

橡胶沥青混合料疲劳性能影响因素研究

黄卫东¹, 高川², 李昆¹

(1. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 深圳高速工程顾问有限公司, 广东 深圳 518034)

摘要: 参考美国国家公路与运输协会(AASHTO)标准 TP8 要求, 根据中国沥青混合料的成型现状, 采用材料试验机(material test system, MTS)控制加载, 选择改进的三分点加载小梁弯曲疲劳试验对橡胶沥青混合料疲劳性能影响因素进行了研究。研究表明: 橡胶沥青油石质量比在 7.5%~9.0% 时, 橡胶沥青混合料的疲劳寿命随沥青掺量的增加而增大; 在正常的空隙率范围内, 随着空隙率的减小, 橡胶沥青混合料的疲劳寿命逐渐增加, 但饱和度太高, 对混合料的疲劳性能不利; 胶粉掺量在 19% 时的疲劳性能最好。对各影响因素进行关联度分析表明, 空隙率对橡胶沥青混合料的疲劳性能影响最为显著, 沥青饱和度、油石质量比和胶粉掺量对疲劳性能也有较大影响。

关键词: 橡胶沥青; 疲劳性能; 空隙率; 沥青用量

中图分类号: U 416.217

文献标识码: A

Research on Influence Factors of AR Mixture Fatigue Performance

HUANG Weidong¹, GAO Chuan², LI Kun¹

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Shenzhen Expressway Engineering Consultants Co. Ltd, Shenzhen 518034, China)

Abstract: According to AASHTO TP8 in American standard specification, three-point-bending-fatigue-loading test method was modified to evaluate the fatigue performance of asphalt rubber(AR) gap-graded mixture. Material test system(MTS) and strain-control mode were used to evaluate influence factors of fatigue performance of AR mixture. According to the research, the fatigue life of AR mixture increases with the asphalt content when the asphalt content is between 7.0%~8.5%. The decrease of air voids will also improve the fatigue performance if VFA is within a reasonable extent. The best fatigue performance comes out when the crape rubber modifier(CRM) content in AR is 19%. Air voids have the greatest

influence on fatigue property of AR mixture and VFA(voids filled with asphalt), asphalt content and CRM content also influence the property obviously. When AR mixture based on fatigue performance is designed, lower air voids first be confirmed according to the engineering requirement and then higher asphalt content and higher CRM content is advised.

Key words: asphalt rubber; fatigue performance; air voids; asphalt content

目前国外对橡胶沥青还缺乏系统的研究, 在美国其发展的首要目的是如何将其处理与使用, 在此目的下美国各州提出了各种不同的使用方法, 但多数州的方案通过工程实践证明存在或多或少的缺陷。而美国的亚利桑那州通过大量的工程实践总结出了一套完整的体系, 包括橡胶粉的掺量、粒径大小、加工工艺、混合料的级配等, 通过工程实践证明这一体系是科学、合理的, 有着良好的疲劳性能与高温稳定性, 但是由于缺少相应系统的实验室研究, 大多数研究只是局限于沥青结合料的研究或简单的混合料性能测试^[1-3]。2002 年, 美国联邦公路局牵头的加速加载试验中对橡胶沥青与其他改性沥青混合料的性能进行了对比分析^[4], 但这一试验只是证明了工程实践的结果, 并不能弥补系统的实验室研究的不足。而大量科学系统的研究对于深化橡胶沥青混合料的设计, 并在此基础上开发出更好的橡胶沥青混合料体系是必不可少的。橡胶沥青混合料最大的优点是疲劳性能优异, 相应具有良好的抗反射裂缝能力。为此, 本文重点对橡胶沥青混合料的疲劳性能进行研究, 研究各种影响因素对疲劳性能的影响, 以用于指导研究开发出疲劳性能更好、更经济的橡胶沥青混合料。

收稿日期: 2008-09-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50308021)

作者简介: 黄卫东(1970—), 男, 副研究员, 工学博士, 主要研究方向为沥青混合料及路面. E-mail: hwd@tongji.edu.cn

1 材料与方法

1.1 材料、级配、沥青用量

本次试验选用加德士 70# 重交沥青(后文中以“JDS 70#”表示)以及泰普克 I-D 型苯乙烯-丁二烯-苯乙烯嵌段共聚物(styrene-butadiene block copolymer, SBS)改性沥青(后文中以“SBS”表示)与橡胶沥青作对比. 橡胶沥青选择 JDS 70# 作为基质沥青,橡胶粉选择山东产 20 目货车子午胎胶粉,参考美国亚利桑那州橡胶沥青标准对橡胶粉的目数加以控制^[6];胶粉掺量选用内掺 19% 为主,加工方式采用室内小型搅拌机对流式搅拌,反应温度控制在 185 °C,反应时间 90 min,试验用橡胶沥青均为现拌现用,以保证试验结果的稳定性,制成的橡胶沥青的基本性能检测结果见表 1. 橡胶沥青的各项指标符合设计要求^[5],177 °C 黏度为 3.3 Pa·s.

表 1 橡胶沥青性能指标检测结果
Tab.1 Testing result of rubber asphalt

检验项目	检测结果	设计要求	试验方法
针入度(25 °C, 100 g, 5 s)/mm	3.7	≥2.5	T0604
软化点/°C	68.5	≥54	T0606
密度/(g·cm ⁻³)	1.05	实测	T0603
177 °C 黏度/(Pa·s)	3.3	1.5~4.0	T0625
弹性恢复/%	75.5	>60	T0662

本次试验采用的石料分 2 种,4.75 mm 以上的粗集料为玄武岩,4.75 mm 以下细集料为石灰岩,填料采用矿粉和普通硅酸岩水泥.

采用美国亚利桑那州技术规范推荐的级配 AR-AC-13^[5],确定将走级配中值的级配二作为主要研究级配,另在级配研究时还选用了走级配上限与下限的级配一与级配三作为对比研究,如图 1,另外掺质量分数为 1.5% 水泥.

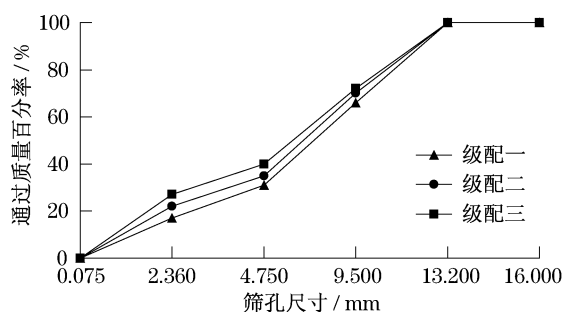


图 1 橡胶沥青混合料的 3 种级配

Fig.1 Gradations of rubber asphalt mixtures

1.2 试验方法与方案

美国 Strategic Highway Research Program(SHRP) 研究计划选定了三分点弯曲疲劳试验作为其沥青混合料疲劳性能研究的标准试验,同时制订了三分点弯曲疲劳试验的标准方法,即 SHRP M-009 和 AASHTO TP8 标准.为此,本次研究选择了改进的三分点加载小梁弯曲疲劳试验来评价材料的疲劳性能.

试验参考美国国家公路与运输协会(AASHTO) TP8 标准要求,但对小梁的尺寸进行了修改.这是由于美国标准要求小梁尺寸为 50 mm×63 mm×380 mm,而我国标准车辙板为 300 mm×300 mm,高 50 mm,缺少大型车辙板碾压成型装置;所以小梁采用 50 mm×50 mm×240 mm 进行试验,即小梁长度为 240 mm,而不是美国规范要求的 380 mm 长.相应对夹具进行了重新设计与加工,试验采用 MTS 材料试验机控制加载,力传感器精确到 1 N,位移控制精确到 0.001 mm,温度采用环境箱控制,精确到 0.1 °C,夹具的 2 个加载点和反力点都可以夹紧小梁,并且能自由平移和旋转.在每个荷载作用周期结束时,夹具将试件拉回初始位置,满足 AASHTO 标准对三分点小梁试验的精度要求.

本次试验每个应变级位下采用 4 根小梁平行试验,结果按试验数据的离散程度进行弃差处理.疲劳试验其他参数如下:试验温度,15 °C;加载波形,偏正弦波;试验频率,10 Hz;应变水平,1 250×10⁻⁶;平行试验次数,4 次.

2 疲劳性能影响因素分析

本文研究的影响因素主要是指沥青混合料本身的材料组成、混合料结构等方面,通常称为沥青混合料的内部因素.影响沥青混合料疲劳性能的内部因素主要包括沥青用量、空隙率、级配类型和沥青性能等.橡胶沥青作为一种特殊的改性沥青,其性能影响因素除了上述各点外,还包括了胶粉掺量、基质沥青类型等特殊的影响因素.

本文首先采用孤立变量法,即通过固定其他因素,变换单个因素进行试验,分析单个因素对橡胶沥青混合料疲劳寿命的影响;然后采用灰关联分析方法对多组数据进行关联度分析,研究各影响因素与橡胶沥青混合料疲劳寿命的关联度大小.

2.1 沥青用量的影响

为了研究沥青用量对橡胶沥青混合料疲劳寿命的影响规律,保持其他因素一致,在 5 个沥青用量

(油石质量比 7.7%~9.7%)下进行小梁疲劳试验对比,试验结果如表 2 所示.

表 2 不同沥青用量下疲劳试验结果

Tab.2 Fatigue test results of rubber asphalt mixture under different asphalt contents

级配类型	油石质量比/%	等效油石比 ¹⁾ /%	应变水平/ 10^{-6}	小梁试件空隙率/%	疲劳寿命平均值	有效试件个数
AR-AC-13	7.7	6.2	1 250	5.3	29 400	4
	8.2	6.6	1 250	4.1	43 900	4
	8.7	7.0	1 250	3.1	69 300	4
	9.2	7.5	1 250	2.2	113 500	3
	9.7	7.9	1 250	1.5	95 000	3

1) 等效油石质量比是指橡胶沥青中除去胶粉,基质沥青所占质量.

从图 2 可以看到,当油石质量比在 7.7%~9.2%时,随着比值的增加,沥青混合料的疲劳寿命不断增加,并且增加速度逐渐增大;当比值增加到 9.2%时,疲劳寿命达到了最高点,随后出现下降.试验结果表明,对应于橡胶沥青混合料的最大疲劳寿命存在着一个最佳的沥青用量,对于橡胶沥青来说,用量太少时黏结力较低,太多则会在混合料中形成过厚的自由沥青膜.这些都会降低混合料疲劳性能.

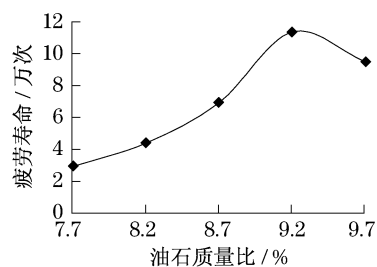


图 2 沥青用量与疲劳寿命关系图

Fig.2 Relationship between asphalt content and fatigue life

英国诺丁汉大学的 P. S. Pell 通过沥青混合料疲劳试验,也得出同样的结论.当时他采用的混合料为英国标准 594 号的基层用间断级配,粗集料用量为 60%,结合料的一般用量范围为 5.6%~6.6%,得出对应于最大疲劳寿命时的沥青用量约为 7.7%,混合料的空隙率约为 0.9%^[6].

本次试验中对应于最大疲劳寿命时的油石质量比约为 9.2%(相当于基质沥青用量占集料质量为 7.5%,橡胶粉占 1.7%),混合料的空隙率约为 2.2%.从结果中可以看出,达到橡胶沥青混合料最大疲劳寿命时的沥青用量很大,超出了普通沥青正常使用范围.根据以往工程实践,正常情况下橡胶沥青的用量在 7.5%~9.0%(油石质量比),可以看到在此阶段橡胶沥青混合料的疲劳寿命随沥青掺量的增加而增大.在混合料设计中,可以在合理范围内使

用较高橡胶沥青掺量,以发挥橡胶沥青混合料抗疲劳性能.

2.2 空隙率的影响

沥青混合料的空隙率对疲劳寿命的影响很大.美国 18 个州 53 项道路工程 12 年的实践证明,每增加 1%空隙率,疲劳寿命会降低 40%.对于确定的沥青混合料级配,混合料空隙率主要受沥青用量变化的影响,在沥青混合料正常的级配范围内,沥青用量与混合料空隙率对疲劳寿命的影响具有明显的交互作用.根据表 2 试验结果,可以画出橡胶沥青混合料空隙率与疲劳寿命的关系图,如图 3 所示.

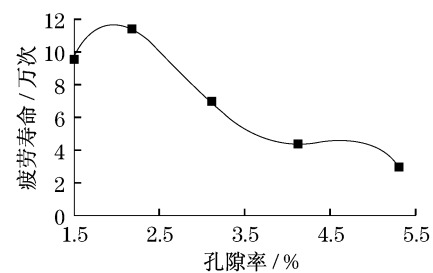


图 3 空隙率与疲劳寿命关系图

Fig.3 Relationship between air voids and fatigue life of rubber asphalt mixtures

可以看到,当空隙率在 2.2%~5.3%时,随着沥青用量增加,混合料的空隙率逐渐减小,同时沥青混合料的疲劳寿命逐渐升高;当空隙率降到约为 2.2%时,疲劳寿命最大;空隙率继续降低,疲劳性能则会出现下降趋势.这是由于橡胶沥青用量太高,导致饱和度太高,过多橡胶粉颗粒产生了反作用,影响了压实并降低了混合料的疲劳性能.当然这个结果仅仅是对于这个级配来说的,不同的级配与沥青有着不同的结果,但是其规律应该有一定的代表性.

最后可以得出,在正常的空隙率范围内,随着空隙率的减小,橡胶沥青混合料的疲劳寿命逐渐增加.对于确定的级配来说,仅通过增加橡胶沥青用量来

降低空隙率,效果不一定好,饱和度太高,也会对混合料的疲劳性能不利.

2.3 级配的影响

混合料级配对疲劳性能的影响主要包括最大公称粒径的影响以及级配粗细(关键档筛孔通过率)的

影响,对于 AR-AC-13 橡胶沥青混合料来说,可以看作 2.36 mm 档集料通过率的影响.

对 3 个级配以目标空隙率为 4% 进行配合比设计,并在设计沥青用量下进行三分点加载小梁弯曲疲劳试验,各项试验结果如表 3 所示.

表 3 不同级配橡胶沥青混合料疲劳试验结果

Tab.3 Results of fatigue test under different gradation

级配类型	2.36 档通过率/%	油石质量比/%	小梁试件空隙率/%	应变水平/ 10^{-6}	疲劳寿命平均值/次	有效试件个数
级配一	17	8.2	4.1	1 250	33 200	3
级配二	22	8.2	4.1	1 250	43 900	4
级配三	27	8.4	4.0	1 250	38 400	4

从试验结果来看,随着细料比例的上升,沥青用量随之有所增大,但是疲劳寿命并没有出现明显的规律性.2.36 mm 档通过率从 30% 增加到 35%,混合料的疲劳寿命增大了 32%;从 35% 增加到 40%,混合料的疲劳寿命反而降低了 13%.虽然改变细料通过率对于橡胶沥青混合料疲劳性能的影响并不明显,但可以看出适当地增加细料比例对于橡胶沥青混合料的疲劳性能有所提高,但是细料过多反而会降低疲劳性能.

以往的研究表明,对于一般沥青来说,细料的增加伴随着沥青用量的增加以及空隙率的降低,对于混合料疲劳性能是有利的,通常使用悬浮密实结构沥青混合料的疲劳性能要好于骨架结构.本文中得出的试验结果与试验中采用的骨架结构间断级配有关,尽管增加了细料的用量,但是这 3 个级配仍然都属于粗型,对于细料用量的增加并不敏感;同时由于使用的是橡胶沥青,通常需要控制细料用量,亚利桑那州规范要求控制 2.36 mm 档通过率在 14%~22% 之间,就是考虑到细料过多会造成缺少空隙来容纳橡胶沥青,影响混合料压实.

2.4 胶粉掺量的影响

仍旧采用 JDS 70# 基质沥青,分别添加 15%,19%,23% 的橡胶粉,得到不同掺量的橡胶沥青的基本技术性能如表 4 所示.

从表 4 可以看出,随着胶粉掺量变化,橡胶沥青

的各项指标变化规律明显:软化点与黏度指标随胶粉掺量增加而升高,尤其是黏度指标,随胶粉掺量变化较大,与胶粉掺量有着很好的相关性;针入度随胶粉掺量增加出现先降后升的过程.其他的研究也表明,在胶粉少量加入时,会降低沥青针入度;但当掺量增加到一定程度时,沥青的针入度反而随胶粉掺量增大而增大.

表 4 不同胶粉掺量 JDS 70# 沥青的性能

Tab.4 Results of rubber asphalt of different CRM contents

胶粉掺量 (内掺)/%	性能指标			
	针入度/ mm	软化点/ ℃	177℃ 黏度/ (Pa·s)	实测密度/ (g·cm ³)
15	4.05	66.5	1.9	1.044
19	3.75	68.5	3.3	1.050
23	4.85	73.5	5.6	1.056

同时,从橡胶沥青的搅拌过程来看,掺量达到 23% 时,黏度明显过大,橡胶粉缺少足够的基质沥青反应,拌和 1 h 后橡胶沥青仍显得十分干涩,已经到了可以反应的最高掺量,从结果来看,黏度已经达到了 5.6 Pa·s,超过了 1.5~4.0 Pa·s 的范围.

采用级配二,使用以上 3 种不同胶粉掺量的橡胶沥青,以 4% 的目标空隙率来确定沥青用量,并在设计沥青用量下,制作试件,进行橡胶沥青混合料小梁疲劳试验,最后试验结果如表 5 所示.

表 5 不同胶粉掺量下橡胶沥青混合料疲劳试验结果

Tab.5 Fatigue test results of rubber asphalt mixture under different CRM contents

级配	胶粉掺量(内掺)/%	油石质量比/%	小梁试件空隙率/%	应变水平/ 10^{-6}	疲劳寿命平均值/次	有效试件个数
AR-AC-13	15	8.0	3.9	1 250	23 700	4
	19	8.2	4.1	1 250	43 900	4
	23	8.4	4.2	1 250	28 700	4

从表5可以看到,随着胶粉掺量的增加,黏度增大,同样空隙率下所需的沥青用量也出现增加,油石质量比由8.0%增加到8.4%.

从疲劳试验结果来看,胶粉掺量从15%增加到19%,疲劳寿命增加了85%,增幅较大,可见15%掺量的橡胶粉对于基质沥青的改性作用不够,橡胶沥青黏度较低,混合料的疲劳性能要低于19%掺量的橡胶沥青混合料;当胶粉掺量从19%增加到23%时,疲劳寿命反而降低了35%,可见胶粉掺量并不是越多越好,对于橡胶沥青的疲劳性能来说,需要控制在合适的范围中.从原理上看,橡胶粉在沥青中的作用,与矿粉类似,添加少量的矿粉能够提高沥青胶泥黏度,增强黏附性,提高混合料疲劳性能;过多地加入会造成沥青胶浆与石料的剥落,降低混合料疲劳性能.23%的胶粉掺量太大,造成自由沥青较少,影响到橡胶沥青的黏附性,降低了混合料疲劳性能.从疲劳性能方面来看,选用时可以尽量选用较高的掺量,但是不要超过1.5~4.0 Pa·s要求的黏度范围.

在合理的掺量范围内,胶粉掺量越大,橡胶沥青黏度越大;相同空隙率下,沥青用量越多,黏结性越强.胶粉掺量高的橡胶沥青显示出较优越的弹性特征,可以反映抗疲劳能力.

3 影响因素关联度分析

灰色系统用关联度分析方法来做系统分析,关联度是表征2个事物的关联程度.关联度分析事实上是动态过程发展态势的量化比较分析,是基于几何范畴的.它根据因素之间发展态势的相似或相异程度来衡量因素间接近的程度.由于关联分析是按发展趋势作分析,因而对样本量的大小没有太高的

要求,分析时也不需要典型的分布规律.关联性实质上是曲线间几何形状的差别,几何形状越接近,则发展变化态势越接近,关联程度越大^[7].

关联分析首先要指定参考数列和被比较数列.将参考数列记为 x_0 , $x_0 = (x_0(1), x_0(2), \dots, x_0(n))$;比较数列记为 x_1 , $x_1 = (x_1(1), x_1(2), \dots, x_1(n))$.比较曲线与参考曲线在 k 时刻的关联系数为

$$\xi_i(k) = \left[\min_i \min_k |x_0(k) - x_i(k)| + 0.5 \max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)| \right] \cdot \left[|x_0(k) - x_i(k)| + 0.5 \max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)| \right]^{-1} \quad (1)$$

式中: $\xi_i(k)$ 是第 k 个时刻比较曲线 x_i 与参考曲线 x_0 的相对差值,这种形式的相对差值称为 x_i 对 x_0 在 k 时刻的关联系数;0.5为分辨系数,一般在0~1之间选取; $\min_i \min_k |x_0(k) - x_i(k)|$,称为2级(2个层次)的最小差; $\max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|$,称为2级(2个层次)的最大差.

关联度的一般表达式为

$$r_i = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \xi_i(k) \quad (2)$$

式中, r_i 是曲线 x_i 对参考曲线 x_0 的关联度.

灰关联分析步骤如下:确定数据列,对数据列进行初值化处理,计算求差序列,计算灰关联系数,计算灰关联度.

(1) 将以上各疲劳试验影响因素与结果原值列于表6中,生成数据列;为了保持影响因素极性一致,对试验数据进行了处理,如疲劳性能随着空隙率的增大而降低,为了改变其极性,取其倒数.

表6 灰关联系数

Tab.6 Grey associate coefficients

混合料类型	沥青针入度	软化点	177℃黏度	胶粉掺量	油石质量比	空隙率	沥青饱和度	2.36 mm 档通过率	疲劳寿命	
级配一	3.75	68.5	3.3	19	8.2	0.244	80.0	17	33 200	
级配二	3.75	68.5	3.3	19	8.2	0.244	79.8	22	43 900	
级配三	3.75	68.5	3.3	19	8.4	0.256	81.2	27	38 400	
油石质量比/%	7.7	3.75	68.5	3.3	19	7.7	0.189	74.1	22	29 400
	8.7	3.75	68.5	3.3	19	8.7	0.323	84.8	22	69 300
	9.2	3.75	68.5	3.3	19	9.2	0.455	89.3	22	113 500
	9.7	3.75	68.5	3.3	19	9.7	0.667	93.2	22	95 000
胶粉掺量/%	15.0	4.05	66.5	1.9	15	8.0	0.256	80.5	22	23 700
	23.0	4.85	73.5	5.6	23	8.4	0.238	80.5	22	28 700

(2) 将试验数据初值化后见表 7.

表 7 数据初值化结果

Tab.7 Results of datum initialization

混合料类型	沥青针入度	软化点	177 °C 黏度	胶粉掺量	油石质量比	空隙率	沥青饱和度	2.36 mm 档通过率	疲劳寿命
级配一	0.100 0	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
级配二	0.100 0	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.998	1.294	1.322
级配三	0.100 0	1.000	1.000	1.000	1.024	1.051	1.015	1.588	1.157
油石质量比/%	7.7	0.100 0	1.000	1.000	0.939	0.774	0.926	1.294	0.886
	8.7	0.100 0	1.000	1.000	1.061	1.323	1.060	1.294	2.087
	9.2	0.100 0	1.000	1.000	1.122	1.864	1.116	1.294	3.419
	9.7	0.100 0	1.000	1.000	1.183	2.733	1.165	1.294	2.861
胶粉掺量/%	15.0	0.108 0	0.971	0.576	0.789	0.976	1.051	1.006	1.294
	23.0	0.129 3	1.073	1.697	1.211	1.024	0.976	1.006	1.294

(3) 计算求差序列结果见表 8.

表 8 求差序列

Tab.8 Difference sequence

混合料类型	沥青针入度	软化点	177 °C 黏度	胶粉掺量	油石质量比	空隙率	沥青饱和度	2.36 mm 档通过率
级配一	0	0	0	0	0	0	0	0
级配二	0.032 2	0.322	0.322	0.322	0.322	0.322	0.325	0.028
级配三	0.015 7	0.157	0.157	0.157	0.132	0.105	0.142	0.432
油石质量比/%	7.7	0.011 4	0.114	0.114	0.114	0.053	0.112	0.041
	8.7	0.108 7	1.087	1.087	1.087	1.026	0.765	1.028
	9.2	0.241 9	2.419	2.419	2.419	2.297	1.555	2.303
	9.7	0.186 1	1.861	1.861	1.861	1.679	0.128	1.696
胶粉掺量/%	15.0	0.036 6	0.257	0.138	0.076	0.262	0.337	0.292
	23.0	0.042 9	0.209	0.833	0.346	0.160	0.112	0.142

(4) 求得 2 级最大差为 2.419,2 级最小差为 0, 按照式(1)计算灰关联系数,见表 9.

表 9 灰关联系数

Tab.9 Grey associate coefficients

混合料类型	沥青针入度	软化点	177 °C 黏度	胶粉掺量	油石质量比	空隙率	沥青饱和度	2.36 mm 档通过率
级配一	1.000 0	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
级配二	0.079 0	0.790	0.790	0.790	0.790	0.790	0.788	0.977
级配三	0.088 5	0.885	0.885	0.885	0.901	0.920	0.895	0.737
油石质量比/%	7.7	0.091 4	0.914	0.914	0.914	0.958	0.915	0.967
	8.7	0.052 7	0.527	0.527	0.527	0.541	0.613	0.541
	9.2	0.033 3	0.333	0.333	0.333	0.345	0.437	0.344
	9.7	0.039 4	0.394	0.394	0.394	0.419	0.904	0.416
胶粉掺量/%	15.0	0.076 8	0.825	0.898	0.941	0.822	0.782	0.805
	23.0	0.073 8	0.853	0.592	0.778	0.883	0.915	0.895

图 4 为各影响因素的关联度直观比较.从图中可以看到,空隙率对橡胶沥青混合料的疲劳性能影响最为显著,沥青饱和度、油石质量比和胶粉掺量也

有较大影响.最后得出的各种影响因素的排序结果从大到小依次是:混合料空隙率,沥青饱和度,油石质量比,橡胶粉掺量,橡胶沥青软化点,橡胶沥青针

入度,橡胶沥青黏度,2.36 mm 通过率.

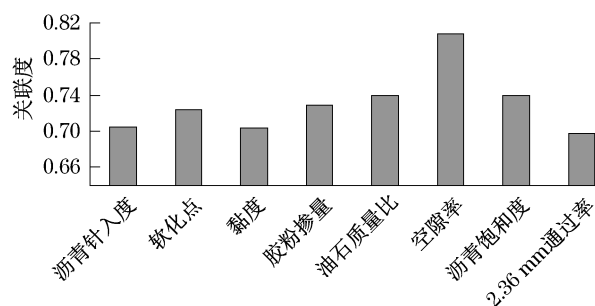


图4 疲劳性能影响因素关联度比较

Fig.4 Gray associate analysis of factors influencing fatigue performance

4 结论

(1) 在橡胶沥青用量的推荐范围 7.5%~9.0% (油石质量比)之间时,橡胶沥青混合料的疲劳寿命随沥青掺量的增加而增大,当对疲劳性能要求较高时,如水泥路面加罩工程中,可以在以上范围内使用较高橡胶沥青掺量,以发挥橡胶沥青混合料抗疲劳性能.

(2) 在正常的空隙率范围内,随着空隙率的减小,橡胶沥青混合料的疲劳寿命逐渐增加,饱和度太高,会对混合料的疲劳性能不利.

(3) 胶粉掺量在 19%时有最好的疲劳性能,在 15%与 23%胶粉掺量时,疲劳寿命会降低,说明胶粉掺量有一个合适的范围,美国亚利桑那州体系下胶粉掺量在 18%~22%的范围要求是科学合理的.

(4) 对各影响因素进行关联度分析,空隙率对橡胶沥青混合料的疲劳性能影响最为显著,沥青饱和度、油石质量比和胶粉掺量对疲劳性能也有较大

影响.

(5) 在考虑疲劳性能的橡胶沥青混合料设计时,需要先确定合适的空隙率,在此基础上尽量提高沥青用量与胶粉用量.

参考文献:

- [1] Airey G, Rahman M, Collop A. The influence of crude source and penetration grade on the interaction of crumb rubber and bitumen[C] // Asphalt Rubber 2003 Conference. Brasilia: Star Print Editora, 2003:375-398.
- [2] Xiao F P, Putman B J, Amirhanian S N. Laboratory investigation of dimensional changes of crumb rubber reacting with asphalt binder [C] // Proceedings of the Asphalt-Rubber 2006 Conference. Palm Springs: [s. n.], 2006:693-714.
- [3] 曹荣吉, 陈荣生. 橡胶沥青工艺参数对其性能影响的试验研究[J]. 东南大学学报:自然科学版, 2008, 38(2):269.
CAO Rongji, CHEN Rongsheng. Laboratory study on process parameters of asphalt rubber and their effects on performance [J]. Journal of Southeast University: Natural Science, 2008, 38(2):269.
- [4] Qi X, Shenoy A. Laboratory characterization and full-scale accelerated performance testing of crumb. rubber asphalts and other modified asphalt systems[C] // Proceedings of the Asphalt-Rubber 2006 Conference. Palm Springs: [s. n.], 2006:39-68.
- [5] Arizona Department of Transportation. Standard specifications for road & bridge construction [M]. Phoenix: Department of Transportation Engineering Records Section, 2000.
- [6] Pell P S. Fatigue of Asphalt Pavement Mixes[C] // Proceeding of the Second International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavement. Washington D C: Highway Research Board, 1967:553-568.
- [7] 邓聚龙. 灰色系统基本方法[M]. 武汉: 华中工学院出版社, 1987:96-125.
DENG Julong. The primary methods of grey system theory[M]. Wuhan: Huazhong Industrial College Press, 1987:96-125.