DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.260439

沥青稳定碎石混合料水稳定性影响因素分析

张喜艳[1],王　春[2]
(1.西安西北民航项目管理有限公司,陕西 西安 710075; 2.长安大学,陕西 西安 710064)

摘　要: 为探究沥青稳定碎石混合料水稳定性的关键影响因素,针对ATB-30混合料通过水稳定性及高温车辙试验,系统分析了级配粗细、粉胶比和沥青膜厚度对混合料水稳定性的影响规律。结果表明:通过级配优化降低混合料粉胶比、增加沥青膜厚度可显著提升ATB-30的冻融劈裂强度比(TSR)。因为沥青膜厚度与TSR呈正相关,较厚的沥青膜可有效阻隔水分侵入,增强沥青与集料的黏附性;适宜的粉胶比有助于协同提升水稳定性与结构强度;同时优化后的级配使关键筛孔通过率更趋合理,提升了骨架密实性,减少了水分滞留空间。研究结果可为沥青稳定碎石混合料的配合比设计与水稳定性优化提供技术依据。

关键词: 道路工程;沥青稳定碎石;水稳定性;冻融劈裂强度比;粉胶比;沥青膜厚度
中图分类号: U414　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 1009-7716(2026)11-0084-04

Analysis on Factors Affecting Water Stability of Asphalt Stabilized Macadam Mixture

ZHANG Xiyan[1], WANG Chun[2]
(1. Xi'an Northwest Civil Aviation Project Management Co., Ltd., Xi'an 710075, China; 2. Changan University, Xi'an 710064, China)

Abstract: To explore the key factors influencing the water stability of asphalt stabilized macadam mixtures, through the water stability and high-temperature rutting tests on ATB-30 mixture, the influence laws of gradation fineness, filler-asphalt ratio and asphalt film thickness on the water stability of the mixture are systematically analyzed. The results show that optimizing gradation to reduce filler-asphalt ratio and increase asphalt film thickness can remarkably enhance the freeze-thaw splitting strength ratio (TSR) of ATB-30. Since the thickness of the asphalt film is positively correlated with TSR, a thicker asphalt film can effectively prevent water from penetrating and enhance the adhesion between asphalt and aggregates. A suitable filler-asphalt ratio helps to synergistically improve water stability and structural strength. At the same time, the optimized gradation makes the passage rate of key sieve holes more reasonable, enhances the compactness of the framework, and reduces the space for water retention. The research results can provide a technical basis for the mix proportion design and water stability optimization of asphalt stabilized macadam mixtures.

Keywords: road engineering; asphalt stabilized crushed stone; water stability; freeze-thaw splitting strength ratio; filler-asphalt ratio; asphalt film thickness

0　引　言

沥青路面水损害是其早期损坏的一种主要病害型式。水损害会引发唧浆、网裂和坑洞等早期病害,进而降低沥青路面的整体强度,诱发严重的车辙、沉陷等结构性破坏,最终削弱路面使用性能,缩短其服役寿命[1-5]。据调查,渗透到路面内部的水分是导致其发生损坏的重要原因[6-9]。研究表明,在水与车辆荷载耦合作用下产生的冲刷、泵吸及挤压作用,对路面结构的破坏比干燥状态下高出40倍以上[10-11]。因为水浸入沥青膜和集料界面之间时,由于水的强极性与集料表面的亲水性,共同导致集料表面对水的吸附力强于沥青,从而使沥青从集料表面逐渐剥落,形成路面水损病害[12-15]。

沥青稳定碎石(ATB)作为沥青路面下面层或柔性基层,虽然处在沥青路面下部,但由于其粒径大、沥青用量少,一旦路表水渗入下面层并滞留其中,那么也很容易使沥青从集料表面剥落,降低混合料强度和劲度,从而导致沥青下面层或基层在车辆荷载作用下过早发生破坏,并逐渐向上发展直至路面表面出现坑槽[16-19]。影响ATB水稳性能的因素很多,如原材料性质、混合料级配、油石比、空隙率等,如何确定并控制好其中关键影响因素十分重要[6]。

收稿日期:2026-04-22
作者简介:张喜艳(1986—),女,硕士,高级工程师,从事机场与道路工程研究工作。

因此，虽然沥青稳定碎石沥青用量小，造价相对较低，逐渐成为了各地沥青路面下面层或柔性基层的首选类型，应用越来越广泛，但仍有必要对其水稳定性进行研究。

1　试验材料

1.1　矿料

本试验选择了两种不同厂家生产的石灰岩，每种级配的细集料、矿粉均采用粗集料同一料源的9.5~19.0 mm碎石加工制成。两种级配所用矿料密度检测结果见表1，其余各项指标均符合JTG F40要求。

表1　矿料密度检测结果

石料规格/mm	级配1		级配2	
	毛体积相对密度	表观相对密度	毛体积相对密度	表观相对密度
19~37.5	2.656	2.751	2.701	2.720
9.5~19	2.667	2.738	2.690	2.718
4.75~9.5	2.651	2.755	2.678	2.724
2.36~4.75	2.626	2.766	2.652	2.712
0~2.36	2.695	2.695	2.724	2.724
矿粉	2.661	2.661	2.777	2.777
矿料合成毛体积相对密度γ_{sb}	2.664		2.697	
矿料合成表观相对密度γ_{sa}	2.735		2.722	

1.2　沥青

本试验采用韩国双龙A-70#沥青，其各项技术指标试验结果见表2。

表2　韩国双龙A-70#沥青试验结果

技术指标		检测值	试验方法
针入度(25 ℃，100g，5 s)/0.1 mm		65.3	T0604
软化点/℃		49.6	T0606
10 ℃延度/cm		54.5	T0605
15 ℃延度/cm		大于100	T0605
密度(15 ℃)/(g·cm^{-3})		0.985	T0603
TFOT(或RTFOT)后残留物	质量变化(%)	−0.20	T0609
	残留针入度(25 ℃)(%)	64.4	T0609、0604
	残留延度(10 ℃)/cm	10.1	T0609、0605

1.3　级配

按照JTG F40中ATB-30级配范围要求，根据两种不同集料筛分结果分别合成了级配1、级配2，其合成级配见表3。

2　试验方法

2.1　油石比确定

采用马歇尔试验方法确定ATB-30最佳油石比，试验结果见表4、表5，最终确定级配1最佳油石比为3.4%，级配2最佳油石比为3.3%。

表3　ATB-30合成级配

筛孔/mm		通过百分率(%)													
		37.5	31.5	26.5	19	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
级配1		100.0	96.9	87.7	68.7	60.6	52.1	43.0	28.9	19.4	14.8	10.2	8.2	6.7	5.2
级配2		100.0	98.0	86.0	68.2	62.7	53.9	42.5	27.5	17.9	13.0	9.5	7.6	6.2	5.1
级配范围	下限	100.0	92.0	82.0	63.0	57.0	49.0	39.0	25.0	15.0	10.0	7.0	5.0	4.0	3.0
	上限	100.0	100.0	90.0	72.0	66.0	59.0	49.0	33.0	23.0	16.0	13.0	9.0	8.0	6.0

表4　级配1马歇尔试验结果

油石比(%)	理论最大相对密度	毛体积相对密度	空隙率(%)	间隙率(%)	饱和度(%)	稳定度/kN	粉胶比FB	沥青膜厚度DA/μm
3.0	2.574	2.427	5.6	12.7	56.2	22.22	2.29	5.44
3.4	2.558	2.443	4.5	12.6	64.4	24.86	1.96	6.35
3.8	2.542	2.454	3.5	12.5	72.4	21.47	1.72	7.25

表5　级配2马歇尔试验结果

油石比(%)	理论最大相对密度	毛体积相对密度	空隙率(%)	间隙率(%)	饱和度(%)	稳定度/kN	粉胶比FB	沥青膜厚度DA/μm
2.9	2.579	2.427	5.9	12.6	53.1	17.34	2.00	6.40
3.3	2.563	2.444	4.6	12.3	62.2	22.70	1.74	7.35
3.7	2.547	2.455	3.6	12.2	75.2	17.71	1.55	8.29

2.2　性能验证与优化试验

采用车辙、浸水马歇尔及冻融劈裂试验等对ATB-30的路用性能进行验证。

对于冻融劈裂较差不能满足规范要求的情况，进行级配优化后重新验证，并通过计算沥青膜厚度、粉胶比等分析其水稳定性变化机理。

3　试验结果分析

3.1　路用性能

对级配1、级配2两种ATB-30沥青混合料的高温车辙、水稳定性进行验证，试验结果见表6。

表6　混合料性能试验结果

级配	动稳定度/次/mm	残留稳定度(%)	冻融劈裂强度比(%)
级配1	3459	86.8	61.4
级配2	3370	88.9	65.3

由表6可知，两个级配的ATB-30沥青混合料在车辙动稳定度和浸水残留稳定度方面表现良好：动稳定度均超过3 300次/mm，远高于规范中对沥青稳定碎石混合料高温稳定性的一般要求（通常不小于800次/mm），表明混合料具备较强的抗车辙能力；浸水残留稳定度均不小于80%，说明混合料在长期浸水条件下仍能保持一定的结构稳定性。

然而，两个级配的冻融劈裂强度比均未达到规范要求（不小于70%），这表明ATB-30混合料在冻融循环作用下的水稳定性不足，结合马歇尔试验数据（见表4、表5）分析可知，冻融劈裂强度比偏低与混合料的粉胶比和沥青膜厚度密切相关。

（1）沥青膜厚度方面：级配1最佳油石比（3.4%）对应的沥青膜厚度为6.35 μm，级配2最佳油石比（3.3%）对应的沥青膜厚度为7.35 μm。相关研究表明，一般情况下当沥青膜厚度低于7 μm时，难以形成连续、致密的保护膜包裹集料表面，水分易通过沥青膜的薄弱环节侵入沥青-集料界面，破坏二者的黏附性。级配1的沥青膜厚度仅6.35 μm，是其冻融劈裂强度比更低的重要原因；级配2虽沥青膜厚度略高，但仍处于临界区间，且受粉胶比影响，水稳定性未得到有效提升。

（2）粉胶比方面：粉胶比反映了矿粉与沥青的比例关系，过高的粉胶比会导致矿粉无法被沥青充分裹覆，多余的矿粉颗粒形成松散结构，增大混合料内部空隙率，使水分易滞留并产生冻融破坏；而粉胶比过低则会降低混合料的黏结强度。级配1的粉胶比（1.96）较高，导致混合料内部结构密实度不足，冻融循环中水分的侵蚀作用加剧，最终表现为冻融劈裂强度比偏低；级配2的粉胶比（1.74）虽相对合理，但受沥青膜厚度及级配组成的综合影响，其冻融劈裂强度比仍然没有达到规范相关技术要求。

3.2　级配优化

根据试验结果对级配1、级配2的级配组成进行调整优化：一方面通过增加4.75 mm筛孔通过率，提升细料比例，使混合料更密实；另一方面通过适当提高油石比增加沥青膜厚度、减小粉胶比，从而增强沥青及沥青胶浆与集料的黏附性。优化后合成级配见表7。

表7　优化后ATB-30合成级配

筛孔/mm	通过百分率(%)													
	37.5	31.5	26.5	19	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
级配1优化后	100.0	98.3	85.2	67.0	58.9	53.2	43.2	29.4	17.9	13.1	9.7	7.6	5.7	5.3
级配2优化后	100.0	96.7	84.6	68.9	61.2	53.4	44.0	29.2	19.2	16.3	10.9	7.5	6.2	5.1

按照优化后的级配，以3.5%作为最佳油石比验证其混合料体积指标，结果见表8。

表8　优化后马歇尔试验结果

级配	油石比(%)	理论最大相对密度	毛体积相对密度	空隙率(%)	间隙率(%)	饱和度(%)	粉胶比FB	沥青膜厚度DA/μm
级配1	3.5	2.575	2.452	4.8	12.5	61.1	1.94	6.85
级配2	3.5	2.562	2.453	4.3	12.0	64.6	1.64	7.60

由表8可知，采用3.5%的油石比后，混合料的各项马歇尔指标均处于合理范围，符合ATB-30混合料的设计要求，表明混合料内部沥青填充状态良好。在此基础上，对优化后级配进行路用性能验证，试验结果见表9。

表9　优化级配后路用性能试验结果（油石比3.5%）

级配	动稳定度/(次·mm^{-1})	残留稳定度(%)	冻融劈裂强度比(%)
级配1	3 637	90.2	81.4
级配2	3 963	88.3	83.2

由表9可知，级配优化后采用3.5%的油石比，ATB-30混合料的动稳定度和残留稳定度进一步提升，表明级配优化未对混合料的结构稳定性产生负面影响。更为关键的是，两种级配的冻融劈裂强度比也都得到了大幅提升，且均已满足规范要求（不小于70%），说明级配优化显著改善了ATB-30的水稳定性。结合级配优化后粉胶比和沥青膜厚度的变化，对其作用机理分析如下：

3.2.1　沥青膜厚度对冻融劈裂强度比的影响

优化后，级配 1 的沥青膜厚度从 6.35 μm 增加至 6.85 μm，级配 2 从 7.35 μm 增加至 7.60 μm。沥青膜厚度的增加直接提升了集料表面的防护能力，一方面，较厚的沥青膜可有效阻隔水分与集料表面的接触，降低水对沥青与集料黏附界面的破坏；另一方面，充足的沥青能更充分地裹覆集料颗粒，增强颗粒间的黏结力，即使在冻融循环导致水分结冰膨胀、融化收缩的反复作用下，沥青膜也不易发生破裂和剥落。已有研究显示，沥青膜厚度每增加 0.5 μm 左右，冻融劈裂强度比可提升约 10%~15%，本试验也验证了沥青膜厚度是影响混合料水稳定性的核心因素之一。

3.2.2　粉胶比对冻融劈裂强度比的影响

级配优化后，粉胶比得到合理调控，级配 1 的粉胶比从 1.96 降至 1.94，级配 2 从 1.74 降至 1.64。粉胶比的降低，一方面减少了多余矿粉的松散作用，使混合料内部结构更密实，水分渗透路径缩短，冻融破坏的概率降低；另一方面适宜的粉胶比使矿粉与沥青形成了更稳定的胶浆体，既保证了胶浆的黏结强度，又避免了胶浆过稠导致的内部空隙增大。

3.2.3　级配优化的协同作用

优化后的级配在关键筛孔（如 2.36、1.18、0.6 mm）的通过百分率更趋合理，使混合料的骨架结构更稳定，密实度更高。稳定的骨架结构可减少水分的滞留空间，同时增强混合料对冻融循环产生的体积变形的抵抗能力，与合理的粉胶比、充足的沥青膜厚度协同作用，最终实现了冻融劈裂强度比的大幅提升。不过由于不同来源的集料岩石成分上的差异，使得集料吸水率不同，导致在相同或相近的油石比、合成级配时，沥青膜厚度、粉胶比差异仍较大，所以虽然级配 1 和级配 2 的混合料性能较为接近，但其沥青膜厚度、粉胶比的绝对值相差较为明显。因此，在配合比设计中沥青膜厚度、粉胶比的适宜范围应结合具体材料特性进行针对性调整。

4　结　论

本文通过 ATB-30 的水稳定性能试验，深入研究了级配、粉胶比、沥青膜厚度等对沥青稳定碎石水稳定性能的影响，得到了以下结论：

（1）沥青膜厚度是 ATB-30 冻融劈裂强度比的关键影响因素，与水稳定性呈正相关关系。当沥青膜厚度较低时，混合料难以抵御水分侵蚀和冻融破坏，冻融劈裂强度比也很难达到规范要求；而通过合理提高油石比来提升沥青膜厚度，可有效增强沥青与集料的黏附性，阻隔水分侵入，显著提升混合料抗水侵蚀与冻融破坏能力。

（2）粉胶比对混合料水稳定性具有显著调控作用，粉胶比过高会导致混合料内部结构松散，空隙率增大，水分易滞留并引发冻融破坏；粉胶比过低则会降低胶浆黏结强度，影响混合料整体稳定性。级配优化后混合料的粉胶比处于适宜区间，协同提升了混合料水稳定性和结构强度。

（3）级配优化可改善混合料的骨架密实结构，减少水分渗透和滞留空间，与油石比调整相结合，能实现粉胶比和沥青膜厚度的协同优化，提升冻融劈裂强度比的同时也使高温与浸水稳定性保持良好，满足路用性能要求。

（4）ATB-30 的水稳定性是沥青膜厚度、粉胶比、级配组成等多因素协同作用的结果。在配合比设计中，应通过级配优化、油石比调整等手段，将沥青膜厚度、粉胶比控制在合理水平，以实现混合料水稳定性与其他路用性能的均衡提升。

参考文献：

[1] 胡晓宇，陈辉亚. 沥青路面早期水损坏演化分析及评价指标研究[J]. 公路，2022(7)：130-134.
[2] 彭响兰. 沥青路面渗水病害分析及处治措施[J]. 公路工程，2014，39(4)：182-185.
[3] 王连中. 影响沥青路面渗水性能的因素分析[J]. 中国公路，2005(4)：92.
[4] 徐义标，丁立. 沥青混合料浸水疲劳的试验研究[J]. 中外公路，2011，31(4)：258-260.
[5] 杨若冲，梁锡三，赖用满. 沥青路面水损害典型原因与对策[J]. 同济大学学报(自然科学版)，2008，36(6)：749-753.
[6] 徐松，唐伯明，朱洪洲，等基于灰熵法的沥青稳定碎石水稳定性影响因素分析[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版)，2008，27(6)：1077-1080.
[7] 姜永昌. 沥青路面水损害分析与防治措施[J]. 公路交通科技，2004，21(4)：9-11.
[8] 顾青. 沥青路面渗水浅析[J]. 湖南交通科技，2004(4)：10-13.
[9] 王薇. 沥青路面渗水性的影响因素研究[D]. 石家庄：河北工业大学，2010.
[10] 周志刚，李岩，俞文生，等. 不同荷载模式作用下饱水沥青路面结构动力响应对比分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版)，2019，35(2)：263-276.
[11] 潘宝峰. 动水压力作用下路面材料损伤的评价方法研究[D]. 大连：大连理工大学，2010.
[12] 朱洪洲，李丽明，韩均. 沥青稳定碎石基层水稳定性试验研究[J]. 重庆交通学院学报，2006，25：64-67.
[13] 沈金安. 解决高速公路沥青路面水损害早期损坏的技术途径[J]. 公路，2000(5)：71-75.

（下转第 133 页）