

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20221314

动态三轴压缩下混凝土的能量演化规律

雷 宇, 彭 刚, 王乾峰, 徐媛媛

(三峡大学土木与建筑学院, 湖北 宜昌 443002)

摘要: 为探究复杂应力状态下混凝土变形破坏过程中的能量演化规律、揭示混凝土变形破坏的本质特征, 利用静动力三轴仪进行不同应变速率(10^{-5} 、 10^{-4} 、 10^{-3} 、 10^{-2} /s)与不同侧向围压下(4.5、6.0、9.0、12.0 MPa)的混凝土三轴动态力学试验, 研究了动态三轴压缩下混凝土的总能量密度、弹性应变能密度和耗散能密度随轴向应变的演化规律, 进一步分析了应变速率和侧向围压对混凝土能量演化规律的影响。结果表明, 随轴向变形的增加, 混凝土的总能量密度和耗散能密度呈非线性增加, 弹性应变能密度先增大后减小。应变速率和侧向围压的增大均提高了混凝土的单位储能极限, 且混凝土的储能极限表现出较强的速率敏感性; 储能极限与侧向围压近似呈线性关系; 随侧向围压的增大, 混凝土储能极限的速率敏感性呈降低趋势。

关键词: 混凝土; 三轴压缩; 应变速率; 能量演化

中图分类号: TV431; TU528

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)04-0151-04

1 引言

能量演化贯穿混凝土的整个变形破坏过程。ZENG S J 等^[1]发现侧向围压会影响混凝土的速率效应, 围压越大其速率效应越不明显; ZHOU R H 等^[2]分析了轴向应变、围压和强度等级对混凝土能量演化规律的影响; 王普等^[3]研究了混凝土在动态双轴压缩过程中能量的演化规律; 柳琪等^[4]研究了混凝土在单轴循环加卸载条件下, 冻融循环及加卸载次数对三种能量特征值的影响; 赵茗等^[5]研究了在压剪破坏过程中混凝土的能量演化规律; 谢和平等^[6, 7]揭示了岩石在变形过程中的能量耗散和释放原理; 张志镇等^[8]研究了围压对岩石能量演化特性的影响。从目前的研究成果来看, 考虑到地震作用对混凝土变形破坏过程中能量演化规律影响的研究较少, 从能量角度分析材料的动力特性主要集中在岩石领域。为此, 本文分析了考虑动态荷载作用和复杂应力状态对混凝土变形破坏过程中能量演化特性的影响规律, 以为复杂应力状态下混凝土建筑物的安全使用提供参考。

2 试验步骤及能量计算方法

2.1 试验设备

试验中所用到的加载装置为 10 MN 大型多功能液压伺服静动力三轴仪。该加载装置主要由 EDC 控制系统、计算机数据采集系统、液压油泵和加载框架等四个主要装置构成。

2.2 试件制备及试验步骤

试验采用 C30 混凝土试件, 试件尺寸为 150 mm 立方体, 水泥型号为 P. O 32.5 普通硅酸盐水泥; 混凝土试件所用碎石粒径为 5~40 mm, 小石粒径为 5~20 mm, 中石粒径为 20~40 mm, 选用自来水进行试验拌和。混凝土配合比为 0.50 : 1.00 : 2.04 : 1.58 : 2.38 (水 : 水泥 : 砂 : 小石 : 中石)。试验中水、水泥、砂、小石、中石材料分别为 81.0、162.0、330.5、256.6、384.9 kg/m³。混凝土制备过程中, 采用二次投料的方法。将搅拌完成后的混凝土倒入事先准备好的模具中, 放在振捣台上振捣, 试件表面进行抹平处理。在混凝土试件硬化成型后, 在标准条件下养护直至进行加载试验。

试验步骤为: ①调整竖向传力柱的位置使试

收稿日期: 2022-06-24, **修回日期:** 2022-08-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(51579139)

作者简介: 雷宇(1997-), 男, 硕士研究生, 研究方向为混凝土材料动力性能, E-mail: 1906083996@qq.com

通讯作者: 彭刚(1963-), 男, 博士、教授、博导, 研究方向为混凝土材料动力性能, E-mail: gpeng158@126.com

件与加载板至对中;②打开计算机数据采集系统,检查采样间隔和水平变向计是否正确;③对试件施加竖向、两个侧向预加载至 15 kN;④施加围压(4.5、6.0、9.0、12.0 MPa)并保持恒定;⑤根据预先设定的应变速率进行加载直至试件完全破坏;⑥试验加载完成后,保存试验所得数据并清理现场。

2.3 能量计算方法

设混凝土变形破坏过程中热量未与外界进行能量交换,则外力做功所产生的总能量由弹性应变能和耗散能两部分组成^[7],即:

$$U = U_e + U_d \tag{1}$$

其中
$$U_e = [\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\nu(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_1\sigma_3)] / (2E) \tag{2}$$

$$U_d = U - U_e \tag{3}$$

式中, U 为单位体积混凝土吸收的总能量; U_e 为单位体积混凝土内部所储存的弹性应变能; U_d 为单位体积混凝土变形破坏过程中所耗散的能量; σ_1 、 σ_2 、 σ_3 分别为第一、二、三主应力; E 为混凝土的割线模量^[9]; ν 为泊松比。

3 结果与分析

3.1 混凝土能量演化规律的速率效应

3.1.1 应变速率对弹性能密度的影响

利用本文能量计算方法,计算在加载速率 10^{-5} 、 10^{-4} 、 10^{-3} 、 10^{-2} /s 与不同侧向围压 4.5、6.0、9.0、12.0 MPa 下混凝土中的总能量、弹性应变能密度和耗散能密度。以侧向围压 4.5、9.0 MPa 为例,得到三轴压缩过程中混凝土在不同应变速率下的总能量密度、弹性应变能密度和耗散能密度的演化曲线,见图 1、2。为直观反映应变速率对弹性能密度的影响,得出相同侧向围压、不同应变速率下混凝土内部的弹性应变能密度演化曲线,见图 3。

由图 1~3 可看出,在曲线的峰前阶段,应变速率越大,弹性应变能密度曲线的斜率也越大。在峰后破坏阶段,随应变速率的增加,弹性应变能密度曲线斜率有增加的趋势,表明应变速率的增加会加快混凝土内部弹性应变能的释放,从而使混凝土在高应变速率下表现出更明显的脆性破坏特征。总的来说,在能量演化曲线的峰前阶段,应变速率的增加提高了弹性能应变能积聚的速率,而峰后阶段则加快了弹性应变能释放的速率。分析其原因在于在加载过程中,应变速率越大,通过试验机做功输入混凝土中的机械能转化为弹性应变能的效率也越大。随应变速率的增加,混凝土

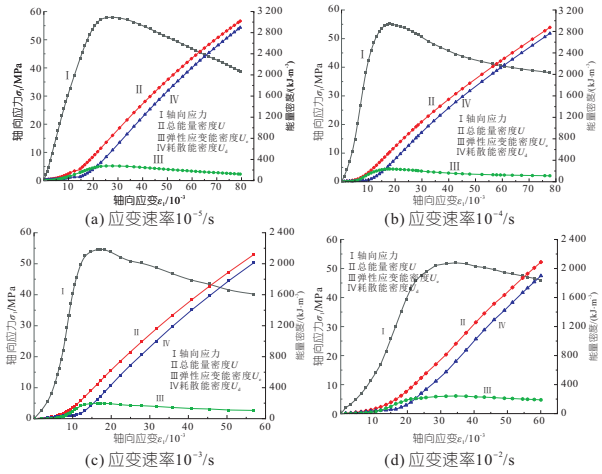


图 1 混凝土在侧向围压为 4.5 MPa 时不同应变速率下的动态能量演化曲线

Fig. 1 Dynamic energy evolution curve of concrete when the lateral confining pressure is 4.5 MPa

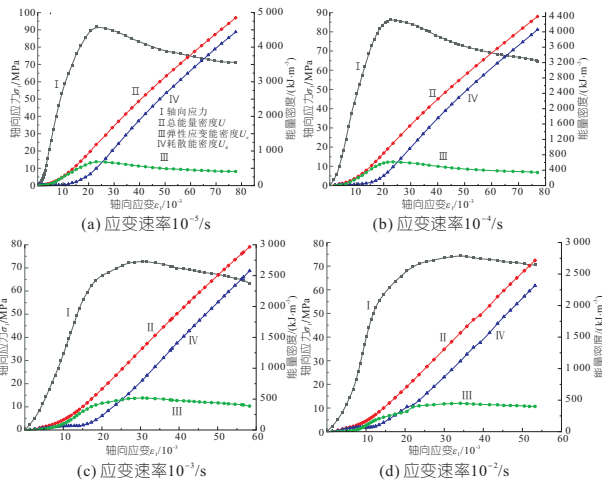


图 2 混凝土在侧向围压为 9.0 MPa 时不同应变速率下的动态能量演化曲线

Fig. 2 Dynamic energy evolution curve of concrete when the lateral confining pressure is 9.0 MPa

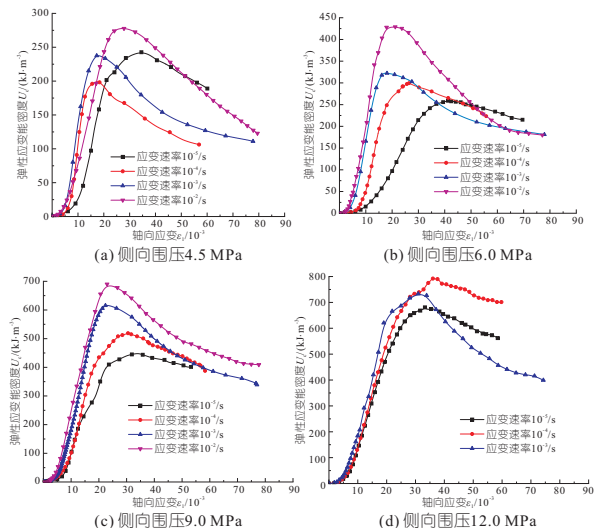


图 3 混凝土不同应变速率下的弹性应变能密度演化曲线

Fig. 3 Evolution curve of elastic strain energy density of concrete at different strain rates

内部裂纹会沿着最短破坏路径发展,导致弹性应变能的释放更加迅速。

定义弹性应变能密度的峰值为混凝土的储能极限,绘制出混凝土储能极限随应变速率的变化图,见图 4。由图 4 可看出,混凝土的单位储能极限具有明显的速率效应。究其原因因为混凝土进入屈服阶段后继续将输入的能量转化为弹性应变能储存起来,混凝土积聚弹性应变能的速率也有所提高,混凝土的储能极限也就越大。当应变速率为 $10^{-2}/s$ 时,与相较于准静态加载相比,侧向围压分别为 4.5、6.0、9.0 MPa 时混凝土弹性应变能储能极限增幅分别为 14.45%、65.65%、53.64%;当应变速率从 $10^{-5}/s$ 增至 $10^{-3}/s$ 时,侧向围压为 12.0 MPa 储能极限的增幅仅为 7.66%。高侧向围压下混凝土的储能极限增幅较在低侧向围压下更为平缓,表明较高的侧向围压会降低混凝土单位储能极限的速率效应敏感性。

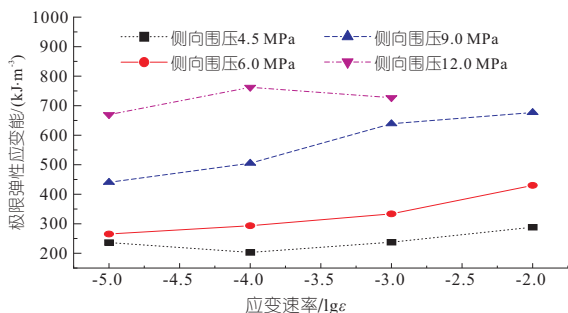


图 4 混凝土单位储能极限随应变速率的变化图

Fig. 4 Variation of concrete unit energy storage limit with strain rate

3.1.2 应变速率对耗能特征的影响

在相同侧向围压作用下混凝土在达到峰值应力点对应的耗散能密度值随应变速率的变化趋势见图 5。

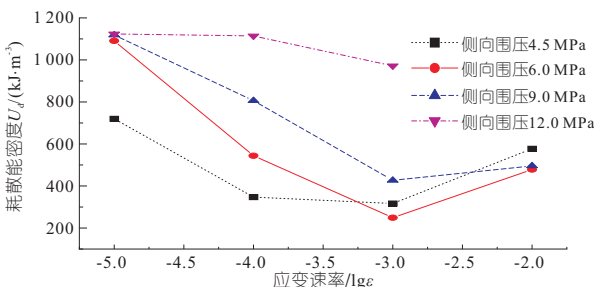


图 5 混凝土的耗散能密度随应变速率的变化

Fig. 5 Dissipative energy density of concrete as a function of strain rate

由图 5 可看出,在侧向围压为 4.5~9.0 MPa 范围内,同一侧向围压作用下,轴向峰值应力处混凝土的耗散能密度随应变速率的增加呈先减小后增大的变化趋势;当侧向围压为 12.0 MPa 时,耗散能密度值随应变速率的增大整体呈减小趋势。

另外,准静态应变速率加载时($10^{-5}/s$)混凝土的耗散能密度值远大于动态荷载作用下所对应的耗散能密度值。分析其原因为准静态加载速率时混凝土的峰值应变较大,导致该过程中的耗散能不断累积增加。而当应变速率从 $10^{-3}/s$ 增至 $10^{-2}/s$ 时,侧应力对混凝土破坏的抑制作用高于混凝土初始损伤所表现的劣化作用,抑制了混凝土内部裂纹的发育及扩展,进而导致其破坏时需消耗更多的能量。

3.2 混凝土能量演化规律的围压效应

在相同应变速率、不同侧向围压下的弹性应变能密度随轴向变形增加的演化曲线见图 6。

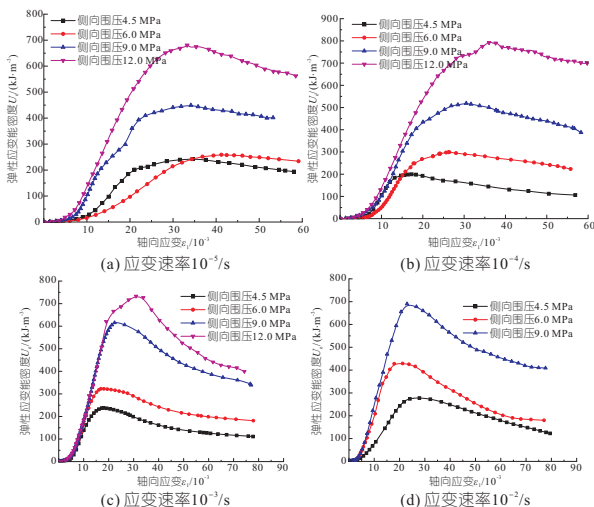


图 6 混凝土在相同应变速率时不同侧向围压下的弹性应变能变化规律

Fig. 6 Variation law of elastic strain energy of concrete under different lateral confining pressures

由图 6 可看出,相同应变速率、不同侧向围压作用下的混凝土弹性应变能密度随轴向变形的增加呈先增大后减小的趋势。在混凝土破坏前侧向围压值越大,混凝土的弹性应变能密度曲线随轴向变形的增长速率越快。相同应变速率时,混凝土的储能极限随侧向围压的增大而增大,表明混凝土的储能极限表现出明显的围压效应。

图 7 为不同应变速率下混凝土的储能极限随侧向围压的变化规律。由图 7 可看出,混凝土的储能极限随侧向围压的增加近似呈线性增加关系,用下式对试验数据进行拟合:

$$U_e^d = a\sigma_3^1 + b \quad (4)$$

式中, U_e^d 为动态极限弹性能密度; σ_3^1 为侧向围压大小; a 、 b 均为材料参数。

拟合参数见表 1。由表 1 可看出,不同应变速率下的拟合相关性系数均在 0.98 以上,可见混凝土的单位储能极限与侧向围压之间满足良好的线性关系。

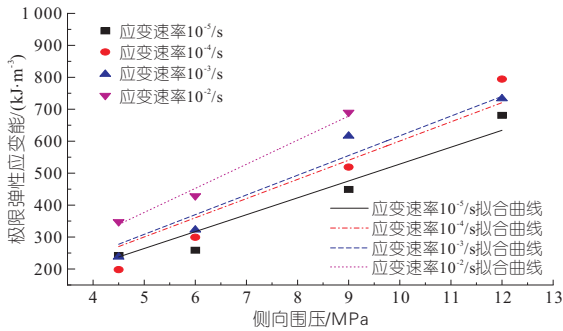


图 7 混凝土单位储能极限随侧向围压值的变化

Fig. 7 Variation of concrete unit energy storage limit with lateral confining pressure

表 1 不同应变速率下储能极限拟合参数值与相关性系数
Tab. 1 Fitting parameter values and correlation coefficients of energy storage limit at different strain rates

应变速率/ s^{-1}	a	b	R^2	应变速率/ s^{-1}	a	b	R^2
10^{-5}	98.87	52.84	0.99	10^{-3}	99.40	61.69	0.99
10^{-4}	113.15	60.05	0.98	10^{-2}	110.93	75.40	0.99

4 结论

a. 在弹性能密度演化曲线的峰前阶段, 应变速率的增加提高了弹性能应变能积聚的速率, 而在峰后阶段则加快了弹性应变能释放的速率。应变速率的增加会加快混凝土内部弹性应变能的释放。

b. 较高的侧向围压会降低混凝土单位储能极限的速率效应敏感性。在整个加载过程中, 混凝土的总能量密度和耗散能密度随轴向应变的增大呈非线性增加的变化趋势, 弹性应变能密度先增大后减小。

c. 在混凝土破坏前侧向围压值越大, 混凝土的弹性应变能密度曲线随轴向变形的增长速率越快。混凝土的储能极限随着侧向围压的增加近似呈线性增加关系。

参考文献:

[1] ZENG S J, REN X D, LI J. Triaxial behavior of concrete subjected to dynamic compression [J]. Journal of structural engineering, 2013, 139(9): 1582-1592.

[2] ZHOU R H, CHENG H, LI M J. Energy evolution analysis and brittleness evaluation of high-strength concrete considering the whole failure process [J]. Crystals, 2020, 12(10): 1099-1114.

[3] 王普, 陈灯红, 彭刚, 等. 基于能量法的混凝土循环加卸载动态损伤特性 [J]. 水利水电技术, 2020, 51(2): 192-197.

[4] 柳琪, 彭刚, 徐童淋, 等. 冻融劣化混凝土循环加卸载外包络线及能量演化 [J]. 水利水运工程学报, 2017(6): 85-91.

[5] 赵茗, 彭刚, 王普, 等. 压剪破坏过程中混凝土的储能规律 [J]. 水电能源科学, 2022, 40(5): 139-142.

[6] 谢和平, 彭瑞东, 鞠杨. 岩石变形破坏过程中的能量耗散分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2004(21): 3565-3570.

[7] 谢和平, 鞠杨, 黎立云. 基于能量耗散与释放原理的岩石强度与整体破坏准则 [J]. 岩石力学与工程学报, 2005(17): 3003-3010.

[8] 张志镇, 高峰. 受载岩石能量演化的围压效应研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(1): 1-11.

[9] 吴家龙. 弹性力学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2011.

Energy Evolution Law of Concrete Under Dynamic Triaxial Compression

LEI Yu, PENG Gang, WANG Qian-feng, XU Yuan-yuan

(College of Civil Engineering and Architecture, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: A static dynamic triaxial instrument was used to carry out concrete triaxial dynamic mechanical tests by setting different strain rates ($10^{-5}/s$, $10^{-4}/s$, $10^{-3}/s$, $10^{-2}/s$) and different lateral confining pressures (4.5 MPa, 6.0 MPa, 9.0 MPa and 12 MPa). The evolution law of the total energy density, elastic strain energy density and dissipated energy density of concrete with axial strain under dynamic triaxial compression was studied. The influence of lateral confining pressure and strain rate on the energy evolution law of concrete was analyzed. The results show that with the increase of axial deformation, the total energy density and dissipated energy density of concrete increase nonlinearly, and the elastic strain energy density first increases and then decreases. The increase of strain rate and lateral confining pressure improves the specific energy storage limit of concrete, and the energy storage limit of concrete shows a strong rate sensitivity; The relationship of energy storage limit and the lateral confining pressure is approximately linear; With increase of the lateral confining pressure, the rate sensitivity of the concrete energy storage limit shows a decreasing trend.

Key words: concrete; triaxial compression; strain rate; energy evolution