

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2017.02.002

基于正交设计法的橡胶沥青性能试验研究

郭寅川^{1,2}, 赵 宾¹, 申爱琴¹, 贾文涛¹, 张 铨¹

(1. 长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710064;

2. 路易斯安那州立大学路易斯安那州交通研究中心, 路易斯安那 巴吞鲁日 70803)

摘要: 为提高橡胶沥青的性能, 依托河北廊沧高速公路建设工程, 针对当地气候特征及材料性状, 借助正交试验优选橡胶沥青的9种正交组合, 并研究了胶粉掺量、胶粉目数、沥青型号对橡胶沥青3大指标的规律性影响。此外, 采用老化试验和布氏黏度试验, 评价了拌和时间以及拌和温度对橡胶沥青老化前后性能的影响程度。研究表明: 橡胶沥青正交试验各因素的显著性顺序为: 胶粉掺量>基质沥青型号>胶粉目数; 拌和时间 and 拌和温度对橡胶沥青老化性能影响显著, 因此在制备橡胶沥青的过程中需合理控制时间和温度; 选取90#、60目、胶粉含量为20%的橡胶沥青, 在190℃的环境下拌和60min, 能使橡胶沥青达到最佳性能; 建议橡胶沥青的性能评价指标以5℃延度和180℃黏度为主, 针入度和软化点为辅。

关键词: 道路工程; 橡胶沥青; 正交试验; 评价指标; 加工因素

中图分类号: U414

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268(2017)02-0007-08

Experimental Study on Performance of Rubber Asphalt Based on Orthogonal Design Method

GUO Yin-chuan^{1,2}, ZHAO Bin¹, SHEN Ai-qin¹, JIA Wen-tao¹, ZHANG Quan¹

(1. Key Laboratory of Highway Engineering in Special Region of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an Shaanxi 710064, China;

2. Louisiana Transportation Research Center, Louisiana State University, Baton Rouge Louisiana 70803, US)

Abstract: In order to improve the performance of rubber asphalt, relying on Langfang-Cangzhou expressway construction project in Hebei Province, according to the regional climate characteristics and material property there, 9 orthogonal combinations are selected preferably by orthogonal test, and the effect of rubber powder dosage, rubber powder mesh and asphalt type on the regularity of 3 major indexes of rubber asphalt is studied. In addition, the influences of mixing time and mixing temperature on the performance of rubber asphalt are evaluated using Brookfield viscosity test and aging test. The result shows that (1) the significant sequence of various factors affecting rubber asphalt's orthogonal test is rubber powder dosage > matrix asphalt type > rubber powder mesh; (2) mixing time and mixing temperature have significant effect on the performance of rubber asphalt, which should be controlled reasonably in the process of preparation of rubber asphalt; (3) the best performance of rubber asphalt can be made by choosing asphalt No.90 adding 60 mesh, 20% dosage rubber powder and mixing 60 minutes at 190℃. It is suggested that taking ductility at 5℃ and viscosity at 180℃ primarily, and needle penetration and softening point secondary as the evaluation index of rubber asphalt's performance.

Key words: road engineering; rubber asphalt; orthogonal test; evaluation index; processing factor

收稿日期: 2016-02-26

基金项目: 河北省交通运输厅科学技术项目计划项目(2010019)

作者简介: 郭寅川(1983-), 男, 江西九江人, 博士, 副教授。(84167573@qq.com)

0 引言

近年来,随着汽车行业的大力发展,我国已成为废旧轮胎产生量最大的国家,每年约有 2.6 亿条产生,近 950 万 t,如若“黑色垃圾”处理不当,必然会对生态环境造成严重影响^[1]。正因为这种巨大的生态压力,将废旧轮胎制成胎粉加入到沥青中进而改善沥青的性能^[2],受到国内外道路工作者的关注。研究表明,橡胶沥青路面具有行车成本低、降噪以及能抵抗低端气候^[3]的优点,因此研究橡胶粉对橡胶沥青性能的影响,具有十分重要的意义。为研究橡胶沥青性能的影响因素及相关变化规律,长安大学李晓燕、汪海年等^[4]分析了不同胶粉掺量对橡胶沥青高温、低温性能,并给出相应的评价指标;姚城熙等^[5]通过碳谱和氢谱试验,发现胶粉与沥青之间没有发生复杂的化学反应,仅表现为物理上的相似相容;肖川^[6]对橡胶沥青性能影响因素进行了总结,并指出施工工艺对橡胶沥青制备尤为关键。

考虑到橡胶沥青的制备受到多重影响因素的制约,加之橡胶粉与基质沥青的溶胀反应也较为复杂^[7],因此想通过研究单一因素或采用常规方法对橡胶沥青性能进行评价是不够的。本文在查阅国内外相关文献的基础上,借助正交设计法,设计 3 因素 3 水平的正交试验^[8],对橡胶沥青 3 大指标(针入度、软化点和延度)进行深入研究,优选出性能最佳的水平组合。此外,探讨拌和工艺对橡胶沥青性能的影响,从而选择合理的橡胶沥青搅拌温度及时间^[9]。

1 原材料及试验方案

1.1 试验原材料

针对河北当地的自然气候及施工常用材料,试验用沥青选用滨州中海 70[#], 90[#]和 110[#]这 3 种,以此研究橡胶沥青性能的变化规律,其中各项指标均符合规范要求;另外,试验用橡胶粉同样满足规范要求,相应技术指标见表 1。

表 1 废胎胶粉的技术性质(单位:%)

Tab.1 Technical property of waste tire rubber powder (unit:%)

项目	金属含量	水分	橡胶烃含量	灰分	丙酮抽出物	炭黑含量
技术标准	<0.05	<1	≥42	≤8	≤22	≥28
实测值	0.025	0.63	58	5	13	35
试验方法	—	—	—	GB 4498	GB/T 3516	GB/T 14837

1.2 试验方案

橡胶沥青的形成来自于橡胶粉和基质沥青的相

互作用,这种作用不仅存在物理作用又存在化学作用,并且废旧胎粉和基质沥青的化学成分不全相同,这就造成了二者的反应机理十分复杂^[10]。胶粉颗粒的加入,能吸收沥青组分中的轻质组分,在橡胶粉颗粒表面形成沥青质含量很高的凝胶膜,正是通过凝胶膜将分散于沥青中的橡胶颗粒连接成一个黏度很大的半固态连续相体系。

考虑到橡胶粉和基质沥青复杂的反应过程,加之影响橡胶沥青性能的因素众多,如胶粉目数、胶粉掺量、基质沥青型号、外掺剂因素、拌和工艺^[11]、搅拌时间、搅拌温度等,经总结归纳为两大类:材料因素和加工因素。本文首先从材料因素中挑选 3 种因素,设计 3 因素 3 水平正交试验方案,以胶粉掺量、胶粉目数、基质沥青型号为因素进行橡胶沥青性能的研究,从而确定其优选组合,其中正交方法设计的 $L_9(3^3)$ 试验方案见表 2;并分析了加工因素(搅拌时间和搅拌温度)对橡胶沥青老化前后性能的影响,从而确定最优的搅拌时间和搅拌温度,见表 3;最后综合材料因素和加工因素两方面的试验结果建议橡胶沥青性能的评价指标。

表 2 材料因素正交试验表

Tab.2 Material factors' orthogonal test table

编号	因素及水平		
	基质沥青型号	胶粉掺量/%	胶粉目数/目
ZJ-1	70	15	40
ZJ-2	70	20	60
ZJ-3	70	25	80
ZJ-4	90	15	60
ZJ-5	90	20	80
ZJ-6	90	25	40
ZJ-7	110	15	80
ZJ-8	110	20	40
ZJ-9	110	25	60

表 3 加工因素试验设计表

Tab.3 Design of processing factors' test

设计参数		加工因素	
		搅拌时间	搅拌温度
技术指标		15~90 min, 每 15 min 为一间隔	170~200 ℃, 每 10 ℃为一间隔
老化试验	老化前指标	√	√
	老化后指标	—	√
布氏黏度		√	√

注:√为在该因素影响下即将进行的试验指标。

2 材料因素对橡胶沥青性能的正交分析

采用针入度、软化点、延度作为评价橡胶沥青性能的主要指标,对正交试验表2中的9组橡胶沥青试样进行各性能指标测试,其测试结果如表4所示。

表4 橡胶沥青正交试验结果

Tab. 4 Orthogonal test result of rubber asphalt

编号	针入度 (25 ℃, 100 g, 5 s) / (0.1 mm)	软化点/℃	5 ℃延度/cm
ZJ-1	43.5	60.7	15.0
ZJ-2	40.7	62.8	21.9
ZJ-3	38.3	64.1	22.6
ZJ-4	49.4	61.2	19.3
ZJ-5	37.9	63.2	23.1
ZJ-6	35.7	65.3	25.7
ZJ-7	38.1	63.6	22.4
ZJ-8	36.5	63.8	23.8
ZJ-9	35.2	66.7	27.1

2.1 不同因素对橡胶沥青针入度变化趋势的影响

针入度是沥青主要的质量指标之一,表征沥青的软硬程度,是划分我国沥青标号的主要指标,在一定条件下反映沥青的相对黏度,针入度值越大,表明沥青愈软,反之愈硬。本文借助正交试验设计法,对选定的3种材料因素分析不同水平下对针入度的影响,如表4所示。从正交试验结果可以看出,针入度越小表明沥青越硬,抵抗剪切破坏的能力越强。3种不同因素条件下针入度指标随不同水平下的变化规律如图1所示,其中水平1代表基质沥青型号为70[#],胶粉掺量为15%,胶粉目数为40目;水平2代表基质沥青型号90[#],胶粉掺量为20%,胶粉目数60目;水平3代表基质沥青型号110[#],胶粉掺量为25%,胶粉目数80目。该注释同样应用于图2和图3。

不同影响因素水平下的变化趋势如图1所示,沥青针入度在基质沥青型号、胶粉掺量、胶粉目数3个因素影响下随不同水平的变化规律如下:

(1) 橡胶粉粒的加入使针入度明显降低,沥青变黏稠,究其原因主要是橡胶粉吸收沥青中的轻质组分(油分),从而使橡胶粉溶解在沥青中形成的胶凝物质增多,胶粉与胶粉之间的交联作用加强,橡胶沥青黏度就增大。

(2) 随着基质沥青型号的增加,其对针入度的

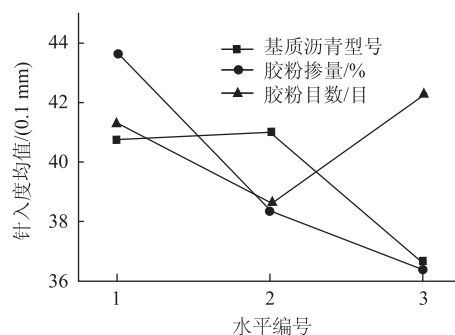


图1 针入度平均值随不同影响因素水平的变化规律

Fig. 1 Rules of average penetration varying with various influencing factors' levels

影响主要体现在高标号沥青上面,因为往70[#]和90[#]的基质沥青中掺入橡胶粉后,其针入度基本没有变化,但110[#]的基质沥青对针入度的影响较大,在标号变大的过程中针入度迅速下降,减少量为4.4。可见橡胶沥青如果应用在南方夏季高温地区并不是一味地追求低标号沥青,在高标号沥青中掺入橡胶粉可达到低标号沥青类似的效果。

(3) 随着胶粉掺量的递增,针入度逐渐下降,当掺量为25%时针入度最小,其值为36.4,但在针入度下降过程中出现一个拐点即胶粉掺量为20%,当掺量为15%~20%时下降较快,减少量为5.3,而处于20%~25%的掺量针入度降低趋势变缓,减少量为2。这一现象表明虽然胶粉的加入可改善沥青的针入度,从而提高沥青的黏稠度,但同样存在一个最佳掺量,掺量过小改善效果不明显,掺量过多导致多余胶粉并未与沥青较好地接触发育,并造成橡胶粉的浪费,因此生产商需要挑选合理的橡胶粉粒掺量,方可使制备出的橡胶沥青优质且经济。

(4) 随着胶粉目数的增大,针入度平均值逐渐减小,橡胶沥青愈发变硬,当达到60目时,针入度达到最小值为38.6,其后针入度增大,橡胶沥青变软,橡胶沥青随着目数的增大先软后硬的现象主要是因为随着胶粉目数增加,其胶粉粒径越小,比表面积越大,与沥青的溶胀反应就越充分,胶粉与胶粉之间的交联作用加强,橡胶沥青就越黏稠,针入度变小,沥青变硬;但是当目数超过一定范围时,橡胶颗粒脱硫和降解速率增大,其有效颗粒减少,造成橡胶沥青三维空间网络结构不稳定,最终沥青变软。

2.2 不同因素对橡胶沥青软化点变化趋势的影响

加入橡胶粉之后的沥青仍然是一种非晶质高分子材料,没有明确的固化点或液化点,通常仍采用

橡胶沥青达到规定条件黏度时的温度即软化点来表征温度稳定性。它既可以反映橡胶沥青的热稳定性又是沥青条件黏度的一种量度,因此很有必要对橡胶沥青的软化点进行测试,其相关结果见图2。

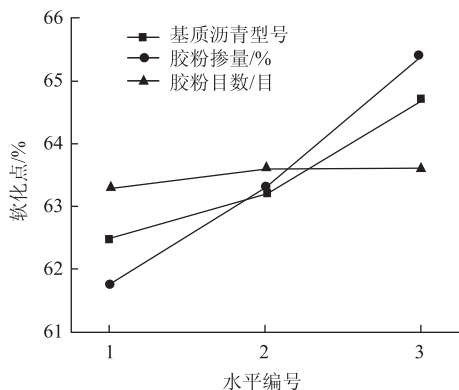


图2 软化点平均值随不同影响因素水平的变化规律

Fig. 2 Rules of average softening point varying with various influencing factors' levels

从图2软化点指标在不同影响因素水平下的变化趋势图中发现规律如下所示:

(1) 在橡胶目数增加的过程中,其对橡胶沥青软化点的影响不大,波动幅度为 0.3°C ,与实际胶粉目数对橡胶沥青软化点的提升效果不符,可能是在制备橡胶沥青时搅拌不均或试验量少导致的,但该现象在一定程度上表明提升橡胶沥青软化点时,不必过分地追求橡胶粉目数,否则会增加工艺难度以及生产费用。

(2) 随着胶粉掺量的增加,软化点平均值逐渐增大,其中掺量在20%时出现拐点,即在15%~20%的掺量范围时,软化点增加较缓,但胶粉掺量从20%~25%时,软化点提高较快,其平均值达到 65.4°C 。其中掺量在15%~20%的过程里增速缓慢,可能是因为胶粉在沥青中的溶胀才刚刚开始并未形成足够的胶凝物质,之后增速较快主要是溶胀反应更充分,凝胶成分显著增加,对橡胶沥青的高温性能有显著提升作用,使得软化点增长较快。

(3) 3种基质沥青型号随着标号的增大,软化点平均值也随之增大,由此说明胶粉颗粒的掺入,显著提升高标号沥青的高温性能,因为高标号的沥青较软,黏度较小,有利于橡胶粉在沥青中的分散,更好地发生溶胀反应,形成更多的胶凝物质,使沥青变硬,高温性能提升。

2.3 不同因素对橡胶沥青延度变化趋势的影响

沥青路面的低温抗裂性与沥青的低温性能有密

切联系,且延度在一定程度可表征沥青的低温性能。通常,延度大的沥青不易产生裂缝,并可减少摩擦时产生的噪声^[12]。因此在室内研究不同材料因素对延度指标的影响十分重要,整理数据绘成如图3所示。

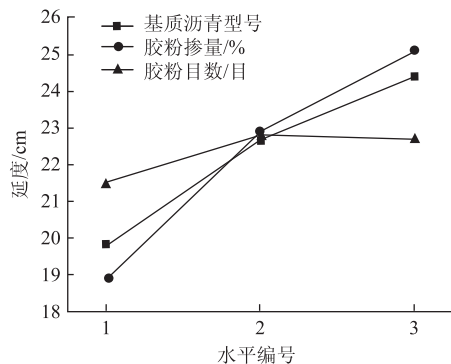


图3 延度平均值随不同影响因素水平的变化规律

Fig. 3 Rules of average ductility varying with various influencing factors' levels

该图反映的是橡胶沥青低温抗裂性随不同影响因素水平的变化规律,不管基质沥青型号、胶粉掺量及其目数如何变化,橡胶沥青的低温延度较高,明显改善了橡胶沥青的低温性能,具体分析如下所示:

(1) 当胶粉掺量由15%增加到20%时,延度增幅约21.2%,在2.1和2.2节时,针入度降低约12.1%,软化点提高2.4%;当胶粉掺量由20%渐变到25%时,延度增加幅度约9.6%,而相应的针入度和软化点分别降低5.2%和3.3%,不难看出,胶粉掺量对橡胶沥青 5°C 延度的影响最为明显,随着其掺量的逐步增大,延度变化幅度逐渐变小。造成这种现象的主要原因就是过多的胶粉会产生显著的应力集中,抑制延度的增长。

(2) 随着基质沥青型号从70#→90#→110#变化的过程中,延度逐渐增大,从最初的19.8 cm增加到24.4 cm,增长23.2%,这种现象说明了沥青型号的变大会使得沥青变软,更利于胶粉的分散,促进溶胀作用,产生较多的凝胶,增加黏度的同时改善了沥青延度。

(3) 胶粉细度对橡胶沥青性能的影响为:当目数从40~80变化时,延度有小幅度变化,在60目时延度均值最大,主要原因就是随着胶粉目数的变大,比表面积增加,吸收更多的轻质油分,导致自由沥青减少,使得沥青黏度增加,延度变大;但目数不可过大,增加施工难度和生产造价。

2.4 不同因素对橡胶沥青各性能指标的影响程度

2.1~2.3节研究了不同影响因素对橡胶沥青针入度、软化点、延度等指标的变化趋势,为得到影响橡胶沥青性能各因素的权重,进行相应的方差分析,结果如表5所示。

表5 不同因素对橡胶沥青性能指标的方差

Tab.5 Variances of different factors affecting performance of rubber asphalt

评价指标	影响因素		
	沥青型号	胶粉掺量	胶粉目数
针入度/(0.1 mm)	1.03	2.33	0.66
软化点/℃	3.36	8.68	0.1
延度/cm	3.56	6.59	0.34

通过对表4的观察不难发现,各因素对橡胶沥青各性能指标影响程度从大到小均为:胶粉掺量、沥青型号、胶粉目数。胶粉掺量的变化对橡胶沥青性能,尤其是低温性能起重要作用,橡胶粉的掺入,在一定程度上使得橡胶沥青中固态成分增加,有利于低温延展性的提高,但掺量过多,会增加沥青的黏度,影响施工和易性,因此选用橡胶粉掺量为20%;沥青型号的不同,使得基质沥青中各个组分不同,从而与胶粉结合程度亦有区别,而沥青类型的选择在很大程度上要考虑当地的自然环境和交通特性,针对河北地区高温、昼夜温差大及明显的冻融现象,采用90[#]沥青;胶粉目数对橡胶沥青性能指

标的影响最小,造成这样的原因可能是有限的试验数据造成的,并不能真实地反映胶粉目数对橡胶沥青性能的影响规律,胶粉太细增加施工制备难度,胶粉太粗不能与沥青发生完全的溶胀反应,故胶粉粒采用60目。

3 加工因素对橡胶沥青性能的影响分析

除了上述材料因素对橡胶沥青性能的影响之外,加工因素对橡胶沥青的制备同样至关重要。搅拌温度和搅拌时间的合理选择有助于橡胶沥青性能的提升,因此有必要研究搅拌温度和搅拌时间对制备优良橡胶沥青的影响^[13-14]。本文采用上海某单位制造的小型高速剪切机(可控制搅拌温度和搅拌时间),型号为BME200L,在控制转速为5 000 r/min时,借助橡胶沥青的老化试验及180℃布氏黏度试验^[15]研究加工因素对橡胶沥青性能的影响。

3.1 搅拌时间对橡胶沥青性能的影响

搅拌时间是橡胶沥青性能重要的影响参数之一,合理地选择该加工参数,有助于橡胶沥青的发育,对于性能的提升有着重要作用。在上述小节中建议河北地区制备橡胶沥青时的材料因素取值为:基质沥青用滨州中海90[#],目数采用60目,掺量20%。在此基础上通过改变不同的搅拌时间:15~90 min,对橡胶沥青进行三大指标及布氏黏度试验,其结果整理成如图4所示。

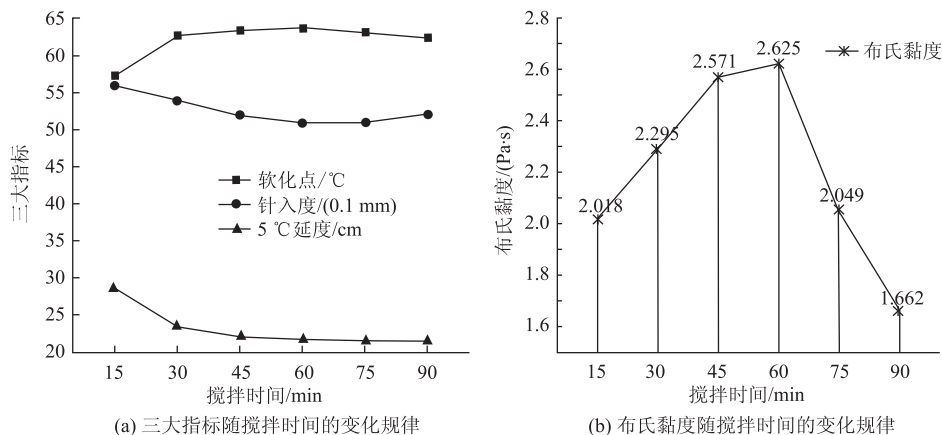


图4 搅拌时间对橡胶沥青性能的影响

Fig.4 Effect of mixing time on performance of rubber asphalt

针入度随着搅拌时间的增加先下降后上升,在拌和时间60 min时达到最小;随着拌和时间的增加,软化点逐渐增大,到达60 min以后,增大趋势明显放缓;而5℃延度却随着时间的推移,先降低然后60 min以后趋于稳定但仍在20 cm以上,可见橡胶

粉的加入可明显改善橡胶沥青的低温抗裂性能。而180℃黏度在试验温度范围内先升高再下降。在60℃处有一个波峰,波峰值为2.625 Pa·s,黏度增大是因为刚加入沥青中拌和的时候反应主要以溶胀为主,随着时间的慢慢延长,胶粉的脱硫化逐渐

严重,产生的硫会降低沥青的黏度,影响沥青的品质。

当搅拌时间过少时,沥青胶体结构中的分散相大部分没有与胶粉结合形成稳定体系,在外力作用下胶粉积聚团会被分裂,最终导致橡胶沥青的性能下降。当搅拌时间过长时,溶胀引起的橡胶颗粒体积增加与脱硫降解导致的橡胶颗粒的体积减小处于不平衡状态,脱硫降解占主要作用,导致黏度降低,不利于橡胶沥青的高温性能。因此综合三大指标试验及布氏黏度试验结果,最终建议制备橡胶沥青时的最佳拌和时间为 60 min。

3.2 搅拌温度对橡胶沥青性能的影响

搅拌温度是除搅拌时间之外另一个影响橡胶沥

青制备的重要加工因素,有必要对温度进行研究。考虑到橡胶沥青加工过程中,反应温度直接影响到成品橡胶沥青的性能。一般来说,沥青的温度越高,其黏度越小,橡胶粉在沥青中越容易分散,橡胶粉越容易溶胀,橡胶沥青的黏度提高;但反应温度越高,沥青的老化也越严重,同时在高温下,橡胶粉内部的脱硫反应也越严重,可见要严格控制拌和温度。

在制备过程中,为防止搅拌温度过高导致橡胶沥青老化,从而引起性能下降,特进行橡胶沥青老化试验和布氏黏度试验,研究不同搅拌温度对橡胶沥青老化前后性能的影响,具体试验结果如图 5 所示。

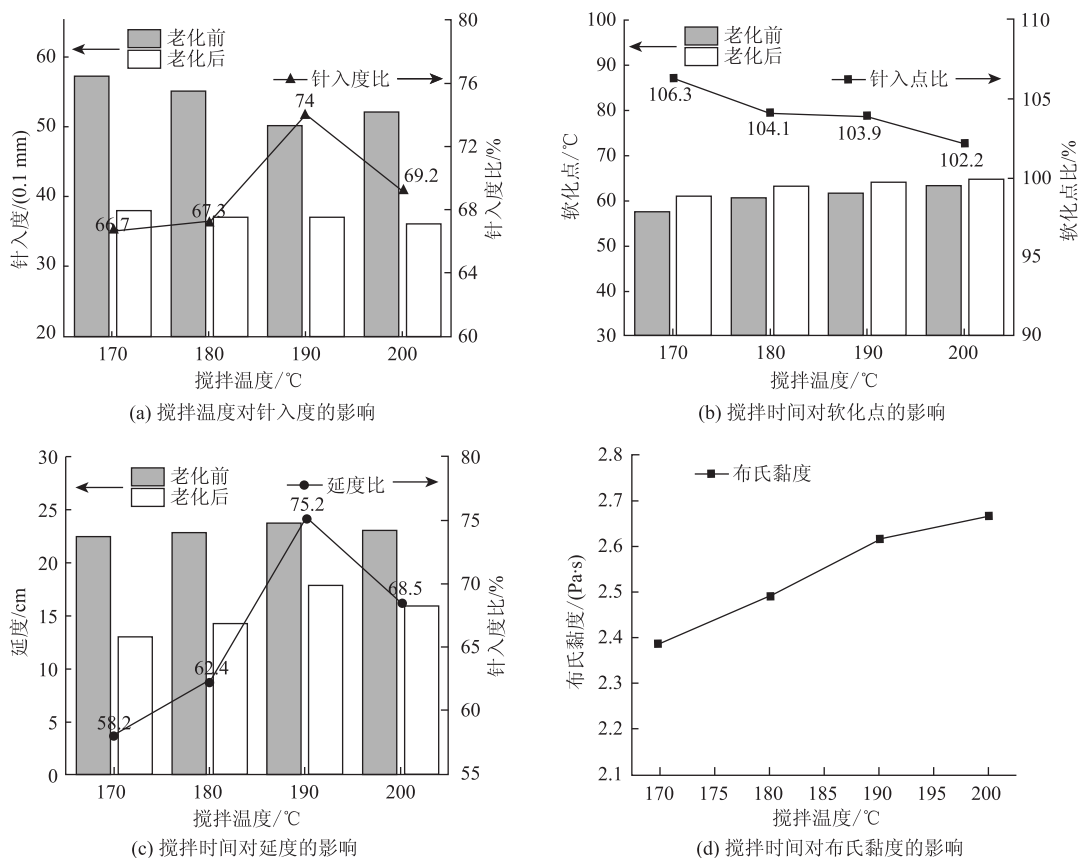


图 5 拌和温度对橡胶沥青性能的影响

Fig. 5 Effect of mixing temperature on performance of rubber asphalt

如图 5 所示,老化前随着搅拌温度的升高,针入度先减小后增大,软化点持续提高,延度在此期间变化不大;老化后针入度逐渐减小,软化点继续提高,延度先增大后减小。对于老化试验评价指标而言,针入度比和延度比在 190 °C 搅拌温度下达到最大,而软化点比随着搅拌温度逐渐下降。另外,布氏黏度随着拌和温度的升高黏度逐渐增加,当搅拌

温度达到 190 °C 后,黏度增速放缓。

造成这种现象的原因主要是胶粉在与沥青发生相容作用时,吸收沥青中的轻质油分,体积膨胀,在橡胶粉周围产生较厚的凝胶膜,从而通过该膜形成黏度很大的半固态连续相体系,使得软化点升高,针入度下降,老化后搅拌温度对橡胶沥青的延度有很大影响。在 190 °C 时老化后延度和延度比均达到

最大,与此同时布氏黏度在此之后增速放缓。该原因可能是温度较低时,基质沥青黏度较小,利于胶粉的分散,发生溶胀反应,黏度增大,当搅拌温度过高,橡胶沥青的脱硫降解会使得其黏度增速放缓,从老化角度看,橡胶沥青的性能正在逐渐降低。结合老化前后橡胶沥青的性能建议制备橡胶沥青的搅拌温度为190℃。

4 橡胶沥青性能评价指标的提出

由于胶粉的掺入使沥青性能得到较大提升,其改性机理与普通沥青不尽相同,导致橡胶沥青在性能评价指标上的选取有所差异^[16]。通过调研发现,国外的橡胶沥青性能评价指标也不是一成不变的,如美国的亚利桑那州采用旋转黏度(177℃)、针入度、软化点、弹性恢复作为评价橡胶沥青性能指标;智利将黏度(175℃)、针入度、软化点、弹性恢复纳入评价体系;而南非的橡胶沥青性能指标为:黏度(190℃)、压缩恢复、软化点等。

经过汇总观察,黏度(尽管测试环境、方法略有不同)是国外评价橡胶沥青性能常用的指标,结合上文加工因素对橡胶沥青180℃黏度的影响分析,发觉黏度随影响因素的变化显著,可有效控制橡胶沥青的施工和易性,除此之外可间接地防止橡胶沥青老化。故建议将180℃黏度作为橡胶沥青性能评价指标之一。

除此之外,通过前面正交试验的结果分析得出,相对于延度来说,针入度和软化点在正交因素的影响下没有太明显的规律性变化,其幅度亦不是很大,恰相反,在材料因素和加工因素的作用下,老化后延度有着巨大的提升,且老化后的延度具有显著性规律,是橡胶沥青较为明显的特征之一,更证明了橡胶粉的积极掺入可极大改善沥青的低温性能。

基于上述分析,本文建议5℃延度和180℃黏度作为橡胶沥青的主要评价指标,同时为了与其他沥青性能有一定的可比性,针入度和软化点可作为辅助评价指标。

5 结论

根据上述影响因素对橡胶沥青性能的试验研究,可以得出以下结论:

(1) 橡胶粉的加入可明显改善橡胶沥青的高温性能,随着胶粉掺量的增多,橡胶沥青针入度减小,5℃延度和软化点均增加,究其原因就是胶粉与基质沥青进行的溶胀反应形成众多的凝胶物质所致,通

过上述的正交分析可得影响橡胶沥青性能程度大小的顺序为:胶粉掺量>基质沥青型号>胶粉目数,因此在制备优质橡胶沥青时应严格控制胶粉掺量。

(2) 室内研究发现,合理加工因素的选择可有效提高橡胶沥青的低温性能及抗老化性能,其中拌和温度以及拌和时间对橡胶沥青180℃黏度影响显著,随拌和时间的增加,180℃黏度先增大后减小;而随着拌和温度的升高,橡胶沥青黏度一直增大,但提升缓慢。可见为防止橡胶沥青的老化及过度的脱硫降解效应,严格控制橡胶沥青生产工艺对于制备优质橡胶沥青起着十分重要的作用。

(3) 综合2、3节的研究内容,推荐制备适用于河北地区的橡胶沥青优化方案为:90#60目橡胶沥青,胶粉含量20%,拌和时间60min,拌和温度190℃。

(4) 综合上述材料因素的正交试验结果、加工因素的老化试验结果、黏度试验结果,提出5℃延度和180℃黏度作为橡胶沥青的主要评价指标,针入度和软化点可作为辅助评价指标。

参考文献:

References:

- [1] 胡彪,张晓雨,赵新,等. 废旧橡胶制品资源化利用研究进展[J]. 材料导报, 2014, 28(2): 75-79, 87. HU Biao, ZHANG Xiao-yu, ZHAO Xin, et al. Research Progress on Resource Utilization of Waste Rubber Products [J]. Materials Review, 2014, 28(2): 75-79, 87.
- [2] 孙祖望,陈飙. 橡胶沥青技术应用指南[M]. 北京: 人民交通出版社, 2007. SUN Zu-wang, CHEN Biao. Guide of Application of Rubber Asphalt Technology [M]. Beijing: China Communications Press, 2007.
- [3] 杨志峰,李美江,王旭东,等. 废旧橡胶粉在道路工程中应用的历史和现状[J]. 公路交通科技, 2005, 22(7): 19-22. YANG Zhi-feng, LI Mei-jiang, WANG Xu-dong, et al. The History and Status Quo of Rubber Powder Used in Road Building [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2005, 22(7): 19-22.
- [4] 李晓燕,平路,汪海年,等. 基于国内外试验方法的橡胶沥青性能测试[J]. 交通运输工程学报, 2015, 15(1): 10-17. LI Xiao-yan, PING Lu, WANG Hai-nian, et al. Performance Test of Rubber Asphalt Based on Domestic and Abroad Test Methods [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2015, 15(1): 10-17.

- [5] 姚城熙, 于新. 废胶粉对橡胶沥青性能的影响 [J]. 华东交通大学学报, 2013, 30 (5): 8-12.
YAO Cheng-xi, YU Xin. The Performance of Waste Rubber Powder in Rubber Asphalt [J]. Journal of East China Jiaotong University, 2013, 30 (5): 8-12.
- [6] 肖川, 凌天清. 废旧橡胶粉改性沥青材料在道路工程中的应用 [J]. 公路工程, 2009, 34 (4): 49-53.
XIAO Chuan, LING Tian-qing. Research of Waste Crumb Rubber Modifier Used in Highway Engineering [J]. Highway Engineering, 2009, 34 (4): 49-53.
- [7] 黄文元. 轮胎橡胶粉改性沥青路用性能及应用研究 [D]. 上海: 同济大学, 2004.
HUANG Wen-yuan. Research on Road Performance and Application of Crumb Rubber Modified Asphalt [D]. Shanghai: Tongji University, 2004.
- [8] 汪荣鑫. 数理统计 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2006.
WANG Rong-xin. Mathematical Statistics [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2006.
- [9] 李熠. 橡胶沥青生产工艺应用研究 [D]. 济南: 山东大学, 2013.
LI Yi. Study on Production Technology of Rubber Asphalt [D]. Jinan: Shandong University, 2013.
- [10] 李廷刚, 李金钟, 李伟. 橡胶沥青微观机理研究及其公路工程应用 [J]. 公路交通科技, 2011, 28 (1): 25-30.
LI Ting-gang, LI Jin-zhong, LI Wei. Micro-mechanism Study and Road Engineering Application of Rubber Asphalt [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2011, 28 (1): 25-30.
- [11] 赵强. 拌和时间及拌和温度对橡胶沥青性能的影响 [J]. 交通标准化, 2014, 42 (9): 90-93.
ZHAO Qiang. Influence of Mixing Time and Mixing Temperature on Performance of Rubber Asphalt [J]. Communications Standardization, 2014, 42 (9): 90-93.
- [12] 申爱琴. 道路工程材料 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2010.
SHEN Ai-qin. Road Engineering Materials [M]. Beijing: China Communications Press, 2010.
- [13] 杨永顺, 曹卫东, 李英勇, 等. 橡胶沥青制备工艺及其性能的研究 [J]. 山东大学学报: 工学版, 2008, 38 (5): 10-13.
YANG Yong-shun, CAO Wei-dong, LI Ying-yong, et al. Preparation Process and Performance of Asphalt-rubber [J]. Journal of Shandong University: Engineering Science Edition, 2008, 38 (5): 10-13.
- [14] 杨光, 申爱琴, 陈志国, 等. 季冻区橡胶粉/SBS 复合改性沥青工厂化参数分析与性能评价 [J]. 公路交通科技, 2015, 32 (12): 29-37.
YANG Guang, SHEN Ai-qin, CHEN Zhi-guo, et al. Analysis of Industrialized Parameters and Evaluation of Performance of Crumb Rubber/SBS Composite Modified Asphalt in Seasonal Freezing Region [J]. Journal of Highway and Transportation Research and development, 2015, 32 (12): 29-37.
- [15] 张泽鹏, 王钊. 高温多雨地区橡胶沥青粘度技术指标的试验研究 [J]. 公路交通科技, 2010, 27 (6): 34-39.
ZHANG Ze-peng, WANG Zhao. Experimental Study of Viscosity Technical Specification of Rubber Asphalt in High Temperature and Rainy Regions [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2010, 27 (6): 34-39.
- [16] 黄彭, 吕伟民, 张福清, 等. 橡胶粉改性沥青混合料性能与工艺技术研究 [J]. 中国公路学报, 2001, 14 (增1): 6-9.
HUANG Peng, LÜ Wei-min, ZHANG Fu-qing, et al. Research on Performance and Technology of the Rubber Powder Modified Asphalt Mixture [J]. China Journal of Highway and transport, 2001, 14 (S1): 6-9.

(上接第 6 页)

- [13] 李晓军, 江丽华. 沥青砂浆粘弹特性试验与模型参数分析 [J]. 武汉理工大学学报, 2011, 33 (3): 82-86.
LI Xiao-jun, JIANG Li-hua. Test and Model Parameter Analysis of Asphaltic Sand with Viscoelasticity [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2011, 33 (3): 82-86.
- [14] SHU X, HUANG B. Micromechanics-based Dynamic Modulus Prediction of Polymeric Asphalt Concrete Mixtures [J]. Composites Part B: Engineering, 2008, 39 (4): 704-713.
- [15] SHU X, HUANG B. Dynamic Modulus Prediction of HMA Mixtures Based on the Viscoelastic Micromechanical Model [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2008, 20 (8): 530-538.
- [16] WANG L B. Mechanics of Asphalt: Microstructure and Micromechanics [M]. New York: McGraw Hill, 2011: 292-293.