

引用格式:毕志远,徐佳翔,阮世华,等.不同应变率加载条件下石墨烯混凝土的抗压性能[J].大连海事大学学报,2026,52(1):134-142.

不同应变率加载条件下石墨烯混凝土的抗压性能

毕志远¹,徐佳翔²,阮世华^{*3},吴清鹏⁴

(1.威海智慧谷投资运营有限公司,山东威海 264500;2.西咸新区沣西新城管理委员会,西安 710000;

3.威海畅市政工程有限公司,山东威海 264200;4.哈尔滨工业大学(威海)土木工程系,山东威海 264209)

摘要:为提升混凝土在动荷载作用下的力学性能,探讨纳米材料对其的增强效应,以掺入0.05%石墨烯的混凝土为对象,开展动态单轴抗压性能研究。采用5种应变率水平(10^{-5} s^{-1} 、 10^{-4} s^{-1} 、 10^{-3} s^{-1} 、 $5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 、 10^{-2} s^{-1}),分别对石墨烯混凝土和普通混凝土进行单轴抗压性能试验与有限元模拟,进而对比分析了两类混凝土的动态力学性能差异及其应变率效应。试验结果表明:两种混凝土的抗压强度与弹性模量均具有显著的应变率敏感性,且随应变率的提高而增大;石墨烯混凝土的性能提升幅度随应变率变化而存在差异;相比普通混凝土,石墨烯混凝土的抗压强度、弹性模量、峰值应变和吸能能力的最大提升幅度分别为16.17%、5.02%、7.27%和20.20%。有限元数值模拟结果与试验测试结果吻合良好,验证了模拟方法的有效性。该研究可为石墨烯纳米材料在混凝土工程中的应用提供理论支撑与技术参考。

关键词:石墨烯混凝土;应变率;抗压性能

中图分类号:TU528.01

文献标志码:A

文章编号:1006-7736(2026)01-0134-09

doi:10.16411/j.cnki.issn1006-7736.2026.01.013

Compressive performance of graphene concrete under different strain rate loading conditions

BI Zhiyuan¹, XU Jiexiang², RUAN Shihua^{*3}, WU Qingpeng⁴

(1. Weihai Smart Valley Investment and Operation Co., Ltd, Weihai 264500, China; 2. Xixian New Area Fengxi New City Management Committee, Xi'an 710000, China;

3. Weichang Municipal Engineering Co., Ltd, Weihai 264200, China; 4. Department of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology (Weihai), Weihai 264209, China)

收稿日期:2025-11-12;修回日期:2026-01-06

基金项目:山东省自然科学基金资助项目(ZR2023ME179)

作者简介:毕志远(1984—),男,高级工程师, E-mail: bizhiyuan330@126.com; 阮世华*(1972—),男,高级工程师, E-mail: 15662320599@163.com

Abstract: To enhance the mechanical performance of concrete under dynamic loading and investigate the reinforcing effect of nanomaterials, a study was conducted on the dynamic uniaxial compressive performance of concrete mixed with 0.05% graphene. Uniaxial compressive performance tests and finite element simulations were conducted on graphene concrete and ordinary concrete by using five different strain rate levels (10^{-5} s^{-1} , 10^{-4} s^{-1} , 10^{-3} s^{-1} , $5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$, and 10^{-2} s^{-1}), and the differences in dynamic mechanical properties and strain rate effects between the two types of concrete were compared and analyzed. The experimental results show that the compressive strength and elastic modulus of both types of concrete have significant strain rate sensitivity, and increase with the increase of strain rate. The performance improvement of graphene concrete varies with strain rate. Compared to ordinary concrete, the maximum increase in compressive strength, elastic modulus, peak strain, and energy absorption capacity of graphene concrete is 16.17%, 5.02%, 7.27%, and 20.20%, respectively. The finite element numerical simulation results are in good agreement with the experimental test results, verifying the effectiveness of the simulation method. This study can provide theoretical support and technical reference for the application of graphene nanomaterials in concrete engineering.

Key words: graphene concrete; strain rate; compressive performance

0 引言

近年来,随着国民经济的持续快速发展,大型

混凝土建筑结构在交通、水利、建筑等领域的应用日益广泛,对混凝土的力学性能尤其是动态力学性能提出了更高要求。在实际服役过程中,混凝土结构常受到水动力、车辆荷载、地震荷载、冲击荷载及爆炸荷载等多种动荷载的作用,其动态力学性能直接决定了结构的服役安全与耐久性。因此,探究混凝土动态力学性能的提升方法,已成为当前土木工程领域亟待解决的重要研究课题之一。

为定向改善混凝土的特定功能或力学性能,在混凝土配合比设计阶段,通常需掺入适量的外加剂与矿物掺合料。石墨烯作为一种由碳原子构成的二维晶体,是目前已知最薄的材料,其拉伸强度高达 130 GPa,约为最优钢材的 100 倍^[1]。石墨烯不仅硬度超过金刚石,还具备优异的韧性,可作为增强剂应用于新型高强度复合材料的制备,在航空航天、化工、建筑材料等领域展现出广阔的应用前景^[2]。已有研究表明,将石墨烯作为纳米材料掺入水泥基材料中,可在微观层面改善其内部结构,进而优化材料的宏观性能^[3]。基于此,在混凝土材料领域,通常将掺入水泥质量 0.02%~0.10% 的石墨烯,且能通过其填充、桥接、调控水化等纳米效应显著提升综合性能的水泥基复合材料,称为石墨烯混凝土。这一命名的核心,在于强调石墨烯发挥了区别于惰性掺合料的结构性增强作用。加拿大某矿产公司与以色列本·古里安大学的联合测试结果表明,石墨烯混凝土具有凝结时间短、综合性能优异等特点,不仅可减少混凝土的总用量,还具备显著的环保效益^[4]。现有研究显示,无论采用何种掺加方式,氧化石墨烯均能有效提升混凝土的各项性能^[5]。在 C30 混凝土体系中,当水灰比为 0.6、石墨烯掺量为 0.05% 时,材料的性能改善效果达到最佳^[6]。

混凝土在承受不同形式的荷载作用时,其强度、刚度及延性(或脆性)等力学特性往往表现出显著的应变率相关性。Watstein^[7]对两种不同强度等级的混凝土圆柱体试件开展了应变率范围为 $10^{-6} \text{ s}^{-1} \sim 10 \text{ s}^{-1}$ 的单轴抗压试验,结果表明,试件的抗压强度较准静态条件下提升了 80% 以上。Atchley 等^[8]在 $5 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1} \sim 5 \text{ s}^{-1}$ 的应变率范围内,对三种不同强度等级的混凝土开展单轴抗压试验,结果发现,混凝土的抗压强度随加载速率的提

高而增大,且在不同应变率区间内,强度增幅存在显著差异。胡时胜等^[9]在应变率为 $10 \text{ s}^{-1} \sim 85 \text{ s}^{-1}$ 的冲击压缩实验中发现,混凝土的抗压强度具有显著的应变率敏感性。张玉敏^[10]的研究进一步表明,随着应变率的提高,混凝土的峰值应力呈上升趋势,而其弹性模量与泊松比的变化则不显著。在实际动荷载作用下,建筑结构不同部位的应变率变化规律复杂,因此需开展更为精确的动态特性分析。对掺量为 0.05% 的石墨烯混凝土,开展不同应变率下抗压强度、弹性模量等力学特性的深入研究,将有助于精准掌握其动态力学性能,为石墨烯混凝土的动力设计与工程评价提供可靠依据。同时,推动石墨烯混凝土的工程化应用,也是混凝土材料向绿色环保方向转型的重要实践路径。

1 试验研究

1.1 试验材料

本试验采用 C30 强度等级的混凝土,制备尺寸为 100 mm×100 mm×100 mm 的立方体试件。水泥为普通硅酸盐水泥(P·O42.5),砂子为细度模数为 2.8 的中砂,石子为最大粒径为 25 mm 的岩石颗粒,水为试验室普通自来水;石墨烯纳米片选用山东威海云山科技有限公司生产的石墨烯滤饼,其微片厚度为 8~12 μm,片径为 5~10 μm。混凝土的详细配合比参数见表 1。

表 1 混凝土配合比参数

Tab.1 Mix proportion parameters of concrete		
是否添加 石墨烯	每组混凝土配合比 (水:水泥:砂子: 石子:石墨烯)	每组混凝土材料用量/kg (体积按 1L 计算)
0%石墨烯	1:1.67:3.44:5.60:0	0.205:0.342:0.705: 1.149:0
0.05%石墨烯	1:1.670:3.440: 5.600:0.059	0.205 000:0.342 000: 0.705 000:1.149 000: 0.000 059

1.2 试块制作

试验用混凝土试块分为两组:一组为不含石墨烯的普通混凝土试块,另一组为石墨烯掺量为水泥质量 0.05% 的石墨烯混凝土试块;每组各制作 15 块试件,分两批成型。测得混凝土坍落度满足预设要求后,将拌合物装入预先涂刷脱模剂的塑料模具,置于振动台上振捣成型;静置 24 h 后

拆模,随即放入标准养护箱中养护。养护参数依据相关规范设定为温度 $20\text{ }^{\circ}\text{C}\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度 $\geq 95\%$ 、养护龄期为 28 d。

1.3 试验方法及过程

两种混凝土试块分别分组,每组 3 个试件,每种混凝土各 5 组,共计 10 组。采用位移控制模式,对两种混凝土试块开展不同应变率下的动态单轴抗压试验;选取的应变率水平依次为 10^{-5} s^{-1} 、 10^{-4} s^{-1} 、 10^{-3} s^{-1} 、 $5\times 10^{-3}\text{ s}^{-1}$ 、 10^{-2} s^{-1} ,对应的位移控制条件分别为 0.06 mm/min 、 0.6 mm/min 、 6 mm/min 、 30 mm/min 、 60 mm/min ,其中, 10^{-5} s^{-1} 下的试验设定为拟静态抗压试验。

2 结果分析与讨论

2.1 应力-应变曲线

图 1 为不同应变率加载条件下普通混凝土的应力-应变曲线。图 2 为不同应变率加载条件下石墨烯混凝土的应力-应变曲线。

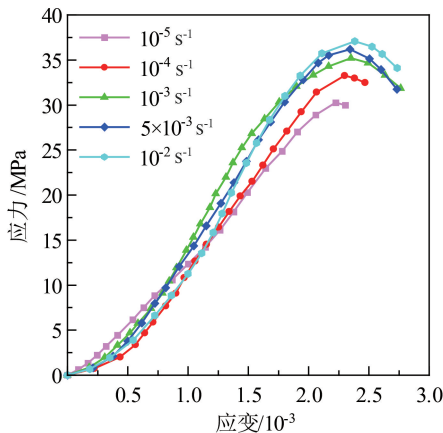


图 1 不同应变率加载条件下普通混凝土的应力-应变曲线

Fig.1 Stress-strain curves of ordinary concrete under different strain rate loading conditions

以 10^{-5} s^{-1} 作为拟静态应变率。对比不同应变率加载条件下混凝土的应力-应变曲线可知,不同应变率下混凝土的应力-应变曲线变化趋势基本一致,表明动态荷载作用下混凝土变形特性的演化规律与静态荷载作用下的变形特性规律基本相同。此外,随着应变率的增大,普通混凝土与石墨烯混凝土的抗压强度均呈现显著提升趋势,其应力-应变曲线上上升段的斜率也有所增大。由此可见,混凝土的抗压强度、弹性模量等力学性能指

标均具有明显的应变率效应,这与目前多数相关研究的结论一致^[7-8, 11]。

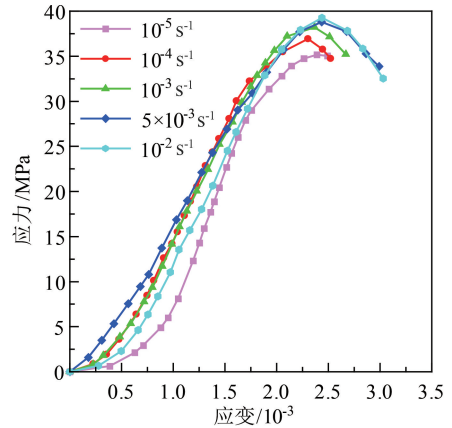


图 2 不同应变率加载条件下石墨烯混凝土的应力-应变曲线

Fig.2 Stress-strain curves of graphene concrete under different strain rate loading conditions

2.2 抗压强度

图 3 为相同应变率加载条件下,普通混凝土与石墨烯混凝土的抗压强度对比曲线。由图 3 可知,随着应变率的增大,两种混凝土的抗压强度均呈上升趋势,且该趋势逐渐趋于平缓。在相同应变率加载条件下,0.05%石墨烯混凝土的抗压强度始终高于普通混凝土。经计算可知,在应变率依次为 10^{-5} s^{-1} 、 10^{-4} s^{-1} 、 10^{-3} s^{-1} 、 $5\times 10^{-3}\text{ s}^{-1}$ 和 10^{-2} s^{-1} 的条件下,0.05%石墨烯混凝土的抗压强度相较普通混凝土分别提高了 16.17%、10.81%、8.52%、7.18% 和 5.93%。由此可见,0.05% 掺量的

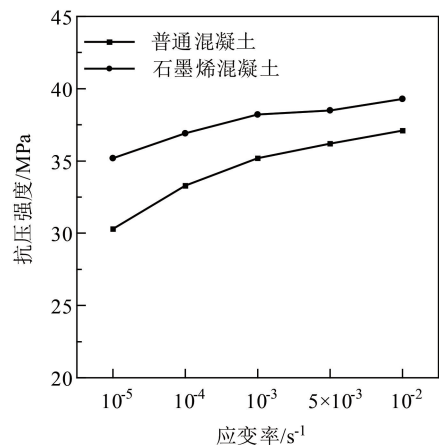


图 3 普通混凝土与石墨烯混凝土的抗压强度比较
Fig.3 Comparison of compressive strength between ordinary concrete and graphene concrete

石墨烯对提升混凝土抗压强度具有显著作用,但随着应变率的增大,其对混凝土强度的提升幅度呈逐渐降低的趋势。

当混凝土发生破坏时,若应变率较高,其内部产生的微裂缝来不及充分扩展,进而产生损伤迟滞效应,因此,混凝土的抗压强度会显著高于静态条件下的强度。石墨烯的加入能够提升混凝土强度,其增强机理源于多尺度的共同作用。在微观尺度下,石墨烯纳米片凭借其巨大的比表面积与表面活性,不仅能物理填充水泥水化产物间的纳米级孔隙,更能作为非均相成核位点,促进水化硅酸钙(C-S-H)凝胶等产物的生长与致密化,进而优化界面过渡区(ITZ)的结构^[3, 12]。这种微观结构的改善提升了基体的密实度与均质性,有效降低了应力集中,并阻碍了微裂纹的萌生与扩展,进而显著改善混凝土的宏观力学性能。此外,在较高应变率加载条件下,荷载作用时间极短,裂纹扩展速度加快,其路径可能更多受惯性效应与应力波支配,倾向于穿越骨料等阻力最小路径,而非充分沿较弱的基体或界面扩展。此时,石墨烯凭借填充与桥联作用实现的微观裂纹萌生及扩展抑制机制,其作用效率或因时间尺度的限制而有所降低。与此同时,石墨烯与水泥基体间的界面动态黏结性能在高应变率加载条件下可能发生改变^[13],致使其荷载传递与能量耗散能力无法与应变率的增加完全同步,这也是石墨烯增强效果随应变率增大而逐渐减弱的重要原因。

2.3 弹性模量

图 4 为相同应变率加载条件下,普通混凝土与石墨烯混凝土的弹性模量对比曲线。由图 4 可知,随着应变率的增大,两种混凝土的弹性模量均呈显著增加的趋势。在相同应变率加载条件下,0.05%石墨烯混凝土的弹性模量始终高于普通混凝土。经计算可知,在应变率依次为 10^{-5} s^{-1} 、 10^{-4} s^{-1} 、 10^{-3} s^{-1} 、 $5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 和 10^{-2} s^{-1} 的加载条件下,0.05%石墨烯混凝土的弹性模量相较普通混凝土分别提高了 5.02%、3.24%、2.48%、2.08% 和 1.72%。由此可见,0.05% 掺量的石墨烯对提升混凝土的弹性模量具有一定的作用,但随着应变率的增大,其对混凝土弹性模量的提升幅度呈逐渐降低的趋势。

混凝土弹性模量的提升与石墨烯对其内部微

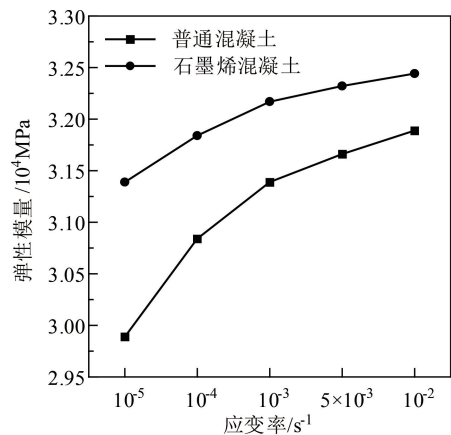


图 4 普通混凝土与石墨烯混凝土的弹性模量比较

Fig.4 Comparison of elastic modulus between ordinary concrete and graphene concrete

孔隙的填充作用存在关联,混凝土结构越密实,其抵抗弹性变形的能力越强。与此同时,石墨烯本身具备极高的抗拉强度(130 GPa)与弹性模量(1 TPa)^[1],当其均匀分散于水泥基体中时,即可作为高效的纳米增强相发挥作用。在荷载传递过程中,石墨烯片层可通过界面剪切应力承担部分外部荷载,有效分担水泥基体所受应力,进而协同提升复合材料在弹性阶段的整体刚度^[14-15]。然而,随着应变率的升高,荷载作用时间相应缩短,这种依赖界面应力传递的增强机制,或因界面黏结的动态响应滞后而受到效率限制,这也从微观尺度阐释了图 4 中石墨烯对混凝土弹性模量的增强效应随应变率增大而逐渐减弱的现象。

2.4 峰值应变

图 5 为相同应变率加载条件下,普通混凝土与石墨烯混凝土的峰值应变对比曲线。由图 5 可知,普通混凝土的峰值应变随应变率的增大呈一定的增长趋势,而石墨烯混凝土的峰值应变则在特定区间内表现出波动特征。尽管普通混凝土与石墨烯混凝土的峰值应变随应变率增大的变化规律存在差异,但整体而言,在相同应变率加载条件下,石墨烯混凝土的峰值应变始终高于普通混凝土。经计算可知,在应变率依次为 10^{-5} s^{-1} 、 10^{-4} s^{-1} 、 10^{-3} s^{-1} 、 $5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 和 10^{-2} s^{-1} 的加载条件下,0.05%石墨烯混凝土的峰值应变相较普通混凝土分别提高了 7.27%、0.22%、0.64%、3.88% 和 2.27%。

石墨烯的掺入对混凝土峰值应变的影响未呈

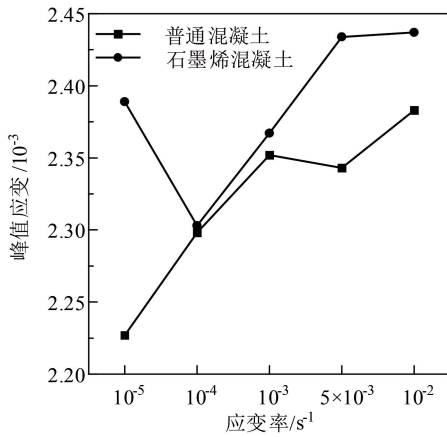


图 5 普通混凝土与石墨烯混凝土的峰值应变比较

Fig.5 Comparison of peak strain between ordinary concrete and graphene concrete

现出明显规律,究其原因,可能是高应变率下加载速率较快,混凝土的破坏过程瞬间完成,进而导致试验结果出现偏差。

2.5 吸能能力

将混凝土应力-应变曲线所包围的面积定义为其吸能能力。图 6 为普通混凝土与石墨烯混凝土在不同应变率加载条件下的吸能能力。由图 6 可知,随着应变率的增大,两种混凝土的吸能能力相较准静态条件均有所提升;在相同应变率加载条件下,0.05% 石墨烯混凝土的吸能能力整体高于普通混凝土。经计算可知,在应变率依次为 10^{-5} s^{-1} 、 10^{-4} s^{-1} 、 10^{-3} s^{-1} 、 $5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 和 10^{-2} s^{-1} 的条件下,石墨烯混凝土的吸能能力相较普通混凝土分别提高了 12.3%、23.4%、5.2%、20.2% 和 5.6%, 平均提高 13.3%。

混凝土吸能能力随应变率提高而增强的原因主要包括两点:其一,在高应变率荷载作用下,单位时间内外部输入的能量显著增加;其二,材料内部微裂纹的萌生与扩展受到抑制,整体抗压强度得以提升,进而增大了其能量吸收容量。石墨烯的掺入进一步强化了这一效应:一方面,石墨烯通过其纳米片层结构可有效填充基体孔隙,增强界面黏结性能,提升材料的整体强度与韧性,从而提高单位体积内的能量吸收能力;另一方面,石墨烯与水泥基体形成的强化界面能够有效阻碍裂纹扩展,增强材料在受力过程中的变形抗力,使其在破坏过程中耗散更多能量。

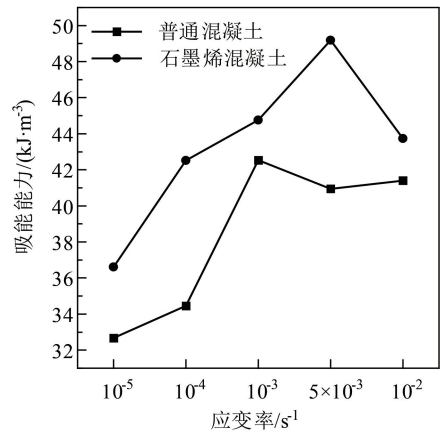


图 6 普通混凝土与石墨烯混凝土吸能能力比较

Fig.6 Comparison of energy absorption capacity between ordinary concrete and graphene concrete

3 有限元分析

本文采用 ABAQUS 软件开展数值模拟,基于不同应变率下石墨烯混凝土的单轴抗压试验数据,建立了 0.05% 石墨烯掺量混凝土的本构关系,并结合混凝土塑性损伤模型(CDP)验证了该本构关系的准确性。在此基础上,针对 10 s^{-1} 的应变率条件进行数值模拟,进一步验证了所建本构关系的有效性。本研究不仅为石墨烯混凝土在动荷载工况下的工程应用提供了理论支撑,同时也克服了传统物理试验成本高、周期长的局限性。

3.1 混凝土本构关系

基于单轴抗压试验数据,对石墨烯混凝土的应力-应变曲线上进行拟合。通过无量纲化处理,推导得出石墨烯混凝土在拟静态条件下应力-应变曲线上上升段的本构方程:

$$\begin{aligned}
 y &= -(A+0.52)x^3 + (2A-0.32)x^2 - (A-1.84)x \\
 y &= \sigma_c / f_c \\
 x &= \varepsilon_c / \varepsilon_{c0} \\
 A &= \frac{E_c}{\sigma_c / \varepsilon_c}
 \end{aligned} \quad (1)$$

式中: y 为应力与抗压强度之比; x 为应变与峰值应变之比; A 为应力-应变曲线上上升段参数。

考虑到混凝土的抗压强度、弹性模量等力学参数具有显著的应变率效应,非静态条件下方程中的参数 A 取值也会相应改变。基于此,本文利用抗压强度与弹性模量的应变率敏感性公式对参

数 A 进行修正,进而获得不同应变率下应力-应变曲线的理论方程。

对石墨烯混凝土在五种应变率加载条件下的本构曲线方程与试验数据开展相关性分析,定量评估了理论模型与试验结果的拟合优度。计算结果显示,除准静态 (10^{-5} s^{-1}) 工况下相关系数为 0.9866 外,其余各应变率下的相关系数均高于 0.9900。结果表明,所建立的理论本构方程在动态加载条件下与试验数据具有高度一致性;尽管准静态工况下模型预测值与试验实测值存在一定偏差,但整体而言,该本构关系具备良好的拟合精度与预测能力。

3.2 数值模拟

数值模拟采用 ABAQUS 软件中的混凝土塑性损伤模型 (CDP),该模型可有效表征混凝土受力过程中的刚度退化与损伤演化规律。CDP 模型通过引入损伤因子,能够准确反映混凝土在循环荷载作用下的力学响应,其适用性已在诸多动态分析相关研究中得到验证^[16-18]。本文参考文献 [18] 中的 CDP 模型参数 (表 2),如膨胀角、偏心率等,对材料的屈服强度与塑性应变进行合理设定,以保障数值模拟结果的可靠性。

表 2 CDP 模型塑性参数^[18]

Tab.2 Plasticity parameters of the CDP model

膨胀角 $\alpha(^{\circ})$	偏心率	f_{b0} / f_{c0}	k	黏度系数
30	0.1	1.16	0.6667	0.0005

在 ABAQUS 中采用分离式建模,混凝土试件尺寸为 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$,上下承压板为刚性体;网格划分为 C3D8R 单元;接触面设置摩擦系数为 0.2 以模拟实际约束条件;加载通过位移控制实现,对于 10^{-5} s^{-1} 、 10^{-4} s^{-1} 、 10^{-3} s^{-1} 、 $5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 和 10^{-2} s^{-1} 五种应变率,分析步时间分别设置为 2000 s、200 s、20 s、4 s 和 2 s。这种设置有效复现了试验中的“箍”效应和破坏形态。

根据不同应变率加载条件下的数值模拟结果,试件的模拟破坏形态表现为对角线方向的应力集中特征 (图 7),这与试验中观察到的对顶角锥形破坏模式一致。模拟得到的应力-应变曲线整体与试验曲线吻合良好 (图 8)。尽管在 10^{-3} s^{-1} 和 10^{-2} s^{-1} 应变率加载条件下,模拟曲线与试验曲线存在轻微偏差,但相关系数分析结果已证实本文模拟方法的准确性。特征值对比结果显示,抗压强度的模拟误差均值低于 4%,均处于工程应用可接受的误差范围内。

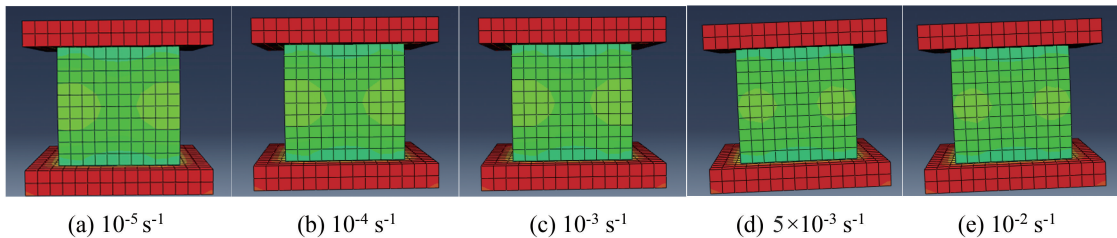
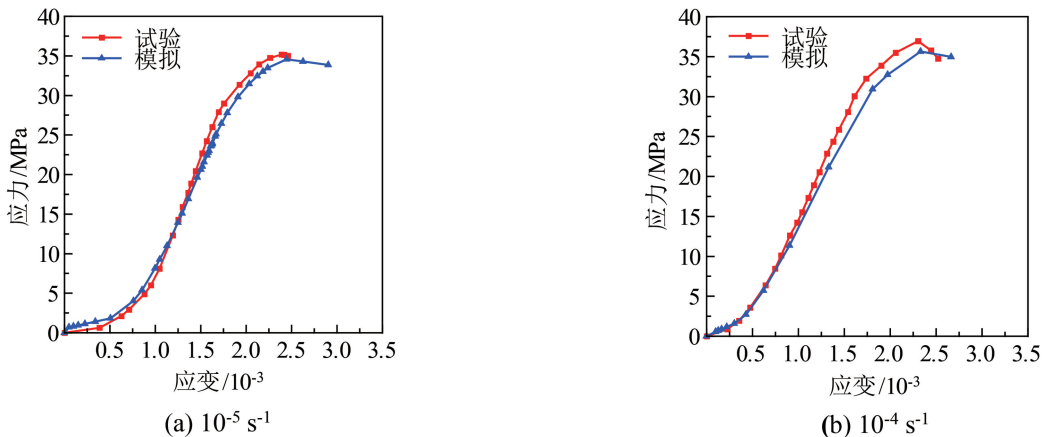


图 7 五种应变率加载条件下石墨烯混凝土数值模拟应力图

Fig.7 Simulated stress distribution in graphene concrete under five strain rate loading conditions



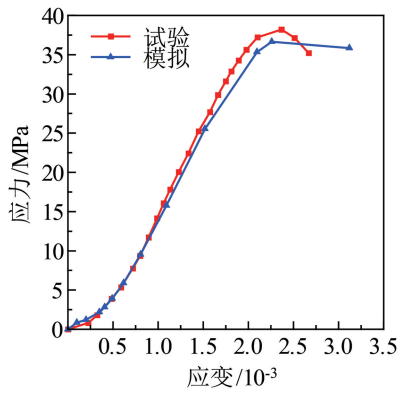
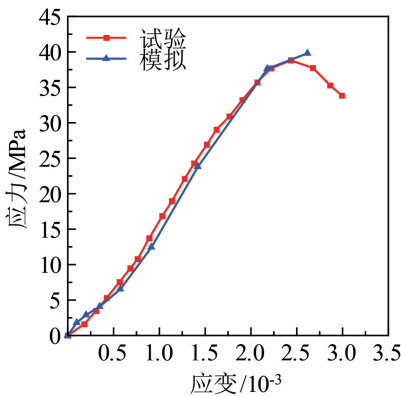
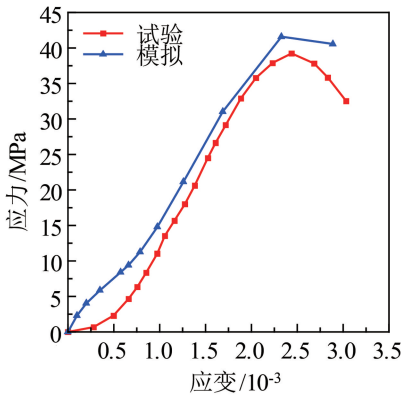
(c) 10^{-3} s^{-1} (d) $5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ (e) 10^{-2} s^{-1}

图 8 五种应变率加载条件下石墨烯混凝土应力-应变曲线的数值模拟与试验对比

Fig.8 Comparison between simulated and experimental stress-strain curves of graphene concrete under five strain rate loading conditions

为进一步探究混凝土材料在高应变率加载条件下的动力学行为,本文在已有分析基础上,开展了应变率为 10^{-1} s^{-1} 与 $5 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ 加载工况的数值模拟研究。应变率水平为 10^{-1} s^{-1} 的工况对应高速冲击或爆炸荷载的作用场景^[13],对评估混

土结构在极端动力作用下的抗压性能具有重要意义。两种不同应变率工况下的数值模拟结果见表 3。由表 3 可知,随着应变率的提高,混凝土的动力增强效应越发显著,其抗压强度与峰值应变均呈上升趋势;模拟值与试验值的最大相对误差小于 4%,这进一步验证了所建模型在较宽应变率范围内的适用性与预测精度。

表 3 两种不同应变率工况下的数值模拟结果

Tab.3 Numerical simulation results under two different strain rate conditions

应变率	抗压强度/MPa			峰值应变/ 10^{-3}		
	模拟值	试验值	误差/%	模拟值	试验值	误差/%
$5 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$	27.9	28.3	1.4	2.184	2.234	2.3
10^{-1} s^{-1}	38.0	38.4	1.1	2.419	2.511	3.8

基于有限元分析的结果,本文成功验证了所构建的本构关系模型的适用性。结果表明,CDP 模型能够有效预测石墨烯混凝土在不同应变率加载条件下的动态抗压性能,为该材料的工程化应用提供了坚实的理论支撑。

4 结 论

选取普通混凝土与石墨烯掺量为 0.05% 的石墨烯混凝土试块各 5 组,在 10^{-5} s^{-1} 、 10^{-4} s^{-1} 、 10^{-3} s^{-1} 、 $5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 、 10^{-2} s^{-1} 五种应变率加载工况下开展单轴抗压试验。选取 10^{-5} s^{-1} 为准静态应变率,系统研究两种混凝土的应力-应变曲线、抗压强度等力学性能的应变率效应,得出如下结论。

1) 混凝土的抗压强度、弹性模量及吸能能力均呈现出显著的应变率效应。随着应变率的增大,其抗压强度与弹性模量均呈上升趋势,且二者的增长趋势随应变率的进一步提高逐渐趋缓。

2) 掺入 0.05% 的石墨烯对混凝土的抗压强度与弹性模量具有显著的提升作用。在 10^{-5} s^{-1} 、 10^{-4} s^{-1} 、 10^{-3} s^{-1} 、 $5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 、 10^{-2} s^{-1} 五种应变率加载工况下,石墨烯混凝土抗压强度分别提升了 16.17%、10.81%、8.52%、7.18% 和 5.93%,弹性模量则依次提升了 5.02%、3.24%、2.48%、2.08% 和 1.72%。此外,石墨烯混凝土在五种应变率下的吸能能力较普通混凝土平均提升 13.3%。

3) 石墨烯的掺入不仅提升了混凝土在各应变率工况下的力学指标,也改变了其应变率响应特性。试验数据表明,石墨烯混凝土的抗压强度

与弹性模量对应变率的敏感性低于普通混凝土。究其原因,石墨烯显著改善了混凝土的静态微观结构特性^[3, 6, 12];而在高应变率加载工况下,石墨烯的纳米增强机制(如桥联与阻裂作用)发挥效率因荷载作用时间的限制而有所降低^[16]。因此,石墨烯混凝土的动态力学性能优势,是其优异的静态力学性能与受限但仍有效的动态增强效应共同作用的结果。

4)有限元模拟结果表明,基于试验数据所建立的本构关系模型,石墨烯混凝土的数值模拟曲线与试验曲线在上升段及整体变化趋势上均吻合良好,试件破坏形态呈现典型的对顶锥形特征;数值模拟结果与试验数据整体具有高度相关性,仅在部分应变率加载工况下存在可接受的小幅偏差,其中,抗压强度与峰值应变的平均误差分别为 3.5%和 3.8%。同时,通过对 10^{-1} s^{-1} 与 $5 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ 应变率工况下混凝土抗压性能的预测分析,进一步验证了所建本构模型在宽应变率范围内具备良好的预测精度与工程应用价值。

参考文献 (References):

- [1] LEE C G, WEI X D, KYSAR J W, et al. Measurement of the elastic properties and intrinsic strength of monolayer graphene[J]. *Science*, 2008, 321(5887):385-388.
- [2] 滕瑜, 陈福亮, 宋群玲, 等. 新材料石墨烯及产业化发展与前景[J]. *昆明冶金高等专科学校学报*, 2017, 33(5):1-6.
TENG Y, CHEN F L, SONG Q L, et al. The new material graphene and its industrialization development and prospect[J]. *Journal of Kunming Metallurgy College*, 2017, 33(5):1-6. (in Chinese)
- [3] ZHAO Z F, QI T Q, ZHOU W, et al. A review on the properties, reinforcing effects, and commercialization of nanomaterials for cement-based materials[J]. *Nanotechnology Reviews*, 2020, 9(1):303-322.
- [4] 曹西宁. 浅析石墨烯新材料在沥青混凝土路面中的应用[J]. *城市道桥与防洪*, 2020(5):304-305.
CAO X N. Brief analysis on application of new graphene material in asphalt concrete pavement[J]. *Urban Roads Bridges & Flood Control*, 2020(5):304-305. (in Chinese)
- [5] 吕岱莹, 王军. 石墨烯混凝土研究进展[J]. *江西建材*, 2020(6):8-9.
LV D Y, WANG J. Research progress of graphene concrete[J]. *Jiangxi Building Materials*, 2020(6):8-9. (in Chinese)
- [6] CHEN G F, YANG M Q, XU L J, et al. Graphene nanoplatelets impact on concrete in improving freeze-thaw resistance[J]. *Applied Sciences-Basel*, 2019, 9(17):3582.
- [7] WATSTEIN D. Effect of straining rate on the compressive strength and elastic properties of concrete[J]. *ACI Journal Proceedings*, 1953, 49(4):729-744.
- [8] ATCHLEY B L, FURR H L. Strength and energy absorption capabilities of plain concrete under dynamic and static loadings[J]. *Journal of the American Concrete Institute*, 1967, 64(11):745-756.
- [9] 胡时胜, 王道荣, 刘剑飞. 混凝土材料动态力学性能的实验研究[J]. *工程力学*, 2001, 18(5):115-118.
HU S S, WANG D R, LIU J F. Experimental study of dynamic mechanical behavior of concrete[J]. *Engineering Mechanics*, 2001, 18(5):115-118. (in Chinese)
- [10] 张玉敏. 不同应变率下混凝土力学性能的试验研究[D]. 北京:北京工业大学, 2012.
ZHANG Y M. Experimental study of the mechanical properties of concrete under different strain rates[D]. Beijing:Beijing University of Technology, 2012. (in Chinese)
- [11] 周宏宇, 麻全周, 赵晓花, 等. 考虑应变率效应的混凝土材料单轴压缩特性尺寸效应研究[J]. *混凝土*, 2021(1):61-65.
ZHOU H Y, MA Q Z, ZHAO X H, et al. Experimental study on dynamic rate relevance of concrete size effect[J]. *Concrete*, 2021(1):61-65. (in Chinese)
- [12] PARK Y J, LEE H S, SEO T E S. Experimental study on properties of graphene and hollow glass powder-added ultra-high strength concrete[J]. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 2024, 18(1):47.
- [13] WANG C Q, GUO J, WANG X Z, et al. Dynamic mechanical properties and damage constitutive model of high-toughness recycled aggregate concrete under high strain rate impact loads[J]. *Journal of Building Engineering*, 2025, 106:112589.
- [14] LI G Y, WANG P M, ZHAO X H. Mechanical behavior and microstructure of cement composites incorporating surface-treated multi-walled carbon nanotubes[J]. *Carbon*, 2005, 43(6):1239-1245.
- [15] DU H J, PANG S D. Enhancement of barrier properties of cement mortar with graphene nanoplatelet[J]. *Cement and Concrete Research*, 2015, 76:10-19.

- [16] 江见鲸, 陆新征, 叶列平. 混凝土结构有限元分析 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
JIANG J J, LU X Z, YE L P. Finite element analysis of concrete structures [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005. (in Chinese)
- [17] 李敏, 李宏男. ABAQUS 混凝土损伤塑性模型的动力性能分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2011, 31(3): 299-303.
LI M, LI H N. Investigation into dynamic properties of damaged plasticity model for concrete in ABAQUS[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2011, 31(3): 299-303. (in Chinese)
- [18] 张飞, 马建勋, 南燕. 混凝土塑性损伤模型参数的选取与验证计算[J]. 混凝土与水泥制品, 2021(1): 7-11.
ZHANG F, MA J X, NAN Y. Parameters selection and verification calculation of concrete plastic damage model [J]. China Concrete and Cement Products, 2021(1): 7-11. (in Chinese)
-
- (上接第 133 页)
- [10] GUO L R, BURKE M G, GRIGGS W M. A new framework to predict and visualize technology acceptance: a case study of shared autonomous vehicles [J]. Technological Forecasting and Social Change, 2025, 212: 123960. doi: 10.1016/j.techfore.2025.123960.
- [11] 鞠鹏, 周晶, 陈星光, 等. 基于 TAM 和 TPB 整合模型的汽车共享使用意向研究 [J]. 管理现代化, 2016, 36(4): 82-85.
JU P, ZHOU J, CHEN X G, et al. Research on car-sharing usage intention based on integrated TAM and TPB model [J]. Modernization of Management, 2016, 36(4): 82-85. (in Chinese)
- [12] 薛寒欣. 新能源汽车推广激励政策的影响机制研究 [J]. 大连海事大学学报(社会科学版), 2025, 24(1): 74-85.
XUE H X. Research on the impact mechanism of incentive policies for promoting new energy vehicles [J]. Journal of Dalian Maritime University (Social Science Edition), 2025, 24(1): 74-85. (in Chinese)
- [13] 霍治方, 刘刚, 樊正德. 中国公众对新兴技术采纳的影响机理研究——基于自动驾驶汽车社会实验调查的微观证据 [J]. 科学学研究, 2025, 43(2): 311-324. doi: 10.16192/j.cnki.1003-2053.20240723.001.
HUO Z F, LIU G, FAN Z D. Research on the influence mechanism of Chinese public's adoption of emerging technology: micro evidence from a social experiment survey on autonomous vehicles [J]. Studies in Science of Science, 2025, 43(2): 311-324. doi: 10.16192/j.cnki.1003-2053.20240723.001. (in Chinese)