

# 冻融循环作用下乳化沥青冷再生混合料 损伤分析

杨野<sup>1,2,3</sup>, 徐剑<sup>1</sup>, 杨彦海<sup>2</sup>, 孙宗光<sup>3</sup>, 李旺<sup>4</sup>

(1. 交通运输部公路科学研究所道路结构与材料交通运输行业重点实验室, 北京 100088;  
2. 沈阳建筑大学交通工程学院, 辽宁 沈阳 110168; 3. 大连海事大学交通运输工程学院,  
辽宁 大连 116026; 4. 中建科工集团有限公司, 广东 深圳 518000)

**摘要** 目的 研究乳化沥青冷再生混合料在冻融循环作用下宏微观损伤情况, 揭示损伤规律. 方法 基于室内试验分析不同饱水状态下乳化沥青冷再生混合料经历不同冻融循环作用下的空隙率、高温性能和低温性能, 运用扫描电镜(SEM)观测水泥乳化沥青复合胶浆微观形貌和化学元素组成. 结果 经历冻融循环 20 次, 完全干燥、50% 饱水和完全饱水状态下乳化沥青冷再生混合料空隙率增加幅度为 3.0%、14.2% 和 19.5%, 高温贯入强度降低幅度达 20.6%、31.8% 和 49.1%, 贯入深度增加幅度达 24.5%、53.5% 和 80.4%, 低温劈裂强度降低幅度达 22.5%、44.7% 和 56.1%; 经历冻融循环 10 次, 乳化沥青与水泥水化产物分离, 水泥乳化沥青复合胶浆晶体中碳元素质量分数降低幅度达 56.4%, 钙元素和硅元素质量分数增加幅度达 2.50 倍和 2.17 倍. 结论 冻融循环作用使乳化沥青冷再生混合料空隙率增加、高温性能下降、复合胶浆损伤.

**关键词** 道路工程; 沥青路面; 乳化沥青冷再生混合料; 饱水状态; 冻融循环; 宏微观分析  
中图分类号 TU997; U414 文献标志码 A

## Damage Analysis of Cold Recycled Mixes using Asphalt Emulsion under Freeze-thaw Cycles

YANG Ye<sup>1,2,3</sup>, XU Jian<sup>1</sup>, YANG Yanhai<sup>2</sup>, SUN Zongguang<sup>3</sup>, LI Wang<sup>4</sup>

(1. Key Laboratory of Transport Industry of Road Structure and Material (Research Institute of Highway Ministry of Transport), Beijing, China, 100088; 2. School of Transportation Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 3. College of Transportation Engineering, Dalian Maritime University, Dalian, China, 116026; 4. China Construction Science and Industry Corporation LTD., Shenzhen, China, 518000)

收稿日期: 2020-04-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(51908378); 道路结构与材料交通运输行业重点实验室 2018 年度开放基金项目(zdsyskfj2019-01); 沈阳市城乡科技计划项目(SYJW2019008)

作者简介: 杨野(1989—), 男, 博士研究生, 主要从事路面材料、废旧资源循环再利用方面研究.

**Abstract:** The paper is to study the macro and micro damage of cold recycled mixes using asphalt emulsion under freeze-thaw cycle and reveal the law of damage. Void ratio, high temperature performance and low temperature performance of cold recycled mixes using asphalt emulsion are analyzed under different water-saturation condition and freeze-thaw cycles based on laboratory tests. The micro-morphology and chemical composition of cement asphalt emulsified compound mortar are observed by the scanning electron microscopy (SEM). After 20 freeze-thaw cycles, when the water-saturation condition are completely dry condition, 50% water-saturation condition and completely water-saturation condition the void ratio of cold recycled mixes using asphalt emulsion increased up to 3.0%, 14.2% and 19.5%, high-temperature penetration strength up to 20.6%, 31.8% and 49.1%, high-temperature depth strength increased up to 24.5%, 53.5% and 80.4%, low-temperature splitting strength decreased up to 22.5%, 44.7% and 56.1%. After 10 freeze-thaw cycles, asphalt emulsion and cement hydration product are separated, the weight percentage of carbon element decreased up to 56.4%, the weight percentage of calcium and silicon element increased up to 2.50 times and 2.17 times in cement asphalt emulsified compound mortar crystal. Void ratio increased, high temperature performance and low temperature performance of cold recycled mixes using asphalt emulsion decreased, compound mortar damaged under freeze-thaw cycles.

**Key words:** road engineering; asphalt pavement; cold recycled mixes using asphalt emulsion; water-saturation condition; freeze-thaw cycles; macro and micro damage analysis

乳化沥青冷再生混合料属于绿色低碳、节能环保型再生材料,具有旧料利用率高、能源消耗低、环境污染小、性价比高等特点,近年来已在我国高等级公路基层,普通公路面层或基层进行了大面积应用<sup>[1-3]</sup>。由于我国季节性冰冻区分布广泛,占国土面积的50%以上,同时,近年来南方地区降雪冰冻天气也有所增加,使得乳化沥青冷再生混合料铺筑的路面在服役过程中,需要承受冻融-荷载的循环作用<sup>[4-6]</sup>,导致服役2~3年后冷再生层芯样出现破碎、松散现象。国内外道路工作者从基本参数入手,研究了普通沥青混合料空隙率、沥青饱和度等体积参数在冻融作用下的变化规律<sup>[7-10]</sup>,分析了动稳定度、车辙深度等高温稳定性指标,低温抗裂性以及水稳定性、耐久性、抗滑性等路用性能的衰变规律,进而研究了普通沥青混合料失效破坏等力学行为的实际变化规律<sup>[5,11-14]</sup>,分析总结了冻融作用的具体影响,并基于相关理论建立了损伤模型<sup>[15-16]</sup>。然而,针对乳化沥青冷再生混合料研究主要集中于材料组成、成型养生方法、空隙特征、路用性能评价、疲劳性

能等研究<sup>[17-20]</sup>,缺少冻融循环作用下的乳化沥青冷再生混合料的性能分析和微观观测分析。笔者根据乳化沥青冷再生混合料应用的广泛性和服役环境的复杂性为研究背景,通过室内试验分析不同饱水状态下乳化沥青冷再生混合料经历冻融循环作用下的体积指标、高低温性能的损伤行为,并通过扫描电镜(SEM)观测水泥乳化沥青复合胶浆微观形貌和化学元素变化,进行损伤微观分析。

## 1 试验

### 1.1 原材料

#### 1.1.1 沥青混合料回收料

笔者试验使用的沥青混合料回收料(RAP)来源于辽宁省某一级公路的铣刨料。为避免RAP级配变异对试验结果的影响,将RAP筛分成单粒径集料,筛分过程中将黏结在一起的“假粗集料”剔除,最终将RAP筛分成0~0.075 mm、0.075~0.15 mm、0.15~0.3 mm、0.3~0.6 mm、0.6~1.18 mm、1.18~2.36 mm、2.36~4.75 mm、4.75~9.5 mm、9.5~13.2 mm、13.2~

16 mm和16~19 mm共11档.并按照《公路沥青路面再生技术规范》(JTG T5521—2019)要求进行了RAP最大颗粒粒径和4.75 mm以下砂当量的检测,RAP最大颗粒粒径满足小于设计级配允许的最大粒径要求,4.75 mm以下RAP砂当量测试结果满足不小于50%的要求.

### 1.1.2 新集料

为保证乳化沥青冷再生混合料的强度和性能,添加30%新集料.试验采用的新集料是来源于辽阳小屯的石灰岩碱性集料,为了避免新集料级配变异对试验结果的影响,将新集料也筛分成单粒径.试验配合比设计的级配类型为中粒式乳化沥青冷再生混合料,RAP筛分中缺少19~26.5 mm的粗集料,因此新集料中增加19~26.5 mm的集料.根据《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2004)要求对新集料进行检测,检测结果满足要求.

### 1.1.3 乳化沥青

试验采用的乳化沥青为冷再生专用的慢裂型阳离子乳化沥青,按照《公路沥青路面再生技术规范》(JTG T5521—2019)要求进行检测,乳化沥青试验检测结果如表1所示.

表1 乳化沥青试验结果

Table 1 Test results of asphalt emulsion

数值来源	筛上残留量 (1.18 mm 筛)/%	恩格拉 黏度计 $E_{25}$	与粗、细 集料拌 和试验	储存稳定性/%	
				1 d	5 d
试验	0.021	6.8	均匀	0.5	2.7
要求	$\leq 0.1$	2~30	均匀	$\leq 1$	$\leq 5$

### 1.1.4 水泥

为提高乳化沥青冷再生混合料的早期强度和性能,粉煤灰、水泥、石灰和火山灰等材料被当作添加剂加入到混合料中.通过宏观性能、微观形貌和作用机理分析得到掺加适量的水泥能够提高乳化沥青冷再生混合料早期强度和改善混合料性能,这主要由于水泥与乳化沥青在混合料强度形成过程中相互作用,水化产物和沥青形成复合胶浆,构成

三维空间网络结构,在混合料中具有“加筋”作用<sup>[21-22]</sup>.试验使用的水泥为辽宁某厂生产的32.5#普通硅酸盐水泥,水泥各项指标均满足《公路水泥混凝土路面施工技术规范》(JTG F30—2015)要求,水泥按内掺1.5%添加<sup>[23-24]</sup>.

### 1.1.5 水

水质好坏直接影响到乳化沥青能否很好的分散、裹附新旧集料,发挥其胶结料作用,关系到混合料的施工和易性与压实效果,最终影响路面的使用性能.因此,试验采用的拌和用水为饮用水,避免水影响混合料性能.

### 1.1.6 配合比设计

乳化沥青冷再生混合料的级配类型采用的是中粒式乳化沥青冷再生混合料.配合比设计过程首先按照级配要求进行RAP和水泥,新集料和水泥的配合比设计.由于试验使用的RAP没有大于19 mm的颗粒,大于19 mm颗粒的组成均由新集料组成,设计出来的合成旧料级配和合成新料级配除19 mm筛孔通过率不同外,其他筛孔质量通过率均相同.然后按照合成旧料与合成新料质量比为7:3的比例得到最终合成级配,级配曲线如图1所示.根据《公路沥青路面再生技术规范》(JTG T5521—2019)规定采用击实试验获得的最大干密度确定最佳含水率为3.0%,通过空隙率、15℃劈裂强度、干湿劈裂强度比等分析确定最佳乳化沥青用量为3.5%.

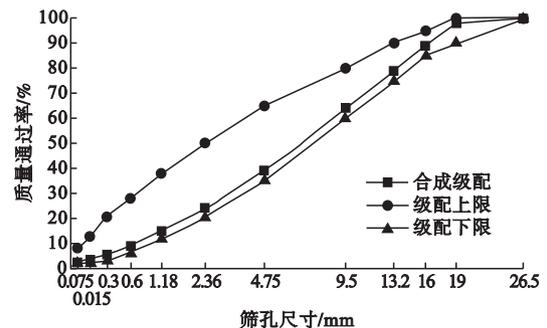


图1 级配曲线

Fig. 1 Grading curve

## 1.2 饱水试验与冻融循环试验

### 1.2.1 饱水试验

笔者主要针对完全干燥、50% 饱水和完全饱水 3 种状态进行研究. 完全饱水状态和 50% 饱水状态主要通过以下试验方法实现.

#### (1) 完全饱水试验

采用旋转压实法成型的直径 100 mm, 高度 63.5 mm 的圆柱体试件置于 60 °C 鼓风烘箱中养生至恒重, 然后放在室温条件下冷却, 称取试件质量  $m_0$ , 将其放在 98.3 ~ 98.7 kPa 真空条件下保持 15 min, 然后恢复到常压, 试件在水中静置至恒重, 以保证试件完全饱水, 用湿毛巾擦干试件表面, 称取表干试件质量  $m_1$ , 作为完全饱水状态, 计算完全饱水质量  $\Delta m$ .

$$\Delta m = m_1 - m_0. \quad (1)$$

#### (2) 非饱水试验

将成型养生至恒重的试件按照完全饱水试验步骤进行完全饱水, 称取计算完全饱水质量, 然后将饱水试件放在恒温鼓风烘箱中失水, 称取计算试件失水质量  $m_3$ , 计算饱水率  $S$ .

$$S = (1 - m_3 / \Delta m) \times 100\%. \quad (2)$$

当饱水率为 50%, 即为试验的 50% 饱水状态, 然后将试件用保鲜膜包裹密封静置 12 h, 使水分在试件内部进行自由均匀分布.

### 1.2.2 冻融循环试验

经过不同饱水处理的表干试件用保鲜膜包裹密封, 避免试件内水分在冻融过程中损失. 将密封好的试件放入直径为 12 cm 的杯子中静置于 -20 °C 的冰箱中冷冻 6 h, 取出后立即将杯子和试件置于 60 °C 的恒温水浴中融化 4 h, 水浴过程中水不能进入杯中, 以此完成一次冻融循环. 按照上述冻融循环过程进行试件冻融循环 0 次、5 次、10 次、15 次和 20 次的试验.

## 1.3 性能试验与微观分析

为了分析研究完全干燥、50% 饱水状态和完全饱水状态时乳化沥青冷再生混合料在

冻融循环作用下性能损伤行为, 笔者进行混合料的空隙率测定、高温性能试验和低温性能试验. 采用镊子夹取经冻融循环作用后的乳化沥青冷再生混合料水泥乳化沥青复合胶浆颗粒若干, 采用扫描电镜 (SEM) 观测分析乳化沥青冷再生混合料复合胶浆的微观形貌改变和化学元素质量分数变化, 从微观层面分析复合胶浆的损伤情况.

## 2 试验结果与分析

### 2.1 空隙率

乳化沥青冷再生混合料相对于普通热拌沥青混合料拥有较大的空隙率, 且大空隙较少, 小空隙较多. 空隙作为混合料本身存在的缺陷, 服役过程中空隙的增大与连通将使水分容易进入到路面结构内部, 大大降低路面的使用性能和使用寿命. 因此, 笔者针对冻融循环作用下乳化沥青冷再生混合料空隙率进行研究, 空隙率测定按照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011) 进行. 完全干燥、50% 饱水和完全饱水状态下乳化沥青冷再生混合料经历 0 次、5 次、10 次、15 次和 20 次冻融循环的空隙率试验结果如图 2 所示.

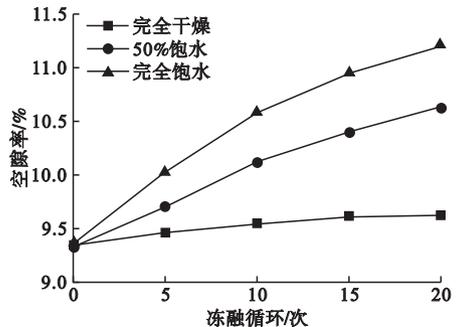


图 2 空隙率随冻融循环变化

Fig. 2 Changes of void ratio under freeze-thaw cycles

从图 2 可知, 完全干燥状态时, 混合料的空隙率随冻融循环次数的增加有少许增加, 冻融循环 20 次增加幅度仅为 3.0%. 原因在于温度循环一般仅能使少量黏结薄弱处的颗粒剥落, 而不能使混合料空隙出现较大的连

通和孔径增大,因此不会导致混合料空隙的大幅增加。50% 饱水和完全饱水状态时,混合料空隙率随冻融循环次数的增加显著增加,冻融循环 20 次 50% 饱水和完全饱水状态空隙率增加幅度分别为 14.2% 和 19.5%,这主要由于随着冻融循环作用的增加水的侵蚀和冻胀作用使混合料内部封闭空隙连通形成连通空隙,同时随着细集料颗粒剥落与流失造成单个空隙增大,从而使混合料空隙率逐渐增大。完全饱水状态的空隙率增加大于 50% 饱水状态,这主要由于完全饱水时水对混合料的侵蚀与冻胀作用较强,导致空隙率增加较大。

## 2.2 高温性能

高温环境服役过程中,沥青混合料承受车辆荷载反复作用容易产生车辙、推移、拥包等高温病害,影响路面的服务水平。因此,笔者采用单轴贯入试验来评价乳化沥青冷再生混合料经冻融循环作用后的高温抗剪切和抗变形能力,试验过程按《公路沥青路面设计规范》(JTG D50—2017)进行,试验温度为 60 °C,加载速率为 1 mm/min。完全干燥、50% 饱水和完全饱水状态下乳化沥青冷再生混合料经历 0 次、5 次、10 次、15 次和 20 次冻融循环的单轴贯入强度试验结果如图 3 所示。

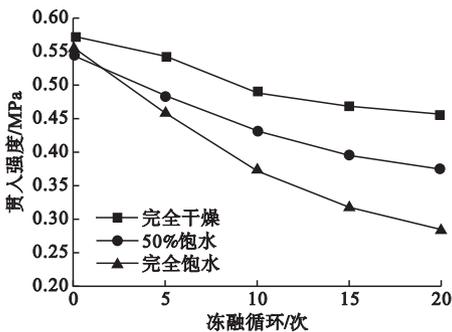


图 3 贯入强度随冻融循环变化

Fig. 3 Changes of penetration strength under freeze-thaw cycles

从图 3 可知,完全干燥、50% 饱水和完全饱水状态的乳化沥青冷再生混合料贯入强度均随冻融循环次数的增加而减小,经历冻融

循环 20 次贯入强度降低幅度分别为 20.6%、31.8% 和 49.1%。完全干燥状态时,由于温度应力作用使混合料内部出现损伤,随着冻融循环次数的增加,混合料损伤逐渐积累,导致高温抗剪能力逐渐下降。50% 饱水和完全饱水状态时,混合料除受温度应力作用还承受水的侵蚀与冻胀作用,混合料内部空隙连通、空隙率增大、集料与沥青的黏附性随冻融循环作用降低,使混合料内部损伤加剧,导致混合料抗剪能力显著下降。混合料饱水率越大,水的侵蚀与冻胀作用越强,所以完全饱水状态混合料高温抗剪能力下降最显著。

贯入深度试验结果如图 4 所示。

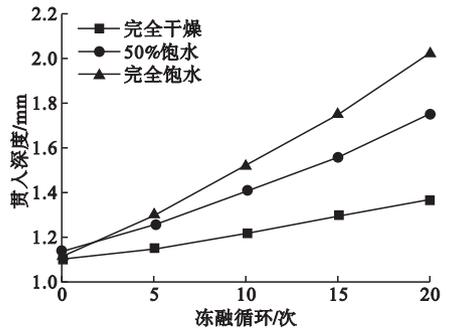


图 4 贯入深度随冻融循环变化

Fig. 4 Changes of penetration depth under freeze-thaw cycles

从图 4 可知,完全干燥、50% 饱水和完全饱水状态的乳化沥青冷再生混合料贯入深度均随冻融循环次数的增加而增加,经历冻融循环 20 次贯入深度增加幅度分别为 24.5%、53.5% 和 80.4%。完全干燥状态下,混合料抗剪强度随冻融循环次数增加而下降,而空隙率随冻融循环次数增加没有显著增加,高温条件下混合料抵抗变形下降主要由于抗剪强度下降导致。50% 饱水和完全饱水状态时,混合料空隙率随冻融循环次数增加显著增加,抗剪强度随冻融循环次数增加显著下降,高温条件下混合料由于空隙压密和抗剪强度下降产生相对较大的变形。混合料饱水率越大,空隙率增加越多,抗剪强度下降越多,使得高温条件下混合料变形越严重。

### 2.3 低温性能

低温环境服役过程中,沥青混合料容易开裂,使路面产生裂缝,水分沿裂缝进入路面结构内部,导致路面承载力降低,影响路面的服务水平.因此,采用低温劈裂试验来评价乳化沥青冷再生混合料经冻融循环作用后的低温性能,试验过程按《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)进行,试验温度为 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,加载速率为 $1\text{ mm/min}$ .完全干燥、50%饱水和完全饱水状态下乳化沥青冷再生混合料经历0次、5次、10次、15次和20次冻融循环的低温劈裂强度试验结果如图5所示.

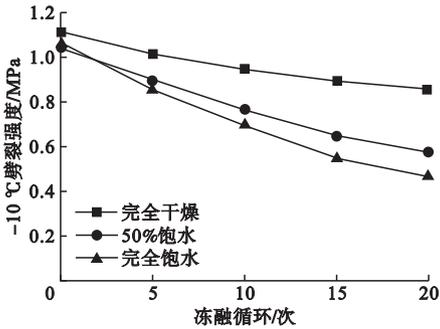


图5 低温劈裂强度随冻融循环变化

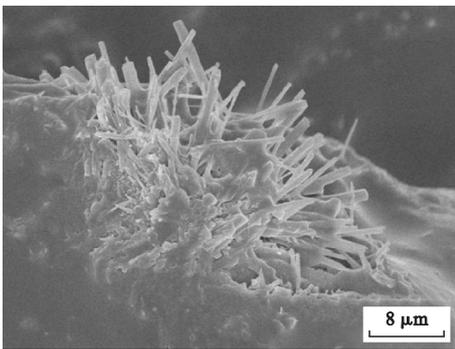
Fig.5 Changes of low-temperature splitting strength under freeze-thaw cycles

从图5可知,完全干燥、50%饱水和完全饱水状态的乳化沥青冷再生混合料 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$

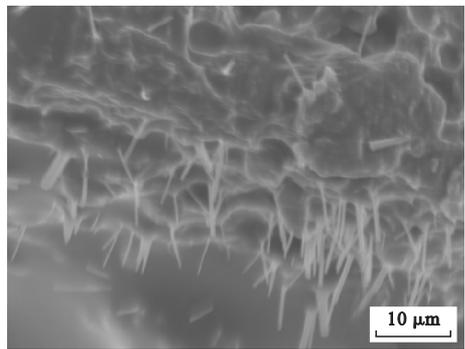
劈裂强度均随冻融循环次数的增加而减小,经历冻融循环20次劈裂强度降低幅度分别为22.5%、44.7%和56.1%.完全干燥状态时,混合料由于温度应力反复作用产生微裂纹,随冻融循环次数增加,混合料微裂纹进一步增加与扩展,导致混合料低温抗拉伸性能逐渐下降.50%饱水和完全饱水状态时,混合料除受温度应力作用还承受水的侵蚀与冻胀作用,使得混合料内部空隙连通、空隙率增大、沥青与集料黏附性降低,随冻融循环次数增加混合料损伤积累愈加严重,使得低温抗拉伸能力下降.混合料饱水率大,水的侵蚀与冻胀作用越强,所以完全饱水状态混合料低温抗拉伸能力下降最显著.

### 3 微观损伤分析

冻融循环作用下乳化沥青冷再生混合料首先发生内部初始微裂纹类缺陷的能量积聚,然后微裂纹不断萌生,随着微裂纹的扩展、搭接和贯通,最终造成材料的整体失稳与破坏.笔者尝试采用扫描电镜(SEM)从微观层面分析冻融循环作用下乳化沥青冷再生混合料的损伤情况.选取50%饱水状态下冻融循环作用0次和10次的水泥乳化沥青复合胶浆进行微观形貌观测分析,复合胶浆微观形貌如图6所示.



(a)0次冻融循环



(b)10次冻融循环

图6 水泥乳化沥青复合胶浆微观形貌

Fig.6 Micro-morphology of cement asphalt emulsified compound mortar

通过图6中0次冻融循环和10次冻融循环作用后水泥乳化沥青复合胶浆晶体形状

对比得到,经历冻融循环作用后大部分晶体由粗棒状变为针尖状,这主要由于冻融循环

作用过程中,水侵入水泥乳化沥青复合胶浆薄弱处使乳化沥青与水泥水化产物黏结强度下降,包裹在水泥水化产物表面的乳化沥青剥落,导致水泥乳化沥青复合胶浆损伤,进而导致混合料的高低温性能下降。

乳化沥青主要由碳(C)、氢(H)、硫(S)和氧(O)等元素组成,普通硅酸盐水泥主要由氧(O)、钙(Ca)、硅(Si)、铝(Al)和铁(Fe)组成<sup>[23]</sup>,微观形貌观测过程中,采用扫描电镜(SEM)能谱分析技术对图5中0次循环和10次循环的晶体部位进行化学元素扫描分析,选取C、Ca、Si主要化学元素作为分析元素,化学元素质量分数分析结果如表2所示。

表2 水泥乳化沥青复合胶浆化学元素分析

Table 2 Chemical elemental analysis of cement asphalt emulsified compound mortar

冻融循环/次	主要化学元素质量分数/%		
	C	Ca	Si
0	32.65	6.85	3.87
10	14.22	17.12	8.43

从表2试验结果可知,0次冻融循环时水泥乳化沥青复合胶浆中含有较多的C,说明复合胶浆表面裹附乳化沥青,10次冻融循环后C质量分数降低幅度达56.4%,Ca和Si质量分数增加幅度达2.50倍和2.17倍,说明水泥乳化沥青复合胶浆中乳化沥青从水泥水化产物表面剥落,复合胶浆出现损伤。

## 4 结 论

(1)完全干燥状态下,乳化沥青冷再生混合料随冻融循环作用次数的增加空隙率增加较小,高温贯入深度增加,高温贯入强度和低温劈裂强度降低,温度循环对混合料性能产生损伤。

(2)50%饱水和完全饱水状态时,乳化沥青冷再生混合料随冻融循环作用次数的增加空隙率和高温贯入深度明显增大,高温贯入强度和低温劈裂强度下降显著,随混合料

饱水率增加,空隙率和高低温性能损伤加剧。

(3)乳化沥青冷再生混合料经过50%饱水冻融循环,沥青与水泥水化产物出现剥落分离,水泥乳化沥青复合胶浆发生损伤破坏。

## 参考文献

- [1] LIN J, HONG J, XIAO Y. Dynamic characteristics of 100% cold recycled asphalt mixture using asphalt emulsion and cement [J]. Journal of cleaner production, 2017, 156: 337-344.
- [2] SANGIORGI C, TATARANNI P, SIMONE A, et al. Laboratory and field evaluation of cold recycled mixture for base layer entirely made with reclaimed asphalt pavement [J]. Construction and building materials, 2017, 138, 232-239.
- [3] 杨彦海, 杨野, 曲泰霖, 等. 基于正交设计的乳化沥青冷再生下面层力学特性分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2016, 32(2): 288-297.  
(YANG Yanhai, YANG Ye, QU Tailin, et al. Mechanical behavior analysis of cold recycling emulsified asphalt used as bituminous concrete subsurface based on orthogonal designing [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2016, 32(2): 288-297.)
- [4] 赵婷, 党松洋. 老化时间对聚合物改性沥青低温粘结性能的影响及机理分析[J]. 新型建筑材料, 2019, 46(6): 144-147.  
(ZHAO Ting, DANG Songyang. Effect of aging time on low temperature bonding properties of polymer modified asphalt and its mechanism [J]. New building materials, 2019, 46(6): 144-147.)
- [5] 李兆生, 谭忆秋, 吴思刚, 等. 冻融循环对沥青混合料力学性能的影响[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2014(3): 378-382.  
(LI Zhaosheng, TAN Yiqiu, WU Sigang, et al. The effects of the freeze-thaw cycle on the mechanical properties of the asphalt mixture [J]. Journal of Harbin engineering university, 2014(3): 378-382.)
- [6] 李国锋, 郝培文, 蒋鹤, 等. 冻融循环对泡沫沥青再生混合料微观结构的影响[J]. 北京工业大学学报, 2017, 43(10): 1508-1513.  
(LI Guofeng, HAO Peiwen, JIANG He, et al. Impacts of freeze-thaw cycles on microscopic characteristics of recycled mixture using foamed asphalt [J]. Journal of Beijing university of technology, 2017, 43(10): 1508-1513.)
- [7] XU H, LI H, TAN Y, et al. A micro-scale investigation on the behaviors of asphalt mixtures under freeze-thaw cycles using entropy theory and a computerized tomography scanning technique [J]. Entropy, 2018, 20(2): 68-80.
- [8] APEAGYEI A K, GRENFELL J R A, AIREY G D. Observation of reversible moisture

- damage in asphalt mixtures [J]. Construction and building materials, 2014, 60: 73 - 80.
- [9] LUO Y, ZHANG Z, CHENG G, et al. The deterioration and performance improvement of long-term mechanical properties of warm-mix asphalt mixtures under special environmental conditions [J]. Construction and building materials, 2017, 135: 622 - 631.
- [10] 罗蓉, 柳子尧, 黄婷婷, 等. 冻融循环对沥青混合料内水气扩散的影响 [J]. 中国公路学报, 2018, 31(9): 20 - 26.  
(LUO Rong, LIU Ziyao, HUANG Tingting, et al. Effect of freezing-thawing cycles on water vapor diffusion in asphalt mixtures [J]. China journal of highway and transport, 2018, 31(9): 20 - 26.)
- [11] LAMP THE S, PERRATON D, BENEDETTO H D. Degradation of hot mix asphalt samples subjected to freeze-thaw cycles and partially saturated with water or brine [J]. Road materials and pavement design, 2017, 18(4): 849 - 864.
- [12] 石福周, 司伟, 马磊, 等. 基于一次二阶矩的冻融作用下沥青路面性能可靠度分析 [J]. 长安大学学报(自然科学版), 2015, 35(4): 20 - 26.  
(SHI Fuzhou, SI Wei, MA Biao, et al. Applying first order second moment to solve the reliability of asphalt pavement performance under freeze-thaw impacts [J]. Journal of Chang'an university (natural science edition), 2015, 35(4): 20 - 26.)
- [13] 杨林, 焦厚滨. 基于冻融循环蠕变特性的沥青路面车辙试验研究 [J]. 中外公路, 2016(2): 69 - 73.  
(YANG Lin, JIAO Houbin. Research on the rutting test of asphalt pavement based on the creep characteristic of freezing-thawing cycle [J]. Journal of China & foreign highway, 2016(2): 69 - 73.)
- [14] 常睿, 郝培文. 盐冻融循环对沥青混合料低温性能的影响 [J]. 建筑材料学报, 2017, 20(3): 481 - 488.  
(CHANG Rui, HAO Peiwen. Impact of freeze-thaw cycles with salt on low temperature properties of asphalt mixture [J]. Journal of building materials, 2017, 20(3): 481 - 488.)
- [15] 张倩, 李泽, 温志广, 等. 考虑荷载作用的沥青混合料冻融损伤特性研究 [J]. 冰川冻土, 2017, 39(2): 358 - 365.  
(ZHANG Qian, LI Ze, WEN Zhiguang, et al. Research on freeze-thaw damage characteristics of asphalt mixture considering load action [J]. Journal of glaciology and geocryology, 2017, 39(2): 358 - 365.)
- [16] WANG W, CHENG Y, MA G, et al. Further investigation on damage model of eco-friendly basalt fiber modified asphalt mixture under freeze-thaw cycles [J]. Applied sciences, 2019, 9(1): 60 - 75.
- [17] 刘海鹏, 蒋应军, 胡永林, 等. 级配对乳化沥青冷再生混合料强度的影响 [J]. 建筑材料学报, 2018, 21(3): 503 - 510.  
(LIU Haipeng, JIANG Yingjun, HU Yonglin, et al. Influence of gradation on strength of emulsified asphalt cold recycled mixture [J]. Journal of building materials, 2018, 21(3): 503 - 510.)
- [18] 杨彦海, 杨野, 温俊生, 等. 基于正交试验的乳化沥青冷再生材料成型养生方法试验研究 [J]. 辽宁省交通高等专科学校学报, 2014, 16(2): 1 - 5.  
(YANG Yanhai, YANG Ye, WEN Junsheng, et al. Experimental research on molding and curing for emulsified asphalt cold recycling mixture using orthogonal test [J]. Journal of Liaoning provincial college of communications, 2014, 16(2): 1 - 5.)
- [19] KIM Y, LEE H D. Performance evaluation of cold in-place recycling mixtures using emulsified asphalt based on dynamic modulus, flow number, flow time, and raveling loss [J]. KSCE journal of civil engineering, 2012, 16(4): 586 - 593.
- [20] 杨彦海, 张东, 杨野. 基于灰色关联分析法的辽宁省厂拌冷再生路面使用性能指数影响因素 [J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2019, 35(1): 124 - 132.  
(YANG Yanhai, ZHANG Dong, YANG Ye. Influencing factors of pavement performance index of central plant cold recycling based on grey correlation analysis in Liaoning province [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2019, 35(1): 124 - 132.)
- [21] XIAO J, JIANG W, YE W, et al. Effect of cement and emulsified asphalt contents on the performance of cement-emulsified asphalt mixture [J]. Construction and building materials, 2019, 220: 577 - 586.
- [22] 魏唐中, 洪锦祥, 林俊涛. 水泥与乳化沥青对冷再生强度的影响及作用机理 [J]. 建筑材料学报, 2017, 20(2): 310 - 315.  
(WEI Tangzhong, HONG Jinxiang, LIN Juntao. Effect and action mechanism of cement and emulsified asphalt on the strength of cold regeneration [J]. Journal of building materials, 2017, 20(2): 310 - 315.)
- [23] YANG Y, YANG Y, QIAN B. Performance and microstructure of cold recycled mixes using asphalt emulsion with different contents of cement [J]. Materials, 2019, 12(16): 2548 - 2558.
- [24] 杨彦海, 邬宇航, 杨野, 等. 水泥对乳化沥青冷再生材料性能影响的宏微观分析 [J]. 公路交通科技, 2018, 35(10): 1 - 8.  
(YANG Yanhai, WU Yuhang, YANG Ye, et al. Macro and micro analysis on influence of cement on performance of emulsified asphalt cold recycled material [J]. Journal of highway and transportation research and development, 2018, 35(10): 1 - 8.)