

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2020.076

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



# 冻融循环作用下煤矸石混凝土的损伤特性及本构关系

邱继生,周云仙,王民煌,关晓,侯博雯

(西安科技大学 建筑与土木工程学院,西安 710054)

**摘要:**考虑煤矸石粗骨料取代率(0、20%、40%、60%)的影响,开展冻融循环试验、单轴受压本构试验及声发射检测试验,研究煤矸石混凝土的损伤本构模型。结果表明:不同取代率煤矸石混凝土的相对峰值应变与冻融损伤值具有较高的相关性,所得冻融损伤值与相对峰值应变的方程可为本构模型的建立提供有效参数。煤矸石混凝土声发射特性与其荷载损伤发展情况、力学性能、应力-应变曲线有紧密联系,基于受压声发射特性,采用PBS平行杆力学模型建立了未冻融循环作用下煤矸石混凝土的荷载损伤模型,并结合其冻融损伤模型,建立了煤矸石混凝土冻融损伤本构关系,计算结果与试验数据符合较好。该模型能较准确地反映混凝土在冻融和单轴受压荷载作用下的全过程损伤特征。

**关键词:**煤矸石混凝土;冻融循环;声发射;抗冻性能;本构关系

**中图分类号:**TU528.1 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2021)05-0149-09

## Damage characteristics and constitutive relationship of coal gangue concrete under freeze-thaw cycles

QIU Jisheng, ZHOU Yunxian, WANG Minhuang, GUAN Xiao, HOU Bowen

(School of Architecture and Civil Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, P. R. China)

**Abstract:** Considering the influence of coal gangue coarse aggregate replacement rate (0, 20%, 40%, 60%), this article conducts freeze-thaw cycle test, uniaxial compressive constitutive test and acoustic emission detection test to study the damage constitutive model of coal gangue concrete (CGC). The research result indicates that the relative peak strain of CGC with different substitution rates has a high correlation with the freeze-thaw damage value. The resulting equations of freeze-thaw damage value and relative peak strain provide effective parameters for the establishment of constitutive models. The acoustic emission characteristics of CGC are closely related to its load damage development, mechanical properties, and stress-strain curve. Therefore, based on the acoustic emission characteristics, this paper uses parallel bar system (PBS) to establish the load damage model of gangue concrete without freeze-thaw cycle. Combined with the damage model of freeze-thaw, the freeze-thaw damage constitutive relationship of CGC is established, and the calculation results are in good agreement with the test data. This model can accurately

**收稿日期:**2020-04-25

**基金项目:**国家自然科学基金(51808443);陕西省自然科学基金(2018JM5167、2016JQ5090);中国博士后科学基金(2017M613166)

**作者简介:**邱继生(1977-),男,博士,副教授,主要从事固废废弃物建材资源化研究,E-mail: Qiujiasheng@xust.edu.cn.

**Received:**2020-04-25

**Foundation items:** National Natural Science Foundation of China (No. 51808443); Natural Science Basic Research Program of Shaanxi Province (No. 2018JM5167, 2016JQ5090); China Postdoctoral Science Foundation (No. 2017M613166)

**Author brief:** QIU Jisheng (1977-), PhD, associate professor, main research interests: utilizing solid wastes as resource of building material, E-mail: Qiujiasheng@xust.edu.cn.

reflect the overall process damage characteristics of CGC under freeze-thaw and uniaxial compression.

**Keywords:** coal gangue concrete; freeze-thaw damage; acoustic emission; frost durability; constitutive model

煤矸石作为目前存量最大的工业固废之一,带来诸多环境问题,影响着煤炭行业的绿色发展,因此,利用其资源属性提高其资源化利用率势在必行<sup>[1-3]</sup>。用煤矸石取代天然碎石制备混凝土,一方面可以防止煤矸石废弃堆存污染环境,另一方面也可以减少开采天然碎石对生态的破坏,是煤矸石高值化、规模化资源利用的有效途径<sup>[4-6]</sup>。中国的煤矿多分布在北方寒冷地区,从就地取材的角度出发,煤矸石混凝土主要应用于北方地区,因此,冻融循环作用对其力学性能及耐久性能有重要影响<sup>[7-8]</sup>。已有研究成果<sup>[9-11]</sup>主要集中在冻融环境下煤矸石混凝土的强度劣化规律和冻融损伤演化规律方面,对能够全面反映其在冻融环境下力学性能的冻融损伤本构模型方面的研究相对较少。

近年来,在经典混凝土损伤本构关系<sup>[12-13]</sup>的基础上,龙广成等<sup>[14]</sup>研究了冻融环境下混凝土的持荷性能,并基于应变等价假说和相关统计理论,建立了冻融后混凝土损伤本构模型。高懿伟<sup>[15]</sup>采用无损检测和有损检测技术探究了早期受冻混凝土的损伤本构模型。徐童淋等<sup>[16]</sup>利用声发射数据分析了冻融循环条件下混凝土的动态力学性能及损伤演化规律。然而,与天然碎石相比,煤矸石具有孔隙率高、吸水性强等特点,从而对混凝土的抗冻性能产生较大影响。为更好地体现煤矸石混凝土的特点,准确地指导实际工程,需要对冻融环境下煤矸石混凝土的本构模型进行进一步的研究。

目前,声发射技术已广泛用于混凝土损伤检测方面。通过声发射检测试验能够捕捉到混凝土受压破坏过程中所产生的机械波,能够较为真实地反映试块内部裂缝的出现和发展情况,可在损伤本构模型的研究中发挥重要作用<sup>[17-18]</sup>。笔者在现有声发射特性研究和普通混凝土损伤本构理论的基础上,基于煤矸石混凝土受压破坏过程中的声发射特性,利用PBS平行力学杆模型,用声发射特性指标定义单轴受压荷载损伤变量,结合其冻融损伤演化模型,构建同时考虑冻融损伤和单轴受压荷载损伤的煤矸石混凝土本构关系。

## 1 试验概况

### 1.1 原材料

试验选用陕西秦岭水泥股份有限公司生产的PO42.5R普通硅酸盐水泥,初凝时间为85 min,终凝时间为260 min,3 d抗压强度不小于22 MPa,28 d抗压强度不小于43 MPa。选用河砂的细度模数为2.8,表观密度为2 610 kg/m<sup>3</sup>。普通碎石的粒径5~25 mm,混合级配,表观密度为2 870 kg/m<sup>3</sup>,压碎指标为6%。煤矸石产自陕西省神木张家峁煤矿(图1(a)),采用日本岛津XRD-7000L型X射线衍射仪分析得到煤矸石的矿物成分,如图1(b)所示。

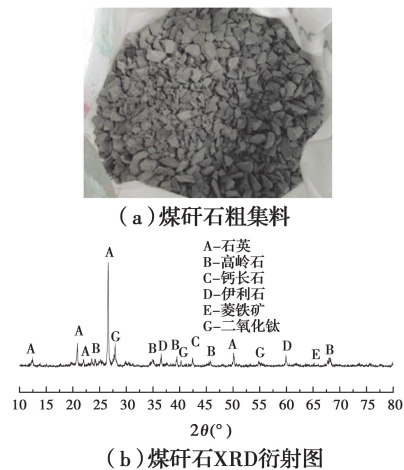


Fig. 1 Coal gangue characteristics

### 1.2 配合比设计

试验采用的4种不同煤矸石体积取代率为0%、20%、40%、60%,分别命名为MG0、MG2、MG4及MG6,水胶比均为0.45,具体配合比见表2。试块的尺寸和数量根据《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2019)中的规定确定,每组试块采用100 mm×100 mm×300 mm的棱柱体试块21个。

表 2 煤矸石混凝土配合比

分组	水	水泥	碎石	煤矸石	砂	kg/m <sup>3</sup>
MG0	160	356	1 225	0	659	659
MG2	160	356	980	180	659	659
MG4	160	356	735	360	659	659
MG6	160	356	490	539	659	659

### 1.3 试块制作

按照《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》(GB/T 50080—2016)的规定制作试块。待 24 h 后将试块脱模,放入温度为  $20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ 、湿度为 98% 的恒温恒湿养护箱中养护 28 d,并确认试块外观无异常。

### 1.4 试验方法

1.4.1 冻融循环试验 混凝土冻融循环试验采用 KDR-V9 型混凝土快速冻融试验机(图 2(a)),按照《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》(GB/T 50082—2009)中有关快冻法的规定进行,其间用 LT20K 型工业计重电子天平测量试块的质量损失,用 NM-4B 型非金属超声检测分析仪(图 2(b))检测试块的弹性模量损失。

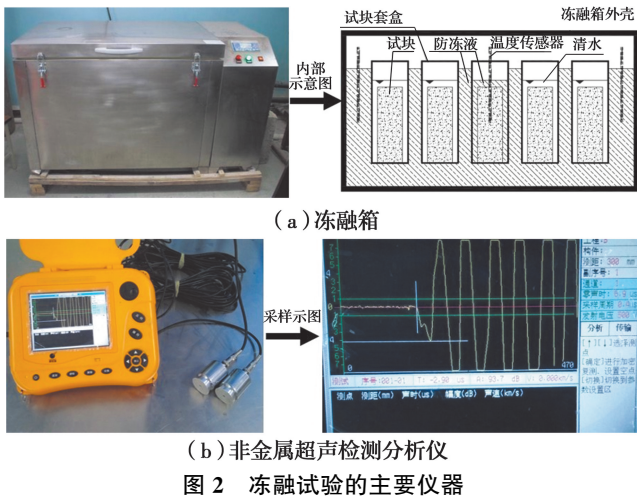


Fig. 2 Main instrument of freeze-thaw test

1.4.2 单轴受压本构试验及声发射试验 采用 DTAW-8000 型伺服压力试验机对冻融后的试件进行单轴受压本构试验,同时在试块侧面布置 SAEU2S 型声发射仪的检测探头,记录试块受压破坏过程中的声发射特性参数。试验布置如图 3 所示。

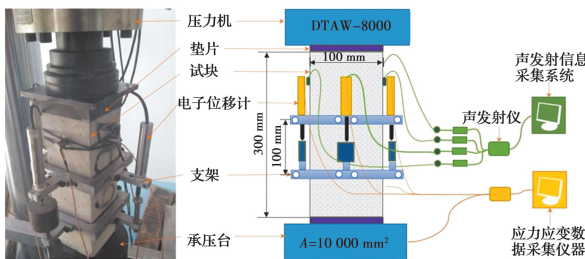


图 3 本构试验及声发射检测试验的各装置布置情况

Fig. 3 Layout of devices for constitutive test and acoustic emission tests

## 2 煤矸石混凝土的冻融损伤特性

通过单轴受压本构试验,得到了经历 0、25、50、75、100 次冻融循环后的 MG0、MG2、MG4 组煤矸石混凝土试块的应力-应变曲线, MG6 组试块经历 100 次冻融循环后受破坏严重,无法得到其应力-应变曲线,只得到经历 75 次冻融循环次数前的 4 条应力-应变曲线。

未经冻融的各组试块的应力-应变曲线如图 4 所示。由试验结果可知,各组曲线规律基本相同, MG2 组试块的峰值应力略高于 MG0 组, MG4、MG6 组试块的峰值应力略低于 MG0 组,各组峰值应变、初始切线模量也无明显差异,说明煤矸石取代率对不考虑冻融循环的混凝土的应力-应变关系曲线影响不大。

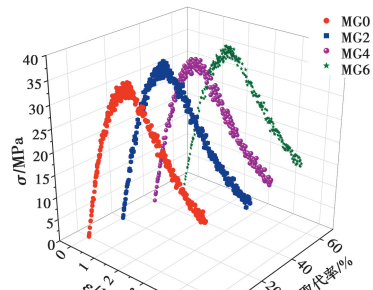


图 4 未经冻融的各组试块的应力-应变曲线

Fig. 4 Stress-strain curve of each specimen without freeze-thaw

经历一定次数的冻融循环后各组煤矸石混凝土试块的应力-应变曲线如图 5 所示。

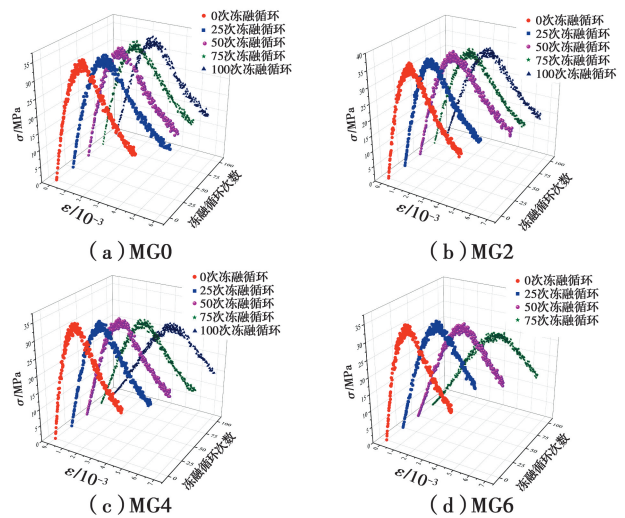


图 5 经历了一定次数的冻融循环后的应力-应变曲线

Fig. 5 Stress-strain curves of each set after a certain number of freeze-thaw cycles



由图 5 可知,各组试块的应力-应变曲线随冻融循环次数的变化规律大致相同,各组试块的峰值应力、初始切线模量、峰值点割线模量均随冻融循环次数的增加而降低,峰值应变和极限应变均随冻融循环次数的增加而提升,应力-应变曲线整体均趋于扁平,而且随着煤矸石取代率的增高,上述变化趋势也更加明显。如图 5(a)所示的 MG0 组试块,其经历 100 次冻融循环后,应力-应变曲线的并无显著变化,而 MG6 组试块每经历 25 次冻融循环,其应力-应变曲线的扁平化趋势愈发明显。此外,取代率较高的煤矸石混凝土的应力-应变曲线在上升段和普通混凝土有较大不同。MG0 组试块即使经历 100 次冻融后,其上升段依然整体上凸,只是较未经冻融时上凸不明显,而 MG4、MG6 组试块经历 100 次、75 次冻融循环后,其应力-应变曲线的上升段前段都出现了明显的下凹。曲线下凹主要是由于加载初期由冻融循环作用产生的裂隙和孔隙被压实所致。这也说明随着煤矸石取代率的增加,冻融循环产生的损伤也越大。

由图 6(a)可知,各组试块的峰值应力随冻融循环次数的增加而降低,取代率越高的试块,其峰值应力随冻融循环次数的增加而降低的速度也更快。另一方面,各组试块的相对峰值应力与其冻融损伤值  $D_f = 1 - E_{IX}$  (其中  $E_{IX}$  为试块的相对动弹性模量) 之间的关系接近线性,且较为一致(图 6(b))。煤矸石混凝土的峰值应变随冻融循环次数的增加而不断增大(图 6(c)),取代率越高的煤矸石混凝土,增加速度就越快,经历 75 次冻融循环后, MG0 组试块的峰值应变增加了约 15.2%,而 MG2、MG4、MG6 组试块的峰值应变则分别增加了 43.9%、76%、162.1%,是 MG0 组试块的 2.9 倍、5 倍、10.7 倍。各组煤矸石混凝土的峰值应变随其冻融损伤值的变化规律较为一致,总体上看,冻融损伤值为 0.1、0.2、0.3 时,不同取代率的煤矸石混凝土的相对峰值应变在 1.4、1.7、2.3 左右。

各组试块的相对峰值应变随冻融损伤值的变化具有较强的一致性,说明经历冻融循环后的试块的相对峰值应变的变化,本质上是由其冻融损伤所导致。不同取代率的煤矸石混凝土的相对峰值应变随冻融循环次数的变化规律有所不同,是因为其经历了一定次数的冻融循环后,冻融损伤值不同,反之,无论取代率的高低和经历冻融循环次数的多少,只要冻融损伤值基本相同的试块,其相对峰值应变也

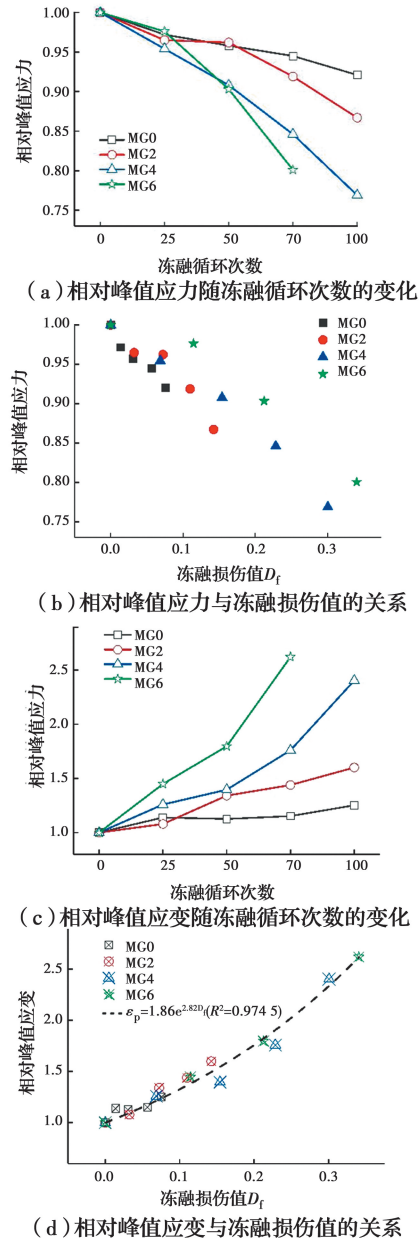


图 6 相对峰值应力和峰值应变随冻融循环次数的变化  
Fig. 6 Variations of relative peak stress and peak strain of specimens with different freeze-thaw cycles

基本相同。故以冻融损伤值为自变量,统一对所有煤矸石混凝土的相对峰值应变进行拟合,拟合结果见图 6(d),拟合相关性系数为 0.974 5,并取 4 组煤矸石混凝土中未经冻融的试块的峰值应变的平均值,即  $1.86 \times 10^{-3}$  为未经冻融时的峰值应变值,得到煤矸石混凝土的峰值应变与冻融损伤值的关系为

$$\epsilon_p = 1.86e^{2.82D_f} \quad (1)$$

式中:  $\epsilon_p$  为煤矸石混凝土的峰值应变(不考虑原材料、水胶比、冻融循环方式、耦合作用等其他因素的影响),单位为  $10^{-3}$ ;  $D_f$  为煤矸石混凝土的冻融损伤值,根据前期研究结果,可由式(2)计算得到。

$$D_f = 0.000\ 688N + 0.003\ 3QN + 0.005\ 51Q^2N \quad (2)$$

式中:Q为煤矸石取代率;N为冻融循环次数。

### 3 煤矸石混凝土冻融损伤本构关系

#### 3.1 声发射幅度分析

经历了一定冻融循环次数后的煤矸石混凝土试块进行单轴受压本构试验得到的应力-应变关系不能准确地反映冻融循环作用对煤矸石混凝土造成的损伤规律,应该分为冻融循环作用的损伤及单轴受压应力的荷载损伤两种,所以,利用声发射技术先研究了未经冻融循环煤矸石混凝土得荷载损伤规律。

煤矸石混凝土在荷载作用下,除少量的弹性变形外,裂缝的出现与扩展会同时伴随着声音和能量的释放<sup>[19]</sup>,试块内部裂缝的开裂会以机械波的形式向周围传播,而机械波在固体中的衰减速度极慢,绝大部分机械波都会传播至试块表面被声发射仪的检测探头所捕捉,成为可被记录和分析的声发射事件。

煤矸石混凝土的荷载损伤过程,即是其中的原生微裂隙开裂发育,不断增大贯通,直到主裂面出现、整体破坏的过程。在这个过程中,裂缝不断出现和发育,都必然伴随着声发射事件。某段时间内或某个应力、应变水平下,煤矸石混凝土裂缝出现和发育得越多,声发射事件就出现的越频繁,其幅度也就越大。故煤矸石混凝土受压破坏过程中的声发射特性可以极为真实地反映出其中裂缝的数量、尺寸等信息,即是煤矸石混凝土的荷载损伤发展情况。

试验得到各组煤矸石混凝土试块未经冻融时,其受压破坏过程中的声发射幅度随应变的变化规律如图7所示。

由图4、图7可知,煤矸石混凝土的声发射幅度和其荷载损伤发展情况、其力学性能、其试验得到的应力-应变曲线有紧密的联系。煤矸石混凝土试块受压破坏过程中的声发射幅度的变化可以分为4个阶段:

1)初始阶段:在试块受压初期、应变较小时,声发射幅度几乎不存在,表明此时试块内部几乎没有裂缝产生,试块的荷载损伤也可以近似为零。对应的应力-应变曲线的初始段几乎呈线性,若此时卸载,试块基本可恢复到初始状态,即可认为试块处于线弹性阶段。

2)增长阶段:随着试块应变的增大,声发射幅度也随之逐渐增大,表明此时试块内部原有微裂纹在不断扩展,并有新的裂缝产生,砂浆与粗集料交界面

由于裂缝的扩展开始分离,随着试块受荷的不断增大,材料损伤不断累积。增长阶段前期,试块还具有较高的承载能力,损伤增长的速度较慢,但随着贯穿集料的裂缝进一步发展,直至达到试块表面形成宏观裂缝时,荷载损伤的增长速度也快速增大。此阶段声发射幅度-应变曲线可与应力-应变曲线中非线性上升段对应,此时混凝土处于塑性阶段的前中期。

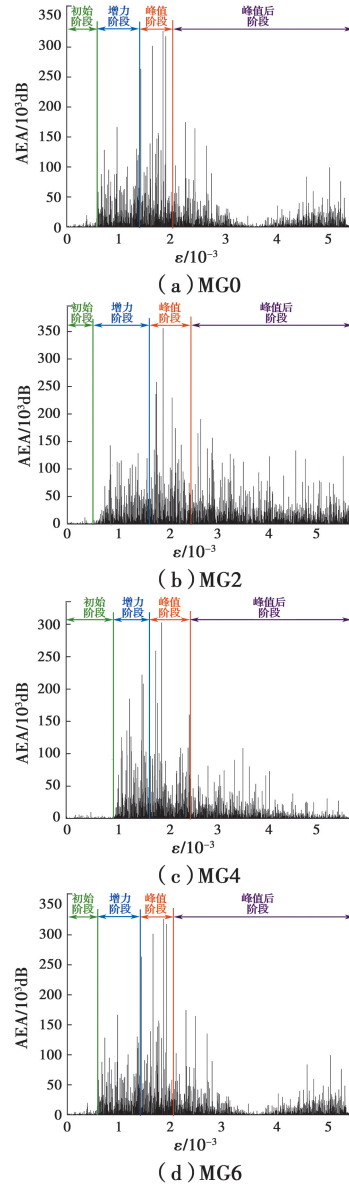


图7 各组试块未经冻融时的声发射幅度-应变曲线  
Fig. 7 Acoustic emission amplitude-strain curve of each set of specimens without freezing and thawing

3)峰值阶段:当应变接近峰值应变时,声发射幅度也接近其最大值,裂缝不断发育扩展逐渐贯穿整个试块,在试块表面可以观察到明显的主裂面。此阶段可与应力-应变曲线中的峰值点附近相对应。

4)峰值后阶段:当应变超过峰值应变后,声发射幅度逐渐降低至较低的水平,混凝土内部产生的新

裂缝较少,材料损伤集中体现为宏观主裂面不断发育扩展。此时试块开始丧失承载力,应力逐渐减小,对应应力-应变曲线中的下降段。

### 3.2 荷载损伤变量的定义

利用 PBS 平行杆力学模型<sup>[20]</sup>,设煤矸石混凝土试块由  $j$  个杆元组成,且每个杆元的截面面积均相同,所有杆元的截面面积之和即为试块的承压面积。当试块处于一定应变水平时,一定数量的杆元发生断裂,由于杆元断裂而导致试块的有效承压面积降低,且弹性模量随之减小,即有

$$\frac{i}{j} = \frac{A_u}{A} = \frac{E_u}{E_n} \quad (3)$$

式中: $i$  为煤矸石混凝土中仍在工作的杆元的数量; $j$  为煤矸石混凝土中杆元的总数; $A_u$  为煤矸石混凝土受压破坏过程中的有效承压面积,  $\text{mm}^2$ ;  $A$  为煤矸石混凝土承压面积,所有试块的  $A$  值均为  $10\,000\text{ mm}^2$ ;  $E_u$  为煤矸石混凝土受压破坏过程中的弹性模量,  $\text{MPa}$ ;  $E_n$  为煤矸石混凝土受压前的初始弹性模量,  $\text{MPa}$ 。

由于煤矸石混凝土的声发射幅度和其荷载损伤发展情况、力学性能、试验得到的应力-应变曲线有紧密的联系,在平行杆力学模型的基础上,增加以下假定:

- 1) 每当一个杆元断裂时,就会产生一定的声发射幅度;
- 2) 所有检测到的声发射幅度,都是由某个杆元断裂产生的;
- 3) 每个杆元断裂后就会退出工作,直到试块完全破坏;
- 4) 杆元的弹性模量即为试块经历了冻融损伤但还没有施加荷载前的初始弹性模量。

依据平行杆力学模型和上述假定,只要有一定的声发射幅度,即有一个杆元断裂,微观角度上煤矸石混凝土有效承压面积降低,宏观角度上煤矸石混凝土的弹性模量减小,即应力-应变曲线的斜率降低。可将受压开始至受压破坏过程中任意时刻的声发射幅度合计为累计声发射幅度,并认为煤矸石混凝土荷载损伤与累计声发射幅度成正比<sup>[21-22]</sup>,即

$$D_l = k_1(j-i) = k_2(A-A_u) = k_3(E_n-E_u) = k_4 J \quad (4)$$

式中: $D_l$  为煤矸石混凝土荷载损伤值,无量纲; $k_1$ 、 $k_2$ 、 $k_3$ 、 $k_4$  为比例系数; $J$  为煤矸石混凝土受压破坏过程中的累计声发射幅度,  $\text{dB}$ 。

为便于计算,以各试块破坏时的累计声发射幅度(简称总声发射幅度)为标准,将各试块的累计声发射幅度做均一化处理,约去式(4)中的比例系数,

将煤矸石混凝土的荷载损伤变量定义为

$$D_{l(\epsilon)} = \frac{J}{J_t} \quad (5)$$

式中: $D_{l(\epsilon)}$  为混凝土荷载损伤值,是应变  $\epsilon$  的函数,无量纲; $J_t$  为煤矸石混凝土的总声发射幅度,  $\text{dB}$ 。

### 3.3 荷载损伤演化模型的建立

假定混凝土在相对应变值为 3 时发生受压破坏,规定此时其荷载损伤值为 0.95,通过试验并依据式(5)计算得到未经冻融的煤矸石混凝土试块的荷载损伤值-应变曲线如图 8 所示。

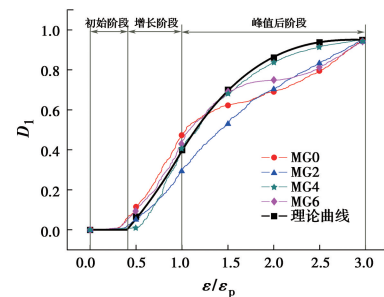


图 8 未经冻融时的荷载损伤值-相对应变曲线与理论曲线  
Fig. 8 Load damage value-relative strain curve and theoretical curve of each set of specimens without freeze-thaw

由图 8 可知,当处于初始阶段( $\epsilon/\epsilon_p \leq 0.4$ )时,荷载损伤很小,认为此时荷载损伤值保持为 0;当处于增长阶段( $0.4 \leq \epsilon/\epsilon_p \leq 1$ )时,荷载损伤值迅速增大,认为其呈指数函数增长,且当相对应变为 0.4 时,荷载损伤值为 0;而当峰值后阶段( $\epsilon/\epsilon_p \geq 1$ )时,荷载损伤值增长速度逐渐变慢,假定其符合四次多项式函数,并当相对应变为 3 时达到 0.95。按照上述变化规律,建立了基于声发射特性的荷载损伤演化模型如式(6)所示。

$$D_{l(\epsilon)} = \begin{cases} 0 & \epsilon \leq 0.4\epsilon_p \\ K_1 e^{K_2 \epsilon/\epsilon_p} - K_1 e^{0.4K_2} & 0.4\epsilon_p \leq \epsilon \leq \epsilon_p \\ K_3 + K_4 \frac{\epsilon}{\epsilon_p} + K_5 \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_p}\right)^2 + K_6 \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_p}\right)^3 & \epsilon \geq \epsilon_p \end{cases} \quad (6)$$

式中: $K_1$ 、 $K_2$ 、 $K_3$ 、 $K_4$ 、 $K_5$ 、 $K_6$  为拟合参数; $\epsilon$  为煤矸石混凝土的应变,  $10^{-3}$ ;  $\epsilon_p$  为煤矸石混凝土的峰值应变,  $10^{-3}$ ,可由式(1)计算得出。

### 3.4 煤矸石混凝土冻融损伤本构模型的建立

依据平行杆力学模型和 3.2 节中的假定,结合式(4)~式(6)可得

$$\sigma = E_u \epsilon = (1 - D_l) E_n \epsilon \quad (7)$$

式中: $\sigma$  为煤矸石混凝土的应力,  $\text{MPa}$ ;  $E_u$  为煤矸石混凝土受压破坏过程中的弹性模量,  $\text{MPa}$ ;  $E_n$  为煤矸石混凝土受压前的初始弹性模量,  $\text{MPa}$ 。



将式(6)带入式(7),得到煤矸石混凝土损伤本构关系

$$\sigma = \begin{cases} E_n \varepsilon & \varepsilon/\varepsilon_p \leq 0.4 \\ [1 - K_1 e^{K_2 \varepsilon/\varepsilon_p} + K_1 e^{0.4K_4}] E_n \varepsilon & 0.4 \leq \varepsilon/\varepsilon_p \leq 1 \\ \left[ 1 - K_3 - K_4 \frac{\varepsilon}{\varepsilon_p} - K_5 \left( \frac{\varepsilon}{\varepsilon_p} \right)^2 - K_6 \left( \frac{\varepsilon}{\varepsilon_p} \right)^3 \right] E_n \varepsilon & \varepsilon/\varepsilon_p \geq 1 \end{cases} \quad (8)$$

由于荷载损伤值-相对应变曲线和应力-应变都应连续,且满足相对应变为 3 时荷载损伤值为 0.95,故有

$$D_{l(\varepsilon=\varepsilon_p)} = K_1 e^{\frac{K_2 \varepsilon}{\varepsilon_p}} - K_1 e^{0.4K_4} = K_3 + K_4 + K_5 + K_6 \quad (9)$$

$$D_{l(\varepsilon=3\varepsilon_p)} = 0.95 = K_3 + 3K_4 + 9K_5 + 27K_6 \quad (10)$$

综合图 8、图 4 中的试验数据,据式(1)计算得到未经冻融时的煤矸石混凝土的峰值应变,并取  $E_0$  为规范规定的弹性模量,对式(6)、式(8)、式(9)、式(10)中的参数进行拟合,如图 9 所示,得拟合参数  $K_1$ 、 $K_2$ 、 $K_3$ 、 $K_4$ 、 $K_5$ 、 $K_6$  分别为 0.59、0.686、-0.728、1.54、-0.463、0.0453。将其带入式(6)、式(8)即得到了基于声发射特性的煤矸石混凝土荷载损伤演化模型、损伤本构关系。

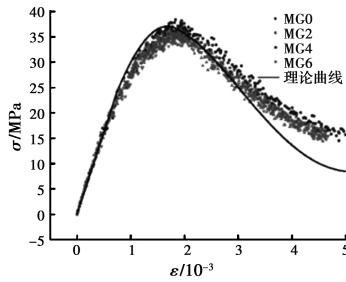


图 9 未经冻融时的的应力-应变曲线与理论曲线

Fig. 9 Stress-strain curve and theoretical curve of each specimen without freeze-thaw

在相对应变的层面上,其弹性模量的变化与其相对动弹性模量的变化一致,故有

$$\frac{E_n/\varepsilon_p}{E_0/\varepsilon_{p0}} = \frac{E_{fN}}{E_{f0}} = 1 - D_f \quad (11)$$

式中: $E_0$ 为未经冻融的混凝土受压前的初始弹性模量,参考既有的规范所规定的 C40 混凝土的弹性模量)即 32 500 MPa; $\varepsilon_{p0}$ 为煤矸石混凝土未经冻融时的峰值应变, $10^{-3}$ ,为可由式(1)计算得出; $E_{fN}$ 为煤矸石混凝土经历  $N$  次冻融循环后的动弹性模量; $E_{f0}$ 为煤矸石混凝土未经冻融时的动弹性模量。

结合式(7)、式(11),整理变形即得到煤矸石混凝土冻融损伤本构关系

$$\sigma = E_0 (1 - D_f) \frac{\varepsilon_p}{1.86} (1 - D_f) \varepsilon \quad (12)$$

### 3.5 模型验证

取不同取代率下煤矸石混凝土中经历 50 次冻融循环后的试块,以及取代率为 40%的煤矸石混凝土经历不同冻融循环次数的试块以验证提出的煤矸石混凝土冻融损伤本构关系,应力-应变曲线的模型计算值与试验结果的对比如图 10 所示。验证结果显示该煤矸石混凝土冻融损伤本构关系曲线与试验数据吻合较好。虽然应力-应变曲线下降段符合精度不高,但以上不足不会导致煤矸石混凝土的理论损伤值大于实际损伤值,该模型的误差总体偏向安全。

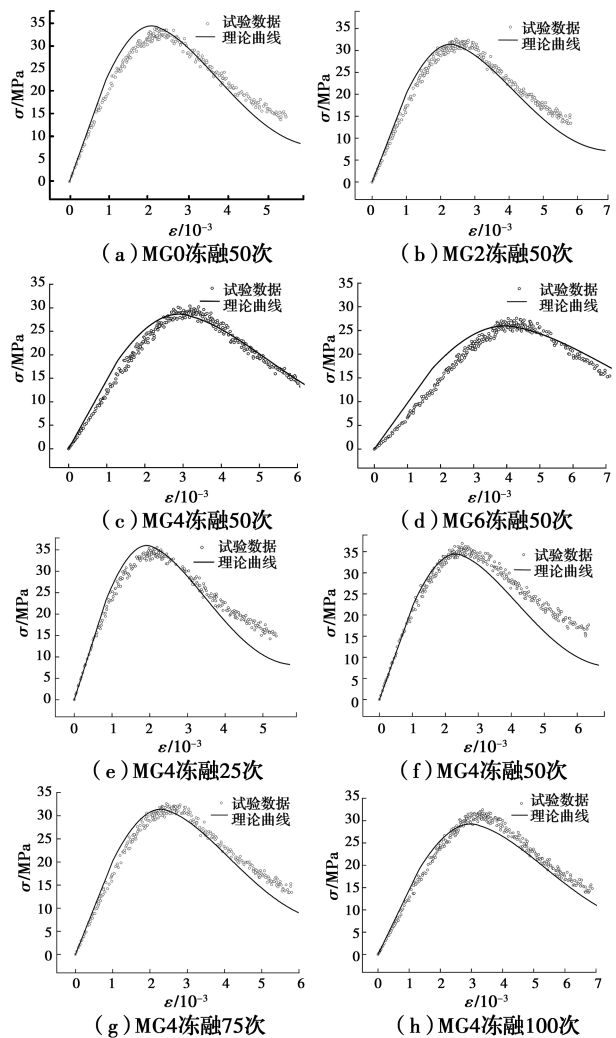


图 10 应力-应变曲线理论值与试验数据对比

Fig. 10 Comparison of theoretical stress-strain curves obtained from the constitutive model with experimental data

## 4 结论

对不同煤矸石取代率的煤矸石混凝土通过冻融循环试验、单轴受压本构试验及声发射检测试验,采用 PBS 平行杆力学模型,建立了同时考虑冻融损伤和单轴受压荷载损伤的煤矸石混凝土冻融损伤本构关系。得到以下主要结论:

1) 单轴受压本构试验发现,不同取代率的煤矸石混凝土相对峰值应变随冻融损伤值的变换具有较强一致性,试验得到的冻融损伤值和相对峰值应变的方程可为冻融循环环境下的煤矸石混凝土本构模型的建立提供有效参数。

2) 煤矸石混凝土受压破坏过程可分为初始阶段、增长阶段、峰值阶段和峰值后阶段 4 个阶段,其声发射特性与荷载损伤发展情况、力学性能、应力-应变曲线有紧密的联系。

3) 采用 PBS 平行杆力学模型,结合冻融损伤演化模型,并基于声发射特性建立了煤矸石混凝土冻融损伤本构关系。该本构关系计算结果与试验数据符合较好,可以为寒冷地区煤矸石混凝土的推广使用及相关研究提供参考。

### 参考文献:

- [1] 桑迪,王爱国,孙道胜,等. 利用工业固体废弃物制备烧胀陶粒的研究进展[J]. 材料导报, 2016, 30(9): 110-114.  
SANG D, WANG A G, SUN D S, et al. Manufacturing sintering-expanded ceramsite from industrial solid wastes [J]. Materials Review, 2016, 30(9): 110-114. (in Chinese)
- [2] ZHAO S J, MUHAMMAD F, YU L, et al. Solidification/stabilization of municipal solid waste incineration fly ash using uncalcined coal gangue-based alkali-activated cementitious materials [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2019, 26(25): 25609-25620.
- [3] LI J Y, WANG J M. Comprehensive utilization and environmental risks of coal gangue: A review [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 239: 117946.
- [4] 王爱国,朱愿愿,徐海燕,等. 混凝土用煤矸石骨料的研究进展[J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(7): 2076-2086.  
WANG A G, ZHU Y Y, XU H Y, et al. Research progress on coal gangue aggregate for concrete [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2019, 38(7): 2076-2086.
- [5] 顾云,张彬. 煤矸石集料混凝土工作与力学性能研究[J]. 混凝土, 2019(7): 71-73.  
GU Y, ZHANG B. Research of working and mechanical properties of coal gangue aggregate concrete [J]. Concrete, 2019(7): 71-73. (in Chinese)
- [6] LIU C J, DENG X W, LIU J, et al. Mechanical properties and microstructures of hypergolic and calcined coal gangue based geopolymer recycled concrete [J]. Construction and Building Materials, 2019, 221: 691-708.
- [7] 白朝能,李霖皓,沈远,等. 煤矸石对 C30 混凝土抗冻性能影响的试验研究[J]. 工程技术研究, 2018(10): 15-17.  
BAI C N, LI L H, SHEN Y, et al. Experimental study on the influence of coal gangue on the frost resistance of C30 concrete [J]. Engineering and Technological Research, 2018(10): 15-17.
- [8] 张向东,李庆文. 盐冻循环作用下煤矸石混凝土耐久性研究[J]. 非金属矿, 2016, 39(6): 45-47.  
ZHANG X D, LI Q W. Study on durability of coal gangue concrete under the action of salt-frost cycle [J]. Non-Metallic Mines, 2016, 39(6): 45-47. (in Chinese)
- [9] 严冰,宋战平,王艳,等. 煤矸石混凝土抗冻性能试验研究[J]. 混凝土, 2017(3): 109-111, 128.  
YAN B, SONG Z P, WANG Y, et al. Study on the frost resistance capacity of coal gangue concrete [J]. Concrete, 2017(3): 109-111, 128. (in Chinese)
- [10] 邢军,周梅,张倩. 热活化煤矸石矿物掺合料对混凝土抗渗和抗冻性能影响[J]. 硅酸盐通报, 2015, 34(9): 2696-2701.  
XING J, ZHOU M, ZHANG Q. Effect of thermal activated coal gangue mineral admixtures on impermeability and frost resistance of concrete [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2015, 34(9): 2696-2701. (in Chinese)
- [11] 李庆文,李桂秀,李洋. 冻融和碳化交替作用煤矸石混凝土耐久性研究[J]. 非金属矿, 2015, 38(4): 39-42.  
LI Q W, LI G X, LI Y. Durability study on coal gangue concrete under alternative effect of freezing-thawing and carbonization [J]. Non-Metallic Mines, 2015, 38(4): 39-42. (in Chinese)
- [12] SIDIRIFF. Anisotropic damage modelling for brittle elastic materials[C]. 1984:60-68.



- [13] LAND K E. Continuous damage model for load-response estimation of concrete [J]. *Cement and Concrete Research*, 1980, 10(3): 395-402.
- [14] 龙广成, 刘赫, 马昆林, 等. 考虑冻融作用的混凝土单轴压缩损伤本构模型[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2018, 49(8): 1884-1892.  
LONG G C, LIU H, MA K L, et al. Uniaxial compression damage constitutive model of concrete subjected to freezing and thawing [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2018, 49(8): 1884-1892. (in Chinese)
- [15] 高懿伟. 早期受冻混凝土的力学性能劣化规律试验研究[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2019.  
GAO Y W. Experimental study on mechanical properties deterioration of early frozen concrete [D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2019.
- [16] 徐童淋, 彭刚, 杨乃鑫, 等. 混凝土冻融劣化后动态单轴抗压特性试验研究[J]. *水利水运工程学报*, 2017(6): 69-78.  
XU T L, PENG G, YANG N X, et al. Experimental studies of dynamic uniaxial compressive properties of concrete after freeze-thaw deterioration [J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2017(6): 69-78. (in Chinese)
- [17] 韩建德, 刘金龙, 王曙光, 等. 声发射技术在混凝土材料及其耐久性中的应用研究进展[J]. *材料导报*, 2014, 28(Sup 1): 110-115.  
HAN J D, LIU J L, WANG S G, et al. Recent situation in research on technique of acoustic emission for concrete material and its durability [J]. *Materials Review*, 2014, 28 (Sup 1): 110-115. (in Chinese)
- [18] 邱继生, 潘杜, 关虢, 等. 冻融后煤矸石混凝土受压损伤声发射特性[J]. *建筑材料学报*, 2018, 21(2): 196-201.  
QIU J S, PAN D, GUAN X, et al. Acoustic emission characteristics of compression damage of coal gangue concrete after freeze-thaw cycles [J]. *Journal of Building Materials*, 2018, 21(2): 196-201. (in Chinese)
- [19] 王明, 李庶林. 基于声发射速率过程理论的岩石声发射特性研究[J]. *厦门大学学报(自然科学版)*, 2008, 47(2): 211-215.  
WANG M, LI S L. Study on acoustic emission characteristics of rock based on acoustic emission rate process theory [J]. *Journal of Xiamen University (Natural Science)*, 2008, 47(2): 211-215. (in Chinese)
- [20] KRAJČINOVIC D, SILVA M A G. Statistical aspects of the continuous damage theory [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 1982, 18(7): 551-562.
- [21] 纪洪广, 张天森, 蔡美峰, 等. 混凝土材料损伤的声发射动态检测试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2000, 19(2): 165-168.  
JI H G, ZHANG T S, CAI M F, et al. Experimental study on concrete damage by dynamic measurement of acoustic emission [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2000, 19(2): 165-168. (in Chinese)
- [22] OHTSU M. Acoustic emission characteristics in concrete and diagnostic application [J]. *Acoustic Emission*, 1987, 6(2): 99-108.

(编辑 胡玲)