

DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2022120723121970

文章编号: 1674-599X(2023)06-0048-09

引用格式: 田小草, 郭常辉, 李光耀, 等. 基于抗疲劳性能的 ATB-25 油石比设计[J]. 交通科学与工程, 2023, 39(6): 48-56.

Citation: TIAN Xiaoge, GUO Changhui, LI Guangyao, et al. Asphalt-aggregate ratio design of rubber asphalt ATB-25 based on fatigue performance [J]. J. Transp. Sci. Eng., 2023, 39(6): 48-56.

基于抗疲劳性能的 ATB-25 油石比设计

田小草, 郭常辉, 李光耀, 胡宏立, 卢雪蓉

(长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘 要: 为确定符合抗疲劳性能要求的橡胶沥青 ATB-25 油石比范围, 通过沥青常规试验和动态剪切流变试验 (DSR) 确定最佳胶粉掺量, 以优化的主骨架空隙填充法进行橡胶沥青 ATB-25 配合比设计, 并确定初始油石比。制备橡胶沥青 ATB-25 的小梁试件, 开展四点弯曲疲劳试验, 建立 5 种油石比下的疲劳寿命方程。结合湖南某高速公路橡胶沥青 ATB-25 的基层所受弯拉应力, 得到该应力水平下橡胶沥青 ATB-25 的弯拉疲劳寿命与油石比的关系曲线。以同时满足橡胶沥青 ATB-25 弯拉疲劳寿命和剪切疲劳寿命的要求为指标, 确定符合抗疲劳性能的油石比范围为 4.0% ~ 4.4%。研究表明: 根据该油石比优化方法, 设计的橡胶沥青 ATB-25 的抗疲劳性能可满足要求, 且具有良好的高温稳定性。

关键词: 橡胶沥青 ATB-25; 动态剪切流变试验; 主骨架空隙填充法; 疲劳试验; 油石比优化; 抗疲劳性能

中图分类号: U414

文献标志码: A

Asphalt-aggregate ratio design of rubber asphalt ATB-25 based on fatigue performance

TIAN Xiaoge, GUO Changhui, LI Guangyao, HU Hongli, LU Xuerong

(School of Traffic & Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology,
Changsha 410114, China)

Abstract: In order to determine the asphalt to aggregate ratio range for rubberized asphalt based on the anti-fatigue property, ATB-25, the optimal rubber powder content was determined through the conventional asphalt test and dynamic shear rheological test (DSR). The initial asphalt to aggregate ratio was then established with the optimized Course Aggregate Void Filling method for ATB-25 mixture design. ATB-25 prism specimens were prepared to carry out four-point bending fatigue tests. Through these experiments, fatigue life equations were established for five different asphalt to aggregate ratios. Combining the flexural-tensile stress experienced by the ATB-25 based layer on a certain expressway in Hunan, the relationship curve between the flexural fatigue life of ATB-25 and asphalt to aggregate ratio at that stress level was obtained. Taking ATB-25 flexural fatigue life and shear fatigue life as criteria, the asphalt to aggregate ratio that meets the anti-fatigue performance requirements was determined to be 4.0%~4.4%. Results indicates that the rubberized asphalt ATB-25

收稿日期: 2022-12-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51978086)

作者简介: 田小草 (1970—), 男, 长沙理工大学教授。E-mail: tianxiaoge@126.com

mixture designed according to optimization asphalt-aggregate ratio method meets the requirements of anti-fatigue performance, and exhibits excellent high temperature stability.

Key words: rubberized asphalt ATB-25; dynamic shear rheometer test; course aggregate void filling method; fatigue test; asphalt to aggregate ratio optimization; anti-fatigue performance

沥青混合料的配合比设计,根据现行的《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2004),采用马歇尔方法,使用空隙率、矿料间隙率、沥青饱和度、毛体积密度、稳定性和流值等指标,确定沥青混合料的最佳油石比。目前,许多沥青路面在使用寿命未到设计使用年限就产生了严重的疲劳开裂,这反映了沥青混合料设计和路用性能设计的关联性不足,导致两者之间存在脱节。在车轮荷载作用下,路面各结构层的受力状况是不同的,其表现为面层受压、基层受拉,因此不同层位具有自身层位功能的侧重点^[1]。在密级配沥青稳定碎石(橡胶沥青 ATB-25)柔性基层的沥青路面中,橡胶沥青 ATB-25 柔性基层的抗疲劳裂缝能力是关键。众多研究学者尝试使用不同的方法进行沥青混合料的配合比设计,并验证其路用性能。王海朋等^[2]采用马歇尔方法进行应力吸收层配合比设计后,基于四点弯曲试验和 Overlay Test 试验,验证了混合料的抗疲劳性能和抗反射裂缝性能。蒋应军等^[3]采用与路面实际力学性能更吻合的垂直振动法,确定了橡胶沥青 AC-2 的最佳油石比。基于小梁弯曲疲劳试验,发现采用垂直振动法测试的橡胶沥青 AC-20 的疲劳性能要优于马歇尔法测试的。柴金玲等^[4]通过旋转压实剪切机(gyratory testing machine, GTM)成型混合料试件,确定最佳油石比。研究发现,采用 GTM 设计的沥青混合料各项路用性能均优于马歇尔配合比设计的。马耀宗等^[5]通过沥青混合料的析漏试验、0℃小梁弯曲试验、车辙试验、浸水马歇尔及冻融劈裂试验,设计了 AC-10 应力吸收层的油石比范围,表明采用该方法设计的沥青混合料具有良好的路用性能。冯新军等^[6]提出了一种基于抗车辙和抗开裂的沥青混合料平衡设计方法,该方法比马歇尔设计方法更能满足沥青路面的路用性能。

综上所述,虽然当前的研究学者已经认识到了马歇尔设计法的缺点,并进行了改进,但这些方法仍存在不足。它们只是在混合料配合设计结束后

对路用性能进行了验证,而在混合料设计阶段并没有反映路用性能。在混合料配合比设计时,只是更换了一种更加接近路面摊铺碾压过程中混合料受力情况的成型方法,并没有针对层位功能进行设计。或者是在混合料设计时考虑了层位功能特性,但没有结合实际路面受力情况。

目前,半刚性基层和柔性基层相结合的路面结构形式日趋平常,其中柔性基层多采用橡胶沥青 ATB-25^[7-8]。为了应对标准轴载的反复作用,须设计柔性基层的抗疲劳能力。本研究基于橡胶沥青 ATB-25 柔性基层的抗疲劳层位功能特性,以疲劳寿命为设计指标,结合实际路面结构,提出基于抗疲劳性能的混合料配合比设计方法,对减少疲劳裂缝破坏具有重要意义。

1 橡胶沥青的制备及其性能

1.1 橡胶沥青制备

原样沥青采用湖南宝利公司生产的 70# 基质沥青。橡胶粉采用都江堰市华益橡胶公司生产的 60 目橡胶粉。采用湿法工艺分别制备橡胶粉掺量为 18%、20%、22% 的橡胶沥青。

制备方法如下:

- 1) 将基质沥青放入至 180℃ 的烘箱中加热。
- 2) 橡胶粉在 105℃ 下烘干备用。
- 3) 将橡胶粉加入基质沥青中,用玻璃棒搅拌 5 min,直至沥青中无明显橡胶粉末。
- 4) 控制温度为 180±5℃,先用高速剪切仪以 2 000 r/min 转速剪切 3~5 min,再以 4 500 r/min 转速剪切 1 h。
- 5) 剪切完成后,将混合物放入烘箱内,在 180℃ 下发育 1 h。

1.2 常规性能试验

对胶粉掺量分别为 18%、20%、22% 的橡胶沥青和基质沥青进行针入度、软化点、延度和 180℃ 布氏

旋转黏度试验,结果如图1~4所示。

从图1可以看出,当胶粉掺量达到18%后,针入度的降幅不大。这是因为橡胶粉均匀分散在沥青中,当掺量达到18%时,已经有一部分胶体结构形成,导致针入度逐渐降低。因此,继续增加胶粉的掺量,效果并不明显。

从图2可以看出,当橡胶粉掺量达到20%之后,软化点几乎没有提升。这是因为在达到一定橡胶粉掺量时,橡胶粉与沥青之间的反应达到平衡状态,橡胶粉不再吸收沥青中的轻质组分,过剩的橡胶粉会在沥青中形成小胶团,导致提升效果不明显。

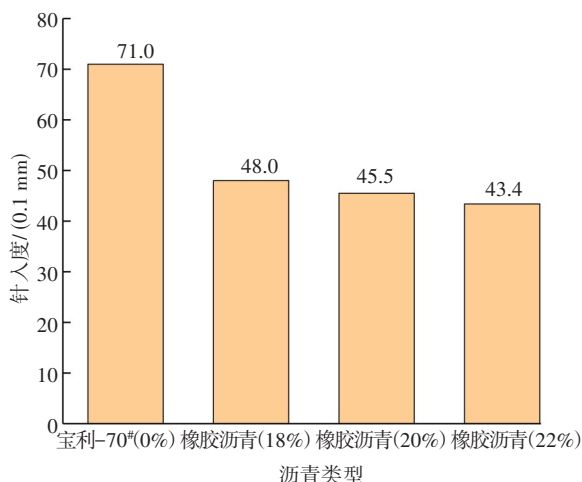


图1 针入度

Fig. 1 The penetration

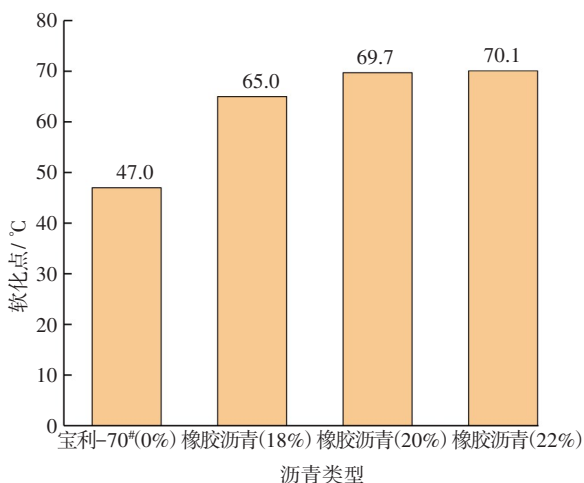


图2 软化点

Fig.2 The softening point

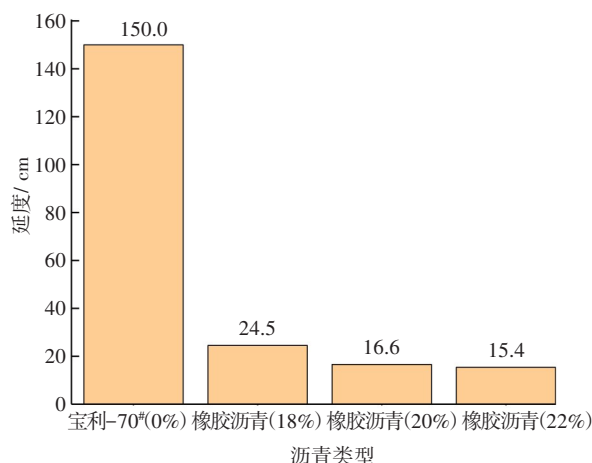


图3 延度

Fig. 3 The ductility

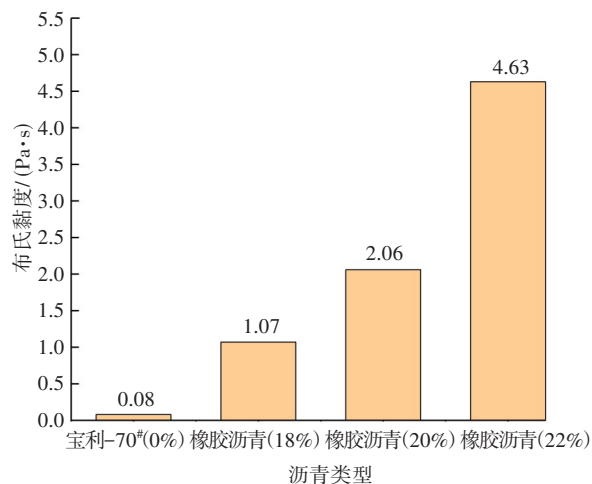


图4 布氏黏度

Fig.4 The brinell viscosity

从图3可以看出,当胶粉掺量达到20%后,延度降幅不大。常温下,橡胶沥青的变形主要是由沥青产生的,由于橡胶粉颗粒的加入,增加了沥青与颗粒间的黏摩阻力,在一定程度上制约了沥青本身的变形能力,胶粉掺量越多,制约能力越明显。

从图4可以看出,当胶粉掺量为22%时,其黏度为4.63 Pa·s,给拌和作业带来了困难。

1.3 动态剪切流变试验

动态剪切流变试验(dynamic shear rheometer, DSR)通过疲劳因子($G^*\sin\delta$)和车辙因子($G^*/\sin\delta$)来评价沥青胶浆的疲劳性能与高温性能^[9-10]。 G^* 为复数剪切模量, δ 为相位角,疲劳因子是材料变形过程中所做的功,与材料的抗疲劳性能成反比,其值越小,材料的抗疲劳性能越好^[11]。而车辙因子反映

沥青材料抵抗永久变形的能力,其值越大,在高温下沥青的流动变形越小,抗车辙能力越强^[12]。

通常,6℃为一个高温等级量度^[13]。试验温度分别为58、64、70、76、82、88℃时,车辙因子和疲劳因子与温度的关系如图5~6所示。

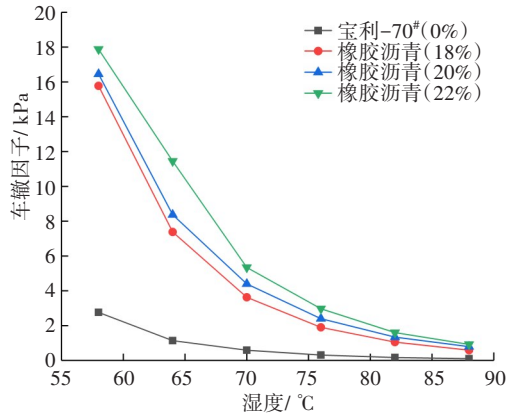


图5 橡胶沥青的车辙因子

Fig. 5 The rutting factor of rubberized asphalt

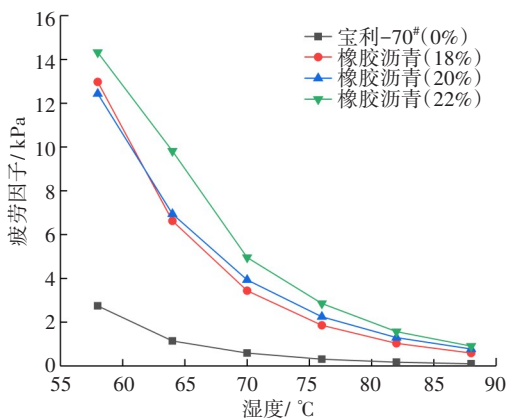


图6 橡胶沥青的疲劳因子

Fig. 6 The fatigue factor of rubberized asphalt

从图5~6可以看出,当试验温度相同时,在沥青中加入橡胶粉,沥青的车辙因子明显增大;当橡胶粉掺量超过18%时,车辙因子的增长趋势不明显。这是因为将橡胶粉加入到基质沥青中,会发生物理溶胀反应,胶粉颗粒表面与基质沥青形成凝胶体,彼此相连,形成似网状结构,使橡胶沥青的黏度增大,温度敏感性降低,抗变形能力增强^[14]。在同一试验温度下,随胶粉掺量的增加,车辙因子提高,沥青的抗疲劳性能下降。这是因为橡胶粉的加入,增大了复数模量 G^* 。在相同荷载作用下,不易变形,抵

抗永久变形的能力也相应增强^[15],但在相同变形下所受的力会更大,因此抗疲劳性能降低。在同一胶粉掺量下,随着温度的升高,车辙因子和疲劳因子的值逐渐减小,橡胶沥青的高温抗变形能力下降,而抗疲劳性能增强。这是因为温度升高会导致沥青的黏度降低,高温稳定性变差,抗变形能力降低,但疲劳性能改善。这表明橡胶沥青的高温性能和抗疲劳性能是一对矛盾的物理量。

1.4 橡胶粉掺量优选

在胶粉掺量大于20%后,针入度、软化点、延度的变化量很小。当胶粉掺量为22%时,拌和变得困难。对于18%和20%两种掺量橡胶沥青,它们的车辙因子和疲劳因子非常接近,但20%掺量橡胶沥青的相位角 δ 较小,其抗变形能力更好。综合考虑,采用橡胶粉掺量为20%的橡胶沥青。

2 橡胶沥青混合料设计

2.1 主骨架空隙填充法设计级配

采用改进的主骨架空隙填充法^[16](coarse aggregate voids filling method, CAVF)计算粗细集料的比例,并优化级配。

$$\begin{cases} q_c + q_f + q_p = 100 \\ \frac{q_f}{\gamma_f} + \frac{q_p}{\gamma_p} = \frac{q_c}{100\gamma_s} (\alpha V_{DRC} - V_s - V_{be}) \end{cases} \quad (1)$$

式中: q_c 为粗集料的质量百分数;

q_f 为细集料的质量百分数;

q_p 为矿粉的质量百分数;

γ_f 为细集料的表观密度;

γ_p 为矿粉的表观密度;

γ_s 为粗集料的紧密密度;

$\alpha = 0.8 \sim 1.0$ 为干涉系数;

V_{DRC} 为粗集料的紧密空隙率;

V_s 为混合料的设计目标空隙率;

V_{be} 为有效沥青的体积百分率。

在 q_c 、 q_f 、 q_p 、 V_s 、 V_{be} 中,将 q_c 、 q_f 作为未知变量进行设计,得出 q_c 、 q_f 之后,按照式(2)~(3)算出油石比 q_a 。

$$q_{be} = \frac{V_{be} \gamma_a}{(1 - 0.01 V_{MA}) \gamma_{sb}} \quad (2)$$

$$q_{ba} = \left(\frac{1}{\gamma_{sb}} - \frac{1}{\gamma_{se}} \right) \gamma_a \times 100\% \quad (3)$$

$$V_{MA} = V_s + V_{be} \quad (4)$$

$$q_a = q_{be} + q_{ba} \quad (5)$$

式中:

V_{MA} 为矿料间隙率;

q_{be} 为有效油石比;

q_{ba} 为被集料吸入的油石比;

γ_{se} 为合成矿料有效相对密度;

γ_{sb} 为合成矿料毛体积相对密度;

γ_a 为沥青相对密度。

2.2 初步配合比及油石比计算

在原材料中,粗细集料均采用石灰岩,粗集料 A (16.0 ~ 31.5 mm 碎石),粗集料 B (10.0 ~ 20.0 mm 碎

石);细集料(0.0 ~ 5.0 mm 碎石);石灰岩磨细的矿粉;橡胶沥青。

主骨架由粗集料 A 和粗集料 B 按 3:1 的比例组成。主骨架的表观密度为 2.751 g/cm³, 紧密密度为 1.688 g/cm³, 计算得主骨料的空隙率 V_{DRC} 为 38.64%; 细集料的表观密度为 2.729 g/cm³; 矿粉的表观密度为 2.717 g/cm³。设计矿粉掺量为 5%, 空隙率为 4%。再由《公路沥青路面施工技术规范》(JTGF40—2004) 中的表 5.3.3-2 可知, 矿料间隙率 V_{MA} 为 12%、 V_{be} 为 8%。

将数据代入式(1), 计算得知主骨架用量为 74.0%, 则粗集料 A 用量为 56.0%, 粗集料 B 用量为 18.0%, 细集料用量为 21.0%。

合成矿料级配组成见表 1。

表 1 集料的级配组成

Table 1 The gradation composition of aggregate

%

矿料名称	通过下列筛孔(mm)的质量百分率												
	31.500	26.500	19.000	16.000	13.200	9.500	4.750	2.360	1.180	0.600	0.300	0.150	0.075
粗集料 A	100.0	86.0	42.0	31.0	25.0	17.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
粗集料 B	100.0	100.0	100.0	83.0	48.0	23.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
细集料	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	70.5	49.8	35.5	25.1	17.0	12.0
矿粉	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	95.6	93.5
合成矿料	100.0	92.2	67.5	58.3	48.6	39.7	26.2	19.8	15.5	12.5	10.3	7.1	4.9

根据沥青相对密度 1.043 和《公路沥青路面施工技术规范》(JTGF40—2004) 附录 B.5.3 和 B.5.6, 计算得到 γ_{sb} 为 2.84, γ_{se} 为 2.89, 最终得到初始油石比 q_a 为 4.0%。

3 基于抗疲劳性能的油石比优化

基于抗疲劳性能的混合料油石比的优化如下:

1) 以初始油石比作为参考值, 制作了 5 种油石比小梁试件, 并进行弯曲疲劳试验^[17]。

2) 建立应力-疲劳寿命方程, 见表 2。

3) 根据设计沥青路面结构中 ATB-25 基层应力大小及疲劳寿命方程, 计算出该应力下小梁试件的疲劳寿命。

4) 绘制在该应力条件下的油石比-疲劳寿命曲线, 如图 7 所示。

5) 将设计使用年限内车道当量累积标准轴载换算为室内疲劳寿命标准, 并根据室内疲劳寿命标准确定合适的油石比范围。

3.1 四点弯曲疲劳试验

以试件完全断裂作为疲劳破坏标准, 采用 MTS810 材料试验系统进行试验。具体如下:

1) 采用应力加载控制, 并设定波形为正弦波, 频率为 10 Hz。

2) 试验温度维持在 15 °C。

3) 制作混合料板块试件。

4) 切割成长 300 mm、宽 60 mm、高 90 mm 的小梁试件。

5) 应力比 s 分别为 0.3、0.4、0.5、0.6、0.7。

疲劳试验前, 选择 5 种不同的油石比 (3.2%、3.6%、4.0%、4.4%、4.8%), 对小梁试件进行四点弯拉强度测试, 得到小梁试件的最大弯拉应力分别为

0.78、1.01、1.24、2.15、3.56 MPa。

对疲劳寿命采用式(4)进行对数拟合,结果见表2。

$$\lg N_f = a - b\sigma \tag{6}$$

式中: a 为截距;

b 为斜率;

σ 为应力;

N_f 为疲劳寿命。

表2 ATB-25 小梁试件在不同应力比下的疲劳寿命

Table 2 Fatigue life of ATB-25 beam specimen at different stress ratios

油石比/ %	疲劳寿命/ 次					疲劳寿命方程
	$s=0.3$	$s=0.4$	$s=0.5$	$s=0.6$	$s=0.7$	
3.2	2 159	1 247	507	382	185	$\lg N_f = 4.120\ 64 - 3.394\ 14\sigma$ $R^2=0.950$
3.6	5 043	2 681	1 054	596	272	$\lg N_f = 4.666\ 77 - 3.156\ 22\sigma$ $R^2=0.987$
4.0	17 498	9 746	4 105	2 073	1 004	$\lg N_f = 5.210\ 04 - 2.544\ 1\sigma$ $R^2=0.993$
4.4	32 676	15 906	5 811	3 046	1 284	$\lg N_f = 5.578\ 91 - 1.641\ 31\sigma$ $R^2=0.989$
4.8	35 407	16 689	7 049	3 572	1 593	$\lg N_f = 5.556\ 42 - 0.944\ 62\sigma$ $R^2=0.997$

由表2可知:

1) 当油石比相同时,橡胶沥青 ATB-25 试件的疲劳寿命随应力比的增大而减小。应力比 s 为 0.5 时,疲劳寿命的降低幅度最为明显。与应力比 s 为 0.4 时相比,疲劳寿命降低 58%~64%;与应力比 s 为 0.3 时相比,应力比 s 为 0.5 时的疲劳寿命是应力比 s 为 0.3 时的 18%~23%。

2) 当应力比相同时,疲劳寿命随油石比的升高而增加。特别是对比油石比为 3.6% 和 4.0%,疲劳寿命的提高幅度更为明显。但是继续提高油石比,疲劳寿命的提高幅度明显降低。通过提高油石比,改善抗疲劳性能,提高疲劳寿命,其主要机理在于:空隙率会显著影响沥青混合料的疲劳寿命,空隙率越大,沥青混合料内部缺陷就越多。这些缺陷在荷载作用下,容易产生应力集中的薄弱点,从而诱导裂缝萌生。增加油石比,可以有效降低空隙率,使沥青混合料更加密实。当油石比继续增大并超过某一数值时,集料表面的沥青膜厚度会持续增加,

集料表面会有过多的自由沥青,导致集料之间的摩擦力降低,更容易产生相对滑动。因此,沥青混合料小梁试件的抗弯拉能力会下降,疲劳寿命也会降低。

3) 油石比增大时,斜率 b 总体上呈减小趋势,而截距 a 变大,降低了混合料对应力的敏感性,改善了抗疲劳性能。这是因为油石比越大,混合料越密实,相同荷载条件下产生的损伤程度越小,表明斜率 b 在变小。

3.2 沥青路面 ATB-25 基层受力情况

以湖南某高速公路的 ATB-25 基层沥青路面结构形式为例,具体见表3。采用 BISAR 3.0 软件来分析结构层的受力情况。假设各沥青层之间是连续的,但沥青层与水泥稳定碎石层之间是半连续的(在 BISAR 3.0 软件中,采用简化的剪切弹性柔量系数 ALK 作为层间接触状态表征参数),施加的单轴双轮荷载为 100 kN 均布荷载。经计算,ATB-25 基层的最大拉应力为 0.027 5 MPa,最大剪应力为 0.150 7 MPa。

表3 沥青路面结构及参数取值

Table 3 Structure and parameter values of asphalt pavement

结构层	厚度/ cm	回弹模量/ MPa	泊松比
上面层(SMA-13)	4	2 000	0.25
中面层(AC-20)	6	1 800	0.25
下面层(AC-25)	8	1 200	0.25
上基层(ATB-25)	11	1 400	0.25
水泥稳定碎石下基层	36	3 200	0.20
水泥稳定碎石底基层	20	3 000	0.20
土基	—	40	0.35

3.3 基于抗疲劳性能的油石比确定方法

为减少室内疲劳试验与实际路况的差异,修正室内疲劳方程^[18]。

通过已有的研究成果,把室内试验所得疲劳寿命 N_f 换算成实际累计当量轴次 N_e 。

$$N_e = A_1 \times A_2 \times A_3 \times A_4 \times N_f \quad (7)$$

式中: N_e 为累计标准轴载当量轴次;

A_1 为荷载间歇时间影响系数^[19], $A_1=5$;

A_2 为裂缝扩展影响系数^[19], $A_2=20$;

A_3 为行车荷载横向分布系数, $A_3=0.5$;

A_4 为不利季节天数影响系数,不利季节天数取值60 d^[19], $A_4=60/365$;

N_f 为室内疲劳试验所得疲劳寿命。

该高速公路在设计年限内累积标准轴载为 60×10^6 次,得到室内试验的疲劳寿命次数标准:

$$N_f = N_e \times \frac{1}{5} \times \frac{1}{20} \times \frac{1}{2} \times \frac{60}{365} = 49\,315 \text{ 次}$$

以析漏损失率“拐点”对应的油石比作为最佳油石比控制上限,确定4.4%油石比为最大沥青用量。根据橡胶沥青ATB-25应力-疲劳寿命方程(表2)以及沥青路面ATB-25基层底最大弯拉应力0.027 5 MPa,得到该应力水平下橡胶沥青ATB-25疲劳寿命与油石比的关系曲线,如图7所示。由室内疲劳寿命标准确定,满足疲劳寿命要求的最小油石比为3.7%。因此,确定基于抗弯拉疲劳性能的最优化油石比范围为3.7%~4.4%。

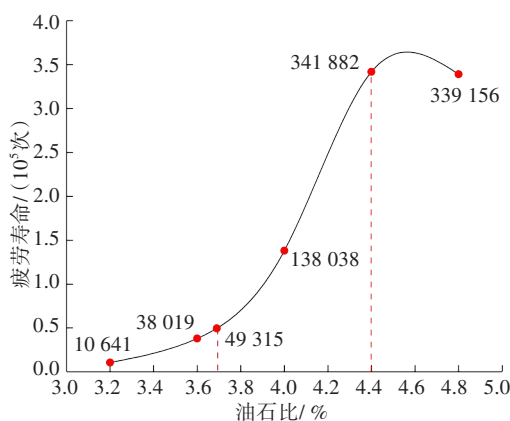


图7 不同油石比疲劳寿命关系曲线

Fig. 7 Fatigue life curve of different asphalt-aggregate ratios

4 剪切疲劳性能及高温稳定性

在车轮作用下,一定区域内的沥青路面会受到1次弯拉和2次剪切,因此需要进行剪切疲劳寿命性

能的验证。采用自制双面剪切仪对不同油石比(3.6%、4.0%、4.4%)的ATB-25小梁试件进行双面剪切疲劳试验^[20]。试验条件(加载方式、加载频率、试验温度、破坏标准)的设计同四点弯曲疲劳试验一致。

先对不同油石比(3.6%、4.0%、4.4%)的小梁试件进行了加载速率为5 mm/min的强度测试,得到剪切强度,分别为0.73、0.99、1.94 MPa,并将其作为剪切疲劳试验控制强度。最后进行在不同应力比 s 下的剪切疲劳试验,得到疲劳寿命(表4)。

表4 橡胶沥青ATB-25小梁试件剪切疲劳寿命

Table 4 Shear fatigue life of rubberized asphalt ATB-25 beam specimens

油石比/%	疲劳寿命/次				拟合公式	R^2
	$s = 0.3$	$s = 0.4$	$s = 0.5$	$s = 0.6$		
3.6	5 957	2 796	730	525	$\lg N_{f2} = 1.338 5 - 3.743 48 \lg \sigma_t$	0.963 35
4.0	7 307	3 841	866	667	$\lg N_{f2} = 1.930 89 - 3.754 74 \lg \sigma_t$	0.941 60
4.4	7 850	4 088	999	764	$\lg N_{f2} = 3.081 2 - 3.638 49 \lg \sigma_t$	0.947 43

采用双对数方程式(6)进行拟合:

$$\lg N_{f2} = n - k \sigma_t \quad (8)$$

式中: N_{f2} 为剪切疲劳寿命;

σ_t 为剪应力。

ATB-25沥青层的最大剪应力为0.150 7 MPa,代入表4拟合公式中,得到小梁试件的不同油石比(3.6%、4.0%、4.4%)的剪切疲劳寿命,分别为260 14次、103 958次和1 179 234次。剪切疲劳试验室内标准98 630次,因此确定符合剪切疲劳寿命的油石比范围为4.0%~4.4%。

动稳定度试验结果见表5。

表5 动稳定度试验结果

Table 5 Dynamic stability test results

油石比/%	车辙深度/mm		动稳定度/(次·mm ⁻¹)
	45 min	60 min	
3.6	3.369	3.575	3 058
4.0	3.112	3.227	5 478
4.4	2.863	2.960	6 495

由表5可知,油石比为3.6%~4.4%时,满足《公路沥青路面施工技术规范》(JT GF40—2004)动稳定度大于2 800次/mm的要求。

5 结论

1) 橡胶沥青的抗疲劳性能和高温性能是相互矛盾的两个物理量。在沥青中加入橡胶粉,可以提高橡胶沥青的高温性能,但同时也会降低抗疲劳性能。当胶粉掺量超过18%时,再增大掺量,对橡胶沥青的高温性能改善不明显,18%和20%两种掺量橡胶沥青的车辙因子和疲劳因子非常接近,但20%掺量橡胶沥青的相位角 δ 较小,抗变形能力好。综合考虑,采用掺量为20%的橡胶沥青。

2) 在相同荷载条件下,油石比越高,混合料越密实,对应力的敏感性降低,抗疲劳性能改善,疲劳寿命达到最佳。但是继续提高油石比,疲劳寿命的提高幅度有明显降低。在达到特定的油石比值之前,适当增加油石比,可以提高沥青混合料的抗疲劳性能。

3) 通过不同油石比的橡胶沥青ATB-25疲劳寿命方程以及路面结构ATB-25层底的拉应力,得到了该拉应力条件下油石比-疲劳寿命曲线。以室内疲劳寿命标准和析漏试验对油石比进行控制,得到基于抗疲劳性能的油石比优化范围。通过剪切疲劳寿命验证,最终确定满足抗弯拉和抗剪切疲劳性能的油石比范围为4.0%~4.4%,且在此范围内具有良好的高温稳定性。

参考文献(References):

- [1] 毛琪. 基于层位特性的中面层沥青混合料平衡设计法初步研究[D]. 武汉: 武汉工程大学, 2018.
MAO Qi. Investigation on asphalt mixture balance design of intermediate layer based on layer properties [D]. Wuhan: Wuhan Institute of Technology, 2018.
- [2] 王海朋, 陈静, 张晓华, 等. 应力吸收层沥青混合料设计及性能研究[J]. 公路, 2020, 65(2): 18-24.
WANG Haipeng, CHEN Jing, ZHANG Xiaohua, et al. Design and performance of stress absorption layer asphalt mixture[J]. Highway, 2020, 65(2): 18-24.
- [3] 蒋应军, 赵占林, 李明杰. 两种方法设计沥青混合料的疲劳特性[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2016, 37(4): 473-478. DOI: 10.3969/j. issn. 1671-7775.2016.04.017.
- JIANG Yingjun, ZHAO Zhanlin, LI Mingjie. Fatigue characteristics of asphalt mixture designed by two methods [J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 2016, 37(4): 473-478. DOI: 10.3969/j.issn.1671-7775.2016.04.017.
- [4] 柴金玲, 栗威. 基于GTM的沥青混合料配合比设计方法试验研究[J]. 材料导报, 2020, 34(增刊2): 1283-1287.
CHAI Jinling, LI Wei. GTM-based experimental study on the asphalt mixtures design [J]. Materials Reports, 2020, 34(sup2): 1283-1287.
- [5] 马耀宗, 刘聪, 陈杰, 等. 沥青混合料应力吸收层设计方法研究[J]. 公路, 2021, 66(4): 34-39.
MA Yaozong, LIU Cong, CHEN Jie, et al. Research on design method of asphalt mixture stress absorbing layer [J]. Highway, 2021, 66(4): 34-39.
- [6] 冯新军, 查旭东, 汪文渊, 等. 基于抗车辙和抗开裂的沥青混合料平衡设计[J]. 武汉理工大学学报, 2011, 33(5): 86-89, 112.
FENG Xinjun, ZHA Xudong, WANG Wen yuan, et al. Study on new mix design method for balancing anti-rutting and anti-cracking [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2011, 33(5): 86-89, 112.
- [7] 马金虎. ATB-25在霍永高速公路的应用技术研究[D]. 西安: 长安大学, 2016.
MA Jinhu. Applied technology study on ATB-25 in highway of Huoyong [D]. Xi'an: Chang'an University, 2016.
- [8] 徐乐, 刘路, 邵成龙. 沥青碎石路面ATB-25施工技术研究[J]. 公路, 2020, 65(6): 112-117.
XU Le, LIU Lu, SHAO Chenglong. Research on construction technology of asphalt macadam ATB-25[J]. Highway, 2020, 65(6): 112-117.
- [9] ZHANG J, LIU G, DU H, et al. Rheological properties of warm mix asphalt binder by DSR test at medium temperature[J]. Journal of Southeast University (English Edition), 2015, 31(3): 384-388. DOI: 10.3969/j. issn.1003-7985.2015.03.015.
- [10] HOSSAIN R, WASIUDDIN N M. A novel method for polymer content determination in asphalt binder and emulsion[J]. International Journal of Pavement Research and Technology, 2019, 12(6): 604-612. DOI: 10.1007/

- s42947-019-0072-6.
- [11] 杨三强, 饶奇, 史向英. 不同老化程度下沥青流变力学性能[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2019, 16(1): 22-27.
- YANG Sanqiang, RAO Qi, SHI Xiangying. Rheological mechanical properties of asphalt under different aging levels[J]. Journal of Changsha University of Science and Technology (Natural Science), 2019, 16(1): 22-27.
- [12] ZHANG Y H, WEI H, DAI Y H. Influence of different aging environments on rheological behavior and structural properties of rubber asphalt [J]. Materials, 2020, 13(15): 3376. DOI: 10.3390/ma13153376.
- [13] 刘黎萍, 张晓英. 沥青高温性能指标和混合料贯入强度相关性分析[J]. 交通科学与工程, 2018, 34(3): 1-6. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2018.03.001.
- LIU Liping, ZHANG Xiaoying. The correlation between the high temperature indicators of the asphalt and shearing properties of the mixture [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2018, 34(3): 1-6. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2018.03.001.
- [14] 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. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0268.2011.01.005.
- LI Tinggang, LI Jinzhong, 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. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0268.2011.01.005.
- [15] 马万, 邓宝智. 不同胶粉掺量的橡胶沥青黏弹性能评价[J]. 公路, 2018, 63(10): 109-113.
- MA Wan, DENG Baozhi. Evaluation of viscoelastic properties of rubber asphalt with different rubber powder content[J]. Highway, 2018, 63(10): 109-113.
- [16] 张书华. 贝雷法和CAVF法在AK-13A和SMA-13的混合料级配设计中的应用[J]. 公路交通科技, 2018, 35(9): 15-20. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0268.2018.09.003.
- ZHANG Shuhua. Application of Bailey Method and CAVF method in designing mixture gradation of AK-13A and SMA-13 [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2018, 35(9): 15-20. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0268.2018.09.003.
- [17] 刘明金, 柯望, 李闯民. 掺钢渣沥青混合料AC-13配合比优化设计[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2021, 18(1): 24-32. DOI: 10.19951/j.cnki.csldgdxzbzkb.2021.01.004.
- LIU Mingjin, KE Wang, LI Chuangmin. Optimization design of mixture ratio of AC-13 asphalt mixture mixed with steel slag [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2021, 18(1): 24-32. DOI: 10.19951/j.cnki.csldgdxzbzkb.2021.01.004.
- [18] 房娜仁, 王选仓, 叶宏宇, 等. 钢桥面浇筑式沥青混合料设计与疲劳寿命研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2020, 53(4): 318-323. DOI: 10.14188/j.1671-8844.2020-04-005.
- FANG Naren, WANG Xuancang, YE Hongyu, et al. Study on design and fatigue life of asphalt mixture poured on steel bridge deck [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2020, 53(4): 318-323. DOI: 10.14188/j.1671-8844.2020-04-005.
- [19] HINRICHSSEN J A, HEGGEN J. Minimum voids in mineral aggregate in hot-mix asphalt based on gradation and volumetric properties [J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 1996, 1545(1): 75-79. DOI: 10.1177/0361198196154500110.
- [20] 田小草, 韩海峰, 李新伟, 等. 抗裂型沥青稳定碎石的双面剪切疲劳性能研究[J]. 建筑材料学报, 2018, 21(1): 165-168. DOI: 10.3969/j.issn.1007-9629.2018.01.027.
- TIAN Xiaoge, HAN Haifeng, LI Xinwei, et al. Double side shear fatigue property of anti-cracking asphalt stabilized macadam [J]. Journal of Building Materials, 2018, 21(1): 165-168. DOI: 10.3969/j.issn.1007-9629.2018.01.027.

(责任编辑:罗容;校对:欧兆虎;英文编辑:杜明瑞)