

提升沥青路面抗水损害能力措施综述

王玉林¹, 徐宁², 卢东³

(1. 甘肃恒和交通设施安装有限公司, 甘肃 兰州 730030; 2. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064;

3. 长安大学 材料学院, 陕西 西安 710064)

摘要:水损害是道路工程领域持续关注的问题。为了提升沥青路面抗水损害能力,缓解沥青路面水损害,该文综合梳理了国内外相关文献,在分析水损害机理的基础上,对提升沥青路面抗水损害能力措施进行了总结与评价。结果表明:合理选择原材料,添加抗剥落剂,优化路面结构、控制施工质量等措施均可以提高沥青路面抗水损害能力,但应根据具体的情况综合考虑加以选择,才能相得益彰。

关键词:沥青路面; 水损害机理; 原材料; 抗剥落剂; 路面结构; 施工控制

水损害是指水分侵入路面结构内部,导致混合料强度降低,在车辆荷载等作用下使路面逐渐出现掉粒、松散及结构性破坏等问题^[1]。水损害是中国高速公路沥青路面早期损坏的主要表现形式,严重降低了沥青路面的路用性能,缩短道路使用寿命。因此,采用综合措施提升沥青路面抗水损害能力尤为重要。

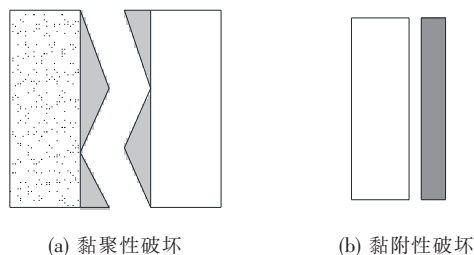


图1 沥青混合料内的水损害特征

1 沥青路面水损害机理

水损害常以两种内在形式出现,即黏聚破坏和黏附破坏,如图1所示。黏聚破坏是指在水的作用下沥青变软,致使集料间的沥青开裂;黏附破坏是指水分进入沥青和集料界面,发生置换、乳化等作用,导致沥青与集料黏结力丧失,沥青从集料表面剥离。

目前的研究更多偏向于沥青和集料间的黏附破坏^[2]。研究人员提出了机械黏附理论、化学反应理论、表面能理论、极性理论等一系列理论定性描述沥青与集料的黏附机理,并基于上述黏附理论揭示水损害机理^[3]。然而沥青路面水损害机理尚未统一,目前主要有以下几种破坏机理^[4-8]:

- *****
- [6] 张献民,董倩,吕耀志. 飞机主起落架构型对道面力学响应的影响[J]. 西南交通大学学报,2014,49(4):675-681.
- [7] 程国勇,王肖江,冯长峰. 飞机临界荷位的道面板内最大弯矩和板边弯矩分析[J]. 公路交通科技,2019,36(2):14-18.
- [8] 聂敏. 特重荷载交通作用下重型水泥混凝土路面结构研究[D]. 武汉理工大学硕士学位论文,2011.
- [9] 颜祥程,翁兴中,杨立耀. 机场水泥混凝土道面加铺层结构接缝传荷能力分析[J]. 公路,2015,60(8):46-50.
- [10] Yong-Kang Fu, Yun-Liang Li, Yi-Qiu Tan, et al. Dynamic Response Analyses of Snow-Melting Airport Rigid Pavement under Different Types of Moving Loads

- [J]. Road Materials and Pavement Design,2019,20(4):943-963.
- [11] 阳栋,谭立新. A380 轮载作用下刚性机场跑道临界响应研究[J]. 中外公路,2018,38(2):58-63.
- [12] 刘春华. 水泥混凝土路面基层支撑均匀性控制标准研究[J]. 中外公路,2020,40(4):53-58.
- [13] 邱伟,易善昌,龚维亮,等. 基于 EPS 的海相深厚软基区路基不均匀沉降处治研究[J]. 中外公路,2018,38(4):19-23.
- [14] 张海涛,于腾江,吕丽华. 水泥混凝土路面设计极限状态方程的研究[J]. 土木工程学报,2015,48(7):123-128.

收稿日期:2021-04-02(修改稿)

基金项目:浙江省公路管理局科技项目(编号:2018H37)

作者简介:王玉林,男,硕士,高级工程师. E-mail:2843089984@qq.com

(1) 置换:水对于集料的润湿作用强于沥青,其渗透进入集料与沥青界面后,减小了沥青与集料的黏结面积,最终使沥青膜沿集料表面完整脱离,但沥青膜并没有严重破损。当水分消散,沥青和集料重新受热后,两者又能形成较好的黏结力。道路实际环境并不能提供这样的条件,因此在车辆荷载作用下,沥青混合料逐渐松散。

(2) 撕裂:当沥青膜有破损时,水沿破损处进入集料表面并向四周扩散而使沥青膜剥落。集料表面黏附不完整,集料锐利的边角处沥青膜破裂,集料表面沥青膜上的小孔等都会导致沥青膜被剥落,致使沥青从集料表面分离。

(3) 乳化:沥青与水接触的瞬间会发生乳化现象。当乳化进行到一定程度时,沥青和集料便失去了黏结性,进而出现剥离、剥落等问题。

(4) 冻胀:温度较低时,进入路面结构内的水结成冰体会增大,强大的膨胀力破坏了沥青混合料的黏结性。

(5) 空隙水压:沥青混合料中空隙不能相互接触,置于空隙中的水在车辆荷载反复作用下产生的应力梯度,促使水流动产生水压。空隙水压使胶浆产生微裂缝,并逐渐使沥青膜破裂脱落。

(6) 水力冲刷:饱水面层在车辆荷载作用下的结果。渗透和回抽是水力冲刷的机理。此外,当集料孔隙有盐,或者盐溶液,产生了渗透梯度,驱动水分穿透沥青膜,从而加速沥青膜破坏。

(7) pH 失衡:沥青与集料的黏附性受侵入水 pH 值影响很大。沥青和集料界面 pH 值稳定,可以最大程度降低黏附失效的可能,形成强力持久的黏附能力。水的 pH 值影响沥青和集料的接触角。当进入路面结构内的水受到盐溶液的影响而 pH 值发生变化时会增大沥青膜剥落的可能性。

2 提升沥青混合料抗水损害能力措施

从水损害机理可以看出:水进入沥青—集料界面导致沥青从集料表面剥离是水损害的根本来源。因此,可从以下两个方面提升沥青混合料抗水损害能力:

① 改善沥青与集料的黏附性;② 减少水分进入沥青路面。通常情况下,合理选择原材料、添加抗剥落剂等可以改善沥青与集料的黏附性,在路面结构、施工等方面采取合适措施可减少水分进入路面结构内部,有效提升沥青路面水稳定性。因此,该文从原材料、抗剥落

剂、路面结构、施工控制措施 4 个方面对改善沥青路面抗水损害能力的措施进行总结,以期采用科学的方法缓解沥青路面的水损害问题。

2.1 采用良好的路面材料

2.1.1 基质沥青

沥青中沥青质、芳香分、饱和分、胶质等组分比例对黏附性有一定的影响。胶质在沥青中起稠化剂作用,其黏度远大于饱和分和芳香分,因此,胶质含量对沥青和集料黏附性的影响程度较高^[9]。蔡婷^[10]研究表明:沥青黏度与胶质含量有较好的相关性,胶质、沥青质与各种矿料的黏附性最好,而饱和分与矿料的黏附性最差;Zhao, PH 等^[11]研究指出芳香环的缩合指数越大,烷基碳含量越低,越有助于提高沥青的界面活性;周卫峰等^[12]对沥青酸值、接触角、含蜡量及黏度与黏附性关系进行了探索,研究指出从沥青角度来讲,使用酸值大、黏度大、含蜡量小、击穿电压小的沥青可以提高黏附性,改善沥青混合料抗水损害能力。

总体来说,工程应用时,应选择黏性较大,不含或少含对水敏感组分的沥青。此外,对沥青改性也可以相应提高沥青混合料抗水损害能力。

2.1.2 改性沥青

改性沥青作为一种有效提升沥青品质的途径,在工程实践中取得了较好的使用效果,其不仅具有较好的耐久性,还具有出色的水稳定性^[13]。常用的沥青改性剂有以下几类:聚合物改性剂(热塑性橡胶类、橡胶类、树脂类)、填充类改性剂(天然沥青、硫磺等)、纤维类改性剂(聚合物纤维、矿物纤维等)、纳米粒子类改性剂(纳米氧化锌、纳米二氧化硅、纳米蒙脱土等)。

(1) 聚合物改性剂

聚合物改性剂中常用的是 SBS、SBR、PE、EVA 4 种改性剂。其中 SBS 改性剂因其全面的改性效果而被广泛应用。SBS 改性剂是一种丁二烯和 1,3-苯乙炔为单体的热塑性弹性体,其苯乙烯段(S)和丁二烯链段(B)具有两个不同的玻璃化温度,使得 SBS 高温下具有塑性,低温下具有橡胶特性。此外,SBS 在沥青中能形成一种独立的网状结构,并且改善沥青的黏度^[14]。经 SBS 改性后,沥青发生上述一系列变化,高低温性能得到改善,且抗水损害能力也得到大幅提高。

(2) 填充类改性剂

天然沥青改性沥青因其良好的路用性能而被广泛应用于机场跑道、桥面铺装、高速公路等。Li, L 等^[15]研究指出,用岩沥青改性基质沥青后,沥青微观结构发生了变化,同时沥青的温度敏感性降低,水稳定性增

强;张恒龙^[16]研究表明,特立尼达湖沥青(TLA)加入沥青中改变了基质沥青中各组分的相互作用,增大沥青黏度,从而对提高沥青混合料水稳定性有积极作用。此外,硫磺对沥青混合料的水稳定性也有相应的改善作用。硫磺夺取沥青中的氢生成硫化氢,同时和沥青分子发生交换作用生成含硫基团,改变了沥青组成和性质,增强沥青混合料内部的黏聚力,从而提高沥青混合料的水稳定性;于海臣、孙立军等^[17]研究表明,硫磺可以改善沥青混合料的水稳定性,但掺量应控制为20%~25%,当硫磺掺量较高时,单质形态存在的硫磺提高了混合料的粉胶比,一定程度上会降低沥青与集料的黏附性。

(3) 纤维类改性剂

纤维类改性剂可以纵横交错分布在沥青混合料中,并发挥加筋作用、稳定作用、增黏作用,增强沥青与集料间的黏附性,因此可以提高沥青混合料水稳定性。常用的纤维类改性剂包括聚酯纤维、玄武岩纤维、木质素纤维等。Yin,CL 等^[18]研究指出,玄武岩纤维改善了沥青—矿料间的界面结合强度,并提升了沥青黏性,与不添加玄武岩纤维的沥青混凝土相比,其具有更好的耐久性和水稳定性;赵颖华等^[19]研究表明,聚酯纤维在沥青中呈立体分布,在“加筋”和“桥接”作用下将沥青和集料有机结合,提高了水稳定性。但聚酯纤维掺量较大时出现凝聚和结团现象,因此其掺量应控制为0.2%~0.25%^[20];包塔纳^[21]研究表明:由木质素纤维、聚酯纤维组成的复合纤维可以大幅提高沥青混合料的抗水损害能力,复合改性后的沥青混合料水稳定性优于SBS改性沥青混合料。

(4) 纳米粒子类改性剂

王萌等^[22]探究了碳纳米管改性沥青的黏附性,陈涵召等^[23]对纳米 ZnO 改性沥青混合料进行了研究,孙璐^[24]探究了纳米 SiO₂ 对沥青的改性效果,结果表明,这些纳米粒子改性剂在一定程度上均可以提高沥青混合料的抗水损坏能力。但目前这些纳米粒子改性剂成本昂贵,且在沥青中容易出现团聚,不能充分发挥纳米粒子的改性效果^[25]。总体来说,目前纳米材料改性剂技术还有待进一步深入研究。

2.1.3 集料

沥青只是影响黏附性的一个方面,除此之外,集料的酸碱性、表面电荷性质、表面特征等方面对黏附性也有较大的影响。合理选择集料,在一定程度上也可以提高沥青混合料抗水损害能力。

(1) 集料的酸碱性

通常情况下,按 SiO₂ 含量大于 65%、65%~52% 及小于 52%,依次将集料分为酸性、中性和碱性。沥青与集料界面存在物理作用和化学作用,但化学作用分子键力远强于物理作用。研究表明:碱性集料易于与沥青表面沥青酸等活性物质发生化学反应,从而改善沥青—矿料间界面结合强度^[26]。因此,工程应用时应首选碱性集料。然而,优质的碱性石料并非用之不竭,同时,酸性集料耐磨性好,硬度大,一定程度上也是良好的路面材料,可见,如何提高酸性集料与沥青黏附性也是当前需要解决的问题。

(2) 集料表面改性

酸性集料具有优良力学性能,工程建设中也会大量使用酸性集料。为了克服酸性集料与沥青黏附性不佳的问题,可对集料进行表面改性^[27]。集料表面改性主要依靠改性剂在集料颗粒表面的吸附、反应、包覆等,实现集料亲油疏水的目的,同时使集料与沥青间产生键桥连接^[28]。杨平等^[29]研究了油溶性和水溶性两种不同体系的界面改性剂对集料—沥青黏附性的影响,两种改性剂组成如表 1、2 所示,其研究指出:0.6% 水溶性改性剂和 0.6% 油溶性改性剂对沥青混合料的抗水损害能力提高程度最明显。此外,硅烷偶联剂,聚乙烯(高密度、低密度)等也被用作集料界面改性剂,可以明显提高酸性集料与沥青的黏附性^[30-31]。

表 1 油溶性界面改性剂组成成分

改性剂组分	质量分数/%	改性剂组分	质量分数/%
有机溶剂	30~50	固化剂	5~10
环氧树脂	10~20	固化促进剂	3~5
偶联剂	5~10	增韧剂	3~5

表 2 水溶性界面改性剂组成成分

改性剂组分	质量分数/%	改性剂组分	质量分数/%
水溶剂	20.0~40.0	表面活性剂	0.3~2.0
树脂	20.0~30.0	促进剂	3.0~10.0
偶联剂	5.0~20.0	稳定剂	0.5~2.0
抗氧剂	0.5~2.0	加工助剂	5.0~10.0
乳化剂	0.3~2.0		

(3) 集料表面电荷

集料表面往往分布着不同电位和性质的电荷。周卫峰等^[32]研究表明,集料的 Y 电位大小可以反映集料与沥青黏附性大小关系,Y 电位越大,集料与同种沥青的黏附性越好;陈实等^[33]研究表明,集料的 ζ 电位为

正值时,其值越大,与沥青的黏附性也越大; ζ 电位为负值时,其绝对值越大,与沥青的黏附性越差;陈燕娟^[34]研究表明:集料的 Zeta 电位越大,沥青的黏附等级就越高。通过上述研究可以看出,一定程度上可通过电位法为集料选择提供帮助。

(4) 集料表面特征

集料表面特征是指集料在加工过程中因诸多因素综合作用而残留在集料表面的各种不同形貌和表面特征,包括表面粗糙度、表面空隙率、表面粉末等。集料表面纹理丰富,可增大沥青与集料表面的接触面积及两者之间的机械黏附力。集料表面具有一定的孔隙,沥青可浸入集料孔隙之中,形成微孔吸附^[35]。此时孔隙及孔隙周围的沥青膜能更牢固吸附于集料表面,改善了沥青与集料的黏附行为,增强了沥青与集料的机械黏附力,如图 2 所示。此外,杨文峰^[36]研究表明,集料表面的粉尘对沥青混合料水稳定性有害,应尽量保持集料洁净干燥。为了降低粉尘对沥青和集料黏附

性的影响,可采用消石灰处理表面有黏土、粉尘的集料。总的来说,在工程应用时,应优先选择洁净干燥、表面粗糙度大、具有一定空隙率的集料。

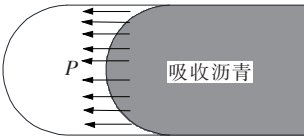


图 2 沥青的孔隙吸附

2.2 添加抗剥落剂

抗剥落剂是提升沥青路面水稳定性的重要措施,在工程中也得到广泛应用。抗剥落剂在不同时期具有不同代表性的产品类型^[37],其发展历程如表 3 所示。水泥、消石灰等是较早使用的无机抗剥落剂,对改善沥青与集料的黏附性具有良好的效果,但工艺复杂。随着抗剥落剂产品的发展,高分子聚合物类抗剥落剂开始被大量使用。

表 3 抗剥落剂的发展历程

发展历程	类型	使用对象	代表物	优点	缺点	使用情况
第 1 代	无机	集料	石灰,消石灰	成本低,效果好	工艺复杂	大量使用
第 2 代	金属皂化物	沥青	皂脚铁	成本低,使用方便	易离析	较少使用
第 3 代	表面活性剂	沥青	季胺盐	使用方便	热稳定性差	较少使用
第 4 代	高分子类	沥青	胺类、非胺类	使用方便,效果好	成本高	大量使用

(1) 水泥、消石灰

水泥和消石灰等无机抗剥落剂可以改善沥青与集料的界面黏附行为。裹附在集料表面的抗剥落剂富含碱性物质(CaO 等),可与界面沥青中的酸性物质反应,形成强有力的化学黏结,其也可以置换集料表面的 K^+ 、 N^+ 、 H^+ 等,起到表面活化剂作用^[38]。此外,消石灰可改善集料表面孔隙结构,其裹附在集料表面形成的多孔粗糙覆盖层可促进沥青发生微孔吸附,增强沥青与集料的机械黏附力^[38]。然而,水泥、消石灰等无机抗剥落剂掺量对混合料油石比、压实度等影响较大^[39]。日本《沥青路面纲要》提出水泥和消石灰掺量为 1%~3%时对黏附性的提升最大;刘涛^[40]研究指出,对于消石灰复配水泥型抗剥落剂,消石灰复配水泥(质量比 1:2)剂量为 1.5%时对沥青混合料水稳定性改善效果最佳。

(2) 胺类抗剥落剂

胺类抗剥落剂多以脂肪族胺为基础,是一种表面活性化合物,目前应用较多。这类抗剥落剂带有大量

正电荷的极性基团,与酸性集料表面所带的负电荷二者相吸,产生较强的吸附作用。因此,其可增强沥青与集料的黏附性,图 3 为胺类抗剥落剂的作用机理示意图。相关研究表明,胺类抗剥落剂在 160 ℃左右会产生分解、蒸发,稳定性及耐久性相对较差^[41]。因此,工程采用胺类抗剥落剂时应控制拌和温度。

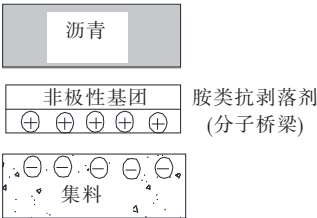


图 3 胺类抗剥落剂增强黏附性机理

(3) 非胺类抗剥落剂

非胺类抗剥落剂多以有磷羟基类为基础。研究表明^[42],在沥青中添加 0.4%的非胺类抗剥落剂,不但可以改善沥青与石料的黏附性,尤其是酸性石料(花岗

岩),且在薄膜烘箱老化后,其黏附性也不会降低;而胺类抗剥落剂,虽然在老化前可以提高沥青与各种石料的黏附性,但在热老化后效果大大降低,所以非胺类抗剥落剂比胺类抗剥落剂的耐热性要好。但并不是所有非胺类的抗剥落剂效果都要比胺类抗剥落剂好,抗剥落剂在某种程度上与集料的种类有一定的配伍性。因此,抗剥落剂的选择宜通过试验确定。

(4) 新型抗剥落剂

Zycosoil 纳米抗剥落剂是目前研究最多的新型抗剥落剂,其热稳定性及性能优良。Behbahani H^[43] 研究表明:Zycosoil 作为抗剥落剂可以改善沥青混合料的力学性能和水稳定性;钟志峰^[44] 研究指出,Zycosoil 纳米抗剥落剂可促使花岗岩集料表面硅醇(Si-OH)亲水基团转变为硅氧(Si-O)疏水基团,从而改善酸性集料与沥青的黏附性。不同岩性的集料表面均具有硅醇(Si-OH)亲水性基团。Zycosoil 纳米材料加入混合料中,其使亲水的硅醇(Si-OH)基团转为疏水的硅氧(Si-O)基团,从而在集料表面形成疏水分子层,并形成分子级的化学胶结,提高沥青和集料的黏附性,其反应机理如图 4 所示。

此外,沥青与集料相互作用过程中,Zycosoil 纳米抗剥落剂可大幅提高沥青中参与胶结的组分比例,使

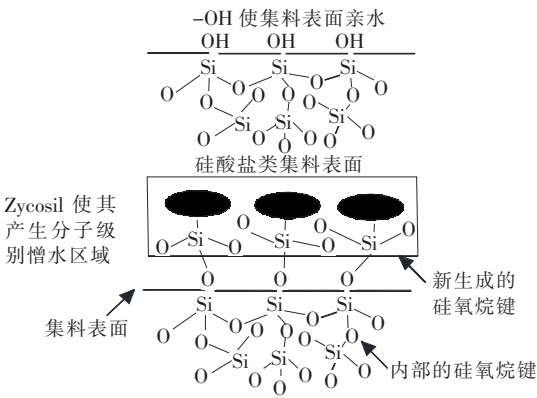


图 4 Zycosoil 纳米抗剥落剂作用机理

沥青中参与胶结的极性基团胶结组分由 5%~10% 提升至 90%~95%，从而提高沥青与集料间的黏附性^[44]。但 Zycosoil 纳米抗剥落剂价格昂贵,还未在中国普及。

2.3 优化路面结构

(1) 设置防水层

为了防止雨水等渗透进入沥青内部产生冲刷、唧浆等破坏,需设置沥青路面防水层。中国高速公路较常见的防水层种类有单层或双层表面处治、细粒式或砂粒式沥青混合料、乳化沥青或改性乳化沥青稀浆封层以及 SBS 改性沥青防水层^[45],其特点如表 4 所示。

表 4 防水层种类及特点

防水层种类	厚度/cm	特点
单层或双层表面处治	1.0~2.5	低温季节施工困难,高温抗剪强度低
细粒式或砂粒式沥青混合料	2.0~2.5	高温抗剪性能差,施工周期长
乳化沥青或改性乳化沥青稀浆封层	6.0	强度低,高温性能差、有潜在的软弱夹层
SBS 改性剂沥青防水层(洒布量约为 1.8 kg/m ²)	0.18	高温抗剪性能好、抗裂性好、施工速度快

从表 4 可以看出:与其他几种防水层材料不同,聚合物 SBS 改性沥青防水层高温抗剪性能好、抗裂性好、施工速度快。此外,聚合物 SBS 改性沥青防水层曾在京石高速、京沪高速、商开高速、广深高速等罩面工程中应用,效果良好^[46]。建议采用聚合物 SBS 改性沥青作为沥青路面的防水层材料。

(2) 完善路面排水设计

水分长期滞留在路面结构内部会导致路面结构整体强度降低。为了防止水分对路面结构的影响,提高沥青路面抗水损害能力,仅阻止水分进入路面结构内部是不够的,还需及时排出已进入路面结构内部的水分,目前主要的排水设计如表 5 所示^[47]。对排水基层而言,应具有较好的密水性和较大的孔隙以便排水,从

而间接提升路面抗水损害能力^[48]。

表 5 排水设计

排水形式	排水设施
路面排水	路表横坡排水、路线纵坡排水
中央分隔带排水	对于有铺面封层的中央分隔带,注重表面排水;对铺面未封闭的中央分隔带,则侧重中央分隔带内的地下排水
路面结构层内部排水	设置排水基层和垫层

2.4 施工控制措施

(1) 提高压实度标准,减小现场空隙率

路面空隙率小于 8%,水分不易进入沥青混合料

内部。当路面实际空隙率大于15%时,水可以从路面孔隙中排除,不会存留在路面结构内部。上述情况均不易造成路面结构水损害问题。然而,当空隙率介于两者之间时,水分会滞留在沥青混合料内部,在车辆荷载作用下极易产生动水,从而破坏路面结构的整体性。当空隙率为8%~10%时,沥青路面水损害最为严重。沙庆林^[49]总结了沥青路面水损害的原因,指出应提高沥青混合料压实度要求,表面层压实度不小于98%,中、底面层不小于97%,并建议表面层空隙率不大于6%,中底面层不大于7%。

(2) 减少离析和压实不均匀的影响

沥青路面离析可分为级配离析、温度离析和压实离析,这也是路面局部水损害的重要原因^[50]。为了提升沥青路面抗水损坏能力,应尽量减小路面离析和压实不均匀。总结相关文献^[51-52],可从以下方面减小沥青路面离析问题:选择合理的集料粒径,尽量使用变异性小的均匀洁净集料;控制拌和、运输、摊铺过程中沥青混合料温度;严格控制施工工艺,避免雨季、寒冷潮湿条件下施工;确定合适的摊铺厚度、碾压工艺等,并及时对路面进行检测。

3 结语

沥青路面水损害机理复杂,不同的理论从不同角度揭示了沥青—集料的黏附—剥落机理。提高沥青—集料黏附性,并防止水分进入路面结构内部是提升沥青路面抗水损害能力的两个主要方向,这一点已达成共识。合理选择原材料、添加抗剥落剂、优化路面结构、控制施工质量等措施均可以提高沥青路面抗水损害能力,但应根据具体的情况综合考虑加以选择。

参考文献:

- [1] 向浩,朱洪洲,钟伟明. 沥青混合料水稳定性评价方法综述[J]. 中外公路,2016,36(6):278—283.
- [2] 张旭,袁峻,杨雨婷. 基于表面能的沥青黏附机理与评价[J]. 中外公路,2017,37(6):243—247.
- [3] 王学东. 沥青路面水损害研究分析[J]. 中国公路,2011(22):74—76.
- [4] 谢华昌,苏华才. 浅议沥青混凝土路面水破坏机理及其防治重点[J]. 公路,2009,54(3):172—176.
- [5] 苏堪祥. 南方高温多雨地区高速公路沥青混凝土路面水损害成因分析及防治对策[J]. 公路,2012,57(7):289—291.
- [6] Fromm H J. The Mechanisms of Asphalt Stripping from Aggregate Surfaces[J]. Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists,1974(43):191—223.
- [7] 姜旺恒,张肖宁,李智. 沥青混凝土的动水压力模拟试验[J]. 公路交通科技,2011,28(10):35—39.
- [8] Yoon, H J. Interface Phenomenon and Surfactants in Asphalt Paving Materials[D]. Dissertation, Auburn University, Ph. D,1989:0514—0514.
- [9] 傅珍,延西利,蔡婷,等. 沥青组分对粘附性能影响的灰关联分析[J]. 武汉理工大学学报,2014,36(1):68—73.
- [10] 蔡婷. 沥青材料的组分与粘度试验分析[D]. 长安大学硕士学位论文,2005.
- [11] Zhao P, Fan W, Zhang L, et al. Research of Gray Relation Entropy of Oil—Water Interfacial Property to Chemical Components of Bitumen[J]. Journal of Dispersion Science and Technology,2015,36(5):634—640.
- [12] 周卫峰,原健安,戴经梁. 影响粘附性的沥青性质分析[J]. 石油沥青,2003,17(3):22—25.
- [13] 蒋凯. SBS改性沥青混合料水稳定性和高温稳定性试验研究[D]. 兰州理工大学硕士学位论文,2012.
- [14] Ding Z, Zhang J, Li PL, et al. Analysis of Viscous Flow Properties of Styrene—Butadiene—Styrene—Modified Asphalt[J]. Construction and Building Materials,2019(229):116—181.
- [15] Li L, He Z, Liu W, et al. Modification Mechanism and Performance of Qingchuan Rock Asphalt—Modified Asphalt[J]. Journal of Testing and Evaluation,2018,46(4):1 610—1 621.
- [16] 张恒龙. TLA改性沥青的制备与性能研究[D]. 武汉理工大学硕士学位论文,2010.
- [17] 于海臣,孙立军,张丽杰,等. 硫磺沥青混合料水稳定性分析[J]. 建筑材料学报,2009,12(6):679—683.
- [18] Yin C, Ge Q, Hu X, et al. Numerical Analysis for Basalt Fiber Reinforced High—Viscosity Asphalt Concrete Bridge Deck Pavement[C]. ICTIM, Xian, PEOPLES R CHINA,2016.
- [19] 赵颖华,赵立东,范颖芳,等. 聚酯纤维改性沥青混合料的高温和水稳定性[J]. 建筑材料学报,2008,11(5):550—554.
- [20] 贾平虎. 纤维改性沥青与沥青混合料性能研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2018,42(6):997—1 000.
- [21] 包塔娜. 纤维与BRA岩沥青复合改性剂组成优化及混合料性能评价[J]. 新型建筑材料,2019,46(5):33—36,61.
- [22] 王萌,刘慧杰,龚明辉,等. 碳纳米纤维改性热拌沥青混合料特性研究[J]. 中外公路,2016,36(1):213—216.
- [23] Arifuzzaman M, Gazder U, Islam M S, et al. Prediction and Sensitivity Analysis of CNTs—Modified Asphalt's

- Adhesion Force Using a Radial Basis Neural Network Model[J]. Journal of Adhesion Science and Technology, 2020, 34(10): 1 100—1 114.
- [24] 陈渊召, 陈爱玖, 李超杰, 等. 纳米氧化锌改性沥青混合料性能分析[J]. 中国公路学报, 2017, 30(7): 25—32.
- [25] 孙璐, 辛宪涛, 任蛟龙. 纳米改性沥青混合料路用性能[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2013, 43(4): 873—876.
- [26] 李萍. 集料对微表处混合料技术性能的影响机理[J]. 公路工程, 2016, 41(1): 152—156.
- [27] 陈烜捷, 罗蓉, 张安富, 等. 集料表面改性剂对沥青混凝土水稳定性的影响研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2017, 41(4): 642—646.
- [28] 关长禄, 吕得保, 陶志政. 矿料改性技术在沥青混合料中的应用[J]. 中外公路, 2010, 30(6): 215—217.
- [29] 杨平, 虞将苗, 张保才, 等. 集料—沥青界面改性剂及改性工艺对沥青混合料路用性能的影响[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2017, 41(6): 1 033—1 036.
- [30] 王海朋, 张蓉, 何兆益, 等. 偶联剂改性沥青与卵碎石集料界面性能研究[J]. 硅酸盐通报, 2017, 36(8): 2 689—2 694.
- [31] 王璐, 陈华鑫, 王金庆, 等. 聚乙烯(PE)处理集料对沥青混合料水稳性的影响[J]. 中外公路, 2013, 33(6): 239—242.
- [32] 周卫峰, 张秀丽, 原健安, 等. 影响粘附性的集料性质分析[J]. 石油沥青, 2003, 17(4): 19—24.
- [33] 陈实, 雷宇, 李刚, 等. 集料与沥青的性质对沥青与集料粘附性的影响[J]. 中外公路, 2010, 30(6): 226—230.
- [34] 陈燕娟. 酸性集料表面活化技术与粘附机理研究[D]. 长安大学硕士学位论文, 2012.
- [35] 杨文锋, 吴少鹏, 磨炼同, 等. 集料孔隙对沥青吸收和混合料体积性能影响[J]. 武汉理工大学学报, 2003, 25(12): 72—75.
- [36] 杨文锋. 沥青混合料抗水损害能力研究[D]. 武汉理工大学硕士学位论文, 2005.
- [37] 彭丹丹, 陈华鑫, 张晨旭, 等. 沥青抗剥落剂的研究进展[J]. 材料导报(纳米与新材料专辑), 2014, 28(1): 325—327.
- [38] 吴登睿. 水泥与胺类抗剥落剂协同作用对沥青路面路用性能的影响研究[D]. 重庆交通大学硕士学位论文, 2016.
- [39] 杨文锋, 赖跃. 消石灰对沥青胶浆及沥青混合料体积性能的影响[J]. 硅酸盐通报, 2015, 34(S1): 253—256.
- [40] 刘涛. 石灰等添加剂改善沥青混合料的水稳定性[D]. 湖南大学硕士学位论文, 2006.
- [41] 赵晶, 于连成. 抗剥落剂的温度稳定性研究[J]. 低温建筑技术, 2006(6): 10—11.
- [42] 陈垚宏. 抗剥落剂对酸性集料沥青混合料性能的影响研究[D]. 重庆交通大学硕士学位论文, 2012.
- [43] Behbahani H, Ziari H, Kamboozia N, et al. Evaluation of Performance and Moisture Sensitivity of Glasphalt Mixtures Modified with Nanotechnology Zycosoil as an Anti—Stripping Additive[J]. Construction and Building Materials, 2015, 78: 60—68.
- [44] 钟志锋, 丁海波. 纳米抗剥落剂 Zycosoil 路用性能试验研究[J]. 大连交通大学学报, 2016, 37(2): 65—68.
- [45] 宫磊. 沥青路面防水层的种类及特点[J]. 交通世界, 2009(3): 136—137.
- [46] 唐伟, 刘朝晖. 改性沥青防水层在沥青路面罩面工程中的应用[J]. 中外公路, 2003, 23(4): 77—79.
- [47] 王大伟. 沥青路面排水设计研究[D]. 长安大学硕士学位论文, 2009.
- [48] 罗志刚, 周志刚, 郑健龙. 沥青路面水损害问题研究现状[J]. 长沙交通学院学报, 2003, 19(3): 39—44.
- [49] 沙庆林. 高速公路沥青路面早期损坏与对策[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2006, 3(3): 1—6.
- [50] 姜海涛, 罗青, 曾国东, 等. 沥青路面离析的表现形态与机理分析[J]. 公路交通科技, 2008, 25(11): 11—15.
- [51] 彭余华, 郭大进, 刘惠兴, 等. 粗粒式沥青混合料离析控制方法[J]. 交通运输工程学报, 2011, 11(2): 1—7.
- [52] 王耀洲. 沥青路面施工中离析的产生与控制措施[J]. 筑路机械与施工机械化, 2013(2): 43—45.