**文章编号:**1007-9629(2023)02-0122-07

# 基于离散元的EMAS泡沫混凝土 贯入力学性能研究

朱兴一<sup>1</sup>, 张启帆<sup>1</sup>, 于 越<sup>2</sup>, 石小培<sup>3,\*</sup>

(1.同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室,上海 201804; 2.中建丝路建设投资有限公司, 陕西 西安 710075; 3.中国公路学会,北京 100011)

摘要:通过贯入力学试验研究特性材料拦阻系统(EMAS)泡沫混凝土在破碎碾压过程中的力学性能,并分析了冻融作用对其压溃强度及吸能效果的影响.在初步建立泡沫混凝土离散元模型的基础上,提出"虚拟试验法",以获得泡沫混凝土离散元模型的最佳参数组合.通过模拟抗压强度试验证明 了模型仿真精度可达97.7%.在此模型的基础上,研究了混凝土子颗粒及孔隙颗粒的半径和力学参 数对材料贯入力学性能的影响.所提出的EMAS泡沫混凝土材料离散元模型可为EMAS拦阻过程 仿真提供更为精确的研究方法.

关键词:泡沫混凝土;特性材料拦阻系统;离散元;贯入力学性能;破碎仿真
 中图分类号:TU528.2
 文献标志码:A
 doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2023.02.002

## Penetration Mechanical Properties of EMAS Foam Concrete Based on Discrete Element Simulation

ZHU Xingyi<sup>1</sup>, ZHANG Qifan<sup>1</sup>, YU Yue<sup>2</sup>, SHI Xiaopei<sup>3,\*</sup>

 (1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. China State Construction Silkroad Construction Investment Group Co., Ltd., Xi'an 710075, China;
 3. China Highway & Transportation Society, Beijing 100011, China)

**Abstract:** Penetration tests were conducted to study the mechanical properties of engineered materials arresting system (EMAS) foam concrete in crushing process. The effects of freeze-thaw cycles on its compressive strength and energy absorption were analyzed. A discrete element model of foam concrete was established, and the virtual test method was proposed to calibrate parameters of the model. The simulation results of compressive strength prove that the accuracy of the model can reach 97.7%. With this model, the influences of particle size and mechanical parameters on penetration mechanical properties of foam concrete were studied. The discrete element model of EMAS foam concrete proposed in this work provides a more accurate research method for EMAS arresting simulation.

**Key words:** foam concrete; engineered materials arresting system(EMAS); discrete element method; penetration mechanical property; crushing simulation

美国联邦航空管理局建议在飞机跑道端外铺设 由泡沫混凝土制成的特性材料拦阻系统(EMAS)以 拦阻冲出跑道的飞机.泡沫混凝土是一种轻质、多孔 混凝土材料.当飞机冲入EMAS后,材料会被进一步

收稿日期:2021-12-30;修订日期:2022-04-09

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51922079,61911530160);上海市教育发展基金会和上海市教委"曙光计划"(21SG24);上海市"科技创新行动计划"国际科技合作项目(22210710700)

第一作者:朱兴一(1983—),女,浙江绍兴人,同济大学教授,博士生导师,博士.E-mail:zhuxingyi66@tongji.edu.cn 通讯作者:石小培(1986—),女,北京人,中国公路学会副研究员,硕士.E-mail:310255050@qq.com

碾碎成粉末,直至被压实[1-2].国内外研究者采用贯入 力学试验及双侵彻试验等方法研究其力学性能和吸 能特性[34],发现其力学性能与材料密度[5-6]、孔隙结 构[7]以及纤维掺入量有关[8].然而长期的冻融作用会 使其力学性能下降,导致拦阻效果减弱,因此需明确 冻融对其力学特性的影响.许多学者使用有限元方 法研究泡沫混凝土的力学特性与拦阻效果[9-10].然而 在采用有限元方法模拟泡沫混凝土碾压变形时,大 剪切变形可能导致网格畸变,并且无法反映材料破 碎后力学性能的变化,因此其计算精度不足.离散元 法(DEM)是把不连续体分离为刚性元素的集合<sup>[11]</sup>, 用时步迭代的方法求解各刚性元素的运动方程,继 而求得不连续体的整体运动,在物料破碎模拟方面 有着广泛应用[12].与有限元相比,离散元可以模拟颗 粒的有限位移和裂缝扩展,而无需生成或划分网格, 因此适合模拟泡沫混凝土的破碎过程[13].

本文建立了泡沫混凝土离散元模型,对EMAS 泡沫混凝土碾压破碎过程进行研究.首先制备了满 足EMAS规范要求的泡沫混凝土试件,并测试其贯 入力学特性.通过冻融循环试验,研究了冻融对泡沫 混凝土贯入力学性能的影响,并验证其抗冻融性能. 采用离散元方法建立了泡沫混凝土试件的离散元模 型,并提出了"虚拟试验法"以标定其颗粒接触模型 参数,以及模拟抗压强度试验来验证仿真结果的精 确性.在此模型的基础上,实现了对泡沫混凝土碾压 破碎过程的精确模拟,并分析了力学参数对泡沫混 凝土压溃强度的影响.

## 1 材料制备与性能测试

#### 1.1 泡沫混凝土实验室制备

#### 1.1.1 原材料与配合比

EMAS泡沫混凝土的原材料包括P·O 42.5硅酸盐水泥、掺和料、发泡剂、添加剂和水.掺和料使用一级粉煤灰,以提高泡沫混凝土的压溃强度.发泡剂选择质量分数为30%的H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>溶液.添加剂主要包括稳泡剂和抗开裂组分,本研究采用cO6型稳泡剂和聚乙烯纤维.

参考 JGJ/T 341—2014《泡沫混凝土应用技术规 程》,对 EMAS 泡沫混凝土进行配合比设计.试件尺 寸为 100 mm×100 mm×100 mm,其配合比如表1 所示.

1.1.2 试件制备方法

按照配合比将水泥、掺和料和外加剂缓慢倒入 水泥净浆搅拌机的搅拌锅中,慢速搅拌6min直到材 料混合均匀;缓慢向搅拌锅中倒入一定质量的温水,

	表1	EMAS泡沫混凝土的配合比	
<b>Fable</b> 1	Miz	proportion of EMAS foam concrete	

Portland cement	Polyethylene fiber	Foam stabilizer	Foaming agent	Water
320.0	1.5	4.8	12.8	185.6

水温46℃,继续慢速搅拌1min,形成均匀的水泥浆体;将发泡剂迅速倒入搅拌机中,慢速搅拌6s后取出搅拌锅,将水泥浆体倒入贴好保鲜膜的模具中;最后将成型好的试件在水泥养护室内静置,用湿润的土工布覆盖,1d后拆模,继续养护至7d,得到泡沫混凝土试件如图1所示.



图 1 泡沫混凝土试件 Fig. 1 Foam concrete specimens

## 1.2 泡沫混凝土力学性能测试

#### 1.2.1 贯入力学试验

贯入力学试验将压杆以一定速度贯入泡沫混凝 土中直至使其压实,记录贯入过程中的压溃度 ε 和应 力σ,得到压溃曲线.典型的泡沫混凝土压溃曲线应 包括3个阶段:在初始阶段,泡沫混凝土为弹性;当应 力达到材料强度时混凝土被压碎,压溃度逐渐增大, 应力则会较为稳定并出现平台期,这一阶段称为压 溃阶段,定义此阶段的平均应力值为泡沫混凝土的 压溃强度<sup>[1]</sup>,以反映材料的吸能效果;当孔隙被全部 破坏后进入压实阶段,应力快速升高.压溃曲线与坐 标轴围成图形的面积表征了泡沫混凝土碾压破碎过 程中吸收的能量.

本文采用万能材料试验机(MTS)来测试EMAS 泡沫混凝土的贯入力学性能.将试件烘干后进行测 试.压杆以不小于500 mm/min的速度连续施加载荷, 并记录压缩过程中的应力和压溃度.对实测压溃曲线 进行拟合,得到拟合函数.根据MH/T 5111—2015 《特性材料拦阻系统》,计算其能量吸收效率.经过 对比多组试件的试验结果,选出具有代表性的泡沫 混凝土压溃曲线,如图2所示.由图2可见,此压溃 曲线明显分为3段,与规范中典型的压溃曲线一致, 试件的最大压溃度为0.69,满足规范要求.因此,将 此典型曲线作为泡沫混凝土离散元模型参数标定的 依据.





#### 1.2.2 冻融循环试验

首先将部分泡沫混凝土试件放入干燥箱内烘干, 用电子天平称重.然后置于温度为(20±2)℃、相对 湿度不低于90%的恒温恒湿箱中48h,使其充分浸 润,取出后用吸水纸吸去表面水分.将试件用塑料袋 分别密封后放置于温度为(-20±2)℃的低温箱中, 试件间距不小于20mm,6h后将试件移至室温环境 中静置5h,反复进行7次冻融循环.冻融循环完成后, 将一部分冻融试件进行烘干处理,然后称量计算其质 量损失率为4.75%,将另一部分冻融试件与未进行冻 融的试件(对照组)一起进行贯入力学试验.分别计算 冻融组与对照组的半溃缩能(结果取3个试件的平均 值),得到冻融前后泡沫混凝土单元体的半溃缩能分 别为17.670、16.555 J,计算得到抗冻系数为0.936 5. 材料的质量损失率与抗冻系数均满足规范要求.

## 2 泡沫混凝土离散元仿真方法

## 2.1 泡沫混凝土颗粒接触模型

在泡沫混凝土未破碎之前,颗粒与颗粒之间存 在固定黏结,故采用Hertz-Mindlin with bonding接触 模型;当泡沫混凝土发生破碎时,颗粒受力大于黏结 强度,导致颗粒自由移动,自由颗粒与其他颗粒(包 括处于黏结中的颗粒和自由颗粒)均采用 Hertz-Mindlin(no slip)接触模型,见图3.

#### 2.2 泡沫混凝土离散元模型

在泡沫混凝土的离散元模型中,混凝土颗粒由2 个短条形子颗粒组成.由文献[14-15]可知,当混凝土 颗粒半径与正方体试件边长比例为0.010~0.015时, 仿真精度较高.据此,本文混凝土子颗粒半径(r)选为 1.0 mm.另外,孔隙半径会直接影响模型内混凝土子 颗粒数量,当孔隙半径减小时混凝土子颗粒数量将



图 3 Hertz-Mindlin with bonding和Hertz-Mindlin(no slip)接触模型

急剧增多,导致计算速度降低,而孔隙过大时计算精 度又将受影响.经多次仿真试验后,综合考虑计算 时间与精度,将孔隙颗粒半径(R)均值定为5.0 mm, 呈正态分布,标准差为0.7,范围限制在4.0~6.0 mm 之间.最终形成的试件模型孔隙率为0.762,模型共 有33598个泡沫混凝土子颗粒,以及1002个孔隙颗 粒.泡沫混凝土试件离散元模型如图4所示.





## 2.2.1 参数标定

本文采用模拟贯入力学试验的"虚拟试验法"标 定离散元模型的弹性模量与接触模型参数."虚拟试 验法"又称"参数匹配法",是离散元研究中确定物料 参数常用的方法,其做法就是模拟一些基本的宏观 试验,通过调整离散元参数,使模拟出来的宏观试验 结果与真实情况相一致,则认为该参数值是符合实 际情况的.本节选择贯入力学试验作为宏观试验.利 用准备好的泡沫混凝土试件离散元模型,模拟贯入 力学试验.压头与实际贯入力学试验相同,为半径 25 mm、长100 mm的刚性圆柱,以500 mm/min的速 率贯入.泡沫混凝土立方体的弹性模量为0.12 GPa, 顶面为自由约束,侧面和底面为位移约束,分别限制 侧面颗粒的侧向位移与底面颗粒的竖向位移,如图5

Fig. 3 Contact models of Hertz-Mindlin with bonding and Hertz-Mindlin(no slip)

所示.通过调节Hertz-Mindlin with bonding接触模型的参数,包括法向强度、切向强度、法向刚度及切向 刚度,使模拟压溃曲线与实际压溃曲线近似相同,此时的参数为合理参数,见表2.



(a) Simulated penetration test
 (b) Actual penetration test
 图 5 模拟贯入力学试验与实际贯入力学试验
 Fig. 5 Simulated penetration test and actual penetration test

表 2 接触模型参数 Table 2 Parameters of contact model

Elastic	Normal	Tangential	Normal	Tangential	Bonding
Modulus/	stiffness/	stiffness/	strength/	strength/	radius/
GPa	(N•mm <sup>-3</sup> )	(N•mm <sup>-3</sup> )	MPa	MPa	mm
0.12	28	19	22.00	7.48	1.5

#### 2.2.2 模型验证

为了验证各参数取值的准确性,利用模拟抗压 强度试验进行复验,如图6所示.首先对1组泡沫混 凝土试件进行真实的抗压强度试验,得到实测抗压 强度为0.43 MPa.然后采用试件的离散元模型来模 拟抗压强度试验,在试件上下表面设置刚性压板, 以2.0 kN/s的速率对其施加压力,直至试件破坏, 得到模拟抗压强度为0.44 MPa,与实测抗压强度 0.43 MPa接近,仿真精度可达97.7%,因此可以认为 模型参数取值合理,仿真结果精度较高.





(a) Simulated compression test
 (b) Actual compression test
 图 6 模拟抗压强度试验与实际抗压强度试验
 Fig. 6 Simulated compressive test and actual compressive test

## 3 泡沫混凝土碾压破碎仿真

## 3.1 贯入过程分析

图7为泡沫混凝土贯入过程仿真结果,展示了试

件中心厚度为25 mm的切片达到4个压溃度( $\epsilon=0$ 、 0.03、0.43、0.81)时的状态.图7中,每个压溃度下,左 图展示了颗粒间的接触状态,右图展示了颗粒受力 状态.由图7(a)可见,当压溃度为0时,切片中孔隙分 布均匀,绝大部分颗粒压力很小.由图7(b)可见,当 压溃度为0.03时,压头周边接触的颗粒应力较大.随 着压杆继续向下移动,颗粒间应力达到极限应力,压 头下方颗粒的法向黏结被破坏,而周边则发生剪切 破坏.破坏后的颗粒可以自由移动,即材料被压碎进 入压溃阶段,并在压杆下方形成压溃区,如图7(c)所 示.值得注意的是,在压溃阶段,材料应力主要集中 在压溃区周边而非内部,而已压溃部分几乎不再受 力,这说明压溃阶段的应力主要由压溃区颗粒与周 边固结颗粒间的剪切应力组成.随着压杆继续向下 移动,压溃区不断接近试件底部.由图7(d)可见,当 压溃度为0.81时,压溃区接触试件底部,此时压杆下 方几乎全部破碎,自由颗粒被挤压密实,颗粒间法向 应力随之迅速增大,导致总应力急剧升高.

#### 3.2 力学性能影响因素分析

#### 3.2.1 冻融的影响

冻融循环前后泡沫混凝土的实测压溃曲线见图 8.由图8可见,经过7次冻融循环后,泡沫混凝土的压 溃强度由0.50 MPa降低为0.18 MPa,降低了64%. 这是因为在冻融的影响下,泡沫混凝土及内部水分 的变形会导致其孔隙壁发生微小破坏,多个孔隙将 相互贯通,在材料内形成微小裂缝<sup>[16]</sup>.在压力下,材料 将更容易被破坏,因此压溃阶段应力水平下降,泡沫 混凝土的吸能效果变差.这说明长期暴露于低温环 境中的EMAS在拦阻冲出跑道的飞机时,产生的阻 力将会大大减小,使得拦阻效果变差.

## 3.2.2 泡沫混凝土和孔隙颗粒粒径的影响

保持孔隙半径为5.0 mm,将混凝土子颗粒半径 分别设置为1.0、1.2、1.5 mm,测试这3种情况下的模 拟压溃曲线,并与实测压溃曲线对比,见图9.由图9 可见:3种混凝土子颗粒半径下试件模拟压溃曲线均 在实测压溃曲线附近波动;当混凝土子颗粒半径为 1.5 mm时,在0~0.44压溃度区间内模拟应力小于实 测应力,而在压溃度超过0.44以后模拟应力大于实 测应力,模拟结果与实测结果差别较大,这说明当混 凝土颗粒较粗时,压杆更容易贯入其中,但破碎的混 凝土颗粒较粗时,压杆更容易贯入其中,但破碎的混 疑土颗粒较粗时,压杆更容易贯入其中,但破碎的混 疑主颗粒较粗时,压杆更容易贯入其中,但破碎的混 疑主颗粒较粗时,压杆更容易贯入其中,但破碎的混 线主颗粒较粗时,压杆更容易贯入其中,但破碎的混

另外,保持混凝土子颗粒半径为1.0 mm,将孔



图 7 泡沫混凝土贯入过程仿真 Fig. 7 Penetration process simulation of foam concrete



图 8 冻融循环前后泡沫混凝土的实测压溃曲线

Fig. 8 Test compression curves of foam concretes before and after freeze-thaw cycles



图 9 不同混凝土子颗粒半径下试件的模拟压溃曲线 Fig. 9 Simulated compression curves of foam concretes

with different concrete particle radius

隙颗粒半径分别设置为4.0、5.0、6.0 mm.模拟结果见图 10.由图 10可见:5.0 mm孔隙颗粒对应的模拟

压溃曲线与实测压溃曲线最为接近;孔隙颗粒半径 为6.0 mm的试件模拟压溃曲线波动最大,孔隙颗粒 半径为5.0 mm的次之,孔隙颗粒半径为4.0 mm的 最小,这说明孔隙颗粒半径越大,计算结果的波动性 越强,仿真误差越大;泡沫混凝土实测最大压溃度为 0.69,孔隙颗粒半径为6.0 mm和5.0 mm的试件对 应最大压溃度约为0.70,与实测结果接近,而孔隙颗 粒半径为4.0 mm的试件对应最大压溃度约为0.61, 说明当孔隙颗粒半径过小时,该模型对贯入过程的 仿真精度较差.综合考虑,当孔隙颗粒半径为5.0 mm 时,模拟效果最好.



图 10 不同孔隙颗粒半径下试件的模拟压溃曲线

Fig. 10 Simulated compression curves of foam concretes with different pore particle radius

#### 3.2.3 接触强度的影响

本节探究 Hertz-Mindlin with bonding 接触模型

中法向强度和切向强度分别增加10%(+10%)和减少10%(-10%)对泡沫混凝土力学性能的影响,结果见图11.由图11(a)可知:初始阶段最大应力随着法向强度的增加而略有增加,这是因为初始阶段试件整体被压缩,颗粒间法向强度起主要作用;压溃阶段3条曲线较为接近,说明法向强度对压溃阶段应力影响不大.由图11(b)可知:切向强度对初始阶段压溃曲线没有影响,因此初始阶段应力主要受颗粒间法向强度影响;压溃阶段应力随着切向强度的增加而明显增加,这是因为材料压溃区主要发生剪切破坏;进入压实阶段后bonding键已完全破坏,法向强度与切向强度均不影响压实阶段应力,因此压实阶段曲线较为接近.

## 3.2.4 接触刚度的影响

同理,探究 Herz-Mindlin with bonding 接触模型 中法向刚度与切向刚度分别增加10%(+10%)和减少 10%(-10%)对泡沫混凝土力学性能的影响,结果见 图12.由图12可见,当颗粒的法向刚度较小时,若压杆 产生相同微小位移,压头下方大部分颗粒的bonding键 积累应力较小,颗粒达到极限应力所需要的位移更多. 因此bonding键断裂过程被放慢,在同一时刻,有更多 的bonding键存在,从而导致压头下颗粒承受的总应力 增加.对比观察图12(a)和图12(b)可以发现,切向刚度 对压溃阶段应力的影响更大.这是因为在压杆贯入的 过程中,压溃区颗粒与周边颗粒间切向应力更高,而这 些切向应力组成了大部分的压溃强度.



## 4 结论

(1)所提出的模拟贯入力学试验方法可以对材料力学参数进行标定(法向刚度、法向强度、切向刚度和切向强度),能够使离散元模型的压溃曲线与实测压溃曲线相近,使模型具备与实际材料相符的力学性能.

(2)在泡沫混凝土的压溃阶段,破碎的颗粒形成 压溃区,压溃强度主要由压溃区内部的法向应力及 压溃区与周边颗粒的切向应力组成,其中切向应力 更大.随着压杆的压入,bonding键不断断裂,压头下 破碎的颗粒逐渐被压实,压溃区内部法向应力成为 压溃强度的主要成分.

(3)在经过7次冻融循环后,泡沫混凝土材料的

贯入力学性能减弱,压溃阶段的压溃强度下降64%,导致材料的吸能效果变差,在拦阻飞机时产生的拦阻力将更小.因此当EMAS泡沫混凝土长期暴露于冻融环境下时,其拦阻效果将变差.

(4)混凝土子颗粒和孔隙颗粒的半径会影响压 溃阶段应力的稳定及计算精度,而压溃阶段应力水 平主要受接触模型参数影响.减小切向刚度和增大 切向强度都会使压溃阶段应力增大.减小法向刚度 会使压溃强度有轻微的提高,而法向强度的影响并 不显著.对于泡沫混凝土吸能特性的影响,切向刚度 大于法向刚度,同时切向强度大于法向强度.

## 参考文献:

- [1] 姚红宇,史亚杰,肖宪波,等.飞机拦阻用泡沫混凝土材料压 缩性能的表征[J].失效分析与预防,2015,10(2):83-86.
   YAO Hongyu, SHI Yajie, XIAO Xianbo, et al. Characterization of compressive properties of foamed concrete used for aircraft arrestment[J]. Failure Analysis and Prevention, 2015, 10(2): 83-86. (in Chinese)
- [2] JIANG C S, YAO H Y, XIAO X B, et al. Phenomena of foamed concrete under rolling of aircraft wheels[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2014, 495:012035.
- [3] 肖帆.泡沫填充混凝土冲击压剪力学性能实验研究[D].广州: 华南理工大学,2014.
   XIAO Fan. Experimental study on the mechanical behavior of foam filled concrete under impact compression/shear loading[D].
   Guangzhou: South China University of Technology, 2014. (in Chinese)
- [4] 黄海健,宫能平,穆朝民,等.泡沫混凝土动态力学性能及本 构关系[J].建筑材料学报,2020,23(2):466-472.
  HUANG Haijian, GONG Nengping, MU Chaomin, et al. Dynamic mechanical properties and constitutive relation of foam concrete[J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(2):466-472. (in Chinese)
- [5] STEYN W J, LOMBARD S, HORAK E. Foamed concrete-based material as a soft ground arresting system for runways and airfields[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2016, 30 (1):C4014006.
- [6] 李升涛,陈徐东,张锦华,等.不同密度等级泡沫混凝土的单 轴压缩破坏特征[J].建筑材料学报,2021,24(6):1146-1153.
   LI Shengtao, CHEN Xudong, ZHANG Jinhua, et al. Failure characteristics of foam concrete with different density under

uniaxial compression[J]. Journal of Building Materials, 2021, 24 (6):1146-1153. (in Chinese)

- [7] 庞超明,王少华.泡沫混凝土孔结构的表征及其对性能的影响
   [J].建筑材料学报,2017,20(1):93-98.
   PANG Chaoming, WANG Shaohua. Void characterization and effect on properties of foam concrete [J]. Journal of Building Materials, 2017, 20(1):93-98. (in Chinese)
- [8] 贾艳涛,杨永敢.泡沫混凝土性能试验研究[J].硅酸盐通报, 2016,35(9):2804-2809.
  JIA Yantao, YANG Yonggan. Experimental research on properties of foamed concrete[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2016, 35(9):2804-2809. (in Chinese)
- [9] XUF, TANZ, SHIYJ. Numerical simulation of aircraft overrun arresting system's arresting behavior[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2014, 34(8):776-780.
- [10] 杨先锋,张志强,杨嘉陵,等.飞机泡沫混凝土道面拦阻系统的 阻滞性能研究[J]. 兵工学报,2017,38(增刊1):155-162.
  YANG Xianfeng, ZHANG Zhiqiang, YANG Jialing, et al. Research on retardation performance of aircraft foamed concrete arresting system[J]. Acta Armamentarii, 2017, 38(Suppl 1): 155-162. (in Chinese)
- [11] CUNDALL P A, STRACK O D L. A discrete numerical model for granular assemblies[J]. Geotechnique, 1979, 29(1):47-65.
- [12] 李臣.振动慢剪破碎机破碎性能分析及实验研究[D].赣州;江 西理工大学, 2018.
   LI Chen. Crushing performance analysis and experimental study on vibration-slow shear crusher[D]. Ganzhou; Jiangxi University of Science and Technology, 2018.(in Chinese)
- [13] FAKHIMI A, CARVALHO F, ISHIDA T, et al. Simulation of failure around a circular opening in rock [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2002, 39(4): 507-515.
- [14] NGUYEN T T, BUI H H, NGO T D, et al. Experimental and numerical investigation of influence of air-voids on the compressive behaviour of foamed concrete [J]. Materials and Design, 2017, 130:103-119.
- [15] NGUYEN T T, BUI H H, NGO T D, et al. A micromechanical investigation for the effects of pore size and its distribution on geopolymer foam concrete under uniaxial compression [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2019, 209:228-244.
- [16] 蔡军, 匡渝阳.路用泡沫混凝土微观孔隙结构特性影响研究[J]. 中外公路,2021,41(5):222-226.
  CAI Jun, KUANG Yuyang. Study on microscopic pore structure characteristics of pavement cellular concrete[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2021, 41(5):222-226. (in Chinese)