

基于纳米压痕试验的沥青油膜微观力学特征

王莹^{1,2}, 李淑明², 蔡易辰¹, 袁玉卿³

(1. 同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 同济大学交通学院, 上海 201804; 3. 河南大学建筑工程学院, 河南开封 475004)

摘要:选取 4 种不同类型的沥青混合料(AC-25、AC-13、AM-13、OGFC-13)进行纳米压痕试验,探究沥青油膜在沥青混合料中的分布特征。试验结果表明,沥青油膜是普遍存在于沥青混合料内(杨氏模量为 13~17 GPa,厚度在 2~7 μm 范围内)紧附于集料颗粒表面的结构层。沥青油膜的承载能力介于集料颗粒和沥青之间,抗变形能力较差,易发生塑性变形,且在卸载后无法完全恢复。虽然沥青油膜中普遍存在纳米级孔隙,但其力学性能主要由其他因素决定。本文提出了沥青油膜的脱层模型,脱层模型揭示了在加载-卸载循环下,沥青油膜与集料颗粒及沥青之间力学响应不同步导致沥青油膜从集料颗粒表面脱落的破坏机理。

关键词:道路工程; 沥青油膜; 纳米压痕试验; 杨氏模量; 微观力学特征; 脱层模型

中图分类号:U414;U416 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5497(2026)09-2373-09

DOI:10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20250203

Micromechanical characterization of asphalt films based on nanoindentation testing

WANG Ying^{1,2}, LI Shu-ming², CAI Yi-chen¹, YUAN Yu-qing³

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering, Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. College of Transportation Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China; 3. School of Civil Engineering and Architecture, Henan University, Kaifeng 475004, China)

Abstract: This study selected four different types of asphalt mixtures (AC-25, AC-13, AM-13, OGFC-13) and conducted nanoindentation testing to investigate the distribution characteristics of asphalt binder films within the mixtures. The test results indicated that asphalt binder films are widely present in asphalt mixtures, with an elastic modulus ranging from 13 to 17 GPa and a thickness between 2~7 μm . These films form a structural layer that closely adheres to the surface of aggregate particles. The asphalt binder film exhibits a load-bearing capacity intermediate between that of aggregate particles and asphalt, but with poor resistance to deformation. It tends to undergo plastic deformation and cannot fully recover after unloading. Although nanoscale pores are commonly present within the binder film, its micromechanical properties are primarily determined by other factors. This paper proposes a Delamination Model for the asphalt binder

收稿日期: 2025-03-14.

基金项目: 河南省高等学校重点科研项目(26A580001).

作者简介: 王莹(1993-), 女, 博士研究生. 研究方向: 沥青混合料级配设计理论及集料颗粒图像卷积网络分类.

E-mail: lexiying@outlook.com

通信作者: 袁玉卿(1972-), 男, 教授, 博士. 研究方向: 道路工程. E-mail: yroad@126.com

film, which reveals the failure mechanism whereby, under loading-unloading cycles, the mechanical responses of the binder film, aggregates, and asphalt are not synchronized, leading to the detachment of the binder film from the aggregate surface.

Key words: road engineering; asphalt binder films; nanoindentation testing; Young's modulus; micromechanical properties; delamination model

0 引言

在沥青混合料的相关研究中,沥青膜结构一直是路用性能方向的研究重点。学术界普遍认为,沥青膜结构是存在于沥青混合料内部的特殊结构层,附着在集料颗粒表面,由沥青、矿粉混合组成,沥青膜结构的结构特征直接影响了沥青路面结构层的抗车辙、抗水损等性能^[1]。目前,关于沥青膜结构的研究主要集中在3个方面:基于理论模型的沥青膜厚度计算、基于宏观试验的沥青膜厚度对性能的影响,以及基于观测手段的沥青膜结构特征及其存在性分析。从提出沥青膜结构至今,国内外学者从宏观和微观层面都建立了沥青膜结构和路面结构的使用性能之间的联系。

1930年,Francis Hveem(弗朗西斯·维姆)^[2]首次提出沥青膜厚度(Film thickness)这一概念,并将其作为独立结构纳入混合料配合比设计,形成了以计算集料比表面积(SA)为核心的维姆法(Hveem法),被引入《公路沥青路面施工技术规范》JTG F40—2004及后续诸多相关研究中。在Hveem法基础上,吕得保^[3]和何娟等^[4]分别通过实测筛余颗粒比表面积和修正表面积系数(FAi)的方法优化SA,以提高Hveem法在实际工程设计中的普适性。Zhang等^[5]考虑了压实效率对沥青混合料成型状态的影响,修正了有效沥青膜厚度的计算公式;侯芸等^[6]和Radovskiy^[7]分别从颗粒空间分布特征和体积指标出发,提出了新的有效沥青膜厚度计算公式。此外,其他研究通过检验实验数据模型精度^[8],或针对不同沥青类型提出有效沥青膜厚度推荐范围^[5,9],进一步拓展了Hveem法的应用场景。

在外力作用下,沥青混合料中常出现沥青从集料表面剥落、沥青胶浆与集料颗粒相互脱离的现象。这一现象的频繁发生引起了学者们对沥青膜结构宏观性能的广泛关注。荷兰代尔夫特理工大学通过有限元模型研究发现,在3D交通荷载作用下,沥青与集料交界面是最易发生结构破坏的

位置之一^[9]。即使沥青基质、集料级配及施工流程均满足规范要求,路面仍可能出现病害,且基于沥青膜设计的混合料耐久性反而较差^[10],表明现有沥青膜结构设计方法存在误区,需重新建立宏观力学性能与介观结构设计的关联。此外,沥青膜厚度与路用性能密切相关,对沥青混合料的抗低温损伤能力^[11]、抗剪切破坏能力^[12]和抗疲劳性能^[13]均有显著影响。Kandhal等^[14]发现,当孔隙率为8%、有效沥青膜厚度为9~10 μm时,抗老化性能最佳;Zhai等^[15]指出改性剂种类不同时,结合料流变性与沥青膜厚度的关系各异;Yi等^[16]以高温稳定性为依据,提出沥青膜的最佳厚度为4.4 μm。于辉^[17]在高温稳定性的基础上,又结合了低温稳定性和抗冻性,得到了更具体的沥青膜厚度范围2.65~2.8 μm。

图像分析是研究沥青混合料内膜结构特征的一项重要手段。Sukkari^[18]通过扫描电子显微镜(SEM)观察到,沥青膜结构是分布在集料颗粒表面的不均匀层,厚度为35~80 μm。Karim等^[19]利用SEM和能量色散X射线光谱仪(EDS)观察再生沥青混合料,发现有效沥青膜厚度(ABFT)为0.4~2 μm,且通过进一步研究发现^[20],沥青油膜主要分布在集料表面0.5 μm范围内,且厚度在0.5~2.4 μm范围内不规则波动。Vieira等^[21]使用SEM扫描细粒式AC混合料截面,观察到有效沥青膜厚度为0.5~30 μm。Jiang等^[22]结合SEM、激光扩散分析仪(LDA)和形态学分析,发现填料含量高、粒度细的沥青玛蹄脂中沥青油膜更薄且均匀,厚度为1~10 μm,并总结出有效沥青膜厚度分布受最大公称粒径影响的规律^[23]。此外,Jiang等^[24]利用IPAS技术分析表明,不同温度条件下,沥青膜厚度为0.96~1.14 μm,且对抗老化能力有显著影响。Al-Khateeb^[25]利用Image J分析电子显微镜图像,发现沥青膜厚度为7~400 μm,且与动态模量密切相关。Elseifi等^[26,27]提出预测沥青膜厚度的统计回归模型,指出实际

沥青膜厚度与 VMA 规定存在矛盾,建议通过控制集料表面积或体积调节 VMA^[28]。

已有的众多研究结果证明,沥青膜结构是一个厚度从属于介观尺度(介于 100 nm~100 μm 之间的尺度范围^[29])的结构层,因此需要采用合适的介观或微观试验手段,探究沥青膜结构的力学特征。纳米压痕试验是一项精度可达到微观(50 nm)等级的试验手段,已经在沥青膜结构的相关研究中被应用^[30]。沿用这一手段,利用纳米压头阵列的灵活性,调整阵列排布,使其实现从微观手段到介观检测的尺度跨越,进而推进沥青膜结构力学特征的相关研究。

1 制样制备

在接下来的表述中,统一将由沥青与小于结构膜厚度矿料混合物组成的,裹覆于集料颗粒外表面且具有一定结构特征的结构层,称作沥青膜结构。紧紧依附于集料颗粒外表面的第一层结构层称作沥青油膜(Asphalt film);紧接着沥青油膜,沿远离集料颗粒表面方向向外延伸的部分,称作有效沥青膜(Effective asphalt film),与先行规范^[31]中保持一致,结构层的具体分布如图 1 所示,图中 t_a 是指有效沥青膜, t_b 是指沥青油膜。

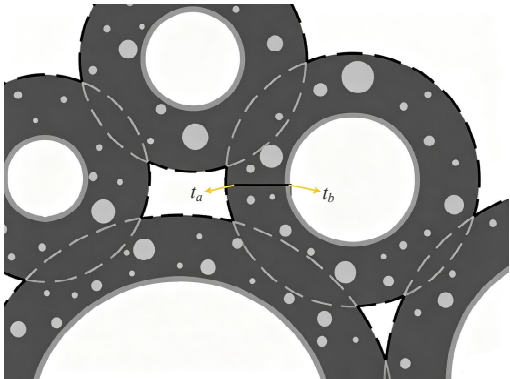


图 1 沥青混合料膜结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of film structure in asphalt mixtures

为了得到完整可靠的研究结论,本研究选择了 3 种不同结构类型的沥青混合料:AC-13(密集配)、AM-13(半开级配)和 OGFC-13(开级配)。此外,AC 设计了两种不同的最大公称粒径(19 mm 和 13.2 mm),最终共制备 4 种类型的沥青混合料试样,用于开展纳米压痕试验。

1.1 试验材料属性

4 种沥青混合料级配的关键筛孔通过率如表

1 所示。本研究中各种混合料均使用#70 基质沥青和相同的石灰石矿粉。

表 1 关键筛孔质量通过率

Table 1 Mass passing rates of key sieve sizes				%
级配类型	筛孔孔径/mm			油石比/%
	4.75	2.36	0.075	
AC-25	41.3	30.5	5.6	3.5
AC-13	54.7	38.8	5.9	4.0
AM-13	24.2	15.6	4.1	4.0
OGFC-13	24.3	14.9	4.3	4.0

依据试验规程^[32,33],本研究采用的集料及沥青的基本性能指标分别如表 2、表 3 所示。

表 2 集料基本性能指标

Table 2 Basic performance indicators of aggregates

试验项目	石灰岩
压碎值/%	11.8
洛杉矶磨耗损失/%	17.8
表观相对密度/(t·m ⁻³)	2.791
坚固性/%	8.2
吸水率/%	0.31
针片状质量分数/%	10.1
矿粉质量分数(水洗法)/%	0.65
软石质量分数/%	1.56

表 3 沥青基本性能指标

Table 3 Basic performance indicators of asphalt

基性性能		数值
针入度(25℃,100 g,5 s),0.1 mm		68.7
软化点(环球法)/℃		52.3
粘度(135℃)/(Pa·s)		0.425
溶解度/%		99.7
闪点(COC)/℃		277
密度/(g·cm ⁻³)		1.022
延度(5 cm/min,15℃)/cm		>150
薄膜加热试验(163℃,5 h)	质量变化/%	0.2
	残余针入度比/%	77
	延度(15℃)/cm	59

1.2 试验试样制备方法

按照规范^[33],制取 AC25、AC-13、AM-13、OGFC-13 四类沥青混合料的 400 mm×300 mm×100 mm 汉堡车辙板。切割各车辙板,得到 10 mm×10 mm×5 mm 的沥青混合料矩形块,在矩形块上进行选点(见图 2(a)),选择用于进行纳米压痕试验的部分。根据图 2(b)中标定的点位位置,从矩形块试样中精准切割出覆盖目标点位的 10 mm×10 mm×10 mm 立方体试样。将切割得到的多块立方体块置于直径 30 mm 的圆柱形

橡胶模具内,并用调配好的环氧树脂进行浇筑固定,得到图3所示的纳米压痕试验试样。图3中的试样在硬化后,还需要依次经过180目、400目和800目砂纸各打磨3 min,再用1 200目、3 000目和5 000目的砂纸各打磨10 min,最终用抛光盘以500 r/min的转速对试样进行水抛,完成待测试样的所有平整抛光工作。

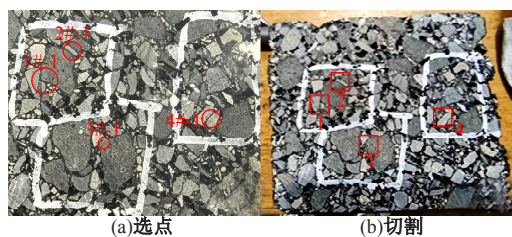


图2 沥青混合料截面选点取样示意图

Fig. 2 Schematic diagram of sampling points on cross-section of asphalt mixtures

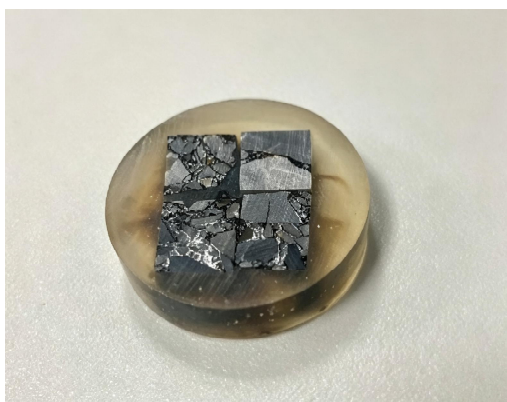


图3 纳米压痕试样

Fig. 3 Nanoindentation test specimen

1.3 测点选择标准

选择沥青混合料截面上集料颗粒之间非点接触的位置。选择的测试点,最好选在集料颗粒之相邻边界相互平行且紧密相接的位置。本研究通过满足以上选择标准,最大程度上控制被测位置附近沥青油膜结构的均匀程度,以防出现被测位置力学特征相比于周围位置存在明显区别的情况。

2 纳米压痕试验

以往的研究表明,沥青油膜的厚度约为0.4~400 μm ,变化范围较大,但是相对于尺寸为100 mm $\times$ 100 mm的沥青混合料试样,是厚度极小的介观结构层,宏观力学试验在描述沥青油膜力学性能方面有很大局限性。为了探究精确的沥青油膜力学特征,本研究利用纳米压痕试验,从

微观尺度探测沥青油膜的杨氏模量,研究沥青油膜在沥青混合料内部的存在特征。

2.1 试验原理

纳米压痕试验是一种用于测量材料微观力学性能的探究性试验方法,在硬性材料中已经得到成功应用,也逐渐被应用在沥青混合料这类粘弹性材料的研究中。纳米压痕试验是通过控制压头在Z方向上的位移或外加荷载的大小,检测被测材料某一区域的杨氏模量的试验方法,主要探究的是材料纳米级区域内的力学性能。用于衡量材料力学特征的杨氏模量,是通过荷载位移曲线,结合奥利弗-法尔模型法(Oliver-Pharr)^[34]计算取得的。

奥利弗-法尔模型法是一种基于刚性体平面的接触响应提出的接触应力模型。测试荷载-位移曲线如图4所示,包括加载和卸载两个部分^[34]。主要依赖荷载位移曲线上卸载段顶端的斜率,按照式(1)(2)计算被测材料的杨氏模量。

$$E_r = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \frac{S}{\sqrt{A}} \quad (1)$$

$$\frac{1}{E_r} = \frac{1 - \nu_s^2}{E_s} + \frac{1 - \nu_i^2}{E_i} \quad (2)$$

式中: S 为卸载顶端斜率; A 为接触面面积; E_r 为压头与被测材料共同决定的复合杨氏模量; E_s 、 ν_s 和 E_i 、 ν_i 分别为被测材料和压头的杨氏模量和泊松比。

Berkovich压头与被测材料表面的接触面积为 A ,如图5(a)所示,压头下压状态下,材料表面

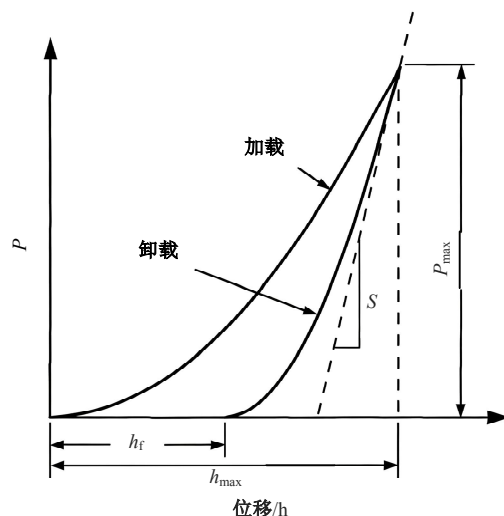


图4 纳米压痕测试荷载位移曲线示意图

Fig. 4 Schematic diagram of load-displacement curves in nanoindentation testing

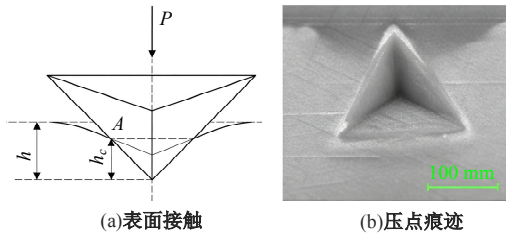


图5 Berkovich压头压点与试样表面接触示意图和压痕图示

Fig. 5 Schematic diagram of contact between Berkovich indenter and specimen surface, and indentation diagram

与压头的交界面到压头下端点的距离为 h_c ,相关的计算式如下^[35]:

$$h_c = h_{\max} - 0.75 \frac{P_{\max}}{S_t} \quad (3)$$

$$A = 24.5 h_c^2 \quad (4)$$

式中: S_t 为试验测得的刚度(stiffness)。

图5(b)为压头离开材料表面留下的压点痕迹。

2.2 试验参数

本研究使用 Nano Indenter G200X, 搭配三面之间夹角为 65.3° 的三棱锥 Berkovich 压头, 其尖端半径小于 100 nm 。设置最大荷载为 50 mN , 最大Z-位移为 500 nm , 加载频率为 110 Hz 。在位移和荷载双控制的条件下, 在4种不同类型的沥青混合料中, 分别取4个平行试样进行试验。本研究中, Berkovich 压头按照图6(b)所示方式排列,

形成行列间距均为 $10\text{ }\mu\text{m}$ 的 3×10 矩阵式阵列。压头阵列放置在沥青混合料试样的平整表面内, 集料-沥青交界面处, 横跨图6(a)中红色虚线标注的交界面位置(彩图参见电子版, 以下同), 用于采集沥青、沥青油膜和集料的杨氏模量。

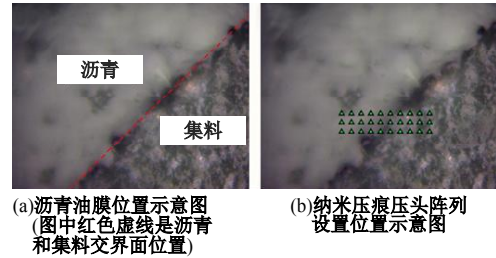


图6 沥青混合料纳米压痕试验图

Fig. 6 Nanoindentation test diagram of asphalt mixtures

3 试验结果分析

3.1 力学响应特征

以 3×10 阵列排布的 Berkovich 压头横跨集料颗粒和沥青, 得到各测样的杨氏模量热力图如图7所示。

4类沥青混合料纳米压痕试验的杨氏模量热力图中(见图7), 分别用红色和蓝色表示杨氏模量最大和最小值, 中间值按比例由其他从红到蓝的渐变颜色表示。其中, 红色代表集料颗粒, 蓝色代表沥青。从图7可以看出, 各类沥青混合料的

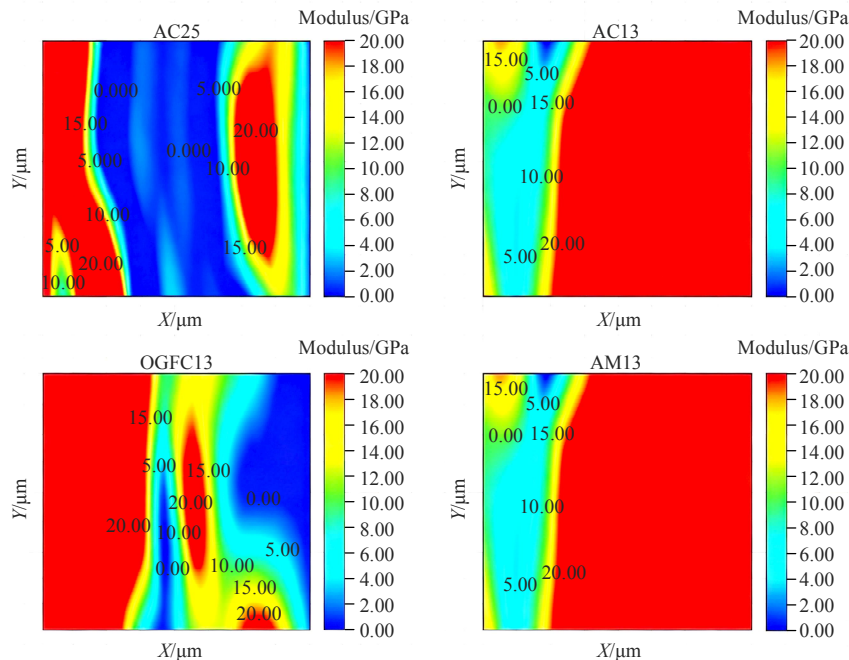


图7 四类混合料纳米压痕杨氏模量热力图

Fig. 7 Heat map of elastic modulus from nanoindentation testing for 4 types of asphalt mixtures

沥青膜结构都是由两部分组成的,主要分为以黄色为主的沥青油膜层和以绿色为主的有效沥青膜层。

集料颗粒、沥青油膜和沥青在本质上的区别很大,因此在相同的外力条件下,会显示不同的力学响应。根据力学响应特征不同,可以从纳米压痕试验各压点的测试结果中区分出沥青、沥青膜结构和和集料颗粒。图 7 证明,在红色的集料颗粒表面,普遍存在着两层分别以黄色为主的沥青油膜和以绿色为主的有效沥青膜,杨氏模量分别在 13~17 GPa 和 5~13 GPa 范围内。

沥青油膜的荷载-位移曲线显示出不同于沥青和集料颗粒的变化趋势,具体如图 8 所示。

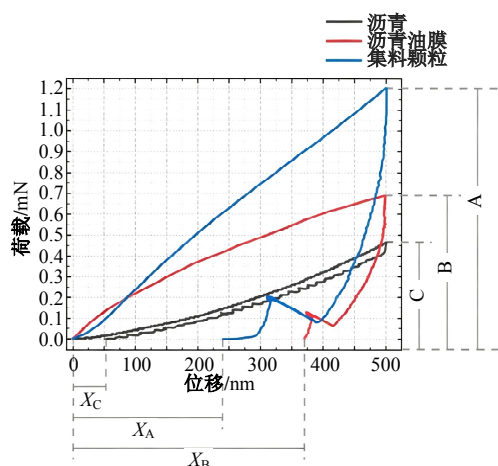


图 8 沥青混合料内荷载-位移曲线示例

Fig. 8 Example of load-displacement curves in asphalt mixtures

分别用 A、B、C 代表集料颗粒、沥青油膜和沥青。图 8 展示了加载和卸载两种应力状态下,集料颗粒、沥青油膜和沥青的荷载-位移关系。其中,沥青的荷载-位移曲线 C 不同于集料颗粒的曲线 A 和沥青油膜的曲线 B,曲线 C 在卸载后只发生了一段相对很小的塑性变形,在卸载开始阶段,由于应力松弛现象,在曲线 C 上出现了一段几乎垂直的线段,该现象符合聚合物高弹态的力学响应特征^[36]。曲线 B 在线形及变化趋势上整体与曲线 A 相同,但是最大荷载相对更小。集料颗粒、沥青油膜和沥青的最大荷载分别为 $Load_A = 1.21$ mN、 $Load_B = 0.69$ mN 和 $Load_C = 0.46$ mN, $Load_A > Load_B > Load_C$,表明沥青油膜的承载能力介于沥青与集料颗粒之间;卸载完成后,集料颗粒,沥青油膜和沥青的塑性变形分别为 $X_A = 239.63$ nm、 $X_B = 369.63$ nm 和 $X_C = 52.79$

nm, $X_B > X_A > X_C$ 。在沥青混合料中,沥青膜结构的杨氏模量随着距集料表面距离的增大而减小,沥青油膜的杨氏模量大于有效沥青膜,在力学性能上,沥青油膜是更优于有效沥青膜的结构层。从塑性变形来看,沥青油膜的刚度比集料颗粒更小,且塑性比沥青更强,集料颗粒-沥青油膜-沥青三者的力学性能特征之间存在较大差异。

3.2 结构特征

以各混合料杨氏模量热力图为依据,在各图像上,按照比例尺,通过图 9 所示的网格计数法,确定沥青油膜和有效沥青膜的平均膜厚度。

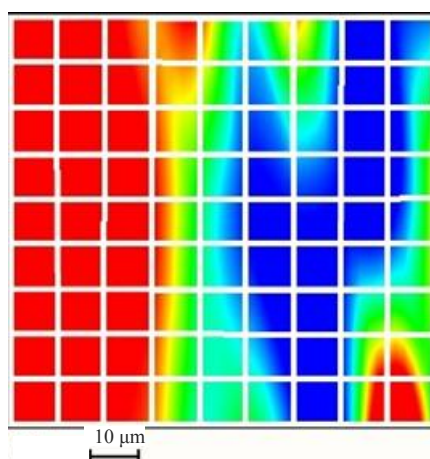


图 9 网格计数法图示

Fig. 9 Schematic diagram of grid counting method

统计显示:沥青油膜厚度为 2~7 μm,是紧贴集料表面的结构层;有效沥青膜是紧接着沥青油膜,向远离集料表面延伸出去的结构层,厚度约为 7~15 μm。

在本研究的纳米压痕试验中,共选择了 16 个测点,每个测点由 30 个压头点位组成,总计 480 个压头点位。在每种混合料中,480 个压头点位中均随机出现了荷载感应器未能采集有效数据的失效点,具体数量见表 4 统计结果。

表 4 各混合料试样总失效点个数

Table 4 Total number of failure points for each asphalt mixture specimen

AC25		AC13		OGFC13		AM13	
I	II	I	II	I	II	I	II
1	9	2	9	2	7	3	14

表 4 中统计了 4 种混合料纳米压痕试验中,失效点位置及对应失效点个数的统计结果,其中 I 对应的是沥青油膜位置,II 对应的是除沥青油膜以外的沥青部分。统计结果显示,失效点不规则

地存在于沥青混合料内,与混合料类型和集料颗粒的最大公称直径无关,普遍存在于沥青混合料纳米压痕试验中。失效点产生源于压头点位上,受外荷载向下移动的压头在移动过程中一直没有接触到被测试样表面。失效点的存在表明,在沥青油膜内普遍存在纳米级尺寸的孔隙,且孔隙的分布不受混合料类型变化影响。尽管失效点确实存在,但其发生概率较低,仅占本研究全部压头加载点的1.67%。由于本研究选点位置局限于集料颗粒之间,相互平行且紧密相接的边界位置,所以本研究中失效点位的存在概率,并不能代表沥青油膜内孔隙的存在概率,只能作为沥青油膜内有纳米级孔隙存在的证明依据。

3.3 变形特征

在压痕试验中,图8所示的荷载-位移曲线反映了集料颗粒、沥青油膜和沥青在加载-卸载过程中的力学响应特性。结合前述研究结果及图8中所展示的三者变形不同步的现象,本文提出了一种能够直观反映该特征的沥青油膜脱层模型(Delamination model),如图10所示,用以刻画沥青油膜在沥青混合料中的微观力学响应特征。

图10中演示了集料颗粒、沥青油膜和沥青这

3种材料,在受到相同的外力时,卸载完成后各部分的力学响应特征。图10(a)是沥青混合料内,集料颗粒、沥青油膜和沥青在未受到外力时的原始状态。当对沥青混合料施加均布的外力时,集料颗粒、沥青油膜和沥青同时发生如图10(b)所示的最大变形 $X_{\max}$,若在此时,沥青混合料的结构没有发生破坏,在沥青混合料内将会发生如图10(c)所示的变形。集料颗粒、沥青油膜和沥青发生的变形分别为 X_A 、 X_B 、 X_C 。图10(c)中 $X_B > X_A > X_C$,证明卸载后沥青油膜的塑性变形大于两侧紧贴的集料颗粒和沥青。沥青油膜在卸载后同时发生了弹性形变和塑性形变,其中以塑性变形为主,绝大部分的变形无法像外层沥青一样完全恢复,也难以像集料颗粒那样通过高刚度抵抗变形,从而导致沥青胶浆从集料颗粒表面剥落,进而引发路面病。尽管沥青与沥青油膜的变形量不同,但由于沥青本身延展性好,且沥青油膜与远离集料颗粒表面的有效沥青膜之间没有明显的分界线,因此沥青油膜会与沥青胶浆一起从集料颗粒表面剥落。沥青油膜与相邻部分在力学响应上的区别,是沥青胶浆剥落现象的根本原因。正是由于沥青油膜的低刚度、高塑性变形特性,使其成为沥青混合料中的薄弱环节之一。

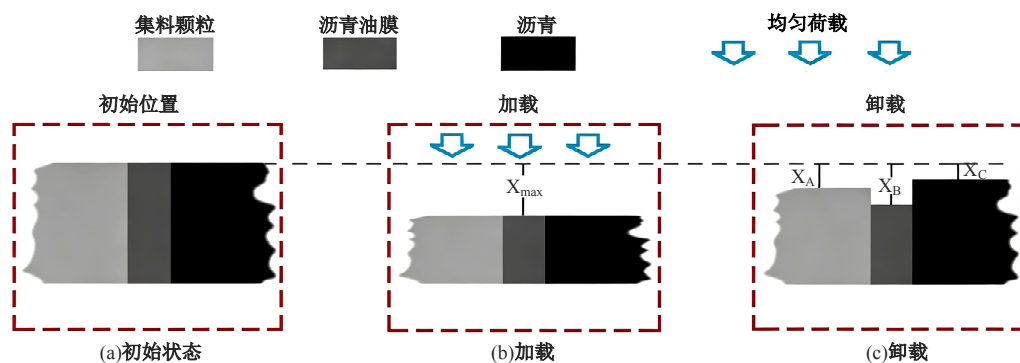


图10 脱层模型

Fig. 10 Delamination model

4 结束语

本研究以AC-25、AC-13、AM-13和OGFC-13四类沥青混合料为研究对象,通过纳米压痕试验,系统地探究了沥青油膜的微观力学特性及其结构特征。研究结果表明,沥青混合料中普遍存在两层膜状结构:靠近集料表面的是沥青油膜,其杨氏模量为13~17 GPa,厚度为2~7 μm ;外侧为有效沥青膜,杨氏模量为5~13 GPa,厚度为7~15 μm 。图像识别中,这两层分别主要表现为黄

色和绿色区域。研究还发现,在沥青混合料内,微观尺度孔隙普遍存在于除集料颗粒以外的部分中,沥青油膜中也存在纳米级孔隙,且孔隙分布具有普遍性,在各类混合料之间无明显分布规律。在沥青混合料内,沥青油膜作为连接集料颗粒与沥青的关键结构层,刚度低于集料颗粒但塑性高于沥青。这表明沥青油膜的承载能力有限,抗变形能力较差,且缺乏弹性材料的变形恢复能力。沥青油膜主要发生塑性变形和一部分占比相对较

小的弹性变形。与大多数学者提出的,孔隙是削弱沥青基质结构的主要因素不同,本研究的孔隙探测结果表明,纳米级孔隙不仅广泛存在于沥青油膜中,且在集料颗粒及沥青油膜以外的区域分布更为显著。这一发现为进一步理解沥青混合料的微观结构及其力学行为提供了新的视角。综合以上沥青混合料的微观力学响应特征,本研究建立的脱层模型揭示了,在均布外荷载作用下,沥青油膜相对于集料颗粒,塑性变形更大,刚度更小,导致其在加载卸载循环中,从集料颗粒表面剥落的病害机理。结果表明,沥青油膜的力学响应特征(如较低的杨氏模量和显著的塑性变形)是其在沥青混合料中成为薄弱环节的根本原因。

参考文献:

- [1] Craus J, Ishai I, Sides A. Some physico-chemical aspects of the effect and the role of the filler in bituminous paving mixtures[J]. Asphalt Paving Technol, 1978, 47:558-588.
- [2] National Center for Asphalt Technology. Asphalt film thickness debunked[EB/OL]. [2025-04-26]. <https://www.eng.auburn.edu/research/centers/ncat/newsroom/2017-spring/film-thickness.html>.
- [3] 吕得保, 刘寒冰, 关长禄. 沥青混合料的集料比表面积确定方法的研究[J]. 公路交通科技, 2011(5): 28-32.
Lü De-bao, Liu Han-bing, Guan Chang-lu. Study on ascertaining specific surface area of asphalt mixture aggregate[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2011(5): 28-32.
- [4] 何娟, 张京锋. 沥青混合料沥青膜厚度计算方法之维姆模型修正[J]. 广州大学学报: 自然科学版, 2010, 9(2): 68-71.
He Juan, Zhang Jing-feng. Revise of hveem model and the optimum asphalt film thickness of asphalt mixture[J]. Journal of Guangzhou University(Natural Science Edition), 2010, 9(2): 68-71.
- [5] Zhang Y, Chen H, Xiao P, et al. Investigation of average asphalt film thickness of dense graded asphalt mixtures with compaction effects[J]. Construction and Building Materials, 2022, 326: No. 126696.
- [6] 侯芸, 魏道新, 田波, 等. 沥青混合料油膜厚度计算方法[J]. 交通运输工程学报, 2007(4): 58-62.
Hou Yun, Wei Dao-xin, Tian Bo, et al. Calculation method of asphalt film thickness in mixture[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2007(4): 58-62.
- [7] Radovski B. Analytical formulas for film thickness in compacted asphalt mixture[J]. Transportation Research Record, 2003, 1829(1): 26-32.
- [8] 成志强, 陈先勇, 陈辉强, 等. RAP中有效沥青膜厚度测定[J]. 重庆交通大学学报: 自然科学版, 2012(6): 1149-1153, 1161.
Cheng Zhi-qiang, Chen Xian-yong, Chen Hun-qiang, et al. Thickness testing of effective asphalt film in RAP[J]. Journal of Chong Qing Jiaotong University(Natural Science), 2012(6): 1149-1153, 1161.
- [9] Nanjgowda V H, Silva F, Sousa J B, et al. Forensic approach to predict film thickness of reacted and activated rubber(RARX) modified asphalt mixtures[J]. Road Materials and Pavement Design, 2020, 21(Sup. 1): 19-36.
- [10] Huurman M. Lifetime optimisation tool(LOT), main report 7-07-170-1[R]. Delft: Delft University of Technology, Laboratory of Road and Railway Engineering, 2008.
- [11] Al-Khateeb G G. Conceptualizing the asphalt film thickness to investigate the Superpave VMA criteria[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2018, 19(11): 957-965.
- [12] Dong M S, Sun W, Li L L, et al. Effect of asphalt film thickness on shear mechanical properties of asphalt-aggregate interface[J]. Construction and Building Materials, 2020, 263: No. 120208.
- [13] de Rezende L R, Kommidi S R, Kim Y R, et al. Strain sweep fatigue testing of sand asphalt mortar to investigate the effects of sample geometry, binder film thickness, and testing temperature[J]. Transportation Research Record, 2021, 2675(10): 516-529.
- [14] Kandhal P S, Chakraborty S. Effect of asphalt film thickness on short-and long-term aging of asphalt paving mixtures[J]. Transportation Research Record, 1996, 1535(1): 83-90.
- [15] Zhai H, Bahia H U, Erickson S. Effect of film thickness on rheological behavior of asphalt binders[J]. Transportation Research Record, 2000, 1728(1): 7-14.
- [16] Yi Y, Jiang Y, Tian T, et al. Research on the optimum asphalt film thickness of asphalt mixtures and its influence on the pavement performance based on the CT and Blaine method[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2022, 34(12): No. 04022324.
- [17] 于辉. 沥青膜厚度对沥青混合料性能影响的研究[D]. 长春: 吉林大学交通学院, 2007.

- Yu Hui. Research on influence of thickness of asphaltum to the performance of asphaltum mixture[D]. Changchun: College of Transportation, Jilin University, 2007.
- [18] Sukkari A, Al-Khateeb G G, Ziada W, et al. Estimating asphalt film thickness in asphalt mixtures using microscopy to further enhance the performance of UAE roadways[C]//The 18th International Road Federation World Meeting & Exhibition, Dubai, UAE, 2021: 87-96.
- [19] Karim F, Hussain J. Assessing the asphalt binder film thickness in recycled asphalt mixtures using micro-level techniques[J]. *Materials*, 2021, 14(24): No. 7891.
- [20] Karim F, Hussain J, Hafeez I. Estimating the asphalt binder film thickness using scanning electron microscope and energy dispersive X-ray spectroscopy[J]. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2021 (1):No. 8894970.
- [21] Vieira L H, de Souza T D, Enriquez-León A J, et al. Experimental testing and analysis procedure to determine the apparent film thickness of asphalt binder in fine aggregate matrix mixtures[J]. *Transportation Research Record*, 2021, 2675(7): 166-179.
- [22] Jiang J, Zhao Y, Lu G, et al. Effect of binder film distribution on the fatigue characteristics of asphalt binder/filler composite based on image analysis method[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 260: No. 119876.
- [23] Jiang J, Ni F, Gu X, et al. Evaluation of aggregate packing based on thickness distribution of asphalt binder, mastic and mortar within asphalt mixtures using multiscale methods[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 222: 717-730.
- [24] Jiang J, Li Y, Zhang Y, et al. Distribution of mortar film thickness and its relationship to mixture cracking resistance[J]. *International Journal of Pavement Engineering*, 2022, 23(3): 824-833.
- [25] Al-Khateeb G G, Sukkari A, Zeiada W, et al. Microscopy-based approach for measuring asphalt film thickness and its impact on hot-mix asphalt performance[J]. *Case Studies in Construction Materials*, 2023, 18: No. e01711.
- [26] Elseifi M A, Al-Qadi I L, Yang S H, et al. Validity of asphalt binder film thickness concept in hot-mix asphalt[J]. *Transportation Research Record*, 2008, 2057(1): 37-45.
- [27] Hinrichsen J A, Heggen J. Minimum voids in mineral aggregate in hot-mix asphalt based on gradation and volumetric properties[J]. *Transportation Research Record*, 1996, 1545(1): 75-79.
- [28] Al-Khateeb G G, Shenoy A. Mixture-property-independent asphalt film thickness model[J]. *Materials Today Communications*, 2019, 19: 482-486.
- [29] 程永喜. 开放量子点系统中的近藤效应及量子输运[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2022: 1-20.
- [30] Zhu X, Yuan Y, Li L, et al. Identification of interfacial transition zone in asphalt concrete based on nano-scale metrology techniques[J]. *Materials & Design*, 2017, 129: 91-102.
- [31] JTG F40-2004. 公路沥青路面施工技术规范[S].
- [32] 交通部公路科学研究所. JTG E42-2005. 公路工程集料试验规程[S].
- [33] JTG E20-2011. 公路工程沥青及沥青混合料试验规程[S].
- [34] Oliver W C, Pharr G M. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments[J]. *Journal of Materials Research*, 1992, 7(6): 1564-1583.
- [35] Zhao L, Zhang J, Pfetzing J, et al. Depth-sensing ductile and brittle deformation in 3C-SiC under Berkovich nanoindentation[J]. *Materials and Design*, 2021, 197: No. 109223.
- [36] 张峥编. 工程材料的力学性能[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2022: 132-140.