℃三档,分析再生剂用量在 0‰~2‰以及温拌剂用量在 0‰~6‰范围内的冻融劈裂抗拉强度、劈裂抗拉强度、冻融劈裂抗拉强度比的变化规律。再生剂和温拌剂在三种碾压温度下对冻融劈裂抗拉强度的影响如图 2 所示,再生剂和温拌剂在三种碾压温度下对劈裂抗拉强度的影响如图 3 所示。

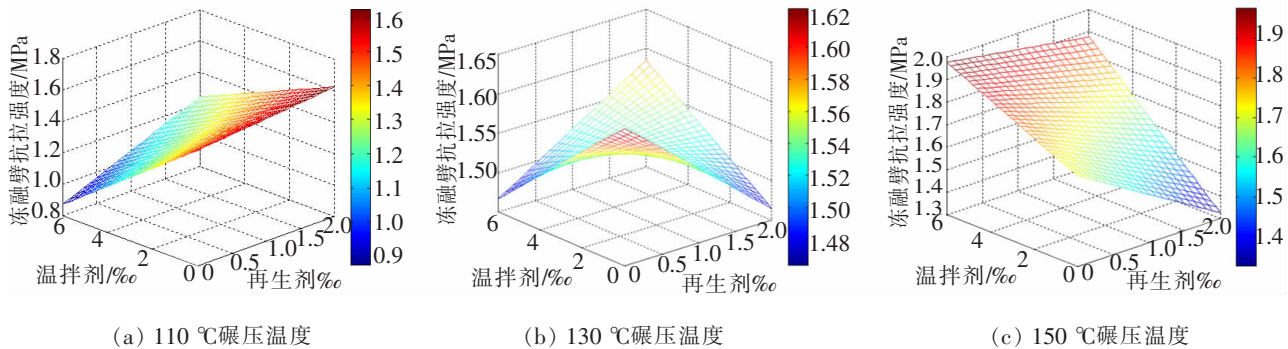


图 2 3 种碾压温度下再生剂和温拌剂对冻融劈裂抗拉强度的影响

Fig.2 Effect of rejuvenator and warm mixing agent on freeze-thaw splitting tensile strength at different temperatures

由图 2 可见,110 ℃与 150 ℃下,增加再生剂用量均可以提高冻融劈裂抗拉强度,而在 110 ℃时,增加温拌剂用量则会降低,150 ℃则会提高;130 ℃时温拌剂用量为 0‰~3‰时,增加再生剂用量将会降低冻融劈裂抗拉强度,而温拌剂用量在 3‰~6‰时,作用效果则反之。比较三种碾压温度下冻融劈裂强度,发现 110,130 ℃和 150 ℃时的最小值分别为 0.87,1.46 MPa 和 1.32 MPa,最大值分别为 1.61,1.62 MPa 和 1.98 MPa,可见冻融劈裂抗拉强度随碾压温度增大而提高,影响效果明显。

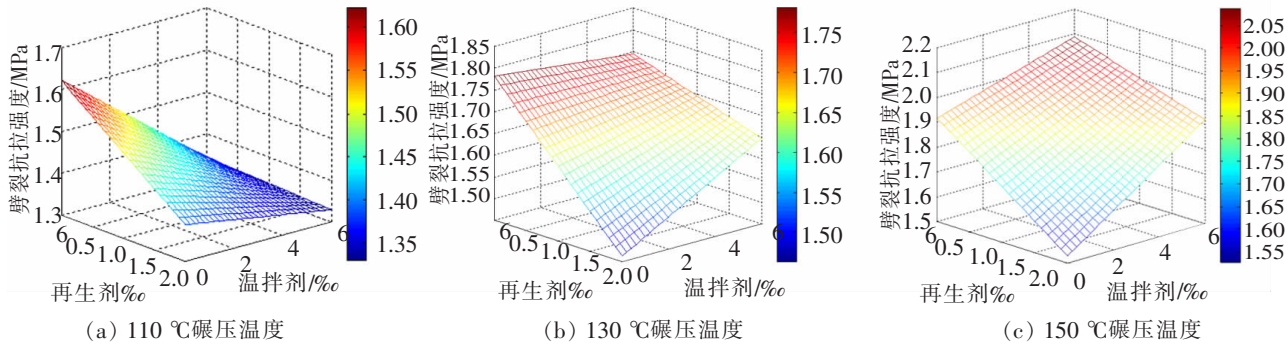


图 3 3 种碾压温度下再生剂和温拌剂对劈裂抗拉强度的影响

Fig.3 Effect of rejuvenator and warm mixing agent on splitting tensile strength at different temperatures

由图 3 可见,3 种碾压温度下,再生剂对劈裂抗拉强度的影响规律均随再生剂用量的增加而降低,而 110 ℃时劈裂抗拉强度会随着温拌剂用量的增加而降低,150 ℃时,作用效果则反之;130 ℃时再生剂用量为 0~0.5‰时,增加温拌剂用量将会降低劈裂抗拉强度,而再生剂用量为 0.5~2‰时,作用效果则反之。比较 3 种碾压温度下劈裂强度,发现 110,130 ℃和 150 ℃时的最小值分别为 1.38,1.46 MPa 和 1.53 MPa,最大值分别

为 1.62, 1.77 MPa 和 2.07 MPa, 可见劈裂抗拉强度指标随碾压温度的增大而提高, 影响效果明显。

3 种碾压温度下, 再生剂对冻融劈裂抗拉强度比的影响规律均随用量增加而提高, 而 110 °C 和 130 °C 下, 冻融劈裂抗拉强度比会随着温拌剂用量的增加而降低, 150 °C 时, 作用效果则反之。比较 3 种碾压温度下冻融劈裂抗拉强度比的数值范围, 发现 110, 130 °C 和 150 °C 时的冻融劈裂抗拉强度比最小值分别为 0.77、0.84 和 0.88, 最大值分别为 1.12、0.99 和 0.98, 理论上冻融劈裂抗拉强度比的最大值应不大于 1, 而实际计算结果已经大于 1 或者趋近于 1, 因此比较不同碾压温度对冻融劈裂抗拉强度比最大值的影响没有意义, 通过分析碾压温度对冻融劈裂抗拉强度比最小值的变化, 得到冻融劈裂抗拉强度比随碾压温度增大而提高, 影响效果明显。

综上所述, 提高碾压温度可以显著提高冻融劈裂抗拉强度、劈裂抗拉强度、冻融劈裂抗拉强度比指标, 改善沥青路面水稳定性。

综合图 2~图 3, 得到冻融劈裂抗拉强度、劈裂抗拉强度、冻融劈裂抗拉强度比与碾压温度、再生剂、温拌剂的关系, 详见表 7。

表 7 三大指标与影响因素作用规律

Tab.7 The relationship between three major indicators and influencing factors

指标	110 °C 碾压温度		130 °C 碾压温度		150 °C 碾压温度	
	温拌剂	再生剂	温拌剂	再生剂	温拌剂	再生剂
冻融劈裂抗拉强度	-1	1	0	0	1	-1
劈裂抗拉强度	-1	-1	0	-1	1	-1
冻融劈裂抗拉强度比	-1	1	-1	1	1	1

注: -1 表示再生剂/温拌剂对指标是降低的作用; 1 表示再生剂/温拌剂对指标是提高的作用; 0 表示指标受到再生剂和温拌剂的综合作用, 变化规律不一。

表 7 表明, 碾压温度在 110 °C 时, 温拌剂对冻融劈裂抗拉强度、劈裂抗拉强度、冻融劈裂抗拉强度比指标均起降低作用, 碾压温度在 150 °C 时, 温拌剂的作用效果则反之; 碾压温度在 130 °C 时, 温拌剂对冻融劈裂抗拉强度比指标起到降低的作用, 而劈裂抗拉强度受到再生剂和温拌剂的综合影响。碾压温度在 110~150 °C 时, 再生剂可以提高冻融劈裂抗拉强度比, 而对劈裂抗拉强度的作用效果则反之; 碾压温度在 110 °C 时, 再生剂可以提高冻融劈裂抗拉强度, 而碾压温度在 150 °C 时, 再生剂的作用效果则反之; 碾压温度在 130 °C 时, 冻融劈裂抗拉强度指标受再生剂和温拌剂的综合影响。

3 结论

以碾压温度、再生剂和温拌剂为影响因素, 以冻融劈裂抗拉强度、劈裂抗拉强度、冻融劈裂抗拉强度比指标为表征再生沥青路面水稳定性目标的评价指标。通过正交试验设计法, 确定了试验方案, 运用了极差、方差分析和非线性回归分析法, 建立了两者的非线性回归模型, 分析了不同碾压温度下, 再生剂和温拌剂对水稳定性指标的影响, 得出主要结论如下:

1) 碾压温度对空隙率、冻融劈裂抗拉强度、劈裂抗拉强度指标的影响程度最高, 再生剂次之, 温拌剂的影响程度最小。但是, 对于冻融劈裂抗拉强度比指标, 再生剂的影响程度最高, 温拌剂次之, 碾压温度的影响程度最小。

2) 碾压温度在 110~150 °C 时, 增加再生剂用量可以提高冻融劈裂抗拉强度比指标, 而再生剂对劈裂抗拉强度的作用效果则反之; 碾压温度在 110 °C, 增加再生剂用量可以提高冻融劈裂抗拉强度指标, 而 150 °C 时, 作用效果则反之; 碾压温度在 130 °C, 冻融劈裂抗拉强度受再生剂和温拌剂的综合影响。

3) 温拌剂的效果主要与碾压温度相关,碾压温度在 110 °C 时,温拌剂对冻融劈裂抗拉强度、劈裂抗拉强度、冻融劈裂抗拉强度比指标起到降低的作用,而碾压温度在 150 °C 时,温拌剂的作用则是逆向的。碾压温度在 130 °C 时,温拌剂对劈裂抗拉强度的作用受到再生剂的影响,而冻融劈裂抗拉强度比随温拌剂的增加而降低。

4) 再生沥青混合料的冻融劈裂抗拉强度、劈裂抗拉强度、冻融劈裂抗拉强度比受碾压温度影响明显,均随其增大而提高。

5) 施工中应根据现场实际的碾压温度,依据路面水稳定性的目标需求,采用式(5)~式(7)计算得到最优目标,可得到最佳的再生剂及温拌剂的添加量。

参考文献:

- [1] 马涛,李春雷,张建,等. 沥青路面就地热再生列车应用研究[J]. 北京工业大学学报,2011,37(1):126-130.
- [2] 黄俊,樊晓旭,孙晓峰,等. 就地热再生技术在沥青路面维修中的应用[J]. 筑路机械与施工机械化,2012,29(12):78-80.
- [3] 徐静,刘加平,洪锦祥. 再生剂对就地热再生沥青混合料的性能影响[J]. 公路,2013(8):290-293.
- [4] 郭乃胜,尤占平,赵颖华,等. 考虑再生剂作用的温拌再生沥青混合料路用性能[J]. 建筑材料学报,2015,18(4):674-681.
- [5] 岳秀梅. 再生剂对 SBS 老化沥青及热再生混合料性能的影响[J]. 公路工程,2016(3):78-84.
- [6] TRAN N, XIE Z, JULIAN G, et al. Effect of a recycling agent on the performance of high-RAP and high-RAS mixtures: field and lab experiments[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2017, 29(1):1-8.
- [7] ZAUMANIS M, MALLICK R B, FRANK R. Determining optimum rejuvenator dose for asphalt recycling based on superpave performance grade specifications[J]. Construction and Building Materials, 2014(69):159-166.
- [8] FAROOQ M A, MIR M S, SHARMA A. Laboratory study on use of RAP in WMA pavements using rejuvenator[J]. Construction and Building Materials, 2018, 168:61-72.
- [9] SABOURI M, CHOI Y T, WANG Y, et al. Effect of rejuvenator on performance properties of WMA mixtures with High RAP content[C]//8th RILEM International Symposium on Testing and Characterization of Sustainable and Innovative Bituminous Materials, 2016:473-484.
- [10] 彭刚. 基于正交试验的温拌橡胶沥青稳定性研究[J]. 华东交通大学学报,2016,33(5):12-17.
- [11] 薛永超,钱振东. 施工关键因素对环氧沥青混凝土路用性能的影响[J]. 交通运输工程学报,2016,16(3):17-27.
- [12] 中华人民共和国行业标准. 公路工程沥青与沥青混合料试验规程(JTG E20-2011)[S]. 北京:人民交通出版社,2011.
- [13] VAVRIK W, PINE W, CARPENTER S. Aggregate blending for asphalt mix design: bailey method[J]. Transportation Research Record:Journal of the Transportation Research Board, 2002, 1789:146-153.
- [14] PASETTO M, BALDO N. Fatigue performance of stone mastic asphalt designed with the bailey's method[J]. RILEM Bookseries, 2016, 11:1005-1016.
- [15] ZHU W, LI H Z, MA S R, et al. Application of bailey method for aggregate grading design of continuous dense gradation asphalt mixture[J]. Advanced Materials Research, 2012, 413:154-159.
- [16] 李波. 基于集料分形特征的沥青混合料配合比设计[J]. 武汉理工大学学报,2008,30(12):50-53.
- [17] 李艳春,张海峰,任金来. 沥青混合料级配分形研究[J]. 河北工业大学学报,2009,38(1):101-105.
- [18] 中华人民共和国行业标准. 公路沥青路面施工技术规范(JTG F40-2004)[S]. 北京:人民交通出版社,2004.
- [19] 刘红坡,艾长发,RAHMAN,等. 基于切-拉拔试验的沥青路面层间黏结性能研究[J]. 长安大学学报(自然科学版),2017,37(3):16-23.
- [20] 梁武韬. 试验数据与回归分析[J]. 土木工程学报,2005,38(8):1-4.

Nonlinear Analysis of Moisture Stability of Hot-in-Place Recycling Asphalt Mixture

Yang Jiangang, Yao Yuquan, Guo Yu, Jiang Yu

(School of Transportation and Logistics, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: The characteristics of hot-in-place recycling technology include open construction, unstable construction temperature, uneven gradation and asphalt properties, which cause the pavement quality to be greatly influenced by three factors such as rolling temperature, rejuvenators and warm mixing agent. The key problem of pavement quality is moisture stability, whose main indexes include the freeze-thaw splitting tensile strength, the splitting tensile strength, and the freeze-thaw splitting tensile strength ratio. The orthogonal test method was used to calculate the degree of influence of factors by using the range and variance analysis, and the change rule of the evaluation factors and moisture stability was evaluated by the regression of the nonlinear model. The results showed that effects on freeze-thaw splitting tensile strength and splitting tensile strength ranked as rolling temperature > rejuvenators > warm mixing agent. However, effects on freeze-thaw splitting tensile strength ratio ranked as rejuvenators > warm mixing agent > rolling temperature. The cross model was used to regress the relationship among rolling temperature, rejuvenators, warm mixing agent and water stability index, which may be applied to measure the actual rolling temperature at the site and estimate the optimum content of rejuvenators and warm mixing agent to ensure the moisture stability of recycled asphalt pavement to meet the requirements.

Key words: asphalt pavement; hot-in-place recycling; moisture stability; orthogonal test; nonlinear analysis