

基于声发射的蒸养混凝土受压损伤特性试验研究

刘伟琪^{1,2}, 陈波^{1,2}, 陈家林^{1,2}

(1. 河海大学水利水电学院, 江苏南京 210098;

2. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏南京 210098)

摘要:为研究矿物掺合料对蒸养混凝土抗压性能的影响,对不同养护制度和配合比混凝土进行了单轴压缩声发射试验,利用声发射信号参数和高斯混合模型探究混凝土的损伤演化特性。试验结果表明:蒸养混凝土抗压强度普遍低于标养混凝土,矿物掺合料的加入能够补偿蒸汽养护导致的强度损失,且复掺粉煤灰和矿粉的补偿效果更好;受压全程中张拉破坏始终占据主导,而剪切破坏占比随加载时间呈递增趋势;声发射参数中,累计振铃计数、 b 值变化幅度和剪切破坏形式占比均与抗压强度呈负相关关系,可作为评价混凝土抗压性能的重要参数。

关键词:蒸养混凝土;矿物掺合料;单轴压缩;声发射;损伤特性

中图分类号:TV431

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2023)01-0050-06

Experimental study on compressive damage characteristics of steam-cured concrete based on acoustic emission// LIU Weiqi^{1,2}, CHEN Bo^{1,2}, CHEN Jialin^{1,2} (1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to study the effect of mineral admixtures on the compressive properties of steam-cured concrete, the acoustic emission test under uniaxial compression was carried out for concrete with different curing regimes and mix ratios, and the damage evolution characteristics of concrete were explored by using acoustic emission signal parameters and Gaussian mixture model. The research shows that the compressive strength of steam-cured concrete is generally lower than that of standard-cured concrete. The addition of mineral admixtures can compensate for the strength loss caused by steam curing, and the compensation effect of adding fly ash and mineral powder is the best. The tension failure always dominates the whole compression process, while the shear failure proportion increases with the loading time. Among the acoustic emission parameters, the accumulative ringing count, the change range of b value and the proportion of shear failure forms are all negatively correlated with the compressive strength value, which can be used as important parameters to evaluate the compressive performance of concretes.

Key words: steam-cured concrete; mineral admixtures; uniaxial compression; acoustic emission; damage characteristics

蒸汽养护是以蒸汽为热介质使混凝土加速硬化的养护方式,常用于混凝土预制构件的生产制造,能有效提高施工效率,缩短施工周期^[1]。该工艺所具有的高温、高湿条件能促进水泥的水化速度,显著提升混凝土早期强度,但也会造成材料内部孔径粗化、界面过渡区微裂缝增多等热损伤效应,不利于其长期服役性能^[2-3]。为了减少蒸汽养护所造成的热损伤效应,许多学者研究了矿物掺合料对蒸养混凝土的影响。如赵晶等^[4]探究了蒸汽养护对掺加不同矿物掺合料混凝土的抗压强度、抗氯离子渗透性和水化产物的影响。阎培渝等^[5]用粉煤灰和石英粉

作为活性和惰性矿物掺合料,研究了不同水胶比、不同养护温度下矿物掺合料对复合胶凝材料抗压强度发展特性的影响。

在外界荷载作用下,材料内部结构的变化导致了局域应力状态改变,释放出瞬态的弹性波,这种常见的物理现象称为声发射或应力波发射。不同于X射线、超声波等外加信号源的检测手段,现代声发射技术收集的是来自材料内部的应力波,其具备同步、动态、准确、可靠等特点,能够实时捕捉试件破坏全程发出的声发射信号;通过分析振铃计数、能量、幅值和峰值频率等特征参数的变化,揭示其与材料破

基金项目:国家自然科学基金面上项目(52079049);国家自然科学基金重点项目(51739003)

作者简介:刘伟琪(1998—),男,硕士研究生,主要从事水工结构安全监控研究。E-mail:945988066@qq.com

通信作者:陈波(1986—),男,教授,博士,主要从事水工结构安全监控研究。E-mail:chenbo@hhu.edu.cn

坏过程的关系,进行对材料内部损伤演化的无损监测和损伤机理的评价^[6],并提出可靠合理的材料破坏前兆依据^[7],从而实现材料和工程安全的监测预报。混凝土材料受力破坏过程中微裂缝的萌生、扩展以及宏观裂缝的形成都伴随着大量的声发射事件。近年来声发射技术在混凝土结构健康监测和劣化评价等领域中得到了广泛应用,众多学者借助此技术深入探究了不同混凝土材料的破坏机理。例如:王立燕等^[8]利用声发射技术分析普通水泥混凝土和橡胶水泥混凝土的疲劳损伤过程,比较了其疲劳性能;段力群等^[9]借助声发射技术对不同密度泡沫混凝土在单轴压缩下的损伤演化进行研究,并定位识别了其破坏模式。然而,将声发射技术用于探究蒸养混凝土力学性能的研究较少。

本文选取标准养护和蒸汽养护制度下掺加和未掺矿物掺合料的 180 d 龄期混凝土作为试验对象,对其进行单轴压缩试验测得抗压强度值,同时利用声发射系统全面记录加载过程中声发射信号的变化。在此基础上选取声发射振铃计数、 b 值等声发射特征参数分析了混凝土试件在破坏过程中的破坏规律,并基于高斯混合模型(Gaussian mixture model, GMM)探究了声发射值与裂纹形式之间的关系,对破坏过程中的两类裂纹进行聚类,分析了不同裂纹形式的变化过程。

1 试验方案

1.1 试验材料与配合比设计

试验选用 P·O 42.5 普通硅酸盐水泥,该水泥 3 d、28 d 抗压强度分别为 16 MPa 和 42.5 MPa,抗折强度分别为 3.5 MPa 和 6.5 MPa,初凝时间 45 min,终凝时间 600 min;粉煤灰为Ⅱ级低钙粉煤灰;矿粉为 S95 级矿渣粉;粗骨料为碎石骨料,粒径为 5~25 mm;细骨料为天然中河砂,细度模数为 2.5;减水剂为高效聚羧酸减水剂,减水率为 28%。试验配合比设计见表 1。

表 1 试验配合比设计 单位:kg/m³

试件编号	水泥	矿粉	粉煤灰
BS	483.0	0	0
ZS	483.0	0	0
ZK	241.5	241.5	0
ZF	241.5	96.6	144.9

注:BS 为标准养护试件,ZS、ZK 和 ZF 为蒸汽养护试件。4 个系列试件的减水剂均为 3.42 kg/m³,粗骨料均为 957 kg/m³,细骨料均为 815 kg/m³,水均为 145 kg/m³,水灰比均为 0.3。

混凝土试件采用边长 100 mm 的立方体,并在浇筑成型后分别进行标准养护和蒸汽养护。标养温度为(20±2)℃,相对湿度大于 95%,试件成型 1 d 后拆模,养护至 28 d。蒸养试件在标准养护室静置 3 h

后放入蒸汽养护箱内进行养护,升温速率为 15~20℃/h,恒温时间为 12 h,养护温度为 60℃,降温速率为 15~20℃/h。蒸汽养护结束后脱模,放入标准养护室养护至 28 d 龄期。所有试件养护 28 d 结束后,从养护箱中取出并放置在室内自然条件下养护至 180 d。试件的制备流程如图 1 所示。

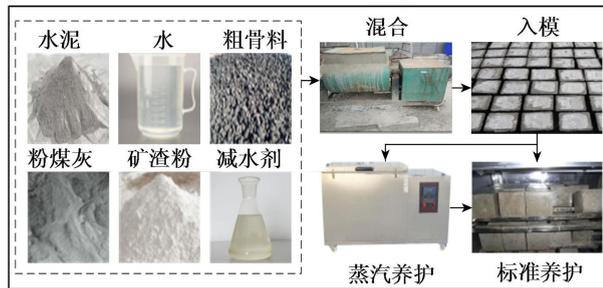
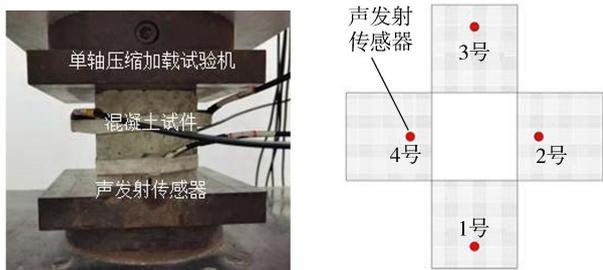


图 1 试件制备流程

1.2 试验方法

抗压强度试验参照 GB/T 50107—2010《混凝土强度检验评定标准》要求执行,由 WAW-1000 微机控制电液伺服万能试验机完成。每个系列试件均采用 3 个混凝土试件,并将同组试验结果取均值作为该类试件的抗压强度。试验过程采用荷载控制的加载方式,为适当控制试件压缩破坏时间,更详细准确地分析破坏过程中的声发射特征参数变化过程,经过前期试验比较,最终确定加载速率为 3 kN/s。

声发射试验采用 Sensor Highway III 全天候结构健康监测系统,与抗压强度试验同步完成。根据仪器调试结果与现场噪声水平的测试结果,将前置放大器的增益设置为 35 dB,阈值设置为 35 dB。为进一步减少干扰并保证信号质量,利用砂纸将传感器与试件之间的接触面进行抛光处理,同时涂抹凡士林作为耦合剂。试验过程中将 4 根传感器对称布置在蒸养混凝土四周,如图 2 所示。选择与组内平均抗压强度值最接近的试件进行后续声发射特征参数分析。



(a) 试验装置

(b) 声发射传感器布置示意图

图 2 单轴压缩-声发射试验加载装置

2 基于声发射特征参数的混凝土损伤过程分析

2.1 声发射振铃计数分析

声发射振铃计数和累计振铃计数能够代表声发

射的活跃程度,且与混凝土损伤程度之间具有较强的正相关关系^[10]。图3为各试件的单轴压缩声发射特征参数历程(图中对加载时间进行了归一化处理)。结合文献[7,9,11-12],将加载过程中的声发射参数演变大致分为初始压密(I)、稳定扩展(II)和失稳破坏(III)。

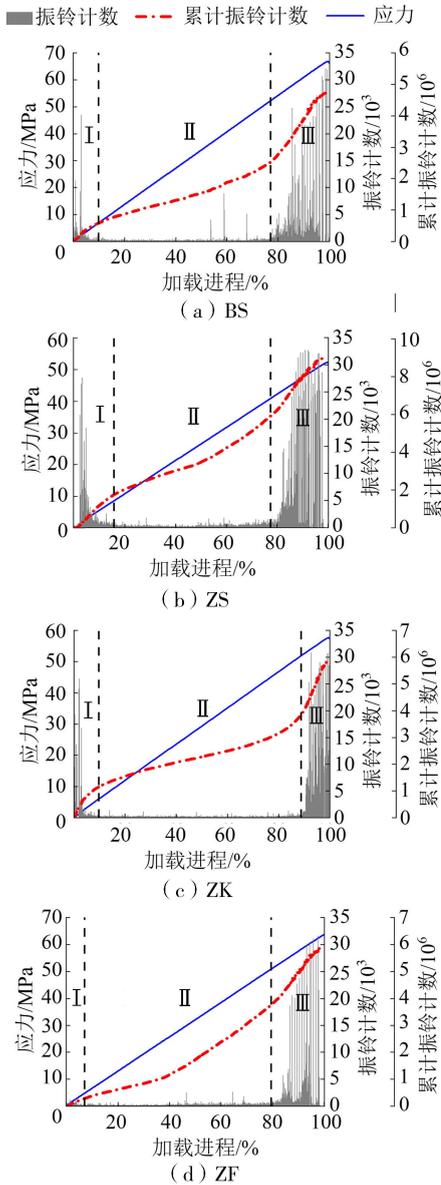


图3 单轴压缩声发射特征参数历程

比较应力曲线可知,标养试件BS的抗压强度较蒸养试件ZS、ZK和ZF分别超出27.9%、25.8%和4.9%,说明蒸汽养护降低了混凝土的长期抗压性能。同时发现,随着粉煤灰和矿粉的加入,2种蒸汽养护制度下的抗压强度差距逐渐缩小。相比强度最差的ZS试件,单掺矿粉的ZK试件和复掺粉煤灰及矿粉的ZF试件的抗压强度分别提高了10.3%和22.1%。由此说明矿物掺合料能有效修复蒸汽养护导致的强度缺陷,且复掺粉煤灰和矿粉使得混凝土具有更好的蒸养适应性^[2,13],对抗压强度的提升效

果优于单掺矿粉。

此外,声发射累计振铃计数与混凝土抗压强度呈负相关。抗压强度最高的BS试件,其累计振铃计数不足 5×10^6 次;而强度最低的ZS试件,其累计振铃计数超过 9×10^6 次,这是因为蒸汽养护使得混凝土内部产生了热损伤等缺陷,更容易导致微裂缝的产生和发展,声发射信号更加活跃。由于粉煤灰和矿粉对蒸养混凝土的强度补偿,ZK和ZF试件的声发射累计振铃计数均低于ZS试件,但仍高于BS试件,说明矿物掺合料的修复效果有限。

蒸养混凝土中,抗压性能最好的ZF试件损伤程度也最小,尤其在初始压密阶段,声发射活跃度很低且无大尺度能量跃迁,甚至优于标准养护混凝土BS。这说明复掺粉煤灰及矿粉对于混凝土蒸养适应性的改良效果明显,形成了更为致密的内部结构,有效限制并减少了材料内部初始微裂纹的形成与发展。

2.2 声发射 b 值分析

b 值是描述声发射相对震级分布的参数,也是混凝土裂缝扩展尺度分布的函数^[14]。混凝土加压破坏过程中,微裂缝的萌生伴随着大量小振幅事件的发生, b 值也相应上升;而宏观裂缝的产生会出现更多大振幅声发射活动,导致 b 值减小^[15]。传统的 b 值计算方法具有一定缺陷,故本文选用了改进的 b 值进行计算分析^[16]:

$$b = \frac{\lg N(\mu - \alpha_1 \sigma) - \lg N(\mu + \alpha_2 \sigma)}{(\alpha_1 + \alpha_2) \sigma} \quad (1)$$

式中: N 为最近声发射事件数,一般取50或100,本文取100; μ 为 N 次声发射事件中振幅的均值; σ 为 N 次声发射事件中振幅的标准方差; α_1 、 α_2 为常数,分别取为0和1。

由图4可知,在初始压密阶段,小振幅声发射事件占较大比例, b 值小范围增加,出现第一个峰值,随着试件不断被压密,试件内部空隙和微裂缝基本闭合,声发射活动加剧, b 值从峰值逐渐减小。

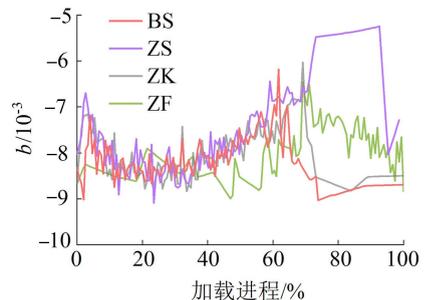


图4 不同试件的声发射 b 值

进入稳定扩展阶段, b 值首先出现较长时间的缓慢波动上升,说明该阶段内部裂纹稳定出现和发展,应变能平稳积聚,声发射活动绝大多数为小振幅

事件,大尺度裂缝较少出现。随后 b 值增速加快,并达到加载全程的最高点,表征试件内部微小裂缝的数量和发育程度达到了极值。

随着荷载越来越大,大尺度裂纹开始出现和发展,大振幅声发射事件短时间内集中产生,导致 b 值发生骤降,预示着混凝土损伤程度迅速加剧,即将发生失稳破坏。由此可见, b 值的变化具有明显规律性,直观反映了混凝土内部裂纹发展的过程,其突变能够作为重要前兆来预测混凝土的宏观破坏。

4 个系列试件的 b 值变化历程均符合上述规律,呈现出“缓慢递减—波动上升—骤然下降”的演变趋势,但在各阶段有较为明显的差异。现以 BS 试件 b 值变化曲线为参照,分析比较蒸汽养护混凝土系列通过 b 值表现出的损伤特性。其中,ZS 试件的 b 值变化幅度最为剧烈,具体表现为加压前期 b 值即从较高点发生了较大速率和幅度的下降;随后 b 值又以较快速率持续上升,增长幅度为全系列最大,最后发生失稳破坏用时亦为全系列最短,这表明蒸汽养护劣化了混凝土内部结构,同时没有矿物掺合料对结构损伤进行修复,因此其自然状态下分布有更多微裂纹,长期性能最差。ZK 试件的 b 值变化趋势与 BS 试件较为相似,且比 ZS 试件更为平缓,说明单掺矿粉对裂纹的发展起到了抑制作用。ZF 试件的 b 值变化趋势最为平缓,一方面,其加载前期 b 值浮动范围相对最小,说明该阶段声发射信号活跃度较低,内部微裂纹很少,这与上文所述初始压实阶段稀少的声发射振铃计数相呼应;另一方面,失稳破坏阶段 b 值的减少相对其他试件而言略显平缓,反映出 ZF 试件内部结构抵抗变形和裂纹发展的能力较好,由小尺度裂纹向大尺度宏观裂纹转变的过程较为缓慢。由此可见,粉煤灰和矿渣的复合掺加较大程度上提高了蒸养混凝土抗劣化的能力。

3 基于 GMM 的混凝土损伤模式识别

上述声发射特征参数能够有效对混凝土单轴压缩的破坏过程进行分析,评价其损伤尺度和演化历程,但不能区分混凝土受压过程的损伤模式。传统的混凝土损伤模式识别通常采用日本混凝土材料协会提出的 RA-AF 值关联分析法。该方法中的 2 个参数:RA 为上升时间与幅度的比值,AF 为振铃计数与持续时间的比值。基于 RA 和 AF,可将混凝土单轴受压的损伤模式分为张拉破坏和剪切破坏 2 种,其中张拉破坏对应较高的 AF 值和较低的 RA 值;剪切破坏反之^[17-18]。传统定性方法是研究者人为规定一条分界线,位于分界线之下的部分为剪切破坏,分界线之上的部分为张拉破坏,该方法难

以消除主观性,故本文尝试采用更为有效的确定性分类方法对裂缝形式进行划分。

GMM 是一种概率密度估计算法,通过多个高斯概率密度分布对样本进行精确量化,判断样本数据在哪种分布下的最大似然概率最大,从而实现对本样本的分类。声发射信号是大量非线性的随机数据^[19],利用声发射参数对 2 类裂纹的分类本质上是对参数的二维聚类,因此样本数据的建模复杂度较小,且对应的模型精度较高,故本文选择 GMM 进行混凝土损伤模式识别。GMM 参数由最大期望算法进行迭代计算,保证每一个声发射事件点在聚类结果中的分布概率最大。图 5 为不同混凝土声发射事件的 GMM 聚类分析结果,图 6 以三维云图的方式给出了其高斯概率分布。

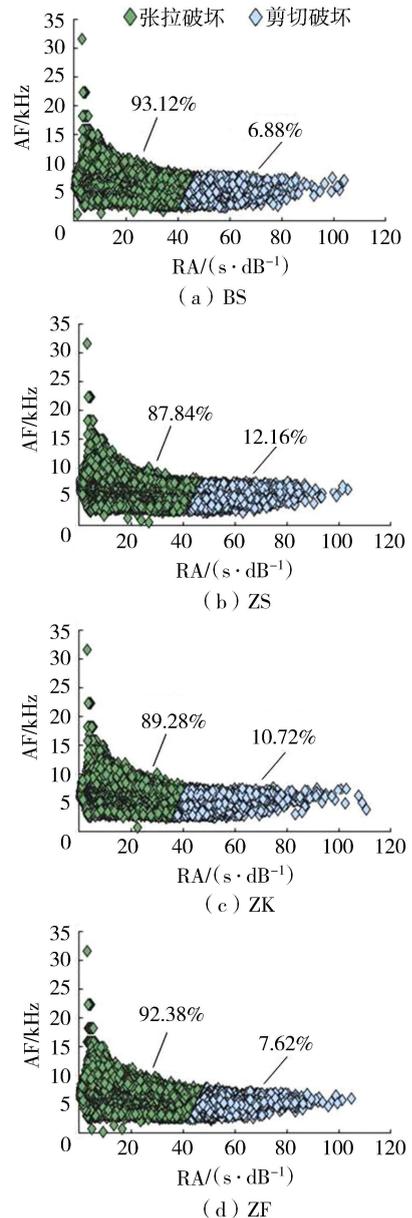


图 5 各试件 GMM 高斯混合模型聚类结果

由图 5 可知,各类试件的单轴压缩破坏过程都

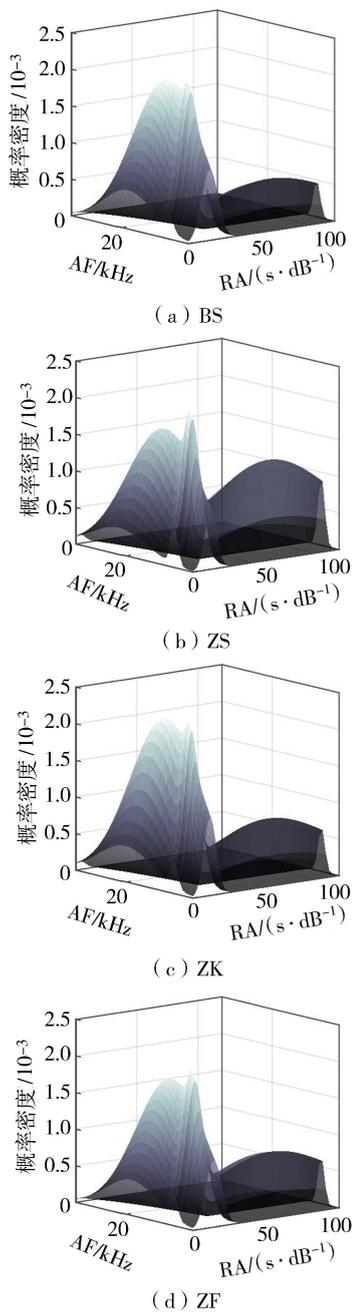


图6 各试件高斯概率密度分布

是张拉破坏与剪切破坏并存,但都以张拉破坏为主导,剪切破坏只占较小比例。这主要是由于试件无四周的横向约束,受压过程中产生大量微裂缝,横向膨胀产生的拉应力超过了抗拉强度而破坏。而剪切裂缝主要产生于微裂缝贯通后的滑移和摩擦中,其出现意味着试件内部结构产生了较大损伤,因此数量相对较少。在各试件破坏形式占比的对比中,标养混凝土 BS 试件张拉形式的破坏占比达到 93.12%,为全系列最高,而剪切破坏只占 6.88%;蒸养混凝土中,随着掺合料的加入,混凝土的结构和力学性能得到改善,张拉破坏占比依次提高,而剪切破坏占比依次减少。因此不同破坏形式的占比可视为表征混凝土力学性能的间接指标,也为建立声发

射参数与混凝土损伤之间的关系提供了新方向。

图7以ZF试件为例,给出了基于GMM算法得到的破坏形式变化过程。受压破坏全程中,张拉破坏占比始终占据90%以上的主导地位,且张拉裂纹的数量始终都超过剪切破坏一个数量级。但随着加载过程的推进,试件不断发生损伤,高RA值的声发射事件增多,试件剪切破坏的占比递增,在前中期增长速度不明显,进入后期之后,声发射b值持续下降,剪切裂纹所占比例快速上升,最终达到7.62%,表明试件内部剪切裂纹越来越多,大量微裂纹贯通形成宏观破坏面^[20]。因此,基于GMM的裂纹形式占比演化过程与声发射b值的变化具有内在联系,都能够反映混凝土试件的破坏过程。

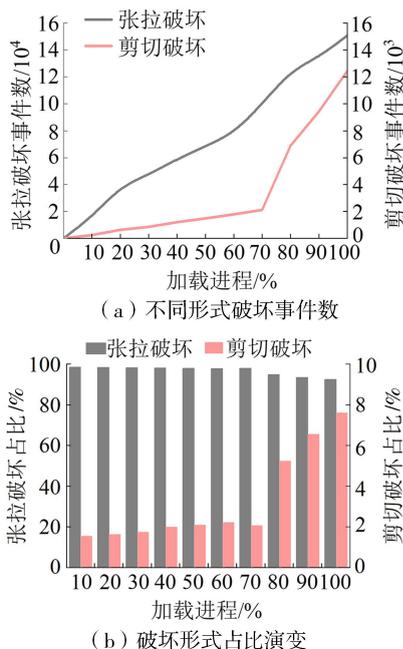


图7 ZF试件单轴压缩破坏形式变化过程

4 结论

a. 蒸汽养护明显劣化了混凝土的力学性能,在未掺加矿物掺合料的情况下,抗压强度下降了约21.9%。添加矿物掺合料能够有效改善蒸养混凝土的力学性能,且复掺粉煤灰和矿粉比单掺矿粉的强度补偿效果更好,抗压强度较不掺提升22.1%,但无法完全弥补强度损伤。

b. 声发射累计振铃计数与抗压强度呈负相关,可以表征混凝土的损伤程度。无掺合料蒸养混凝土的振铃计数变化过程最为剧烈,累计计数最多;随着掺合料的加入,各阶段振铃计数变化的剧烈程度都得以缓和,累计计数递减,该变化印证了混凝土抗压性能的差异。

c. b值的变化反映了混凝土内部裂纹尺度的变化过程,其突变能够作为重要前兆来预测混凝土的

宏观破坏。复掺粉煤灰和矿粉的 ZF 试件 b 值变化相对平缓,说明其内部结构更为致密,限制了小尺度和大尺度裂缝的产生和发展。

d. GMM 算法结果表明不同试件最终破坏时剪切裂纹的占比与抗压强度成反比。ZF 试件受压破坏过程中张拉裂缝占比始终超过 90%,而剪切裂缝占比随加载过程推进而上升,且增速在失稳破坏阶段最大,故剪切破坏占比的变化能够表征混凝土损伤劣化的程度。

参考文献:

[1] 贺炯煌,马昆林,龙广成,等. 蒸汽养护过程中混凝土力学性能的演变[J]. 硅酸盐学报,2018,46(11):1584-1592. (HE Jionghuang, MA Kunlin, LONG Guangcheng, et al. Mechanical properties evolution of concrete in steam-curing process [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2018, 46(11): 1584-1592. (in Chinese))

[2] 谢友均,马昆林,刘运华,等. 蒸养超细粉煤灰高性能混凝土性能试验研究[J]. 深圳大学学报(理工版),2007,24(3):234-239. (XIE Youjun, MA Kunlin, LIU Yunhua, et al. Experimental studies on capabilities of steam curing ultra-fine fly ash high performance concrete [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2007, 24(3): 234-239. (in Chinese))

[3] 马昆林,贺炯煌,龙广成,等. 蒸养温度效应及其对水泥基材料热损伤的影响[J]. 材料导报,2017,31(23):171-176. (MA Kunlin, HE Jionghuang, LONG Guangcheng, et al. Steam-curing temperature effect and its influence on heat damage of cement-based material [J]. Materials Reports, 2017, 31(23): 171-176. (in Chinese))

[4] 赵磊,于一鸣,苟武举,等. 蒸养制度对混凝土抗压强度及抗渗性能影响的研究[J]. 低温建筑技术,2020,42(7):36-39. (ZHAO Jing, YU Yiming, XUN Wuju, et al. Effect of steam curing system on compressive strength and impermeability of concrete [J]. Low Temperature Architecture Technology, 2020, 42(7): 36-39. (in Chinese))

[5] 阎培渝,张庆欢. 含粉煤灰或石英粉复合胶凝材料的抗压强度发展规律[J]. 硅酸盐学报,2007,35(3):263-267. (YAN Peiyu, ZHANG Qinghuan. Compressive strength development of complex binder containing fly ash or quartz powder [J]. Journal of the Chinese Silicate Society, 2007, 35(3): 263-267. (in Chinese))

[6] 张茹,谢和平,刘建锋,等. 单轴多级加载岩石破坏声发射特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2006,25(12):2584-2588. (ZHANG Ru, XIE Heping, LIU Jianfeng, et al. Experimental study on acoustic emission characteristics of rock failure under uniaxial multilevel loadings [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(12): 2584-2588. (in Chinese))

[7] 李庶林,尹贤刚,王泳嘉,等. 单轴受压岩石破坏全过程声发射特征研究[J]. 岩石力学与工程学报,2004,23(15):2499-2503. (LI Shulin, YI Xiangang, WANG Yongjia, et al. Studies on acoustic emission characteristics of uniaxial compressive rock failure [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(15): 2499-2503. (in Chinese))

[8] 王立燕,王超,张亚梅,等. 运用声发射技术研究橡胶混凝土疲劳损伤过程[J]. 东南大学学报(自然科学版),2009,39(3):574-579. (WANG Liyan, WANG Chao, ZHANG Yamei, et al. Study on fatigue damage process of rubberized cement concrete by acoustic emission technique [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2009, 39(3): 574-579. (in Chinese))

[9] 段力群,董璐,马林建,等. 泡沫混凝土单轴压缩下声发射特征试验研究[J]. 中国矿业大学学报,2018,47(4):742-747. (DUAN Liqun, DONG Lu, MA Linjian, et al. Experimental study of acoustic emission characteristics of foamed concrete under uniaxial compression [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2018, 47(4): 742-747. (in Chinese))

[10] 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 Hongguang, ZHANG Tiansen, CAI Meifeng, et al. Experimental research on acoustic emission dynamic detection of concrete material damage [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(2): 165-168. (in Chinese))

[11] 王桂林,王润秋,孙帆,等. 单轴压缩下溶隙灰岩声发射 RA-AF 特征及破裂模式研究[J]. 中国公路学报,2022,35(8):118-128. (WANG Guilin, WANG Runqiu, SUN Fan, et al. RA-AF characteristics of acoustic emission and failure mode of karst-fissure limestone under uniaxial compression [J]. China Journal of Highway and Transport, 2022, 35(8): 118-128. (in Chinese))

[12] 杨永杰,王德超,郭明福,等. 基于三轴压缩声发射试验的岩石损伤特征研究[J]. 岩石力学与工程学报,2014,33(1):98-104. (YANG Yongjie, WANG Dechao, GUO Mingfu, et al. Study of rock damage characteristics based on acoustic emission tests under triaxial compression [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(1): 98-104. (in Chinese))

[13] 谢友均,刘宝举,周士琼,等. 超细粉煤灰混凝土蒸养适应性研究[C]//吴中伟院士从事科教工作六十年学术讨论会论文集. 北京:中国建材工业出版社,2004:150-153.

[14] 曾正文,马瑾,刘力强,等. 岩石破裂扩展过程中的声发射 b 值动态特征及意义[J]. 地震地质,1995,17(1):7-12. (ZENG Zhengwen, MA Jin, LIU Liqiang, et al. AE b -value dynamic features durine rockmass fracturing and their significances [J]. Seismology and Geology, 1995, 17(1): 7-12. (in Chinese))

(下转第 62 页)

- (4):15-20. (in Chinese))
- [5] 申冠卿, 张晓华, 李勇, 等. 1986 年以来黄河下游水沙变化及河道演变分析[J]. 人民黄河, 2000, 52(9):10-11. (SHEN Guanqin, ZHAN Xiaohua, LI Yong, et al. Analysis of runoff and sediment variation and channel evolution in the lower Yellow River since 1986[J]. Yellow River, 2000, 52(9):10-11. (in Chinese))
- [6] 黄建维, 张金善. 我国河口挡潮闸下淤积综合治理技术[J]. 泥沙研究, 2004, 49(3):46-53. (HUANG Jianwei, ZHANG Jinshan. Regulation techniques of sediment siltation downstream tidal barriers in China[J]. Journal of Sediment Research, 2004, 49(3):46-53. (in Chinese))
- [7] 田海涛, 张振克, 李彦明, 等. 中国内地水库淤积的差异性分析[J]. 水利水电科技进展, 2006, 26(6):28-33. (TIAN Haitao, ZHANG Zhenke, LI Yanming, et al. Differences in reservoir sedimentation in Inland China [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2006, 26(6):28-33. (in Chinese))
- [8] 齐梅兰, 陈稚聪, 府仁寿. 射流冲沙研究[J]. 水利学报, 2003, 48(12):71-75. (QI Meilan, CHEN Zhicong, FU Renshou. Experimental study on sediment transportation by impinging jet [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003, 48(12):71-75. (in Chinese))
- [9] 陈稚聪, 府仁寿, 齐梅兰. 有压输水系统中用射流冲沙的系列模型试验研究[J]. 水利学报, 2002, 47(5):55-58. (CHEN Zhicong, FU Renshou, QI Meilan. Model study on forced erosion using impinging jet in pressured water transportation system [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002, 47(5):55-58. (in Chinese))
- [10] 齐梅兰, 府仁寿, 陈稚聪. 射流冲刷平衡深度研究[J]. 水动力学研究与进展(A辑), 2005, 22(3):368-372. (QI Meilan, FU Renshou, CHEN Zhicong. Study on equilibrium scour depth of impinging jet [J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2005, 22(3):368-372. (in Chinese))
- [11] YEH Pohung, CHANG Kuangan, JOHN Henriksen, et al. Large-scale laboratory experiment on erosion of sand beds by moving circular vertical jets [J]. Ocean Engineering, 2009, 36(3):248-255.
- [12] 罗勇, 窦希萍, 罗肇森. 气动冲淤法治理黄河泥沙的一点思考[J]. 水利学报, 2007, 52(增刊1):276-282. (LUO Yong, DOU Xiping, LUO Zhaosen. A few thinking for the Yellow River sediment regulation with "air-uplift" [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 52(Sup1):276-282. (in Chinese))
- [13] 丁磊, 罗勇, 窦希萍, 等. 气动冲沙法辅助小浪底水库调沙的设想[J]. 人民黄河, 2019, 41(7):66-71. (DING Lei, LUO Yong, DOU Xiping, et al. Assumption of assisting sediment regulation in Xiaolangdi Reservoir by pneumatic sluicing [J]. Yellow River, 2019, 41(7):66-71. (in Chinese))
- [14] 徐进超, 丁磊, 罗勇. 气动冲沙数值仿真模型研究[J]. 人民黄河, 2019, 41(6):29-33. (XU Jinchao, DING Lei, LUO Yong. Numerical simulation of air uplift and control sediment [J]. Yellow River, 2019, 41(6):29-33. (in Chinese))
- [15] 沈邦兴. 实验设计及工程应用[M]. 北京:中国计量出版社, 2005.
- [16] 陈立周. 稳健设计[M]. 北京:机械工业出版社, 2000.
- [17] 何为, 唐斌, 薛卫东. 优化试验设计方法及数据分析[M]. 北京:化学工业出版社, 2012.
- (收稿日期:2022-03-06 编辑:骆超)

(上接第 55 页)

- [15] 李元辉, 刘建坡, 赵兴东, 等. 岩石破裂过程中的声发射 b 值及分形特征研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(9):2559-2563. (LI Yuanhui, LIU Jianpo, ZHAO Xingdong, et al. Study on b -value and fractal dimension of acoustic emission during rock failure process [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(9):2559-2563. (in Chinese))
- [16] 余乐兴. 不同粒径充填体单轴压缩条件下力学性能及声发射特性研究[D]. 赣州市:江西理工大学, 2015.
- [17] 周逸飞, 朱星, 刘文德. 基于声发射和高斯混合模型的灰岩破裂特征识别研究[J]. 水利水电技术, 2019, 50(11):131-140. (ZHOU Yifei, ZHU Xing, LIU Wende. Identification of cracking characteristics of limestone under uniaxial compression condition using acoustic emission and GMM [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2019, 50(11):131-140. (in Chinese))
- [18] 李漾, 刘洋, 丁翠, 等. 不同层理煤破坏过程声发射 RA-AF 特征研究[J]. 煤矿安全, 2022, 53(1):37-43. (LI Yang, LIU Yang, DING Cui, et al. RA-AF characteristics of acoustic emission in uniaxial compression failure of different bedded coal [J]. Safety in Coal Mines, 2022, 53(1):37-43. (in Chinese))
- [19] 陈忠购. 基于声发射技术的钢筋混凝土损伤识别与劣化评价[D]. 杭州:浙江大学, 2018.
- [20] 葛振龙, 孙强, 王苗苗, 等. 基于 RA/AF 的高温后砂岩破裂特征识别研究[J]. 煤田地质与勘探, 2021, 49(2):176-183. (GE Zhenlong, SUN Qiang, WANG Miaomiao, et al. Fracture feature recognition of sandstone after high temperature based on RA/AF [J]. Coal Geology & Exploration, 2021, 49(2):176-183. (in Chinese))
- (收稿日期:2022-02-23 编辑:刘晓艳)