

文章编号:1007-9629(2023)08-0906-08

碎石封层的集料嵌挤状态与抗剥落性

马子业^{1,2}, 汪海年^{1,2,*}, 张炎棣¹, 李元乐¹, 惠 冰¹

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064;

2. 长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710064)

摘要:采用自开发算法和自主研发的轮式加速加载磨耗仪,研究了集料形态对碎石封层嵌挤结构与抗剥落性的影响.结果表明:80.7%的针状集料以平铺形式存在,对碎石封层嵌挤结构的影响较小,为保证良好的抗剥落性,其含量不宜高于16%;片状集料多以平铺或交叠形式存在,易引起相邻集料的移位和交叠,对集料嵌入率和保持能力不利,含量应控制在10%以下;当针状与片状集料同时存在时,碎石封层经历磨耗后的质量损失增加约2%;集料嵌入面积百分率兼具良好的稳定性与敏感性,是评价碎石封层抗剥落性的理想指标.

关键词:碎石封层;集料形态;嵌挤结构;抗剥落性;响应面分析

中图分类号:U418.6

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2023.08.011

Aggregate Embedding State and Spalling Resistance of Pavement Chip Seal

MA Ziyi^{1,2}, WANG Hainian^{1,2,*}, ZHANG Yandi¹, LI Yuanle¹, HUI Bing¹

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China;

2. Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: The effect of aggregate shape on the embedding structure and spalling resistance of chip seals was investigated using self-developed algorithms and a wheeled accelerated loading wear tester. The results show that 80.7% of elongated aggregates are distributed tiled, whose negative effect on the aggregate embedding is insignificant. To ensure good spalling resistance, the content of elongated aggregate should not be higher than 16%. The flat aggregate is mostly distributed tiled or vertically, resulting in displacement or spalling of adjacent aggregates, which is detrimental to the aggregate embedment and retention of chip seals. It is recommended that the flat aggregate content be kept below 10%. In addition, the mass loss of the chip seal after abrasion increases by approximately 2% when flat aggregate and elongated aggregate are both present. The percentage of aggregate embedding area is an ideal indicator for evaluating the performance of chip seals, as it combines good stability and sensitivity.

Key words: chip seal; aggregate shape; embedding structure; spalling resistance; response surface methodology

作为一种有效的沥青道路养护策略,碎石封层可以修复裂缝、磨损、车辙等路面早期病害^[1].集料在碎石封层中的质量占比达80%以上,当形态不良的集料(针片状颗粒)含量较高时,碎石封层易出现不

稳定的嵌挤结构,引发集料松散剥落、表面功能快速衰减等问题^[2].国内外规范对碎石封层的集料形态控制标准尚不统一,ASTM D1139/D1139M—2009《Standard specification for aggregate for single or

收稿日期:2022-10-10; 修订日期:2023-01-31

基金项目:“十四五”国家重点研发计划项目(2021YFB2601000);国家自然科学基金资助项目(52078048);中央高校基本科研业务费专项资金—长安大学优秀博士学位论文培育资助项目(300102212708)

第一作者:马子业(1995—),男,河北廊坊人,长安大学博士生.E-mail:zyrna@chd.edu.cn

通讯作者:汪海年(1977—),男,江苏涟水人,长安大学教授,博士生导师,博士.E-mail:wanghnn@chd.edu.cn

multiple bituminous surface treatments》规定碎石封层中针片状集料含量不高于10%,片状指数小于25%,中国各地规范^[3-4]规定针片状集料最大含量为10%~18%不等.上述规范的差异性为碎石封层的设计评价带来了一定的困扰.

碎石封层中集料的分布形式和嵌入状态与其结构稳定性密切相关^[5-6].国际上碎石封层多采用McLeod经验设计方法^[7],将集料种类、形态和级配纳入考虑范畴.工程实践表明,当碎石封层中集料嵌入率不足50%时,易导致集料松散剥落;当集料嵌入率高于70%时,易引起泛油现象^[8].已有学者研究了碎石封层的性能指标、服役寿命和经济效益^[9],但仍缺乏量化评价集料嵌挤状态的手段,集料形态与碎石封层抗剥落性的关系尚不明确.

本文开发了基于断面图像的集料嵌入率量化算法,基于自主研发的轮式加速加载磨损仪研究了集料形态对碎石封层中集料嵌挤状态及抗剥落性的影响规律,以期对碎石封层的规范优化与性能评价提供一定的借鉴.

1 原材料与集料形态分类

1.1 原材料

选择SBS改性沥青与石灰岩集料作为原材料,其基础技术指标分别见表1、2.为排除集料粒径、级配等因素的干扰,采用单一粒径集料(9~12 mm)制备中粒式单层碎石封层.

表1 SBS改性沥青的基础技术指标
Table 1 Basic technical indexes of SBS modified asphalt

Index	Tested	Standard
Penetration(25 °C)/(0.1 mm)	67.7	60~80
Softening point/°C	71.8	≥55
Ductility(5 °C)/cm	43.2	≥30
Flash point/°C	328	≥230

表2 石灰岩集料的基础技术指标
Table 2 Basic technical indexes of limestone aggregate

Index	Tested	Standard
Density/(g·cm ⁻³)	2.691	
Crushing value(by mass)/%	13.28	≤28
Los Angeles abrasion value/%	16.31	≤30

1.2 集料形态分类标准

参照JTG E42—2005《公路工程集料试验规程》,采用游标卡尺测距法,按照“针片度小于1/3”的标准对集料进行初选;随后通过集料图像测量系统(AIMS-II)进一步检验集料形态,根据其三维形状特征分为棱角状集料(AA)、片状集料(AF)和针状集

料(AE).如图1所示,棱角状集料的针片度(K)大于1/3(区域①),片状和针状集料的针片度均小于1/3,其中片状集料的细长度大于0.5、扁平度小于0.5(区域②),针状集料的细长度小于0.5、扁平度大于0.5(区域③).棱角状集料的球度(Q)分布范围为0.6~0.9,三维形状接近于球体,球度等级为“高”;片状集料的球度分布范围为0.5~0.7,颗粒球体特征减弱,球度等级为“中”和“高”;针状集料的球度值均低于0.5,颗粒形状的不规则程度最高,球度等级为“低”.

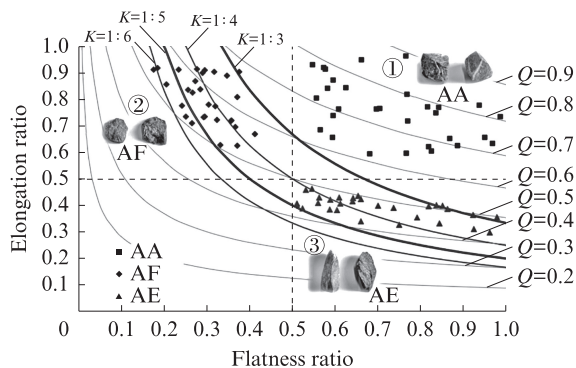


图1 基于AIMS-II的集料三维形状特征分类

Fig.1 Classification of 3D shape features of aggregates based on AIMS-II

2 碎石封层试件设计

2.1 集料组合试验方案

响应面分析法是一种基于统计学的多因素试验设计优化方法,可直观显示各影响因素间的交互作用^[10-11].采用Design-Expert 12.0.6软件,将集料种类作为试验控制变量,基于单纯形格点混料设计原理设计10个试验组,每组作平行试验3次.棱角状集料的占比(质量分数)为70%~100%,片状集料和针状集料的占比为0%~30%,各类集料总和均为100%.图2为各测点的空间分布类型,包括3个顶点(vertex),3个边线点(centEdge),3个轴向扩展点(axialCB)和1个中心点(center),其中扩展轴向点为各顶点到中心点距离的一半.

2.2 碎石封层试件制备

采用McLeod经验设计方法,假设集料在沥青中的嵌入率为70%,集料覆盖率为100%,按照式(1)~(3)分别计算得到平均最小层厚(A_{LD})为8.65 mm;集料的最佳洒布量为9.84 kg/m²,取10.00 kg/m²;沥青的最佳洒布量为1.78 kg/m²,取1.80 kg/m².根据JTG 5142—2019《公路沥青路面养护技术规范》,扫刷试验和覆盖率试验结果表明,当集料洒布量为10.00 kg/m²,沥青洒布量为1.80 kg/m²时,碎石封层

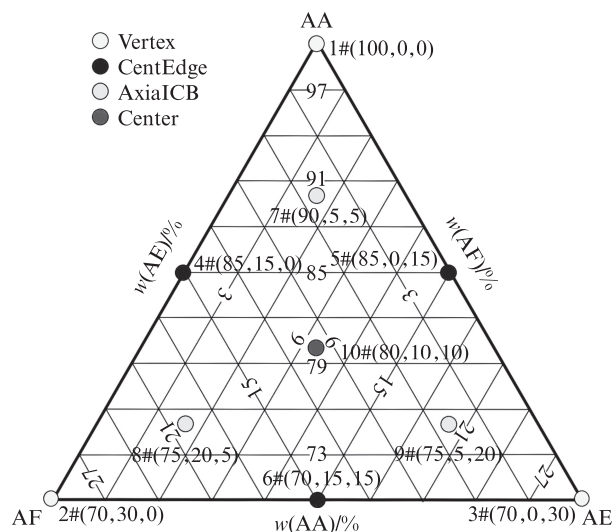


图2 单纯形格点混料设计原理

Fig. 2 Design principles of simplex lattice mixing

试件的碎石剥落率小于2%(室温扫刷15 min),集料覆盖率大于97%,这验证了材料用量选择的合理性.

$$A_{LD} = \frac{M}{1.139 + 0.0115 \times F_1} \quad (1)$$

$$C = (1 - 0.4 \times V) \times A_{LD} \times G \times E \quad (2)$$

$$A_c = (0.4 \times A_{LD} \times V \times T + S + A) \times \rho \quad (3)$$

式中: M 为集料的中值粒径,取11.35 mm; F_1 为集料片状指数,取15%; C 为集料的洒布量, kg/m^2 ; V 为集料的松装孔隙率; G 为集料的毛体积密度; E 为碎石损失系数,取1.05; A_c 为沥青的洒布量, kg/m^2 ; T 为

交通量修正系数,取0.83(按照交通量6 832换算); S 为路面状况修正系数,取0.1; A 为集料吸收系数,取1.3%; ρ 为沥青密度,取 $1.03 \text{ kg}/\text{m}^3$.

碎石封层试件的制备流程为:首先,将集料洗净烘干,加热至 150°C 备用,SBS改性沥青加热至 160°C 备用;然后,按照最佳洒布量,在AC-13沥青混合料车辙板($300 \text{ mm} \times 300 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$)上同步摊铺沥青与集料,用5 kg空心钢桶滚动粗平,随后用轮碾仪碾压20次;最后,将试件置于 60°C 温度下养生1 h之后,再常温养生1 d即完成试件的制备.

3 集料嵌挤状态评价

3.1 集料嵌挤状态测试方法

集料颗粒嵌入沥青层的百分比是影响碎石封层耐久性的重要因素.本文设计了基于断面图像的集料嵌入率测试方法,试件制备流程为:首先,向PVC板方槽($150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$)中先后洒布深色树脂胶(模拟沥青胶结料,洒布量按沥青用量同等换算)和100颗集料样品;然后,用胶轮碾压20遍,使集料达到最终稳定状态;接着,待深色树脂胶表面固化后,灌注浅色树脂胶至10 mm高处,便于识别集料与沥青的临界点;最后,待试件完全固化后将其切割为10等份,并采集碎石封层断面图像,基于Matlab 2018b编译环境逐颗识别集料的嵌挤状态,如图3所示.

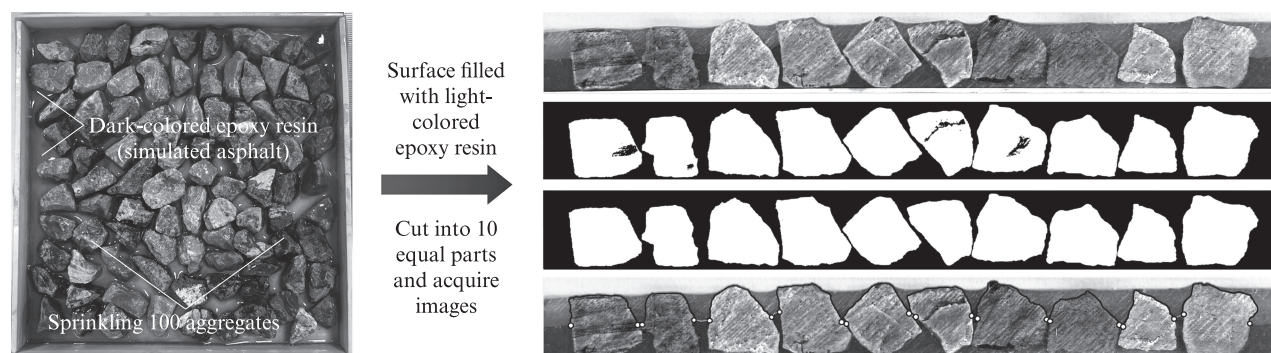


图3 碎石封层断面图像的处理流程

Fig. 3 Processing flow for chip seal section images

识别集料嵌挤状态的具体步骤如下:(1)首先对图像进行锐化,凸显集料和沥青的边界区域.(2)将锐化后的图像转换为灰度图像,采用中值滤波算法做降噪处理后,将图像转换为黑白图像,并提取集料形状特征.(3)采用腐蚀膨胀算法,清除图像表面的非边缘细小点,基于分水岭算法分离出集料图像.(4)基于regionprops函数计算集料的边界像素坐标,并确定沥青裹附集料边缘的最高点,该点是计算集料嵌入

率的重要依据.

本文开发了3种集料嵌入率量化算法,可从嵌入深度、周长和面积角度反映集料在碎石封层中的嵌挤状态,计算原理如图4所示.

(1)嵌入深度:以集料最底端(y 坐标最低值)为基准点,以集料截面两侧沥青裹附的最高点至基准点的平均高度作为集料嵌入深度(h_b),集料高度(h_a)为集料 y 坐标最大值至基准点的距离,集料嵌入深度

百分率(P_h)由式(4)计算.

(2)嵌入周长:首先计算集料周长(C_a),识别并计算集料嵌入沥青部分的边界长度(C_b),由式(5)计算集料嵌入周长百分率(P_c).

(3)嵌入面积:连接集料截面两侧沥青裹附的最高点,将连接线底部区域作为集料的嵌入部分,面积记为 A_b ,整颗集料的面积记为 A_a ,集料嵌入面积百分比(P_A)由式(6)计算.

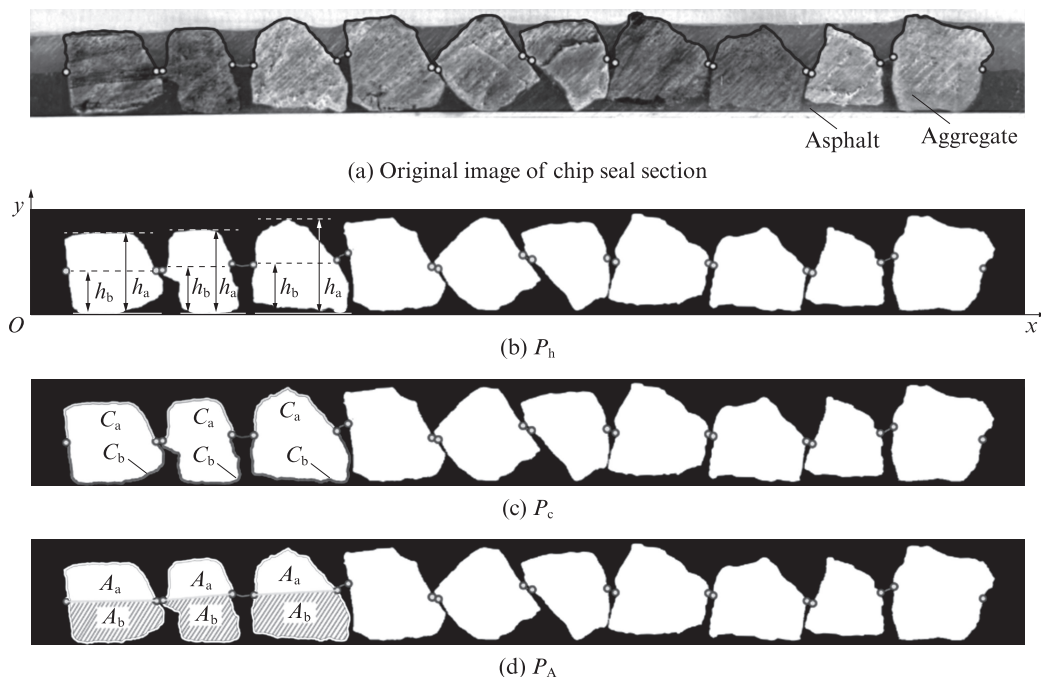


图4 集料嵌入状态计算方法及原理

Fig. 4 Calculation methods of aggregate embedding state in chip seals

$$P_h = \frac{\sum_{i=0} \frac{h_{b(i)}}{h_{a(i)}} \times 100\%}{N} \quad (4)$$

$$P_c = \frac{\sum_{i=0} \frac{C_{b(i)}}{C_{a(i)}} \times 100\%}{N} \quad (5)$$

$$P_A = \frac{\sum_{i=0} \frac{A_{b(i)}}{A_{a(i)}} \times 100\%}{N} \quad (6)$$

式中: N 为断面图像中集料个数; $h_{b(i)}$ 、 $C_{b(i)}$ 、 $A_{b(i)}$ 分别为第 i 颗集料的嵌入深度(mm)、嵌入长度(mm)、嵌入面积(mm^2); $h_{a(i)}$ 、 $C_{a(i)}$ 、 $A_{a(i)}$ 分别为第 i 颗集料的高度(mm)、周长(mm)、面积(mm^2).

3.2 集料嵌挤状态分析

基于响应面分析方法,得到不同集料形态组合下碎石封层的集料嵌入率,如图5所示.由图5可见:

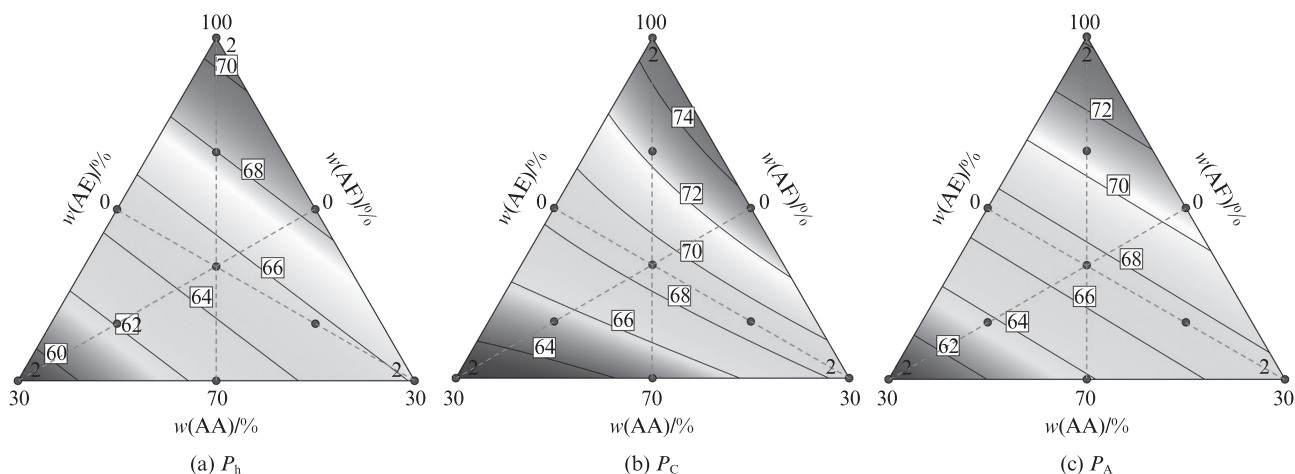


图5 碎石封层的集料嵌入率指标测试结果

Fig. 5 Test results of aggregate embedding percentage index for chip seals

(1)集料形态对嵌入率指标的影响存在一致性,即随着片状集料的增加、棱角状集料的减少,碎石封层中集料的嵌入深度、嵌入周长和嵌入面积均出现较大程度的衰减,而针状集料的含量与嵌入率水平无明显关联。

(2)当碎石封层中不存在针片状集料时,集料嵌入率指标 P_h 、 P_c 、 P_A 均在70%以上;当片状集料含量高于10.0%时,碎石封层的集料嵌入率指标的降幅在5%以上(相较于最大嵌入率)。

(3) P_c 与 P_A 的计算结果等高线图比 P_h 更加密集,表明随着集料形态的变化,集料嵌入周长和嵌入面积的改变量更大,即 P_c 与 P_A 指标对集料形态因素的敏感性高于 P_h 。

图6汇总了形状不良的集料在碎石封层中的典型分布状态。其中:38.8%的片状集料以平铺式

分布,61.2%以交叠式分布;由于自身体积较大,针状集料在封层中多为平铺式分布(占80.7%),其余为交叠式分布(占19.3%)。由图6可见:当片状集料平铺分布时,虽然其自身几乎完全被沥青裹覆,嵌入百分率大幅增加,但其占据封层的表面积相应增大,相邻集料多以不稳定的堆叠形式存在,被沥青裹覆的比例减少,导致集料在沥青中的整体嵌入率下降;当片状集料交叠分布时,其自身狭长的构造一方面使得沥青爬升高度显著降低,另一方面增加了碎石封层表面纹理的峰点数量和曲率,对抵抗行车荷载与磨耗作用不利;当针状集料平铺或交叠分布时,其断面形状与棱角状集料接近,在封层中分布相对均匀,对相邻集料的扰动较小,集料在沥青中的嵌入百分率不会出现大幅度波动,嵌挤状态相对良好。

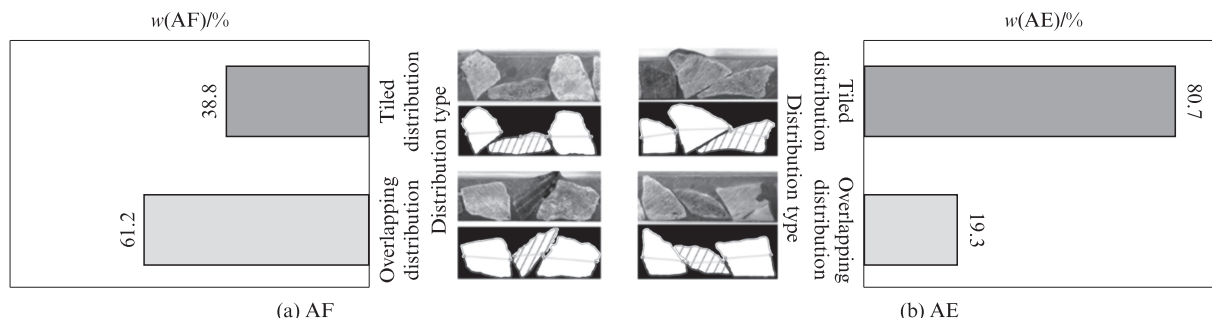


图6 片状集料和针状集料在碎石封层中的典型分布状态

Fig. 6 Typical distribution of flat aggregates and elongated aggregates in chip seals

图7为集料嵌入百分率计算指标对比。由图7可见:对于相同试件,集料嵌入率测试值的大小排序为 $P_c > P_A > P_h$; P_h 指标的测量误差最小,稳定性最好; P_c 指标的测量误差最大,这是因为碎石封层断面切割位置的选择具有随机性,集料图像边缘识别的微小误差对集料嵌入周长的干扰最大,进而引起 P_c 测量值的数据波动; P_A 的测量误差处于较低水平(误差

波动小于10%),指标兼具良好的稳定性与敏感性,是量化评价碎石封层中集料嵌挤状态的最佳方法。

4 碎石封层抗剥落性分析

4.1 室内加速剥落试验

采用课题组自主研发的MH-02型轮式加速加载磨耗仪,模拟车轮转动过程中的磨光与磨耗作用。如图8所示,该磨耗仪主要由操作控制平台、自驱自锁车轮加速磨耗平台、双电机驱动系统、总电控制系统与喷淋系统组成。

磨耗平台配置三联排标准加压轮胎,并设置自驱自锁程序,试件尺寸为300 mm×300 mm×50 mm,喷淋量为20 mL/min,车轮中心距为300 mm,接地压力为0.9 MPa,车轮转速为35 r/min,磨耗频率为30次/min。测试时,将3个标准试件平行放置于加速磨耗平台,轮胎与试件表面紧密接触并做往复运动,轮胎通过配重与自转作用对封层表面进行加速磨耗,每磨耗500次测试1次试件的质量,按式(7)计算不同磨耗阶段下碎石封层的集料保持率(R_a)。

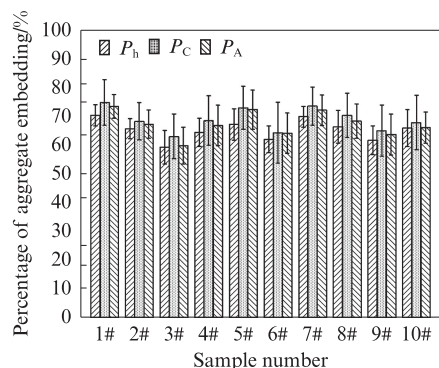


图7 集料嵌入百分率计算指标对比

Fig. 7 Comparison of indicators for aggregate embedded percentage

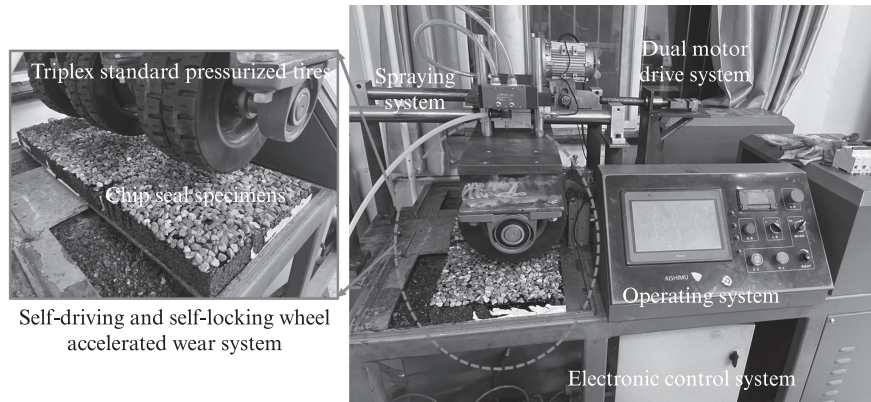


图8 MH-02型轮式加速加载磨耗仪

Fig. 8 MH-02 wheeled accelerated loading wear tester

$$R_a = (1 - \frac{m_0 - m_a}{m_0}) \times 100\% \quad (7)$$

式中: m_0 为碎石封层试件的初始质量, kg; m_a 为碎石封层试件磨耗后的剩余质量, kg.

为验证自主设计的室内加速剥落试验的有效性, 调研汇总了碎石封层试件经历磨耗后的集料剥

落状态, 如图9所示. 在本研究采用的加速磨耗4 000次的试验周期内, 试件的损伤形式主要表现为集料表面损耗和沥青—集料间黏结失效, 未出现泛油、集料压碎等其他病害, 这表明该试验设计方案及参数设置可较好地模拟碎石封层发生集料剥落病害的过程.

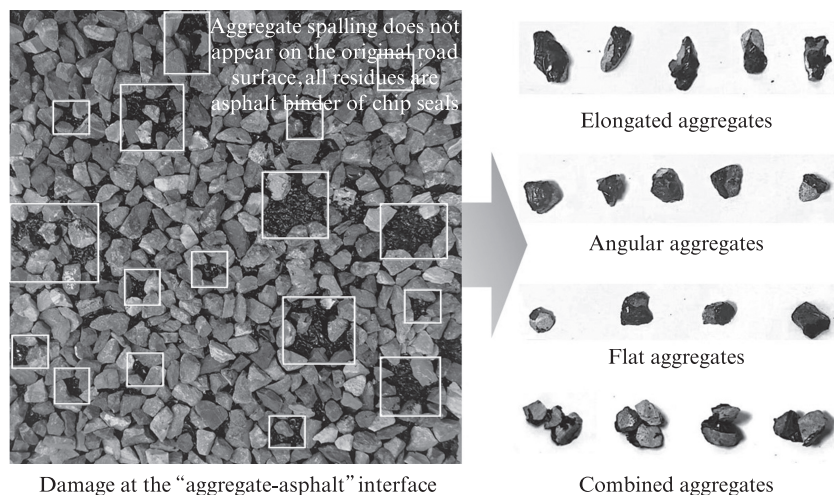


图9 碎石封层试件经历磨耗后的集料剥落状态

Fig. 9 Aggregate spalling state of chip seal specimens after wear

4.2 集料保持率分析

图10为不同磨耗次数下碎石封层的集料保持性能. 由图10可见:

(1) 经历短期加速磨耗(1 000次)后, 片状集料含量较高碎石封层的剥落现象最为明显, 当片状集料含量达30%时, 碎石封层的质量损失率超过8%. 这是由于片状集料的平铺式和交叠式分布易导致其自身或相邻集料的不良嵌入状态, 在荷载作用下碎石封层产生竖向位移的同时, 嵌挤结构不良的位置处集料—沥青的黏结作用被大幅削弱, 处于弱约束状态(低嵌入率)的集料在竖向位移和水平位移的综合作用下发生偏转, 偏转变形累积到一定程度后引起

掉粒. 短期磨耗后, 针状集料对碎石封层的嵌挤状态无明显负面影响, 集料保持率始终处于较高水平, 集料损失率在3%以内.

(2) 当加速磨耗次数达到3 000时, 富含针状集料碎石封层的集料保持率大幅降低, 这与针状集料的不规则棱角和交叠式分布有关. 当针状集料和片状集料同时存在时, 碎石封层的抗剥落性能衰减趋势会被放大, R_a 值在原有基础上再降低约2%. 此外, 当碎石封层中不含针状集料和片状集料时, 在磨耗后期的集料保持率始终保持在90%以上.

图11为集料形状单因素对碎石封层集料保持性能的影响. 由图11可见, 片状集料对碎石封层

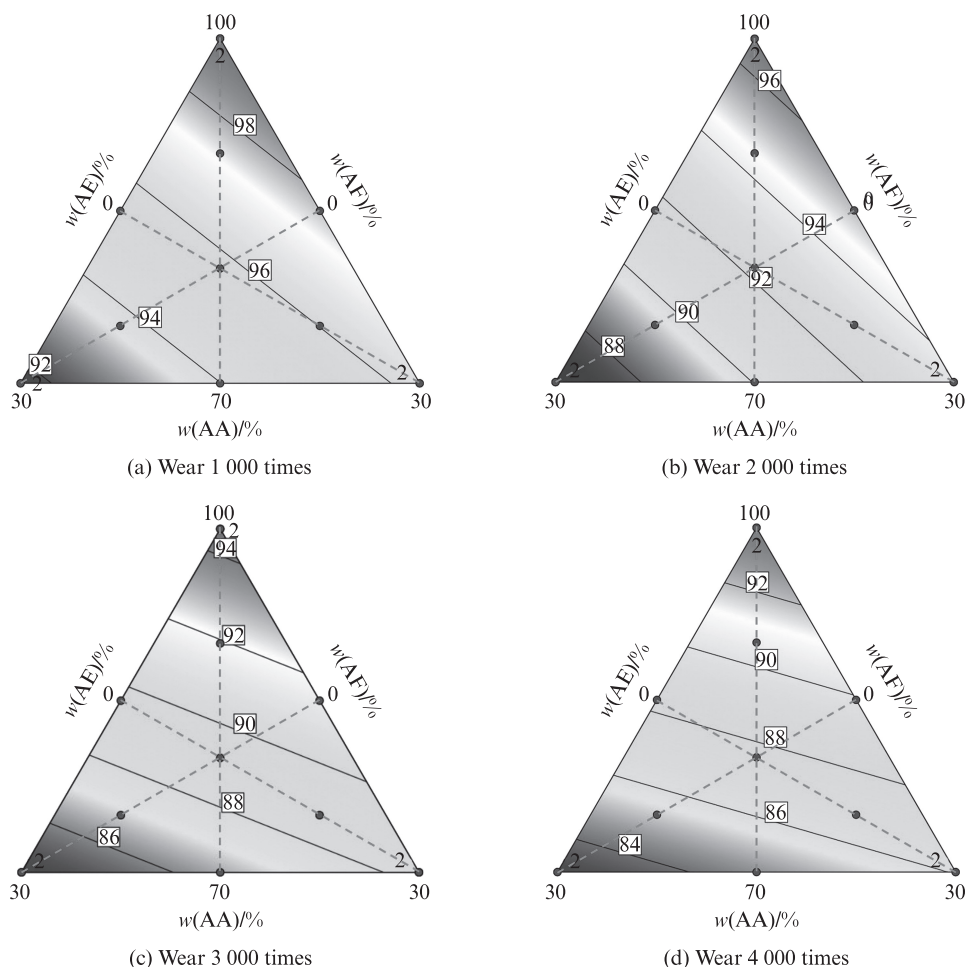


图10 不同磨损次数下碎石封层的集料保持性能

Fig. 10 Aggregate retention in chip seals at different times of wear

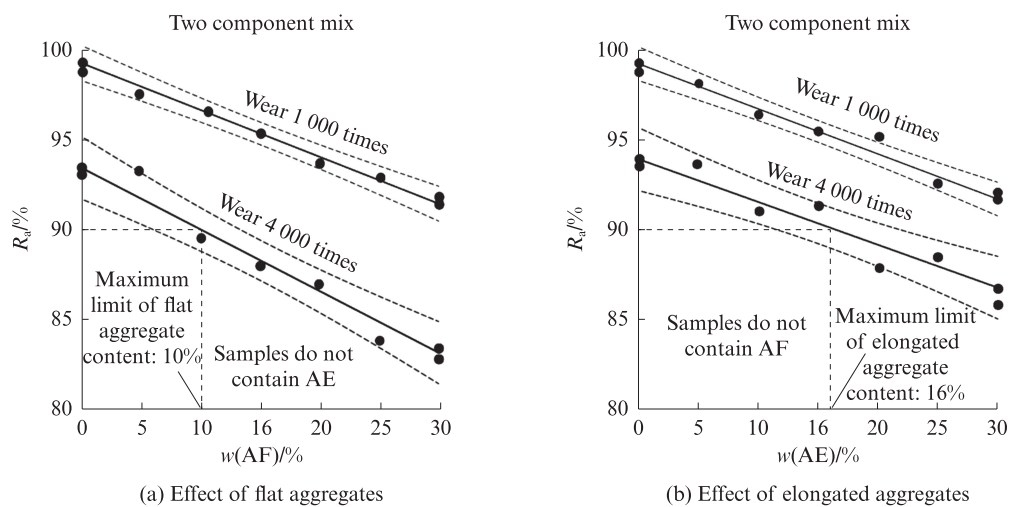


图11 集料形状单因素对碎石封层集料保持性能的影响

Fig. 11 Effect of single factor of aggregate shape on aggregate retention of chip seals

集料保持性能的负面影响大于针状集料,为保证碎石封层的长期耐久性,以磨损后期“ $R_a \geq 90\%$ ”作为碎石封层抗剥落性能的控制标准,片状集料的含量应控制在10%以下,针状集料的含量不宜超过16%。

为验证3.1提出的集料嵌入率量化评价指标的合理性与适用性,建立了 P_b 、 P_c 、 P_a 与碎石封层集料保持能力的关联,如图12所示.由图12可见:集料嵌入率评价指标与集料保持率均为线性正相关关系,拟合度 R^2 值分别为0.981、0.990和0.983,这表明碎

石封层中集料的嵌挤状态显著影响着其耐久性;线性拟合曲线的斜率大小排序为: $P_A > P_C > P_h$,这表明 P_A 与碎石封层集料保持能力的敏感性最高,更适用于评价和预测碎石封层的抗剥落性能。

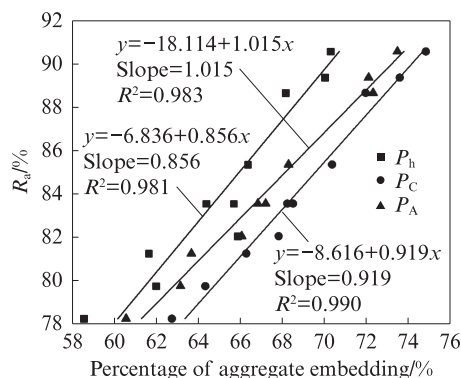


图12 集料嵌入率与集料保持能力的关联性

Fig. 12 Correlation between the percentage of aggregate embedding and the aggregate retention

4 结论

(1)针状集料对碎石封层嵌挤结构的负面影响较小,为保证长期抗剥落性能,其含量不宜高于16%;片状集料多以平铺或交叠形式存在,易引起相邻集料的移位和交叠,当片状集料含量高于10%时,集料嵌入率的降幅大于5%,建议将片状集料含量控制在10%以下。

(2)本文开发的基于断面图像的集料嵌入率量化算法可以客观评价集料的嵌挤状态;集料嵌入深度百分率的测量误差最小,集料嵌入周长百分率与集料嵌入面积百分率对集料形状因素的敏感程度高于集料嵌入深度百分率,集料嵌入面积百分率指标兼具良好的稳定性与敏感性。

(3)自研发的MH-02型轮式加速加载磨耗仪可反映碎石封层的抗剥落性能;片状集料对碎石封层的集料保持能力不利,短期磨耗后封层质量损失率超过8%;当针状与片状集料同时存在时,碎石封层经历磨耗后的质量损失增加约2%。集料嵌入面积百分率与碎石封层集料保持能力的敏感性最高,更适用于评价和预测碎石封层的抗剥落性能。

参考文献:

[1] 于华洋,马涛,王大为,等.中国路面工程学术研究综述·2020[J].中国公路学报,2020,33(10):1-66.

YU Huayang, MA Tao, WANG Dawei, et al. Review on China's pavement engineering research·2020[J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(10): 1-66. (in Chinese)

[2] SCOTT S. Manual for emulsion-based chip seals for pavement preservation[M]. Washington, DC: Transportation Research Board, 2011.

[3] 吕宁生.公路同步碎石封层设计与施工技术规范[M].上海:同济大学出版社,2015:1-23.

LÜ Ningsheng. Design and construction specification of synchronous chip seal in highway engineering[M]. Shanghai: Tongji University Press, 2015: 1-23. (in Chinese)

[4] 安徽省质量技术监督局.公路沥青路面同步碎石封层施工技术规范:DB34/T 2615—2016[S].合肥:合肥工业大学出版社,2016:1-14.

Anhui Bureau of Quality and Technical Supervision. Technical specification for construction of synchronous chip seal of highway asphalt pavement: DB34/T 2615-2016 [S]. Hefei: Hefei University of Technology Press, 2016: 1-14. (in Chinese)

[5] ZAMAN M, GRANSBERG D, BULUT R, et al. Develop draft chip seal cover aggregate specification based on aims angularity, shape and texture test results[R]. Oklahoma: Office of Research Services of University of Oklahoma, 2013: 1-105.

[6] 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 Zhixiang, LI Jiange, ZHANG Zhengqi. Effects of aggregate morphological characteristics on adhesion of aggregate-asphalt and its moisture stability[J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(5): 1039-1047. (in Chinese)

[7] MCLEOD N W. A general method of design for seal coats and surface treatments[C]//Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists. Oregon: Association of Asphalt Paving Technologists, 1969: 537-630.

[8] ADAMS J, KIM Y R. Mean profile depth analysis of field and laboratory traffic-loaded chip seal surface treatments[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2014, 15(7): 645-656.

[9] HAIDER S W, BOZ I, KUMBARGER Y, et al. Development of performance related specifications for chip seal treatments[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2021, 22(3): 1-10.

[10] 张冰冰,刘杰,阿肯江·托呼提,等.基于响应面法的聚丙烯高强土工格室拉伸性能[J].建筑材料学报,2021,24(6):1348-1360.

ZHANG Bingbing, LIU Jie, AKENJIANG Tuohuti, et al. Tensile properties of polypropylene high strength geocell based on response surface method[J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(6): 1348-1360. (in Chinese)

[11] MA Z Y, WANG H N, HUI B, et al. Optimal design of fresh sand fog seal mortar using response surface methodology (RSM): Towards to its workability and rheological properties[J]. Construction and Building Materials, 2022, 340: 127638.