

# 生物质融雪剂腐蚀下沥青混合料的损伤特性

张倩<sup>1,2</sup>, 马浩轩<sup>1,2</sup>, 唐超<sup>1,2</sup>, 高鸿丽<sup>3</sup>

(1. 西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 陕西省岩土与地下空间工程重点实验室, 陕西 西安 710055; 3. 陕西省高速公路建设集团公司西汉分公司, 陕西 西安 710065)

**摘要** 目的 研究自行研制的三种由玉米秸秆制作的生物质融雪剂腐蚀下沥青混合料的损伤特性, 为道路材料融雪剂腐蚀损伤研究方法和手段提供参考。方法 采用干湿循环浸泡试验, 通过对受蚀前后沥青混合料力学性能变化的表征, 运用损伤力学方法分析混合料在承受荷载过程中融雪剂腐蚀对其应力-应变本构关系的影响, 探析融雪剂腐蚀和荷载耦合作用对混合料损伤扩展的影响, 并建立融雪剂腐蚀-受荷损伤演化模型。结果 三种融雪剂及对照组氯盐和纯水的腐蚀会对沥青混合料产生不利影响, 对马歇尔稳定度、劈裂强度以及抗压强度三个力学参数影响的大小顺序依次为 ZM-3, 氯盐融雪剂, ZM-2, ZM-1, 水; 对劈裂劲度模量与抗压回弹模量影响的大小顺序依次为 ZM-3, ZM-1, ZM-2, 氯盐融雪剂, 水。结论 笔者建立的沥青混合料在融雪剂腐蚀下的受荷损伤模型能较好地表征混合料总损伤度随应变的演化规律; 在四种融雪剂均能满足融雪要求的前提下考虑它们在不同受荷条件下对沥青混合料的腐蚀, 建议选用 ZM-2 融雪剂用于沥青道路融雪。

**关键词** 沥青混合料; 生物质融雪剂; 力学性能; 损伤模型

中图分类号 TU582.37; U416.217

文献标志码 A

## Corrosive Damage Characteristics of Biomass Deicers on the Asphalt Mixture

ZHANG Qian<sup>1,2</sup>, MA Haoxuan<sup>1,2</sup>, TANG Chao<sup>1,2</sup>, GAO Hongli<sup>3</sup>

(1. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an, China, 710055; 2. Shaanxi Key Lab of Geotechnical and Underground Space Engineering (XAUAT), Xi'an, China, 710055; 3. Shaanxi Provincial Expressway Construction Group Co. Xi'an Branch, Xi'an, China, 710065)

**Abstract:** Corrosion of the three corn straw developed deicers on asphalt mixture was investigated through characterization of the mechanical properties of asphalt mixture before and after the dry and wet cyclic immersion test. The impact of the deicer corrosion on the stress-strain relationship

收稿日期: 2020-02-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(52008333); 陕西省交通运输厅交通科研项目(16-14K); 浙江省公路与运输管理中心(2019H01); 衢州市科技计划项目(2019KK39)

作者简介: 张倩(1971—), 女, 副教授, 博士, 主要从事道路工程方面研究。

of the asphalt mixture under load is analyzed using damage mechanics. The coupled influence of the deicer corrosion and the load on the damage propagation of the asphalt mixture was analyzed, and the evolution mechanical model of the corrosion and load effect was established. The results show that the order of influence of the three deicers, the chlorine salt and pure water on the Marshall stability, splitting and compressive strength of asphalt mixture was ZM-3, Chlorine salt, ZM-2, ZM-1, water; while the impact order of the splitting stiffness modulus and compressive resilience modulus is ZM-3, ZM-1, ZM-2, chloride salt, water. The proposed model can describe how the damage degree of asphalt mixture evolves with the strain. This work provides a reference for the research approaches and means of corrosion damage of road materials.

**Key words:** asphalt mixture; biomass deicer; mechanical properties; damage model

喷撒高氯盐型融雪剂是世界各国目前应急保障冬季雨雪天交通安全广泛采用的方法之一,但传统氯盐类融雪剂对路面、桥梁腐蚀破坏性强,严重影响了道路及其附属设施的使用安全和寿命,对生态环境也有不良影响。目前市面销售的所谓环保型融雪剂,成分以氯化钙、氯化镁为主,其腐蚀性仍很强。针对此问题,笔者所在课题组开展有机环保道路融雪材料研发,采用水循环和碳循环技术,以秸秆粉末和土豆作为原料,经过化学预处理后,采用生化降解、生物发酵、酸碱中和联用的“一锅煮”的绿色生产方法,得到了融雪效果较好的生物质融雪剂,通过复配得到了三种配方各具特征的融雪剂 ZM-1、ZM-2、ZM-3。ZM-1 主要成分是醋酸钙镁盐, ZM-2 由生物质融雪剂与少量氯盐组成, ZM-3 则在生物质融雪剂中加入了助融雪的醇类。对三种融雪剂进行了实地撒布融雪试验,试验结果表明三种融雪剂的融雪效果良好,能够满足使用要求。

国内外对融雪剂腐蚀沥青混合料的研究,主要以传统氯盐融雪剂对混合料性能的损伤为主。如丛培良等<sup>[1]</sup>研究了除冰盐种类、温度和浸泡时间等因素对基质和改性沥青两种混合料性能的影响。周金枝和吴泽媚等<sup>[2-3]</sup>研究了氯盐的浸泡腐蚀对沥青混凝土低温抗裂性能的影响。魏建国等<sup>[4]</sup>研究分析了氯盐融雪剂对沥青结合料路用性能的影响及其作用机理。肖庆一等<sup>[5]</sup>研究了醋酸

类除冰盐对沥青混合料的侵蚀机理。Y. Edwards 等<sup>[6]</sup>开展了融雪剂对北欧飞机场道路耐久性的影响研究。Y. HASSAN, D. Christensen 和 J. Ekblad 等<sup>[7-9]</sup>研究了融雪除冰剂对机场沥青混凝土的影响。X. Shi 和 L. J. Novak 等<sup>[10-11]</sup>采用改进沸水试验方法,研究了醋酸盐对沥青混合料力学性能的影响。马芹永等<sup>[12]</sup>采用冻融劈裂试验,以冻融劈裂抗拉强度和冻融腐蚀因子评价沥青混凝土在氯盐侵蚀下强度的变化规律。王富玉等<sup>[13]</sup>基于冻融劈裂强度研究了不同浓度盐水浸泡后沥青混合料劈裂强度的变化规律。可以看出已有路用融雪剂腐蚀研究主要针对氯盐类融雪剂进行,针对生物质融雪剂的相关研究几乎没有;有关融雪剂腐蚀与荷载的耦合作用对沥青混合料影响的研究也较少。基于此,笔者依托腐蚀试验研究3种生物质复配融雪剂对沥青混合料力学性能的影响,首先运用损伤力学分析混合料在承受荷载过程中融雪剂溶液的腐蚀对其应力-应变关系的影响,其次考虑融雪剂腐蚀和荷载耦合作用,探析其对混合料损伤发展的影响,通过公式推导建立融雪剂腐蚀-受荷损伤演化模型,并对三种生物质融雪剂进行评价。

## 1 试验原材料与试验方法

### 1.1 原材料

采用韩国 SK 牌 SBS 改性沥青,粗细集料分别为闪长岩类碎石和石灰岩,级配选用

密级配沥青混合料 AC - 13 ,最佳沥青用量为 4.4% ,级配设计见表 1。

表 1 级配设计表  
Table 1 Gradation design

粒径/mm	通过率/%	粒径/mm	通过率/%
16.000	100.0	1.180	23.0
13.200	98.0	0.600	17.0
9.500	76.0	0.300	12.8
4.750	44.0	0.150	8.9
2.360	30.0	0.075	4.6

1.2 试验方法

依据《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)规定,马歇尔稳定性和劈裂强度均采用 φ101.6 mm × 63.5 mm 的小型马歇尔标准件,抗压强度与抗压回弹模量采用 φ100 mm × 100 mm 的静压试件。

采用 ZM - 1、ZM - 2、ZM - 3 三种生物质融雪剂,配制成质量分数为 20% 的溶液,对照组采用纯水和质量分数为 20% 的氯化钠溶液,在零下 5℃ 的条件下采取干湿循环浸泡进行沥青混合料腐蚀试验(见图 1)。

一个周期,腐蚀龄期设定为两个周期。浸泡结束后测定混合料马歇尔稳定度、劈裂强度、抗压强度、劈裂劲度模量、抗压回弹模量等力学指标<sup>[14-16]</sup>的数值变化。实验结果均为四个平行试件的均值,各力学指标衰减率均采用式(1)、式(2)计算。

$$\Delta_y = \frac{(R_y - R_r) \times 100}{R_y}.$$
 (1)

$$\Delta_s = \frac{(R_s - R_r) \times 100}{R_s}.$$
 (2)

式中:Δ<sub>y</sub> 为与原样试件相比测试指标衰减率,% ;Δ<sub>s</sub> 为与水浸泡试件相比测试指标衰减率,% ;R<sub>y</sub> 为原样试件的指标测试值;R<sub>s</sub> 为经水浸泡试件的指标测试值;R<sub>r</sub> 为经融雪剂浸泡试件的指标测试值。

2 融雪剂腐蚀试验结果

2.1 马歇尔稳定度变化

试验操作依据《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)中 T0709—2011 方法进行,试验结果如图 2 所示。

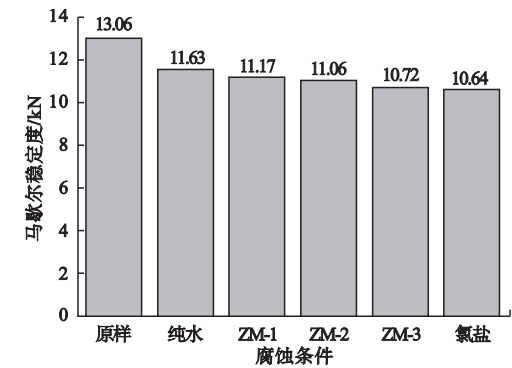


图 2 经融雪剂腐蚀后马歇尔稳定度试验结果  
Fig. 2 The test result of Marshall stability after deicer corrosion

试验结果表明三种生物质融雪剂干湿循环浸泡对马歇尔稳定度的影响程度要小于氯盐融雪剂。

2.2 间接拉伸试验

采用经融雪剂干湿循环浸泡后的马歇尔试件,依据《公路工程沥青及沥青混合料试

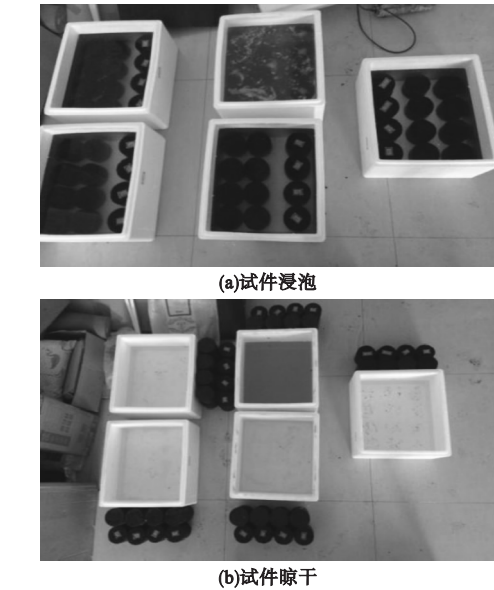


图 1 干湿循环浸泡

Fig. 1 The dry and wet cycle corrosion immersion test  
试件在融雪剂中浸泡 5 d,然后室温条件下放置 2 d 为一个干湿循环,3 个干湿循环为

验规程》(JTG E20—2011) T0716—2011,利用万能试验机进行间接拉伸试验,试验温度采用  $(15 \pm 0.5)^\circ\text{C}$ ,加载速率采用  $50\text{ mm/min}$ ,如图 3 所示。



图 3 间接拉伸试验

Fig.3 Indirect tension test

材料应力-应变关系包含重要的力学性能特征。为分析融雪剂对沥青混合料造成的损伤,对比经不同环境浸泡后沥青混合料的间接拉伸应力-应变曲线,考察其变化规律;然后通过分析劈裂破坏劲度模量以及临界应变能密度,以混合料间接拉伸性能判别融雪剂造成的损伤。

间接拉伸应力-应变曲线采用经 5 种腐蚀环境干湿循环浸泡作用后,利用万能材料试验机得到的荷载-位移原始数据,其劈裂抗拉强度及破坏劲度模量计算公式如下:

$$R_T = 0.006\,287 P_T / h. \tag{3}$$

$$\varepsilon_T = X_T \times (0.030\,7 + 0.093\,6\mu) / (1.35 + 5\mu). \tag{4}$$

$$S_T = P_T \times (0.27 + 1.0\mu) / (h \times X_T). \tag{5}$$

式中: $R_T$  为劈裂抗拉强度,MPa; $\varepsilon_T$  为破坏拉伸应变; $S_T$  为破坏劲度模量,MPa; $\mu$  为泊松比; $P_T$  为试验荷载的最大值,N; $h$  为试件高度,mm; $X_T$  为相应于最大破坏荷载时水平方向的总变形,mm。由于试验环境温度为  $15\text{ }^\circ\text{C}$ ,因此泊松比选用试验规程中的推荐值 0.30。

选取各腐蚀条件下与其测定的劈裂强度均值大小最接近的试件作为该条件下应力-应变曲线数据的来源,将试验数据通过计算转换成相应的应力应变后绘制间接拉伸应

力-应变曲线见图 4,计算结果如图 5、图 6、图 7 所示。

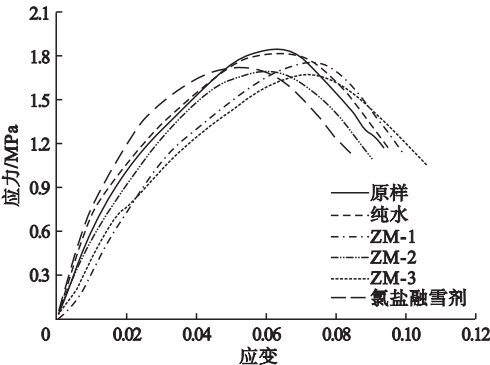


图 4 间接拉伸应力-应变曲线

Fig.4 Indirect tensile stress-strain curve

图 4 中同一应力水平下经 4 种条件浸泡后混合料的应力-应变曲线在横向分布在原样试件曲线两侧。氯盐融雪剂浸泡混合料后会使其“变硬”,随着应力增加应变增加幅度相对较小,故其应力-应变曲线分布在原样试件的左侧;而 ZM-1 和 ZM-3 为醋酸盐类融雪剂,会使混合料“软化”,所以其应变增加幅度相对较大,曲线在原样试件右侧;ZM-2 融雪剂为有机化合物和无机化合物的复配,其应力-应变曲线在到达峰值应力前位于原样曲线的右侧,到达峰值应力后位于原样曲线左侧。

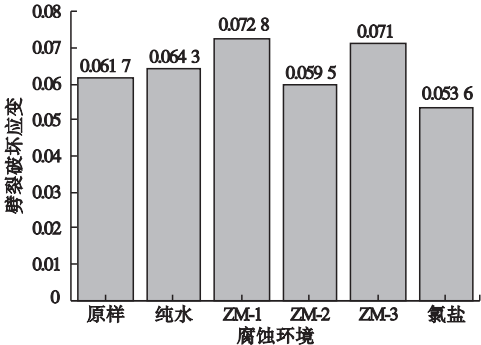


图 5 经融雪剂腐蚀后混合料的劈裂破坏应变

Fig.5 Splitting failure strain of mixture after deicer corrosion

劈裂破坏应变作为混合料受荷时变形程度的评判指标,能够反映 4 种融雪剂腐蚀对沥青混合料变形性能的影响,图 5 显示氯盐



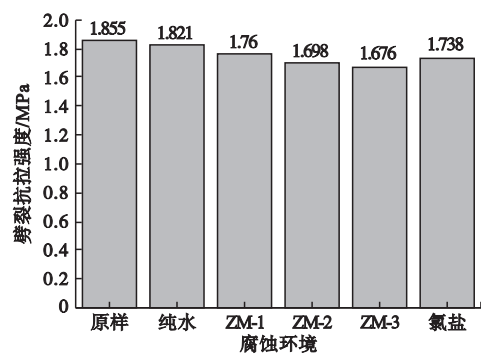


图 6 经融雪剂腐蚀后混合料的劈裂抗拉强度

Fig. 6 Splitting tensile strength of mixture after deicer corrosion

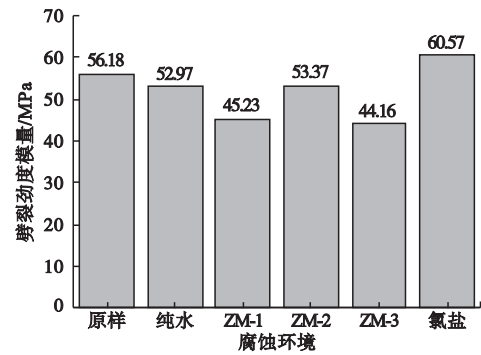


图 7 经融雪剂腐蚀后混合料的劈裂刚度模量

Fig. 7 Splitting stiffness modulus of mixture after deicer corrosion

融雪剂与 ZM-2 浸泡后试件变形性能降低,而 ZM-1 与 ZM-3 浸泡试件的变形性能增强,验证了氯盐类融雪剂会使混合料变硬从而使得模量提高,而 ZM-1 与 ZM-3 等醋酸类融雪剂则使混合料模量减小。

为表征经不同融雪剂腐蚀后沥青混合料性能的差异,利用拉应变准则的应变能密度指标,从能量角度研究融雪剂的腐蚀性,临界应变能密度指混合料到达峰值应力时,应力-应变曲线与应变横轴所围成的面积,混合料临界应变能密度对比情况如图 8 所示。

根据图 8,从能量角度分析,经氯盐融雪剂和 ZM-2 融雪剂腐蚀后混合料释放能减小,吸收能增加,而 ZM-1 和 ZM-3 融雪剂会使得沥青混合料的释放能增加,吸收能减小。

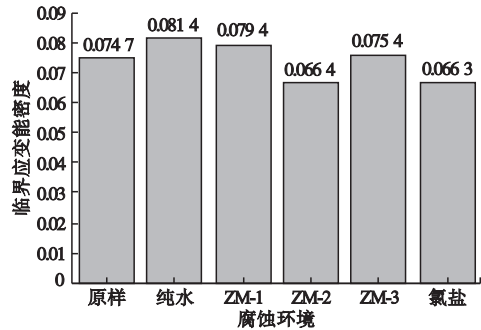


图 8 混合料临界应变能密度对比

Fig. 8 Comparison of critical strain energy density of mixtures

2.3 单轴压缩试验

单轴压缩试验利用万能试验机,依据《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)进行,试验温度选取 20 ℃,加载速率 2 mm/min,直至试件破坏为止,记录峰值荷载。

选取各环境条件下与其测定的抗压强度均值大小最接近的试件作为该环境下应力-应变曲线的数据来源,其抗压强度及抗压回弹模量的计算公式如下:

$$R_c = 4P / \pi d^2 \tag{6}$$

$$q_i = 4P_i / \pi d^2 \tag{7}$$

$$E' = q_5 h / \Delta L_5 \tag{8}$$

式中: $R_c$  为试件的抗压强度,MPa; $P$  为试件破坏时的最大荷载,N; $d$  为试件直径,mm; $q_i$  为相应于各级试验荷载  $P_i$  作用下的压强,MPa; $P_i$  为施加于试件的各级荷载值,N; $E'$  为抗压回弹模量,MPa; $q_5$  为相应于第 5 级荷载(0.5P)时的荷载压强,MPa; $h$  为试件轴心高度,mm; $\Delta L_5$  为相应于第 5 级荷载(0.5P)时经原点修正后的回弹变形,mm。

将数据通过计算转换成相应的应力应变后绘制单轴压缩应力-应变曲线见图 9,计算结果如图 10、图 11、图 12 所示。

图 9 中,4 种融雪剂腐蚀后的混合料单轴压缩应力-应变曲线走势基本相同,峰值应力与原样相比存在不同程度减小,纯水浸泡后混合料的应力应变曲线介于原样与融雪

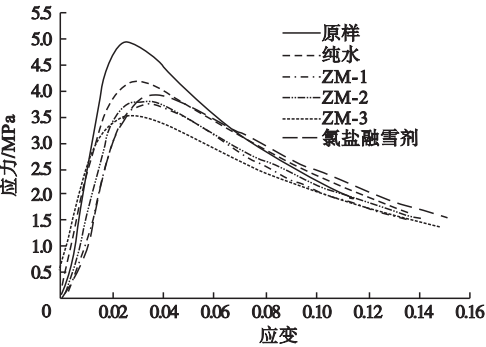


图 9 混合料单轴压缩破坏应力 - 应变曲线

Fig. 9 Stress-strain curve of mixture under uniaxial compression

剂浸泡的混合料之间。经不同腐蚀作用后混合料峰值应力所对应的应变变化存在差异性,纯水与 ZM - 3 融雪剂处治后的混合料峰值应变与原样相比变化相对较小,另外 3 种融雪剂处治后的混合料峰值应变与原样相比则有一定程度的增加。

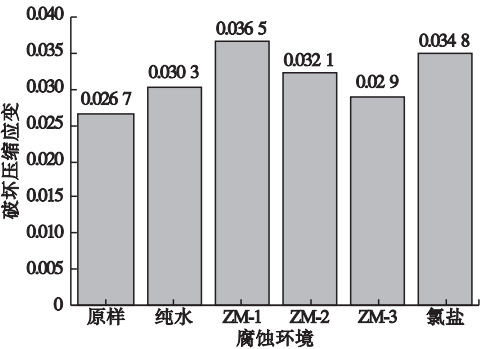


图 10 经融雪剂腐蚀后混合料的破坏压缩应变

Fig. 10 Compression failure strain of mixture after deicer corrosion

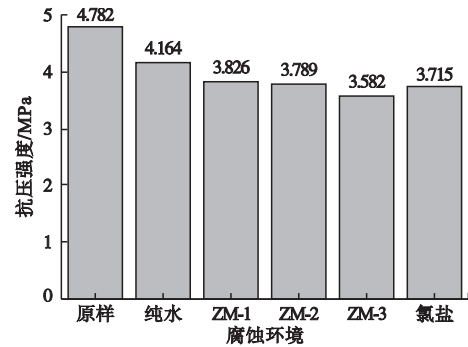


图 11 经融雪剂腐蚀后混合料的抗压强度

Fig. 11 Compressive strength of mixture after deicer corrosion

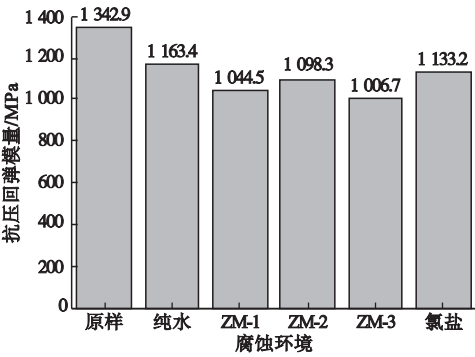


图 12 经融雪剂腐蚀后混合料的抗压回弹模量

Fig. 12 Compression rebound modulus of mixture after deicer corrosion

沥青混合料经不同腐蚀环境作用后与原样相比,单轴压缩破坏应变均存在不同程度增大,抗压回弹模量则存在不同程度减小,表明混合料经过融雪剂作用后抵抗变形能力降低,其中 ZM - 3 融雪剂对沥青混合料抗压性能影响最大,氯盐融雪剂与 ZM - 2 次之,ZM - 1 融雪剂的影响最小。上述规律与间接拉伸破坏应变的规律不同,说明经不同种类融雪剂干湿循环腐蚀后,所造成的沥青混合料应变变化的差异性与其受力特征有关。

### 3 基于融雪剂腐蚀沥青混合料应力 - 应变特性的受荷损伤演化模型

#### 3.1 损伤机理分析

沥青混合料由于融雪剂干湿循环的腐蚀作用,微裂隙、微空洞等微观缺陷会产生扩展,逐渐形成裂缝、剥落、松散等病害。其原因一方面是融雪剂电离出的离子渗入沥青内部,使得一些沥青分子之间的链接断裂,降低了沥青的粘结能力,导致试件经融雪剂浸泡过后更容易出现强度破坏;同时融雪剂离子对集料也有腐蚀作用。另一方面是在干湿循环浸泡环境下,融雪剂溶液浸入到沥青与集料的表面,这部分融雪剂在干燥以后会在沥青膜与集料之间形成结晶从而降低沥青与集料之间的粘附性,导致试件抵抗破坏的能力减弱。因此,笔者依据间接拉伸和单轴压缩

的试验结果,建立受荷损伤演化模型,进行受荷损伤演化分析。

### 3.2 模型的建立

由于融雪剂浸泡腐蚀,加剧了沥青混合料内部细观结构损伤累积,表现为宏观物理力学性能的变化,为了反映混合料内部的衰变程度,选取劈裂劲度模量或抗压回弹模量作为损伤控制变量,定义融雪剂干湿循环腐蚀引起的损伤如下:

$$D_r = 1 - E_r/E_0. \quad (9)$$

式中: $D_r$  为腐蚀损伤因子; $E_r$  为腐蚀一定时间后的劈裂劲度模量或抗压回弹模量; $E_0$  为受腐蚀时的劈裂劲度模量或抗压回弹模量。

考虑到沥青混合料普遍存在初始缺陷,故将其腐蚀前初始损伤状态定义为基准损伤状态,由 J. Lemaitre 提出的应变等效假设,可得沥青混合料损伤本构关系为

$$\sigma = E_0(1 - D_s)\varepsilon. \quad (10)$$

式中: $\varepsilon$  为应变; $D_s$  为受荷损伤因子。

将融雪剂腐蚀作用定义为一种膨胀力,则沥青混合料的受荷损伤就可以等效成融雪剂腐蚀损伤与受荷损伤的叠加。将 Lemaitre 提出的应变等价原理假设进行推广<sup>[17-18]</sup>,将融雪剂干湿循环作用引起的沥青混合料损伤状态定义为第一种损伤状态,融雪剂腐蚀后经受荷载引起的损伤状态定义为第二种损伤状态,可得沥青混合料经融雪剂腐蚀损伤本构方程为

$$\sigma = E_r(1 - D_s)\varepsilon. \quad (11)$$

采用融雪剂腐蚀和受荷总损伤变量  $D_z$  表示沥青混合料腐蚀受荷应力-应变关系<sup>[19]</sup>,可写成:

$$\sigma = E_0(1 - D_z)\varepsilon. \quad (12)$$

$$D_z = D_r + D_s - D_r D_s. \quad (13)$$

式中: $D_z$  为沥青混合料融雪剂腐蚀受荷总损伤因子; $D_r D_s$  为耦合项。

融雪剂-荷载耦合作用加剧了沥青混合料细观结构的损伤累积,宏观表现为物理力学性能的衰减。因此,将劈裂劲度模量作为

对细观结构变化的描述,基于沥青混合料是一种各类缺陷随机分布的复合非均质材料,其损伤程度在各因素综合作用下也呈概率性分布,假设沥青混合料微元体强度服从 Weibull 分布,其概率密度函数<sup>[20]</sup>为

$$P(\varepsilon) = \frac{m}{F} \left( \frac{\varepsilon}{F} \right)^{m-1} e^{-\left(\frac{\varepsilon}{F}\right)^m}. \quad (14)$$

式中: $\varepsilon$  为混合料应变值; $m$ 、 $F$  为表征材料物理力学性质的参数,分别反映材料受外荷载不同响应下的统计特征,通常与模量  $E$ 、泊松比  $\nu$  等材料参数有关。

假定混合料的损伤是由于局部微元体不均匀破坏所引起,将某一荷载下已破坏的微元体个数  $N_c$  与总微元体个数  $N$  之比定义为统计损伤度  $D_s$ 。在任意应变区间  $[\varepsilon, \varepsilon + d\varepsilon]$  内,产生破坏的微元体个数为  $NP(x)d\varepsilon$ ,当加载至某一应变水平  $\varepsilon$  时,已破坏的微元体个数可以表示为

$$N_c(\varepsilon) = N \int_0^\varepsilon P(x) dx = N \left[ 1 - e^{-\left(\frac{\varepsilon}{F}\right)^m} \right]. \quad (15)$$

式中: $\varepsilon_f$  为应力-应变曲线峰值应力所对应的峰值应变。

将式(15)代入  $D_s = N_c/N$  中,可得:

$$D_s = 1 - e^{-\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_f}\right)^m}. \quad (16)$$

联立式(10)、式(16),同时依据应力-应变曲线上的峰值强度进行推导,可得损伤统计本构模型参数  $m$  的计算公式为

$$m = 1 / \ln \left( \frac{E_0 \varepsilon_f}{\sigma_f} \right). \quad (17)$$

式中: $\sigma_f$  为应力-应变曲线的峰值应力; $E_0$  为原样试件的劈裂劲度模量。

联立式(9)、式(13)、式(16),得到以融雪剂腐蚀和应变为损伤控制变量的总损伤演化方程为

$$D_z = 1 - \frac{E_r}{E_0} e^{-\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_f}\right)^m}. \quad (18)$$

当仅考虑融雪剂腐蚀损伤时,受荷应变  $\varepsilon = 0$ ,得到  $D_z = D_r$ ;而当仅考虑受荷损伤时,

$E_r = E_0$ , 从而  $D_z = D_s$ 。

3.3 基于间接拉伸应力-应变特性的受荷损伤模型分析

当采用劈裂劲度模量作为控制变量时,该损伤演化方程相应的参数值如表2所示。

表2 间接拉伸破坏损伤演化方程的参数值

腐蚀环境	参数					
	$E_0/\text{MPa}$	$E_r/\text{MPa}$	$E_r/E_0$	$\sigma_f/\text{MPa}$	$\varepsilon_f$	$m$
原样	56.18	56.18	1.000	1.855	0.061 7	1.599
纯水	56.18	52.97	0.943	1.821	0.064 3	1.460
ZM-1	56.18	45.23	0.805	1.760	0.072 8	1.186
ZM-2	56.18	53.37	0.950	1.698	0.059 5	1.476
ZM-3	56.18	44.16	0.786	1.676	0.071 0	1.153

将表2计算所得的参数值代入损伤演化方程(18),得到总损伤度  $D_z$  与  $\varepsilon/\varepsilon_f$  的函数关系曲线,如图13所示。

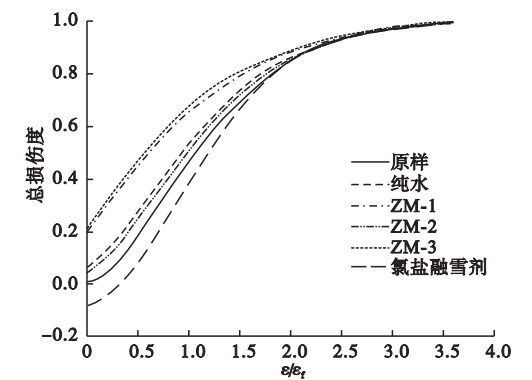


图13 受融雪剂腐蚀后混合料间接拉伸损伤演化函数曲线

Fig.13 Indirect tensile damage evolution curve of mixture after deicer corrosion

图13中,经融雪剂腐蚀后混合料的总损伤度  $D_z$  在失效破坏前呈现加速增长趋势直至完全破坏。不同腐蚀环境的混合料损伤演化曲线差异性比较明显,除氯盐融雪剂处治试件初始损伤度为负值外,其余均为正值,表明氯盐融雪剂与其他融雪剂对混合料造成的损伤性质不同,若以与原样损伤演化曲线的相似度作为融雪剂腐蚀与间接拉伸损伤程度的评判基准,ZM-2的曲线与原样曲线最相似,则ZM-2融雪剂对混合料的影响最小。

3.4 基于单轴压缩应力-应变特性的受荷损伤模型分析

当采用抗压回弹模量作为控制变量时,该损伤演化方程相应的参数值如表3所示。

表3 单轴压缩破坏损伤演化方程的参数值

腐蚀环境	参数					
	$E_0/\text{MPa}$	$E_r/\text{MPa}$	$E_r/E_0$	$\sigma_f/\text{MPa}$	$\varepsilon_f$	$m$
原样	134.9	1 342.9	1.000	4.926 241	0.026 66	0.504
纯水	1 342.9	1 163.4	0.866	4.163 808	0.030 27	0.439
ZM-1	1 342.9	1 044.5	0.778	3.890 308	0.036 54	0.395
ZM-2	1 342.9	1 098.3	0.818	3.809 708	0.032 07	0.412
ZM-3	1 342.9	1 006.7	0.750	3.515 520	0.028 74	0.417

将表3中计算所得的损伤演化方程参数值代入函数方程(18),得到总损伤度  $D_z$  与

$\varepsilon/\varepsilon_f$  的函数关系曲线,如图14所示。



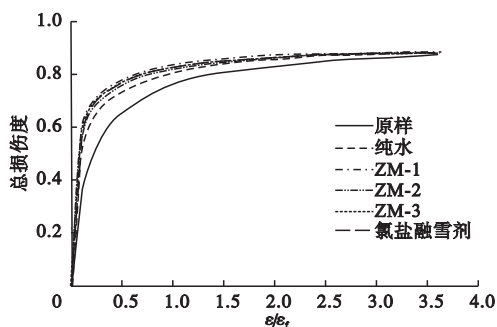


图 14 受融雪剂腐蚀后混合料单轴压缩损伤演化函数曲线

Fig. 14 Uniaxial compression damage evolution curve of mixture after deicer corrosion

图 14 中,经不同环境腐蚀后混合料总损伤度均随应变增加而增加,趋势基本相同。在达到峰值荷载应力前损伤度增加较快,且腐蚀后的混合料损伤度增长较原样要快。与间接拉伸损伤曲线相比,单轴压缩破坏曲线初期损伤度增加幅度更大,速度更快;应变达到峰值而失效破坏后,各腐蚀环境混合料损伤度均接近 1。在同一应变水平下 ZM-1 融雪剂处治后的混合料损伤度最大,ZM-2、ZM-3 和氯盐融雪剂处治后的混合料损伤度比 ZM-1 的小,原样混合料损伤度最小,纯水腐蚀混合料的损伤度介于融雪剂处治混合料与原样混合料之间。若以与原样损伤演化曲线的相似度作为融雪剂腐蚀间接拉伸损伤程度的评判基准,纯水和 ZM-2 的曲线与原样曲线最相似,则 ZM-2 融雪剂对混合料的影响最小。

沥青混合料在单轴压缩作用下达到峰值应力失效破坏时,原样与 5 种腐蚀环境处治后的试件损伤度在 0.85 ~ 0.95。而在间接拉伸损伤演化曲线中,达到峰值应力失效破坏时,原样与 5 种腐蚀环境处治后的试件损伤度在 0.3 ~ 0.7,要比单轴压缩破坏的损伤度小很多,说明融雪剂的腐蚀作用对沥青混合料抗压性能的影响要比间接拉伸性能的影响大。

## 4 结 论

(1) 由于融雪剂的成分各具特征,经 4

种融雪剂干湿循环腐蚀后,对试件的马歇尔稳定度、劈裂强度、抗压强度以及试件的劈裂劲度模量与抗压回弹模量的影响不同,表明醋酸钙镁、有机无机结合类融雪剂和含有醇类的生物质融雪剂对沥青混合料的影响机理不同,因而影响结果有差异。

(2) 比较经不同融雪剂干湿循环浸泡腐蚀前后沥青混合料间接拉伸与单轴压缩破坏应力-应变曲线及相关的指标参数,由不同融雪剂腐蚀后所产生的变化表现为:经 ZM-1 和 ZM-3 浸泡的试件,其劈裂破坏应变增大,变形能力增强,释放能增加,吸收能减小;经 ZM-2 浸泡的试件,其劈裂破坏应变减小,变形能力降低,释放能减小,吸收能增加;从能量角度分析,ZM-1 与 ZM-3 两种生物质融雪剂对沥青混合料间接拉伸性能的影响相似,ZM-2 与氯盐融雪剂对沥青混合料间接拉伸性能的影响相似;与原样相比,试件经三种生物质融雪剂浸泡后的单轴压缩破坏应变均存在不同程度的增大,其相对大小顺序依次为 ZM-1, ZM-2, ZM-3。

(3) 受荷损伤模型计算表明,融雪剂腐蚀与荷载耦合作用会使得混合料总损伤程度加剧,呈非线性增长趋势;经 ZM-2 浸泡的沥青混合料间接拉伸和单轴压缩损伤演化曲线与原样最为相似,表明有机无机结合的 ZM-2 生物质融雪剂对沥青混合料的影响程度最小。

## 参考文献

- [1] 丛培良,陈拴发,陈华鑫. 除冰盐对沥青混凝土性能的影响[J]. 公路,2011(6):180-184. ( CONG Peiliang, CHEN Shuanfa, CHEN Huaxin. Effect of deicing salt on performance of asphalt concrete [J]. Highway, 2011(6): 180-184. )
- [2] 周金枝,郑建华. 氯盐侵蚀下沥青混凝土低温性能试验研究[J]. 中外公路,2011,31(5):215-217. ( ZHOU Jinzhi, ZHENG Jianhua. Experimental study on low temperature performance of asphalt concrete under chloride etching [J]. Journal of China & foreign highway, 2011, 31(5):215-217. )

- [3] 吴泽媚,高培伟,陈东丰,等.氯盐融雪剂对沥青混合料低温抗裂性的影响[J].公路工程,2012,37(4):26-30.  
(WU Zemei, GAO Peiwei, CHEN Dongfeng, et al. Effect of chlorine deicers on performance of low temperature crack resistance of asphalt mixture[J]. Highway engineering, 2012, 37(4):26-30.)
- [4] 魏建国,傅广文,付其林.氯盐融雪剂对沥青结合料路用性能的影响[J].交通运输工程学报,2014,14(4):7-13.  
(WEI Jianguo, FU Guangwen, FU Qilin. Influence of chlorine salt snow-melting agent on road performance of asphalt binder[J]. Journal of traffic and transportation engineering, 2014, 14(4):7-13.)
- [5] 肖庆一,王玉宝,胡海学,等.醋酸类除冰盐侵蚀沥青混合料机理研究[J].武汉大学学报(工学版),2015,48(2):187-190.  
(XIAO Qingyi, WANG Yubao, HU Haixue, et al. Mechanism of acetate-based deicer eroding asphalt mixture[J]. Engineering journal of Wuhan university, 2015, 48(2):187-190.)
- [6] EDWARDS Y, ROLLÉN J, LANGE G, et al. Durability problems on nordic airfields: the influence of deicing agents on asphalt concrete pavements[M]. DiVA-academic archive online, 1999.
- [7] HASSAN Y, ABD E H A O, ELDESOUKY A, et al. Effects of new and conventional deicing chemicals on airfield asphalt concrete pavement[C]. International conference on the bearing capacity of roads & airfields, 2002.
- [8] CHRISTENSEN D, MALLELA E, HEIN J, et al. Effect of deicing and anti-icing chemicals on HMA airfield runways[C]. 2010 FAA worldwide airport technology transfer conference, 2010.
- [9] EKBLAD J, EDWARDS Y. Precision of LFV method 2-98: effect of de-icing fluid on the surface tensile strength of asphalt concrete for airfields-adhesion test[R]. Sweden: AVD for Vagteknik, 2001.
- [10] SHI Xianmin, AKIN M, PAN Tongyan, et al. Deicer impacts on pavement materials: introduction and recent developments[J]. Open civil engineering journal, 2009, 3:16-27.
- [11] NOVAK L J, HOLTZE K, KENT R A, et al. Acute toxicity of storm water associated with de-icing/anti-icing activities at Canadian airports[J]. Environmental toxicology & chemistry, 2000, 19(7):1846-1855.
- [12] 马芹永,吴金荣,秦凯.氯盐对沥青混凝土冻融劈裂抗拉强度影响的试验与分析[J].冰川冻土,2013,35(5):1202-1208.  
(MA Qinyong, WU Jinrong, QIN Kai. Tests and analyses of the influence of chlorine salt on freezing-thawing splitting tensile strength of asphalt concrete[J]. Journal of glaciology and geocryology, 2013, 35(5):1202-1208.)
- [13] 王富玉,马晨,马桂荣.氯盐对沥青混合料劈裂抗拉强度影响的试验研究[J].工程与试验,2017,57(2):23-26.  
(WANG Fuyu, MA Chen, MA Guirong. Study on influence of chloride salt on splitting tensile strength of bituminous mixture[J]. Engineering & test, 2017, 57(2):23-26.)
- [14] 刘宝奎.盐冻融作用下沥青混合料性能及破坏机理研究[D].西安:长安大学,2017.  
(LIU Baokui. Study on the performance and failure mechanism of asphalt mixture under the action of salt freeze-thaw[D]. Xi'an: Chang'an University, 2017.)
- [15] 虎见.冻融循环作用下的沥青混合料力学参数研究[D].西安:长安大学,2011.  
(HU Jian. Study on mechanical parameters of asphalt mixture under freeze-thaw cycle[D]. Xi'an: Chang'an University, 2011.)
- [16] 张洪刚.水-温冻融条件下沥青路面病害特征及发展机理[D].长沙:长沙理工大学,2010.  
(ZHANG Honggang. Damage characteristics and development mechanism of asphalt pavement under freezing and thawing conditions[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2010.)
- [17] 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.)
- [18] 刘娟红,赵力,宋少民,等.混凝土硫酸盐腐蚀损伤的声波与声发射变化特征及机理[J].工程科学报,2016,38(8):1075-1081.  
(LIU Juanhong, ZHAO Li, SONG Shaomin, et al. Characteristics and mechanism of acoustic emission and acoustic wave in concrete sulfate corrosion damage[J]. Chinese journal of engineering, 2016, 38(8):1075-1081.)
- [19] 李新平,路亚妮,王仰君.冻融荷载耦合作用下单裂隙岩体损伤模型研究[J].岩石力学与工程学报,2013,32(11):2307-2315.  
(LI Xinping, LU Yani, WANG Yangjun. Research on damage model of single jointed rock masses under coupling action of freeze-thaw and loading[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2013, 32(11):2307-2315.)
- [20] 张我华,孙林柱,王军,等.随机损伤力学与模糊随机有限元[M].北京:科学出版社,2011.  
(ZHANG Wohua, SUN Linzhu, WANG Jun, et al. Random damage mechanics and fuzzy stochastic finite element[M]. Beijing: Science Press, 2011.)

(责任编辑:刘春光 英文审校:范丽婷)