

文章编号:1671-8879(2016)05-0016-06

水泥乳化沥青胶浆与 RAP 粘附性的量化评价

王振军¹, 安等等¹, 刘 亮^{1,2}, 王红飞¹, 张 倩¹

(1. 长安大学 材料科学与工程学院, 陕西 西安 710061; 2. 浙江省交通运输科学研究院, 浙江 杭州 311305)

摘 要:冷再生乳化沥青混合料中存在水泥乳化沥青胶浆对回收沥青路面材料(RAP)粘附不均匀以及浸水易剥落等问题,直接影响了混合料的水稳定性等路用性能。国内外对水泥乳化沥青胶浆与 RAP 粘附程度多采用定性评价,缺乏便于操作且能够精确量化的测试方法。利用 HCl 溶液侵蚀水泥乳化沥青胶浆薄层模拟试验,运用数字图像技术对回收沥青路面材料(RAP)进行二维形状特征提取,提出了 RAP 表面积计算模型;同时设计了不同形状指数的 RAP 与水泥乳化沥青胶浆粘附性试验,并对粘附界面的胶浆用 HCl 溶液进行侵蚀试验,以 20 min 内 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的释放量表征 RAP 表面胶浆层的抗盐酸侵蚀性和粘附均匀性。研究表明: HCl 对水泥乳化沥青胶浆有侵蚀特性,可腐蚀胶浆中水泥的水化产物相;集料形状指数对水泥乳化沥青胶浆平均膜厚度影响不大; RAP 形状指数越大,离子释放量与粘附量的比也越大,胶浆粘附层抗盐酸侵蚀能力下降,粘附的均匀性和粘附等级变差;随着水泥与乳化沥青质量比 C/E_A 的增加,离子的释放量先减小后增大,胶浆粘附性先增大后减小;当 C/E_A 为 30% 时,离子释放量最小,粘附性最佳。

关键词:道路工程;回收沥青路面材料(RAP);水泥乳化沥青胶浆;界面粘附;量化评价

中图分类号: U411

文献标志码: A

Quantitative evaluation of interfacial adhesion between cement emulsified asphalt mastic and RAP

WANG Zhen-jun¹, AN Deng-deng¹, LIU Liang^{1,2}, WANG Hong-fei¹, ZHANG Qian¹

(1. School of Materials Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, Shaanxi, China;

2. Zhejiang Scientific Research Institute of Transport, Hangzhou 311305, Zhejiang, China)

Abstract: Cement emulsified asphalt mastic was easy to peel from the interface between mastic and reclaimed asphalt pavement (RAP) after soaking and the interfacial adhesion was not uniform in the cold reclaimed emulsified asphalt mixtures, which directly influenced the properties of the mixtures, such as water stability. Interfacial adhesion degree was usually evaluated by qualitative methods at home and abroad and easily-operated and accurately-quantified technique was desired. In this paper, HCl solution was used to erode the lamella of the cement emulsified asphalt mastic according to a simulation test. The digital image processing technology was adopted to get the two-dimension shape features of RAP. The calculation model of RAP surface area was put forward. The coating ability test was designed between different shape factors of RAP and

收稿日期:2016-05-17

基金项目:国家自然科学基金项目(50908021);福建省科技计划重点项目(2014H0017);中央高校基本科研业务费专项资金项目(310831153504,310831163113)

作者简介:王振军(1978-),男,山东潍坊人,教授,工学博士,博士后,E-mail: zjwang@chd.edu.cn。

cement emulsified asphalt mastic; and the coating interface was eroded with HCl. HCl erosion resistance and adhesion uniformity of mastic layer were expressed by the release of Ca^{2+} and Mg^{2+} within 20 minutes. The results show that the HCl has erosion characteristics for cement emulsified asphalt mastic and it can corrode cement hydrates. Aggregate shape factor has little influence on the average film thickness of cement emulsified asphalt mastic. The larger the RAP shape factor, the greater the ratio of ion release quantity to adhesion amount, the worse HCl erosion ability, the inferior the adhesion uniformity and adhesive grade. The larger the RAP shape factor, the weaker interfacial adhesion of cement emulsified asphalt mastic. Ion release quantity first increases and then decreases with the increase of C/E_A . However, the adhesion ability first decreases and then increases. There exists the lowest ion release quantity and the best interfacial adhesion degree when C/E_A reaches 30%. 1 tab, 7 figs, 21 refs.

Key words: road engineering; reclaimed asphalt pavement (RAP); cement emulsified asphalt mastic; interfacial adhesion; quantitative evaluation

0 引言

回收沥青路面材料(RAP)的高比例应用是当今公路工程领域的热点研究内容之一,它不仅节约建设成本,而且对环境保护有利^[1]。乳化沥青冷再生技术便是其中之一,然而在冷再生混合料拌和与成型过程中,由于乳化沥青中水分的蒸发和与水泥等活性填料的作用,RAP表面的水泥乳化沥青胶浆固化后留下很多孔隙,明显影响混合料的拌和均匀性,也直接影响了RAP表面水泥乳化沥青胶浆层的抗渗性和裹覆能力。冷再生混合料受到酸性水分侵蚀时,水分子和 H^+ 易从孔隙进入胶浆与RAP的粘附层,导致胶浆易从RAP表面剥落,影响了混合料的水稳定性等路用性能^[2-4]。

水泥乳化沥青胶浆与集料粘附性试验中,胶浆很容易被清水洗脱,其关键原因在于,水泥乳化沥青胶浆是一种多孔结构材料,其抗水分渗透的能力较差,水分易通过这些孔道进入RAP与沥青界面,造成粘附性降低。国内外学者也对乳化沥青的抗渗性及其与再生集料的粘附效果作了相关研究。例如,魏永锋进行了乳化沥青抗渗性研究,提出乳化沥青浸水后粘聚力下降,自身结构易松散,从集料上剥落^[5];杜少文研究了外加材料对乳化沥青冷再生混合料路用性能的影响,利用SEM对RAP与水泥乳化沥青胶浆界面进行观察,发现水泥水化的刚性产物刺入老化沥青胶浆中,起到连接作用,使沥青胶浆黏结性增大^[6];Cui等利用剥离试验研究水对沥青与集料粘附性的影响,表明在潮湿的环境下,加入硅烷、胺等可以提高界面的粘附性^[7];Cheng等提出粘

附失效模式来分析在遇水情况下集料与沥青的粘附断裂,并用表面能估算沥青与矿料表面的粘附性^[8]。然而,以上研究多为定性评价,缺少一种便于操作且能够精确量化评价胶浆与RAP粘附程度的方法,因此,设计一种水泥乳化沥青对RAP界面粘附均匀性的量化评价方法对于提高冷再生沥青混合料的路用性能具有重要应用价值。

为此,本文基于水泥乳化沥青胶浆粘附试验,建立RAP集料形状特征与水泥乳化沥青胶浆特性之间的关系,分析RAP集料形状特征,利用HCl对RAP集料进行酸性侵蚀,结合络合滴定的方法测试 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 的释放量,量化评价水泥乳化沥青胶浆与RAP的粘附性,以表征水泥乳化沥青胶浆层抗侵蚀性和裹覆均匀性,为水泥乳化沥青再生集料拌和均匀性研究提供理论依据。另外,本文用HCl溶液进行侵蚀性试验,加速了水泥乳化沥青胶浆在RAP表面的脱离速度,溶出的 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 用于表征水泥乳化沥青胶浆的破坏程度,定量评价界面粘附,对实际工况有较好的参考价值。

1 原材料与试验方法

1.1 原材料

RAP集料:粒径9.5~12.5 mm,沥青抽提回收量约4%(质量分数);阳离子慢裂快凝型乳化沥青:沥青含量60.1%(质量分数);筛上残留物含量0.4%(质量分数);5 d存储稳定性4.5%(质量分数);水泥:复合硅酸盐水泥P·C32.5,技术指标见下页表1;EDTA标准溶液:浓度0.01 mol/L;浓盐酸:质量分数37%; $\text{NH}_3\text{-NH}_4\text{Cl}$ 缓冲溶液:pH值为

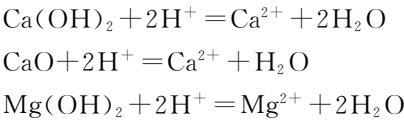
表 1 水泥技术性质
Tab. 1 Technology properties of cement

细度 (80 μm 筛余)/%	安定性 (水煮法)	凝结时间/min		抗压强度/MPa		抗折强度/MPa	
		初凝	终凝	3 d	28 d	3 d	28 d
≤10	合格	101	265	15.7	38.5	3.4	7.8

10.0; 铬黑 T 指示剂; 三乙醇胺溶液: 与水按体积比 1:1 配制; 去离子水等。

1.2 试验原理

水化硅酸钙(C-S-H)、Ca(OH)₂ 为水泥水化反应的主要产物, 且 Ca(OH)₂ 占到水化产物固相的 20%~30%, 且含有极少的 Mg(OH)₂, C-S-H 化学性质稳定, 不与酸反应, 而 Ca(OH)₂、Mg(OH)₂ 以及未水化的水泥颗粒中的 CaO 在遇到 H⁺ 的侵蚀下, 会发生如下反应



水泥在与乳化沥青拌和的过程中, 水泥吸收乳化沥青的水分发生水化反应, 在胶浆中留下孔隙, 同时由于沥青内孔道的存在, 使水、酸等进入胶浆与 RAP 界面区, 长期服役后, 界面性质发生改变, 使胶浆与 RAP 发生剥离, 降低了胶浆与 RAP 的粘附性^[9]。为在实验室加速胶浆与 RAP 发生剥离的速度, 试验采用 H⁺ 加速破坏水泥水化产物成分, 以达到加速水泥乳化沥青胶浆与 RAP 的剥离, 如图 1 所示。分析化学中 EDTA-诺黑 T 法是检验水中 Ca²⁺、Mg²⁺ 含量的有效方法, 因此可通过检验释放的 Ca²⁺、Mg²⁺ 来进行粘附性的量化评价^[5]。

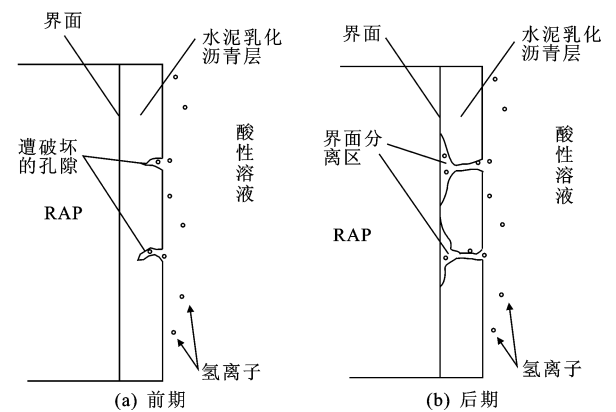


图 1 水泥乳化沥青胶浆与 RAP 粘附性劣化模拟
Fig. 1 Simulation of interfacial adhesion deterioration between cement emulsified asphalt mastic and RAP

1.3 试验方法

(1)对回收的 RAP 集料进行选料、清洗, 通过目测将接近立方体、针片状的集料去除, 留下接近椭

球和圆球的集料, 并进行烘干处理。采用数码相机对 RAP 集料的垂直 3 个方向进行拍照, 在参数相同的条件下收集各个集料照片。如图 2 所示, 利用 IPP 软件自动分析各个集料图片的投影面积和周长, 利用式(1)计算投影面的形状指数 SF, 对同一个集料取垂直 3 个面形状指数的平均值为该集料的形状指数



图 2 集料投影面形状提取
Fig. 2 Shape extraction of aggregate projection surface

$$I_{SF} = \frac{l^2}{4\pi A}$$

(1)

式中: I_{SF} 为形状指数的计算参数; l 为投影周长; A 为投影面积, 采用照片像素单位计算。

(2)RAP 集料表面积的测定存在一定的困难, 试验中将其看成椭球模型, 用游标卡尺测出集料垂直三面的半轴长, 利用式(2)对椭球面进行近似估算^[10-11], 以椭球的表面积来近似为集料的表面积

$$S = \frac{2\pi}{3}(a^2 + b^2 + c^2 + ab + ac + bc)$$

(2)

式中: a 、 b 、 c 为 3 个垂直面的半轴长。

(3)参考文献[12]以乳化沥青和水泥质量比为 3:2 制备水泥乳化沥青胶浆, 并测出其固化后的密度, 在烧杯中搅拌均匀。在载玻片上涂上 1 层厚度 1 mm 左右的水泥乳化沥青层, 晾干, 称重 1 g。对收集好的 RAP 集料分别称重, 然后用水润湿, 再用细线拴住 RAP 集料在水泥乳化沥青胶浆中进行粘附, 将粘附水泥乳化沥青的集料晾干, 并称重, 记下每个集料的粘附量。

(4)取浓盐酸 6 mL, 并稀释至 60 mL, 将载玻片上的水泥乳化沥青薄片放入其中侵蚀, 保持常温 25 ℃下, 每隔 20 min 取 10 mL 侵蚀液, 再稀释 10

倍。取 20 mL 稀释液于锥形瓶中,加入 2 mL 三乙醇胺溶液,再加 10 mL $\text{NH}_3\text{-NH}_4\text{Cl}$ 缓冲溶液,再滴加 2 滴诺黑 T 指示剂,溶液呈酒红色。用 EDTA 标准溶液进行滴定,直到出现蓝色为止停止滴定,记下滴定量 V ,平行滴定 3 次。通过式(3)计算每次取样测量时 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 等的释放总物质的量

$$n_{\text{ion}} = 5(7 - m)c_m V_m + 5 \sum_{m=1}^6 c_{(m-1)} V_{(m-1)} \quad (3)$$

式中: n_{ion} 为 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等离子的释放总物质的量(mol); c_m 为第 m 次称取样的 EDTA 溶液浓度(mol/L); V_m 为第 m 次称取样的滴定体积(L); m 为第 m 次称取样。

(5)取浓盐酸 2 mL,并稀释至 20 mL。将晾干后的集料放入盐酸中浸泡 20 min,取出集料后,将浸泡液再稀释 10 倍。用与(4)相同的方法测定每个再生集料上沥青薄膜释放的离子物质的量。为方便研究,以离子释放量 n_{ion} 与粘附量 Δm 的比值 $\frac{n_{\text{ion}}}{\Delta m}$ 作为离子的释放值。

(6)选取 3 个形状指数差距大的浸泡粘附集料晾干,然后对其用水煮法在 60 °C 热水中浸泡 5 min,计算水泥乳化沥青胶浆剥落面积。

(7)按照水泥占乳化沥青质量比(C/E_A)的 10%、20%、30%、40%、50%、60% 制备水泥乳化沥青胶浆,用相同形状指数的 RAP 进行粘附试验,重复试验(3)、(5),测试不同水泥乳化沥青胶浆在盐酸中浸泡 20 min 的离子释放值。

2 结果与讨论

2.1 形状指数对水泥乳化沥青层厚度的影响

图 3 为集料形状指数与水泥乳化沥青胶浆层厚度之间关系。从图中可以看出,集料的形状指数和水泥乳化沥青胶浆层厚度间关系的离散度很大,同时对于 RAP 集料表面积的测定误差相对较大,因此总体上水泥乳化沥青胶浆层厚度呈不变趋势。水泥乳化沥青胶浆层的厚度可能与胶浆自身的性质有关,集料形状对其粘附厚度影响很小。

2.2 盐酸对水泥乳化沥青层的影响

图 4 为水泥乳化沥青胶浆层在盐酸的侵蚀下, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 离子释放量与时间的关系,表明随着时间增加,水泥乳化沥青胶浆释放 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 离子的物质的量逐渐增多。 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 离子不断从水泥乳化沥青胶浆中释放出来,水化产物固相成分逐渐被掏空,水泥颗粒也会受到侵蚀,孔隙随之越来越大。

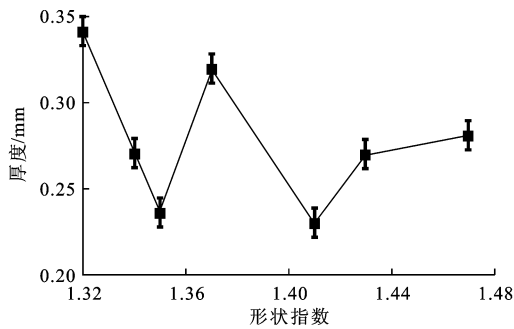


图 3 形状指数与水泥乳化沥青薄膜厚度的关系

Fig. 3 Relationship between shape factor and film thickness of cement emulsified asphalt

沥青表面的防水作用也会因表面的孔道增多、增大而减弱,所以内部的大量离子被酸液带走,离子的释放量也会提高,因此,裹附于 RAP 集料上的水泥乳化沥青胶浆在盐酸的侵蚀下也会同样释放大量的离子,胶浆表面的均匀性会受到破坏。RAP 与水泥乳化沥青胶浆层的粘附性破坏的主要原因是水、酸性物质进入界面区,水泥乳化沥青胶浆层抗酸、抗侵蚀性直接影响到其与 RAP 的粘附性,水泥乳化沥青胶浆层的好坏直接影响 H^+ 、水进入水泥乳化沥青胶浆与 RAP 界面。

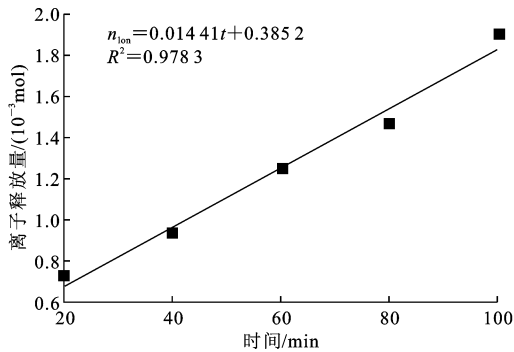


图 4 离子释放量随时间的变化趋势

Fig. 4 Quantity of release change trend with time

2.3 形状指数对水泥乳化沥青胶浆层的影响

RAP 集料的形状指数与 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等离子的单位释放量的关系如下页图 5 所示。图 5 表明,在侵蚀 20 min 后,随着 RAP 集料不规则程度增大,单位质量水泥乳化沥青胶浆释放 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等离子的释放值 $\frac{n_{\text{ion}}}{\Delta m}$ 逐渐增大。因为随着水分的蒸发,水泥乳化沥青胶浆层发生收缩,其刚性也比纯沥青大, RAP 集料形状的不规则性、多棱角性使水泥乳化沥青胶浆层内应力增大,沥青表层的断裂程度也随之增加,与表面相连孔通道数量也增多,内部固相 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 、水泥颗粒等受 H^+ 离子侵蚀

几率增加^[13-16]。因此,固相中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 离子流失会随着形状指数的增大而增大。

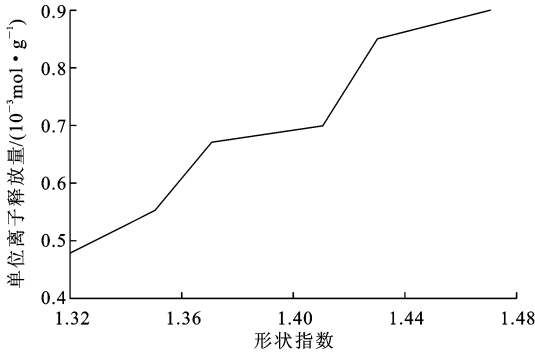


图 5 形状指数与单位离子释放量的关系

Fig. 5 Relationship between shape factor and quantity of release per gram

2.4 形状指数对水泥乳化沥青粘附性的影响

图 6 为水泥乳化沥青胶浆对 3 种形状下 RAP 集料的粘附等级。从图中可以看出,形状指数越大,粘附等级也越差,这与水泥乳化沥青胶浆层上存在较多的开口孔隙有关系;形状不规则性越大,水分子和各种离子等越容易从缝隙中渗入到水泥乳化沥青胶浆与老化沥青的界面区域,改变界面区性质,造成水泥乳化沥青从老化沥青上剥落下的量增多^[17]。虽然集料越不规则,对沥青混合料整体性能提高有帮助,但基于粘附试验下,则对水泥乳化沥青的抗水剥落性不利。

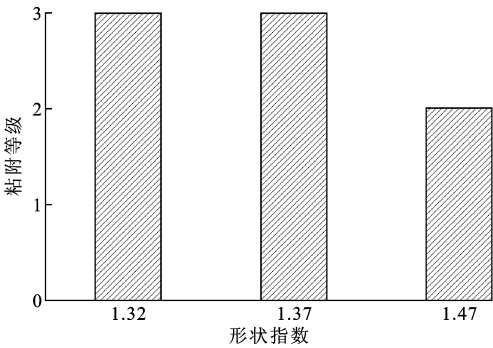


图 6 形状指数与粘附等级关系

Fig. 6 Relationship between shape factor and adhesion grade

2.5 水泥乳化沥青胶浆配比 (C/E_A) 对其粘附性的量化评价

图 7 为对不同的 C/E_A 水泥乳化沥青胶浆进行粘附,裹附胶浆的 RAP 在盐酸中浸泡 20 min 后 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等的离子单位释放量。从图中可以看出,随着 C/E_A 值增加,离子的释放值先降低后上升,在 30% 时达到最低值。由于乳化沥青的固含量一定,当 C/E_A 值较低时,水泥水化时的水灰比 (W/C) 较高,水泥水化反应固化后留有孔隙较

多^[18],与沥青拌和时,在水泥乳化沥青胶浆层中也留有较多的孔隙,因此当受盐酸侵蚀时,其离子的释放值大,粘附性较差。当 C/E_A 达到 30% 时,水泥与乳化沥青中的水灰比 (W/C) 较低,留有的孔隙降低,粘附性达到最佳。但是随着 C/E_A 的增加,水泥量也增多,由于未水化的水泥颗粒以及较多的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 填充于水泥乳化沥青胶浆中,受盐酸侵蚀的接触面增大,离子释放值也增大,这与相关研究在宏观上表现出粘附性降低具有一致性^[10,15,19-21]。

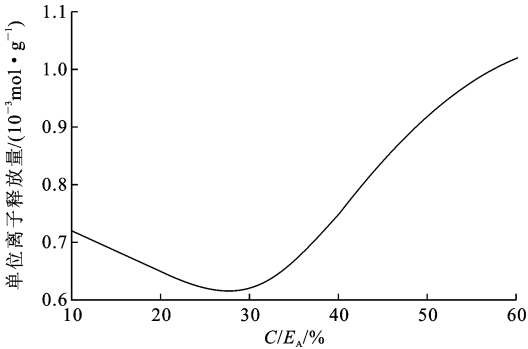


图 7 不同 C/E_A 下的粘附性量化评价

Fig. 7 Quantitative evaluation of adhesion with different C/E_A ratios

3 结 语

(1) RAP 形状指数和水泥乳化沥青胶浆层厚度之间关系的离散度较大, RAP 集料形状指数与水泥乳化沥青胶浆粘附层厚度之间没有明显的规律。

(2) 随着盐酸侵蚀水泥乳化沥青胶浆层时间的增加,被盐酸侵蚀释放的离子量逐渐增多,水化产物相被腐蚀,水泥乳化沥青胶浆层的孔隙结构遭到破坏,粘附性降低。

(3) RAP 集料形状指数越大,水泥乳化沥青胶浆被盐酸侵蚀后释放的离子量越多,抗盐酸侵蚀能力下降,粘附均匀性变差。

(4) RAP 集料形状明显影响 RAP 与水泥乳化沥青胶浆的粘附等级, RAP 集料形状指数越大,水泥乳化沥青胶浆对 RAP 的粘附等级越低。

(5) 随着 C/E_A 的增加,离子的释放量先减小后增大,水泥乳化沥青在 RAP 上的粘附性先增大后减小,当 C/E_A 为 30% 时,离子释放量最小,粘附性最佳。

(6) 集料形状指数和离子释放量可作为水泥乳化沥青胶浆与 RAP 粘附性评价指标,为定量评价水泥乳化沥青胶浆对集料粘附性等问题提供了理论方法,需要后续研究 RAP 集料形状指数和离子释

放量对冷再生混合料路用性能的影响,建立界面粘附与路用性能的关联性,提出利用形状指数和离子释放量改善混合料路用性能的技术途径。

参考文献:

References:

- [1] ASI I M, WAHHAB H I A A, AL-AMOUDI O S B, et al. Stabilization of dune sand using foamed asphalt[J]. *Geotechnical Testing Journal*, 2002, 25(2): 168-176.
- [2] AIREY G D, COLLOP A C, ZOOROB S E, et al. The influence of aggregate, filler and bitumen on asphalt mixture moisture damage[J]. *Construction and Building Materials*, 2008, 22(9): 2015-2024.
- [3] 张兰峰, 庞立果. 乳化沥青冷再生混合料配合比设计[J]. *筑路机械与施工机械化*, 2014, 31(4): 68-71.
ZHANG Lan-feng, PANG Li-guo. Design of proportion for emulsified asphalt cold recycling mixture[J]. *Road Machinery & Construction Mechanization*, 2014, 31(4): 68-71. (in Chinese)
- [4] 魏永锋, 王振军. 乳化沥青水中浸出性能与沥青混合料性能相关性研究[J]. *公路交通科技: 应用技术版*, 2015(12): 139-141.
WEI Yong-feng, WANG Zhen-jun. Leaching performance of emulsified asphalt and related properties of asphalt mixtures[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development: Application Technology Edition*, 2015(12): 139-141. (in Chinese)
- [5] 魏永锋. 乳化沥青及混合料水中浸出性能研究[D]. 西安: 长安大学, 2014.
WEI Yong-feng. The leaching characteristics of emulsified asphalt and mixture in water [D]. Xi'an: Chang'an University, 2014. (in Chinese)
- [6] 杜少文. 外加材料对乳化沥青冷再生混合料路用性能的影响[J]. *建筑材料学报*, 2013, 16(3): 534-538.
DU Shao-wen. Effect of additives on pavement performance of cold recycled asphalt emulsion mixture[J]. *Journal of Building Materials*, 2013, 16(3): 534-538. (in Chinese)
- [7] CUI S, BLACKMAN B R K, 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.
- [8] CHENG D X, LITTLE D N, LYTTON R L, et al. Moisture damage evaluation of asphalt mixture by considering both moisture diffusion and repeated load conditions[J]. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2003 (1832): 42-49.
- [9] 谢永江, 郑新国, 李书明, 等. 温度对水泥乳化沥青砂浆韧性的影响[J]. *建筑材料学报*, 2013, 16(6): 862-967.
XIE Yong-jiang, ZHENG Xin-guo, LI Shu-ming, et al. Influence of temperature on toughness of emulsified asphalt cement mortar[J]. *Journal of Building Materials*, 2013, 16(6): 862-967. (in Chinese)
- [10] 纪兵, 边少锋. 三轴椭球表面积的计算[J]. *海军工程大学学报*, 2008, 20(4): 21-24.
JI Bing, BIAN Shao-feng. Calculation of surface area of triaxial ellipsoid[J]. *Journal of Naval University of Engineering*, 2008, 20(4): 21-24. (in Chinese)
- [11] 徐宏枢. 三轴椭球面的面积计算[J]. *渝州大学学报: 自然科学版*, 1998, 15(1): 57-60.
XU Hong-shu. The calculation of the area of the 3-axes ellipsoid[J]. *Journal of Yuzhou University: Natural Science Edition*, 1998, 15(1): 57-60. (in Chinese)
- [12] 王琼. 水泥乳化沥青胶浆的粘附性能研究[D]. 西安: 长安大学, 2013.
WANG Qiong. Study on adhesion performance of cement emulsified asphalt mastic [D]. Xi'an: Chang'an University, 2013. (in Chinese)
- [13] LU C T, KUO M F, SHEN D H. Composition and reaction mechanism of cement-asphalt mastic[J]. *Construction and Building Materials*, 2009, 23(7): 2580-2585.
- [14] 王振军, 高杰, 魏永锋, 等. 阳离子乳化沥青对硅酸盐水泥砂浆力学性能影响分析[J]. *郑州大学学报: 工学版*, 2013, 34(3): 81-84, 89.
WANG Zhen-jun, GAO Jie, WEI Yong-feng, et al. Influence of cationic emulsified asphalt on mechanical properties of portland cement mortar[J]. *Journal of Zhengzhou University: Engineering Science*, 2013, 34(3): 81-84, 89. (in Chinese)
- [15] HUANG B S, SHU X, LI G Q. Laboratory investigation of Portland cement concrete containing recycled asphalt pavements[J]. *Cement and Concrete Research*, 2005, 35(10): 2008-2013.
- [16] ABO-QUDAIS S, AL-SHWEILY H. Effect of aggregate properties on asphalt mixtures stripping and creep behavior[J]. *Construction and Building Materials*, 2007, 21(2): 1886-1898.
- [17] 沙爱民, 王振军. 水泥乳化沥青混凝土胶浆-集料界面微观结构[J]. *长安大学学报: 自然科学版*, 2008, 28(4): 1-6.