

# 沥青混凝土冻融断裂特性与损伤机理研究

王学军<sup>1</sup>, 张向东<sup>1</sup>, 李 军<sup>1</sup>, 陈海涛<sup>2</sup>, 王凤池<sup>3</sup>

(1. 辽宁工程技术大学土木工程学院, 辽宁 阜新 123000; 2. 辽宁农业职业技术学院基建处, 辽宁 营口 115009; 3. 沈阳建筑大学交通工程学院, 辽宁 沈阳 110168)

**摘要** 目的 研究冻融循环对沥青混凝土抗剪强度参数、弹性模量及断裂性能的影响规律, 为防治季冻区路面冻融灾害提供科学依据。方法 采用冻融循环试验和三轴压缩试验测定沥青混凝土的抗剪强度参数变化规律; 采用半圆劈裂试验研究冻融循环对沥青混凝土断裂性能的影响规律; 基于 ABAQUS 数值计算软件 XFEM 扩展元程序模拟沥青混凝土裂隙动态扩展规律, 并对开裂过程的损伤耗散能进行动态采集; 基于 Griffith 断裂理论推导出拉-剪组合状态下沥青混凝土 I 型、II 型断裂应力强度因子计算方法, 揭示裂隙倾角对沥青混凝土裂隙扩展路径的影响机理。结果 沥青混凝土的抗剪强度、弹性模量及弯拉强度均随着冻融循环次数增加出现降低的现象; 沥青混凝土车辙深度随冻融循环次数增多而增长; 沥青混凝土的抗高温变能力随循环性次数增多而逐渐弱化。结论 椭圆形断裂强度准则可较好地描述冻融效应下沥青混凝土复合裂隙断裂韧性特征, 所提出的应力强度因子可较好地描述沥青混凝土开裂特征; 开展本研究对于季冻区沥青混凝土路面冻融灾害防治具有重要意义。

**关键词** 沥青混凝土; 冻融循环; XFEM; 应力强度因子; 断裂韧性

中图分类号 TU528.42; U416

文献标志码 A

## Study on Freeze-Thaw Fracture Characteristics and Damage Mechanism of Asphalt Concrete

WANG Xuejun<sup>1</sup>, ZHANG Xiangdong<sup>1</sup>, LI Jun<sup>1</sup>, CHEN Haitao<sup>2</sup>, WANG Fengchi<sup>3</sup>

(1. School of Civil Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin, China, 123000; 2. Capital Construction Department, Liaoning Agricultural Vocational and Technical College, Yingkou, China, 115009; 3. School of Transportation Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

**Abstract:** The influence of freeze-thaw cycles on the shear strength parameters, elastic modulus and fracture performance of asphalt concrete is studied to provide a scientific basis for the prevention and control of freeze-thaw disasters of pavement in seasonal frozen area. The change

收稿日期: 2020-10-31

基金项目: 国家自然科学基金项目(51774166); 辽宁省教育厅基金项目(lnqn201904)

作者简介: 王学军(1971—), 男, 教授研究员级高级工程师, 主要从事岩土工程方面研究。

rules of shear strength parameters of asphalt concrete are determined by freeze-thaw cycle experiment and triaxial compression test, and the influence of freeze-thaw cycles on the fracture performance of asphalt concrete is studied by semicircle splitting experiment. Based on the ABAQUS software XFEM, the dynamic crack propagation law of asphalt concrete is simulated, and the damage dissipation energy in the cracking process is collected dynamically. Based on Griffith fracture theory, the calculation methods of mode I and mode II fracture stress intensity factors of asphalt concrete under tension shear combination state are derived, and the influence mechanism of crack inclination angle on crack propagation path of asphalt concrete is revealed. The shear strength, elastic modulus and flexural tensile strength of asphalt concrete decrease with the increase of freeze-thaw cycles. The elliptical fracture strength criterion is better. The proposed stress intensity factor can better describe the cracking characteristics of asphalt concrete. This study is of great significance for the prevention and control of freeze-thaw disaster of asphalt concrete pavement in seasonal frozen area.

**Key words:** asphalt concrete; freeze-thaw cycle; XFEM; stress intensity factor; fracture toughness

沥青混凝土是将具有一定级配的碎石和沥青砂浆拌合在一起的胶凝材料,具有较好的稳定性和耐磨耗能力,是高等级路面铺装的主要形式。由于荷载和环境造成的沥青路面开裂普遍存在于服役的各个阶段。在我国东北地区,冻融循环作用对沥青路面裂隙扩展影响显著,由冻融和行车荷载产生的车辙、松散、坑槽及翻浆冒泥病害现象频繁发生,严重影响沥青路面的质量与寿命,因此研究冻融循环作用下沥青混凝土的断裂性能对揭示冻融损伤演化过程具有十分显著工程意义。

沥青路面的安全与稳定性一直是路基路面工程领域重要的研究方向,近些年一大批国内外学者在冻融对沥青混凝土影响方面开展大量研究,取得一些有意义的研究成果。李东庆等<sup>[1]</sup>采用劈裂实验作为测试手段,研究冻融循环对沥青混凝土劈裂抗拉强度的影响。夏文杰<sup>[2]</sup>采用弯拉实验和工业 CT 无损检测实验研究冻融循环对沥青混凝土弯拉性能和细观孔隙结构的影响规律。王岚等<sup>[3]</sup>采用半圆弯拉实验和数字散斑技术研究冻融循环对改性沥青混凝土低温抗裂性能的影响。杨海华等<sup>[4]</sup>采用马歇尔击实实验和冻融循环实验,研究孔隙率对沥青混凝土冻融稳定性的影响。吴金荣等<sup>[5]</sup>采用冻融劈裂实验研究氯盐和冻融循环共同作用下沥青混

凝土的寿命与冻融温度和冻融次数之间的关系。康成等<sup>[6]</sup>针对三种不同级配沥青混凝土,研究了在盐溶液和清水作用下沥青混凝土的疲劳性能,并分析了疲劳破坏的影响机理。崔亚楠等<sup>[7]</sup>采用动态剪切流变实验对 SBS 改性沥青混凝土的流变性能进行测试,并采用原子力显微镜对发生剪切流变的微细观结构进行测试。在沥青混凝土断裂性能研究方面,R. Martin 等<sup>[8]</sup>采用三点弯曲实验对沥青混凝土裂纹愈合能力进行研究,研究发现乳化沥青使得沥青混凝土具有很好的自愈能力。周庆华等<sup>[9]</sup>利用有限元软件模拟小梁疲劳试验,对高模量沥青混凝土与普通混凝土疲劳断裂性能进行比较,使得路面的抗开裂性能得到改善。田小葛等<sup>[10]</sup>通过对带有预制裂隙的半圆形试件进行不同温度与裂隙位置的三点弯曲实验,研究临界强度因子的变化规律。钱振东等<sup>[11]</sup>采用离散元方法模拟了沥青混凝土小梁弯曲试验,并借助数字图像拍摄技术监测裂隙发展规律,研究了裂隙张口位移的变化规律。A. Laurent 等<sup>[12]</sup>研究发现,在沥青混凝土圆柱形试件疲劳试验过程中,随着冻融循环次数增加,超声波速度和振幅均会降低。

学者们在沥青混凝土冻融稳定性和断裂性能方面做了大量研究,但是很少对沥青混

凝土断裂过程中能量变化规律进行分析,从微裂隙的萌生到宏观裂隙的形成,再到破坏失稳始终伴随着耗散能的显著变化。基于此,笔者拟采用三轴剪切试验研究冻融循环对沥青混凝土剪切强度的影响,通过 CT 扫描的方法研究冻融损伤过程中的试样内部孔隙变化规律;利用 ABAQUS 数值模拟软件对裂隙的扩展规律和耗散能变化进行模拟,研究沥青路面在冻融循环作用下力学性能变化规律与损伤演化机理,为路面灾害防治提供科学依据。

1 试验测试

1.1 原材料特性与试样制备

笔者所选沥青为 70#重交道路石油沥青,沥青的常规实验严格按照《公路工程沥

青及沥青混合料试验规程》(JTJ E20—2011)执行,沥青的相关技术指标见表 1。集料是沥青混合料的重要组成部分,对其性能起着重要的作用,笔者采用的集料来自宫八线大修改造工程,均为玄武岩,相关技术指标见表 2,矿粉为粉碎的石灰石,相关技术指标见表 3。集料与矿粉测定方法符合《公路工程集料试验规程》(JTG E42—2005)的要求。级配曲线如图 1 所示。

表 1 沥青的技术指标

Table 1 Technical indexes of asphalt			
技术指标	针入度/0.1 mm (100 g, 5 s, 25 ℃)	延度(15 ℃)/ cm	软化点 $T_{R\&B}/^{\circ}\text{C}$
技术要求	60 ~ 80	$\geq 100$	$\geq 45$
测试结果	78	125	49.8

表 2 粗集料技术指标

Table 2 Technical index of coarse aggregate					
技术指标	压碎值/%	磨耗值/%	吸水率/%	相对密度	扁平颗粒质量分数/%
试验值 1	14.6	16.8	0.62	2.892	9.1
试验值 2	—	—	0.48	2.885	8.8
技术要求	$\leq 26$	$\leq 28$	$\leq 2.0$	$\geq 2.60$	$\leq 15$

注:试验值 1 为粒径 10 ~ 20 mm 情况下所得;试验值 2 为粒径 5 ~ 10 mm 情况下所得。

表 3 矿粉的技术指标

Table 3 Technical index of mineral powder					
技术指标	表观相对密度	含水量/%	粒度范围 ( < 0.6 mm ) / %	粒度范围 ( < 0.15 mm ) / %	粒度范围 ( < 0.075 mm ) / %
技术要求	60 ~ 80	$\geq 100$	100	93.2	82.6
测试结果	78	125	100	90 ~ 100	75 ~ 100

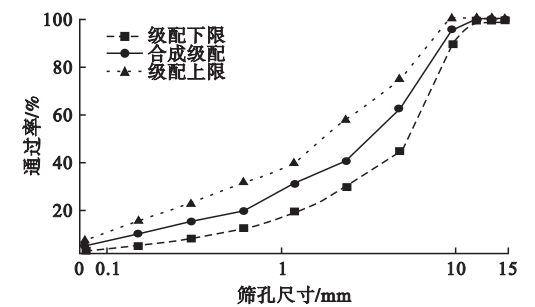


图 1 AC-13 级配曲线图

Fig. 1 The diagram of AC-13 grading

根据《公路沥青路面施工技术规范》

(JTG F 40—2004)的要求,采用 ZMJ-II 型自动马歇尔击实仪对试样进行击实,沥青混合料试件的直径和高度分别为 101.6 mm、63.5 mm。

1.2 冻融循环作用下沥青混凝土三轴压缩测试

冻融相关试验参考相关研究的测试方法<sup>[13]</sup>,在进行冻融循环实验之前,首先应将试样放在清水中饱和,通过真空饱水的方法使试样达到满足要求的饱和度。然后,将饱

和的试样放在圆形保鲜盒内,注入清水没过试件。KDR-10 型混凝土快速冻融试验机如图 2(a)所示,将试样放在 KDR-10 型混凝土快速冻融试验机内。冻结温度控制在  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,融化温度控制在  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,由于试样尺寸较小且容易发生完全冻结,因此冻结时间控制为 12 h,融化时间控制为 12 h。

采用 TAW-2000 岩石三轴试验仪(见图 2(b))分批次对发生冻融循环后的 AC-13 沥

青混凝土试样开展三轴剪切试验,该设备测力范围  $40\sim 2\,000\text{ kN}$ ,测力精度  $\pm 1\%$ ,最大围压为  $100\text{ MPa}$ ,轴向变形  $0\sim 10\text{ mm}$ ,径向变形  $0\sim 3\text{ mm}$ ,满足试验要求。分别进行围压  $50\text{ kPa}$ 、 $100\text{ kPa}$  和  $150\text{ kPa}$  条件下的三轴试验,测试 AC-13 的三轴压缩曲线和抗剪强度参数(黏聚力  $c$ 、内摩擦角  $\varphi$ )。发生冻融损伤后 AC-13 的应力-应变曲线如图 2(c)所示。

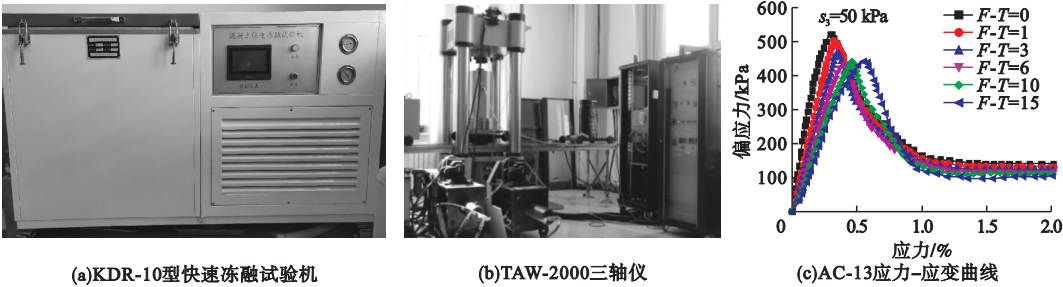


图 2 测试系统及加载曲线

Fig. 2 Testing devices and stress-strain curves

1.3 冻融循环作用下 AC-13 半圆劈裂试验

为了研究冻融循环对 AC-13 抗开裂性能的影响,采用马歇尔实验方法制作圆形 AC-13 试件,将圆形试件沿直径锯成两个半圆形试件,对半圆形试件开展了劈裂试验。

测试的温度控制在  $(20\pm 2)\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,试件厚度为  $40\text{ mm}$ ,切口深度为  $25.4\text{ mm}$ ,加载速率为  $0.5\text{ mm/min}$ 。试样的尺寸及支点位置如图 3(a)所示,劈裂加载曲线如图 3(b)所示,以劈裂曲线的峰值作为劈裂强度。

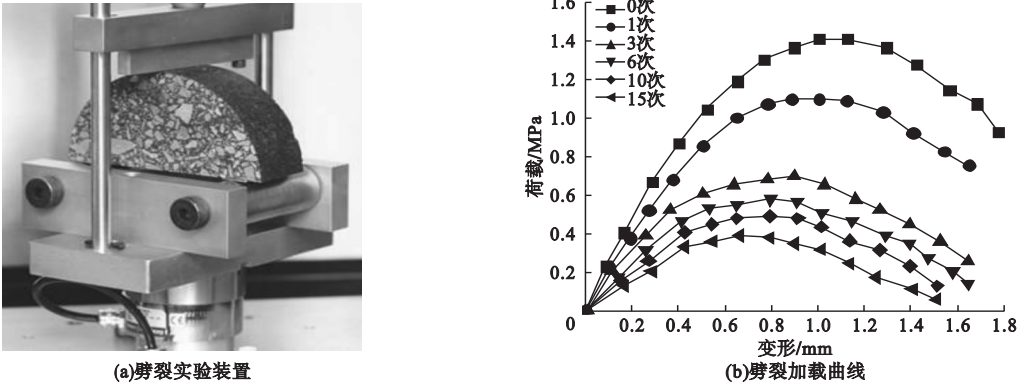


图 3 冻融循环次数对开裂强度影响规律

Fig. 3 Effect of freeze-thaw cycles on cracking strength

以劈裂试验荷载-变形曲线的峰值作为试样的劈裂强度,黏聚力、内摩擦角、弹性模量及劈裂强度随冻融循环次数的变化规律汇总见表 4。由表 4 可知,AC-13 的劈裂强度

随着冻融循环次数增加而逐渐降低,说明冻融循环损伤造成沥青混凝土材料的脆性特征增强,在劈裂荷载作用下更容易发生开裂现象<sup>[14]</sup>。



表 4 冻融循环作用下沥青混凝土的力学特性汇总

Table 4 Mechanical properties of asphalt concrete under freeze-thaw cycles

冻融循环/次	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	弹性模量/MPa	劈裂强度/MPa
0	850	31.5	204.01	1.41
1	723.38	30.12	172.23	1.1
3	605.31	29.28	141.11	0.698
6	464.56	28.24	127.76	0.582
10	349.7	28.15	111.51	0.495
15	244.23	26.17	88.06	0.393

2 冻融断裂损伤演化模型

为了研究冻融循环作用下不同裂隙形态对损伤演化的影响,提出如下假设:①裂隙的扩展轨迹是一条曲线,且扩展方向服从于 Griffith 断裂理论;②在有限元分析过程中,将冻胀量转化成位移荷载施加在模型的上边界;③在试样的表面及内部,裂隙的深度保持一致,且具有均一稳定的特点;④裂隙的破坏服从于 Mohr-Coulomb 强度准则<sup>[15]</sup>。

2.1 复杂应力状态下应力强度因子

含有单裂隙的沥青混凝土在三轴压缩实验条件下的应力状态如图 4 所示。轴向应力为  $\sigma_1$ ,围压为  $\sigma_3$ ,预制裂隙倾角为  $\beta$ ,长度为  $2a$ 。在裂隙所在的直线上,包括开裂区和未开裂区两部分。将滑块简化成图 4 所示,由  $\sigma_1$  和  $\sigma_3$  单独作用。根据静力平衡条件, $\sigma_n$  的方向始终指向内法向( $-\vec{n}$ )。若只存在  $\sigma_1$ , $\tau$  沿斜面向上,若只存在  $\sigma_3$ , $\tau$  沿斜面向下。若  $\sigma_1$  和  $\sigma_3$  同时存在,无论  $\beta$  多大,由于  $b\sigma_{1r}\sin\beta > a\sigma_{3r}\cos\beta$  恒成立,因此  $\sigma_{1r}$  始终大于  $\sigma_{3r}$ ,可知  $\tau$  始终沿斜面向上。

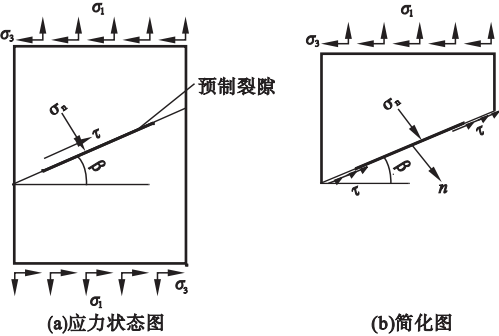


图 4 带有预制裂隙的沥青混凝土试件

Fig. 4 Asphalt concrete specimens with prefabricated cracks

由图 4 可知,在三轴剪切状态下,沥青混凝土发生张拉型(I 型)断裂和剪切型(II 型)断裂复合模式破坏。在沿着裂隙方向上,存在未开裂区的抗滑移力  $\tau$  和开裂区的摩擦阻力  $f$ ,在垂直于裂隙的方向上存在法向应力  $\sigma_n$ 。若假设裂隙的长度为  $2l$ ,试样的直径为  $2r$ ,则可知,未开裂区的长度为长度为  $(2r/\cos\beta - 2l)$ 。根据静力平衡条件可得:

$$\begin{cases} 2r\sigma_1 = \frac{2r}{\cos\beta}\sigma_n\cos\beta - \left(\frac{2r}{\cos\beta} - 2a\right)\tau\sin\beta, \\ 2r\sigma_3 = \frac{2r}{\cos\beta}\sigma_n\sin\beta + \left(\frac{2r}{\cos\beta} - 2a\right)\tau\cos\beta. \end{cases} \quad (1)$$

解方程组(1)可得到裂隙面上的正应力  $\sigma_n$  和切应力  $\tau$  分别为

$$\begin{cases} \sigma_n = \cos\beta(\sigma_1\cos\beta + \sigma_3\sin\beta), \\ \tau = \frac{r\cos^2\beta}{r - l\cos\beta}(\sigma_3 - \sigma_1\tan\beta). \end{cases} \quad (2)$$

若剪切应力等于 0,可知此时不发生剪切破坏,只发生张开型破坏,由式(2)可知应力满足:

$$\frac{\sigma_3}{\sigma_1} = \tan\beta. \quad (3)$$

根据 Mohr-Coulomb 强度准则可知,预制裂隙面发生剪切破坏时的临界切应力  $\tau_c$  满足:

$$\tau_c = c_n^f + \sigma_n\tan\varphi_n^f. \quad (4)$$

式中: $c_n$  为未开裂裂隙结构面的黏聚力; $\varphi_n$  为内摩擦角,与冻融循环次数有关。

将式(2)带入到式(4)中,可得到发生剪切滑动破坏时的主应力  $\sigma_1$  和  $\sigma_3$  间的关系为

$$\begin{aligned} &\left(\frac{r\cos\beta\sin\beta}{r - l\cos\beta} + \cos^2\beta\tan\varphi_n\right)\sigma_1 + c_n = \\ &\left(\frac{r\cos^2\beta}{r - l\cos\beta} - \cos\beta\sin\beta\tan\varphi_n\right)\sigma_3. \end{aligned} \quad (5)$$

两种裂隙的应力强度因子  $K_I, K_{II}$  可分别

表示为

$$\begin{cases} K_I = \sigma_n Y(\theta) \sqrt{\pi a}, \\ K_{II} = \tau Y(\theta) \sqrt{\pi a}. \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $Y(\theta)$  为与裂纹形状有关的形状系数, 与裂纹形状、构件几何形状与尺寸和加载方式有关。可按照下式进行计算:

$$Y(\theta) = \frac{1}{E(k)} (1 - k^2 \cos^2 \theta)^{\frac{1}{4}}, \quad (7)$$

$$k^2 = 1 - \left(\frac{a}{c}\right)^2, \quad (8)$$

$$E(k) = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{1 - k^2 \sin^2 \theta} d\theta = \text{Elliptic}E[k^2]. \quad (9)$$

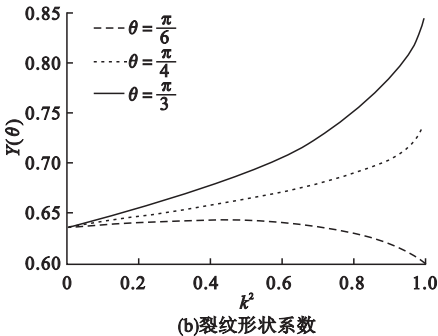
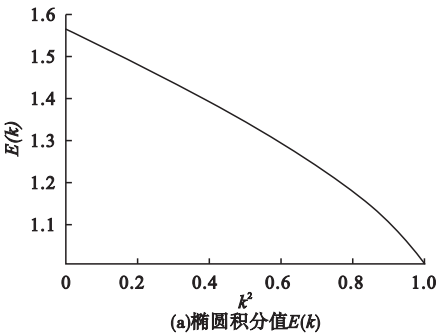


图5 裂纹形状系数计算结果

Fig. 5 Calculation of crack shape coefficient

由图5可看出,  $E(k)$  随着  $k^2$  的增加而逐渐降低, 当  $k^2$  达到1时, 取得最小值0。当  $\theta = \pi/6$  时, 裂纹形状系数  $Y(\theta)$  随着  $k^2$  增加而降低, 当  $\theta = \pi/4, \theta = \pi/3$  时, 裂纹形状系数  $Y$  随着  $k^2$  增加而增加。对于浅表裂隙来说,  $c = 2a^{[14]}$ , 此时  $k^2 = 0.75$ , 椭圆积分  $\text{Elliptic}E[0.75] = 1.211$ , 形状因子  $Y(\pi/6) = 0.635\ 3$ ,  $Y(\pi/4) = 0.683\ 6$ ,  $Y(\pi/3) = 0.734\ 2$ 。对于II型裂隙必须克服临界切应力  $\tau_c$ , 因此应力强度因子可表示为

其中,  $c$  为裂隙的深度;  $\text{Elliptic}E[k^2]$  为关于  $k^2$  的第二类椭圆积分, 若对其进行级数展开, 可得:

$$\begin{aligned} \text{Elliptic}E[k^2] &= \frac{\pi}{2} - \frac{\pi k^2}{8} - \frac{3\pi k^4}{128} - \frac{5\pi k^6}{512} - \\ &\frac{175\pi k^8}{32768} + o(k^8). \end{aligned} \quad (10)$$

式中:  $o(k^8)$  为  $k^8$  的高阶无穷小。一般情况下认为  $a < c$ , 因此  $k^2 \in (0, 1)$ ,  $\text{Elliptic}E[k^2]$  以及不同裂隙倾角条件下裂纹形状系数在此区间的变化如图5所示。

$$\begin{cases} K_I = \cos\beta (\sigma_1 \cos\beta + \sigma_3 \sin\beta) Y(\theta) \sqrt{\pi a_c}, \\ K_{II} = \frac{r \cos^2\beta (\sigma_3 - \sigma_1 \tan\beta)}{r - l \cos\beta} Y(\theta) \sqrt{\pi a_c}. \end{cases} \quad (11)$$

式中:  $a_c$  为临界裂隙长度。

2.2 基于耗散能的断裂韧度确定方法

单元体在破坏的过程中, 由于化学键的

断裂将会好散掉一部分能量, 这部分能量将会转化为新的表面能, 如图6所示。

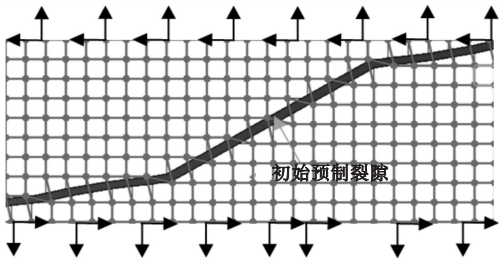


图6 单元体断裂过程示意图

Fig. 6 Schematic diagram of fracture process in the element body

ABAQUS 6.14 数值计算软件中 XFEM 扩展元功能可以定量地描述裂隙扩展过程中能量耗散规律。预制裂隙倾角为  $30^\circ$ 、 $45^\circ$  和  $60^\circ$  所对应的试样扩展形式及 Mises 规律如图7所示。

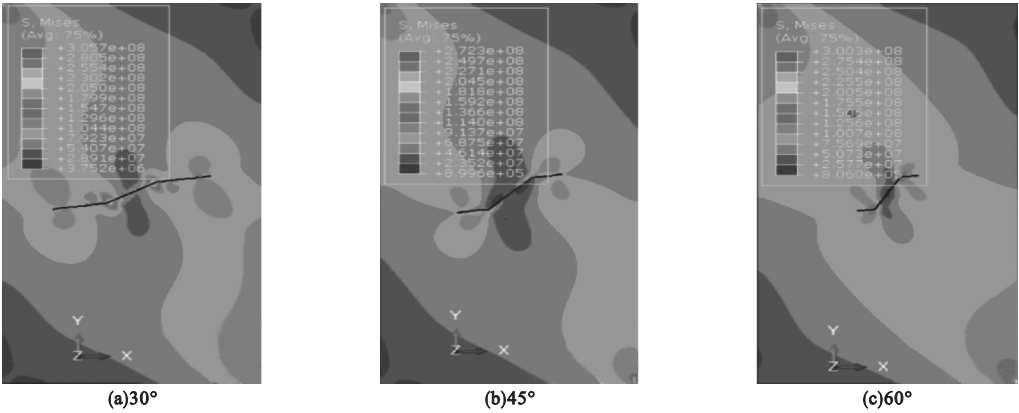


图 7 即将失稳时裂隙扩展有限元分析

Fig. 7 Finite element analysis of fracture propagation when instability occurs

由图 7 可看出,不同倾角裂隙裂隙在发生扩展时相对原始方向均产生一定角度偏移。裂隙尖端处的 Mises 应力明显高于其他部位,这是由于在裂隙尖端发生应力集中现象所致。以裂隙中点为对称中心,形成双扭带形的应力场,当裂隙倾角为 30°和 45°时,应力场双扭带彼此分离;当裂隙倾角达到 60°时,裂隙双扭带应力场开始接触并形成条带状应力场。随着裂隙的扩展,不同倾角裂隙耗散能的变化规律如图 8 所示。

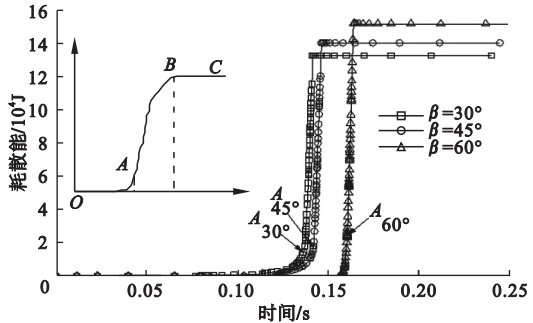


图 8 损伤耗散能变化规律

Fig. 8 Variation of damage dissipation energy

由图 8 可看出,不同倾角裂隙发展大致经历三个阶段。第 1 阶段:该阶段在裂隙尖端附近会聚集大量导致裂隙开裂的能量,但是能量释放率  $G$  小于临界能量释放率  $G_c$ ,对应图 8 的  $OA$  段;当积聚的能量超出裂隙尖端单元体所能承受的阈值时,单元体将会发生开裂现象,此时的能量释放率  $G$  恰好达到临界能量释放率  $G_c$ ,对应图 8 的  $A$  点;第二阶段:当能

量释放率  $G$  超过临界能量释放率  $G_c$  时,裂隙在短时间内将会发生急剧扩展,最终成为导致整体失稳的宏观断裂裂纹,对应图 8 中  $AB$  段;第三阶段,完成第二阶段后,耗散能将会保持在一稳定水平,对应图 8 中  $BC$  段。

裂隙倾角分别为 30°、45°和 60°所对应的临界耗散能为  $1.247 \times 10^4 \text{ J}$ 、 $1.073 \times 10^4 \text{ J}$  和  $2.472 \times 10^3 \text{ J}$ ,最终耗散能为  $1.164 \times 10^5 \text{ J}$ 、 $1.231 \times 10^5 \text{ J}$  和  $1.332 \times 10^5 \text{ J}$ 。随着角度的增加,临界耗散能和最终耗散能均具有增加的趋势。随着裂隙的扩展试样的弹性应变能变化规律如图 9 所示。

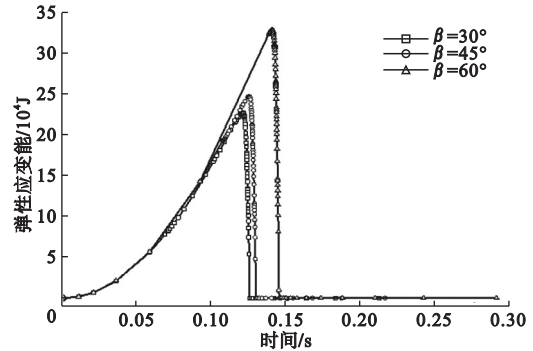


图 9 应变能变化规律

Fig. 9 Variation of strain energy

由图 9 可看出 30°、45°和 60°预制裂隙倾角所对应的失稳时间分别为 0.120 67 s, 0.124 18 s, 0.139 448 s。各角度的预制裂隙应变能随着裂隙扩展先增加,当超过某一时间时急剧降低,这主要是由于裂隙出现了失稳造成

的,由于宏观贯穿裂纹的出现,会使材料弹性变形迅速恢复,因此弹性应变能迅速减少至 0。该点恰好与图 9 中阈值点 A 对应相同的时间,进一步印证了该点对应着临界损伤释放率。裂隙发生失稳扩展所对应的时间点应力强度因子  $K_I(i=1,2)$  刚好达到材料的断裂韧度  $K_{IC}(i=1,2)$ 。不同倾角裂隙发生失稳破坏时的形态如图 10 所示。

根据图 10 中确定发生失稳时临界裂隙长度  $a_c$  和失稳应力。试样半径  $r=25\text{ mm}$ ,

表 5 断裂韧度计算结果

编号		倾角/(°)	临界裂隙长度/mm	失稳应力		$\sigma_n/\text{MPa}$	$\tau/\text{MPa}$	初始开裂应力 $\tau_c/\text{kPa}$	$K_{IC}/$	$K_{IIC}/$
				$\sigma_1/\text{MPa}$	$\sigma_3/\text{MPa}$				$(\text{MPa}\cdot\text{m}^{\frac{1}{2}})$	$(\text{MPa}\cdot\text{m}^{\frac{1}{2}})$
1		30	27.84	38.83	25.92	35.61	5.59	34.17	7.44	1.16
2		45	25.03	62.74	46.74	54.75	8.00	49.05	10.85	1.58
3		60	18.09	95.09	69.05	75.57	11.28	55.55	12.74	1.90

图 11 给出了不同冻融循环次数作用下 AC-13 沥青混凝土局部裂隙发展及损伤演化

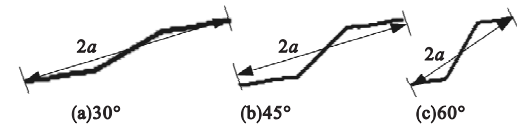


图 10 发生失稳时裂隙的临界状态

**Fig 10** The critical state of fracture when instability occurs  
黏聚力  $c_0^f=850.12\text{ kPa}$ ,内摩擦角  $\varphi_0^f=7.5^\circ$ ,初始裂隙半长  $a=2.5\text{ mm}$ 。根据式(2)计算临界切应力  $\tau_c$ 。根据式(6)可计算出不同倾角裂隙的断裂韧度  $K_{IC}(i=1,2)$ ,裂隙的相关断裂参数计算结果见表 5。

过程,图中的深色区域代表裂隙的扩展过程。

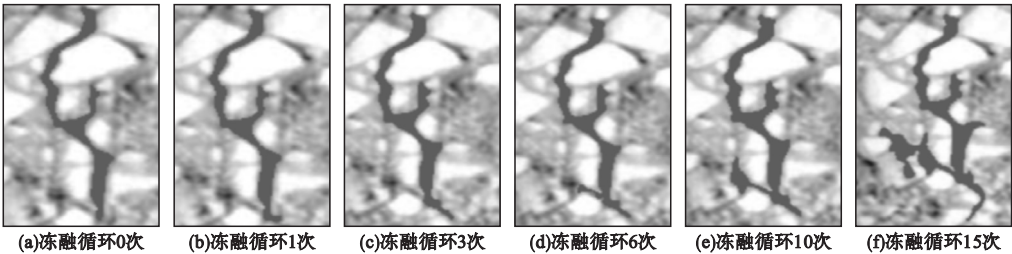


图 11 发生失稳时裂隙的临界状态

**Fig. 11** Critical state of fracture when instability occurs

由图 11 可看出,裂隙的长度与不规则程度随着冻融循环次数增加而逐渐增长和加剧。裂隙扩展表现出沿着沥青胶浆和骨料接触界面处发生开裂并扩展。为了研究冻融循环对 AC-13 沥青混凝土断裂性能的影响,基于 ABAQUS 对发生冻融损伤的预制裂隙 AC-13 沥青混凝土断裂性能进行模拟,采用弹性模量和拉伸强度折减法描述冻融损伤。AC-13 的弹性模量和极限抗拉强度根据表 1 来确定。本构模型选择 Maxps Damage 模型,损伤采用能量控制模式,泊松比为定值 0.3。AC-13 经历多次冻融循环后耗散能的变化规律如图 12 所示。

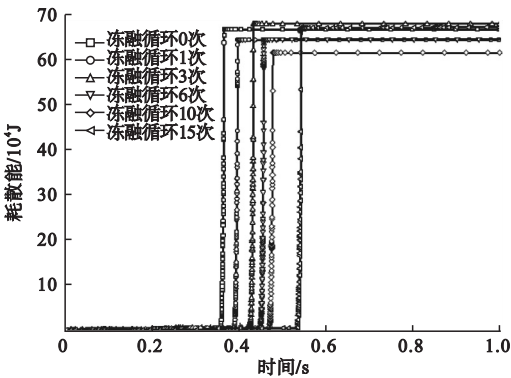


图 12 冻融循环对耗散能的影响规律

**Fig. 12** Effect of freeze-thaw cycle on dissipation energy

按照 2.1 节的分析方法,裂隙长度  $2a$  选



取为 0.5 mm。倾角 30° 所对应的摩擦系数  $\mu = \tan 7.5^\circ = 0.13$ , 所以 0, 1, 3, 6, 10 和 15 次冻融循环后的初始开裂应力  $\tau_c$  依次为 26.75 kPa, 26.78 kPa, 26.87 kPa, 26.94 kPa, 27.03 kPa, 27.02 kPa。断裂韧度  $K_{IC}$ 、 $K_{IIc}$  随着冻融循环次数的变化规律见表 6。

表 6 冻融循环对断裂韧度影响规律

Table 6 Effect of freeze-thaw cycles on fracture toughness

冻融循环次数	开裂主应力		$K_{IC}/$ ( $\text{MPa}\cdot\text{m}^{\frac{1}{2}}$ )	$K_{IIc}/$ ( $\text{MPa}\cdot\text{m}^{\frac{1}{2}}$ )
	$\sigma_1/\text{MPa}$	$\sigma_3/\text{MPa}$		
0	28.69	18.06	0.729 4	0.128 2
1	28.67	18.04	0.728 9	0.128 2
3	27.77	17.17	0.703 9	0.127 8
6	24.00	13.53	0.599 2	0.126 2
10	22.59	12.16	0.559 9	0.125 7
15	15.89	5.70	0.354 7	0.116 5

2.3 冻融循环下沥青混凝土开裂准则

由表 6 可看出, AC-13 的断裂韧度  $K_{IC}$ 、 $K_{IIc}$  均随着冻融循环次数增加而降低。说明冻融循环对 AC-13 的断裂性能造成了损伤。在损伤过程中, 出现了张开(I 型)和滑开(II 型)两种破坏模式, 因此裂隙扩展符合 I、II 复合裂隙扩展准则。椭圆断裂准则是最常用的复合裂隙断裂准则, 其表达式为

$$\left(\frac{K_I}{K_{IC}^p}\right)^2 + \left(\frac{K_{II}}{K_{IIc}^p}\right)^2 = 1, (K_I, K_{II} > 0). \quad (12)$$

式中:  $K_I$ 、 $K_{II}$  分别为 I、II 型应力强度因子;  $K_{IC}^p$ 、 $K_{IIc}^p$  分别为纯 I 型、纯 II 型裂隙的断裂韧度。对于椭圆形断裂准则,  $K_{IC}^p$ 、 $K_{IIc}^p$  为椭圆边界的长、短半轴。式(12)表示发生断裂时的临界状态, 若应力强度因子状态点  $(K_I, K_{II})$  位于椭圆形内部, 则不会发生断裂, 若应力强度因子状态点  $(K_I, K_{II})$  位于椭圆形外部, 表示 AC-13 沥青混凝土早已发生断裂。

采用 ABAQUS 按照弹性模量与劈裂强度折减法对发生冻融损伤后的沥青混凝土试样裂隙扩展进行模拟, 提取裂隙发生失稳扩展时的应力强度因子状态点  $(K_I, K_{II})$ 。将式(12)所对应的椭圆作为临界断裂状态线, 断

裂韧度按照表 3 中的数值进行确定。不同冻融循环次数后的沥青混凝土应力强度因子状态点及临界断裂状态线如图 13 所示。

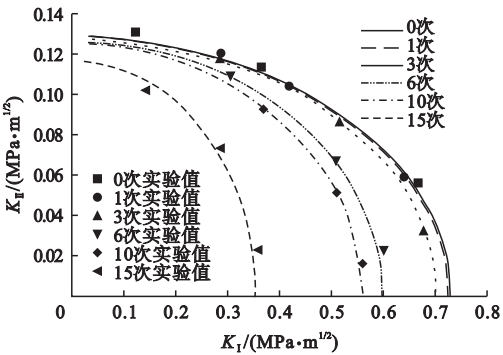


图 13 应力强度因子状态点与临界椭圆状态线

Fig. 13 Stress intensity factor state point and critical elliptic state line

由图 13 可看出, 同一冻融循环周期内的 I 型、II 型应力强度因子大致在一个椭圆上, 可以采用椭圆形断裂准则描述沥青混凝土断裂强度特征。

3 结 论

(1) 沥青混凝土的抗剪强度、弹性模量及弯拉强度均随着冻融循环次数增加出现降低的现象, 黏聚力从 850.12 kPa 降到了 244.23 kPa, 内摩擦角从 31.5° 降到了 26.17°, 弹性模量从 204.01 MPa 降到了 88.06 MPa, 弯拉强度从 1.14 MPa 降到了 0.43 MPa, 表现出了明显的冻融损伤特征。

(2) 拉-剪状态下的裂隙扩展过程中耗散能刚开始发展较慢, 弹性应变能逐渐积累, 当达到某一时刻时, 耗散能出现了陡增现象, 同时弹性应变能出现了陡降现象, 说明此时裂隙出现了失稳扩展现象。因此, 可将该时刻的裂隙状态作为临界断裂状态。

(3) 随着冻融循环次数增加, 发生断裂的临界时间不断扩大, AC-13 的弹性模量会逐渐降低, 脆性特征逐渐增强, 韧性逐渐降低, 劈裂强度也逐渐降低, 所以最终耗散能是由韧性和劈裂强度综合作用的结果。椭圆形断裂准则可以较好的描述 I 型、II 型裂隙复

合断裂状态。

## 参考文献

- [1] 李东庆,孟庆洲,房建宏,等. 沥青混合料抗冻融循环性能的试验研究[J]. 公路, 2007(12):145-147.  
(LI Dongqing, MENG Qingzhou, FANG Jianhong, et al. Test and research on performance of frost thawing resistance of asphalt mixture [J]. Highway, 2007(12):145-147.)
- [2] 夏文杰. 多年冻土区冻融循环作用对沥青混合料弯拉性能的影响[J]. 公路工程, 2017, 42(1):282-289.  
(XIA Wenjie. Effect of freeze-thaw action on flexural behavior of asphalt mixtures in permafrost regions [J]. Highway engineering, 2017, 42(1):282-289.)
- [3] 王岚,贾永杰,张大伟,等. 基于数字散斑相关法的聚合物改性沥青混合料抗裂性能[J]. 复合材料学报, 2016, 33(9):2123-2131.  
(WANG Lan, JIA Yongjie, ZHANG Dawei, et al. Anti-cracking performance of polymer modified asphalt mixture based on digital speckle correlation technique [J]. Journal of composite materials, 2016, 33(9):2123-2131.)
- [4] 杨海华,刘亮,游光明. 不同孔隙率下沥青混凝土的水稳定性试验研究[J]. 水力发电, 2017, 43(6):115-119.  
(YANG Haihua, LIU Liang, YOU Guangming. Experimental study on water stability of asphalt concrete with different porosity [J]. Water power, 2017, 43(6):115-119.)
- [5] 吴金荣,马芹永,王文娟. 温度与侵蚀对沥青混凝土冻融疲劳寿命的影响[J]. 冰川冻土, 2015, 37(2):422-427.  
(WU Jinrong, MA Qinyong, WANG Wenjuan. Influence of temperature and corrosion on freezing-thawing fatigue life of asphalt concrete [J]. Journal of glaciology and geocryology, 2015, 37(2):422-427.)
- [6] 康诚,马芹永,吴金荣. 冻融腐蚀对沥青混凝土疲劳性能的影响[J]. 公路交通科技, 2014, 31(5):47-51.  
(KANG Cheng, MA Qinyong, WU Jinrong. Effect of freeze-thaw and corrosion on fatigue property of asphalt concrete [J]. Journal of highway and transportation research and development, 2014, 31(5):47-51.)
- [7] 崔亚楠,郭靖,冯蕾,等. 复杂环境因素影响下沥青混合料自愈合性能[J]. 建筑材料学报, 2018, 21(5):836-840.  
(CUI Ya'nan, GUO Jing, FENG Lei, et al. Investigation on self-healing properties of asphalt mixture under different factors [J]. Journal of building materials, 2018, 21(5):836-840.)
- [8] MARTIN R, 罗钦,杨钦麟,等. 乳化沥青对沥青混凝土裂纹愈合性能的影响分析[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2018, 42(1):112-115.  
(MARTIN R, LUO Qin, YANG Qinlin, et al. Effects of emulsified asphalt on cracking healing property of asphalt concrete [J]. Journal of Wuhan university of technology (transportation science & engineering), 2018, 42(1):112-115.)
- [9] 周庆华,沙爱民. 高模量外掺剂对沥青混凝土疲劳参数的影响[J]. 交通科学与工程, 2016, 32(3):12-15.  
(ZHOU Qinghua, SHA Aimin. The influence of high modulus additive to the fatigue parameters of asphalt concrete [J]. Journal of transportation science and engineering, 2016, 32(3):12-15.)
- [10] 田小草,韩海峰,李新伟,等. 不同加载模式下沥青混凝土的断裂特性[J]. 建筑材料学报, 2016, 19(4):758-761.  
(TIAN Xiaoge, HAN Haifeng, LI Xinwei, et al. Fracture performance of asphalt concrete under different loading modes [J]. Journal of building materials, 2016, 19(4):758-761.)
- [11] 钱振东,王江洋. 环氧沥青混凝土裂纹起裂与失稳扩展的临界特征[J]. 工程力学, 2015, 32(1):96-103.  
(QIAN Zhendong, WANG Jiangyang. Critical characterization of crack initiation and unstable propagation for epoxy asphalt concrete [J]. Engineering mechanics, 2015, 32(1):96-103.)
- [12] LAURENT A, ADRIEN H. Fatigue damage of asphalt pavement on an orthotropic bridge deck [J]. Road materials and pavement design, 2007, 8(3):505-522.
- [13] IVERSON R M. Regulation of landslide motion by dilatancy and pore pressure feedback [J]. Journal of geophysical research earth surface, 2005, 110(F2):68-76.
- [14] 杨野,徐剑,杨彦海,等. 冻融循环作用下乳化沥青冷再生混合料损伤分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2020, 36(5):869-876.  
(YANG Ye, XU Jian, YANG Yanhai, et al. Damage analysis of cold recycled mixes using asphalt emulsion under freeze-thaw cycles [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2020, 36(5):869-876.)
- [15] 张海,马光超,张敏江,等. 冷再生基层沥青路面结构的断裂力学分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2012, 28(5):865-871.  
(ZHANG Hai, MA Guangchao, ZHANG Minjiang, et al. Cracking analysis on the renewable base-course asphalt pavement structure [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2012, 28(5):865-871.)
- (责任编辑:刘春光 英文审校:范丽婷)