

引用本文:卜静武,徐慧颖,羌宇杰,等. 橡胶混凝土轴拉破坏过程中声发射特性[J]. 建筑科学与工程学报,2022,39(2):78-86.

BU Jing-wu, XU Hui-ying, QIANG Yu-jie, et al. Acoustic Emission Characteristics of Rubber Concrete in Axial Tension Process[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2022, 39(2): 78-86.

DOI:10.19815/j.jace.2021.06061

橡胶混凝土轴拉破坏过程中声发射特性

卜静武,徐慧颖,羌宇杰,周 宣,白文杰,徐龚欢

(扬州大学 水利科学与工程学院,江苏 扬州 225009)

摘要:为了研究橡胶掺量对单调荷载下混凝土拉伸破坏的影响,开展了不同橡胶掺量(体积分数 0%、5%、10%、15%、20%)的带缺口混凝土棱柱体的单轴拉伸破坏试验,采用声发射技术监测其破坏过程,进一步分析应力-裂缝张开位移曲线、断裂能以及声发射特征参数。结果表明:随着橡胶掺量的增加,混凝土失稳荷载下降,峰值裂缝张开位移增大,橡胶混凝土断裂能大于基准混凝土,并在橡胶掺量为 15% 时达到最大值;声发射累计振铃计数及累计撞击次数曲线能够将混凝土破坏过程划分为 3 个阶段,随着橡胶掺量的增加,声发射活性有所降低,峰值频率由高频向低频转变;声发射 b 值能够很好地反映混凝土试件的破坏形式,可以将混凝土试件的破坏过程划分为 2 个阶段,试件破坏过程中 b 值整体呈下降趋势,随着橡胶掺量的增加, b 值有所增大,主裂纹形成阶段 b 值最大值与最小值的差值有所减小;橡胶掺量小于 20% 时,强度降低速率较快,大于 20% 时,强度下降减缓。

关键词:橡胶混凝土;橡胶掺量;单轴拉伸试验;断裂能;声发射

中图分类号: TU528

文献标志码: A

文章编号: 1673-2049(2022)02-0078-09

Acoustic Emission Characteristics of Rubber Concrete in Axial Tension Process

BU Jing-wu, XU Hui-ying, QIANG Yu-jie, ZHOU Xuan, BAI Wen-jie, XU Gong-huan
(College of Hydraulic Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, Jiangsu, China)

Abstract: In order to study the influence of rubber content on the fracture performance of concrete under monotonic force, the uniaxial tensile tests of notched concrete prisms with different volume rubber contents (0%, 5%, 10%, 15%, 20%) were carried out. Acoustic emission technology was used to monitor the failure process of rubber concrete. Based on the test results, the curve of stress-crack opening displacement, fracture energy and acoustic emission characteristic parameters were analyzed. The results show that with the increase of rubber content, the instability load of concrete decreases, and the peak crack opening displacement increases. The fracture energy of rubber concrete is greater than that of reference concrete, and reaches the maximum value when the rubber content is 15%. The curves of acoustic emission accumulate counts and hits can divide the concrete failure process into three stages. With the increase of rubber content, the acoustic emission activity decreases, and the peak frequency changes from

收稿日期:2021-06-03

基金项目:国家自然科学基金项目(51809227)

作者简介:卜静武(1988-),女,江苏徐州人,讲师,工学博士,E-mail: bujingwu2008@163.com。

high frequency to low frequency. The acoustic emission b value can well reflect the failure form of the concrete specimen. The failure process of concrete specimen can be divided into two stages. During the failure process of the specimen, the b value shows a downward trend. As the rubber content increases, the b value increases. During the main crack formation stage, the difference between the maximum and minimum values of b value is reduced. The strength reduction rate is high with the rubber content less than 20%, while the strength reduction rate is lower when it exceeds 20%.

Key words: rubber concrete; rubber content; uniaxial tensile test; fracture energy; acoustic emission

0 引言

随着中国汽车工业的发展,废弃轮胎的数量繁多,其回收利用率一直很高,但无害化利用率却很低^[1]。将废弃轮胎经过处理变成橡胶颗粒掺入混凝土形成土木工程材料,不仅能够提高废弃轮胎的利用率,而且可以有效缓解橡胶固体废弃物对环境造成的影响。将具有弹性的橡胶颗粒等体积取代部分细骨料,可以提升混凝土的延性、抗冲击性及耐久性等特性^[2-6]。因此,进行橡胶混凝土试验与研究不仅对国家经济循环、可持续发展具有重要意义,而且对土木工程材料领域的发展也起到促进作用。

目前,国内外已有许多学者开展了橡胶混凝土力学性能的研究。大量研究表明橡胶的掺入对混凝土中细小裂纹的扩展有抑制阻碍作用,能够改善混凝土的韧性^[7]。由于橡胶颗粒弹性模量较小,且与水泥基材料的黏结较弱,因此会降低混凝土的强度^[8-10],且细橡胶微粒较粗橡胶微粒对混凝土强度影响更大。葛文慧^[11]研究了粒径分别为2~4 mm、20~40目和60~80目的橡胶颗粒对橡胶混凝土力学性能的影响,发现橡胶取代率为15%时,掺入橡胶颗粒为2~4 mm的橡胶混凝土抗压强度和拉伸强度均达到最大。胡艳丽等^[12]对5种不同橡胶取代率的混凝土试件分别展开了单轴受压、单轴劈拉和纯剪试验,发现橡胶混凝土的基本受力性能及破坏机理基本一致,强度均随橡胶掺量的增加而降低,而混凝土塑性变形能力增大,其中单轴抗压强度受橡胶取代率的影响最大。对于混凝土材料,裂缝的出现以及结构的破坏往往是由于抗拉能力的不足,轴向拉伸试验是确定混凝土拉伸断裂特性最直接的方法^[13]。综合国内外文献,学者们越来越关注混凝土的拉伸性能^[14-15],但对带裂缝的橡胶混凝土轴拉试验的研究成果极少,所以亟需补充相关的试验研究。

声发射技术是一种可以对材料内部损伤进行检测的无损检测方法,可以对受到荷载作用的脆性材料内部裂缝的产生与发展进行实时检测^[16-17]。李建涛等^[18]发现利用声发射事件数、声发射振铃计数等声发射特征参数,可揭示含初始缺陷的立方体混凝土损伤破坏机理。于江等^[19]从声发射波速、能量参数、空间定位分析、损伤演化规律等角度综合评价了不同粗骨料粒径普通混凝土的材料特性。Guo等^[20]通过分析AF和RA值的变化判别不同加载速率下混凝土构件的破坏模式,同时利用声发射b值的变化分析了不同加载速率下混凝土的破坏形式。吴胜兴等^[21]借助声发射特征参数和波形频谱特征对轴拉荷载作用下的混凝土及其组成材料损伤过程进行分析,证实声发射技术有助于解释混凝土的损伤断裂机理。上述研究表明,声发射监测结果能够清晰明了地向研究者展示混凝土内部损伤程度,声发射特征参数能够反映试验所测得的混凝土力学特性,因此本文采用声发射技术获得不同橡胶掺量下混凝土破坏损伤的声发射特性,以便更好地揭示橡胶混凝土的破坏机理。

为确保裂纹扩展在标尺范围内,并能够获得稳定的峰后响应,本文选用带缺口橡胶混凝土试件,通过声发射技术对其展开单轴拉伸破坏试验,研究不同橡胶体积掺量对混凝土断裂性能的影响,并获得不同橡胶掺量混凝土损伤破坏的声发射特性。

1 试验概况

1.1 试验材料

采用标号为P. O42.5的普通硅酸盐水泥,表观密度为 $2\,540\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 的河砂,粗骨料选用最大粒径为20 mm的石灰岩碎石,采用经废弃轮胎切碎加工处理的粒径为2~4 mm、密度为 $1\,060\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 的橡胶颗粒,并掺入水泥质量0.5%的聚羧酸高效减水剂以提高混凝土拌合物的流动性。

1.2 试验准备

选择一种混凝土的配合比作为基准配合比,以等体积橡胶颗粒取代混凝土拌合物中的河砂,橡胶颗粒取代率(橡胶体积掺量,简称橡胶掺量)分别为 0%、5%、10%、15%、20%,得到 5 组不同橡胶掺量的橡胶混凝土配合比,如表 1 所示。

表 1 橡胶混凝土配合比

试件 编号	水灰比	各材料含量/(kg·m ⁻³)					
		水	水泥	河砂	橡胶	碎石	减水剂
C0R	0.45	171	380	819	0.00	1 000	1.9
C5R	0.45	171	380	791	11.64	1 000	1.9
C10R	0.45	171	380	763	23.28	1 000	1.9
C15R	0.45	171	380	735	34.92	1 000	1.9
C20R	0.45	171	380	707	46.56	1 000	1.9

橡胶混凝土试件尺寸为 100 mm×100 mm×400 mm(图 1),试件浇筑完成 24 h 后拆模,置于温度为 20 ℃、湿度 90% 以上的养护室内养护 28 d。试验前用切割机对养护好的混凝土试件进行切割,预制裂缝深度为 10 mm,宽度为 2 mm,每组橡胶混凝土分别成型 2 个棱柱体试件。

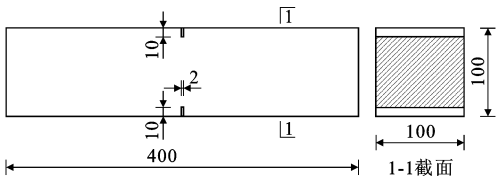


图 1 试件尺寸(单位:mm)

Fig. 1 Specimen Size (Unit:mm)

1.3 单轴拉伸试验

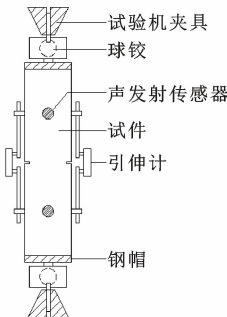
橡胶混凝土单轴拉伸试验采用型号为 MTS322 的液压伺服试验机进行加载。试验装置如图 2 所示。试验前,将自制的与试件等截面大小的钢盘用结构胶粘贴于试件的两端使其成为一个整体。为了使试件能够始终处于轴拉受力状态,使用球铰连接试件与试验机。试件表面固定 3 个标距为 30 mm 的引伸计,分别置于试件的 3 个侧面。试验过程中均以 0.000 6 mm·s⁻¹ 的加载速率对试件进行加载。对不同橡胶掺量混凝土试件分别重复进行 2 次试验。

1.4 声发射试验

本文所有试件的声发射参数均由美国 PAC 公司研制的 8 通道 SAMOSTM 声发射检测系统监测并采集,门槛值设为 35 dB,前置增益为 35 dB,滤波频率为 1~60 kHz。在试件前后表面布置 2 个传感



(a) 实物



(b) 示意图

图 2 试验装置

Fig. 2 Test Device

器,在声发射传感器与试件的接触面上涂抹凡士林,并用松紧带缠绕固定传感器。

2 试验结果与分析

2.1 轴拉力学性能

2.1.1 应力-裂缝张开位移曲线

图 3 为单轴拉伸试验所得到的不同橡胶掺量混凝土的应力-裂缝张开位移($\sigma\delta$)曲线。由图 3 可知,随着橡胶掺量的增加,橡胶混凝土的抗拉强度整体呈下降趋势,峰值裂缝张开位移呈上升趋势。橡胶混凝土峰值荷载和裂缝张开位移及其相较于基准混凝土试件的强度下降率和位移增长率见表 2。从表 2 可以看出:橡胶掺量在 15% 以内时,强度下降率不超过 20%;当橡胶掺量增加至 20% 时,强度发生骤降,下降率达到 35.41%;相比普通混凝土,橡胶掺量大于 10% 时,峰值位移增长率超过 40%。橡胶颗粒是一种弹性材料,其弹性模量较小,强度远低于天然骨料,有较强的变形能力。混凝土失稳荷载降低,一方面是由于橡胶颗粒等体积取代混凝土拌合物中的河砂,使得橡胶混凝土的强度和弹性模量低于基准混凝土,另一方面是由于橡胶属于有机材料,与作为无机材料的混凝土之间的黏结性较差,其与水泥

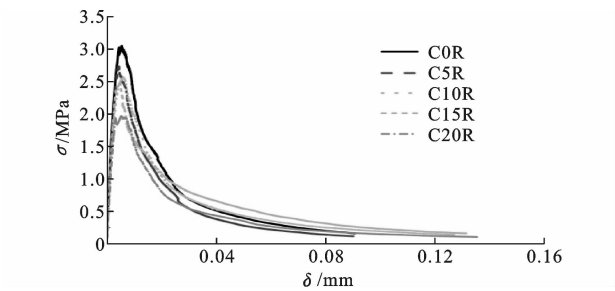


图 3 不同橡胶掺量下混凝土的应力-裂缝张开位移曲线

Fig. 3 σ - δ Curves of Concrete Under Different Rubber Contents

表 2 橡胶混凝土峰值荷载及对应的裂缝张开位移				
Table 2 Peak Loads and Corresponding Crack Opening Displacements of Rubber Concretes				
试件编号	峰值荷载/ MPa	强度下降 率/%	裂缝张开 位移/mm	位移增长 率/%
C0R	3.05	0.00	0.091	0.00
C5R	2.75	9.84	0.090	-1.10
C10R	2.57	15.74	0.127	39.56
C15R	2.50	18.03	0.131	43.90
C20R	1.97	35.41	0.135	48.35

的结合界面易形成薄弱面,从而使橡胶混凝土抵抗裂缝扩展的能力也相应地降低。通过上述试验结果发现,掺入橡胶能起到增加变形能力并降低强度的作用。掺入橡胶的目的是希望既能增加塑性变形能力,又能使强度降低较小。从试验结果看出:橡胶掺量小于 15% 时,变形性能增加不明显;橡胶掺量大于 15% 时,对强度影响较大。综合强度和变形性能来看,橡胶掺量为 15% 时能够发挥橡胶颗粒较好的变形性能,且对强度影响较小。

2.1.2 断裂能

混凝土本构关系中,断裂能是指宏观裂缝开展后混凝土应力-裂缝张开位移曲线下方的面积^[22]。混凝土在拉伸荷载作用下的应力-位移关系可以分为裂缝外混凝土的应力-应变关系(过程区)和裂缝本身的应力-裂缝张开位移关系^[23],如图 4 所示,其中 f_t 为混凝土抗拉强度, G_F 、 G_{F1} 、 G_{F2} 分别为总断裂能、裂缝外断裂能和裂缝本身断裂能, E_0 为混凝土的初始弹性模量, W_0 为临界裂缝张开位移, W 为裂缝张开位移, F 为轴向拉力。峰值前尚未形成宏观裂缝,位移引伸计测得的变形基本由材料弹性变形造成,因此可以用平均应力-应变关系来表示,峰值后宏观裂缝形成,产生应力松弛,此时用位移引伸计测量得到的变形由应变和裂纹的张开造成,可以用应力-裂缝张开位移关系来表示。

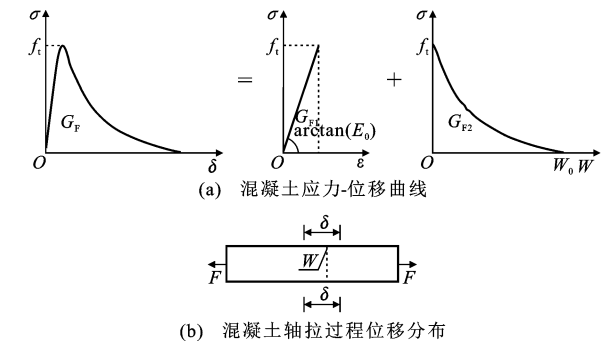


图 4 混凝土应力-位移关系

Fig. 4 Relationship of Concrete Stress-displacement

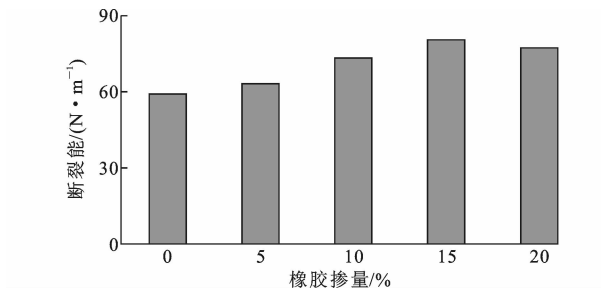


图 5 不同橡胶掺量混凝土断裂能

Fig. 5 Fracture Energies of Concretes with Different Rubber Contents

5 组混凝土试件断裂能如图 5 所示。可以看出,当橡胶掺量在 5%~15% 之间,断裂能随橡胶掺量的增加而增加;橡胶掺量由 15% 上升至 20% 时,断裂能有所减小,但仍然高于基准混凝土的断裂能。断裂能的增加是因为随着橡胶掺量的增加,裂缝扩展断面上橡胶颗粒数目逐渐增多,橡胶混凝土具有增韧减脆的特点,其受力变形后与砂浆界面起到摩擦阻的效果,黏聚力增大,所消耗的能量也增大;橡胶掺量由 15% 上升至 20% 时,断裂能有所减少,可能是由于过多橡胶的掺入使得薄弱界面数量增加,大大削弱了橡胶混凝土的强度。

2.2 声发射信号分析

2.2.1 声发射累计振铃计数和累计撞击次数

声发射振铃计数和撞击次数可以描述混凝土损伤累计的发展过程^[21]。图 6 为荷载、累计振铃计数和累计撞击次数随时间变化曲线。从图 6 可以看出,不同橡胶掺量下,声发射累计振铃计数和累计撞击次数随时间的变化曲线均有 2 个明显的拐点,这 2 个拐点将声发射信号分为 3 个阶段。第 1 个拐点对应于峰值荷载,此后进入到软化阶段,第 2 个拐点出现在峰后的软化阶段,第 1 阶段声发射累计振铃计数和累计撞击次数的增长速率较慢,第 2 阶段声发射累计振铃计数和累计撞击次数的增长速率有着

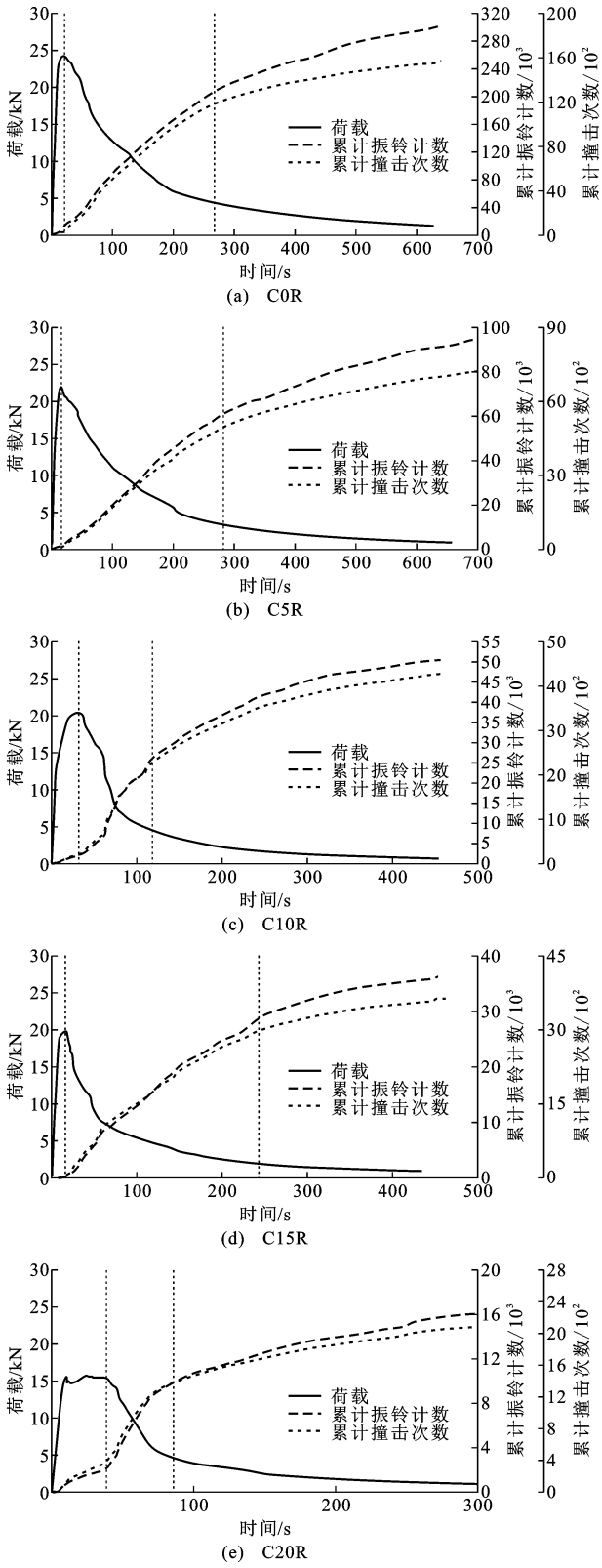


图6 荷载、累计振铃计数和累计撞击次数随时间变化关系曲线

Fig. 6 Relationship Curves of Load, Acoustic Emission Accumulate Counts and Hits Versus Time

显著的提高,第3阶段声发射累计振铃计数和累计撞击次数的增长速率有所减缓。

第1阶段声发射信号开始活跃,声发射累计振铃计数和累计撞击次数增加,表明混凝土微裂缝产生,并在荷载作用下开始扩展,从而在混凝土试件的最低强度区域和局部拉伸区域产生新的微裂缝,并不断发展产生宏观裂缝,当达到峰值荷载时,曲线进入到软化阶段,此时试件还尚未失稳破坏,混凝土试件仍具备一定的承载能力,试件进入裂缝稳定增长区,此时声发射振铃计数和累计撞击次数增长较快,由于混凝土断裂能存在尺寸效应,进入第3阶段,断裂过程区尖端到达试件边界,当断裂过程区尖端与试件边界接触时,断裂能会逐渐减少,此时声发射振铃计数和累计撞击次数的增长速率也随之降低。

此外,由图6还可以看出,随着橡胶掺量的增加,累计振铃计数和累计撞击次数均逐渐减少,说明橡胶的掺入降低了声发射信号的活性。从声发射产生的原因分析,相比天然河砂,橡胶颗粒具有较好的吸收声波和能量的性质,当声发射信号经过橡胶颗粒之后就会产生明显的衰减,降低声发射信号的活性。此外,橡胶颗粒具有较好的吸收变形的能力,在外力作用下,通过自身产生较大的变形吸收能量,可以有效地缓解应力集中现象,阻止裂缝扩展,降低声发射活性和强度。

2.2.2 声发射峰值频率

峰值频率为频率域中振幅最大值点所对应的频率,发射信号高频值对应内部小尺度裂纹的萌生,低频值则对应大裂缝的形成。声发射试验过程中,获得的声发射峰值频率均在0~800 kHz之间,为研究不同橡胶掺量混凝土试件在加载过程中峰值频率的分布规律,将其划分为12个区段,0~550 kHz以50 kHz为间隔划分为11个区段,550~800 kHz为第12区段。图7为不同橡胶掺量混凝土的峰值频率分布图。从图7可以看出,掺入橡胶的混凝土试件的各区段峰值频率分布规律基本一致,其声发射峰值频率信号基本集中在0~50 kHz、100~150 kHz及250~300 kHz区段,而橡胶掺量为0%的混凝土试件的声发射峰值频率信号基本集中在50~150 kHz、250~300 kHz及400~450 kHz。相较于掺入橡胶的橡胶混凝土,橡胶掺量为0%的混凝土峰值频率分布更为分散,该变化表明未加入橡胶的混凝土损伤破坏规律更为复杂,破坏模式更具多样性。从图7还可以发现,橡胶混凝土声发射峰值频率信号主要集中在0~50 kHz,当橡胶掺量为20%时,该频段占比达到70%以上,这表明在橡胶混凝土单轴拉伸破坏过程中,该频段对应橡胶混凝土损

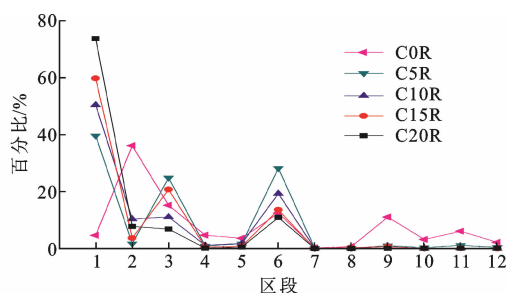


图 7 不同橡胶掺量混凝土声发射峰值频率分布

Fig. 7 Distributions of Acoustic Emission Peak Frequencies of Concretes with Different Rubber Contents

伤破坏中最主要的破坏模式。低频值代表大裂纹的形成,低频值占比越大,试件破坏也越严重。随着橡胶掺量的增加,0~50 kHz 频段占比逐渐增大,250~300 kHz 频段占比逐渐减小,表明随橡胶掺量的增加,橡胶混凝土的破坏逐渐严重,这与橡胶的掺入使混凝土试件的抗拉强度降低有关。

2.2.3 声发射 b 值

最早应用于地震活动水平测量的 b 值(小振幅声发射事件占总声发射事件的比例)已经成为衡量混凝土裂纹扩展的重要参数,通过分析 b 值,能够有效评估混凝土结构中裂纹的发展。声发射 b 值的计算公式^[13]为

$$\lg(N) = a - b \frac{A_{dB}}{2} \quad (1)$$

式中: A_{dB} 为声发射峰值振幅; N 为振幅大于 A_{dB} 的声发射命中次数; a 为经验常数; b 为声发射 b 值。

图 8 为不同橡胶掺量混凝土的声发射 b 值。从图 8 可以看出,b 值均随时间的变化整体呈现波动下降的趋势,峰值荷载过后,b 值均有下降趋势,随后 b 值波动集中,之后趋于分散。b 值的上升表现为微观裂纹的产生,b 值的下降表现为宏观裂纹的形成,因此 b 值在整个过程中的波动行为表明混凝土是在微裂纹不断产生汇聚成宏观裂纹的往复过程中破坏的。到达峰值荷载后,b 值的骤降表明产生的微裂纹已扩展成为宏观裂纹,b 值波动集中且剧烈表明声发射活跃度高,主宏观裂纹正在加速形成,之后 b 值趋于分散表明主裂缝已形成,裂缝扩展剧烈程度趋于平缓。

从图 8 可以看出,橡胶掺量为 0% 的混凝土声发射 b 值下降略慢,在 b 值密度较大阶段可以明显看出曲线有先下降后上升再下降的 2 个下降阶段,随着橡胶掺量的增加,峰值荷载后 b 值的下降速率逐渐加快,2 个下降阶段的划分趋于模糊,说明橡胶

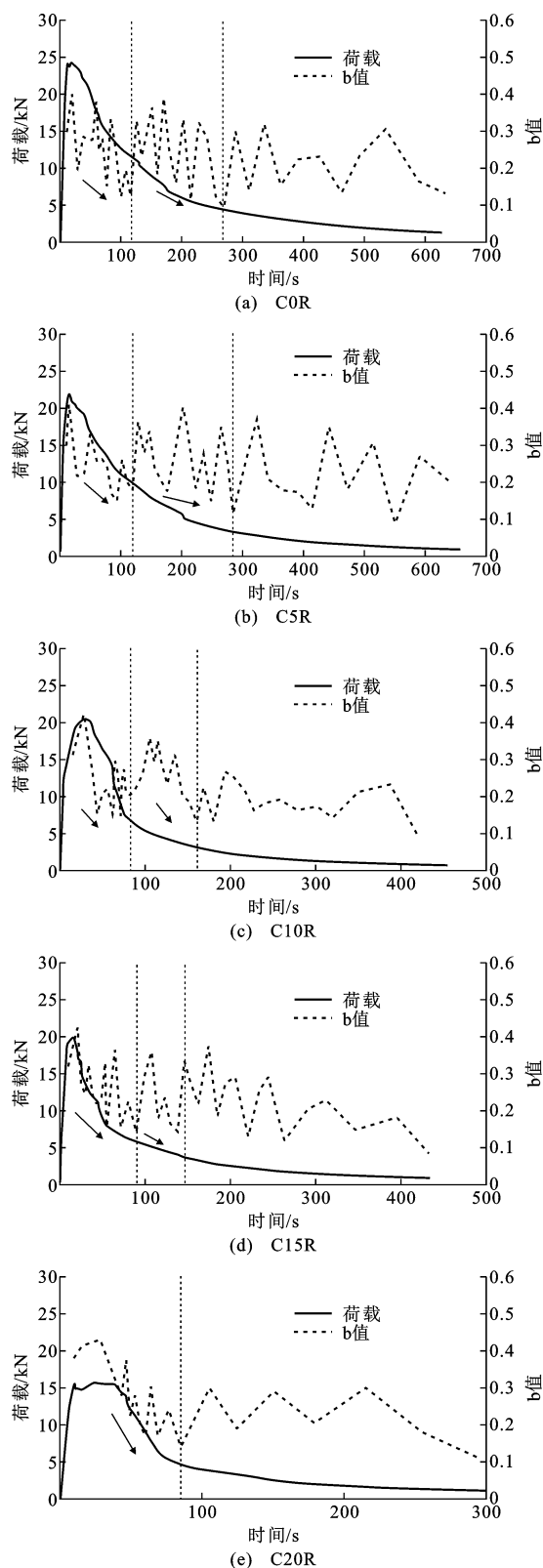


图 8 不同橡胶掺量混凝土声发射 b 值

Fig. 8 Acoustic Emission b-values of Concretes with Different Rubber Contents

掺量越大,混凝土强度越小,试件破坏越容易,主裂纹的形成越迅速,声发射 b 值下降速率也越快。随

着橡胶掺量的增加, b 值呈上升趋势, 这是因为橡胶混凝土的断裂幅度小于橡胶掺量为 0% 的混凝土, 而 b 值在橡胶混凝土中也相对较大。

表 3 为第 1 阶段即主裂纹形成期间 b 值的大小, 从表 3 可以看出, 该阶段 b 值最大值和最小值的差值随着橡胶掺量的增加先减小后增大, 该阶段是混凝土断裂模式从微裂纹向宏观裂纹的转变阶段, b 值的变化说明橡胶掺量的增加能够改善混凝土的断裂性能。橡胶掺量的增加在一定程度上会阻碍裂缝的扩展, 导致峰后承载力及韧性增强。此外, 大量微裂纹在扩展阶段会吸收消耗一部分能量, 导致断裂能增大, 这与之前提及的断裂能变化规律一致。

表 3 第 1 阶段不同橡胶掺量混凝土的声发射 b 值

Table 3 Acoustic Emission b -values of Concretes with Different Rubber Contents in the First Stage

橡胶掺量/%	0	5	10	15	20
b 值最大值	0.399	0.410	0.419	0.425	0.431
b 值最小值	0.094	0.117	0.132	0.142	0.143
b 值差值	0.305	0.293	0.287	0.283	0.288

3 讨 论

本文主要研究橡胶掺量对单轴拉伸荷载下混凝土断裂性能的影响。结果表明, 随着橡胶掺量的增加, 混凝土抗拉强度呈现下降的趋势, 变形能力有所提高, 与文献[12]、[24]~[31]中的研究结果一致。图 9 总结了文献[12]、[24]~[31]中不同橡胶掺量的混凝土强度相对于基准混凝土(橡胶掺量为 0%)的降低情况。从图 9 可以看出, 混凝土各种强度均随着橡胶掺量的增加而降低, 但是由于试验条件和原材料的差异, 研究结果略有不同。总体来看, 橡胶掺量在 40% 以内时, 强度随掺量增加呈现逐渐减小的趋势, 且以 20% 为分界线, 强度降低速率随着掺量的增大而减小。橡胶掺入混凝土的另一个作用是提高其抵抗变形的能力, 橡胶弹性模量较小, 在较小外力作用下会产生较大变形, 能够延缓混凝土裂纹的扩展, 所以橡胶的掺入可以提高混凝土抵抗变形的能力。综上所述, 掺入橡胶颗粒能否起到改善混凝土综合力学性能的作用, 主要取决于两方面: 一是需要有一定数量的橡胶来增强混凝土的韧性, 另一方面, 掺入的橡胶颗粒不致使混凝土强度显著降低。

4 结 语

(1) 随着橡胶掺量的增加, 失稳荷载整体呈现下降趋势, 峰值裂缝张开位移显著增大, 混凝土断裂能

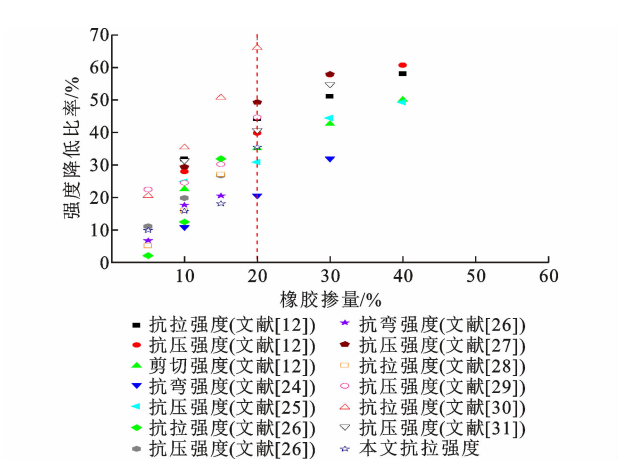


图 9 橡胶混凝土强度降低比率

Fig. 9 Rubber Concrete Strength Reduction Ratios

整体呈增加趋势, 橡胶掺量为 20% 时的混凝土断裂能相对橡胶掺量为 15% 的混凝土断裂能有所减小, 但仍然高于基准混凝土的断裂能。

(2) 声发射累计振铃计数和累计撞击次数描述了混凝土损伤累计发展过程的 3 个阶段, 同时验证了橡胶混凝土断裂破坏过程受“边界效应”的影响。随着橡胶掺量的增加, 边界区域长度减小, 声发射信号的活性降低。

(3) 掺入橡胶的混凝土试件声发射峰值频率分布特征基本一致, 主要集中在 0~50 kHz、100~150 kHz 和 250~300 kHz 三个频段, 相较于基准混凝土试件的声发射峰值频率的频段较低。

(4) 声发射 b 值可以反映混凝土主裂纹快速形成及裂纹稳定扩展直至试件破坏的 2 个阶段, 随着橡胶掺量的增加, b 值有所增大, 主裂纹形成阶段 b 值最大值与最小值之差有所减小, 说明橡胶的掺入可以提高混凝土的断裂性能。

(5) 总结现有研究结果发现, 橡胶掺量在 20% 以内时, 混凝土强度降低速率较快, 掺量超过 20% 时, 强度下降速率减缓。

参考文献:
References:

[1] 庞涛华. 我国轮胎循环利用行业砥砺前行[J]. 中国轮胎资源综合利用, 2019(10):10-15.
PANG Shu-hua. China's Tire Recycling Industry Forge Ahead: Review of the 70th Anniversary Celebration of National Day[J]. China Tire Resources Recycling, 2019(10):10-15.

[2] 赵江霞, 高越青, 梁超锋, 等. 橡胶混凝土动态力学性能研究进展[J]. 混凝土, 2020(8):37-40.
ZHAO Jiang-xia, GAO Yue-qing, LIANG Chao-feng, et al. Research Progress of Dynamic Mechanical Properties of Rubber Concrete[J]. Concrete, 2020(8):37-40.

- et al. Review on the Dynamic Mechanical Properties of Rubber Concrete[J]. Concrete, 2020(8):37-40.
- [3] 曹国瑞,王娟,卿龙邦,等. 橡胶混凝土断裂性能试验研究[J]. 土木建筑与环境工程, 2018, 40(6):91-97.
CAO Guo-rui, WANG Juan, QING Long-bang, et al. Experimental Study on the Fracture Characteristics of Crumb Rubber Concrete[J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2018, 40(6):91-97.
- [4] HUANG X, PANG J Y, LIU G C, et al. The Influence of Equal Amplitude High Stress Repeated Loading on the Mechanical and Deformation Characteristics of Rubber Concrete[J]. Construction and Building Materials, 2021, 266:121135.
- [5] 郝负洪,樊磊,韩燕,等. 冲击荷载作用下橡胶混凝土的损伤研究[J]. 振动与冲击, 2019, 38(17):73-80.
HAO Yun-hong, FAN Lei, HAN Yan, et al. Damage of Rubber Concrete Under Impact Loads[J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(17):73-80.
- [6] 郭琦,崔胜超,仵晗. 橡胶混凝土冻融损伤分析[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2018, 37(7):40-45.
GUO Qi, CUI Sheng-chao, WU Han. Analysis of Damage of Rubber Concrete in Freezing-thawing Circumstance[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2018, 37(7):40-45.
- [7] 李小慧. 纤维橡胶混凝土基本力学及耐久性能研究[J]. 建筑科学, 2016, 32(7):118-122, 137.
LI Xiao-hui. Research on Mechanical Properties and Durability of Fiber-rubber Concrete[J]. Building Science, 2016, 32(7):118-122, 137.
- [8] 周航,陈爱玖,韩小燕,等. 正交法分析玄武岩纤维橡胶再生混凝土的基本性能[J]. 混凝土, 2019(11):74-77, 82.
ZHOU Hang, CHEN Ai-jiu, HAN Xiao-yan, et al. Research on the Basic Properties of Rubber Recycled Concrete with Basalt Fiber by Orthogonal Test[J]. Concrete, 2019(11):74-77, 82.
- [9] 谢建和,李自坚,孙明炜. 硅粉对纤维橡胶再生混凝土抗压性能影响试验[J]. 建筑科学与工程学报, 2016, 33(3):72-77.
XIE Jian-he, LI Zi-jian, SUN Ming-wei. Experiment About Influence of Silica Fume on Compressive Performance of Fiber Reinforced Rubber Recycled Concrete[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2016, 33(3):72-77.
- [10] 袁群,冯凌云,曹宏亮,等. 橡胶混凝土的应力-应变曲线试验[J]. 建筑科学与工程学报, 2013, 30(3):96-100.
YUAN Qun, FENG Ling-yun, CAO Hong-liang, et al. Experiment on Stress-strain Curve of Rubber Concrete[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2013, 30(3):96-100.
- [11] 葛文慧. 废弃橡胶混凝土的力学性能和断裂韧性及抗冻性能[J]. 合成橡胶工业, 2019, 42(6):474-478.
GE Wen-hui. Mechanical Properties, Fracture Toughness and Frost Resistance of Waste Rubber Concrete[J]. China Synthetic Rubber Industry, 2019, 42(6):474-478.
- [12] 胡艳丽,高培伟,李富荣,等. 不同取代率的橡胶混凝土力学性能试验研究[J]. 建筑材料学报, 2020, 23(1):85-92.
HU Yan-li, GAO Pei-wei, LI Fu-rong, et al. Experimental Study on Mechanical Properties of Rubber Concrete with Different Substitution Rates[J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(1):85-92.
- [13] 胡钰泉,胡少伟,黄逸群,等. 不同张口位移速率下带裂缝混凝土轴拉试验研究[J]. 振动与冲击, 2019, 38(2):179-183, 191.
HU Yu-quan, HU Shao-wei, HUANG Yi-qun, et al. Axial Tension Tests of Cracked Concrete Under Different Opening Displacement Rates[J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(2):179-183, 191.
- [14] 范向前,胡少伟,陆俊,等. 不同初始静载混凝土轴向拉伸试验研究[J]. 振动与冲击, 2017, 36(2):83-88.
FAN Xiang-qian, HU Shao-wei, LU Jun, et al. Effects of Initial Static Loads on the Tensile Strength of Concrete[J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(2):83-88.
- [15] 范向前,刘决丁,胡少伟,等. 中央带裂缝混凝土循环拉伸断裂试验 Felicity 效应[J]. 复合材料学报, 2019, 36(12):2968-2974.
FAN Xiang-qian, LIU Jue-ding, HU Shao-wei, et al. Cyclic Tensile Fracture Test of Concrete with Central Crack and Felicity Effect[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2019, 36(12):2968-2974.
- [16] HAN Q H, YANG G, XU J, et al. Acoustic Emission Data Analyses Based on Crumb Rubber Concrete Beam Bending tests[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2019, 210:189-202.
- [17] 林峰,李庶林,薛云亮,等. 混凝土受压过程中声发射数的灰色模型研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2008, 25(3):42-46.

- LIN Feng, LI Shu-lin, XUE Yun-liang, et al. Study of Number of Acoustic Emission with Gray Model in Compression Process of Concrete[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2008, 25(3): 42-46.
- [18] 李建涛, 于江, 秦拥军, 等. 含不同初始缺陷混凝土单轴压缩条件下声发射特性试验研究[J]. 混凝土, 2020(1): 7-10, 14.
- LI Jian-tao, YU Jiang, QIN Yong-jun, et al. Experimental Study on Acoustic Emission Characteristics of Concrete Materials with Different Initial Defects Under Uniaxial Compression[J]. Concrete, 2020(1): 7-10, 14.
- [19] 于江, 袁飞, 秦拥军. 不同骨料粒径混凝土声发射特性分析[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2020, 42(5): 61-66, 94.
- YU Jiang, YUAN Fei, QIN Yong-jun. Analysis of Acoustic Emission Characteristics of Concrete with Different Aggregate Size[J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences), 2020, 42(5): 61-66, 94.
- [20] GUO Y Z, CHEN X D, YANG H Q, et al. Experimental Study on Direct Tension Behavior of Concrete Through Combined Digital Image Correlation and Acoustic Emission Techniques[J]. Structural Concrete, 2019, 20(6): 2042-2055.
- [21] 吴胜兴, 王岩, 沈德建. 混凝土及其组成材料轴拉损伤过程声发射特性试验研究[J]. 土木工程学报, 2009, 42(7): 21-27.
- WU Sheng-xing, WANG Yan, SHEN De-jian. Experimental Study on Acoustic Emission Characteristics of the Damage Process of Concrete and Its Components Under Uniaxial Tension[J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 42(7): 21-27.
- [22] DEL VISO J R, CARMONA J R, RUIZ G. Shape and Size Effects on the Compressive Strength of High-strength Concrete[J]. Cement and Concrete Research, 2008, 38(3): 386-395.
- [23] HORDIJK D A. Local Approach to Fatigue of Concrete[D]. Delft: Delft University of Technology, 1991.
- [24] ABOUHUSSIEN A A, HASSAN A A A. Classification of Damage in Self-consolidating Rubberized Concrete Using Acoustic Emission Intensity Analysis[J]. Ultrasonics, 2020, 100: 105999.
- [25] FENG W H, LIU F, YANG F, et al. Compressive Behaviour and Fragment Size Distribution Model for Failure Mode Prediction of Rubber Concrete Under Impact Loads[J]. Construction and Building Materials, 2021, 273: 121767.
- [26] ZHANG J H, CHEN C L, LI X J, et al. Dynamic Mechanical Properties of Self-compacting Rubberized Concrete Under High Strain Rates[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2021, 33(2): 04020458.
- [27] RIDGLEY K E, ABOUHUSSIEN A A, HASSAN A A A, et al. Evaluation of Abrasion Resistance of Self-consolidating Rubberized Concrete by Acoustic Emission Analysis[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2018, 30(8): 04018196.
- [28] MING P, LU J, CAI X, et al. Analysis of the Crack Evolution Process in Crumb Rubber Concrete Based on Acoustic Emission Technology[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2020, 24(7): 2088-2098.
- [29] HUANG X, PANG J Y, LIU G C, et al. The Influence of Equal Amplitude High Stress Repeated Loading on the Mechanical and Deformation Characteristics of Rubber Concrete[J]. Construction and Building Materials, 2021, 266: 121135.
- [30] 薛刚, 孙立所, 刘佳香, 等. 橡胶混凝土弯曲疲劳性能研究[J]. 长江科学院院报, 2021, 38(11): 149-156.
- XUE Gang, SUN Li-suo, LIU Jia-xiang, et al. Flexural Fatigue Performance of Rubber Concrete[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2021, 38(11): 149-156.
- [31] 陈徐东, 黄业博, 陈晨. 橡胶自密实混凝土断裂性能及声发射特征[J]. 建筑材料学报, 2021, 24(4): 758-765.
- CHEN Xu-dong, HUANG Ye-bo, CHEN Chen. Fracture Properties and Acoustic Emission Characteristics of Rubber Self-compacting Concrete[J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(4): 758-765.