

沥青-集料黏附和剥落研究进展

赵胜前¹, 丛卓红², 游庆龙¹, 李源¹

(1. 长安大学公路学院, 西安 710064; 2. 长安大学道路施工技术与装备教育部重点实验室, 西安 710064)

摘要: 针对沥青-集料之间的黏附性能, 对国内外黏附和剥落机理、评价体系、影响因素和改善措施 4 个方面的研究成果进行了综述。黏附的形成和失效是涉及物理、化学、热力学及微观力学的复杂过程, 界面特征受材料特性、混合料空隙、沥青膜厚及外界环境等因素影响, 不同试验体系致力于开发既能模拟损伤发生过程又能评估混合料适用性的方法, 进而保证路面使用寿命。最后, 结合已有研究内容, 对未来研究方向进行了展望。

关键词: 道路工程; 黏附和剥落; 评价方法; 影响因素; 表面能; 原子力显微镜; 分子动力学模拟
中图分类号: U416.217 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5497(2023)09-2437-28

DOI: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20221433

Adhesion and raveling property between asphalt and aggregate: a review

ZHAO Sheng-qian¹, CONG Zhuo-hong², YOU Qing-long¹, LI Yuan¹

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. Key Laboratory of Road Construction Technology & Equipment of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: In view of the adhesion performance between asphalt-aggregate, the research results on the adhesion and raveling mechanism, evaluation methods, influencing factors and improvement measures in domestic and overseas are summarized. Formation and failure of adhesion are complex processes involving physics, chemistry, thermodynamics, and micromechanics. The characteristics of the interface between asphalt and aggregate are influenced by the properties of asphalt and aggregate, the void and asphalt film thickness of the mixture, and the external environment. The different test systems are dedicated to the development of methods that that can not only simulate the process of damage occurrence in the field but also provide an assessment method through which the suitability of mixtures would be estimated in designing steps and would be guaranteed during the pavements service life. Combined with the existing research contents, the future research directions of asphalt-aggregate adhesion performance and asphalt mixture moisture sensitivity are prospected.

Key words: road engineering; adhesion and raveling; evaluation methods; influence factors; surface free energy; atomic force microscopy; molecular dynamics simulation

收稿日期: 2022-11-11.

基金项目: 国家自然科学基金项目(51308061); 中国民用航空局民航机场工程技术研究中心项目(ER-CAOTP20220303).

作者简介: 赵胜前(1997-), 男, 博士研究生. 研究方向: 道路材料及路面力学行为. E-mail: zhaoshengqian0831@163.com

通信作者: 丛卓红(1979-), 女, 副教授, 博士. 研究方向: 路面结构强度提升及道路材料. E-mail: czhwh05@163.com

0 引言

沥青混合料是由沥青胶结料、集料以及两者间界面等组成的非均质复杂多相体系,松散的集料颗粒借助沥青胶结料的黏结作用形成整体,沥青与集料之间通过复杂的物理力学作用和化学反应形成复合相^[1]。由于沥青与集料之间存在极性差异,水和荷载的作用会减弱两相材料间的相互作用力,使界面相成为多相体系中的薄弱部位,降低沥青混合料的整体性能,引发松散、开裂和坑槽等病害,由此造成的交通中断及路面养护维修成本巨大。

水损害定义为行车荷载与水分作用下,沥青胶结料与集料之间的黏附力丧失或沥青胶结料内部黏聚力丧失导致的路面性能衰减^[2],说明沥青与集料之间黏附力的降低和沥青内聚力丧失导致的沥青劣化是水损害发生的主要驱动机制,其中又以沥青胶结料与集料之间黏附力的降低占主导作用^[3]。因此,良好的黏附能力是界面相强度的保证,探究沥青-集料界面的黏附作用对于研究沥青路面水损害机理、延长路面寿命具有重要意义。

关于黏附机理的认识目前主要有力学理论、化学反应理论、静电理论、弱边界理论、分子定向理论和表面能理论等 6 种^[1,4,5],这些理论从不同角度解释了沥青与集料之间黏附力的形成原因。此外,许多研究可以解释水分渗入沥青混合料后界面的微观效应,称之为剥落机制^[4,5]。剥落机制表明,水分作用下沥青与集料界面间会产生剥落起始点,在行车荷载、外界环境等共同作用下不断发展形成病害。为了评估沥青与集料之间的黏附性能,研究者提出了不同评价方法和指标。总体可以分为常规室内试验评价方法、表面能评价方法、基于原子力显微镜(Atomic force microscopy, AFM)的评价方法及基于分子动力学模拟(Molecular dynamics, MD)的评价方法。其中,表面能作为材料的固有属性,可以通过能量方法对沥青与集料之间的黏附和剥落进行定量分析,还可以与室内试验、AFM 及 MD 技术等建立联系,获得研究者的广泛青睐^[1,6-8]。随着研究思路的拓展,除常规方法外,基于动态力学分析仪(Dynamic mechanical analysis, DMA)^[9]和动态剪切流变仪(Dynamic shear rheological, DSR)^[10]开发的室内黏附疲劳测试被用于沥青混合料黏结区域的评价,AFM^[11]及 MD^[12]技术则将沥青与集料之间黏

附和剥落的研究扩展到微观尺度。

对于沥青-集料之间黏附和剥落的研究,理解黏附和剥落机理是基础,掌握不同评价指标和试验方法是开展研究的重要手段,可通过合适的方法确定影响黏附和剥落的因素并加以改善,进而提高沥青路面的使用寿命。因此,本文以沥青-集料之间黏附和剥落的研究进展为基础,对现有黏附理论和剥落机制进行了总结,分类评述了国内外沥青-集料之间黏附性和混合料水稳定性的评价方法,剖析了黏附性的影响因素和改善措施,并提出了未来发展趋势,以期为后续沥青-集料黏附和剥落的研究提供参考。

1 黏附和剥落机理

1.1 黏附机理

沥青与集料界面间的黏附机理涉及沥青和集料的化学成分、集料表面构造、沥青与集料界面间的力学状态、化学相互作用、电荷和分子排布以及热能的交换和平衡。根据相关研究,黏附理论可以分为 6 类,如表 1 所示。

组成界面相的沥青和骨料成分复杂且分布不均匀,导致同一界面的不同区域性质有较大区别,不同黏附机制同时发生,共同提供黏附力。Huang 等^[24]发现集料对沥青极性成分的定向吸附过程伴随着物理吸附和化学反应,说明物理作用和化学反应是同时进行的,同时弱边界的形成也多与物理吸附丧失和化学解吸有关。静电理论中, ζ 电位的值、电荷状态以及分子定向理论中极性分子的吸附能力都与集料的化学成分有关。此外,静电理论、分子定向理论和弱界面理论都提到黏附力的丧失与水的 PH 值有关。水的 PH 小于 3 可能会导致沥青和集料的 ζ 电势具有相同的极性进而排斥脱黏,影响集料表面化合物或矿物的溶解度^[2]。PH 值的变化还会改变离子电离状态和集料表面吸附极性基团的类型,导致沥青集料的分离^[16]。表面能理论能够将动态载荷引起的物理过程以及形成黏结的化学过程结合起来,通过能量指标对不同沥青-集料组合黏附或剥落的趋势进行表征,这一指标与沥青的种类、集料矿物成分和表面性质、水以及分子间的作用力都有关系。表面能理论是普遍性的能量方法,提供了能够测量的宏观参数以量化黏附力以及黏附功和剥落功,进而判断沥青与集料之间的黏附状态。

表 1 沥青与集料的黏附理论
Table 1 Adhesion theories of asphalt and aggregate

理论	内容	特点
力学理论 ^[1,13]	黏附力主要由集料与渗入集料表面孔隙和裂缝中的沥青之间的物理力提供	同时适用于宏、微观尺度;黏附主要取决于集料表面结构
化学反应理论 ^[14-18]	黏附力由沥青与集料表面的特性点位发生化学反应生成的新产物提供	具体的反应产物难以确定;化学反应依赖于集料种类
静电理论 ^[4,16,19]	沥青和集料借助双电层(Stern层和移动扩散层)间的静电引力相互吸引	ζ 为带电层剪切面电势的量度; ζ 电势与PH值有关,不易测量
弱界面理论 ^[1,4,16,20]	黏附破坏由界面区域某些特定位置的黏结强度降低引起	弱边界为集料固有,或集料表面化合物和矿物在水中溶解后形成;过大的棱角性和孔隙率或过多的酸碱反应会形成弱界面;弱边界的具体位置难以判断
分子定向理论 ^[1,19,21,22]	黏附力主要由沥青内部存在的表面活性物质在集料表面产生定向吸附提供	吸附量大的化合物脱附量也较大,说明沥青极性基团越多,黏附性越好的观点具有局限性
表面能理论 ^[23]	沥青润湿集料表面,发生能量交换,固-液体系表面能减小,产生黏附功	可以判别黏附、剥落发生的方向;无法判别黏附、剥落发生的速率;能评估不同沥青-集料组合的相容性

1.2 剥落机制

水损害始于混合料内部水分的迁移,水分通过浓度差或者沿薄弱处进入沥青直至沥青与集料界面,造成沥青黏聚力下降和沥青-集料的脱黏。在交通荷载的作用下,轮胎前、后路面空隙中的水由于压-吸循环在路面内部形成孔隙水压,引起的水流冲刷进一步加剧沥青胶结料与集料界面间黏附力的丧失,宏观上表现为集料与沥青胶结料的物理分离,称之为剥落^[4]。Caro等^[4]的研究表明,剥落的发生包括以下两个步骤:①水分迁移,液态

水或气态水渗入沥青混合料及沥青胶结料并到达沥青-集料界面;②系统反应,内部结构变化导致材料承载力损失。一般认为,水分渗透是剥落发生的主要原因,沥青层底部通常水分含量最高,剥落通常始于此处。许多机制可以解释沥青混合料中的剥落现象,这些机制的共同点表明:剥落的发生必须包含剥落起始点和随后的扩张过程^[5]。将Bagampadde等^[25]、Caro等^[4]、Kakar等^[5]对沥青与集料间剥落机制的研究进行了汇总,如表2所示。

表 2 沥青与集料间的剥落机制
Table 2 Raveling mechanism of asphalt and aggregate

过程	机制	理论
分离/取代	水由于表面能比沥青低,极性比沥青高,较为完整地分离/取代集料表面的沥青	热力学和化学反应
自发乳化	胶结料的乳化削弱了界面处的黏附	热力学和化学反应
胶浆散失/解吸	胶浆材料在孔隙水压作用下的长期散失导致内聚力减弱/从集料表面脱落	物理破坏
沥青膜开裂	沥青膜和集料微裂缝的产生使结构完整性恶化,为水分的侵入提供路径	物理破坏
孔隙水压	高孔隙水压导致沥青膜破裂,水进入界面	物理破坏
化学剥落	水和集料之间的化学、静电作用使得沥青从集料表面脱落	静电作用和化学反应
渗透	沥青膜上存在的浓度梯度使得水分被运输至集料表面	扩散作用
微生物活性	界面上可能存在的微生物代谢产物影响了沥青-集料界面的黏附性	细菌代谢

2 常规室内试验评价体系

沥青-集料之间黏附或剥落的评价方法众多,总的来说可以分为常规室内试验评价方法、基于表面能的评价方法、基于原子力显微镜的评价方法以及基于分子动力学模拟的评价方法。室内试验评价方法根据制备试件的不同分为两类:①针对松散混合料或混合料组分的试验;②基于击实或压实混合料试件的试验。

2.1 松散混合料试验评价方法

对于松散混合料黏附或剥落性能的评价,一般是制备一定数量裹附沥青的集料试件进行加速损伤(浸水、冲刷、化学反应等),根据沥青从集料表面剥落的情况判断黏附性能。目前,关于松散混合料黏附和剥落的评价方法可以分为3类^[1,2,5,26-29],如表3所示。总的来说,松散混合料黏附和剥落的评价方法主要考虑裹附沥青的集料在有水状态下界面黏附性的丧失。多数松散混合

物黏附性试验具有明显缺陷,如:依赖测试者主观经验测定的集料粒径范围相当有限,无法考虑完整级配混合料的黏附性和抗剥落能力;试验结果的评价仅依据黏附破坏的最终结果,未考虑水分渗透和扩散过程。此外,松散的集料颗粒无法代表实际路面结构中混合料的受力状况,同时无法耦合水分和荷载的共同作用。因此,此类试验方

法的结果仅能粗略代表沥青与集料之间的黏附性,作为筑路材料选取时的控制手段,与实际路面水稳定性之间的联系有待进一步研究。但是,水煮法等定性分析方法相较于仪器价格高昂、操作复杂的定量试验,能够简单、快速地给出黏附性评价结果,且对试验设备要求不高,这也是实际施工检测过程中此类试验长久存在的原因。

表 3 松散混合料的黏附性评价方法

Table 3 Evaluation methods for loose asphalt mixtures adhesion property

分类	名称	测试过程	评价指标
静态剥落类	水煮法/水浸法、静水浸润法、沸煮法	将裹附沥青的集料在恒定温度的水中浸泡一段时间	沥青膜剥落程度
	动态水浸法、旋转瓶法、动态振荡剥落试验、动态冲刷水煮法	通过特定方式使裹附沥青的集料经受恒温水流冲刷	沥青膜剥落程度
动态剥落类	超声波剥落试验	超声波在水中产生“气穴现象”,气泡爆炸释放能量作用于至沥青-集料表面模拟动水冲刷	沥青膜剥落程度
	板冲击试验	标准质量钢球在 50 cm 处自由落下冲击黏结石料(100 颗)的钢板	震落碎石与碎石总量比
化学分析类	光电比色法、美国公路战略研究计划(Strategic highway research program, SHRP)净吸附法、示踪盐法、溶剂洗脱法	将裹附沥青的集料放入已知浓度的有色溶液静置,或将集料放入一定浓度的沥青-甲苯溶液,加水洗脱	集料表面沥青的吸附率和剥落率

2.2 混合料组分试验评价方法

沥青和集料是混合料的两种主要组分,当考虑两材料界面之间固有的黏附性质时,可以依据试验形式制备不同的材料组分试件或者“三明治”试件,以拉脱强度或剪切强度等宏观力学指标进行评价,这是一种定量的试验方法。常见的混合料组分试验如表 4 所示。

DMA 拉伸试验和 DSR 动态剪切试验可归类于沥青与集料界面黏附性的疲劳评价体系^[33],其评价指标为周期性应力(应变)作用下试样黏附疲劳破坏时的疲劳寿命或者时间。其中,DMA 试

验通过模量和相位角等参数评估沥青胶结料和胶浆的疲劳损伤和断裂特征,试件可以是沥青胶浆、砂浆或石料夹沥青试件^[36]。水损害程度与混合料的构成有关,因此 DMA 试验可以选择不同的胶结料、细集料和抗剥落剂组合,并结合表面能理论评价水损害^[9,10]。DSR 试验与 DMA 施加拉伸力不同,其对试件施加动态循环剪应力,且 DSR 试验除了能够对石柱式“三明治”试件^[36]进行黏附性评价外,同样可以根据需要选择沥青胶浆、砂浆等不同研究尺度^[33]。DSR 还可以通过流变试验评价沥青自身的黏性^[37],当改变转子的材质

表 4 混合料组分的黏附性评价方法^[30-33]

Table 4 Evaluation methods for asphalt mixtures components adhesion property

名称	测试方法	评价指标
沥青黏结强度试验 ^[30,31]	对沥青层施加垂直拉力,测量拉头从集料表面剥落时内聚破坏或黏附破坏的压力,转换为拉脱强度	拉脱强度
剥离试验 ^[34,35]	使用剥离臂从集料或基材表面剥离沥青,获取拉力与拉伸速率关系曲线(剥离曲线)	剥离强度或断裂能
剪切黏附试验 ^[33]	制备集料或玻璃基材夹沥青层的“三明治”试件进行两端拉伸施加剪切力,获取破坏时界面上的剪切力或剪切强度	剪切强度
沥青黏性测试	对沥青层施加垂直拉力,仪器自动测量施加力的大小和薄膜分离的时间,并将其与沥青的黏性或黏性系数相关联,评估沥青的内聚破坏	沥青黏性系数
DMA 拉伸试验	采用动态力学分析仪对“三明治”试件施加拉力,记录试验过程中的位移、力、强度以及相应的时间	试件“破坏”时间或荷载循环次数
DSR 动态剪切试验	采用动态剪切流变仪对试件施加循环荷载,记录试件“破坏”时的荷载循环次数	试件“破坏”时的荷载循环次数

时,通过复数模量的变化可以评价沥青-集料的界面黏附性质^[38],或通过循环加载至试件破坏,对沥青胶浆^[39]和沥青砂浆^[33]的黏附疲劳破坏进行定量评价。

基于混合料组分的评价方法相较于松散混合料试验考虑了拉、剪、扭等荷载作用方式,可以区分破坏类型,能够给出破坏的强度指标。针对沥青的黏弹性特征,可以借助 DMA 或 DSR 施加动态荷载开展多尺度下的黏附疲劳研究,在沥青材料的相态结构研究方面优势巨大。但相较于实际

路面中沥青裹附在集料表面的状态,“三明治”试件能否有效反映真实的黏附性、荷载作用下最终损伤结果展现出的黏附性能与水分作用下剥落损伤展现出的黏附性能有何差异,需要进一步研究。

2.3 压实混合料试验评价方法

基于压实混合料的试验,以试件在水分作用前、后强度等性能的变化或比值作为标准,当沥青混合料不满足这一标准时,认为其容易在水分作用时受到损伤,可以更真实地评估混合料的性能。表 5 为混合料水稳性能的主要评价方法。

表 5 压实混合料水稳性能评价方法^[2,5,40,41]

Table 5 Evaluation methods for compacted mixtures moisture sensitivity

试验名称	测试方法	评价参数
饱和老化拉伸刚度测试 ^[42]	水分作用(高温、高压)前、后混合料试件的劲度模量	劲度模量比
双冲剪试验	水分作用前、后混合料试件的冲剪强度	冲剪强度比
Heveem 稳定度测试	剥落时混合料试件空隙内水分的浓度	Heveem 稳定度比
浸水压缩试验 ^[43]	水分作用前、后混合料试件的抗压强度	抗压强度比
浸水马歇尔试验	水分作用前、后混合料试件的马歇尔稳定度	浸水残留稳定度
浸水飞散试验	水分作用前、后试件在试验机中旋转撞击后散落材料的质量	散落材料质量百分率
冻融架梁试验	记录水分作用前、后混合料试件产生裂纹时的冻融循环次数	冻融循环次数
直接拉伸试验	水分作用前、后混合料试件的拉伸强度	直接抗拉强度
间接拉伸试验	水分作用前、后混合料试件的拉伸强度	ITS TSR
冻融劈裂试验	水分作用前、后混合料试件的劈裂强度	TSR
Lottman 试验	水分和冻融作用前、后混合料试件的拉伸强度或模量	TSR
Root-Tunicliff 试验	在 Lottman 试验的基础上控制混合料试件饱水率不大于 55%~80%(未经冻融循环)	TSR
改进 Lottman 试验	Lottman 试验与 Root-Tunicliff 试验的综合,调整了冻融循环的温度和时间、试件尺寸和饱水压力	TSR
动态力学分析试验	水分作用前、后对沥青试样剪切模量和疲劳寿命的影响	剪切模量曲线转折点的荷载循环次数
小梁疲劳试验	测量水分作用前、后混合料试件的疲劳寿命	疲劳寿命
浸水轮辙试验	记录车辙深度和循环次数的曲线图(蠕变曲线),绘制剥落拐点(蠕变曲线第 2 和第 3 部分斜率的交点)	轮辙深度或剥落拐点的作用次数
环境调节系统 ^[44]	测量混合料试件的透水性和在湿、热循环和荷载循环作用下弹性模量的变化	弹性模量
水敏感性测试	测量湿热环境下循环荷载引起的孔隙水压作用后试件的强度	与 MIST 处理后的测试有关

水损害的评价广泛采用间接抗拉强度法^[2],间接抗拉强度(Indirect tensile strength, ITS)和间接抗拉强度比(Tensile strength ratio, TSR)能够较为准确地预估沥青-集料之间的水损害,与路面性能建立起一定联系^[43]。但试验结果依据的是水分作用前、后强度的相对比值,而不是强度的绝对值,可能出现干湿状态下强度值都很高,但两者的比值(TSR)较低的情况,这一现象在使用抗剥落剂后更为明显,故水损害的控制标准除了将 TSR 限定在一定范围,还应对 ITS 设定最小标准

值。此外,Lottman 试验真空抽吸的过程中混合料内部会产生微裂纹,且不同级配的混合料内部微结构存在差异,不可能在相同次数的真空循环下共同达到最低饱和度^[41]。

相较于 ITS 类试验,饱和老化拉伸刚度试验(Saturation ageing tensile stiffness, SATS)的潮湿环境更为严格,尽管 SATS 试验在高温、高压下进行,但其并不能够模拟泵送现象,也未考虑混合料空隙中循环压力发展的影响,仅提供了一种加速长期水分扩散的方法^[41]。环境调节系统^[45](Envi-

ronmental conditioning system, ECS)能够在湿、热共同作用下对试样施加静载或者动载形式的压力引起永久变形,以试样弹性模量的变化作为水损害评价指标,并在整个试验过程中实时测量。相较于 ITS 类试验, ECS 试验具有更好的重复性,但其测试机制较为复杂且设备昂贵。水敏感性测试仪(Moisture induced susceptibility test, MIST)能够模拟湿热环境下荷载循环在路面结构中引起的孔隙水压力。任敏达等^[46]对经过 MIST 和恒温浸水处理后的试件进行了劈裂试验,结果表明孔隙水压抗力对于薄弱孔隙的应力集中有一定消散作用,混合料饱水后的强度由自身强度和孔隙水压力共同组成。轮辙试验能够综合永久变形和水损伤共同作用^[47,48],尽管轮辙试验以永久变形

定义剥落拐点不能解释水损害的机理,但永久变形结果反映了损伤过程中的复杂力学行为,相较于单一参数,轮辙试验对水损害的评估更加全面,也更能够模拟水分在路面中的泵送效应^[2]。

表 6 为基于室内试验的黏附性或水稳定性的部分研究成果。这些研究评价了不同沥青-集料组合的水稳定性,并对混合料试件进行老化、水温组合处理,探究了外界环境作用下混合料水稳定性的衰减程度,采取添加抗剥落剂、改性剂等方式探寻水损害的改善措施。这些研究表明,沥青与集料界面的黏附性质和混合料的水稳定性与集料成分和构造、沥青成分、混合料的级配等都有关系。此外,沥青路面运营过程中的环境因素(如温度、水、荷载等)也会影响水稳定性能。

表 6 基于室内试验的黏附性能和水稳定性能研究

Table 6 Researches of adhesion properties and moisture sensitivity based on laboratory tests

作者	主要方法	主要研究变量	主要结论
Copeland 等 ^[49]	拉脱试验	沥青改性、长期老化	改性剂并不总能提高黏附性能;长期老化会增加沥青内聚强度;水分参与的老化会降低黏附强度
Kanitpong 等 ^[30]	拉脱试验、黏性测试、车辙试验	抗剥落剂种类、聚合物改性剂	聚合物同时改善黏附性和内聚性;抗剥落剂仅改善黏附性
Wasiuddin 等 ^[50]	拉脱试验	新的水处理方法、沥青集料种类、温拌剂种类	拉脱试验与表面能计算的黏附强度未显示出良好相关性; Sasobit 将混合破坏变为黏附破坏
Moraes 等 ^[51]	拉脱试验、DSR 测试	沥青集料种类、改性剂种类	不同组合的黏附强度结果与改进 DSR 应变扫描结果的排序相似
Mogawer 等 ^[52]	拉脱试验、汉堡车辙试验	温拌剂种类、老化时间、老化温度	只有 Sasobit 显著提高了拉脱试验的黏附强度结果;高温和更长的老化时间可以提高汉堡车辙试验评估的水稳定性;拉脱试验与汉堡车辙试验结果未显示出良好相关性
Junior 等 ^[53]	静态剥落试验、改进 Lottmen	不同集料、沥青和抗剥落剂组合	水稳定性和疲劳寿命与集料类型有关;黏附性好的混合物疲劳寿命更长
Bagampadde 等 ^[54]	改进 Lottmen	不同集料、沥青组合	沥青酸值、针入度等级和分子尺寸分布不会影响混合料的水稳定性;水稳定性与集料成分显著相关;水稳定性更多归因于集料而非沥青
Canestrari 等 ^[14]	拉脱试验	集料与 RAP 料、不同改性剂含量	普通集料受到水的影响导致的性能损失比 RAP 料更明显; AP 料似乎能改善沥青-集料体系的黏附性能,并显著降低水敏感性
Bagampadde 等 ^[55]	间接拉伸试验	集料种类	含碱金属元素(如钠和钾)的集料对水分敏感; Al_2O_3 和 SiO_2 含量与水稳定性没有相关性
Zhou 等 ^[47]	剪切黏附试验、拉脱试验、汉堡车辙试验	改性剂和添加剂的种类与含量	苯乙烯-丁二烯-苯乙烯嵌段共聚物(SBS)和胶粉可以改善黏附性能;剪切黏附试验结果与汉堡车辙试验剥离曲线拐点在评价不同改性沥青时未见相关性,评价不同改性剂掺量时具有良好的相关性
Cui 等 ^[35]	剥离试验	改性剂种类、集料类型	碱性集料黏附性优于酸性集料;集料化学成分贡献大于孔隙率
Kim 等 ^[10]	DMA 试验	干、湿状态	存在水分的混合物初始损伤水平更高且损伤发展速度更快;水稳定性与混合料组分的表面能特性有关

总的来说,基于压实混合料的试验关注试件的整体性能,而不是沥青-集料界面间的黏附状况。其不能区分黏聚破坏和黏附破坏,也无法将材料特性和水损害的基本机制联系起来,即无法通过压式混合料试验确定具体的水稳定性改善措施。尽管对压实沥青混合料水稳定性的测试方法

很多,但没有一种方法能够完全将实验室性能与现场性能结合起来,可能导致一些现场性能比较优良的混合料种类会在实验室评价阶段被否定,或出现相反的情况。

常规室内试验评价体系致力于开发一种测试方法,该方法需要模拟现场损伤发生的过程,

还能够提供一种评估方法能够在设计步骤中评估混合料的适用性。一些研究中,利用改进的实验室测试系统(ECS、MIST、万能试验机(Universal testing machine, UTM)、轮辙试验、DMA等)提供与现场类似的荷载和环境条件,然后试图采用力学参数(如ITS)的评价模型,以考虑水分损伤的可能影响。同时,不少学者致力于将各种力学参数进行组合,推导出综合的多参数准则,如耗散蠕变应变能、断裂能和裂纹扩展速率^[2]。基于试验研究了解剥落机理和涉及因素,并与计算方法相结合,提出一种严格的力学经验设计方法,用于预测路面力学性能的变化。

常规室内试验方法有助于选取黏附性能良好的沥青胶结料和集料组合以及水稳定性优秀的混合料。但试验的宏观指标难以对黏附或者剥落机理进行解释,也无法分析混合料各组分在改善黏附性能过程中所起的作用,如需确定占主导作用的组分,需要更为精细的试验手段。近年来,随着黏附理论、测试技术的发展,以经典润湿理论为基础的表面能方法成为沥青和集料黏附性研究的热点,其以沥青和矿料的固有属性为出发点,以黏附功和剥落功为指标,可以对沥青-集料体系的黏附性和抗剥落能力进行定量评价。

3 表面能评价体系

表面自由能理论的热力学意义是真空中分离固体或液体产生新界面时所需要的能量。如果被分离的物质是均匀的,则能量叫作黏聚力;如果被分离的物质不均匀,并产生两个不同的表面,则能量叫作黏附力^[19]。当沥青润湿集料表面时,发生能量交换,固-液体系表面自由能减小,产生黏附功。根据 Good-van Oss-Chaudhury 理论,材料的总表面能 γ 主要由色散分量 γ^{LW} 和极性分量 γ^{AB} 两部分组成^[1]:

$$\gamma = \gamma^{LW} + \gamma^{AB} \quad (1)$$

极性分量又由 Lewis 酸分量 γ^+ 和 Lewis 碱分量 γ^- 两部分组成^[1]:

$$\gamma^{AB} = 2\sqrt{\gamma^+ + \gamma^-} \quad (2)$$

黏聚力是指将均匀相物质分离成两部分,产生两个新界面所做的功,数值上等于其表面能的两倍^[56]。沥青的黏聚力为:

$$W_A = 2\gamma_A = 2\left(\gamma_A^{LW} + 2\sqrt{\gamma_A^+ + \gamma_A^-}\right) \quad (3)$$

式中: W_A 为沥青的黏聚力; γ_A 为沥青的表面能; γ_A^{LW} 、 γ_A^+ 、 γ_A^- 均为沥青的表面能分量。

黏附功是指两相物质分离时,需要外界在单位面积上所做的功。没有水分存在的情况下,沥青在矿料表面浸润形成沥青-矿料体系释放的能量即为两者之间的黏附功,但沥青与集料相互接触之前已经存在界面能,这部分能量在两者形成黏附体系时消失,需要在总能量中被减去,如下所示^[56]:

$$W_{AS} = \gamma_A + \gamma_S - \gamma_{AS} = 2\left(\sqrt{\gamma_A^{LW}\gamma_S^{LW}} + \sqrt{\gamma_A^+\gamma_S^-} + \sqrt{\gamma_A^-\gamma_S^+}\right) \quad (4)$$

式中: W_{AS} 为沥青和集料界面的黏附功; γ_S 为集料的表面能; γ_{AS} 为沥青与集料间的界面能; γ_S^{LW} 、 γ_S^- 、 γ_S^+ 均为集料的表面能分量。

当水分侵入两相界面后会逐渐取代沥青膜,无水状态下的沥青-集料体系逐渐转变为有水状态下水-沥青和水-集料两个体系,此时沥青与集料之间的黏附功和沥青的黏聚力分别为^[57]:

$$W_{AWS} = 2\left[\sqrt{\gamma_A^{LW}\gamma_W^{LW}} + \sqrt{\gamma_S^{LW}\gamma_W^{LW}} - \sqrt{\gamma_A^{LW}\gamma_S^{LW}} - \gamma_W^{LW} + \sqrt{\gamma_W^+}\left(\sqrt{\gamma_A^-} + \sqrt{\gamma_S^-} - \sqrt{\gamma_W^-}\right) + \sqrt{\gamma_W^-}\left(\sqrt{\gamma_A^+} + \sqrt{\gamma_S^+} - \sqrt{\gamma_W^+}\right) - \sqrt{\gamma_A^+\gamma_S^-} - \sqrt{\gamma_A^-\gamma_S^+}\right] \quad (5)$$

$$W_{AW} = 2\left[2\sqrt{\gamma_A^{LW}\gamma_W^{LW}} + 2\sqrt{\gamma_W^+\gamma_A^-} + 2\sqrt{\gamma_W^-\gamma_A^+} - \gamma_W - \gamma_A\right] \quad (6)$$

式中: W_{AWS} 、 W_{AW} 分别为有水状态下沥青与集料的黏附功和沥青的黏聚力; γ_W^{LW} 、 γ_W^+ 、 γ_W^- 均为水的表面能分量。

3.1 沥青和集料的表面能测试方法

采用表面能理论研究沥青-集料之间的黏附性时,需要对材料的表面能参数进行测定。表面能参数的测定方法原理上可分为4大类:①基于湿润特性的接触角法,包括座滴法、核磁共振成像技术、威廉米平板法、柱状灯芯法;②基于吸附特性的评价方法,包括通用吸附装置、反气相色谱法;③基于浸没特征的评价方法,包括微热量计法;④基于表面张力的评价方法,包括杜诺伊环法。各方法采用沥青与集料黏附和剥落过程中产生的能量变化或黏附功和剥落功作为定量评价指标,这些评价指标可以通过接触角、表面张力、扩散压力、浸没焓、吸附焓等参数计算表面能的相应

分量得到。不同参数对应不同方法,常用的表面能测定和计算方法如表 7 所示。

3.2 表面能评价指标与宏观指标的相关性

获得沥青和集料的表面能参数后,通过计算沥青的黏聚功以及沥青和集料在干燥和湿润条件下的黏附功和剥落功评价沥青-集料间的抗水损害能力。但采用单一指标评判水损害发生的可能性不全面,基于此,诸多学者以黏聚功、黏附功和剥落功为基础

开发了扩散系数(Spreading coefficient, SC)、能量比(Energy ratio, ER)、综合能量比(Composite energy ratio, CER)、能量参数(Energy parameter, EP)等一系列指标用于水损害评估,如表 8 所示。

表 8 中的评价指标可以有效评判干燥和潮湿条件下不同集料与沥青组合的抗水损害能力,这些指标是结果性的,与时间发展过程无关,即表面能理论只能判别黏附或剥落的发展方向,不能给

表 7 常用的表面能测定方法

Table 7 Surface energy measurement methods

方法	理论基础	主要参数	测量对象	特点
座滴法			沥青、集料	经济、设备简单,结果相对准确;高温下沥青液滴的尺寸难以控制;沥青试样表面难以达到均匀光滑;不适用于小接触角
核磁共振成像			沥青	数据较为可靠,但测试周期长;试件制备较为复杂,设备昂贵
威廉米平板法	湿润特征	接触角 α, β, θ	沥青、集料	可测量动态接触角,测量值不受线性张力作用;样品的各向同性和尺寸要求较高;需保证板的湿润长度和体积恒定
柱状灯芯法			集料	成本低、易操作、复现性较好;仅用于粉体或小粒径填料,浸渍时间和浸渍高度读数、粉体的均匀性等人为操作有一定误差;探针液体的黏度或接触角不能过大
通用吸附装置	吸附特征	扩散压力 π_c	集料	测试结果准确但测试时间较长;设备昂贵,操作复杂;对待测集料粒径有要求
反气相色谱		保留时间 t_r	沥青、集料	测试速度快但设备昂贵;色谱柱制备技术复杂
微热量计法	浸没特征	浸入焓 ΔH_{imm}	集料	测量相对快速、结果较为准确;测试前必须确定集料的比表面积;对焓贡献的假设会导致一定误差
杜诺伊环法	表面张力	表面张力 γ_A	沥青	技术成熟、设备简单;测量快速、结果相对准确,但需要人工标定

表 8 基于表面能理论的评价指标

Table 8 Evaluation index based on surface energy theory

评价指标	计算公式	含义	与水稳定性的关系
黏聚功 W_A	$W_A = 2\gamma_A$	干燥条件下沥青自身分离的难易程度	正相关
黏附功 W_{AS}	$W_{AS} = \gamma_A + \gamma_S - \gamma_{AS}$	干燥条件下沥青-集料黏附的牢固程度	正相关
剥落功 W_{AWS}	$W_{AWS} = \gamma_{AS} - \gamma_{AW} - \gamma_{SW}$	有水条件下沥青-集料分离的难易程度	负相关
扩散系数 SC ^[58]	$SC = W_{AS} - W_A$	沥青胶结料润湿集料表面的能力	正相关
	$ER_1 = W_{AS}/W_{AWS} $	黏附功与剥落功的相对值	正相关
	$ER_2 = (W_{AS} - W_A)/W_{AWS} $	在 ER ₁ 的基础上考虑了沥青胶结料的黏聚功	正相关
能量比 ^[6,7,59,60]	$ER_3 = \left \frac{\min(W_{AS}, W_A)}{W_{AWS}} \right $	黏附功与黏聚功两者最小值与剥落功的相对值	正相关
	$ER_1 \times A$	在 ER ₁ 的基础上考虑了集料的比表面积	正相关
	$ER_2 \times A$	在 ER ₂ 的基础上考虑了集料的比表面积	正相关
综合能量比 CER ^[8]	$CER = \frac{\sum_{i=1}^n p_i W_{AS_i}}{\sum_{i=1}^n p_i W_{AWS_i}}$ p_i 为第 i 种集料的质量占比	在 ER ₁ 的基础上考虑了集料种类,可用于 RAP 料	正相关
	$EP_1 = (W_{AS} - W_{WS})/W_{AS} $	沥青-集料界面与水-集料界面黏附功的相对差值	负相关
能量参数 ^[61]	$EP_2 = \frac{W_{AS}}{W_{AS} - W_{AWS}}$	沥青-集料界面黏附功与水作用下释放能量的比值	正相关
	$EP_4 = \gamma_{AS} \times A$	单位质量集料剥落需要的力值	正相关

出发展速率或损害发生的时间节点。后续若能将表面能指标与能够判断剥落发生时间规律的指标相结合,则可进一步避免道路因水稳定性不足而发生病害。表面能理论中的黏附模型是基于纳观尺度的分子间作用力和微观尺度的多相体系建立的,可以通过经典接触力学理论与AFM测定的

微观力学指标建立联系,并且基于MD得到的沥青胶结料与集料之间的相互作用同样可以计算两相材料的黏附功和剥落功。表面能参数作为热力学指标,仅与材料自身性质有关,在与宏观试验评价指标建立联系(见表9)后,则可以作为未来研究时尺度跨越的“桥梁”。

表9 表面能指标与宏观指标的相关性

Table 9 Correlation between surface energy index and macro index

研究对象	表面能指标	宏观试验指标	相关性
沥青集料	黏聚功	ITS、TSR	石灰石尖端作用下的黏附功结果与ITS规律一致;SO ₂ 尖端作用下的黏附功/剥落功结果与TSR规律一致 ^[62]
	黏附功	拉拔强度	ER ₃ 与残留拉拔强度比、残留拉拔功比线性关系较强 ^[63]
	剥落功	残留拉拔强度比	黏附功与拉脱强度正相关 ^[64]
	ER ₃	残留拉拔功比	剥落功绝对值与浸水后拉拔强度损失线性正相关,与浸水后的拉拔强度近似线性负相关;拉拔强度与黏聚功近似线性正相关,与黏附功正相关 ^[65]
沥青胶浆	黏聚功	拉拔强度	黏聚功与拉拔强度二次相关 ^[66]
	黏附功	拉拔强度比	黏附功拉拔强度弱相关;干、湿状态的抗拉强度比与ER ₁ 近似二次相关,与ER ₂ 弱相关;足够冻融循环次数后,TSR与ER ₁ 和ER ₂ 明显线性正相关 ^[66]
	ER ₁ 、ER ₂	TSR	
沥青混合料	黏附功	动态模量比	$\frac{E_{wec}^+}{E_{dry}^+} = \frac{W_{AS}(1-P_a) + W_{AWS}P_a}{W_{AS}}$, P _a 为裸露在水中的集料表面积的百分比 ^[67-69]
	黏聚功	飞散损失	水温耦合作用下飞散损失结果与黏聚功、黏附功结果趋势一致 ^[70]
	剥落功	汉堡车辙剥离拐点碾压次数	汉堡车辙、TSR与CER结果可以得到相同的抗水损害等级 ^[8]
	EP ₁ 、EP ₂	浸水残留稳定度	旧料掺量增加,ER值降低;RAP料浸水残留稳定度、冻融劈裂强度比与ER值高度相关 ^[71]
	SC、EP ₄	冻融劈裂强度比	EP ₁ 与TSR近似线性负相关;EP ₂ 与TSR近似线性正相关;SC、EP ₄ 与TSR弱相关 ^[61]
	ER ₁ × A	TSR	黏附功、黏聚功与TSR正相关 ^[72]
	ER ₂ × A	残留稳定度	黏附功和剥落功与TSR、残留稳定度近似线性正相关,ER ₁ × A与残留稳定度与TSR近似线性正相关,ER ₂ × A与残留稳定度和TSR相关性较ER ₁ × A差 ^[60]

表面能理论以热力学为基础,通过沥青和集料的物理化学性质解释两者之间的黏附和黏聚。由于通用吸附方法可以考虑集料的表面构造,说明表面能理论参数同样能够反映物理黏结提供的吸附。此外,表面能方法可以给出黏附力和黏聚力分别在界面黏附中的贡献,并反映在相应表面能参数中,使得对诸如愈合或衰老等现象的解释更容易理解。表面能作为一种手段,还能够弥补沥青和集料的物理化学性质与混合料断裂力学之间的差^[73]。由表9可知,常规室内试验评价方法的宏观指标与表面能指标存在不同形式的相关性,这表明表面能理论与宏观尺度之间的水损害存在一定内在联系。可以借助表面能理论的上述优势,通过两相材料表面能的变化更好地解释试件在浸水、冻融及老化后的水损害现象。

4 原子力显微镜评价体系

沥青的黏聚破坏以及沥青-集料之间的黏附破坏发生在微观尺度,为了在微观尺度研究沥青的形貌以及沥青与集料之间的黏附特性,一种在纳观尺度成像表面形貌和测量材料表面力的方法,即AFM技术,被应用于道路工程领域。

4.1 基于沥青微观形貌的黏附性

Loeber等^[74]首先利用AFM对沥青的表面形貌进行了研究,报道了直径几微米、高度几十纳米的波纹结构,称之为“蜂状结构(bee-shaped)”,如图1所示。在此之后大量研究人员研究了微结构的成分、微结构随时间和温度的演变方式、微结构在表面和整体结构中的分布以及微结构沥青性能等^[11,75]。但不论其化学成分是蜡质还是沥青质,蜂状结构的特殊形貌必然会对沥青与集料之

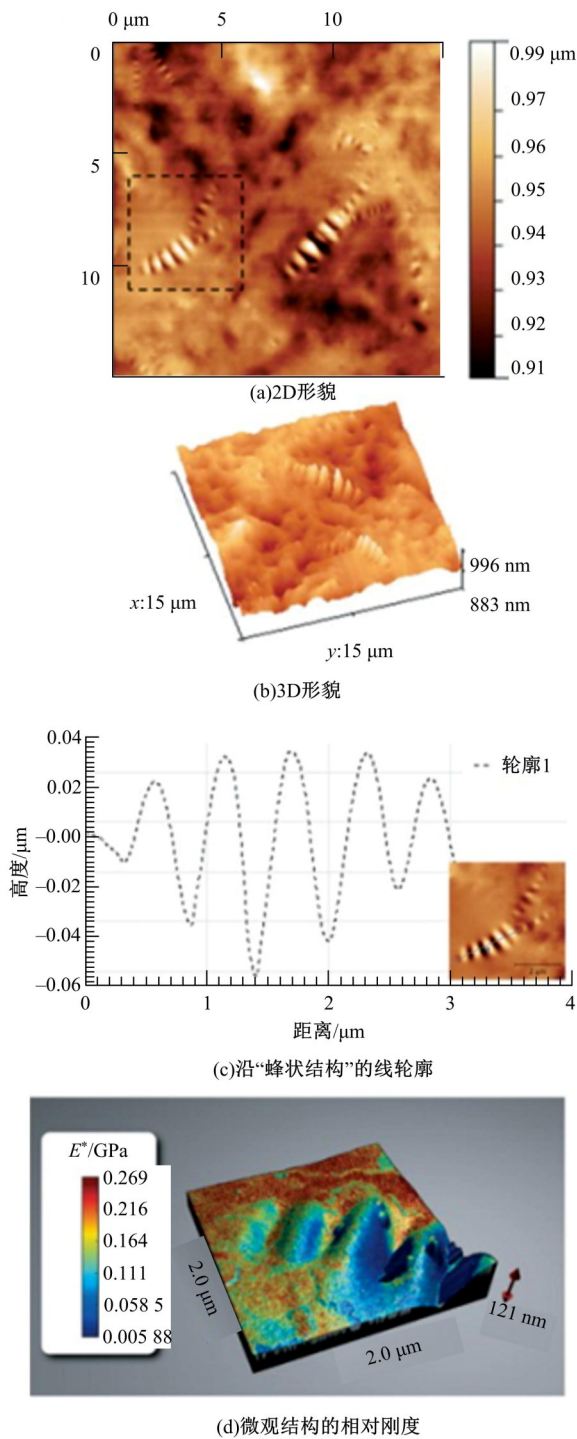


图 1 沥青典型 AFM 图像^[75]

Fig. 1 Typical AFM images of asphalt binder^[75]

间的黏附造成影响。

对于沥青表面的总体特征,经水分作用后,沥青表面坑槽的排布变得更加不均匀,且数量增加^[76]。粗糙度决定了集料与沥青黏附的有效接触面积,影响两者界面间的黏附力。蜂状结构在水分作用下数量减少、尺寸变小,这种趋势会随着温度的升高更加明显,这是由蜂状结构组成中的

微晶蜡和其他成分融化所导致^[77]。易军艳等^[78]为了定量描述沥青的表面特征,基于粗糙度分析参数 R_a 评价了沥青的表面粗糙程度,如下所示:

$$R_a = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N Z_j \quad (7)$$

式中: N 为测试点的总数; Z_j 为每一测试点的高程。

易军艳等^[78]还利用拉拔试验,建立了粗糙度与蜂形结构数目与黏附性之间的关系,对于含蜂形结构的沥青,蜂形结构的数目和粗糙度对黏附性有很大影响;不含蜂形结构的沥青,沥青与矿料的表面能占主导作用。但 Xu 等^[79]认为沥青表面粗糙度在水分作用后的变化不具有规律性。

Vasconcelos 等^[80]分别研究了干燥和潮湿状态下沥青的表面形貌,发现水分扩散率的增大主要归因于沥青微观结构的变化。dos Santos 等^[81]将沥青薄膜在不同试验条件下浸入 23 °C 的水中,通过测量沥青薄膜的变形,发现沥青膜表面出现新的形貌特征,表明沥青表面微观结构会受到水的强烈影响。当沥青存在于有水的环境中时,张力、弯曲和压力等都会导致表面结构在最薄弱点开裂。并且,蜂状结构的凹谷处以及 Peri 相与 Para 相之间的界面是沥青表面微观结构最薄弱的点,此处最易开裂。Lyne 等^[82]通过 AFM 研究了沥青表面的微观形貌与黏附力之间的关系,发现在 Peri 相和 Catana 相过渡区域中测得的黏附力小于 Para 相。

4.2 基于力-距离曲线的黏附性

AFM 可以在微观尺度上通过力-距离曲线获得沥青的黏聚性能或与集料之间的黏附性能,力-距离曲线是悬臂挠度随样品位置变化的函数图,典型的力-距离曲线如图 2 所示^[83]。图 2 中,黏附力为将尖端拉离样品所需的力,是回缩曲线的最低点。接近曲线和回缩曲线包围的区域是一个滞后环,代表尖端-样品相互作用过程中消耗的能量。在测定沥青与集料之间的黏附力时,可以采用 SiO_2 、 CaCO_3 等矿料成分修饰探针模拟集料特性,通过甲基、羧基和羟基等沥青分子官能团修饰针尖可以测定沥青胶结料自身的黏聚力。

借助力曲线,通过改变沥青种类、改性剂类型及含量、探针类型、干湿状态等条件,可以获得不同条件下集料-沥青组合的黏附力和黏聚力指标^[84]。刘克非等^[85]测试了干燥/潮湿、原样/老化

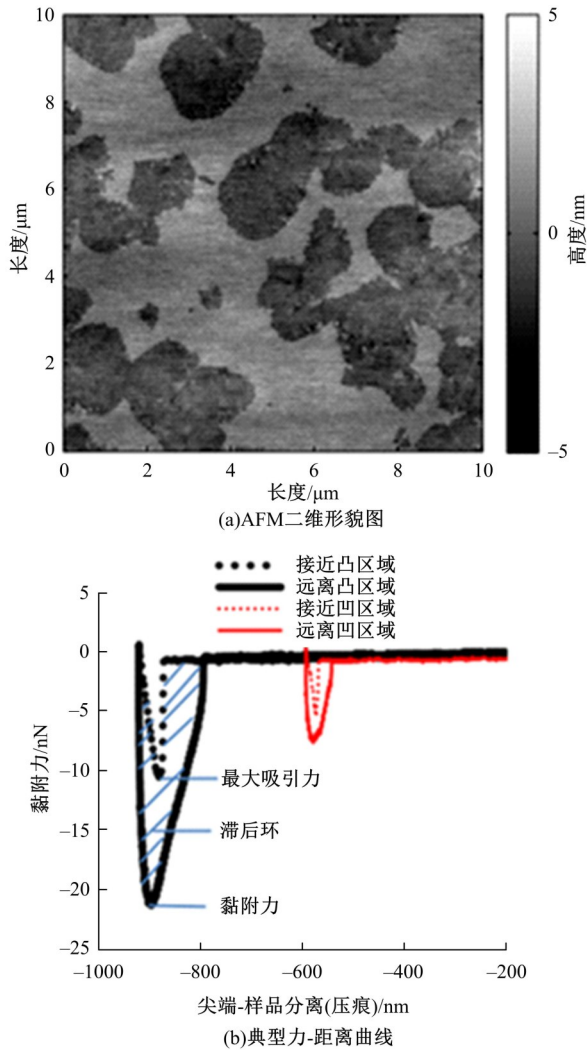


图 2 沥青胶结料的二维形貌和典型力-距离曲线^[83]

Fig. 2 AFM 2D morphology and typical force-distance curve of asphalt binder

等条件下的多种沥青与矿料之间的黏附力,评价了不同状态下沥青的抗水损害能力,发现黏附力在短期或长期老化下都会损失。Yao等^[77]研究指出升温过程中沥青与集料间的黏附力有所降低,更易遭受水损害。有研究发现,聚合物改性后的沥青在湿润状态的黏附力较干燥状态有所提升,这与基质沥青相反^[86]。原因是在水分作用下,SBS等聚合物会在沥青中产生暂时的偶极,使范德华力增大。采用不同官能团探针测定同一沥青样品时,黏聚力在水分作用前、后的比值不同,相较于疏水官能团探针,采用亲水官能团修饰的探针更易受水分的影响。在沥青水稳定性与黏聚力比值关系方面存在两种观点:一种认为黏聚力比值反映了沥青自身的内部黏结状况,比值越大,水稳定性越好;另一种观点认为,水稳定性与黏聚力

在水分作用前、后的比值呈负相关关系,因为沥青会在水的作用软化,与探针产生更强的吸引力^[84]。

4.3 基于表面能指标的黏附性

采用AFM测定沥青、集料表面能遵循以下思路:采用力曲线获得黏附力(F),将黏附力转换为黏附功(W)并进一步转换为表面能(γ)。建立AFM力学指标与表面能指标之间关系借助了经典接触力学理论,通过Johnson-Kendall-Roberts (JKR) 或 Deeyaguin-Muller-Toporov (DMT) 接触模型进行力到功的转换。这两个模型都考虑了分子间相互吸引的能量,区别是JKR模型仅考虑接触区域内状况,而DMT模型考虑了接触区域外的状况^[87]。基于Fowkes模型,可得沥青与探针之间的黏附功 W_{AT} 和界面能 γ_{AT} 分别为:

$$W_{AT} = 2\sqrt{\gamma_A^{lw}\gamma_T^{lw}} \quad (8)$$

$$\gamma_{AT} = \gamma_{AT} + \gamma_{AT} - 2\sqrt{\gamma_A^{lw}\gamma_T^{lw}} \quad (9)$$

式中:“A”和“T”分别为沥青和探针分子。

沥青和集料的色散力主导着两者之间的黏附作用,做如下假设 $\gamma_A^{lw} = \gamma_A$ 、 $\gamma_T^{lw} = \gamma_T$,则Fowkes方程可简化为:

$$W_{AT} = 2\sqrt{\gamma_A\gamma_T} \quad (10)$$

Yi等^[64]通过对比AFM和坐滴法对沥青和集料表面能的测量结果,认为AFM的测量结果可以代表材料的表面特征。王岚等^[7]发现通过AFM测定的表面能较接触角计算的表面能偏小。易军艳等^[78]基于JKR理论,采用AFM测定了4种不同油源沥青和多种矿料的表面能,并针对表面能大小进行了相应排序。Al-Rawashdeh等^[62]采用AFM评估了干燥和湿润条件下4种类型的针尖与3种沥青胶结料之间的黏结力和黏附功,基于此评估了温拌剂对沥青-集料之间黏附力的影响。

AFM技术使黏附性能的研究向纳观尺度扩展,将沥青表面的微观形貌与黏附力、黏附功和表面能等参数相结合,进而评价沥青胶结料的水敏感性以及不同外掺剂对其性能的影响。该技术的优点是样品制备简单、受人为因素干扰少,可以在绝大多数环境条件下进行,并且基于AFM观察到的特定沥青微观结构具有复现性。但AFM技术本身具有局限性,通过沥青微观形貌特征进行黏附性研究时,需要待测量样品具有足够光滑均匀的表面,且测量结果仅反映了待测样品的表面性质,不能够反映样品的整体性质。通过力-距离

曲线进行黏附性研究时,仅通过评价沥青自身黏聚力和沥青与集料之间黏附性的大小判断其抵抗水损害的能力也存在缺陷,即黏聚力和黏附力仅能反映沥青自身或与集料之间相互作用时的牢固程度,还需结合水分作用时黏聚力与黏附力衰减的速率和比例共同判定材料的抗水损害能力。基于 AFM 技术,采用表面能指标进行黏附性研究时,不同探针修饰的针尖测量得到的功和表面能不同,且与采用传统测量方式测得的表面能有一定差异,这是因为沥青和集料并不是由一种官能团或者成分组成,这种替代方式有一定的误差。

5 分子动力学模拟评价体系

MD 通过研究分子物理运动提供的热信息,对分子间的相互作用和能量变化进行有效计算,将沥青-集料黏附体系中分子状态下的微观作用与宏观试验结论进行有效联系。基于经典力学中的牛顿力学方程对系统中粒子在不同时刻的受力大小和相关运动轨迹进行求解,实现系统随时间演变的计算机模拟过程。通过牛顿方程对时间的积分预测 t 时刻粒子的速度和位置,再结合分子排列获得 t 时刻粒子的势能。重复上述过程,得到系统中粒子在不同时间步的动态信息,经统计分析后获得系统宏观上的热力学参数^[88]。牛顿力学方程为:

$$F(X) = ma = dp/dt \quad (11)$$

式中: m 为粒子的质量; $a = d^2r/dt^2$ 为粒子的加速度; p 为粒子的动量。

采用 MD 方法研究沥青-集料之间的黏附性主要包括 3 个步骤^[1]:首先,建立沥青、集料及界面模型,这一过程需要进行结构优化以及力场的

施加;其次,重复应用和求解牛顿方程,直至系统达到平衡状态,同时处理粒子的运动轨迹;最后,应用统计力学计算分子轨迹得到相关力学和热力学参数,评价沥青-集料之间的黏附性。分子的初始结构、施加给系统的力场以及动力学方程的系统和积分方法需要在模拟前确定。

5.1 沥青-集料界面模型的构建

沥青是成分和结构极其复杂的有机物,与实际情况完全相符的沥青分子模型还未建立,现有模型是基于沥青的主要组分按照一定比例构建。常用的沥青分子模型包括美国公路战略研究计划(Strategic highway research program, SHRP)中建立的 8 种平均分子模型^[89],以及 Zhang 等^[90]在 2007 年建立的沥青三组分模型和随后 SHRP 计划中 AAA-1 沥青的修正四组分模型^[91]。常用的四组分模型还包括 Hansen 等^[92]在 2013 年提出的“Cooee”沥青模型以及 Li 等^[93]在 2014 年提出的 12 分子模型,该模型在目前研究中使用最为广泛,在此基础上, Xu 等^[94]提出了包含 20 种分子类型的四组分沥青模型。与沥青分子模型不同,虽然矿料成分十分复杂,但其模型通常由简化的单晶模型代表,如石英(SiO_2)或方解石(CaCO_3)等。将单晶模型从特定方向解理成面,根据模型大小构建超晶胞,加入真空层形成约束构建集料模型。构建沥青-集料界面模型时,集料模型放置在底部,将添加约束层的沥青模型放置在集料顶部的真空层。沥青-集料界面模型需要添加边界约束,保证集料分子在模拟剪切和拉伸过程中不与沥青分子同时移动^[95]。模拟潮湿环境下沥青混合料的水损害特征时,可以在沥青分子与矿物晶体之间添加界面水。典型的沥青-集料界面模型如图 3 所示^[96]。

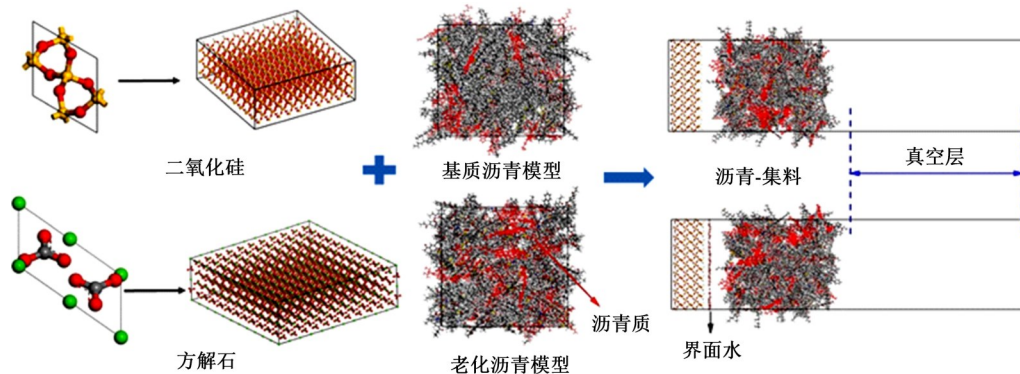


图 3 典型沥青-集料界面模型^[96]

Fig. 3 Typical interfacial models of asphalt-aggregate

5.2 沥青-集料界面黏附和抗水损害能力

图 4 为沥青-石英界面黏附强度计算模型和典型拉伸应力示意图。黏附功和剥落功可以采用沥青与集料间的相互作用能计算,分别为^[1]:

$$W_{AS} = \frac{\Delta E_{AS}}{A_{AS}} \quad (12)$$

$$W_{AWS} = \frac{\Delta E_{AW} + \Delta E_{SW} - \Delta E_{AS}}{A_{AS}} \quad (13)$$

式中: W_{AS} 、 W_{AWS} 分别为沥青与集料之间的黏附功和剥落功; $\Delta E_{AWS} = \Delta E_{AW} + \Delta E_{SW} - \Delta E_{AS}$ 为剥落能; ΔE_{AS} 、 ΔE_{AW} 、 ΔE_{SW} 分别为沥青与集料、集料与水以及沥青与水之间的相互作用能,其中黏附能 $\Delta E_{AS} = E_{total} - (E_A + E_S)$, E_{total} 为沥青与集料间的总势能, E_A 、 E_S 分别为沥青和集料的分离势能; A_{AS} 为沥青与集料的界面接触面积。

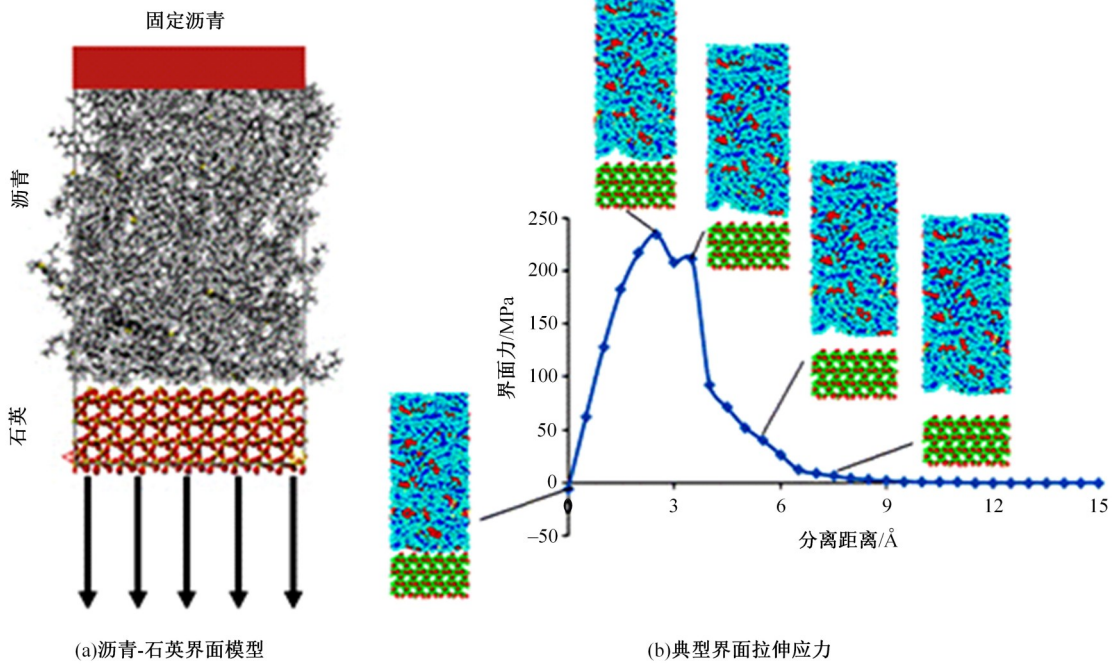


图 4 沥青-石英界面黏附强度计算模型与典型拉伸应力示意图^[98]

Fig. 4 Schematic diagram of asphalt-quartz interface model and typical tensile stress for adhesion strength calculation by MD simulation

根据 MD 模拟结果,当 W_{AS} 值为负值时,沥青与集料之间存在吸引力; W_{AWS} 为负值说明水分存在条件下沥青与集料之间的脱黏过程是自发的,这与传统认知一致。还可以通过 MD 技术进行拉伸模拟,以沥青集料间的黏附应力 $\sigma_{adhesion} = F_{traction}/A_{AS}$ 评估两者间的黏附性能^[97],如图 4 所示。

MD 技术从分子角度解释了宏观角度难以解释的沥青动态行为原理,提供了从微观角度观察沥青纳观结构运动以及研究沥青与集料之间黏附性的工具。诸多学者基于 MD 技术对不同条件下沥青与集料之间的黏附性进行了研究,代表性研究成果如表 10 所示。由表 10 可知,虽然由于模型精度和尺寸限制,模拟计算的能量值无法与实际试验值比较,但集料成分对水损害的影响以及沥青老化和水分对黏附性能的影响与宏观

试验结果一致。MD 还能够分析沥青各组分在集料表面的黏附贡献以及矿料解理面在黏附中的作用。该方法的优点显而易见,但也存在一定局限性:首先,不同研究者对分子大小、分子类型和力场的假设会导致不同模拟结果之间的差异;其次,不同地区沥青的化学组成差异较大,现有研究方式多是结合试验数据,调整已有模型进行研究,容易产生误差,并且包含较多分子的沥青模型虽然更贴近于实际沥青状况,但需要大量的计算资源;再次,矿料分子模型多是通过石英或者方解石单晶体构建,虽然有研究开发出了能够反映矿料各向异性的界面模型,但仍与实际状况差距较大。在研究水分对沥青与集料黏附性的影响时,水直接被添加在界面层,未能够模拟水分进入界面的过程,界面水也被简化为去离子水,不能表征路表各种水源进入后离子化产物和水

表 10 基于 MD 技术的沥青-集料黏附性研究

Table 10 Researches on asphalt-aggregate adhesion based on MD technology

作者	沥青模型	集料模型	力场	评价指标	研究变量	主要结论
Yao ^[99]	三组分	SiO ₂	Amber	W_{AS}	界面系统形式、老化	水倾向于附着在集料上;适度老化的沥青提高了黏附能力
Zheng ^[100]	十二分子四组分	SiO ₂	COMPASS	W_{AS}	沥青成分、老化方式、温度	短期老化后界面黏附力急剧下降,长期老化后下降趋势减缓;饱和分和芳香分在沥青润湿集料的过程中占主导地位,相较于饱和分和芳香分,沥青质对界面的低温黏结性能影响最小
Luo ^[101]	十二分子四组分	SiO ₂ 、CaCO ₃	COMPASS	W_{AS} 、 W_{AWS} 、ER	集料表面各向异性、集料类型	矿物表面各向异性显著影响界面黏结性能;新裂解的方解石表面对水敏感性贡献最大,羟基化的 α -石英表面集中的羟基显著增加了表面亲水性,未羟基化的 α -石英表面贡献最小
Sun ^[96]	十二分子四组分	SiO ₂ 、CaCO ₃	COMPASS	ΔE_{AS} 、 ΔE_{AWS} 、ER	水分、沥青组分、集料类型、老化	界面水改变了沥青组分的分布特征及沥青质的自聚集状态;沥青各组分与集料的黏附能力与水分作用下的变化趋势不同;老化对沥青与 SiO ₂ 和 CaCO ₃ 之间黏附性能的影响不同
Wang ^[98]	三组分	SiO ₂	CVFF	$\sigma_{adhesion}$	沥青成分、温度、模型尺寸、加载速率、水分含量	MD 模拟的界面应力分离曲线与拉拔试验的破坏行为类似;沥青成分影响界面水敏感性,黏附强度随温度升高而降低;随着模型尺寸增大或加载速率减小,界面失效收敛于极限值
Xu ^[97]	十二分子四组分	SiO ₂	OPLS	$\sigma_{adhesion}$	沥青成分、加载速率、温度	界面主要是黏聚失效,界面破坏强度和峰值后变形受加载速率和温度影响;抗拉强度和分离功与沥青质指数呈正线性相关
Xu ^[94]	二十分子四组分	SiO ₂	PCFF	$F_{adhesion}$	老化、沥青模型、AFM 力曲线模型	MD 模拟的黏附力远小于 AFM 结果,但两者具有良好一致性;黏附力和破坏形式与集料模型表面粗糙度有关;如果黏附破坏比例增加,则最大黏附力随着老化程度增大
Lu ^[102]	三组分	SiO ₂	CVFF	σ_{ij}	—	σ_{ij} 为 j 平面 i 方向的平均应力;界面拉伸强度由层间应力状态控制,界面的内聚破坏在低温和低应变率下表现出延展性
Lu ^[103]	平均分子	SiO ₂ 、CaCO ₃	CVFF	W_{AS} 、 W_{AWS}	沥青成分、集料类型、水分	界面能在水层存在时降低,集料为 CaCO ₃ 时的降低幅度更低;CaCO ₃ 对沥青类型更敏感;集料类型在黏附失效中占主导地位

离子化程度的复杂性;最后,由于计算机的计算限制导致模拟的时间跨度较短,缺乏对于沥青与集料之间的黏附性以及沥青混合料的水稳定性的长期模拟研究。

基于上述评价方法可建立宏、微观多尺度的评价体系,松散混合料及混合料组分试验用于选取黏附性良好的沥青-集料组合;压实混合料试验用以评估外界环境、混合料设计对水稳定性的影响;MD 和 AFM 分别从沥青和集料的组分和微观形貌两个方面量化黏附的微观影响因素,帮助研究者更好地理解沥青和集料的表面形态、成分组成及其物理化学性质如何影响界面间的黏附和剥落作用。

6 黏附性影响因素及改善措施

沥青混合料是沥青胶结料、集料以及两者间界面等组成的非均质复杂多相体系,松散的集料颗粒借助沥青胶结料的黏结作用形成整体,沥青与集料之间通过复杂的物理力学作用和化学反应形成复合相,两者间的界面黏附特征是影响沥青混合料水稳定性的主要因素。此外,控制沥青混合料类型的关键因素(如级配类型和沥青含量,以及沥青路面运营过程中经受的外部环境和荷载作用)同样会影响沥青-集料之间的黏附性能。

6.1 沥青和集料

(1) 集料

影响黏附性的集料特征包括:化学组成、表

面构造特征等。力学理论认为接近于立方体及具有复杂棱角性和表面纹理构造的集料,能够为沥青的铺展提供更大的接触面积,增加沥青在集料表面的吸附量,形成良好的机械互锁作用^[104],利于黏附的集料几何特征如图 5 所示。

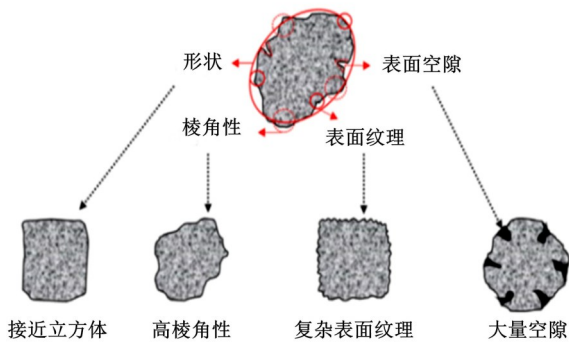


图 5 利于黏附的集料几何特征^[1]

Fig. 5 Favorable geometry features of aggregates with good performance in adhesion property

王志祥等^[105]研究了不同混合料水稳定性与集料形态特征的关系,认为集料的棱角性会显著影响混合料试件的浸水飞散损失,最佳值在 2500~3000 之间;球度会显著影响混合料试件的冻融劈裂强度比和浸水车辙试验曲线的变形拐点,最佳值在 0.65~0.75 之间。王璐^[106]发现混合料的冻融劈裂强度与集料的棱角性系数线性正相关,因为扁平化集料构成的试件孔隙较大,难以抵御水分入侵^[107]。

化学反应理论认为黏附力的形成依赖于沥青中的极性物质与集料表面活性点位发生的相互作用^[16]。Bagampadde 等^[54]认为,水损害很大程度上归因于集料,碱性集料含有高浓度的羟基,更容易与沥青中的羧酸反应形成化学产物促进黏附。关于集料酸碱性与黏附性的关系存在两种观点:一种是沥青混合料的水稳定性与集料的酸性(SiO_2 含量)负相关;另一种是与集料的碱性(CaCO_3 含量)正相关,这两种认知矛盾且不完全准确^[5,108],因为单纯以 SiO_2 和 CaCO_3 的含量确定集料的酸碱性不合理,且 SiO_2 和 CaCO_3 是可以相容的两种氧化物,对于可能同时含有大量 SiO_2 和 CaCO_3 的集料无法适用。总的来说,对于混合料的水稳定性, CaCO_3 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 MnO 、 MgO 等氧化物有一定促进作用,但 SiO_2 极化水的能力较强,会使集料表面吸附更多水分以补偿不饱和力场,引起体系表面能降低,促进水损害的发生^[7,109,110]。

对于由 11 种不同矿物含量的石料制备而成 AG-16 型混合料,其弹性模量 (Resilient modulus, MRR) 和拉伸强度比 (Tensile strength ratios, TSR) 的平均值与 SiO_2 、 Al_2O_3 以及两者组成的酸性不溶物含量关系如图 6 所示^[55,111]。图 6 中的散点随机分布,并未呈现出明显的统计学关系,这些结果似乎表明了水损害与 SiO_2 、 Al_2O_3 或酸性不溶物含量之间没有明显关系,这也佐证了将混合料的水稳定性好坏归因于集料单一化合物含量的不合理性。

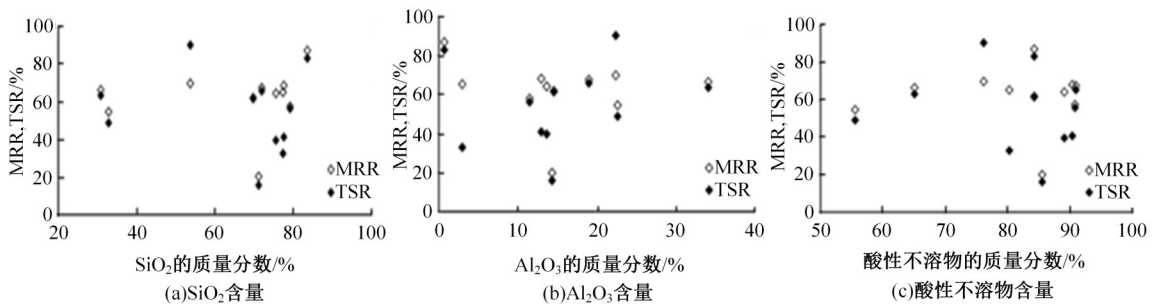


图 6 MRR 和 TSR 与 SiO_2 、 Al_2O_3 、酸性不溶物含量的对比

Fig. 6 Mean MRR and TSR versus SiO_2 , Al_2O_3 and total acid insolubles

(2) 沥青

影响黏附性的沥青胶结料特征包括:黏度、化学成分等。通常高黏度沥青胶结料制备的沥青混合料水稳定性更好,因为水分在高黏度沥青中扩散速率较小,延缓了水分扩散至集料表面的进程,同时高黏沥青能够提供较高的内聚强度以及其与骨料之间的黏附强度。对于沥青的化学成分,

Hefer 等^[16]对沥青中各种官能团与集料和水的相对亲和力进行了量化排序,认为沥青中具有最强吸附能力的官能团是羧酸类,同时羧酸类、酸酐、亚砷等也是最容易被水置换的官能团。

沥青质分子具有非对称结构且含有少量杂原子(如 N、O、S 等),杂原子以 $-\text{OH}$ 和 $-\text{NH}$ 或五元杂环等活性官能团的形式存在,导致环中碳原子

的电子云密度增大、使环活化,更容易发生亲电取代反应。多数胶质分子也含有由 N 和 S 组成的杂环,活化原理类似于沥青质分子,因而沥青质和胶质表现出弱极性。多数饱和分和芳香分分子具有明显的对称结构,分子中也不存在杂原子,是非极性的。沥青内部的极性沥青质分子和胶质分子在集料表面近端的活性中心发生化学反应或定向吸附,推动沥青与集料结合,形成黏附,而非极性分子主要分布在集料表面的远端^[112],这属于分子定向理论和化学反应理论观点。表面能观点认为饱和分和芳香分具有良好的流动性,与集料矿物形成的接触角较小,在沥青润湿集料表面的过程中占主导地位,促进了沥青与集料之间的黏附作用^[100]。因此,具有何种组分比例的沥青具有更好的黏附性需要进一步研究。老化会引起沥青硬化,增加羧酸、酮、亚砷类官能团的数量,并且沥青中的轻组分含量降低,其中一些转化为重组分。沥青中的大分子结构降低了沥青在矿物表面上的扩散速率,并削弱了矿物对沥青的吸附,导致沥青-集料界面处的黏附力减弱,由此造成的沥青混合料水稳定性衰减不容忽视。

6.2 沥青混合料

(1) 弱界面

弱界面理论认为沥青-集料之间存在黏附强度或黏聚强度不足的界面。形成弱界面的原因包括但不限于边界层存在污染物、集料表面不够洁净、集料表面矿物溶解、大量的酸碱络合产物在界面处团聚交联形成脆性界面,部分骨料作为氧化老化催化剂作用于沥青形成内聚力减弱的弱边界层^[16]。成志强等^[57]发现干燥条件下弱边界位于沥青内部,荷载作用时黏附失效多发生在弱边界位置;水分作用后界面黏附力的丧失远大于沥青的黏聚力,弱边界转移至两相界面处。这与 Wang 等^[113]和 Hossain 等^[114]采用有限元分析得到的结论一致。虽然集料丰富的棱角和表面纹理有助于沥青与集料之间的黏附,但过于尖锐棱角处的沥青膜会变薄形成弱边界,增加破裂的可能性^[113,115]。沥青老化也会形成弱边界,老化后的沥青不但会降低自身的黏聚力,增大与集料界面的剥落功,还会加快水分通过沥青的扩散速度^[79,116]。基于此,对集料进行清洁、加工,对沥青进行改性和添加抗剥落剂等手段已经应用于沥青混合料施工拌和过程中,以改善沥青-集料之间的弱界面层。

(2) 空隙

空隙被认为是影响水稳定性的主要因素之一。不同压实成型方式和级配会造成混合料内部空隙分布的差异,密级配沥青混合料空隙较少且不连通,水分难以进入,利于抵抗水损害。当混合料采用孔隙率较大的开级配时,路面结构中的水可以快速排出,同样具有较好的水稳定性。空隙率为 8%~12% 的路面结构最利于水的渗透,孔隙水在荷载作用下产生动水压力引起的冲刷作用最显著^[117]。当沥青膜在动水压力下出现破损,空隙中的水会沿破损路径进入沥青-集料界面,当不存在明显的弱边界时,水分需要透过沥青抵达沥青-集料界面,这一过程可以通过扩散作用解释^[118]。水的扩散速率随着沥青中水分的饱和逐渐变慢^[116],可溶性盐溶液会增大水分在沥青胶浆中的扩散系数^[119]。浸水初期沥青内部主要是自由水,随着浸水时间延长,一部分自由水向结合水转化,转化速率与沥青质浓度呈正相关^[120]。

Caro 等^[121]使用 CT 扫描获得了气孔大小的概率函数,将实际空隙分布集成到有限元模型中,采用耗散能和刚度的 95% 的置信区间研究了空隙分布的影响,如图 7 所示。在潮湿和干燥条件下,空隙数量变化对混合料性能产生巨大影响,空隙率为 7% 时,两个力学参数的变化较为明显。对于干燥条件下的试件,空隙分配方式和数量显著影响刚度,但刚度对于潮湿条件下的试件体积参数并不敏感,耗散能似乎作为评价参数更有优势。此外,潮湿环境下试样刚度比干样品降低了约 40%。

Masad 等^[122]研究了空隙孔径分布对混合物水稳定性的影响。水损害程度被量化为水处理后试样的疲劳寿命(N_{fc})与干燥试样的疲劳寿命(N_{fd})之比。图 8 为花岗岩混合料平均孔径与干湿比的对比。由图 8 可以看出,存在使混合料水稳定性最差的最不利平均孔径。这是因为,水难以渗透进入较小的孔径,对于较大的孔径,水易于进入的同时也利于排出,在孔径尺寸最不利点(花岗岩:1.2~1.4 mm,石灰岩:0.8~1.0 mm),水被困在试样中,为水损害提供了有利条件。Arambula 等^[123]使用 CT 扫描和图像分析技术证明采用相同沥青胶结料和目标空隙率(6%~7%)设计的沥青混合料在空隙尺寸分布和连通性方面存在显著差异。采用基于断裂力学的模型量化了混合料的

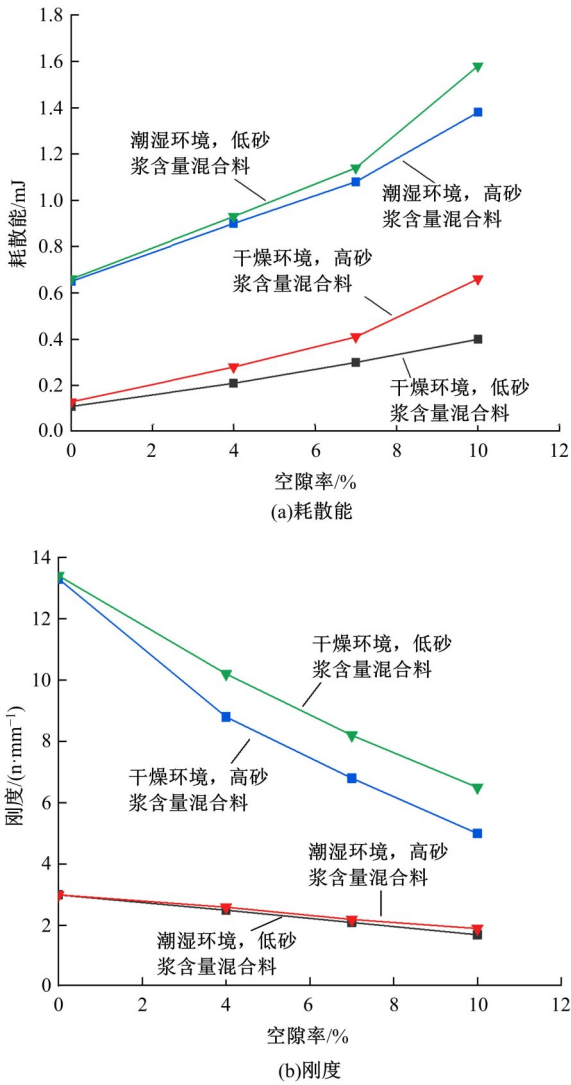


图 7 10 d 水分扩散和荷载作用下耗散能和刚度与沥青混合物总空隙率的对比^[121]

Fig. 7 Mean values of dissipated energy and stiffness as a function of total air void content of asphalt mixtures subjected to 10 days moisture diffusion and mechanical loading

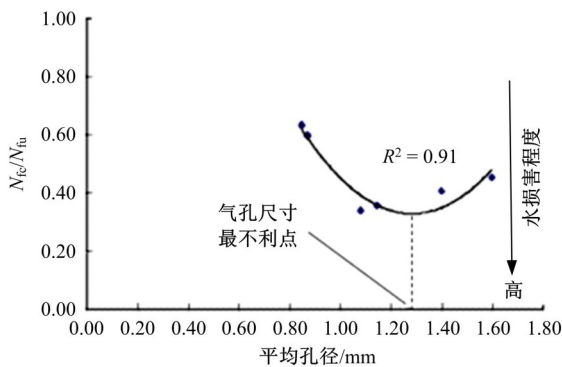


图 8 花岗岩混合物平均孔径与干湿比的对比^[122]

Fig. 8 N_g/N_u ratio versus average air void diameter for a dense granite mixture

水稳定性,结果表明,试样的气孔结构与水稳定性显著相关。

(3) 沥青膜厚

界面黏结强度还与沥青的膜厚相关^[51],相同沥青掺量下,混合料级配中细料含量越多沥青膜越薄。沥青膜厚度增加,界面黏附强度增大,直至超过沥青本身的黏聚力,沥青膜厚不足时,水更容易通过扩散作用抵达界面。并且,若沥青含量不足以完全裹附集料,水分还会通过裸露的集料表面进入界面造成剥落。Schram 等^[124]跟踪调查了 458 段沥青路面,认为沥青膜厚显著影响路面的水稳定性和耐久性,建议控制沥青膜厚在 9~12 μm 之间。图 9 展示了 3 种级配的沥青混合料浸水前、后的蠕变增量与集料表面渗透性空隙中沥青吸收量之间的关系。由图 9 可以看出:开级配沥青混合料的蠕变增量明显大于密级配沥青混合料,随着集料表面沥青吸收量的增大,沥青与集料之间存在良好的机械互锁作用,浸水后混合料的蠕变增量明显降低。集料表面吸收沥青的量不仅与级配类型有关,还与集料和沥青的类型有关,这也佐证了前文所述的高黏度沥青、碱性集料、孔隙率小的密级配利于沥青混合料的水稳定性。

6.3 外界环境

(1) 水的 PH 值

静电理论中的 ζ 电势与集料矿物成分有关,水分的 PH 值会影响集料的表面电荷,当 PH 值小于 3 时,可能导致沥青和集料的 ζ 电势具有相同的极性,两者发生排斥脱黏,但多数情况下沥青和集料所带电荷极性相反,利于黏附^[4]。PH 值还会影响集料表面化合物或矿物的溶解度,PH 值低于 6 时,利于碳酸盐的溶解,PH 值高于 8 时利于硅石矿物的溶解^[2]。

分子定向理论认为沥青与集料之间的黏附力产生是由于沥青内部的表面活性物质在集料表面产生定向吸附^[16]。活性物质中的极性基沿集料离子的极化方向取向,满足集料的能量需求,主要发生在低极性沥青和亲水性集料之间。或者沥青分子和集料借助化学键力吸附,主要发生在高极性分子和憎水性集料之间。由于水相较于沥青极性更强,容易侵入沥青-集料界面开始水解过程,水解产物引起邻近水层的 PH 值变化,PH 值的变化易改变离子电离状态和集料表面吸附极性基团的类型,最终导致沥青与集料之间的分离^[2]。低极性

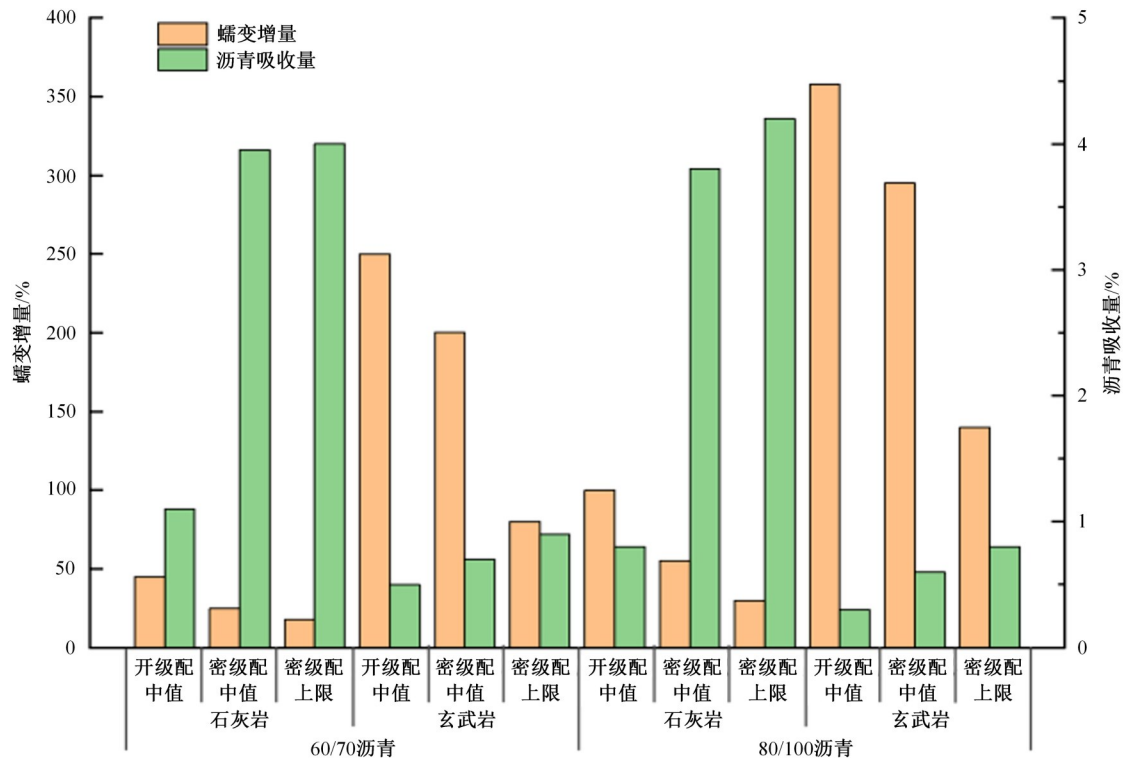
图 9 不同沥青混合料类型的沥青吸收量与蠕变增量^[115]

Fig. 9 Percent increase in creep and percent absorbed asphalt of different HMA types

沥青和亲水性集料之间没有化学键连接,一旦极性基团的吸附状态发生改变黏附力会快速丧失。

(2) 荷载及水分耦合

交通荷载可以引起沥青路面中饱水空隙的压力场,引起的应力会对沥青膜造成物理损伤,若孔隙水没有时间在混合料中重新分布,孔隙压力还会在轨迹以外的地方产生^[125]。Gao 等^[126]和 Li 等^[127]的实测结果表明孔隙水压随着车速的增加而增大,路面表面孔隙水压与行驶速度平方成正比,且沿路面深度衰减。Lei 等^[128]还发现路面内的动水压具有各向异性,在车辆水平后方出现最大值。车速大于 60 km/h 时,各向异性随着车速的增加而增加。Varveri 等^[41]的研究结果还表明,随着孔隙水压循环次数增加,混合料的空隙率和孔隙连通性不断增大,这是因为孔隙压力会产生额外的内应力,与行车荷载共同形成水流动的新路径。冬季动水冲刷会与冻融循环结合,水被正向动水压力压入混合料内部大孔隙,在孔隙内部冻胀拉裂周围沥青膜形成裂缝,多个微裂隙发展连通形成大孔隙导致应力消散,新的微裂隙增长速度下降。随着冻融循环次数增加,最终混合料内部会形成大量孔隙通道,降低混合料的水稳定性和力学强度^[129]。冬季除冰雪会使用大量除

冰盐,当盐溶液浓度小于 3% 时,冻融仍占主导作用,浓度超过 3% 后,可溶盐离子对沥青胶浆和两相界面的损伤则成为强度衰减的主要因素^[130]。夏季沥青路面还会经受高温和水的耦合作用,混合料在高温水浴作用下,沥青的黏聚功和两相界面的黏附功都会降低,并且飞散损失大幅增加。原因是水温共同作用导致部分轻组分转化为沥青质,大量极性组分的富集削弱了沥青在集料表面的附着能力^[70]。建议后续对沥青路面水损害的研究结合动水压的分布规律进行。

研究人员还开发了有限元模型,分析了交通荷载和水分渗透及扩散耦合作用下可能发生的力学响应。Kutay 等^[131]研究了交通荷载真空抽吸作用下路面结构内部的水分分布和孔隙内部的剪切应力,结果表明试样表面的动态效应最明显,由于沥青混合料的非均匀性,孔隙压力沿深度非线性变化。Kringos 等^[132]基于能量法将水分引起的物理损伤整合到黏弹塑性本构模型中,开发了沥青混合料的水损伤计算程序,提出了水分扩散系数、胶结料水分吸收的最大容量、胶结料解吸系数、胶结料扩散系数和分散系数等扩散相关参数。Caro 等^[4]在微观模型结构内部空隙的随机分布对载荷和水分扩散的影响方面做了大量工作。Mehrara 等^[2]

较为全面地总结了前人在沥青混合料剥落的数值模拟和计算分析方面所做的工作。

6.4 生产及施工

沥青混合料生产和施工过程中,料堆中的集料由传送带运输,在料仓中与沥青高温拌和,由卡车运输至施工现场,摊铺和碾压成型沥青路面。为保证沥青混合料的水稳定性,加热过程中应使用适当的方法测量含水量,确保集料与沥青拌和之前完全干燥,尤其是对于温拌沥青混合料。此外,拌和过程应严格按照混合料设计要求控制沥青含量和矿料级配,沥青混合料出料完成后需要正确装载并及时运输,保证沥青在集料表面均匀裹附,将热离析降至最低。摊铺压实过程中需保证混合料具有足够的温度,因为较低的温度下很难达到适当的密度。

压实度不足是影响沥青混合料水稳定性的主要因素之一。对于密级配沥青混合料,若施工过程中压实度不足,则达不到设计孔隙率,过多的空隙为水分渗透、循环和积聚提供了途径。路面行车道和路肩之间的纵向接缝压实不足会导致水渗入沥青混合料和下层路面结构。此外,压实功过大会导致骨料颗粒破裂,降低路面结构整体强度,进而引发水损害。同时,不良的排水系统设计,无论是地表排水还是地下排水,都可能导致水损害的发生。

6.5 改善措施

宏观的剥落是荷载、温度和路面结构中的水共同造成的,微观上则是沥青与集料之间的黏附破坏或沥青胶结料自身的黏聚破坏。雨后及时将水排出路面结构、对车辆行驶速度进行管制、寒冷地区冬季控制融雪盐的撒布量都能够减缓水损害的程度。进行混合料设计时,选择合适的级配保证路面结构的空隙率和沥青膜的厚度,可以有效防止水分过快进入沥青和两相界面。原材料选择时,尽量选择能够形成良好黏附的沥青-集料组合,保证水分侵入后黏附力和黏聚力不至于衰减过快。

除上述措施外,还可以采取沥青改性,添加抗剥落剂等措施。图 10 为不同沥青添加改性剂后的黏结破坏能和拉拔强度^[30,47]。由图 10 可以看出,改性剂的加入显著影响了拉拔强度,但在不同的集料表面规律不同。对于 SBS 改性沥青,作用于玄武岩集料界面时,拉拔强度有所降低,作用于石灰岩和花岗岩集料界面时,拉拔强度有略微提升。这是因为玄武岩表面的孔隙结构相较于其他两种集料更为粗糙,经 SBS 改性后的沥青内部发生团聚交联,难以渗透进集料表面小孔产生锚固力。SBS 改性沥青的流动差,也一定程度上阻碍了沥青-集料的黏附过程,降低了沥青与集料实际接触的面积。此外,SBS 改性沥青在拉拔试验过程中存在更明显的延迟弹性变形,延长了拉力由拉头传递至沥青的时间,即 SBS 改性沥青具有较

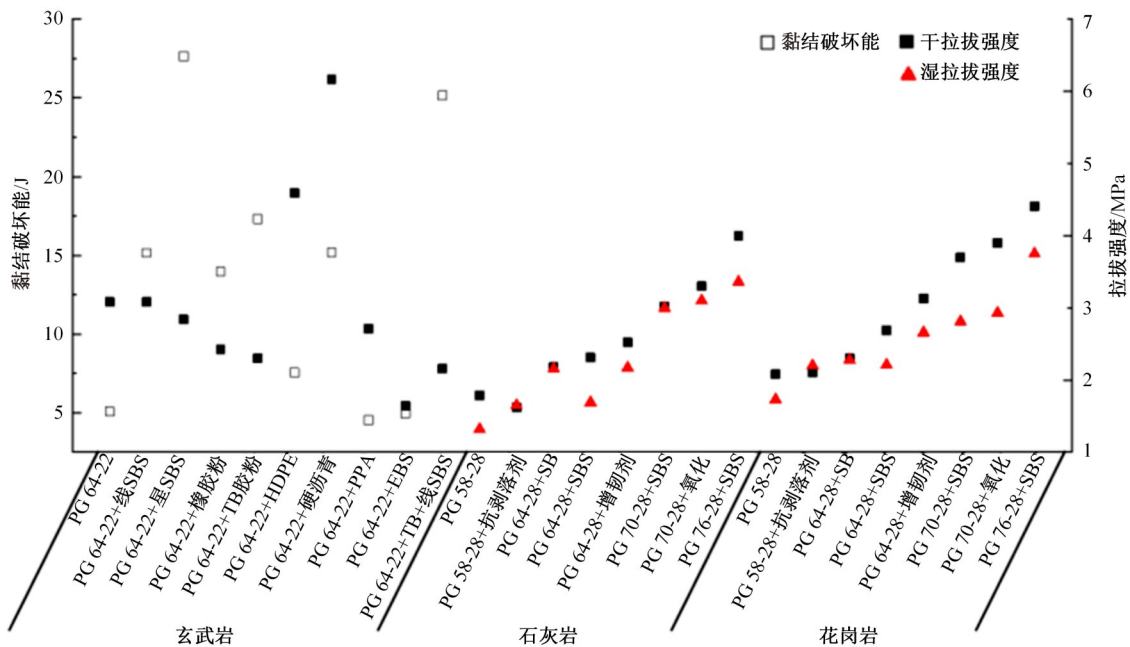


图 10 改性沥青的剪切黏附试验和拉拔试验结果

Fig. 10 Shear adhesion test and BBS test results of modified asphalt

低的被加载速率,这是拉拔力降低的原因。对于胶粉或TB胶粉改性沥青,其难以在沥青中完全溶胀发育,不具有黏附性的橡胶颗粒会占用两相界面上沥青与集料的接触面积,这是拉拔强度降低的原因^[133]。事实上,经由SBS或胶粉改性后的沥青具有良好的弹性性能,仅以拉拔强度作为黏附性评判标准并不合理,还应考虑其在破坏过程中外力做的功。由图10还可以看出:SBS和胶粉改性沥青的黏结破坏能明显高于基质沥青,能够持续耗散外界荷载引起的破坏能量,进而持久抵抗荷载;此外,水分作用后试样的拉拔强度都会有一定降低,降低幅度与沥青和集料种类有关;使用抗剥落剂和SB改性的沥青与两种集料的干抗拔强度虽没有显著提升,但维持了较高的湿拉拔强度,说明采用合理的添加剂抵御水分作用同样是改善混合料水稳定性的合理方式。

原则上,与沥青化学成分相近,掺入能够显著提高沥青的模量和黏度,或者可以补充极性组分的改性剂都能够提高沥青与集料间的黏附性,例如岩沥青、湖沥青和煤液化残渣^[134]等。此外,纳米改性材料已经成为了一项颇具前景和创新性的技术,其中纳米黏土、纳米熟石灰、纳米二氧化硅和碳纳米

管已经被证明可以提高混合料的水稳定性^[135],其他纳米改性沥青的黏附性亟需进一步研究。

广泛使用的抗剥落剂可分为两类:主动性促黏剂(Active adhesion promoters, AAP)和被动型抗剥落剂(Passive adhesion promoters, PAP)^[136]。前者通过增强沥青胶结料与集料之间的黏结力,防止水进入界面,如图10中的硬沥青所示;后者则可以在有水环境下促进沥青黏合剂和骨料之间的黏结,如图10中的抗剥落剂所示。

表11给出了常用的抗剥落剂,其中,使用较多的胺类化合物存在一些缺点:首先,热稳定性不足,易在施工过程中分解丧失效果,需进行耐热性检验,确认其长效性能,例如预先对掺加抗剥落剂的沥青混合料进行短期老化及长期老化;其次,胺类抗剥落剂存放时会产生刺激性氨气污染环境。实际应用表明,对于一些以物理吸附方式改善沥青与集料之间黏附性的抗剥落剂,其长期性能同样需要确认,尤其是采用酸性集料时。因此,开发环境友好(如降低生产、施工温度、减少能源消耗、减少气味和烟雾排放)的抗剥落剂,以及制定标准、合理的抗剥落剂长期性能评价体系十分必要。

表 11 常用抗剥落剂

Table 11 Common anti-stripping agent

项目	类 型			
	无机类	金属皂化物	表面活性剂	有机高分子
代表物	消石灰、水泥	皂角铁	季铵盐	非胺、胺类聚合物
改性对象	石料	沥青	沥青	沥青
优点	性能较好、成本低	使用方便、成本低	使用方便	性能好,使用方便
缺点	使用工艺复杂	与沥青密度相差大,易离析	性能一般,热稳定性差	成本高
目前状况	仍在使用	较少使用	较少使用	较多使用

7 结 论

文章回顾了国内外沥青-集料之间黏附和剥落产生的机理、评价方法、影响因素及改善措施,得到以下结论。

(1)多种机制在黏附形成和剥落发展的过程中同时存在,目前仍不完全清楚占主导作用的是某种机制或多种机制的组合,集料和沥青中决定黏附性能的关键成分需要进一步确定。

(2)不同试验方法的试样尺寸、试验程序和评价指标不统一,导致不同试验结果无法定量比较,仅能定性反映黏附性和水稳定性的强弱规律。室内试验的单一简单力学参数模型不能评估沥青

混合料黏附损伤行为的复杂性,室内试验环境参数的设置与真实环境差距较大。

(3)表面能理论通过能量参数量化了不同沥青-集料组合的黏附和剥落潜力,考虑了沥青成分、集料种类和表面性质、水以及分子间的作用力等因素对黏附和剥落的影响,可以给出各因素对黏附力和内聚力的贡献。

(4)AFM和MD技术推动了沥青与集料的表面形态、成分组成及物理化学性质与界面黏附和剥落关系的研究,但工具自身具有一定局限性。

(5)基于现有评价方法可建立宏微观多尺度评价体系:松散混合料及混合料组分试验可用于选取黏附性良好的沥青-集料组合;压实混合料试

验用以评估外界环境、混合料设计对水稳定性的影响;MD和AFM分别从沥青与集料的组分和微观形貌两个方面量化黏附的微观影响因素;有限元模拟用于评估路面结构中动水压力的分布及影响。

(6)沥青与集料间的黏附强烈依赖于原材料的选取和混合料的设计,同时恶劣的外界环境和不规范的生产 and 施工过程会造成剥落的发生。黏附性的提高多通过对沥青改性和添加抗剥落剂实现。

8 展 望

沥青-集料黏附及剥落相关研究已经取得了大量成果,但水损害仍然存在表明现有研究仍有不足。基于此,本文提出了一些未来可能的研究方向。

(1)黏附理论需要基于各理论的综合运用形成更全面的理论,尝试将基于表面能的热力学参数与其他材料特性参数纳入整体的热拌混合料性能预测模型中。

(2)尝试建立一种能够完整获取混合料试件内部空隙分布特征的方法,包括空隙的曲折程度和连通程度,开发与之对应的室内试验或有限元模型,进而完整考虑空隙分布特征对混合料或路面水稳定性的影响。

(3)动态模量是沥青路面设计中的关键参数,可尝试建立路面使用寿命期间动态模量变化的估计模型,该模型需要考虑水损害带来的模量衰减,并可应用于有限元模拟以更好地预测损伤传播。

(4)统一试验程序,建立不同尺寸试样与不同评价指标结果的定量转换关系。

(5)水损坏作为一种长期现象,出现在路面整个生命周期,需要建立沥青路面全寿命周期的水稳定性评价过程,包括材料的设计和生产和路面及附属结构的施工,最重要的是引入现场测试技术,同时对现场报告的水损害进行室内试验评估,将试验结果纳入现场测试程序。

(6)现有现象学模型仅基于沥青微观结构下复杂胶体分散的粗略物理化学图像,不能完整预测沥青改性剂和抗剥落剂改善黏附性的作用机制,需要进一步确定沥青改性剂和抗剥落剂带来的主要分子间相互作用,并在沥青胶体模型的框架内进行解释。

(7)AFM和MD技术的未来发展方向主要是解决工具自身局限性问题,如AFM测定时如何控制试件精度,合理地采用矿料颗粒进行针尖修饰;MD技术需要更精确的分子模型、更合适的力场类型参数,在解决计算硬件模拟跨度的基础上,构建更大、更复杂的仿真系统,考虑与量子力学等其他模拟方法结合进行更全面的研究。

参考文献:

- [1] Guo F, Pei J, Zhang J, et al. Study on the adhesion property between asphalt binder and aggregate: a state-of-the-art review[J]. Construction and Building Materials, 2020, 256: No. 119474.
- [2] Mehrara A, Khodaii A. A review of state of the art on stripping phenomenon in asphalt concrete[J]. Construction and Building Materials, 2013, 38: 423-442.
- [3] Canestrari F, Cardone F, Graziani A, et al. Adhesive and cohesive properties of asphalt-aggregate systems subjected to moisture damage[J]. Road Materials and Pavement Design, 2010, 11(增刊1): 11-32.
- [4] Caro S, Masad E, Bhasin A, et al. Moisture susceptibility of asphalt mixtures, part 1: mechanisms[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2008, 9(2): 81-98.
- [5] Kakar M R, Hamzah M O, Valentin J. A review on moisture damages of hot and warm mix asphalt and related investigations[J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 99: 39-58.
- [6] Soenen H, Vansteenkiste S, de Maeijer P K. Fundamental approaches to predict moisture damage in asphalt mixtures: state-of-the-art review[J]. Infrastructures, 2020, 5(2): No. 20.
- [7] 王岚, 罗学东, 张琪, 等. 温拌胶粉改性沥青-集料粘附性及其体系水稳定性分析[J]. 材料导报, 2022, 36(8): 123-130.
Wang Lan, Luo Xue-dong, Zhang Qi, et al. Analysis of adhesion of warm mix rubber powder modified asphalt aggregates and water stability of the system [J]. Materials Reports, 2022, 36(8): 123-130.
- [8] Ghabchi R, Singh D, Zaman M, et al. Micro-structural analysis of moisture-induced damage potential of asphalt mixes containing RAP[J]. Journal of Testing and Evaluation, 2016, 44(1): 194-205.
- [9] Kim Y R, Little D, Lytton R. Fatigue and healing characterization of asphalt mixtures[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2003, 15(1): 75-83.
- [10] Kim Y R, Little D N, Lytton R L. Effect of mois-

- ture damage on material properties and fatigue resistance of asphalt mixtures[J]. *Transportation Research Record*, 2004, 1891(1): 48-54.
- [11] Yu X, Burnham N A, Tao M. Surface microstructure of bitumen characterized by atomic force microscopy[J]. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2015, 218: 17-33.
- [12] Yao H, Liu J, Xu M, et al. Discussion on molecular dynamics (MD) simulations of the asphalt materials[J]. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2022, 299: No. 102565.
- [13] McBain J W, Hopkins D G. On adhesives and adhesive action[J]. *The Journal of Physical Chemistry*, 1925, 29(2): 188-204.
- [14] Canestrari F, Ferrotti G, Cardone F, et al. Innovative testing protocol for evaluation of binder-reclaimed aggregate bond strength[J]. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2014, 2444(1): 63-70.
- [15] Petersen J, Plancher H, Ensley E, et al. Chemistry of asphalt-aggregate interaction: relationship with pavement moisture-damage prediction test[J]. *Transportation Research Record*, 1982, 843: 95-104.
- [16] Hefer A W, Little D N, Lytton R L. A synthesis of theories and mechanisms of bitumen-aggregate adhesion including recent advances in quantifying the effects of water[J]. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 2005, 74(139): No. e196.
- [17] Huang S C, Branthaver J F, Robertson R E. Interaction of asphalt films with aggregate surfaces in the presence of water[J]. *Road Materials and Pavement Design*, 2002, 3(1): 23-48.
- [18] Petersen J C, Plancher H. Model studies and interpretive review of the competitive adsorption and water displacement of petroleum asphalt chemical functionalities on mineral aggregate surfaces[J]. *Petroleum Science and Technology*, 1998, 16(1/2): 89-131.
- [19] Tan Y, Guo M. Using surface free energy method to study the cohesion and adhesion of asphalt mastic[J]. *Construction and Building Materials*, 2013, 47: 254-260.
- [20] 陈燕娟. 酸性集料表面活化技术与粘附机理研究[D]. 西安: 长安大学材料科学与工程学院, 2012. Chen Yan-juan. Surface activation technology of acid aggregate and adhesion mechanism[D]. Xi'an: School of Materials Science and Engineering, Chang'an University, 2012.
- [21] 任玉娜. 聚合物改性沥青粘聚性与粘附性研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东)化学化工学院, 2011. Ren Yu-na. Research on cohesion and adhesion properties of polymer modified asphalt[D]. Qingdao: College of Chemistry and Chemical Engineering, China University of Petroleum, 2011.
- [22] Ensley E K. Multilayer adsorption with molecular orientation of asphalt on mineral aggregate and other substrates[J]. *Journal of Applied Chemistry and Biotechnology*, 1975, 25(9): 671-682.
- [23] 庞晓奕. 基于 AFM 与表面能原理的沥青与集料粘附特性分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学交通科学与工程学院, 2015. Pang Xiao-yi. Asphalt and aggregate adhesion characteristics analysis based on the principle of AFM and the surface energy[D]. Harbin: School of Transportation Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, 2015.
- [24] Huang S C, Robertson R E. Rheology of thin asphalt films in contact with aggregate[J]. *Road Materials and Pavement Design*, 2006, 7(2): 179-199.
- [25] Bagampadde U, Isacson U, Kiggundu B M. Classical and contemporary aspects of stripping in bituminous mixes[J]. *Road Materials and Pavement Design*, 2004, 5(1): 7-43.
- [26] Caro S, Masad E, Bhasin A, et al. Moisture susceptibility of asphalt mixtures, part 2: characterisation and modelling[J]. *International Journal of Pavement Engineering*, 2008, 9(2): 99-114.
- [27] 周卫峰. 沥青与集料界面粘附性研究[D]. 西安: 长安大学材料科学与工程学院, 2002. Zhou Wei-feng. Study on adhesion of interface between asphalt and aggregate[D]. Xi'an: School of Materials Science and Engineering, Chang'an University, 2002.
- [28] 陈斌华. 基于光电比色法的沥青与矿料粘附效应研究[D]. 西安: 长安大学公路学院, 2014. Chen Bin-hua. Based on the photoelectric colorimetric method of asphalt and mineral aggregate adhesion effect [D]. Xi'an: School of Highway, Chang'an University, 2014.
- [29] 宋艳茹, 张玉贞. 沥青粘附性能评价方法综述[J]. *石油沥青*, 2005(3): 1-6. Song Yan-ru, Zhang Yu-zhen. The evaluating methods' summary of asphalt adhesion[J]. *Petroleum Asphalt*, 2005(3): 1-6.
- [30] Kanitpong K, Bahia H. Relating adhesion and cohesion of asphalts to the effect of moisture on laboratory performance of asphalt mixtures[J]. *Transportation*

- Research Record, 2005, 1901(1): 33-43.
- [31] Zhang J, Apeagyei A K, Airey G D, et al. Influence of aggregate mineralogical composition on water resistance of aggregate-bitumen adhesion[J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2015, 62: 45-54.
- [32] 徐青杰. 沥青-集料黏附性能多尺度分析与评价方法研究[D]. 重庆: 重庆交通大学交通运输学院, 2020.
Xu Qing-jie. Multi-scale analysis and evaluation method of asphalt-aggregate adhesion [D]. Chongqing: College of Traffic and Transportation, Chongqing Jiaotong University, 2020.
- [33] 王威娜, 徐青杰, 周圣雄, 等. 沥青-集料黏附作用评价方法综述[J]. 材料导报, 2019, 33(13): 2197-2205.
Wang Wei-na, Xu Qing-jie, Zhou Sheng-xiong, et al. A review on evaluation methods of asphalt-aggregate adhesion[J]. Materials Reports, 2019, 33(13): 2197-2205.
- [34] Blackman B R, Cui S, Kinloch A J, et al. The development of a novel test method to assess the durability of asphalt road-pavement materials[J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2013, 42: 1-10.
- [35] Cui S, Blackman B R, Kinloch A J, et al. Durability of asphalt mixtures: effect of aggregate type and adhesion promoters[J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2014, 54: 100-111.
- [36] Mo L T. Damage development in the adhesive zone and mortar of porous asphalt concrete[D]. Netherlands: Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Delft University of Technology, 2010.
- [37] Kanitpong K, Bahia H U. Role of adhesion and thin film tackiness of asphalt binders in moisture damage of HMA (with discussion)[J]. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 2003, 72: 502-528.
- [38] Cho D W, Bahia H U. Effects of aggregate surface and water on rheology of asphalt films[J]. Transportation Research Record, 2007, 1998(1): 10-17.
- [39] 肖月. 沥青混合料中胶浆-集料粘结性及力学性能研究[D]. 武汉: 武汉理工大学材料科学与工程学院, 2008.
Xiao Yue. Fracture mechanisms of binder-aggregate system and its effect on properties of asphalt mixtures [D]. Wuhan: School of Materials Science and Engineering, Wuhan University of Technology, 2008.
- [40] Huang B, Shu X, Dong Q, et al. Laboratory evaluation of moisture susceptibility of hot-mix asphalt containing cementitious fillers[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2010, 22(7): 667-673.
- [41] Varveri A, Avgerinopoulos S, Scarpas A. Experimental evaluation of long-and short-term moisture damage characteristics of asphalt mixtures[J]. Road Materials and Pavement Design, 2016, 17(1): 168-186.
- [42] Collop A C, Choi Y, Airey G. Effects of pressure and aging in SATS test[J]. Journal of Transportation Engineering, 2007, 133(11): 618-624.
- [43] Abed A H, Qasim Z I, Al-Mosawe H, et al. The effect of hybrid anti-stripping agent with polymer on the moisture resistance of hot-mix asphalt mixtures[J]. Cogent Engineering, 2019, 6(1): No. 1659125.
- [44] Murshed A M, Tandon V, Nazarian S, et al. Identification of moisture-susceptible asphalt concrete mixes using modified environmental conditioning system[J]. Transportation Research Record, 1998, 1630(1): 106-116.
- [45] Al-Swailmi S, Terrel R L. Evaluation of water damage of asphalt Concrete mixtures using the environmental conditioning system (Ecs)(with discussion)[J]. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 1992, 61: 405-445.
- [46] 任敏达, 冯汉卿, 丛林, 等. 沥青混合料饱水过程的强度演化规律及机理分析[J]. 建筑材料学报, 2022, 25(5): 537-544.
Ren Min-da, Feng Han-qing, Cong Lin, et al. Strength evolution law and mechanism analysis of asphalt mixtures during water saturation[J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(5): 537-544.
- [47] Zhou L, Huang W, Xiao F, et al. Shear adhesion evaluation of various modified asphalt binders by an innovative testing method[J]. Construction and Building Materials, 2018, 183: 253-263.
- [48] Kim Y R, Lutif J S, Bhasin A, et al. Evaluation of moisture damage mechanisms and effects of hydrated lime in asphalt mixtures through measurements of mixture component properties and performance testing[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2008, 20(10): 659-667.
- [49] Copeland A R, Youtcheff J, Shenoy A. Moisture sensitivity of modified asphalt binders: factors influencing bond strength[J]. Transportation Research Record, 2007, 1998(1): 18-28.
- [50] Wasiuddin N M, Saltibus N E, Mohammad L N. Novel moisture-conditioning method for adhesive failure of hot-and warm-mix asphalt binders[J]. Transportation Research Record, 2011, 2208(1): 108-117.
- [51] Moraes R, Velasquez R, Bahia H U. Measuring the

- effect of moisture on asphalt-aggregate bond with the bitumen bond strength test[J]. *Transportation Research Record*, 2011, 2209(1): 70-81.
- [52] Mogawer W S, Austerman A J, Bahia H U. Evaluating the effect of warm-mix asphalt technologies on moisture characteristics of asphalt binders and mixtures[J]. *Transportation Research Record*, 2011, 2209(1): 52-60.
- [53] Júnior J L L, Babadopulos L F, Soares J B. Moisture-induced damage resistance, stiffness and fatigue life of asphalt mixtures with different aggregate-binder adhesion properties[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 216: 166-175.
- [54] Bagampadde U, Isacsson U, Kiggundu B. Impact of bitumen and aggregate composition on stripping in bituminous mixtures[J]. *Materials and Structures*, 2006, 39(3): 303-315.
- [55] Bagampadde U, Isacsson U, Kiggundu B. Influence of aggregate chemical and mineralogical composition on stripping in bituminous mixtures[J]. *The International Journal of Pavement Engineering*, 2005, 6(4): 229-239.
- [56] 豆莹莹, 李晓民, 姚志杰, 等. 基于表面自由能的再生沥青粘附性及其水稳定性[J]. *材料科学与工程学报*, 2020, 38(4): 648-653.
- Dou Ying-ying, Li Xiao-min, Yao Zhi-jie, et al. Adhesion and water stability of regenerated asphalt based on surface free energy[J]. *Journal of Materials Science & Engineering*, 2020, 38(4): 648-653.
- [57] 成志强, 张晓燕, 孔繁盛, 等. 利用表面能理论及拉脱试验分析沥青膜的剥离行为[J]. *材料导报*, 2020, 34(增刊2): 1288-1294.
- Cheng Zhi-qiang, Zhang Xiao-yan, Kong Fan-sheng, et al. Investigation on stripping behavior of asphalt Film using surface energy theory and pull-off test[J]. *Materials Reports*, 2020, 34(Sup. 2): 1288-1294.
- [58] Wasiuddin N M, Zaman M M, O'Rear E A. Effect of sasobit and aspha-min on wettability and adhesion between asphalt binders and aggregates[J]. *Transportation Research Record*, 2008, 2051(1): 80-89.
- [59] Bhasin A, Little D N, Vasconcelos K L, et al. Surface free energy to identify moisture sensitivity of materials for asphalt mixes[J]. *Transportation Research Record*, 2007, 2001(1): 37-45.
- [60] Wang W, Shen A, Yang X, et al. Surface free energy method for evaluating the effects of anti-stripping agents on the moisture damage to asphalt mixtures[J]. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2020, 34(18): 1947-1970.
- [61] Hamed G H, Moghadas Nejad F. Using energy parameters based on the surface free energy concept to evaluate the moisture susceptibility of hot mix asphalt[J]. *Road Materials and Pavement Design*, 2015, 16(2): 239-255.
- [62] Al-Rawashdeh A S, Sargand S. Performance assessment of a warm asphalt binder in the presence of water by using surface free energy concepts and nanoscale techniques[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2014, 26(5): 803-811.
- [63] 王端宜, 郭秀林, 唐成. 基于真实沥青膜厚的沥青与集料黏结性能评价与验证[J]. *建筑材料学报*, 2021, 24(3): 624-629.
- Wang Duan-lin, Guo Xiu-lin, Tang Cheng. Bonding performance evaluation and verification between asphalt and aggregate based on true asphalt film thickness[J]. *Journal of Building Materials*, 2021, 24(3): 624-629.
- [64] Yi J, Pang X, Feng D, et al. Studies on surface energy of asphalt and aggregate at different scales and bonding property of asphalt-aggregate system[J]. *Road Materials and Pavement Design*, 2018, 19(5): 1102-1125.
- [65] Moraes R, Velasquez R, Bahia H. Using bond strength and surface energy to estimate moisture resistance of asphalt-aggregate systems[J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 130: 156-170.
- [66] Guo M, Tan Y, Zhou S. Multiscale test research on interfacial adhesion property of cold mix asphalt[J]. *Construction and Building Materials*, 2014, 68: 769-776.
- [67] Kim S H, Jeong J H, Kim N. Use of surface free energy properties to predict moisture damage potential of asphalt concrete mixture in cyclic loading condition[J]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2003, 7(4): 381-387.
- [68] Arabani M, Hamed G H. Using the surface free energy method to evaluate the effects of polymeric aggregate treatment on moisture damage in hot-mix asphalt[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2011, 23(6): 802-811.
- [69] Hamed G H. Effects of polymeric coating the aggregate surface on reducing moisture sensitivity of asphalt mixtures[J]. *International Journal of Civil Engineering*, 2018, 16(9): 1097-1107.
- [70] 马翔, 胡绪泉, 王丽丽, 等. 基于表面自由能研究水

- 温耦合作用对沥青黏结性能的影响[J]. 森林工程, 2022, 38(4): 140-146.
- Ma Xiang, Hu Xu-quan, Wang Li-li. Study on the effect of water temperature coupling on asphalt bond performance based on surface free energy[J]. Forest Engineering, 2022, 38(4): 140-146.
- [71] 冯浩浩, 苗强, 李振纲, 等. 基于表面能理论的再生集料与沥青黏附性影响研究[J/OL]. [2022-11-05]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1824.U.20220923.1120.006.html>
- [72] Hamed G H, Moghadas N F. Evaluating the effect of mix design and thermodynamic parameters on moisture sensitivity of hot mix asphalt[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2017, 29(2): No. 04016207.
- [73] Masad E A, Zollinger C, Bulut R, et al. Characterization of HMA moisture damage using surface energy and fracture properties (With Discussion)[J]. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 2006, 75: 713-754.
- [74] Loeber L, Sutton O, Morel J, et al. New direct observations of asphalts and asphalt binders by scanning electron microscopy and atomic force microscopy[J]. Journal of Microscopy, 1996, 182(1): 32-39.
- [75] Das P K, Baaj H, Tighe S, et al. Atomic force microscopy to investigate asphalt binders: a state-of-the-art review[J]. Road Materials and Pavement Design, 2016, 17(3): 693-718.
- [76] Tarefder R, Arifuzzaman M. A study of moisture damage in plastomeric polymer modified asphalt binder using functionalized AFM tips[J]. Journal of Systemics, Cybernetics and Informatics, 2011, 9(5): 1-12.
- [77] Yao Z, Zhu H, Gong M, et al. Characterization of asphalt materials' moisture susceptibility using multiple methods[J]. Construction and Building Materials, 2017, 155: 286-295.
- [78] 易军艳, 庞骁奕, 姚冬冬, 等. 基于原子力显微镜技术的沥青与矿料表面粗糙度及黏附特性[J]. 复合材料学报, 2017, 34(5): 1111-1121.
- Yi Jun-yan, Pang Xiao-yi, Yao Dong-dong, et al. Characterization of surface roughness and adhesive mechanism of asphalt and mineral aggregate based on atomic force microscopy method[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2017, 34(5): 1111-1121.
- [79] Xu M, Yi J, Feng D, et al. Analysis of adhesive characteristics of asphalt based on atomic force microscopy and molecular dynamics simulation[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2016, 8(19): 12393-12403.
- [80] Vasconcelos K L, Bhasin A, Little D N. History dependence of water diffusion in asphalt binders[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2011, 12(5): 497-506.
- [81] dos Santos S, Partl M N, Poulikakos L D. Newly observed effects of water on the microstructures of bitumen surface[J]. Construction and Building Materials, 2014, 71: 618-627.
- [82] Lyne Å L, Wallqvist V, Birgisson B. Adhesive surface characteristics of bitumen binders investigated by atomic force microscopy[J]. Fuel, 2013, 113: 248-256.
- [83] Yu X, Burnham N A, Mallick R B, et al. A systematic AFM-based method to measure adhesion differences between micron-sized domains in asphalt binders[J]. Fuel, 2013, 113: 443-447.
- [84] 邓越, 孙国强, 余可心, 等. 沥青混合料水损坏微观尺度研究方法(1)——AFM的应用[J]. 石油沥青, 2018, 32(1): 31-37.
- Deng Yue, Sun Guo-qiang, Yu Ke-xin, et al. Micro-Nano scale research methods for moisture damage of asphalt mixtures (1)—the application of AFM[J]. Petroleum Asphalt, 2018, 32(1): 31-37.
- [85] 刘克非, 邓林飞, 郑佳宇, 等. 不同沥青结合料水损害的纳米尺度研究[J]. 材料研究学报, 2016, 30(10): 773-780.
- Liu Ke-fei, Deng Lin-fei, Zheng Jia-yu, et al. Moisture induced damage of various asphalt binders[J]. Chinese Journal of Materials Research, 2016, 30(10): 773-780.
- [86] Tarefder R A, Zaman A M. Nanoscale evaluation of moisture damage in polymer modified asphalts[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2010, 22(7): 714-725.
- [87] Medendorp C A. Atomic force microscopy method development for surface energy analysis[D]. Kentucky: College of Pharmacy, University of Kentucky, 2011.
- [88] Chen Z, Pei J, Li R, et al. Performance characteristics of asphalt materials based on molecular dynamics simulation—a review[J]. Construction and Building Materials, 2018, 189: 695-710.
- [89] Pauli A T, Miknis F, Beemer A, et al. Assessment of physical property prediction based on asphalt average molecular structures[C]//Chemistry of Petroleum and Emerging Technologies, Washington, DC, USA, 2005, 50(2): 255-259.
- [90] Zhang L, Greenfield M L. Analyzing properties of

- model asphalts using molecular simulation[J]. *Energy & Fuels*, 2007, 21(3): 1712-1716.
- [91] Zhang L, Greenfield M L. Effects of polymer modification on properties and microstructure of model asphalt systems[J]. *Energy & Fuels*, 2008, 22(5): 3363-3375.
- [92] Hansen J S, Lemarchand C A, Nielsen E, et al. Four-component united-atom model of bitumen[J]. *The Journal of Chemical Physics*, 2013, 138(9): No. 094508.
- [93] Li D D, Greenfield M L. Chemical compositions of improved model asphalt systems for molecular simulations[J]. *Fuel*, 2014, 115: 347-356.
- [94] Xu M, Yi J, Qi P, et al. Improved chemical system for molecular simulations of asphalt[J]. *Energy & Fuels*, 2019, 33(4): 3187-3198.
- [95] 马建民, 孙国强, 胡明君, 等. 沥青混合料水损坏微观尺度研究方法(3)—分子动力学模拟[J]. *石油沥青*, 2018, 32(3): 42-47, 59.
- Ma Jian-min, Sun Guo-qiang, Hu Ming-jun, et al. Micro-Nano scale research methods for the moisture damage of asphalt mixtures(3)—molecular dynamics simulation[J]. *Petroleum Asphalt*, 2018, 32(3): 42-47, 59.
- [96] Sun W, Wang H. Moisture effect on nanostructure and adhesion energy of asphalt on aggregate surface: a molecular dynamics study[J]. *Applied Surface Science*, 2020, 510: No. 145435.
- [97] Xu G, Wang H. Molecular dynamics study of interfacial mechanical behavior between asphalt binder and mineral aggregate[J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 121: 246-254.
- [98] Wang H, Lin E, Xu G. Molecular dynamics simulation of asphalt-aggregate interface adhesion strength with moisture effect[J]. *International Journal of Pavement Engineering*, 2017, 18(5): 414-423.
- [99] Yao H, Dai Q, You Z. Chemo-physical analysis and molecular dynamics (MD) simulation of moisture susceptibility of nano hydrated lime modified asphalt mixtures[J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 101: 536-547.
- [100] Zheng C, Shan C, Liu J, et al. Microscopic adhesion properties of asphalt-mineral aggregate interface in cold area based on molecular simulation technology[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 268: No. 121151.
- [101] Luo L, Chu L, Fwa T. Molecular dynamics analysis of moisture effect on asphalt-aggregate adhesion considering anisotropic mineral surfaces[J]. *Applied Surface Science*, 2020, 527: No. 146830.
- [102] Lu Y, Wang L. Nanoscale modelling of mechanical properties of asphalt-aggregate interface under tensile loading[J]. *International Journal of Pavement Engineering*, 2010, 11(5): 393-401.
- [103] Lu Y, Wang L. Atomistic modelling of moisture sensitivity: a damage mechanisms study of asphalt concrete interfaces[J]. *Road Materials and Pavement Design*, 2017, 18(Sup. 3): 200-214.
- [104] Swamy A K, Matolia V, Ramana G. Interrelationship between uncompacted void content of aggregates and asphalt concrete properties[J]. *Particulate Science and Technology*, 2019, 37(5): 623-631.
- [105] 王志祥, 李建阁, 张争奇. 集料形态特征对集料-沥青黏附及水稳定性的影响[J]. *建筑材料学报*, 2021, 24(5): 1039-1047.
- Wang Zhi-xiang, Li Jian-ge, Zhang Zheng-qi. Effects of aggregate morphological characteristics on adhesion of aggregate-asphalt and its moisture stability[J]. *Journal of Building Materials*, 2021, 24(5): 1039-1047.
- [106] 王璐. 沥青-集料界面相结构和粘附机理研究[D]. 西安: 长安大学公路学院, 2014.
- Wang Lu. Investigation of the interface structure and adhesion mechanism between asphalt and aggregate[D]. Xi'an: School of Highway, Chang'an University, 2014.
- [107] 苏文超. 碎石颗粒形状对沥青混合料性能影响的试验研究[D]. 长沙: 长沙理工大学交通运输工程学院, 2013.
- Su Wen-chao. Experimental study on gravel particle shape effect on the performance of asphalt mixture[D]. Changsha: School of Traffic & Transportation Engineering, Changsha University, 2013.
- [108] Airey G, Collop A, Zoorob S, et al. The influence of aggregate, filler and bitumen on asphalt mixture moisture damage[J]. *Construction and Building Materials*, 2008, 22(9): 2015-2024.
- [109] Cala A, Caro S, Lleras M, et al. Impact of the chemical composition of aggregates on the adhesion quality and durability of asphalt-aggregate systems[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 216: 661-672.
- [110] 虞将苗, 周文理. 宏纳观多尺度集料-沥青粘附性评价[J]. *材料导报*, 2021, 35(2): 2052-2056.
- Yu Jiang-miao, Zhou Wen-li. Experimental study on gravel particle shape effect on the performance of asphalt mixture[J]. *Materials Reports*, 2021, 35(2):

- 2052-2056.
- [111]Blazek J, Sebor G, Maxa D. Effect of aggregate composition on asphalt-aggregate adhesion[J]. *Petroleum and Coal*, 2000, 42(1): 46-51.
- [112]Huang M, Zhang H, Gao Y, et al. Study of diffusion characteristics of asphalt-aggregate interface with molecular dynamics simulation[J]. *International Journal of Pavement Engineering*, 2021, 22(3): 319-330.
- [113]Wang H, Wang J, Chen J. Micromechanical analysis of asphalt mixture fracture with adhesive and cohesive failure[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2014, 132: 104-119.
- [114]Hossain M I, Tarefder R A. Identifying damage in asphalt matrix materials surrounding an aggregate particle[J]. *Construction and Building Materials*, 2013, 49: 536-546.
- [115]Abo Q S, Al S H. Effect of aggregate properties on asphalt mixtures stripping and creep behavior[J]. *Construction and Building Materials*, 2007, 21(9): 1886-1898.
- [116]豆莹莹, 魏定邦, 李晓民, 等. 沥青-集料界面黏附性衰减机理研究[J]. *建筑材料学报*, 2019, 22(5): 771-779.
- Dou Ying-ying, Wei Ding-bang, Li Xiao-min, et al. Adhesion attenuation mechanism of asphalt-aggregate interface[J]. *Journal of Building Materials*, 2019, 22(5): 771-779.
- [117]Kutay M E, Aydilek A H. Pore pressure and viscous shear stress distribution due to water flow within asphalt pore structure[J]. *Computer Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2009, 24(3): 212-224.
- [118]Noguera J A H, Quintana H A R, Gómez W D F. The influence of water on the oxidation of asphalt cements[J]. *Construction and Building Materials*, 2014, 71: 451-455.
- [119]张吉哲, 王静, 李岩, 等. 沥青胶浆-集料界面水盐侵蚀损伤规律研究[J]. *材料导报*, 2022, 36(16): 21-29.
- Zhang Ji-zhe, Wang Jing, Li Yan. Study on water and salt erosion damage of asphalt mortar-aggregate interface[J]. *Materials Reports*, 2022, 36(16): 21-29.
- [120]成志强, 张晓燕, 孔繁盛. 水分在沥青膜中的扩散特征[J]. *建筑材料学报*, 2021, 24(2): 399-404.
- Cheng Zhi-qiang, Zhang Xiao-yan, Kong Fan-sheng. Moisture diffusion property into asphalt film[J]. *Journal of Building Materials*, 2021, 24(2): 399-404.
- [121]Caro S, Masad E, Bhasin A, et al. Probabilistic modeling of the effect of air voids on the mechanical performance of asphalt mixtures subjected to moisture diffusion[J]. *Asphalt Paving Technology*, 2010, 79: 221-228.
- [122]Masad E, Castelblanco A, Birgisson B. Effects of air void size distribution, pore pressure, and bond energy on moisture damage[J]. *Journal of Testing and Evaluation*, 2006, 34(1): 15-23.
- [123]Arambula E, Masad E, Martin A E. Influence of air void distribution on the moisture susceptibility of asphalt mixes[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2007, 19(8): 655-664.
- [124]Schram S, Abdelrahman M. Effects of asphalt film thickness on field performance[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 2020, 5(7): 600-628.
- [125]Kiggundu B M, Roberts F L. Stripping in HMA mixtures: state-of-the-art and critical review of test methods[EB/OL]. [2022-11-04]. <https://eng.auburn.edu/research/centers/ncat/files/technical-reports/rep88-02.pdf>
- [126]Gao J, Guo C, Liu Y. Measurement of pore water pressure in asphalt pavement and its effects on permeability[J]. *Measurement*, 2015, 62: 81-87.
- [127]Li S, Zhang H, Sun L. Development and simulation measurement of dynamic hydraulic pressure[J]. *Journal of Tongji University*, 2007, 35(7): No. 915.
- [128]Lei Y, Hu X, Wang H, et al. Effects of vehicle speeds on the hydrodynamic pressure of pavement surface: measurement with a designed device[J]. *Measurement*, 2017, 98: 1-9.
- [129]王英, 杨熙, 姜继斌, 等. 动水冲刷作用下季冻区沥青混合料水损害发展的细观过程[J]. *材料导报*, 2022, 36(10): 50-56.
- Wang Ying, Yang Xi, Jiang Ji-bin. The micro process of water damage in asphalt mixture in seasonal frozen area under the dynamic water erosion[J]. *Materials Reports*, 2022, 36(10): 50-56.
- [130]Feng D, Yi J, Wang D, et al. Impact of salt and freeze-thaw cycles on performance of asphalt mixtures in coastal frozen region of China[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2010, 62(1): 34-41.
- [131]Kutay M E, Aydilek A H. Dynamic effects on moisture transport in asphalt concrete[J]. *Journal of Transportation Engineering*, 2007, 133(7): 406-414.
- [132]Kringos N, Scarpas T, Kasbergen C, et al. Modeling of combined physical-mechanical moisture-induced damage in asphaltic mixes, part 1: governing

- processes and formulations[J]. *International Journal of Pavement Engineering*, 2008, 9(2): 115-128.
- [133]周璐, 黄卫东, 吕泉, 等. 不同改性剂对沥青黏结及抗水损害性能的影响[J]. *建筑材料学报*, 2021, 24(2): 377-384.
- Zhou Lu, Huang Wei-dong, Lv Quan, et al. Effects of various modifiers on the bond property and moisture damage resistance of asphalt[J]. *Journal of Building Materials*, 2021, 24(2): 377-384.
- [134]季节, 马榕达, 郑文华, 等. TLA 和 DCLR 对沥青与集料黏附性的影响[J]. *重庆交通大学学报: 自然科学版*, 2018, 37(1): 54-61.
- Ji Jie, Ma Rong-da, Zheng Wen-hua, et al. Effect of DCLR and TLA on adhesion characteristics of asphalt and aggregate[J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University(Natural Science)*, 2018, 37(1): 54-61.
- [135]Chakravarty H, Sinha S. Moisture damage of bituminous pavements and application of nanotechnology in its prevention[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2020, 32(8): No. 03120003.
- [136]Oliviero R C, Teltayev B, Angelico R. Adhesion promoters in bituminous road materials: a review[J]. *Applied Sciences*, 2017, 7(5): No. 524.