

铅锌尾矿砂对混凝土单轴压缩声发射特征的影响研究

张亚利¹, 陈昌远², 王杰³, 季云³

(1. 河南质量工程职业学院, 河南 平顶山 467000; 2. 中建一局集团第二建筑有限公司, 北京 102600; 3. 中南大学 冶金与环境学院环境工程研究所, 湖南 长沙 410083)

摘要: 为了研究尾矿砂骨料混凝土的力学特性, 对4种铅锌尾矿砂含量的混凝土开展单轴压缩实验, 同时获取了压缩过程中的声发射信号, 基于声发射信号对材料损伤演化特征进行了评价。结果表明: 混凝土试件的变形过程分为弹性、塑性、断裂破坏和残余变形4个主要阶段; 随着铅锌尾矿砂取代率增加, 抗压强度有增大趋势, 并在超过30%后趋于稳定; 根据声发射实验得到了损伤因子与应变的关系曲线; 普通混凝土结构损伤主要在塑性变形阶段, 尾矿砂改性混凝土的结构性损伤集中在塑性和断裂破坏阶段; 一定比例的铅锌尾矿砂有助于加速水化凝胶物的形成, 从而增强强度和变形性能。

关键词: 混凝土; 铅锌尾矿砂; 应力应变; 损伤特征; 声发射

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2022.06.011

中图分类号: TD952; TU528 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532 (2022) 06-0061-05

天然砂是建筑工程领域的一种极为重要的矿产资源, 但也存在日渐枯竭和品质下降的现状^[1]。因此, 找到天然砂的可替代资源用作砂浆细骨料是工程材料领域的重要研究方向之一^[2]。尾矿砂是一种常见的矿产固态废料, 具有成本低廉、资源众多与绿色环保等优点。采用尾矿砂骨料用作天然砂的替代材料, 能够大大促进尾矿砂的回收利用, 也可以相对提高混凝土材料的生产效益^[3-4]。当前, 尾矿砂改性的高性能混凝土材料正在工程界逐步推广, 对尾矿砂资源的需求量也逐渐增加, 深入地认知不同类别尾矿砂对混凝土变形损伤特征的影响具有重要的科学价值。

声发射 Acoustic Emission(简称 AE)现象是材料内部区域在外部荷载作用下发生破坏引起能量快速释放, 进而发出瞬态弹性波的现象。声发射信号特征是评价混凝土受压性能的关键指标, 声发射技术在水泥基材料变形损伤分析中已引起广泛关注。混凝土材料在载荷作用下, 砂浆体发生局部变形和结构性损伤, 这种效应表现为能量耗

散的形式, 声发射信号可以有效地反映颗粒结构的损伤级别^[5]。具与声发射信号数据的后期处理和量化分析能够准确地评价混凝土砂浆结构的破损特征, 进而反演处结构的损伤演化规律^[6]。

虽然对混凝土 AE 信号与强度特征的内在关系已取得了一定成果, 然而尾矿砂混凝土的 AE 损伤关系分析还较少见^[7]。因此, 有必要进行尾矿砂混凝土的力学性能与声发射联合测试, 深入分析材料受压损伤演化特征。

本文以4种不同替代率的铅锌尾矿砂作为天然砂替代骨料制备改性混凝土, 开展单轴压缩与声发射联合实验, 进而对其损伤演化特征进行了结构性损伤分析, 基于微观结构对混凝土损伤变形机制进行细致探讨。本研究旨在为尾矿砂混凝土的制备和改性提供科学参考。

1 实验材料与方法

1.1 实验材料

本实验采用的混凝土样品的基本物料配合比

收稿日期: 2021-05-17

基金项目: 河南省自然科学基金资助项目 (KJ204079)

作者简介: 张亚利 (1979-), 女, 硕士, 讲师, 主要从事建筑工程管理和材料方面研究。

由某大型水电站施工现场提供,包括:碎石粗骨料、天然河砂细骨料、普通硅酸盐水泥、二级粉煤灰、水和外加剂。本研究采用铅锌尾砂作为天然河砂的替代材料制备改性试件。三种骨料:碎石、天然河砂和尾矿砂的性能指标见表1。粗集料粒径范围为10~25 mm的碎石;细集料分别采用天然河砂和铅锌尾砂,河砂粒径最大为5 mm,尾砂粒径最大为4.75 mm,河砂天然密度低于铅锌尾砂,透水性和细度模数高于铅锌尾砂。本研究制备了4组不同铅锌尾矿砂取代率(0、15%、30%和45%)的混凝土试件。

1.2 混凝土制备

参照《普通混凝土制备方法》DBJ53/T-2-2016

表1 粗细骨料的基本物理特性

骨料类别	碎石	河砂	尾矿砂
密度/(g·cm ⁻³)	2.65	2.68	2.80
透水率/%	0.95	1.02	0.75
细度模数	4.60	3.28	2.04

制备混凝土试件,配合比见表2,水灰比为0.45,浇筑后静置48 h后脱模,养护28 d龄期。表2中TS为铅锌尾矿砂,NS为天然砂,G为粗集料,C为水泥,F为粉煤灰,AA为引气剂,WA为减水剂。成型后的混凝土试件为150 mm×150 mm×150 mm的棱柱体,采用钻芯制样的方式制备直径50 mm,高度100 mm的圆柱样品,用以开展力学实验。

表2 混凝土的配合比

Table 2 Mix proportion of concrete

组别	取代率/%	单位体积的质量/(kg·m ⁻³)					外加剂/%	
		TS	NS	G	C	F	AA	WA
1#	0	0	780	1285	580	120	0.1	0.4
2#	15	117	663	1285	580	120	0.1	0.4
3#	30	234	546	1285	580	120	0.1	0.4
4#	45	351	429	1285	580	120	0.1	0.4

1.3 实验方法

采用液压伺服式压缩实验仪和PCI-2型声发射测试探讨进行测试(图1)。实验前用夹持器把AE测试探头固定在混凝土试件中间。采用压力控制式进行加载,加载的速率为0.05 MPa/min,AE探头谐振频率是150 kHz,频率为5 kHz,最小阈值为25 dB。

2 实验结果分析

2.1 应力-应变-声发射演化特征

图2给出了4种不同铅锌尾砂取代率的混凝土压缩破坏形态图片。不含铅锌尾砂的混凝土破坏时呈单向剪切形式,裂缝竖向分布且贯穿混凝土试件,呈脆性破坏特点。不同尾砂取代率的改性混凝土在破坏时存在一定塑性特征,破坏的主要断裂裂缝为斜向分布。且混凝土破坏裂缝数量随着铅锌尾砂取代率的增加剧烈增加,塑性变形程度也逐渐提高,尾砂取代率为45%的混凝土表面出现了掉渣现象。

在力学过程中测试声发射信号获取了混凝土

的应力-应变曲线和声发射振铃计数(AE信号)测试结果。由图1可知,不同铅锌尾砂取代率的混凝土应力-应变关系曲线均可划分为弹性变形、塑性屈服、断裂破坏和残余变形4个主要阶段。铅锌尾矿砂取代率为0%的混凝土试件在弹性变形阶段中,应力随应变增长近似呈直线型上升,且声发射信号活跃程度较高;在进入塑性屈服变形阶段后,应力上升的斜率逐渐下降,且声发射信号的变化剧烈,说明试件的内部结构出现了显著的损伤效应;断裂破坏的应力随应变增长而剧烈下降的变形阶段;发生残余变形后,应力-应变曲线继续下降,同时声发射振铃数趋于平稳,表明此时混凝土的结构性损伤累积过程基本结束,结构的破损程度达到较大。

由图1(b)~(c)所知,铅锌尾砂取代率为15%和30%的混凝土的应力-应变曲线发生明显变化。线性上升段的范围变宽,说明弹性变形的应变值增大,弹性变形的轴向应变最大可达0.7%~0.8%。另外,弹性模量随尾矿砂含量增加而上升,说明混凝土承压和变形性能随尾矿砂含

量增加而提高。图1(d)所示的是铅锌尾矿砂取代率为45%的混凝土实验结果,可以看出较尾矿砂取代率为30%的试件,该组混凝土的峰值强度下

降,说明尾矿砂外掺改性作用对混凝土强度的提升有一定范围。对于本实验而言,尾矿砂改性混凝土的较佳取代率为30%。

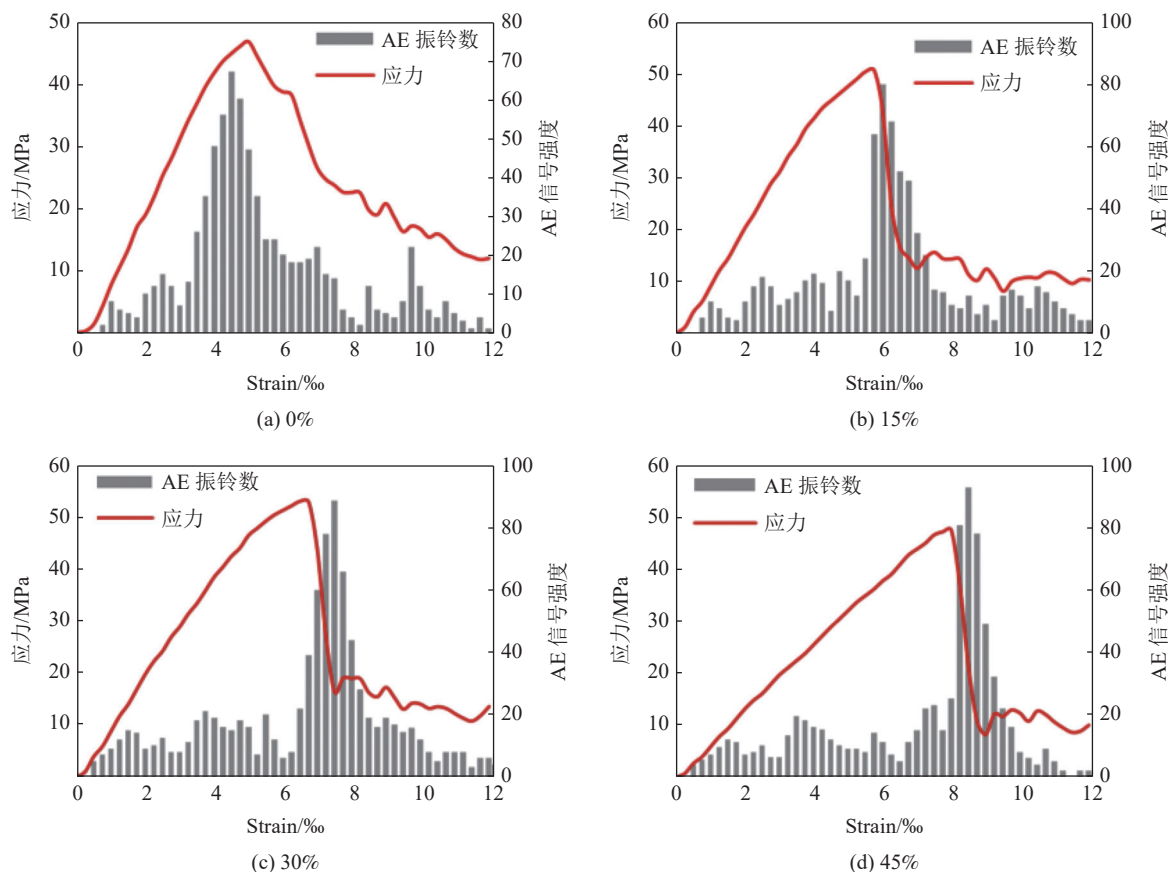


图1 混凝土的应力-应变-AE信号曲线
Fig.1 Stress-strain-AE signal curve of concrete

对混凝土单轴破坏时的AE信号变化特点开展进一步的分析,不同取代率的铅锌尾矿砂混凝土在弹性和塑性变形阶段的信号波动较平稳,没有明显突变;进行破坏阶段后,AE振铃数开始活跃,且持续的阶段较短;进入残余变形阶段后,声发射信号又归于平稳。该现象说明铅锌尾矿砂改性混凝土的破坏特征与普通混凝土有明显差异,尾矿砂改性混凝土的AE信号活跃期主要出现在断裂破坏阶段,而普通混凝土发生在塑性屈服阶段。

究其原因,尾矿砂混凝土砂浆结构相对比较密实,强度较高,在进入弹性变形和塑性变形阶段时,内部的水泥砂浆硬化体在外荷载增加过程中出现滑移,混凝土结构发生调整,并没有立刻出现断裂裂缝,故此阶段AE信号相对稳定。进入断裂破坏阶段后,混凝土应力到达峰值,裂隙迅

速连通,并伴随剧烈的结构性损伤,AE信号进入短暂的活跃期。而进入残余变形阶段后,混凝土结构总体已破坏,AE信号趋于稳定。从AE信号变化趋势可以看出尾矿砂混凝土在单轴荷载作用下有明显的脆性特征^[8]。

图2给出了不同铅锌尾矿砂取代率条件下的混凝土抗压强度和累积AE振铃数。从图2可以看出随铅锌尾矿砂取代率的增加,峰值强度和累积AE振铃数呈先上升后稳定的趋势。图3给出了累积振铃数与峰值应力的数据拟合结果,可以看出强度性能指标与声发射信号存在一定正相关的关系,故可以将声发射信号作为一种评价混凝土材料变形性能的指标。

2.2 损伤机理分析

不同尾矿砂取代率的混凝土强度特征与AE信号累积数存在正相关特点,可以考虑借助AE信号变

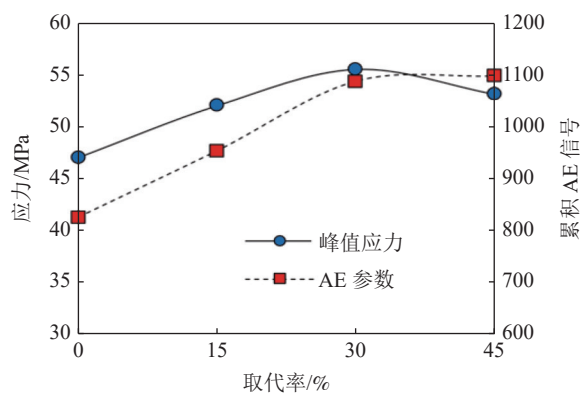


图2 混凝土强度与累积 AE 振铃数
Fig.2 Strength and accumulated AE signal

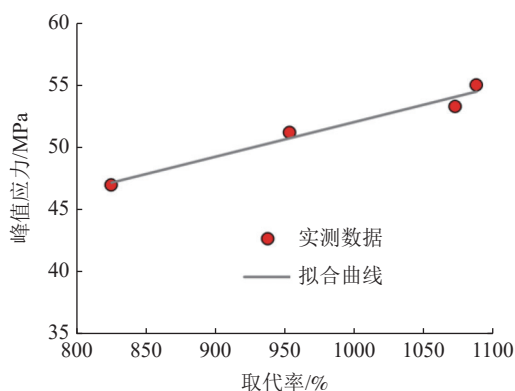


图3 峰值强度与 AE 信号的关系
Fig.3 Relation between strength and AE signal

化规律评价混凝土在变形过程中的结构损伤演化特征。对单轴压缩实验中的混凝土开展声发射信号监测后,从而根据 AE 振铃数的变化反演混凝土砂浆结构的损伤程度与裂纹的扩展规律。基于 AE 振铃计数提出了混凝土试件的单轴压缩实验过程中的损伤因子 D , 见公式 (1):

$$d = S_i / \sum S_i \quad (1)$$

式中, S_i 是不同变形阶段 AE 振铃累积值。在单轴压缩的过程中, 4 种铅锌尾砂取代率的混凝土损伤因子随应变增加的变化曲线见图 4, 其中 1#~4# 分别表示尾矿砂取代率为 0~45% 的混凝土试件。根据损伤因子-应变曲线的变化规律可知, 尾砂取代率对混凝土试件的损伤特点存在明显影响。其中, 尾砂取代率为 0 的混凝土试件结构性损伤发展速度相对较快; 铅锌尾砂改性的混凝土试件在变形前期增长数量较缓, 轴向应变超过 5% 后进入损伤因子快速跃迁阶段, 当轴向应变达到 12% 后, 4 种不同尾砂取代率的混凝土损伤因子保持稳定状态。损伤因子-应变曲线表明: 铅锌尾砂

改性混凝土结构性损伤主要累积阶段为塑性变形和破坏阶段, 而普通混凝土的结构性损伤在弹性阶段就开始快速上升。相对于普通混凝土试件而言, 铅锌尾砂改性混凝土破坏阶段的塑性变形量较大, 混凝土试件的延性更好, 该现象与观察到的混凝土试件破坏形态相似。

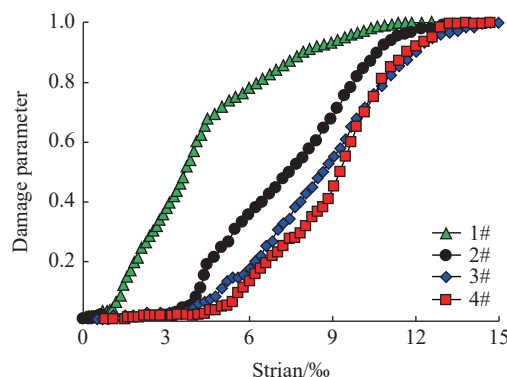


图4 损伤因子-应变关系曲线
Fig.4 Curves of damage index and strain

从微观角度进行混凝土损伤分析, 铅锌尾砂颗粒与天然砂颗粒的性质有较大区别, 其细度模数更小, 透水率更低, 与水泥之间存在表面相互作用, 可以加速水泥水化反应, 通过尾矿砂结晶效应形成胶凝状的团聚体, 加速了水化硅酸钙的形成。尾矿砂的结晶效应可以降低材料的孔隙率、增加胶凝体数量, 在混凝土中掺入一定量的尾矿砂能够起到抑制裂纹扩张的功能, 从而提高抗压强度和变形特性。但是当尾矿砂含量过高时, 水泥水化的需水量更高, 导致混凝土的裂隙增多, 强度与变形性能有所弱化。

3 结 论

(1) 采用一定比例的铅锌尾砂取代天然砂对混凝土进行改性, 有利于提升混凝土材料的力学性能, 取代率为 30% 的改性混凝土强度和变形性能达到较佳。

(2) 普通混凝土声发射信号的活跃期集中在塑性变形和屈服阶段, 铅锌尾砂改性混凝土声发射信号活跃期为断裂破坏阶段, 损伤因子在破坏阶段迅速发展。

(3) 一定比例的铅锌尾砂掺入混凝土后与水泥发生表面反应, 加速水泥水化物的形成, 阻碍裂隙扩张, 从而提高混凝土试件的力学性能。研究结果可为铅锌尾砂改性混凝土的研制和性能改

良提供参考。

参考文献:

- [1] 李萌, 周庆立, 白丽梅, 等. 机械力化学效应提高铁尾矿活性实验研究[J]. *矿产综合利用*, 2021(1):179-185.
- LI M, ZHOU Q L, BAI L M, et al. Experimental study on improving the activity of iron tailings by mechanochemical effect[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2021(1):179-185.
- [2] 吕兴栋, 刘战鳌, 朱志刚, 等. 尾矿作为水泥和混凝土原材料综合利用研究进展[J]. *材料导报*, 2018, 32(S2):452-456.
- LV X D, LIU Z A, ZHU Z G, et al. Research progress on comprehensive utilization of tailings as raw materials for cement and concrete[J]. *Materials Review*, 2018, 32(S2):452-456.
- [3] 李建涛, 崔杰, 王之宇. 利用商洛钼尾矿制备混凝土保温砌块的试验研究[J]. *新型建筑材料*, 2015, 42(3):80-83.
- LI J T, CUI J, WANG Z Y. Experimental study on preparation of concrete thermal insulation blocks using Shangluo molybdenum tailings[J]. *New Building Materials*, 2015, 42(3):80-83.
- [4] 张晋, 贺爱平, 李国栋, 等. 钙镁质磷矿选矿尾矿综合利用技术现状及展望[J]. *矿产综合利用*, 2021(2):199-203.
- ZHANG J, HE A P, LI G D, et al. Status and prospect of comprehensive utilization technology of calcium-magnesium phosphate tailings[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2021(2):199-203.

- [5] 郭庆华, 邵保平, 李志伟, 等. 混凝土声发射信号频率特征与强度参数的相关性试验研究[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2015, 46(4):1482-1488.

GUO Q H, XI B P, LI Z W, et al. Experimental study on the correlation between frequency characteristics and intensity parameters of concrete acoustic emission signals[J]. *Journal of Central South University(Natural Science Edition)*, 2015, 46(4):1482-1488.

- [6] 王笑然, 王恩元, 刘晓斐, 等. 混凝土损伤演化声发射和超声波时-频-空联合响应[J]. *中国矿业大学学报*, 2019, 48(2):268-277.

WANG X R, WANG E Y, LIU X F, et al. Acoustic emission and ultrasonic time-frequency-space joint response of concrete damage evolution[J]. *Journal of China University of Mining and Technology*, 2019, 48(2):268-277.

- [7] 赖于树, 熊燕, 程龙飞. 受载混凝土破坏全过程声发射信号频带能量特征[J]. *振动与冲击*, 2014, 33(10):177-182.

LAI Y S, XIONG Y, CHENG L F. Energy characteristics of acoustic emission signal bands in the whole process of loaded concrete failure[J]. *Vibration and Shock*, 2014, 33(10):177-182.

- [8] 于江, 吕旭滨, 秦拥军, 等. 基于声发射技术的再生混凝土梁受弯过程的损伤特性研究[J]. *混凝土*, 2020(8):27-31.

YU J, LV X B, QIN Y J, et al. Research on damage characteristics of recycled concrete beams during bending process based on acoustic emission technology[J]. *Concrete*, 2020(8):27-31.

Influence of Lead-Zinc Tailing Sand on Acoustic Emission Characteristics of Concrete under Uniaxial Compression Tests

Zhang Yali¹, Chen Changyuan², Wang Jie³, Ji yun³

(1.Henan Quality Polytechnic, Pingdingshan, Henan, China; 2.Second Construction Co., Ltd., of China Construction First Group, Beijing, China; 3.Institute of Environmental Engineering, School of Metallurgy and Environment, Central South University, Changsha, Hunan, China)

Abstract: In order to study the mechanical properties of tailings aggregate concrete, uniaxial compression tests were carried out on concrete with four kinds of lead-zinc tailing sand, and the acoustic emission signals during compression were obtained, and the damage evolution characteristics of the material were evaluated based on the acoustic emission signals. The results show that the deformation process of concrete specimens can be divided into four main stages: elastic, plastic, fracture and residual deformation. With the increase of replacement ratio of lead-zinc tailing sand, the compressive strength increases and becomes stable after more than 30%. The relation curve between damage factor and strain was obtained by acoustic emission test. The structural damage of ordinary concrete is mainly in the plastic deformation stage while the structural damage of tailing sand modified concrete is mainly in the plastic and fracture failure stage. A certain proportion of lead-zinc tailing sand helps to accelerate the formation of hydrated gels, thus enhancing the strength and deformation properties.

Keywords: Concrete; Lead-Zinc Tailing sand; Stress and strain; Damage characteristics; Acoustic emission