

# 沥青混合料半圆弯曲试验疲劳剩余强度分析与预测

李友云<sup>1</sup>, 车翔宇<sup>1</sup>, 申艳梅<sup>2</sup>, 吕 琰<sup>3</sup>, 高英力<sup>1</sup>

(1. 长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114;

2. 中车株洲电力机车有限公司, 湖南 株洲 412000; 3. 江苏中设集团股份有限公司, 江苏 无锡 214000)

**摘要:**为揭示沥青混合料在弯拉作用下的疲劳剩余强度规律,基于半圆弯曲试验,对AC-13C型沥青混合料及含不同粒径集料的AC-9.5、AC-4.75、AC-2.36、AC-1.18型沥青混合料开展了疲劳试验、疲劳剩余强度试验等研究,结合多尺度算法建立的数值模型,预测了不同粒径沥青混合料在不同损伤程度下的抗弯拉剩余强度和剩余强度衰减规律。预测结果与沥青混合料半圆弯曲试验结果对比分析表明,利用多尺度算法建立的数值模型,能够较精确地预测沥青混合料的抗弯拉剩余强度,预测结果与半圆弯曲试验结果吻合良好。

**关键词:**沥青混合料;半圆弯曲试验;多尺度预测;疲劳破坏;抗弯拉剩余强度

中图分类号:TU528.42;U414

文献标志码:A

## Analysis and prediction of fatigue residual strength of asphalt mixture in semi-circular bending tests

LI Youyun<sup>1</sup>, CHE Xiangyu<sup>1</sup>, SHEN Yanmei<sup>2</sup>, LÜ Yan<sup>3</sup>, GAO Yingli<sup>1</sup>

(1. School of Traffic and Transportation Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China;

2. CRRC Zhuzhou Electric Locomotive Co. Ltd, Zhuzhou 412000, China;

3. Jiangsu Zhongshe Group Co. Ltd, Wuxi 214000, China)

**Abstract:** To reveal the law of fatigue residual strength of asphalt mixture under bending and tensile action, this study carried out the fatigue tests and fatigue residual strength tests on AC-13C asphalt mixture and asphalt mixture containing aggregates AC-9.5, AC-4.75, AC-2.36 and AC-1.18 based on semi-circular bending tests. By numerical model combining with multi-scale algorithm, it predicted the residual strength and attenuation law of residual strength of asphalt mixture at different damage degrees. The predicted results were compared with the results of asphalt mixture semicircular bending tests. The results show that the numerical model established by using multi-scale algorithm can predict the residual strength of asphalt mixture more accurately. The predicted results are in good agreement with those of the semicircular bending tests.

**Key words:** asphalt mixture; semi-circular bending test; multiple scale prediction; fatigue damage; residual strength of flexural tension

沥青路面作为我国高等级路面的主要形式,其性能优越,对公路的运营能力、服务水平以及安全舒适性的影响较大。沥青路面在使用过程中会逐渐产生损伤,其原因主要分两方面:一是路面的结构性损坏,即路面本身的抵抗力不足以支撑车辆重复荷载作用而发生的疲劳破坏;二是沥青路面会发生功能性损坏,导致路面的使用性能下降,影响车辆行驶的安全性。作为一种黏弹性材料,沥青混合料在周围环境和车辆荷载的共同作用下发生变形,致使沥青路面内部产生损坏;同时随着荷载的不断加载,沥青混合料产生永久变形,其力学性能不断

收稿日期:2024-04-26

基金项目:国家自然科学基金项目(51978080)

作者简介:李友云(1973—),男,湖南益阳人,教授,博士,主要从事道路结构与土木工程材料方面的研究。

车翔宇(1998—),男,江苏徐州人,硕士研究生,主要从事土木工程材料与路基路面工程研究,本文通信作者。

E-mail:1070501970@qq.com

降低,导致路面结构抵抗变形的能力不断减弱。因此,研究沥青混合料的疲劳损伤性能十分有必要。

半圆弯曲试验最初用于测量岩石的断裂强度,后逐渐被用来评价沥青混合料的抗拉性能<sup>[1]</sup>。该试验不仅具有试验设备简单、过程简便、可重复性强、试件制备来源多等优点,而且更重要的是试验过程中试件的应力情况与实际路面的情况更为接近,有利于预测沥青路面表面裂缝的产生与扩展情况,因此相较于其他试验方法具有一定的优越性<sup>[2]</sup>。Molenaar 等<sup>[3-4]</sup>基于半圆弯曲试验,针对支座距离为半圆试件直径的 0.8 倍条件,提出试件底部拉应力的计算方法;曹轲铭<sup>[5]</sup>认为半圆弯曲试验与三点弯曲小梁试验都属于弯拉问题,二者的受力方式相似,并给出了半圆试件底部的拉应力计算方法;刘宇等<sup>[6]</sup>通过有限元模拟半圆弯曲试验,分析了其在荷载下的应力与位移响应,在此基础上选取合适的试验参数,并在允许切割损耗的情况下给出了更为精准的应力系数计算方法;Wang 等<sup>[7]</sup>考虑了温度和加载速率对半圆试验的影响,通过室内半圆弯曲试验计算了不同种类沥青混合料的刚度、抗拉强度、断裂韧性以及断裂能等指标。

以上关于沥青混合料半圆弯拉试验已有较多研究成果和经验,但是将宏观室内试验与有限元数值模拟相结合的研究较少,对于疲劳损伤衰减规律有待进一步研究。基于此,为研究沥青混合料在弯拉作用下的疲劳损伤规律,本研究采用半圆弯曲试验,对不同粒径沥青混合料的疲劳损伤性能进行探究,并结合多尺度算法预测剩余强度衰减规律。

## 1 沥青混合料半圆弯曲疲劳损伤试验

### 1.1 沥青混合料配合比设计

试验采用 SBS 改性沥青,根据 JTG F40—2004《公路工程路面施工技术规范》测定原材料的各项技术指标,并确定 AC-13C(最大公称粒径为 13 mm 的连续式密级配)沥青混合料及其他不同粒径集料的 AC-9.5、AC-4.75、AC-2.36、AC-1.18 沥青混合料的配合比,级配设计如表 1 所示。

表 1 不同沥青混合料的配合比设计

Table 1 Mixture design of different asphalt mixtures

%

混合料类型	筛分粒度/mm									
	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
AC-13C	100.0	96.0	78.0	56.0	40.0	27.0	19.0	13.0	10.0	6.0
AC-9.5	—	100.0	81.3	58.4	41.7	28.1	19.8	13.5	10.4	6.2
AC-4.75	—	—	100.0	71.8	51.3	34.6	24.4	16.6	12.8	7.6
AC-2.36	—	—	—	100.0	71.4	48.1	33.9	23.1	17.8	10.6
AC-1.18	—	—	—	—	100.0	67.4	47.5	32.4	25.0	14.9

### 1.2 半圆弯曲疲劳试验

试验试件由马歇尔标准击实切割得到,试件的厚度为 50 mm。试验前,将标准马歇尔圆柱型试件(直径 101.6 mm,高度为 63.5 mm)的两端切除,保留中间 50 mm 的部分并切割成两个半圆试件。试验时,将半圆试件固定在三点弯曲试验装置台上,在试件顶部中心位置施加荷载直至发生断裂破坏,如图 1 所示,根据试件破坏时的峰值荷载计算其抗弯拉强度。

### 1.3 半圆弯曲剩余强度试验

沥青混合料的疲劳破坏是一个疲劳损伤逐步积累、材料承载能力逐步下降的过程,随着重复荷载次数的增加,混合料的疲劳强度不断衰退。Miner 法则是在设计沥青路面时应用最广泛的线性累积损伤理论,其疲劳损伤演化方程为:

$$S = \frac{N}{N_f} \times 100\%。 \quad (1)$$

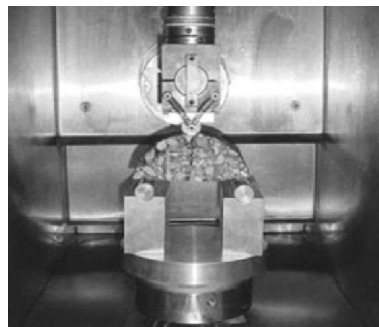


图 1 半圆弯曲试验示意图

Fig. 1 Schematic diagram of semicircle bending test

式中: $S$ 为试件的疲劳损伤程度, $N$ 为试验中荷载重复作用的次数, $N_f$ 为沥青混合料疲劳寿命。在重复荷载作用不变的情况下,试件的疲劳损伤程度 $S$ 与试验中荷载重复作用的次数成线性关系,因此试件疲劳荷载的重复作用次数可转化成疲劳损伤程度 $S$ 。

在进行半圆弯曲疲劳剩余强度试验时需要注意:一是避免次数过多导致试件未达到规定疲劳次数就发生破坏;二是划分疲劳程度时要使相邻的疲劳次数之间存在一定的距离,以清晰地显示试件在相邻疲劳程度时强度的变化,充分反映混合料剩余强度的衰减规律。

试验根据表2中的疲劳设计次数对试件加载相应次数的重复荷载,得到不同损伤程度(0、20%、50%、65%、80%)的沥青混合料半圆试件后,再在应力比为0.3水平下,对不同损伤程度的沥青混合料半圆试件进行弯拉试验,得到不同损伤程度试件的剩余强度,结果如表3所示。

表2 剩余强度试验时的设计疲劳次数

Table 2 Design fatigue times in residual strength test

损伤程度 $S/\%$	AC-13C	AC-9.5	AC-4.75	AC-2.36	AC-1.18
100	16 379	15 377	13 782	11 573	7 815
0	0	0	0	0	0
20	3 276	3 075	2 756	2 315	1 563
50	8 190	7 689	6 891	5 787	3 908
65	10 646	9 995	8 958	7 522	5 080
80	13 103	12 302	1 1026	9 258	6 252

表3 不同损伤强度下沥青混合料的试验结果

Table 3 The experimental results of asphalt mixture under different damage strengths

疲劳程度 $S/\%$	峰值荷载/kN					峰值荷载时竖向位移/mm					弯拉剩余强度/MPa				
	AC-13C	AC-9.5	AC-4.75	AC-2.36	AC-1.18	AC-13C	AC-9.5	AC-4.75	AC-2.36	AC-1.18	AC-13C	AC-9.5	AC-4.75	AC-2.36	AC-1.18
0	6.364	5.739	4.977	3.667	2.437	2.06	2.27	3.07	3.31	4.01	6.013	5.423	4.703	3.465	2.303
20	5.785	5.326	4.539	3.301	2.157	2.19	2.39	3.56	3.75	4.32	5.466	5.034	4.289	3.119	2.038
50	4.877	4.543	3.881	2.891	1.857	2.33	2.56	4.12	4.48	5.07	4.608	4.293	3.667	2.732	1.755
65	3.945	3.562	3.191	2.457	1.498	2.51	3.04	4.31	4.98	6.22	3.728	3.366	3.015	2.322	1.415
80	2.213	2.052	1.723	1.523	0.902	3.62	3.53	5.68	6.2	6.61	2.091	1.939	1.628	1.439	0.852

### 1.4 试验结果分析

根据表3中不同粒径沥青混合料疲劳损伤程度的弯拉剩余强度数据,得到不同沥青混合料的强度衰减曲线,如图2~4所示。

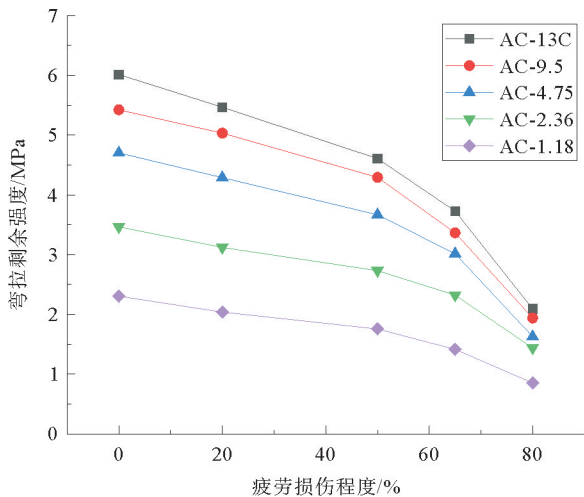


图2 沥青混合料弯拉剩余强度衰减情况

Fig. 2 Attenuation of residual strength of asphalt mixture

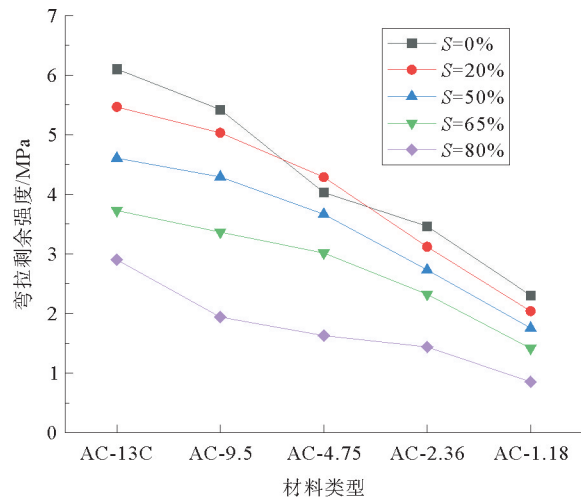


图3 不同类型粒径沥青混合料弯拉剩余强度变化

Fig. 3 Change of residual strength of asphalt mixture with different particle sizes

由图 2 可以看出,在疲劳损伤过程中,不同粒径沥青混合料的弯拉剩余强度衰减规律呈现相似趋势,其承载能力也在重复荷载作用下不断下降,直至试件达到破坏。从图 3 可看出,随着沥青混合料中粗集料的逐级去除,混合料的弯拉剩余强度也呈现出逐渐下降的趋势。以疲劳损伤程度 50% 为例,试件由 AC-13 至 AC-1.18 型沥青混合料,其弯拉剩余强度从 4.068 MPa 降低至 1.755 MPa,减少了 57%,这是因为 AC-1.18 型沥青混合料中已经不存在粗集料,而在沥青混合料中起承载作用的主要是粗集料。

同样的,由图 4 可以看出,AC-2.36 与 AC-1.18 型沥青混合料的强度差值明显高于其他组沥青混合料,这是因为在 AC-2.36 型沥青混合料中增加了粒径范围在 2.36~4.75 mm 的集料,而 2.36 mm 以上属于粗集料,使 AC-2.36 型沥青混合料的弯拉剩余强度相较于 AC-1.18 型得到大幅度提升。

为便于分析不同沥青混合料的弯拉剩余强度衰减规律,对不同粒径、不同疲劳损伤程度沥青混合料的弯拉剩余强度进行拟合,拟合曲线如图 5 所示。

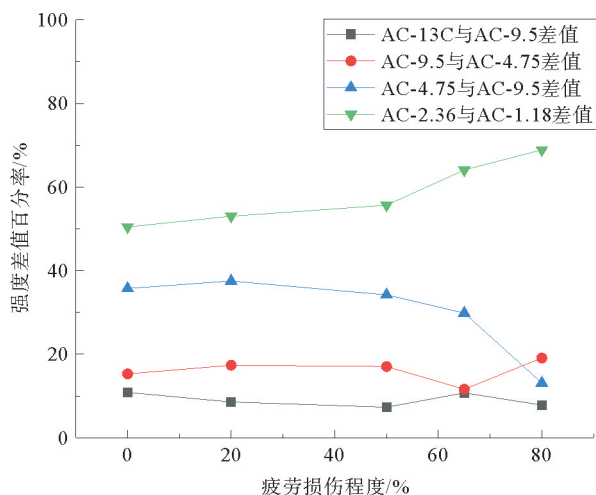


图 4 沥青混合料的强度差值百分率  
Fig. 4 Percentage difference in strength of asphalt mixture

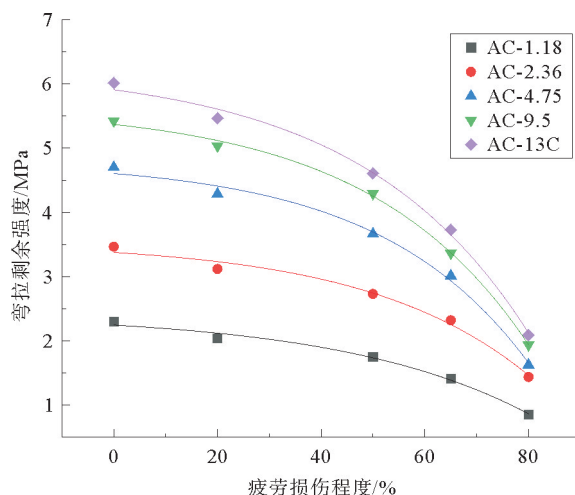


图 5 不同粒径沥青混合料弯拉剩余强度拟合曲线  
Fig. 5 Curve of flexural and tensile residual strength of asphalt mixtures with different particle sizes

由图 5 可看出,不同粒径沥青混合料在疲劳损伤过程中弯拉剩余强度的衰减规律相似,可分为两个阶段:第一阶段(损伤程度为 0~65%)的弯拉剩余强度衰减速率较慢,而第二阶段(损伤程度为 65%~80%)的弯拉剩余强度衰减速率突然变快,进入急剧衰减阶段。在整个疲劳过程中,沥青混合料的弯拉剩余强度衰减呈现非线性规律,并且随着混合料中粗集料最大公称粒径的逐级去除,混合料的弯拉剩余强度不断降低。

## 2 多尺度数值模型预测弯曲疲劳剩余强度

### 2.1 半圆弯曲二维模型有限元的建立

二维模型的构建使用蒙特卡罗法,使用考计算机模拟技术生成随机数进行统计试验。根据实际试验中沥青混合料试件的骨料几何特征,利用有限元生成二维数值模型,数值试件直径为 101.6 mm,如图 6 所示。

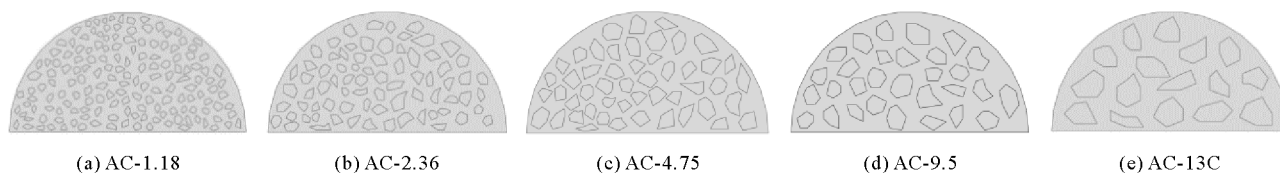


图 6 不同粒径沥青混合料的二维数值模型

Fig. 6 Two-dimensional numerical model of asphalt mixtures with different particle sizes



### 2.2 疲劳强度参数的多尺度试验

由于沥青混合料中集料的粒径尺寸种类较多,根据多尺度分析思想,按照混合料集料颗粒的尺寸对其进行分组,将混合料的强度参数均匀化。根据沥青混合料内部集料粒径的尺寸,将集料划分为  $m$  组,记作  $l^p$  ( $p=1,2,\dots,m$ ),统计窗尺度区域为  $\epsilon^p$  ( $p=1,2,\dots,m$ ),且尺度区域大小满足  $\epsilon^p < \epsilon^{p+1}$  ( $p=1,2,\dots,m-1$ )。不同集料颗粒在相应的统计窗内遵循各自的分布规律,每组的集料粒径尺寸满足  $\lambda^p \leq l^p < \lambda^{p+1}$  ( $p=1,2,\dots,m-1$ )。根据随机分布生成统计窗内相应的随机数,在统计窗内模拟生成第  $m$  尺度的随机集料颗粒,建立相应的有限元数值模型并划分网格。假定沥青与粒径尺寸小于 1.18 mm 的集料组成的沥青砂强度参数为  $b_1^2$ ,集料的强度参数为  $b_0^1$ ,每个尺度区域内的混合料强度的计算期望值为  $b^p$  ( $p=1,2,\dots,m$ ),利用多尺度算法思想,将统计窗  $\epsilon^p$  尺度下沥青混合料强度的计算期望值  $b^p$  作为下一个统计窗  $\epsilon^{p+1}$  尺度下沥青混合料基体的强度参数,同时在统计窗  $\epsilon^m$  中将沥青混合料中集料的强度参数看作恒定的指标,利用这种多层迭代算法逐步均匀化预测出沥青混合料的疲劳强度参数。

按照上述流程,首先计算 AC-1.18 型沥青混合料的均匀化力学强度参数  $b^1$ ,将  $b^1$  作为 AC-2.36 型沥青混合料的基体强度参数,其集料强度参数为  $b_1^2$ ,将其代入数值模型中的材料参数中,可通过多尺度数值模拟计算出 AC-2.36 型沥青混合料的强度参数  $b^2$ 。以此类推,从小粒径混合料逐步均匀化到大粒径混合料,最后得到 AC-13C 型沥青混合料的强度期望值。

### 2.3 沥青混合料的疲劳强度预测

将疲劳过程试验得到的沥青砂均质体和粒径为 1.18~2.36 mm 集料的力学参数代入多尺度有限元模型,按流程进行第一层预测,计算 AC-11.1818 型沥青混合料的不同损伤程度下力学参数模拟值,结果如表 4 所示。其中,1.18~2.36 mm 集料的弹性模量  $E$  取值 32 700 MPa,泊松比  $\mu$  取值 0.21。

表 4 不同疲劳程度下材料力学参数及 AC-1.18 型沥青混合料的模拟值

Table 4 Material mechanical parameters and simulation value of asphalt mixture AC-1.18 under different fatigue degrees

疲劳程度 $S/\%$	沥青砂			AC-1.18 型模拟值		
	弹性模量 $E/\text{MPa}$	泊松比 $\mu$	弯拉剩余强度/ $\text{MPa}$	弯拉剩余强度/ $\text{MPa}$	弹性模量 $E/\text{MPa}$	泊松比 $\mu$
0	356.7	0.318	1.532	2.382	522.437	0.309
20	282.1	0.321	1.284	2.119	456.752	0.311
50	255.1	0.323	0.967	1.806	412.677	0.312
65	206.9	0.329	0.724	1.475	264.12	0.315
80	153.8	0.338	0.355	0.897	197.505	0.321

由表 4 可知,在整个疲劳试验过程中,AC-1.18 型沥青混合料弯拉剩余强度由 2.382 MPa 降至 0.897 MPa。AC-1.18 型沥青混合料强度指标实现了均匀化,并将其作为算法的输入变量预测下一尺度 AC-2.36 型沥青混合料基体的弯拉剩余强度参数指标。

为分析沥青混合料在不同疲劳程度下力学特性参数在模型中的变化规律,沿模拟试件  $X$  轴导出其应力( $X$  轴向的应力,拉应力为正值,压应力为负值)变化值,以 AC-1.18 为例,其变化曲线如图 7 所示。由图 7 可以看出,应力沿试件中心基本呈现轴对称分布;在半圆试件  $X$  轴水平方向上受力主要为拉应力,但支座处拉、压应力交替出现,受力情况较为复杂,其中拉应力最大值出现在

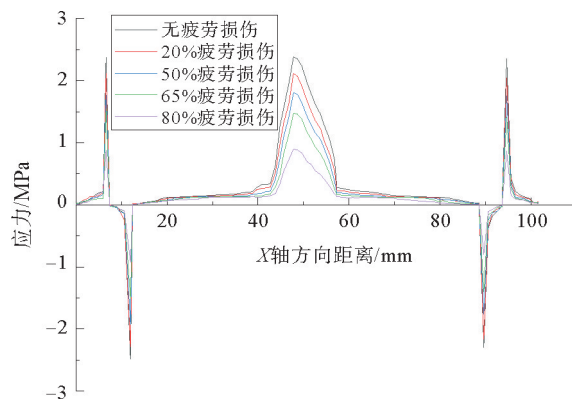


图 7 不同疲劳程度下 AC-1.18 型沥青混合料沿 X 轴方向的应力变化

Fig. 7 Stress variation of asphalt mixture AC-1.18 along X direction under different fatigue degrees

试件底部的中心区域,这与试件发生断裂的情形相符。

将 AC-1.18 型沥青混合料模拟得到的参数代入预测模型,作为 AC-2.36 型沥青混合料基体的强度参数,可得到 AC-2.36 型沥青混合料的力学参数模拟值,如表 5 所示。由表 5 可知,在整个疲劳试验过程中,AC-2.36 型沥青混合料弯拉剩余强度由 3.611 MPa 降至 1.534 MPa。AC-2.36 型沥青混合料强度指标实现了均匀化,并将其作为算法的输入变量预测下一尺度 AC-4.75 型沥青混合料基体的弯拉剩余强度参数。

通过上述多层迭代方法,可得到 AC-4.75、AC-9.5 和 AC-13C 型沥青混合料的预测值,结果如表 6 所示。以 AC-9.5 型为例,数值模型云图如图 8 所示。可以看出混合料试件模型在不同疲劳损伤程度时内部的破坏情况:试件竖向位移沿顶部施加荷载的位置呈现轴对称分布,试件底部中心位置的拉应力较为明显。

表 5 AC-2.36 型沥青混合料的弯拉剩余强度模拟值

Table 5 Simulated values of residual strength of asphalt mixture AC-2.36

损伤程度 S/%	弹性模量 E/MPa	泊松比 $\mu$	弯拉剩余 强度/MPa
0	757.011	0.288	3.611
20	681.073	0.290	3.239
50	592.541	0.292	2.815
65	501.418	0.295	2.468
80	321.539	0.304	1.534

表 6 不同沥青混合料的弯拉剩余强度模拟值

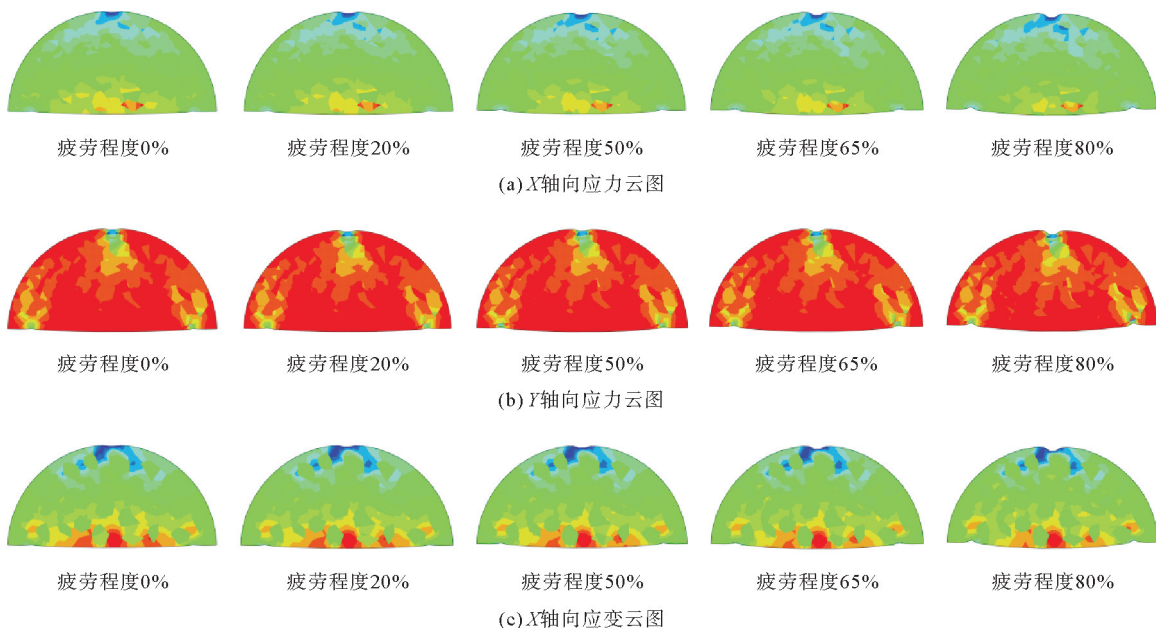
Table 6 Simulation values of residual strength of asphalt mixture under different fatigue degrees MPa

损伤程度 S/%	AC-4.75	AC-9.5	AC-13C
0	4.828	5.554	6.152
20	4.367	5.152	5.628
50	3.754	4.367	4.833
65	3.192	3.591	4.016
80	1.715	2.051	2.168

### 3 不同粒径沥青混合料弯拉剩余强度衰减规律分析

#### 3.1 强度参数模拟结果分析

根据表 4~6 中不同粒径沥青混合料的弯拉强度参数,计算相应的强度差值百分率,并绘制不同粒径沥青混合料的强度变化规律图,如图 9~11 所示。



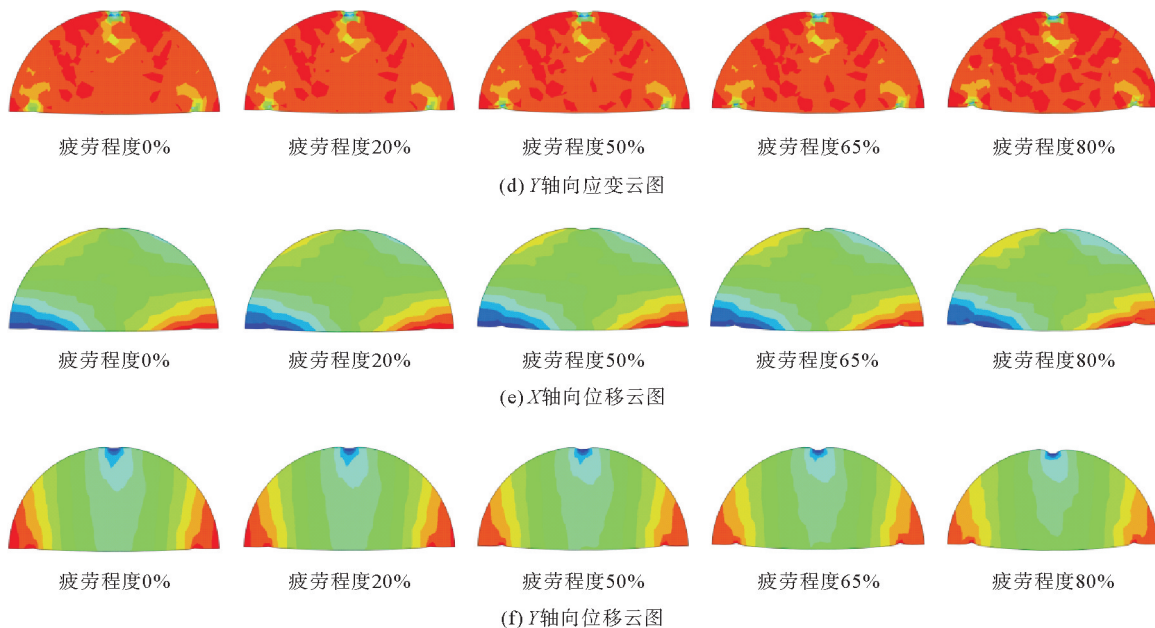


图 8 不同疲劳程度下沥青混合料数值模拟云图

Fig. 8 Cloud image of numerical model of asphalt mixture under different fatigue degrees

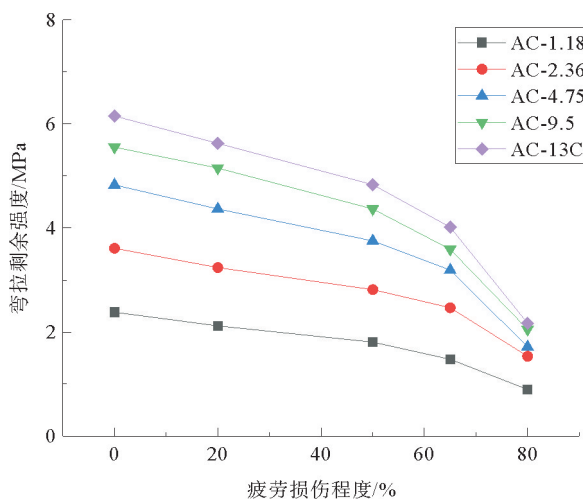


图 9 不同沥青混合料预测的弯拉强度衰减情况

Fig. 9 Attenuation of predicted bending and tensile strength of different asphalt mixtures

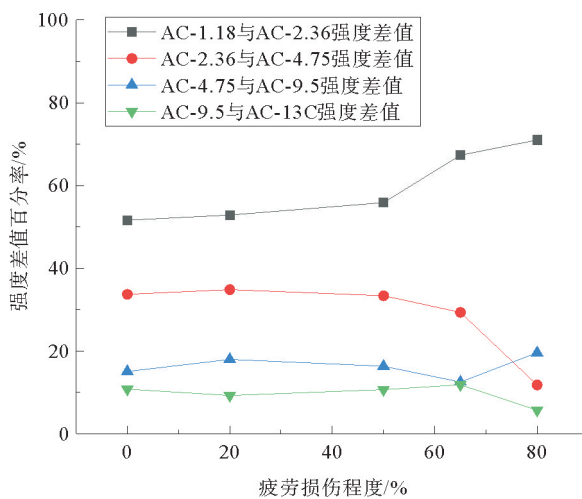


图 10 不同沥青混合料强度提升百分率

Fig. 10 Strength increase percentage of different asphalt mixtures

由图 9~11 可以看出,弯拉强度衰减规律与半圆弯曲试验得到的强度衰减规律相似。由图 10 可以看出,AC-1.18 与 AC-2.36 型沥青混合料的强度差值明显大于其他相邻粒径的强度差值,这是因为 AC-2.36 型沥青混合料中有粒径为 2.36~4.75 mm 粗集料,使 AC-2.36 型沥青混合料比 AC-1.18 型的弯拉强度大幅度提升。

### 3.2 不同疲劳损伤程度的强度衰减规律

为便于分析沥青混合料的剩余强度衰减规律,对不同粒径沥青混合料疲劳损伤中的弯拉剩余强度进行拟合,拟合曲线如图 12 所示。拟合函数基本形式为  $y = y_0 + A_1 e^{\frac{-k}{t}}$ , 得到模拟弯拉剩余强度的拟合函数,如表 7 所示。拟合函数的相关系数  $R^2$  越接近 1,表明数据拟合的效果越好。由表 7 可以看出,随着集料粒径的增大,沥青混合料拟合函数的相关系数变小,集料粒径最大的 AC-13C 型试件相关系数最小。在疲劳过程

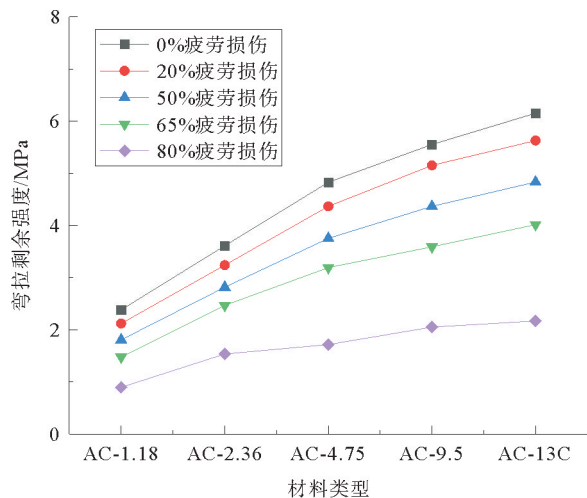


图 11 不同粒径沥青混合料抗弯拉剩余强度变化  
Fig. 11 Change of residual strength of asphalt mixture with different particle sizes

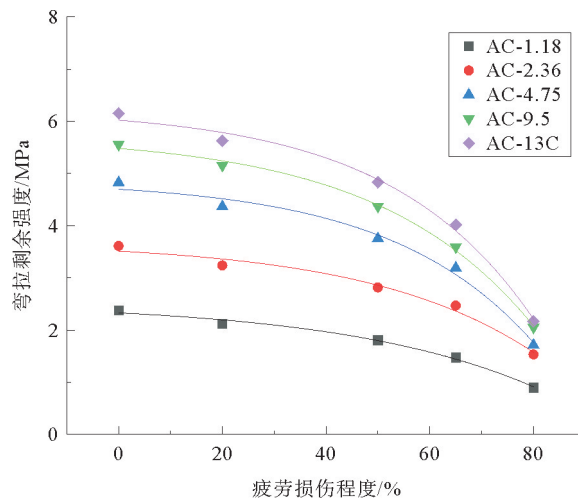


图 12 不同沥青混合料弯拉剩余强度拟合曲线  
Fig. 12 Residual strength fitting curve of different asphalt mixtures

中,AC-13C 型试件的疲劳强度参数从 6.152 MPa 衰减到 2.168 MPa,AC-1.18 型试件的疲劳强度参数则从 2.382 MPa 衰减到 0.897 MPa,说明集料粒径的范围越广,其强度变化范围越大、离散性越强,拟合的相关性也越低。

表 7 不同疲劳损伤程度下沥青混合料弯拉强度的拟合函数

Table 7 Fitting function of residual strength of asphalt mixture under different fatigue damage

材料类型	初始剩余强度 $y_0$	强度系数 $A_1$	强度衰减因子 $t$	弯拉剩余强度 $R_T$ 的拟合函数	相关系数 $R^2$
AC-1.18	2.520	-0.191	-37.503	$R_T = 2.520 - 0.191e^{\frac{s}{37.503}}$	0.965
AC-2.36	3.686	-0.173	-31.994	$R_T = 3.686 - 0.173e^{\frac{s}{31.994}}$	0.969
AC-4.75	4.869	-0.171	-27.575	$R_T = 4.869 - 0.171e^{\frac{s}{27.575}}$	0.978
AC-9.5	5.729	-0.249	-29.776	$R_T = 5.729 - 0.249e^{\frac{s}{29.776}}$	0.975
AC-13C	6.242	-0.221	-27.549	$R_T = 6.242 - 0.221e^{\frac{s}{27.549}}$	0.997

#### 4 疲劳损伤过程中沥青混合料数值模拟的强度误差分析

将半圆弯曲试验得到的沥青混合料疲劳剩余强度参数与数值模拟得到的弯拉剩余强度进行对比分析,计算模拟结果与试验结果之间的绝对误差和相对误差,并绘制误差变化趋势图,如图 13、图 14 所示,分析疲劳损伤过程沥青混合料的误差变化情况。

由图 13、图 14 可以看出,混合料的强度误差在疲劳过程前期变化不大,但在中后期突然增长,误差范围急剧增大。分析误差变化的可能原因有:一是在二维微观模型建立过程中,其集料的建立系随机生成,集料形状尺寸会有差别,对数值模拟结果的精度会有一定的影响;二是由于强度参数是经过多尺度数值模拟多层迭代得到,混合料粒径尺度逐级推进,小粒径沥青混合料的强度参数均值代入下一粒径沥青混合料中,前一级小粒径的误差逐渐积累到后一级大粒径混合料中,使得误差范围逐渐增大,但误差结果在 10% 以内,符合多尺度精度要求。



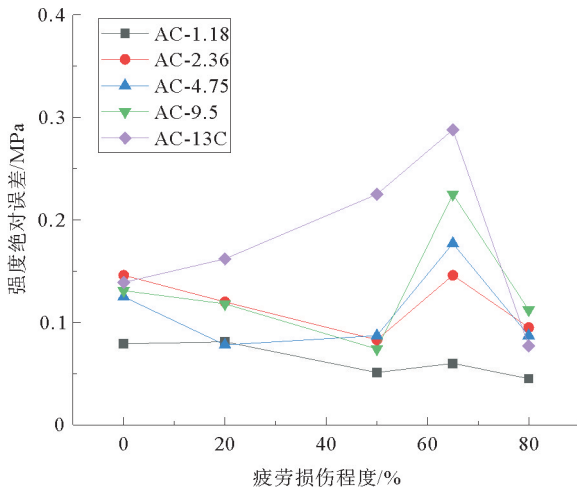


图 13 疲劳过程中沥青混合料强度绝对误差变化  
Fig. 13 Variation of absolute error of asphalt mixture strength during fatigue

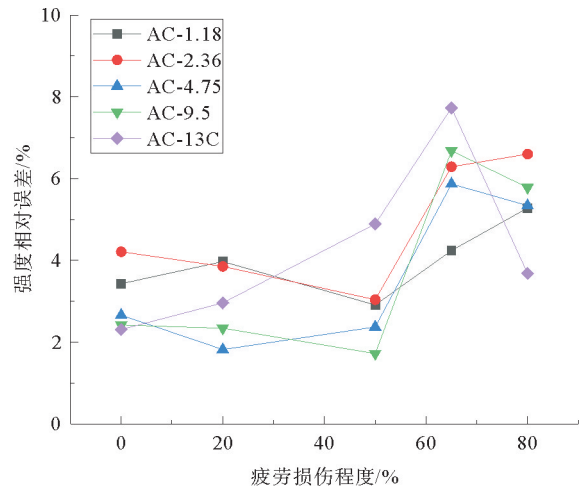


图 14 疲劳过程中沥青混合料强度相对误差变化  
Fig. 14 Variation of asphalt mixture strength relative error during fatigue

### 5 结论

1) 对不同粒径的沥青混合料进行半圆弯曲疲劳试验,得到强度衰减规律。试验结果表明:在重复荷载作用下,沥青混合料的疲劳损伤程度不断加剧,试件的抗弯拉强度逐渐降低;对比分析不同粒径沥青混合料的弯拉强度表明,随着试件中粗集料的最大公称粒径尺寸的减少,对应试件的抗弯拉强度也随之衰减,混合料抵抗疲劳损伤的能力逐渐变差,说明在沥青混合料中粗集料主要起支撑骨架作用,在实际工程中粗集料的作用不容忽视。

2) 通过荷载作用下疲劳损伤过程中沥青混合料的抗弯拉强度参数,分析了剩余强度衰减规律,得到不同粒径沥青混合料弯拉剩余强度衰减拟合函数。拟合结果表明,随着混合料中骨料粒径的增大,沥青混合料拟合函数的相关系数变小,其中集料粒径最大的 AC-13C 型沥青混合料相关系数最小。

3) 对比室内半圆弯曲疲劳试验与多尺度数值模拟试验发现,由数值模拟得到的沥青混合料抗弯拉强度,在疲劳损伤前期时的强度误差较为稳定,但在疲劳损伤后期误差波动较大,这是因为在数值模拟时粒径尺度是逐级推算的,使得前面小粒径的误差逐渐积累到大粒径混合料中,导致误差范围逐渐增大。虽然二者得到的抗弯拉强度参数之间存在误差,但是得到的沥青混合料弯拉剩余强度规律一致,且误差小于 10%,说明运用多尺度数值模拟预测沥青混合料疲劳损伤过程中的力学强度参数是有效的。

### 参考文献:

[1] PELLINEN T K, WITCZAK M W, MARASTEANU M, et al. Stress dependent master curve construction for dynamic (complex) modulus[J]. Association of Asphalt Paving Technologists: Proceedings of the Technical Sessions, 2002, 71: 281-309.

[2] 冯德成, 崔世彤, 易军艳, 等. 基于 SCB 试验的沥青混合料低温性能评价指标研究[J]. 中国公路学报, 2020, 33(7): 50-57.  
FENG Decheng, CUI Shitong, YI Junyan, et al. Evaluation index of low-temperature asphalt mixture performance based on semi-circular bending test[J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(7): 50-57.

[3] MOLENAAR A, ATHANASIOS S, XUE L, et al. Semi-circular bending test, simple but useful[J]. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 2002, 71(3): 794-815.

[4] FCUAD B, AHMAD A A, MARY A M, et al. Evaluation of hot mix asphalt (HMA) fracture resistance using the critical strain energy release rate, Jc[C]//Transportation Research Board 85th Annual Meeting, Washington, Jan. 22-26, 2006: 9-14.

[5] 曹轲铭. 沥青混合料半圆弯拉试验方法研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2007.  
CAO Keming. Research on semi-circular bending test for asphalt mixtures[J]. Changsha: Hunan University, 2007.

- [6] 刘宇,张肖宁. 沥青混合料半圆弯拉强度与间接拉伸强度对比分析[J]. 公路交通技术,2011(3):34-37.  
LIU Yu,ZHANG Xiaoning. Comparative analysis for semicircle bending strength and indirect tensile strength of asphalt mixtures[J]. Technology of Highway and Transport,2011(3):34-37.
- [7] WANG X Y,ZHANG J H,LI K,et al. Cracking analysis of asphalt mixture using semi-circle bending method[J]. Iranian Journal of Science and Technology,Transactions of Civil Engineering,2020,45:269-279.
- [8] 李友云,陈佳,王硕,等. 沥青混合料劈裂疲劳损伤力学特性多尺度研究[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版),2022,19(1):1-11.  
LI Youyun,CHEN Jia,WANG Shuo,et al. Multi-scale research on mechanical characteristics of splitting fatigue damage of asphalt mixture[J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science),2022,19(1):1-11.
- [9] 闫景晨,郑建龙,李宁宇. 玄武岩纤维沥青砂浆的抗裂性能研究[J]. 建筑材料学报,2019,22(5):800-804.  
YAN Jingchen,ZHENG Jianlong,LI Ningning. Anti-cracking performance of asphalt mortar reinforced by basalt fiber[J]. Journal of Building Materials,2019,22(5):800-804.
- [10] LI L M,JIANG X L,LIN Y L,et al. A prediction model on viscoelastic fatigue damage of asphalt mixture[J/OL]. Materials,2020,13(17). DOI:10.3390/ma13173782.
- [11] 崔亚楠,李雪杉,吴华信,等. 沥青混合料损伤愈合性能的多尺度评价[J]. 建筑材料学报,2021,24(2):432-439.  
CUI Yanan,LI Xueshan,WU Huaxin,et al. Multiscale evaluation of damage healing performance of asphalt mixture[J]. Journal of Building Materials,2021,24(2):432-439.
- [12] 魏海斌,王相焱,王富玉,等. 基于振动成型 AC-25 沥青混合料力学性能及微观分析[J]. 吉林大学学报(工学版),2021,51(4):1269-1276.  
WEI Haibin,WANG Xiangyan,WANG Fuyu,et al. Mechanical properties and micro analysis of AC-25 asphalt mixture based on vibration forming[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition),2021,51(4):1269-1276.
- [13] JIANG J W,NI F J,DONG Q,et al. Fatigue damage model of stone matrix asphalt with polymer modified binder based on tensile strain evolution and residual strength degradation using digital image correlation methods[J]. Measurement,2018,123:30-38.
- [14] 郑得标,倪富健,蒋继望,等. 基于离散元法的沥青混合料复合断裂行为研究[J]. 江苏大学学报(自然科学版),2020,41(1):87-92.  
ZHENG Debiao,NI Fujian,JIANG Jiwang,et al. Mixed-mode fracture behavior of asphalt mixture based on discrete element method[J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition),2020,41(1):87-92.
- [15] 单景松,杜贝贝. 沥青混合料永久变形模型研究[J]. 山东科技大学学报(自然科学版),2013,32(4):91-96.  
SHAN Jingsong,DU Beibei. Study of permanent deformation model of asphalt mixture[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science),2013,32(4):91-96.
- [16] 蒋继望. 多尺度视角下沥青混合料疲劳性能及微观结构研究[D]. 南京:东南大学,2019.  
JIANG Jiwang. Investigation of the fatigue property and internal structure of asphalt mixtures based on multiscale methods[D]. Nanjing:Southeast University,2019.
- [17] 王岚,焦子雄. 基于数字散斑相关方法的老化对沥青混合料疲劳开裂的影响[J]. 北京工业大学学报,2020,46(3):260-266.  
WANG Lan,JIAO Zixing. Effect of aging on fatigue cracking of asphalt mixture based on digital speckle correlation method[J]. Journal of Beijing University of Technology,2020,46(3):260-266.
- [18] 牛冬瑜,谢希望,牛艳辉,等. 粗集料接触参数对沥青混合料损伤演化的影响[J]. 中国公路学报,2020,33(10):201-209.  
NIU Dongyu,XIE Xiwang,NIU Yanhui,et al. Influence of contact parameters of coarse aggregate on damage evolution of asphalt mixture[J]. China Journal of Highway and Transport,2020,33(10):201-209.
- [19] GAO L,KONG H,DENG X,et al. Multi-scale finite element simulation of asphalt mixture anti-cracking performance[J/OL]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics,2022,121. DOI:10.1016/tafmec.2022.103490.
- [20] 盛鹰,贾彬,王汝恒,等. 基于内聚力模型的复合裂纹耦合扩展多尺度数值模拟研究与实验验证[J]. 材料导报,2022,36(4):199-208.  
SHENG Ying,JIA Bin,WANG Ruheng,et al. Multi-scale numerical simulation based on cohesive zone model and experimental verification of coupling compound crack propagation[J]. Materials Reports,2022,36(4):199-208.

- grid considering forecast errors of wind/photovoltaic[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(1):73-81.
- [15] 阎怀东, 马汝祥, 柳志航, 等. 计及需求响应的电动汽车充电站多时间尺度随机优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(10):71-80.  
YAN Huaidong, MA Ruxiang, LIU Zhihang, et al. Multi-time scale stochastic optimal dispatch of electric vehicle charging station considering demand response[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(10):71-80.
- [16] YU S Y, FANG F, LIU Y J, et al. Uncertainties of virtual power plant: Problems and countermeasures[J]. Applied Energy, 2019, 239:454-470.
- [17] 刘海涛, 许伦, 郝思鹏, 等. 基于配电网分区的分布式混合储能优化方法[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(5):137-145.  
LIU Haitao, XU Lun, HAO Sipeng, et al. Optimization method of distributed hybrid energy storage based on distribution network partition[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(5):137-145.
- [18] 孔德政, 张靖, 何宇, 等. 区域综合能源系统 IGDT-MPC 双层能量优化调度[J]. 电网技术, 2022, 46(10):3970-3979.  
KONG Dezheng, ZHANG Jing, HE Yu, et al. IGDT-MPC bi-layer energy optimal scheduling of regional integrated energy system[J]. Power System Technology, 2022, 46(10):3970-3979.
- [19] ENTSO-E. Data platform-open power system data[EB/OL]. (2020-10-06)[2022-09-02]. [https://data.open-power-system-data.org/time\\_series/2020-10-06](https://data.open-power-system-data.org/time_series/2020-10-06).
- [20] PJM Interconnection. Markets & operations, Energy markets, day-ahead energy market[EB/OL]. [2022-09-01]. <http://www.pjm.com/markets-and-perations/energy/day-ahead.aspx>.
- [21] FREY B J, DUECK D, et al. Clustering by Passing Messages Between Data Points[J]. Science, 2007, 315(5814):972-976.
- [22] 吴宇, 张彼德, 袁国森, 等. 计及电动汽车和风光资源不确定性的微电网优化配置[J]. 电测与仪表, 2016, 53(16):39-44.  
WU Yu, ZHANG Bide, YUAN Guosen, et al. Optimal configuration of micro-grid considering uncertainties of electric vehicles and PV/wind sources[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2016, 53(16):39-44.

(责任编辑: 齐敏华)

### (上接第 83 页)

- [21] 陈俊, 黄晓明. 沥青路面多尺度结构的荷载响应分析[J]. 建筑材料学报, 2012, 15(1):116-121.  
CHEN Jun, HUANG Xiaoming. Numerical analysis on multi-scale structure of asphalt concrete pavement[J]. Journal of Building Materials, 2012, 15(1):116-121.
- [22] 宫兴, 英红, 姜鹏. 基于 BP 神经网络的沥青混合料级配检测研究[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2022, 41(3):165-171.  
GONG Xing, YING Hong, JIANG Peng. Research on asphalt mixture grading detection based on BP neural network[J]. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science), 2022, 41(3):165-171.
- [23] MENG Q X, LV D, LIU Y. Mesoscale computational modeling of concrete-like particle-reinforced composites with non-convex aggregates[J/OL]. Computers & Structures, 2020, 240. DOI:10.1016/j.compstruc.2020.106349.
- [24] YAO X G, LI C X, XU T. Multi-scale studies on interfacial system compatibility between asphalt and SBS modifier using molecular dynamics simulations and experimental methods[J/OL]. Construction and Building Materials, 2022, 346. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2022.128502.
- [25] 张海涛, 马盛盛, 于腾江. 不同预测方法的沥青混合料弹性模量对比研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2018, 37(1):35-39.  
ZHANG Haitao, MA Shengsheng, YU Tengjiang. Comparative study on HMA elastic modulus based on different predicting methods[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2018, 37(1):35-39.

(责任编辑: 齐敏华)