

蒸压加气混凝土动态力学性能与损伤模型

王小兵¹, 张传达¹, 高 健¹, 甘元楠², 纪云锋²

(1. 河南洛宁抽水蓄能有限公司, 洛阳 471000; 2. 中国安能集团第二工程局有限公司, 南昌 330096)

摘要: 为探究粉煤灰基蒸压加气混凝土动态力学性能和损伤本构模型, 通过制备不同强度级别和干密度等级的圆柱形试件, 并利用单轴抗压试验机进行不同应变速率下的轴向压缩试验。结果表明: 蒸压加气混凝土在各应变速率下的破坏模式主要为纵向劈裂和剪切破坏, 其力学性能与应变速率紧密相关; 在高应变速率下, 材料的峰值应力增加而峰值应变减少, 显示出材料脆性的增强; 随着应变速率的增加, 蒸压加气混凝土的能量耗散能力提升, 显示出其在动态加载下具有较好的能量吸收特性。其中, A5.0 B06 级蒸压加气混凝土的能量耗散能力最强, 而 A3.5 B05 级最弱。基于 Weibull 分布的损伤本构模型能有效地预测蒸压加气混凝土的应力-应变关系, 尤其在高应变速率下与试验数据的吻合度较高。

关键词: 蒸压加气混凝土; 应变速率; 力学性能; 损伤本构模型; Weibull 分布

中图分类号: X773 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2026) 02-0048-07

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2026.02.008

Dynamic Mechanical Properties and Damage Model of Autoclaved Aerated Concrete

WANG Xiaobing¹, ZHANG Chuanda¹, GAO Jian¹, GAN Yuannan², JI Yunfeng²

(1. Henan Luoning Pumped Storage Co., Ltd., Luoyang 471000, China;

2. China Anneng Group Second Engineering Bureau Co., Ltd., Nanchang 330096, China)

Abstract: To investigate the dynamic mechanical properties and damage constitutive model of fly ash-based autoclaved aerated concrete (AAC), cylindrical specimens with varying strength grades and dry densities were prepared. Axial compression tests were conducted using a uniaxial compression testing machine at different strain rates. The results indicate that the failure modes of AAC under various strain rates primarily involve longitudinal splitting and shear failure. The mechanical properties of AAC are closely related to strain rates; at higher strain rates, the peak stress increases while the peak strain decreases, indicating enhanced material brittleness. Additionally, the energy dissipation capacity of AAC improves with increasing strain rates, demonstrating good energy absorption characteristics under dynamic loading. Among the tested samples, A5.0 B06 exhibited the highest energy dissipation capacity, while A3.5 B05 showed the lowest. The damage constitutive model based on Weibull distribution effectively predicts the stress-strain relationship of AAC, with particularly high agreement with experimental data at high strain rates.

Key words: autoclaved aerated concrete; strain rate; mechanical properties; damage constitutive model; Weibull distribution

作者简介: 王小兵 (1988—), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 混凝土材料研究。

通信作者: 张传达 (1997—), 男, 本科, 助理工程师, 研究方向: 混凝土材料研究。

收稿日期: 2024-12-02

0 引言

随着建筑技术的不断发展,对建筑材料的综合性能要求越来越高,尤其是在抗震、节能和环保方面^[1]。蒸压加气混凝土(Autoclaved Aerated Concrete, AAC)作为一种轻质多孔的硅酸盐建筑材料,因其优异的保温隔热性能、良好的耐火性能以及较高的强度质量比,被广泛应用于建筑领域^[2]。然而, AAC 在实际工程中可能承受复杂荷载作用,特别是在地震荷载作用下,其力学性能和损伤特性的研究尤为重要。

近年来,研究主要集中在利用不同固体废弃物制成的 AAC 的物理性能以及静态荷载下的力学性能。刘凤利等^[3]通过使用电石渣作为钙质材料,研究了聚羧酸减水剂掺量对 AAC 的料浆流动性、干密度、孔隙率、孔径分布以及对抗压强度的影响;薛文浩等^[4]则通过使用生物质炉渣作为主要原料,对比了两种主流燃烧工艺产生的炉渣对 AAC 制品力学性能影响;陈永亮等^[5]研究了砖混建筑垃圾作为主要原料制备 AAC,探讨了废弃混凝土、废弃黏土砖及其复配掺量对 AAC 干密度和抗压强度的影响;Liu 等^[6]利用砂岩煤矸石粉替代粉煤灰作为硅质原料生产 AAC,研究了钙硅比对砂岩煤矸石基 AAC 和粉煤灰基 AAC 浆料物理性能与力学性能的影响;Dong 等^[7]研究了以高辐射赤泥替代 30% 粉煤灰制备 AAC 的耐久性、孔结构和微观结构;Chen 等^[8]则利用砖混再生砂粉作为硅质材料制备 AAC,研究了砖混再生砂粉含量、细度、砖混比、水泥用量和钙硅比对 AAC 性能的影响。

尽管已有大量研究关注不同固体废弃物制 AAC 的力学性能,充分展现了 AAC 在节能和环保方面的优势,但关于其抗震性能的研究相对较少。特别是在动态荷载作用下,即不同应变速率下,对 AAC 的轴压力学性能和本构模型的研究较为有限。与静态荷载作用相比,混凝土材料在地震等动态荷载作用下的力学性能存在显著差异,这些差异与应变速率存在着密切联系^[9]。目前在不同应变速率下对其他混凝土材料的力学性能和本构模型的研究则较为丰富。王攀峰等^[10]开展了不同应变速率下橡胶混凝土的轴压试验,研究了混凝土细骨料的橡胶颗粒体积替换

率和应变速率对橡胶混凝土力学性能的影响规律;关隹等^[11]利用声发射技术,研究了不同水泥取代率、不同水胶比下矸石基混凝土轴心受压时的力学性能和损伤演化规律,并提出了矸石基混凝土轴心受压时的本构关系;张金等^[12]利用大小可控的球形高吸水性树脂(SAP)与水泥基制成 SAP 多孔混凝土,对其进行一维应变加载,探究了 SAP 多孔混凝土静态力学性能及耗能特性,并建立了基于 SAP 多孔混凝土密度的损伤本构模型;张青天等^[13]考虑贝壳含量、龄期等因素,对不同加载应变率下的海水海砂再生混凝土试件开展了单轴受压应力-应变曲线试验,并提出了适用于中低应变率($10^{-5} \sim 10^{-1} \text{ s}^{-1}$)下海水海砂再生混凝土受压动力本构模型;Zhang 等^[14]研究了模拟酸雨环境下,受压应力混凝土在不同应变率下的力学性能;Ke 等^[15]通过在自密实混凝土中加入橡胶制备自密实橡胶混凝土,并对两种粒径的自密实橡胶混凝土在不同应变率下进行了单轴压缩试验,研究了应变率和橡胶含量对混凝土动态力学性能的影响;Bai 等^[16]研究了不同应变速率下硅灰含量分别为 0、5%、9% 的再生骨料混凝土单轴压缩力学性能,并基于统计损伤本构模型,从细观角度分析了再生骨料混凝土的损伤和破坏机理。

综上,目前关于不同应变率下的混凝土材料力学性能和本构模型研究较为成熟,但针对 AAC 的研究还相对较少。因此,通过对三种不同等级的 AAC 进行不同应变速率下的轴压试验,获得不同应变速率下 AAC 的应力-应变关系曲线和峰值应力等力学性能的影响规律,构建并验证不同应变速率下的基于 Weibull 分布的 AAC 损伤本构模型,为 AAC 的工程抗震应用提供参考。

1 试验

1.1 试验材料

试件选取强度级别为 A3.5、A5.0,干密度为 B05、B06、B07 级 AAC,采直径 50 mm、高 100 mm 的圆柱形试件。试件均由工厂生产而成,原材料配比见表 1。采用普通硅酸盐水泥,强度等级为 42.5 MPa;石灰采用消化速度为 9 min,消化温度为 88 ℃ 生石灰,采用普通硅砂,无夹杂物, SiO₂ 含量为 83%;石膏主要成分为 CaSO₄,含量为 95%;铝

材料科学

粉为 GLS-70 水剂性铝粉膏，活性铝含量为 92%。试件采用车床加工成圆柱形，直径和圆柱度公差小于 0.1 mm。

表 1 试件原材料配比

Table 1 Mix proportion of raw materials for specimens /%					
级别	水泥	石灰	砂	石膏	铝粉
A3.5 B05	15	10	68.10	6	0.90
A3.5 B06	14	11	68.15	6	0.85
A5.0 B06	13	12	68.20	6	0.80

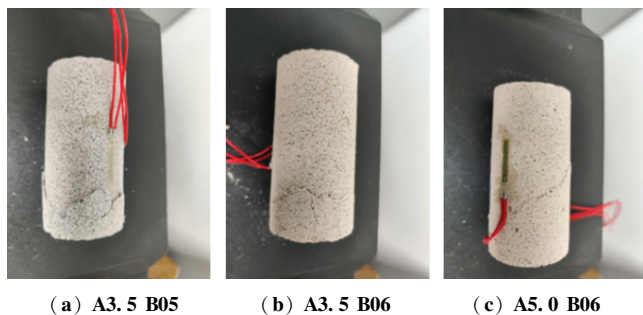
1.2 试验方法

试验采用单轴抗压试验机对三种 AAC 试件进行轴向压缩，加载方式采用轴向位移控制。为了模拟地震荷载对材料的影响，试验选定地震荷载作用范围内的应变速率量级，分别为 10^{-5} 、 10^{-4} 、 10^{-3} 、 10^{-2} s^{-1} 。应变速率 10^{-5} s^{-1} 定义为准静态应变速率，所测的峰值应力定义为准静态峰值应力，所测的峰值应变定义为准静态峰值应变。为获得准确的变形数据，在试件侧面中间位置粘贴纵向应变片，并在其对面粘贴横向应变片，通过应变片测量试件加载过程中的变形情况。在试验开始前，确保试验机的承压面轻轻接触试件，且无预载作用，然后启动试验程序。试验开始后，试件在轴压作用下发生变形，当试件发生破坏时，立即停止试验。每种 AAC 试件在相同的应变速率下均进行两次重复试验。

2 试验结果与分析

2.1 破坏形态

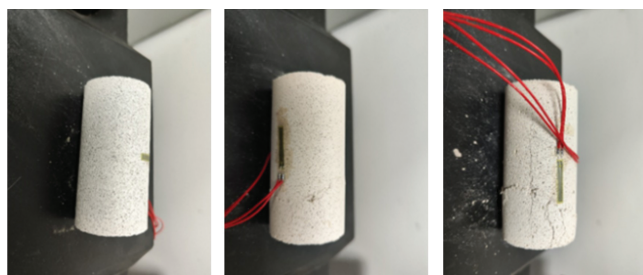
不同加载速率下的 AAC 试件的典型破坏形态如图 1、2、3、4 所示。AAC 试件受压破坏多呈现纵向劈裂破坏和剪切破坏，这种破坏形态与 AAC 的细观结构密切相关。AAC 主要由气孔和基质材料构成，形成一种蜂窝状结构。当孔壁结构受到压应力作用时，这种结构有助于应力的传递和分散，从而具有一定的强度。然而，当孔壁结构受到拉应力作用时，孔壁之间的薄弱环节易成为破坏的起点，产生微裂纹，并最终引起材料破坏。此外，在 AAC 加载试验过程中，试件的破坏过程通常呈现出明显的脆性特征。这种脆性破坏在发生时，往往能够听到清晰而干脆的劈裂声。



(a) A3.5 B05 (b) A3.5 B06 (c) A5.0 B06

图 1 加载速率 10^{-5} s^{-1} 的试件破坏形态

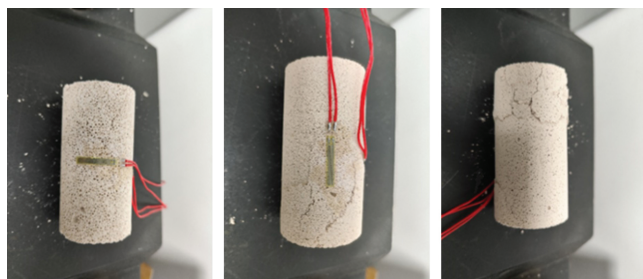
Fig. 1 Damage pattern of specimen with loading rate 10^{-5} s^{-1}



(a) A3.5 B05 (b) A3.5 B06 (c) A5.0 B06

图 2 加载速率 10^{-4} s^{-1} 的试件破坏形态

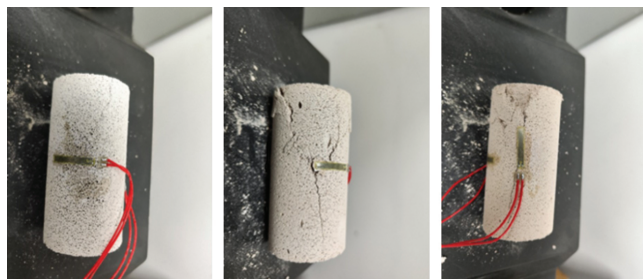
Fig. 2 Damage pattern of specimen with loading rate 10^{-4} s^{-1}



(a) A3.5 B05 (b) A3.5 B06 (c) A5.0 B06

图 3 加载速率 5×10^{-3} s^{-1} 的试件破坏形态

Fig. 3 Damage pattern of specimen with loading rate 10^{-3} s^{-1}



(a) A3.5 B05 (b) A3.5 B06 (c) A5.0 B06

图 4 加载速率 10^{-2} s^{-1} 的试件破坏形态

Fig. 4 Damage pattern of specimen with loading rate 10^{-2} s^{-1}

2.2 应力-应变曲线

应力-应变曲线是分析材料力学性能的重要工具，它直观地反映了材料在受力过程中的应力与应变关系，并为研究材料损伤特性提供了基础。不同

应变速率的三种不同等级 AAC 的应力 - 应变曲线如图 5 所示。AAC 应力应变曲线均呈现出三个典型的阶段：线性段、非线性段、破化段。当 AAC 的强度越高，应变速率越大时，曲线的线性段上升越快，相应的破坏段也下降更快。此外，当应变速率为

10^{-5} s^{-1} 时，曲线在加载初期表现出一个压实阶段。这一现象表明，在较慢的应变速率条件下，随着应力的增加，较低强度 AAC 内部的孔隙体积减小，从而变得更紧实。

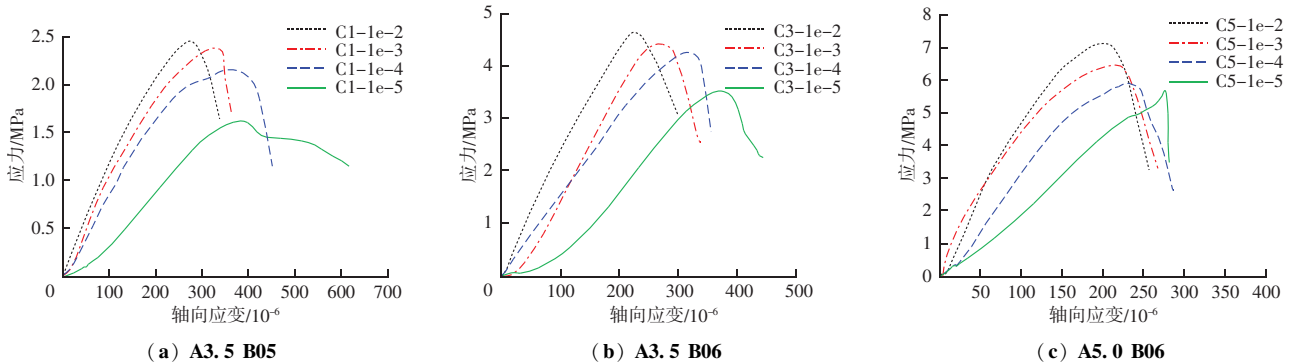


图 5 蒸压加气混凝土应力 - 应变曲线
Fig. 5 Stress - strain curve of autoclaved aerated concrete

2.3 峰值应力和峰值应变

峰值应力与峰值应变不仅是依据应力 - 应变曲线详细衡量 AAC 抗压强度与变形特性的关键指标，同时也反应了 AAC 在压缩过程中的损伤程度。不同应变速率的三种不同等级 AAC 的峰值应力与峰值应变变化规律如图 6、7 所示，其中横坐标 $\lg(\varepsilon/\varepsilon_0)$ 表示应变速率 ε 与准静态应变速率 ε_0 比值的对数。

图 6 显示了 AAC 的等级不同，其峰值应力不同，具体表现为 A3.5 B05 级的峰值应力最低，其次是 A3.5 B06 级，A5.0 B06 最高。这是因为 AAC 强度等级越高，基体强度越高，干密度等级越高，其孔隙更小且数量更少。随着应变率的提高，即应变速率分别为 10^{-4} 、 10^{-3} 、 10^{-2} s^{-1} 时，A3.5 B05 级的峰值应力较其准静态峰值应力分别提升了 33.5%、47.2%、52.2%；而 A3.5 B06 级的提升幅度为 20.2%、23.6%、

31.5%；A3.5 B05 级的提升幅度为 4.5%、11.4%、22.1%。这表明应变速率显著影响了 AAC 的强度表现，其原因是当应变速率较高时，材料响应行为滞后，限制了孔隙中的微裂纹扩展与合并，从而提高了强度。

图 7 则显示了强度最低的 A3.5 B05 级的峰值应变最高，其次是 A3.5 B06 级，最低是 A5.0 B06，这反映出 AAC 的强度越高，越表现出脆性特征。随着应变速率的增加，不同等级 AAC 的峰值应变均有所降低。当应变速率分别为 10^{-4} 、 10^{-3} 、 10^{-2} s^{-1} 时，A3.5 B05 级的峰值应变较其准静态峰值应变分别降低了 4.5%、15.4%、29.5%；而 A3.5 B06 级的降低幅度为 12.5%、28.0%、39.0%；A3.5 B05 级的降低幅度为 14.8%、21.4%、28.1%。这表明，在较低应变速率下，AAC 会经历更充分的变形和裂纹扩展。

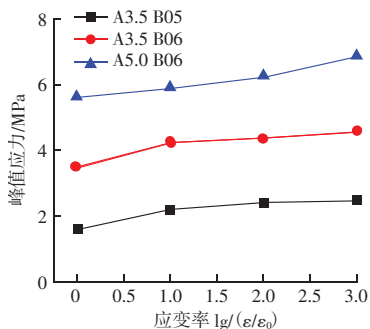


图 6 峰值应力与应变速率的关系

Fig. 6 The relationship between peak stress and strain rate

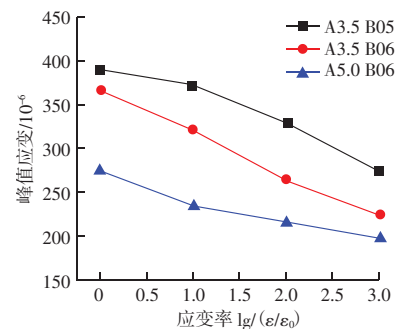


图 7 峰值应变与应变速率的关系

Fig. 7 The relationship between strain and strain rate

材料科学

2.4 耗能分析

耗能特性是评价多孔混凝土力学性能的重要指标,其孔隙结构在受压时通过收缩、压实和裂纹扩展来吸收能量。AAC 耗能特性可以通过在加载过程中荷载-位移曲线的面积来计算,公式为:

$$W = \int_0^{F_{\max}} F(s) d_s \quad (1)$$

式中: W 为耗散的能量; F_{\max} 为加载过程中的最大荷载; $F(s)$ 为荷载位移曲线; s 为试件在加载过程中的位移; d_s 为试件位移的微小增量。

从图 8 中可知,不同等级 AAC 表现出不同的耗能能力,其抗压强度越高,吸收的能量会越多。当应变速率分别为准静态应变速率 10^{-5} 、 10^{-4} 、 10^{-3} 、 10^{-2} s^{-1} 下, A3.5 B06 级分别耗散的能量较 A3.5 B05 级分别增加了 72.2%、50.6%、21.6%、43.6%; A5.0 B06 级耗散的能量较 A3.5 B05 级分别增加了 134.5%、56.9%、90.8%、109.2%。此外,在不同的应变速率下,随着应变速率的增加,其耗散的能量也有所增加。

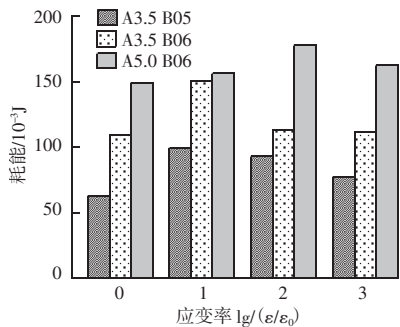


图 8 不同应变速率下蒸压加气混凝土试件吸收的能量

Fig. 8 Energy absorbed by autoclaved aerated concrete specimens at different strain rates

3 不同应变速率的蒸压加气混凝土损伤本构模型

3.1 基于 Weibull 分布的本构模型

AAC 在受力过程中,损伤和裂纹的形成与发展通常沿着材料内部的孔隙扩展。因此,可以将 AAC 中的微元体视为空心的薄壁球体,这些球体共同构成了材料的细观结构基础。损伤变量是损伤力学中的核心概念,它能够有效地描述混凝土从初始损伤状态直至最终破坏的连续过程。假定微元体强度及其损伤行为遵循 Weibull 分布,其概率密度函

数为:

$$f(x; m, F_0) = \frac{m}{F_0} \left(\frac{x}{F_0} \right)^{m-1} e^{-\left(\frac{x}{F_0} \right)^m} \quad (2)$$

式中: m 为形状参数,且 $m > 0$; F_0 为尺度参数,且 $F_0 > 0$ 。

根据 Lemaitre 的应变等效理论,认为应力作用在受损材料上引起的应变与有效应力作用在无损材料上引起的应变是等价的^[17]。因此, AAC 的损伤本构关系可推导为:

$$\sigma = E(1 - D)\varepsilon \quad (3)$$

式中: σ 、 E 、 D 、 ε 分别为有效应力、弹性模量、应变及损伤变量。

结合式 (2) 和式 (3) 可得, AAC 的损伤本构模型关系式为:

$$\sigma = E\varepsilon e^{-\left(\frac{\varepsilon}{F_0} \right)^m} \quad (4)$$

3.2 参数计算与模型验证

应力-应变曲线在峰值应变处,应力达到最大值,且曲线斜率为 0。这两个边界条件可以用来确定参数 m 和尺度参数 F_0 。利用图 6、7 中数据,计算结果见表 2、3。

表 2 形状参数 m 计算结果

应变速率	10^{-5} s^{-1}	10^{-4} s^{-1}	10^{-3} s^{-1}	10^{-2} s^{-1}
A3.5 B05	3.915 25	5.373 58	8.440 21	6.575 83
A3.5 B06	16.616 83	17.866 45	13.392 98	5.638 37
A5.0 B06	306.846 00	8.820 10	4.791 65	7.303 80

表 3 分布参数 F_0 计算结果

应变速率	10^{-5} s^{-1}	10^{-4} s^{-1}	10^{-3} s^{-1}	10^{-2} s^{-1}
A3.5 B05	625.441 74	451.102 96	385.323 56	349.167 85
A3.5 B06	451.874 40	363.738 83	339.801 68	308.704 34
A5.0 B06	281.298 00	280.932 46	257.627 48	249.380 24

从图 9 可知,损伤本构模型在预测应力-应变关系方面与试验数据高度吻合,尤其是在高应变速率条件下尤为一致。然而,在低应变速率条件下,受材料压实阶段的影响,模型预测准确性略有下降。这表明模型能有效反映 AAC 在高应变速率下的动态力学响应,而在模拟低应变速率下时 AAC 的渐进损伤过程则需要进一步优化。

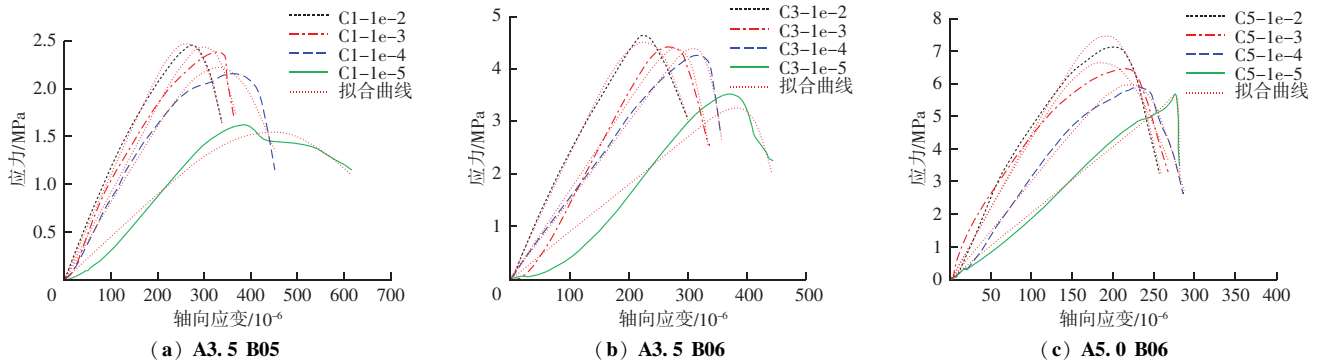


图9 模型结果与试验结果对比

Fig. 9 Comparison of model results with experimental results

4 结论

通过开展不同应变速率下三种强度等级蒸压加气混凝土试件的轴压试验, 获取其应力-应变响应特征及关键力学参数变化规律, 并在此基础上建立了基于 Weibull 分布的损伤本构模型, 对模型进行了验证与分析。得出结论如下:

(1) 蒸压加气混凝土在不同应变速率下主要呈现出纵向剪切破坏模式, 但其力学性能与应变速率紧密相关。在高应变速率下, 材料峰值应力增大, 峰值应变减小, 表现出脆性增强的特征。在强度方面, A5.0 B06 级蒸压加气混凝土的峰值应力最高, 其次是 A3.5 B06 级, 而 A3.5 B05 级的峰值应力最低。

(2) 蒸压加气混凝土的能量耗散能力随应变速率的增加而提高, 表明其在动态加载条件下具有较好的能量吸收特性, 其中 A5.0 B06 级的能量耗散能力最强, A3.5 B05 最弱。这一特性对于设计抗震结构和评估其在地震等动态荷载下的性能具有一定意义。

(3) 基于 Weibull 分布的损伤本构模型能够有效预测蒸压加气混凝土的应力-应变关系, 尤其在高应变速率下与试验数据吻合度高, 但在低应变速率下需要进一步优化以考虑初始加载时的压实效应的影响。

参考文献

[1] MICHELINI E, FERRETTI D, MICCOLI L, et al. Autoclaved aerated concrete masonry for energy efficient buildings: State of the art and future developments [J]. Construction and Building

Materials, 2023, 402: 132996.

- [2] CHEN G, LI F, GENG J, et al. Identification, generation of autoclaved aerated concrete pore structure and simulation of its influence on thermal conductivity [J]. Construction and Building Materials, 2021, 294: 123572.
- [3] 刘凤利, 侯孔超, 刘俊华, 等. 减水剂改性固废基蒸压加气混凝土的制备与性能研究 [J]. 功能材料, 2024, 55 (5): 5169-5176.
- [4] 薛文浩, 蹇守卫, 李宝栋, 等. 不同生物质炉渣对蒸压加气混凝土浆料性能与力学性能的影响 [J]. 硅酸盐通报, 2024, 43 (3): 987-994.
- [5] 陈永亮, 成亮, 陈铁军, 等. 砖混建筑垃圾制备蒸压加气混凝土性能及水化机理 [J]. 材料导报, 2024, 38 (12): 122-127.
- [6] LIU K, SHEN C, WANG Y, et al. The performance of autoclaved aerated concrete prepared by arenaceous rock coal gangue powder instead of fly ash: the effect of Cas⁻¹i ratio [J]. Construction and Building Materials, 2024, 441: 137495.
- [7] DONG M, RUAN S, ZHAN S, et al. Utilization of red mud with high radiation for preparation of autoclaved aerated concrete (AAC): performances and microstructural analysis [J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 347: 131293.
- [8] CHEN X, GUO Y, GONG T, et al. Study on preparation and performance of brick-concrete recycled sand powder autoclaved aerated concrete [J]. Journal of Building Engineering, 2024, 91: 109671.
- [9] GAN L, LIU Y, ZHANG Z, et al. Experimental investigation of the dynamic mechanical properties of concrete under different strain rates and cyclic loading [J]. Case Studies in Construction Materials, 2024, 20: e02750.
- [10] 王攀峰, 曹玉贵, 邓晓光, 等. 不同应变速率下橡胶混凝土损伤本构模型 [J]. 硅酸盐通报, 2022, 41 (6): 1912-1919.
- [11] 关虢, 余洁, 邱继生, 等. 矽石基混凝土轴心受压声发射特性与损伤本构模型 [J]. 西安科技大学学报, 2024, 44 (3): 543-552.
- [12] 张金, 肖定军, 林谋金, 等. 高吸水性树脂多孔混凝土静态力学特性与损伤本构模型 [J]. 新型建筑材料, 2023, 50 (4): 50-55.

研究与应用

抗震承载力计算的准确性,为砌体结构抗震性能评估提供了可靠的技术支撑。

参 考 文 献

- [1] 郭磊,刘继斌.多孔砖砌体强度试验对比分析[J].河南建材,2009,4(55):85-87.
- [2] 喻云龙,陈慧,刘伟.老旧砖混结构房屋检测鉴定中若干问题的讨论[J].江苏建筑,2022,(3):93-96,136.
- [3] 喻云龙,李世宏,喻洪,等.既有老旧房屋砂浆及砌体强度现场试验研究[J].建筑结构,2019,49(5):23-26,43.
- [4] 成金阁,宋明志.既有砌体结构耐久性鉴定研究和必要性[J].内江科技,2024,45(7):107-108.
- [5] 刘兴远,谢华,封承九.砌体工程现场检测数据分析探讨[J].重庆建筑,2012,11(5):26-29.
- [6] 林文修.砌体工程现场强度检测技术及应用[J].建筑科学,2002,(2):43-45.
- [7] 姜宏安,陈磊,孙德永.原位轴压法在砌体强度检测中的应用[J].煤炭工程,2004,(5):43-44.
- [8] 张威.测定房屋砌体强度的原位轴压法[J].工程技术,2012,9:249.
- [9] 张涛.原位轴压法检测砌体抗压强度在建筑工程中的应用和探讨[J].四川建筑科学研究院,2006,(1):91-93.
- [10] 丁智潮,王立.烧结黏土多孔砖砌体原位轴压法试验研究[J].建筑结构,2011,41(增刊2):477-479.
- [11] 周雪枫,杨珑.贯入回弹法与原味轴压法检测既有老旧砌体强度对比分析[J].江西建材,2022,(1):45-47.
- [12] GB 50003—2011,砌体结构设计规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2011.
- [13] 吴乐乐,唐曹明,罗开海,等.既有低强度砂浆砖砌体结构的抗震性能指标研究[J].建筑结构,2025,55(16):133-139.
- [14] 朱奇云.上海多层砌体住宅结构特征及抗震措施分析[J].建筑结构,2025,55(1):59-65.
- [15] 陈淑圆.既有多层砖混结构抗震鉴定及加固处理分析[J].安徽建筑,2023,30(6):153-154,173.
- [16] 李运富,张宏伟,马博,等.砌体结构轴心受压和原位轴压试验声发射信号参数特征分析[J].工业建筑,2023,53(2):8-11.
- [13] 张青天,张凯建.海水海砂再生混凝土受压动力本构模型[J].建筑材料学报,2024,27(7):580-588,610.
- [14] ZHANG Y, ZHUANG S, QU M, et al. Experimental Study on compressive behavior of compressive stress - loaded concrete at different strain rates under simulated acid rain environment [J]. Journal of Building Engineering, 2024: 110584.
- [15] KE X, CHEN Z, YE C, et al. Dynamic uniaxial compression properties of self - compacting rubber concrete subjected to different strain rates [J]. Magazine of Concrete Research, 2024: 1-16.
- [16] BAI W, SHEN J, GUAN J, et al. Study on compressive mechanical properties of recycled aggregate concrete with silica fume at different strain rates [J]. Materials Today Communications, 2022, 31: 103444.
- [17] 王攀峰,曹玉贵,邓晓光,等.不同应变速率下橡胶混凝土损伤本构模型[J].硅酸盐通报,2022,41(6):1912-1919.

(上接第 53 页)