

文章编号:1007-9629(2024)06-0565-08

基于声发射检测 CSG 材料损伤演变及裂纹识别

黄 虎*, 刘赵涵, 邱庆明, 曹克磊, 郭利霞

(华北水利水电大学 水利学院, 河南 郑州 450046)

摘要:为了从微观角度揭示胶凝砂砾石(CSG)材料损伤演变机制和裂纹的分类演化规律,结合声发射测试技术,采用 Geiger 时差定位法、上升角-平均频率法和高斯混合模型,对 CSG 材料的裂纹类型进行识别.结果表明:CSG 材料的破坏过程可分为原始裂纹闭合、新生裂纹扩展、裂纹聚结和峰后破坏 4 个阶段;声发射事件的三维定位直观反映了裂纹萌生、扩展直至贯通的动态演化过程;通过裂纹类型识别,加载前期试件以剪切裂纹为主,后期拉伸裂纹占比增加,在临近破坏前,高水胶比时剪切裂纹与拉伸裂纹比约为 2:1,低水胶比时约为 1:1.

关键词:胶凝砂砾石材料;声发射;时空演化;高斯混合模型;裂纹类型

中图分类号:TV43

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2024.06.012

Damage Evolution and Crack Identification of CSG Material Based on Acoustic Emission Detection Technology

HUANG Hu*, LIU Zhaohan, QIU Qingming, CAO Kelei, GUO Lixia

(School of Water Conservancy, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China)

Abstract: To reveal the damage evolution mechanism and crack classification evolution law of cemented sand and gravel (CSG) materials from a microscopic perspective, the Geiger time difference positioning method, rising angle-average frequency method, and Gaussian mixture model were employed to identify the crack types of CSG materials. The results show that the failure process of CSG materials can be divided into four stages, initial crack closure, new crack propagation, crack coalescence and peak failure. The three-dimensional positioning of acoustic emission events intuitively reflects the dynamic evolution process from crack initiation, propagation to penetration. Through crack type identification, shear cracks predominate in the early loading stage, and the proportion of tensile cracks increases later. Before failure, the ratio of shear to tensile crack is about 2:1 at high water-binder ratio, and about 1:1 at low water-binder ratio.

Key words: cemented sand and gravel material; acoustic emission; spatio-temporal evolution; Gaussian mixture model; crack type

胶凝砂砾石(CSG)材料具有明显的弹塑性特征,其破坏主要是骨料间黏结力的丧失.低围压时骨料本身不发生任何形式破损,裂纹以弥散状分布为主,宏观上表现为剪切断裂和压碎^[1-3].声发射(AE)作为一种实时、无损检测技术,可通过收集和分析材料受载过程中的声发射信息,评估材料内部损伤活

动状态^[4-6].为实现对材料损伤的量化评估,日本建筑与材料协会提出了一种上升角 R_A -平均频率 A_F 参数关联方法,通过关联 R_A 和 A_F 来评价混凝土的裂纹破坏机制.该方法真实、简单、直观,但剪切裂纹和拉伸裂纹的分界线难以确定.Farhidzadeh等^[7]将分界线确定问题转化为一组未知分类数据的聚类问题,利用

收稿日期:2023-07-12; 修订日期:2023-11-09

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52109154); 河南省科技攻关项目(192102310224)

第一作者(通讯作者):黄 虎(1981—),男,河南兰考人,华北水利水电大学副教授,硕士生导师,博士. E-mail:huanghu1006@163.com

高斯混合模型(GMM)聚类算法可将声发射特征与裂纹分类联系起来^[8-10],可以克服传统裂纹分类的不足.

鉴于GMM算法在识别中良好的数据分析能力,为了进一步认识CSG材料的破坏机理,提出合理的CSG材料破坏前兆判据.本文结合声发射测试技术,采用Geiger时差定位法、上升角-平均频率法和GMM等方法,开展了不同骨料级配、水胶比(质量比,文中涉及的砂率、水胶比等除特殊说明外均为质量分数或质量比)下CSG材料试验研究,对CSG材料损伤演变机制和裂纹类型进行识别,从细观动态角度揭示加载过程中CSG材料的内部损伤演变机制和裂纹的分类演化规律,为工程实践提供理论依据.

1 试验

1.1 材料

普通硅酸盐水泥(C);热电厂干排Ⅱ级粉煤灰(FA);细骨料采用细度模数为2.94的天然河砂(S);粗骨料取自河南省林州市林虑河原状砾石(G),经冲洗、铺晒及晾干后直接使用,其级配曲线见图1;试验用水为生活用水(W).

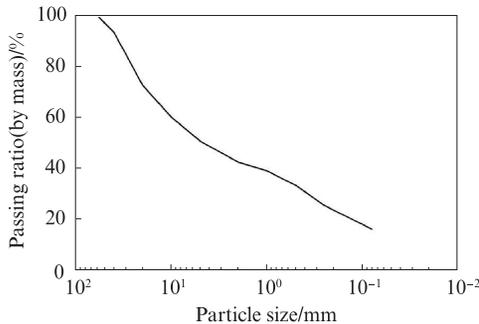


图1 原状砂砾石的级配曲线
Fig. 1 Grading curve of undisturbed sand gravel

CSG材料的配合比设计遵循填充包裹理论和SL 678—2014《胶结颗粒料筑坝技术导则》,设置水胶比 m_w/m_b 为1.0、1.2、1.5,骨料级配为平均级配AG(最大骨料粒径为60 mm)、最细级配FG(最大骨料粒径为20 mm),AG的砂率 $m_s=30\%$,FG的 $m_s=44\%$,试件的配合比见表1.拌和设备为单卧轴强制式搅拌机,依次将预先拌和均匀的水泥、粉煤灰、骨料加入搅拌仓内,搅拌1 min,再加水搅拌2 min.采用边长为150 mm的立方体模具,分3层装入,振捣压实后置于振动台机械振动22 s;试件成型后移入(20±2)℃、相对湿度为95%的标准养护室中养护至28 d.

1.2 试验方法

单轴压缩试验设备采用深圳三思纵横公司生产

表1 试件的配合比
Table 1 Mix proportions of specimens

Specimen	m_w/m_b	$m_s/\%$	Mix proportion/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)				
			C	FA	S	G	W
AG1	1.5	30.0	70.0	30.0	600.0	1 400.0	150.0
AG2	1.2	30.0	70.0	30.0	609.0	1 421.0	120.0
AG3	1.0	30.0	70.0	30.0	615.0	1 435.0	100.0
FG1	1.5	44.0	70.0	30.0	880.0	1 120.0	150.0
FG2	1.2	44.0	70.0	30.0	893.2	1 136.8	120.0
FG3	1.0	44.0	70.0	30.0	902.0	1 148.0	100.0

的YAW-5000型微机控制电液伺服压力试验机,加载模式为轴向位移控制,加载速率为0.5 mm/min,精度控制在设定值的±0.5%以内.单轴压缩加载与北京声华公司生产的SAEU3H声发射系统联合使用.加载试验前,反复进行铅笔芯断裂试验,调整采集硬件设置参数,提高声发射的定位精度.确定胶凝砂砾石材料声发射参数分别为:撞击定义时间为60 μs;撞击闭锁时间为310 μs;峰值定义时间为165 μs;前置放大器增益40 dB;为排除实验室仪器噪音的影响,试验环境参数门限设为40 dB.

2 结果与讨论

2.1 CSG材料损伤分析

2.1.1 CSG材料的力学特性

CSG材料的应力-应变曲线见图2.由图2可见:不同骨料级配及水胶比下,CSG材料的应力-应变曲线均表现出上凹-直线-上凸-下凹的变化规律,其可划分为4个阶段——初始压密阶段(OA段)、弹性变形阶段(AB段)、塑性变形阶段(BC段)以及峰后破坏阶段(CD段);与平均骨料级配相比,最细骨料级配CSG材料的应力-应变曲线在初始压密阶段更长、峰后破坏阶段更为平缓,表现出更强的塑性变形能力;随着骨料粒径的增加,CSG材料的轴向刚度提高,水胶比为1.5、1.2、1.0的试件对应的峰值应力 f_c 分别由4.01、3.65、3.32 MPa增加至6.82、6.91、8.62 MPa;当

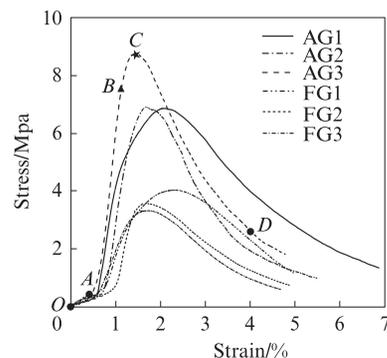


图2 CSG材料的应力-应变曲线
Fig. 2 Stress-strain curves of CSG materials

骨料级配相同时,CSG材料存在最优水胶比,平均骨料级配下,最优水胶比为1.0,对应的峰值应力为8.62 MPa,最细骨料级配的峰值强度与峰值应变均随着水胶比的增大而增加,其最优水胶比为1.5,对应峰值应力为4.01 MPa.

2.1.2 CSG材料的声发射特征

由于CSG材料应力和声发射特征参数随时间的变化类似,因此本文仅以试件AG1为例进行分析,其曲线见图3.由图3可见,CSG材料的破坏过程可分为4个阶段:(1)原始裂纹闭合阶段(阶段I) 累计声发射信号(AE能量和振铃计数)初始呈非线性增长,AE能量和振铃计数相对较低,且总体呈现出先增大后减小的趋势.此阶段所产生的少量AE能量和振铃计数是由于原始缺陷或孔隙在低应力下闭合所致.(2)新生裂纹扩展阶段(阶段II) 累计声发射信

号呈指数型增长,AE能量和振铃计数增加至最高,与应力-应变曲线弹性变形阶段相对应.裂隙压实闭合后,仍然存在少量接近优势方位的裂隙和内部构造,可以随着应力集中作用的增强而起裂或扩展,但这些细观损伤过程是弹性变形调整的结果,故而并不产生宏观裂隙变形^[11].(3)裂纹聚结阶段(阶段III) 累计声发射信号呈对数型增长,AE能量和振铃计数有所降低,与应力-应变曲线塑性变形阶段相对应,在峰值应力点附近声发射信号略有升高.此阶段裂纹交汇、贯通,宏观裂纹开始形成,微裂纹发展减少,大尺度裂纹扩展迅速.(4)峰后破坏阶段(阶段IV) 累计声发射信号曲线趋近于水平,AE能量和振铃计数趋于稳定.此阶段裂纹进一步扩展,贯穿性裂纹开始形成,试件开始出现大变形,并伴随着粗骨料之间的摩擦,试件承载力明显减弱.

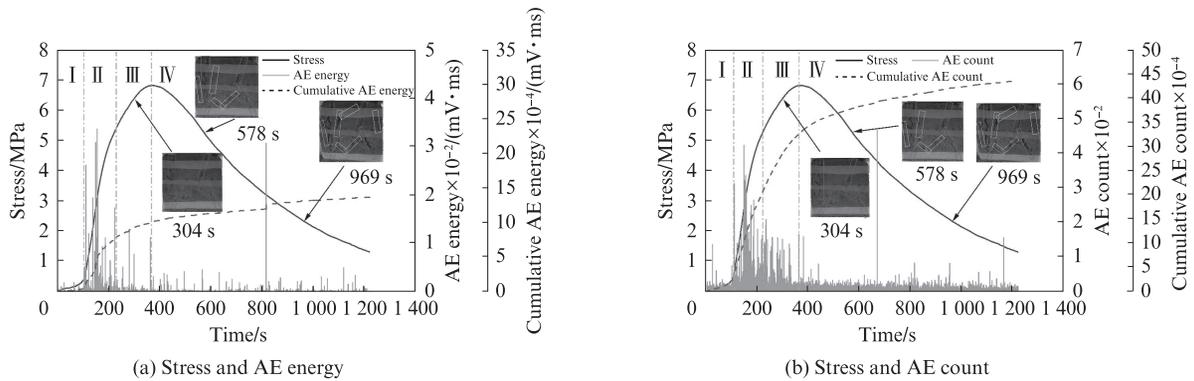


图3 试件AG1应力和声发特征参数随时间的变化曲线
Fig. 3 Curves of stress and AE characteristic parameters of specimen AG1

由图3还可知,CSG材料AE特征参数均呈现出平静-活跃-稳定的变化规律.将不同配合比的CSG材料的AE能量及振铃计数累计值进行对比,结果见图4.由图4可见:平均骨料级配试件AE能量和振铃计数的累计值随着水胶比的降低分别由 13.7×10^4 mV·ms、 43.7×10^4 增大至 30.7×10^4 mV·ms、 78.6×10^4 ;最细骨料级配试件的AE能量和振铃计数的累计值随着水胶比的增加分别由 6.5×10^4 mV·ms、 28.4×10^4 增大至 2.1×10^5 mV·ms、 1.1×10^5 .其主要原因为平均骨料级配试件的骨料体系中胶凝浆体强度随着水胶比的降低而增大,外荷载作用下试件内部裂纹沿骨料间最薄弱面进行扩展时,伴随更强烈的声发射活动,释放出更多的能量;最细骨料级配试件随着水胶比的增大骨料间胶凝浆体的包裹率得到了提升,增加了骨料间的胶结强度,使AE能量和振铃计数累计值增大.

2.1.3 裂纹的时空演化规律

基于Geiger时差定位法,通过传感器接收P波

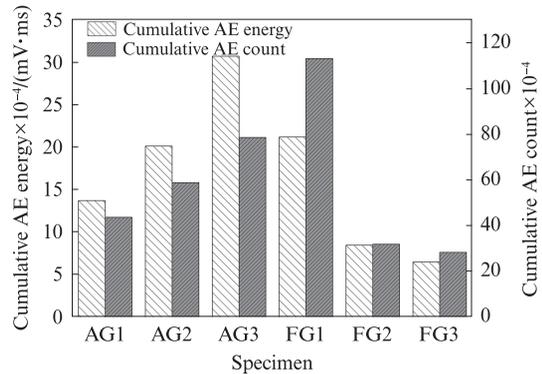
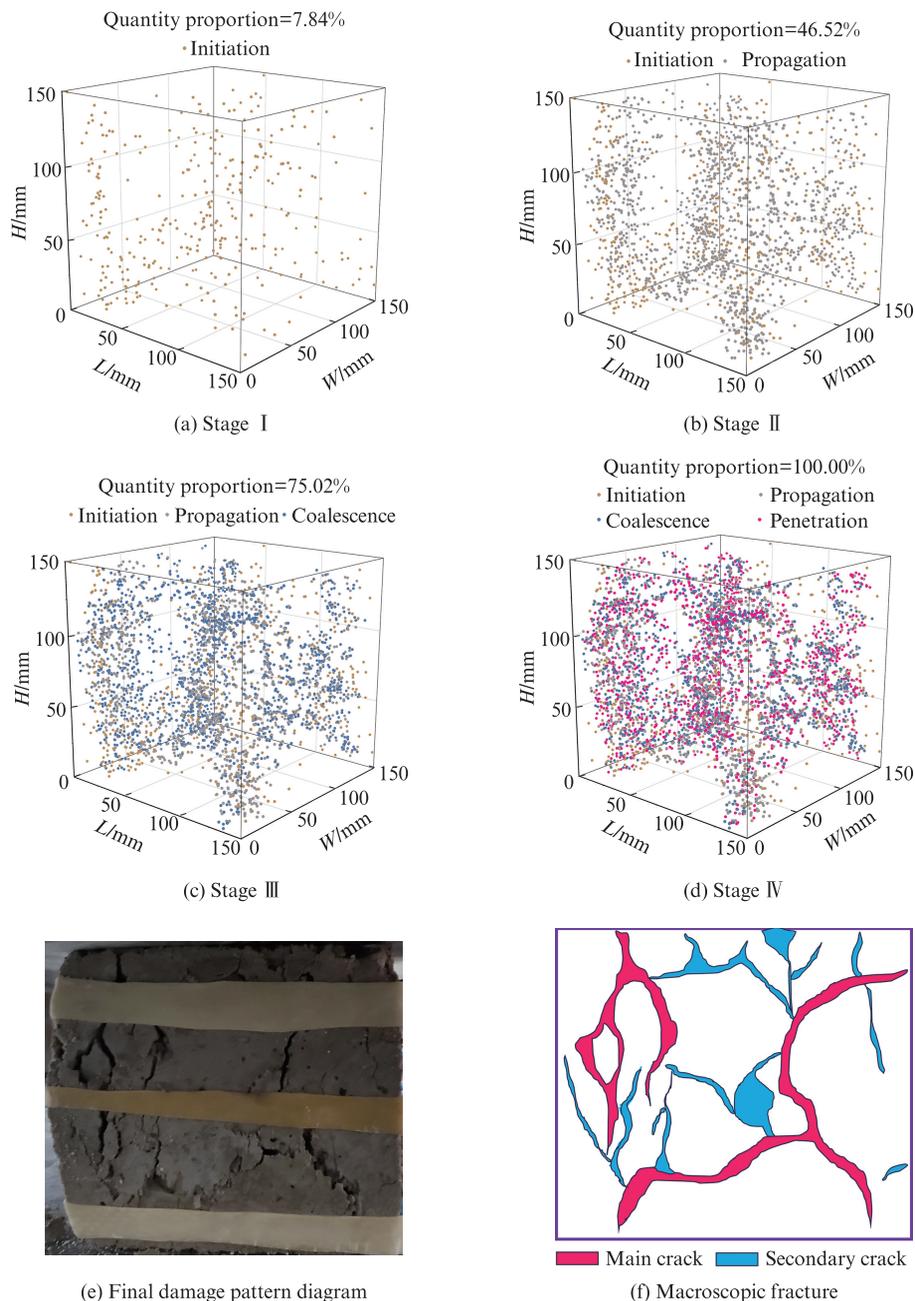


图4 不同配合比下的声发射能量和振铃计数累计值
Fig.4 Cumulative values of AE energy and counts under different mix proportions

到达的时间差反演破裂源的位置,对反演结果进行筛选,可消除小幅值事件的影响.限于篇幅,以试件AG1为例进行重点分析.试件AG1裂纹时空演化分布见图5(图中L、W、H分别为试件的长、宽、高).由图5可见:在原始裂纹闭合阶段,定位点(声发射事件)主要源自原始裂纹的闭合,空间分布表现为数量



(e) Final damage pattern diagram

图5 试件AG1裂纹时空演化分布

Fig. 5 Distribution of spatio-temporal evolution of cracks in specimen AG1

少、稀疏及随机等特点,定位点数量占比为7.84%(见图5(a));在新生裂纹扩展阶段,声发射定位点开始增多且集聚,呈现出构造集聚型分布,定位点主要聚集在试件4条棱边附近,数量占比为38.68%(见图5(b));在裂纹聚结阶段,声发射在保持构造集聚的前提下,呈现整体加密型集聚,棱边处裂纹相互交错,这种特征与裂隙变形趋势一致,定位点数量占比为28.50%,比新生裂纹扩展阶段下降26.30%。定位点数量增加率降低,可作为CSG材料破坏的前兆信息(见图5(c)、(e));在峰后破坏阶段,构造集聚已不明显,相应出现了多区加密集聚,与上个阶段相比,集聚宽度更小,定位点数量占比为24.98%(见图5(d))。

2.2 CSG材料损伤裂纹识别

2.2.1 高斯混合模型识别

材料在压缩作用下的破坏形式包括拉伸破坏和剪切破坏,声发射特征参数中上升角 R_A 与平均频率 A_F 的相对关系与材料破坏类型有关,可以有效识别材料的破坏类型。 R_A 和 A_F 的计算式为:

$$R_A = \frac{R_T}{P_A} \quad (1)$$

$$A_F = \frac{A_C}{A_D} \quad (2)$$

式中: R_T 为声发射上升时间; P_A 为声发射信号峰值幅值; A_C 为声发射振铃计数; A_D 为声发射持续时间。

在拉伸破坏模式下,弹性能瞬间释放,声发射上升时间和持续时间短,幅度大,振铃计数多,造成更低的 R_A 值与更高的 A_F 值;在剪切破坏模式下则相反,由于上升时间和持续时间更长,与剪切裂纹相关的 R_A 值较高.裂纹类型示意图见图6.由于 R_A 与 A_F 之间的坐标比例并没有清晰的界定标准^[12],且不同材料的 R_A - A_F 阈值一般不同,因此,难以确定拉剪裂纹的分界线以描述其阶段性演化规律.

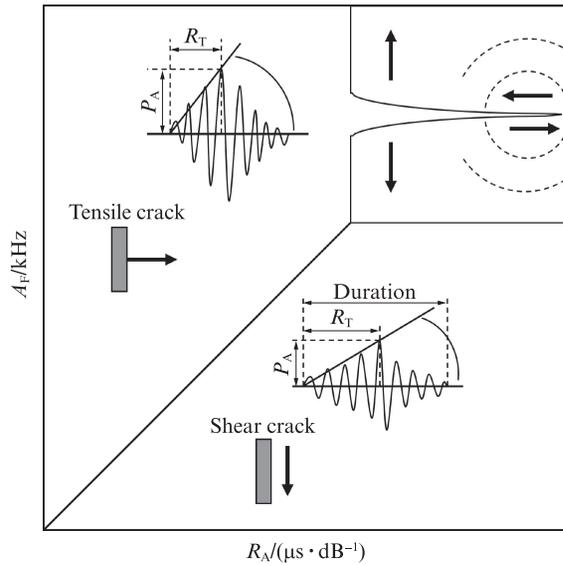


图6 裂纹类型示意图

Fig. 6 Schematic diagram of crack types

高斯混合模型算法可以看作是单个高斯模型的加权平均和,其概率密度函数 $p(x_i)$ 计算式^[13]为:

$$p(x_i) = \sum_{k=1}^M \omega_k p_k(x) = \sum_{k=1}^M \omega_k N(x | \mu_k, \Sigma_k) \quad (3)$$

式中: x_i 为第 i 个观测样本; M 为模型的混合数; ω_k 为混合模型的权重系数,且 $\sum_{k=1}^M \omega_k = 1$; $p_k(x)$ 为第 k 个高斯概率密度函数; $N(x | \mu_k, \Sigma_k)$ 为第 k 个单一高斯概率密度函数; μ_k 为第 k 个高斯概率密度函数的期望值; Σ_k 为第 k 个高斯概率密度函数的协方差矩阵.

声发射试验数据的输入为二维矢量,即 (R_A, A_F) .将混合模型数目分为两类,即与声发射裂纹模式相关的剪切裂纹和拉伸裂纹.总数据集 X 为:

$$X = \{x_1 = (R_{A1}, A_{F1}), x_2 = (R_{A2}, A_{F2}), \dots, x_t = (R_{At}, A_{Ft})\} \quad (4)$$

式中: R_{At} 为第 t 个上升角的样本数据; A_{Ft} 为第 t 个平均频率的样本数据.

高斯混合模型聚类参数估计的目的是估算出最优参数集 θ (见式(5)),使高斯混合模型概率密度函数能最好地匹配特征向量的分布规律,即使概率

密度的似然估计值 $J(\theta)$ 达到最大值.假设数据集 X 之间相互独立,则 $J(\theta)$ 可以表示为式(6).

$$\theta = [\omega_j, \mu_j, \Sigma_j], j = 1, 2, \dots, M \quad (5)$$

$$J(\theta) = \ln \left[\prod_{i=1}^M p(x_i) \right] = \sum_{i=1}^M \ln p(x_i) = \sum_{k=1}^M \ln \left[\sum_{j=1}^M \omega_j N(x | \mu_j, \Sigma_j^2) \right] \quad (6)$$

式中: $\omega_j, \mu_j, \Sigma_j$ 分别为第 j 个混合模型的权重系数、期望值、协方差矩阵; σ_k 为第 k 个高斯概率密度函数的方差.

最大似然估计法(ML)的参数可以通过最大期望值(EM)算法迭代获得^[14].

2.2.2 损伤裂纹识别分析

为明晰CSG材料损伤过程中裂纹演化规律,将声发射最为活跃的新生裂纹扩展阶段(阶段II)进一步划分为新生裂纹扩展阶段初期(阶段II初)和新生裂纹扩展阶段后期(阶段II后).限于篇幅限制,以试件AG1为例,使用GMM算法对其在各阶段的裂纹进行分类,结果见图7.根据每个数据点的后验概率(资格分数),将数据分配给剪切裂纹集群或拉伸裂纹集群,图中浅色区域表示高概率密度,深色区域则表示低概率密度.由图7可见,整个阶段概率密度逐渐向拉伸裂纹区移动,表现为剪切裂纹向拉伸裂纹过渡,最终破坏裂纹类型以拉伸型为主.

在试件受压破坏的整个过程中,随着应力的增加,不同级配试件裂纹演化过程均表现为拉伸裂纹占比逐渐增多,剪切裂纹占比逐渐减少.CSG材料中的裂纹占比见图8.由图8可见:(1)在原始裂纹闭合阶段(阶段I),初始微裂纹逐渐闭合,新生裂纹类型以剪切型为主,少量拉伸裂纹并存.在平均骨料级配下,拉伸裂纹与剪切裂纹比约为57:43;在最细骨料级配下,拉伸裂纹与剪切裂纹比约为65:35.(2)在新生裂纹扩展阶段初期(阶段II初),新生裂纹大量产生,剪切裂纹逐渐向拉伸裂纹过渡,剪切裂纹与拉伸裂纹数量基本相当,水胶比为1.5的试件AG1、FG1中拉伸裂纹开始占据主导.(3)在新生裂纹扩展阶段末期(阶段II后),裂纹交汇贯通,拉伸裂纹开始增多,水胶比为1.2的试件AG2、FG2和水胶比为1.0的试件AG3、FG3中拉伸裂纹开始占据主导.(4)在裂纹聚结阶段(阶段III),宏观裂纹开始产生,直至试件破坏.在高水胶比(水胶比为1.5、1.2)下,拉伸裂纹与剪切裂纹比约为2:1;当水胶比为1.0时,拉伸裂纹与剪切裂纹比接近1:1.综上,随着荷载的增大,剪切裂纹占比逐渐减少,拉伸裂纹占比逐渐增多.在阶段

I, 拉伸裂纹与剪切裂纹比随着骨料粒径的降低而下降;在阶段III,随着水胶比的降低,CSG的拉伸裂纹与剪切裂纹比降低.这是因为在最细骨料级配下,由于级配不均匀,骨料间初始孔隙较多,阶段I时骨料间发生相互错动,导致剪切裂纹占比较大.

不同类型裂纹的时空演化过程见图9.由图9可

见:在单轴压缩条件下,试件裂纹的扩展方向近似平行于加载方向,少量裂纹倾斜于加载方向,平行剪切裂纹是由于压缩荷载方向正常的局部拉应力引起的,而倾斜剪切裂纹则是由于刚性粗骨料周围的软质胶凝基体流动,在粗骨料与水泥基体的边界处形成界面裂纹所造成的^[15];胶凝基体的横向变形远大

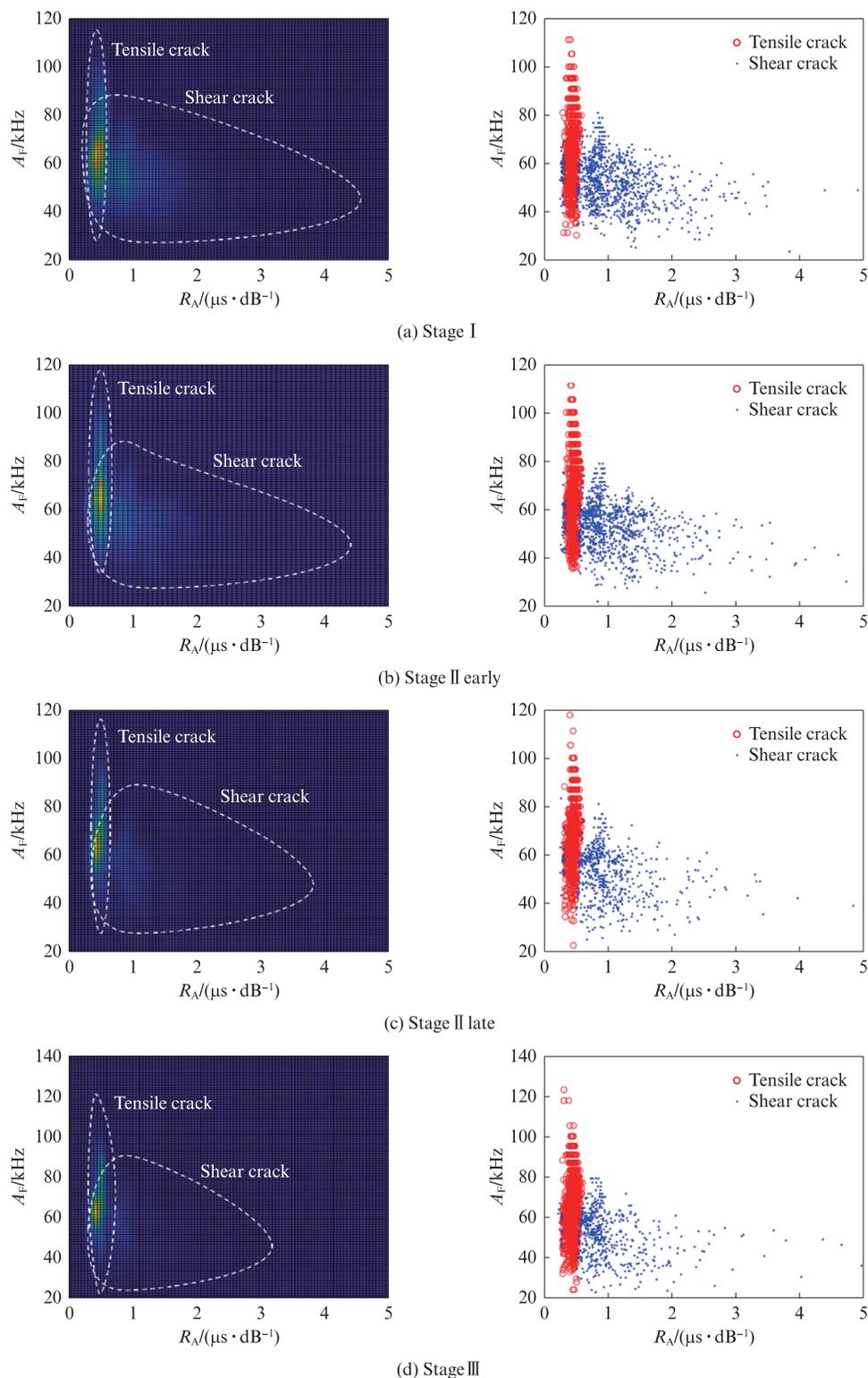


图7 不同阶段下试件AG1的GMM分析结果

Fig. 7 Results of GMM analysis for specimen AG1 under different stages

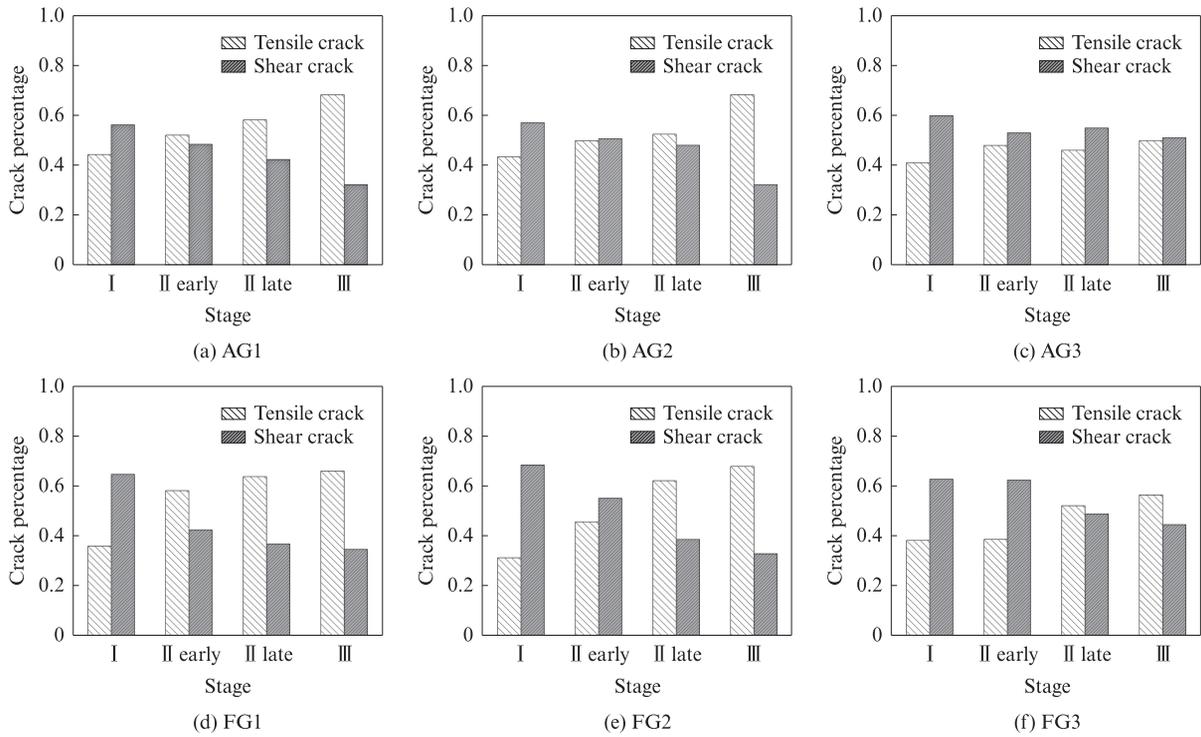


图8 CSG 材料中的裂纹占比
Fig. 8 Crack percentage of CSG materials

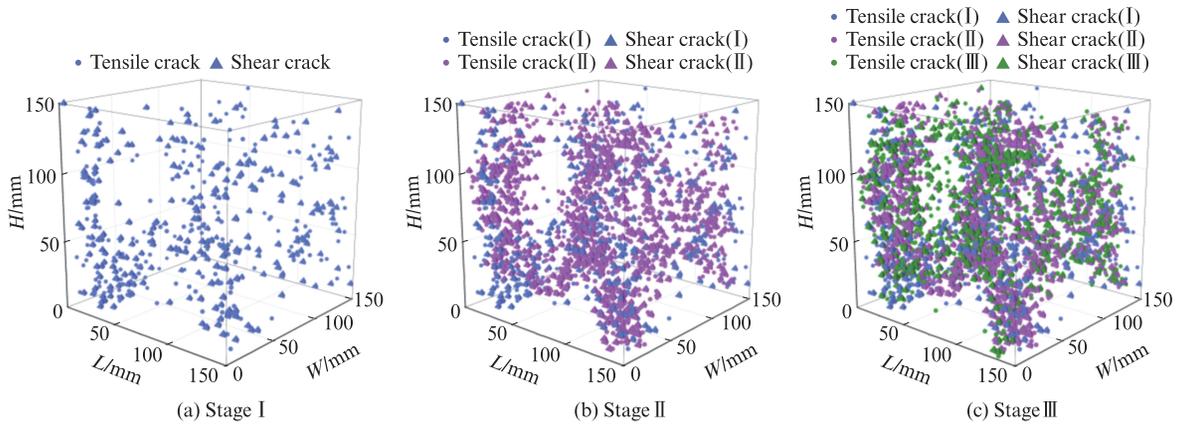


图9 不同裂纹类型的时空演化过程
Fig. 9 Spatio-temporal evolution process of different crack types

于骨料,这种不均匀性导致粗骨料顶部和底部剪应力的发展形成剪切锥(见图10),破坏面随着剪切锥

两侧梯形裂纹的扩展而形成;试件在低应力水平下,裂纹沿骨料与胶凝材料之间的胶结面进行拓展,形成大量的剪切裂纹,随着荷载的增加,拉应力开始占据主导地位,试件开始发生剪胀破坏;随着水胶比的降低,胶结面的强度有所提高.因此,在阶段III,拉伸裂纹与剪切裂纹占比比值由2:1变为1:1.

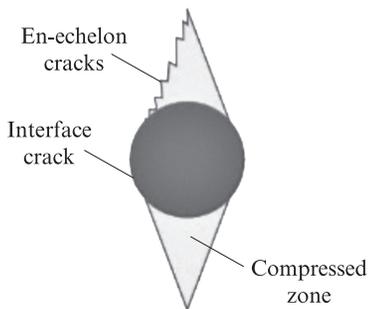


图10 胶结砂砾石在单轴压缩下的破坏机理
Fig. 10 Failure mechanism of cemented sand gravel under uniaxial compression

3 结论

(1) 骨料级配和水胶比对CSG材料的应力-应变曲线和强度具有显著影响.平均骨料级配试件强度与刚性均优于最细骨料级配,而最细骨料级配试件则表现出更好的塑性和延展性;平均骨料级配下最优水胶比为1.0,最细骨料级配下最优水胶比为1.5.

(2)CSG材料的破坏过程可分为原始裂纹闭合、新生裂纹扩展、裂纹聚结和峰后破坏4个阶段.声发射活动在裂纹扩展阶段最为活跃;在整个加载过程中,AE能量及振铃计数累计值与试件强度呈正相关.

(3)裂纹时空演化分布表现出明显的阶段性特征.原始裂纹闭合阶段以少量随机型声发射事件为主;在新生裂纹扩展阶段,声发射事件开始增多,裂纹呈构造型聚集;在裂纹聚结阶段和破坏阶段,裂纹表现为加密型聚集向多区加密型过渡.

(4)在单轴受压下,由剪切、拉伸及两者共同作用导致CSG试件最终破坏.在裂纹发展的整个过程中,剪切裂纹占比逐渐减少,拉伸裂纹占比逐渐增多;在临近破坏前,高水胶比(1.5、1.2)时剪切与拉伸裂纹比约为2:1,低水胶比(1.0)时约为1:1.

参考文献:

- [1] 蔡新,武颖利,李洪焯,等.胶凝堆石料本构特性研究[J].岩土工程学报,2010,32(9):1340-1344.
CAI Xin, WU Yingli, LI Hongxuan, et al. Constitutive equation for CSG materials [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(9):1340-1344. (in Chinese)
- [2] 郭磊,李泽宣,田青青,等.基于XGBoost算法的胶凝砂砾石劈拉强度预测分析[J].建筑材料学报,2023,26(4):378-382,388.
GUO Lei, LI Zexuan, TIAN Qingqing, et al. Predictive analysis of cemented sand and gravel splitting tensile strength based on XGBoost algorithm [J]. Journal of Building Materials, 2023, 26(4):378-382, 388. (in Chinese)
- [3] 黄虎,李坡,霍文龙,等.胶凝砂砾石材料宏细观参数及破坏模式研究[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2020,41(4):27-38.
HUANG Hu, LI Po, HUO Wenlong, et al. Study on relationship between mesoscopic and macroscopic mechanical parameters and failure model of cemented sand and gravel material [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science), 2020, 41(4):27-38. (in Chinese)
- [4] 甘一雄,吴顺川,任义,等.基于声发射上升时间/振幅与平均频率值的花岗岩劈裂破坏评价指标研究[J].岩土力学,2020,41(7):2324-2332.
GAN Yixiong, WU Shunchuan, REN Yi, et al. Evaluation indexes of granite splitting failure based on RA and AF of AE parameters [J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(7):2324-2332. (in Chinese)
- [5] 赖于树,熊燕,程龙飞.混凝土受载试验全过程声发射特性研究与应用[J].建筑材料学报,2015,18(3):380-386.
LAI Yushu, XIONG Yan, CHENG Longfei. Study of characteristics of acoustic emission duringentire loading tests of concrete and its application [J]. Journal of Building Materials, 2015, 18(3):380-386. (in Chinese)
- [6] 张志博,李树杰,王恩元,等.基于声发射事件时-空维度聚类分析的煤体损伤演化特征研究[J].岩石力学与工程学报,2020,39(增刊2):3338-3347.
ZHANG Zhibo, LI Shujie, WANG Enyuan, et al. Research on the damage evolution characteristics of coal based on cluster analysis of temporal-spatial dimension of acoustic emission events [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(Suppl 2):3338-3347. (in Chinese)
- [7] FARHIDZADEH A, SALAMONE S, SINGLA P. A probabilistic approach for damage identification and crack mode classification in reinforced concrete structures [J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2013, 24(14):1722-1735.
- [8] FARHIDZADEH A, MPALASKAS A C, MATIKAS T E, et al. Fracture mode identification in cementitious materials using supervised pattern recognition of acoustic emission features [J]. Construction and Building Materials, 2014, 67:129-138.
- [9] YANG D J, HU J H, MA S W, et al. Analysis of dynamic fracture of granite after uniaxial recompression predamaged by high confining pressure cyclic loading based on acoustic emission [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2022, 266:108-414.
- [10] 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. Study on 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)
- [11] 邓绪彪,刘远征,邢矿,等.基于声发射时空演化的岩石全应力-应变曲线阶段特征分析[J].岩石力学与工程学报,2018,37(增刊2):4086-4099.
DENG Xubiao, LIU Yuanzheng, XING Kuang, et al. Analysis based on AE space-time evolution characteristics for stage division of whole stress-strain curve of rock [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(Suppl 2):4086-4099. (in Chinese)
- [12] BEHNIA A, CHAI H K, SHIOTANI T. Advanced structural health monitoring of concrete structures with the aid of acoustic emission [J]. Construction and Building Materials, 2014, 65:282-302.
- [13] REYNOLDS D A, QUATIERI T F, DUNN R B. Speaker verification using adapted gaussian mixture models [J]. Digital Signal Processing, 2000, 10(1-3):19-41.
- [14] DEMPSTER A P, LAIRD N M, RUBIND B. Maximum likelihood from incomplete data via the EM algorithm [J]. Journal of the Royal Statistical Society Series B (Methodological), 1977, 39(1):1-22.
- [15] SAGAR R V, SRIVASTAVA J, SINGH R K. A probabilistic analysis of acoustic emission events and associated energy release during formation of shear and tensile cracks in cementitious materials under uniaxial compression [J]. Journal of Building Engineering, 2018, 20:647-662.