文章编号: 1671−7872(2025)05−0534−12

特约论文

马芹永 博士，二级教授，博士生导师。安徽省学术和技术带头人，安徽省战略性新兴产业技术领军人才，安徽省先进工作者，安徽省教学名师，安徽省模范教师，安徽省劳模工匠创新工作室领衔人。兼任中国岩石力学与工程学会理事，中国岩石力学与工程学会岩石动力学专业委员会副主任，安徽省岩石力学与工程学会理事长。主要从事人工冻土力学、模拟月壤静动态力学性能等方面的研究，承担国家自然科学基金、教育部博士点基金优先发展领域、安徽省优秀青年基金等课题 21 项，出版学术专著 3 部，在《岩石力学与工程学报》《岩土工程学报》《岩土力学》等期刊发表论文 86 篇。被授予中国科学技术发展基金会孙越崎青年科技奖、中国岩石力学与工程学会青年科技奖、安徽青年科技奖等称号；获安徽省科学技术奖、国家安全生产科技成果奖、中国煤炭工业科学技术奖和中国岩石力学与工程学会科学技术奖 16 项。

石墨烯增强模拟月壤地聚合物的动态压缩力学性能

马芹永[a,b]**，简伟强**[a,b]**，张波波**[a,b]

(安徽理工大学 a. 土木建筑学院；b. 矿山地下工程教育部工程研究中心，安徽 淮南 232001)

摘要: 采用Φ50 mm 分离式霍普金森压杆 (SHPB) 试验系统，在 3.39~6.67 m/s 的冲击速度和 0~0.15%(质量分数) 的石墨烯掺量条件下，研究石墨烯增强模拟月壤地聚合物在动态冲击载荷下的力学响应特性。重点分析石墨烯掺量对材料动态抗压强度、能量耗散机制及破碎分形特征的影响，并借助扫描电子显微镜 (SEM) 揭示其在基体中的微观增强机理。结果表明：石墨烯增强模拟月壤地聚合物具有明显的应变率效应，动态抗压强度和动态强度因子均随冲击速度提高呈线性增长；在 3.39 m/s 的冲击速度下，动态抗压强度随石墨烯掺量增加先增大后降低，最优掺量为 0.10%，较未掺组强度提升 14.75%，过量掺入会因石墨烯团聚效应导致性能下降。能量分析表明，入射能、吸收能与反射能均呈先增长后稳定的趋势，其中 0.10% 掺量组试样在 6.67, 4.49, 3.39 m/s 的冲击速度下，对应的入射能峰值分别为吸收能峰值的 7.06, 6.66, 3.67 倍。破碎体分形特征分析证实材料破碎后碎块分布具有良好的分形结构特征。微观机理分析显示：石墨烯通过孔隙充填和微裂纹桥接作用有效抑制损伤扩展，促进能量耗散；同时作为成核位点促进地聚合反应，生成更多 C—A—S—H 和 N—A—S—H 胶凝相，形成多尺度增强结构。本研究为月球基地建筑材料在高应变率条件下的性能优化提供了重要试验依据。

关键词: 石墨烯；模拟月壤；应变率效应；分形维数；能量耗散；SHPB 试验

中图分类号: TU 43 **文献标志码:** A **doi:** 10.12415/j.issn.1671−7872.25078

收稿日期: 2025−07−03

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50874003)；安徽省教育厅研究生学术创新项目 (2024xscx082)

作者简介: 马芹永 (1964—)，男，博士，二级教授，博士生导师，主要研究方向为冻土力学和模拟月壤力学特性。

引文格式: 马芹永，简伟强，张波波. 石墨烯增强模拟月壤地聚合物的动态压缩力学性能 [J]. 安徽工业大学学报 (自然科学版)，2025，42(5):534−545.

Dynamic Compressive Mechanical Properties of Graphene-reinforced Simulated Lunar Soil Geopolymer

MA Qinyong[a,b], JIAN Weiqiang[a,b], ZHANG Bobo[a,b]

(a. School of Civil Engineering and Architecture; b. Engineering Research Center of Underground Mine Construction, Ministry of Education, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

Abstract: The dynamic impact response characteristics of graphene-reinforced simulated lunar soil geopolymer were investigated using a Φ50 mm split hopkinson pressure bar (SHPB) test system with impact velocities from 3.39 to 6.67 m/s and graphene contents varying from 0 to 0.15% (mass fraction). The effect of graphene content on the dynamic compressive strength, energy dissipation characteristics, and fragmentation fractal dimension was systematically analyzed. The microstructural reinforcement mechanisms of graphene in the matrix were characterized by scanning electron microscopy (SEM). The results demonstrate that the graphene-reinforced simulated lunar soil geopolymer exhibits significant strain rate effects, with both dynamic compressive strength and dynamic strength factor showing linear increases with impact velocity. Under an impact velocity of 3.39 m/s, the dynamic compressive strength first increases and then decreases with increasing graphene content, reaching an optimal content of 0.10%，14.75% improvement compared to the control group, while excessive graphene leads to strength reduction due to graphene agglomeration. Energy analysis reveals that the incident, absorbed and reflected energies all display initial growth followed by stabilization, with peak incident energies reaching 7.06, 6.66 and 3.67 times the peak absorbed energies at impact velocities of 6.67, 4.49 and 3.39 m/s respectively for the 0.10% graphene content group. The fractal characteristics of the fragmented material demonstrate that the distribution of fragments exhibits well-defined fractal structural features. Microstructural investigations indicate that graphene effectively restricts damage propagation through pore-filling and microcrack-bridging mechanisms, thereby enhancing energy dissipation, while simultaneously serving as nucleation sites to accelerate geopolymerization reactions, promoting the formation of C—A—S—H and N—A—S—H gel phases and creating multiscale reinforcement structures. This study provides important experimental support for performance optimization of lunar base construction materials under high strain rate conditions.

Keywords: graphene; simulated lunar soil; strain rate effect; fractal dimension; energy dissipation; SHPB test

作为地球唯一的天然卫星, 月球蕴藏着氦–3 等清洁能源和稀土元素等重要矿产资源, 这些资源的高效开发利用将为人类社会可持续发展提供重要支撑; 其独特的微重力、高真空、强辐射环境也为航天科学研究、深空探测技术验证以及天文观测提供了理想实验平台[1–2]。基于此, 开展月球原位资源利用 (in-situ resource utilization, ISRU) 研究具有重大意义。国家航天局探月与航天工程中心于 2014 年提出建设月球科研站构想, 并于 2020 年立项开展国际月球科研站项目研究[3–4], 但由于地月材料运输成本高昂, 利用月壤等原位资源建造科研站成为必然选择。月壤作为月球表面风化作用的产物, 因其独特的物理化学特性成为深空探测 ISRU 的首选建造材料, 然而真实月壤珍贵稀缺, 国内外学者多采用模拟月壤开展研究。因此, 通过开展石墨烯增强模拟月壤地聚合物的动态力学性能研究, 为月球 ISRU 提供材料性能参数与技术支持, 对我国月球基地建设具有工程应用价值。

近年来, 模拟月壤地聚合物研究取得重要进展。Ma 等[5] 通过氧化铝–碱激发剂协同固化模拟月壤地聚合物, 证实氧化铝可促进地聚合物强度发展; Gu 等[6] 对比分析了干养护与密封养护条件下模拟月壤地聚合物的强度差异; 姚羿舟等[7] 考察了热真空环境下氢氧化钠基和硅酸钠基碱激发剂模拟月壤浆体的物相分布、微观结构和力学性能发展规律, 揭示了基体固化反应机理; Zhang 等[8] 采用碳纳米纤维

增强模拟月壤地聚合物,发现其不仅能提升基体力学性能,还可有效降低孔隙率。这些研究证实了模拟月壤地聚合物在静态力学性能方面的优越性,为其作为月球科研站建设材料提供了理论依据。

然而,月球表面的极端环境对建筑材料性能提出了更为严苛的要求。研究[9] 表明,月球表面微陨石撞击速度可达 20 km/s,这一极端工况对材料的抗冲击性能构成了严峻挑战。研究[10–11] 表明,地聚合物存在脆性高、韧性不足的问题,难以有效抵御月表微陨石冲击。Zhang 等[12] 在嫦娥五号 (CE–5) 月球土壤样本中发现天然少层石墨烯以单薄片的形式嵌入或包裹月壤矿物颗粒; Li 等[13] 研究表明,石墨烯可构建三维杂化网络结构,并可改善材料力学性能。石墨烯作为一种纳米级高性能材料,因其优异的轻质性、超高强度和大比表面积特性,被认为是提升无机胶凝材料韧性的理想增强体,但目前关于石墨烯增强模拟月壤地聚合物抗冲击性能的研究仍较少。为此,本文采用霍普金森压杆 (split hopkinson pressure bar, SHPB) 动态冲击试验装置,探究石墨烯对模拟月壤地聚合物材料抗冲击性能的影响机制,以期为月面建造材料在冲击荷载下的性能优化提供科学依据。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 模拟月壤组分

研究[14–16] 表明,南京六合区玄武岩在化学成分、矿物组成、微观形貌方面与嫦娥系列真实月壤样品高度相似,其能够准确反映月壤地聚合物的力学行为特征。因此,本文选用南京六合区玄武岩为模拟月壤的原料。嫦娥系列月壤样品及南京六合区玄武岩的主要成分如表 1。

表 1 月壤主要化学成分 *w*/%

Tab. 1 Chemical composition of lunar regolith *w*/%

成分	Chang' E–5[17]	BH–1[18]	Apollo14[19]	Chang' E–6[20]	模拟月壤
SiO_2	42.08	43.40	48.10	45.60	46.64
Al_2O_3	11.61	16.50	17.40	14.30	14.01
FeO	22.10	16.70	10.40	17.30	10.78
CaO	11.66	8.80	10.70	11.90	7.57
TiO_2	4.86	2.90	1.70	2.70	2.22
MgO	6.50	3.00	9.40	7.08	8.96
Na_2O	0.46	3.80	0.70	0.25	4.10
K_2O	0.19	3.30	0.55	0.07	2.64
MnO	0.27	0.30	0.14	0.22	0.14
P_2O_5	0.25	0.70	0.51	0.07	0.57
Total	99.98	99.40	99.60	99.49	97.63

续表

1.1.2 碱激发剂配比

采用分析纯氢氧化钠和 50%(质量分数) 蒸馏水混合配制碱激发剂溶液,充分搅拌溶解后在室温下静置 24 h,确保溶液充分均质化后使用。

1.1.3 石墨烯参数

试验采用的石墨烯由深圳穗衡石墨烯技术有限公司提供,该材料为增强型石墨烯,能够显著提高基体材料的强度和耐久性。其主要技术参数见表 2。

表 2 石墨烯的主要技术参数

Tab. 2 Key technical parameters of graphene

层数	*w*(碳)/%	片径(d_{50})/μm	堆积密度/(g/mL)	比表面积/(m^2/g)
1~3	98	7~12	0.01~0.02	50~200

鉴于石墨烯易受范德华力作用而产生团聚的问题,采用优化的超声波分散工艺: 精确称量石墨烯粉末,量取 50% 试验蒸馏水作为分散介质; 将石墨烯粉末缓慢加入蒸馏水中搅拌 10 min 实现初步润湿; 随后将混合液置于超声波分散仪中分散处理 30 min,同时通过冰水浴维持体系温度,抑制石墨烯二次团聚,最终获得均匀稳定的石墨烯水分散体系。

1.2 模拟月壤地聚合物制备

采用多阶段混合工艺制备石墨烯增强模拟月壤地聚合物: 将碱激发剂与模拟月壤颗粒放入砂浆搅拌机,以 (285±10) r/min 的速度搅拌 3 min 完成初步混合; 随后加入预配置的石墨烯分散液,采用梯度搅拌工艺——先以 (140±5) r/min 低速搅拌3 min 确保材料充分浸润,再提高至 (285±10) r/min 高速搅拌 3 min 实现均匀分散; 将混合浆体注入Φ50 mm×25 mm 的圆盘模具,经 60 s 振捣充分排除气泡后用聚乙烯薄膜包裹密封,再将其置于 60 ℃ 环境预养护 24 h 脱模。基于嫦娥六号南极艾特肯盆地着陆点 (41.64 °S, 153.99 °W) 月表环境特征,选择 80 ℃(模拟月昼高温环境及最佳养护温度)28 d 养护,每组设置 3 个平行试样,制备流程和石墨烯掺量设计分别如图 1 和表 3。该工艺通过控制搅拌参数和养护制度,确保材料性能的可靠性和试验结果的可重复性。

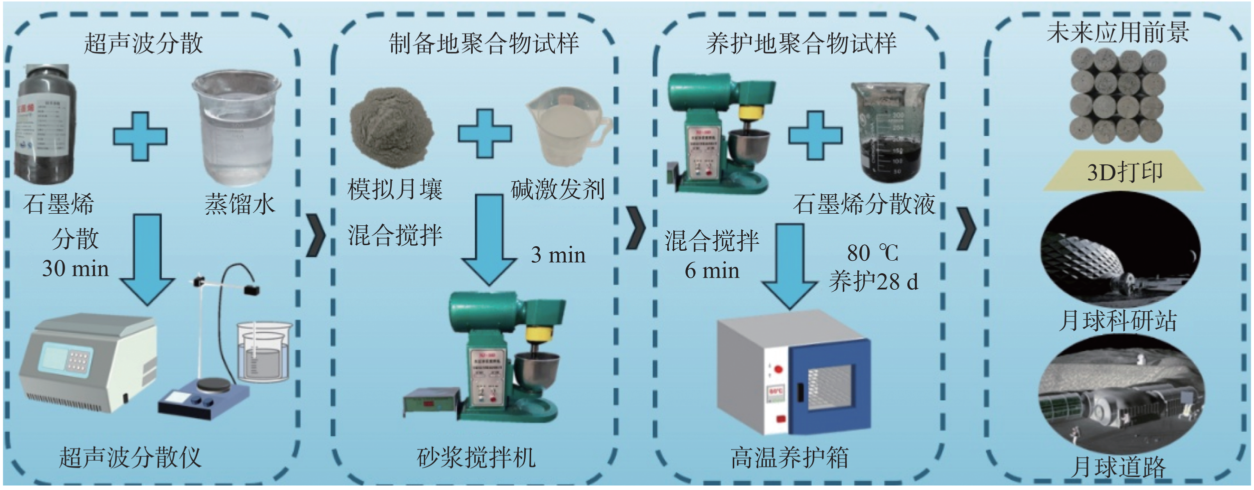


图1　石墨烯增强模拟月壤基复合材料制备的工艺流程

Fig. 1　Preparation processs of graphene-reinforced lunar soil simulant-based composites

表 3　石墨烯掺量试验设计方案

Tab. 3　Experimental design scheme of graphene dosage

组别	m_w/m_{lss}	m_{NaOH}/m_{lss}	m_G/m_{lss}
G00			0
G05	0.20	0.08	0.000 5
G10			0.001 0
G15			0.001 5

注: m_w 为蒸馏水的质量; m_{lss} 为模拟月壤的质量; m_{NaOH} 为氢氧化钠的质量; m_G 为石墨烯的质量。

1.3　动态冲击试验

采用安徽理工大学冲击动力学实验室的分离式霍普金森压杆 (SHPB) 系统 (图 2) 对模拟月壤地聚合物试样进行动态冲击试验。该系统由 0.8 m 撞击杆、2.5 m 入射杆和 2.0 m 透射杆组成, 杆件材料为钢质 (弹性模量 206 GPa、纵波波速 5 113 m/s)。设置 0.15, 0.20, 0.30 MPa 等 3 个气压等级调控撞击速度, 每个工况重复 3 次确保数据可靠性。试验过程中严格控制试样与杆件的同轴度, 并在试样端面均匀涂抹凡士林以减小端面摩擦效应。基于一维弹性应力波理论, 采用 “三波法” [21] 处理入射波、反射波和透射波信号, 获取材料的动应力–动应变曲线、动态强度及变形模量等关键参数。

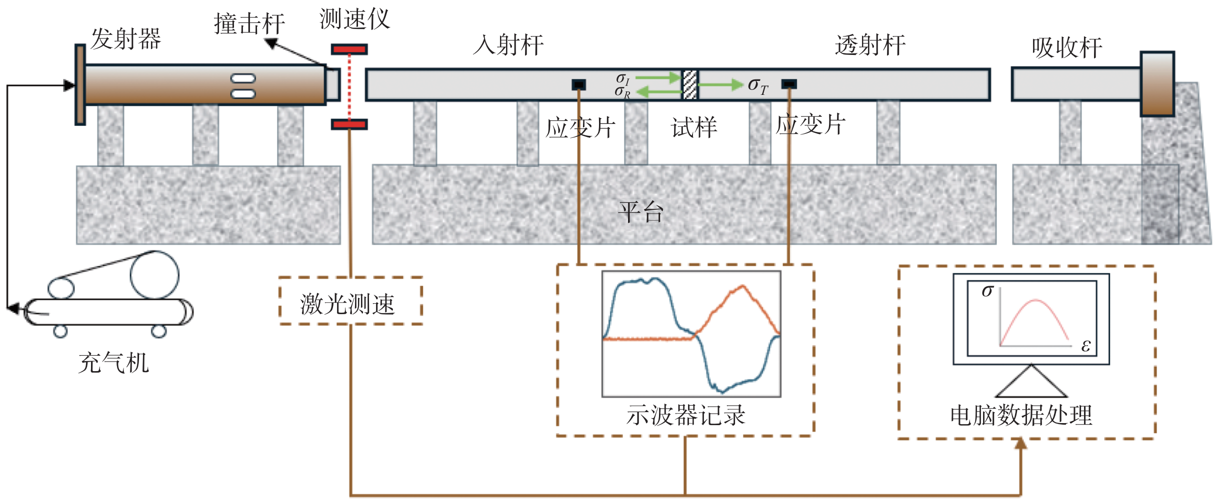


图2　SHPB 试验装置示意图

Fig. 2　Schematic diagram of the SHPB test setup

2　试验结果与分析

为确保动态冲击试验数据的有效性, 以试样 G05 为例验证应力动态平衡状态, 通过计算入射端 (入射应力与反射应力之和) 和透射端 (透射应力) 的动态应力 (图 3) 进行分析。

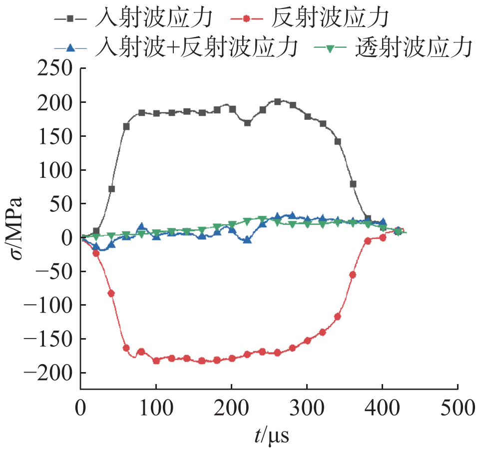


图3 试样 G05 的动态应力平衡验证曲线

Fig. 3 Dynamic stress equilibrium verification curves of specimen G05

分析图 3 表明: 在 0~500 μs 关键时域内, 入射端与透射应力 (σ) 的偏差率小于 3.17%; 2 条动态应力时程曲线的相关系数达 0.965, 且在弹性阶段呈高度一致性, 表明试样在冲击荷载下已满足动态应力平衡条件, 符合霍普金森杆试验的基本假设, 证实所获试验数据真实有效。

2.1 动态强度特性

不同掺量配比石墨烯增强模拟月壤地聚合物试样的动态冲击性能试验结果如表 4。表 4 表明, 当冲击速度在 3.39~6.67 m/s 范围时, 试样应变率相应达 156.15~301.97 s^{-1}。通过分析应变片采集的试验数据, 计算得到各试样在冲击荷载作用下的动态强度指标, 具体结果如图 4。

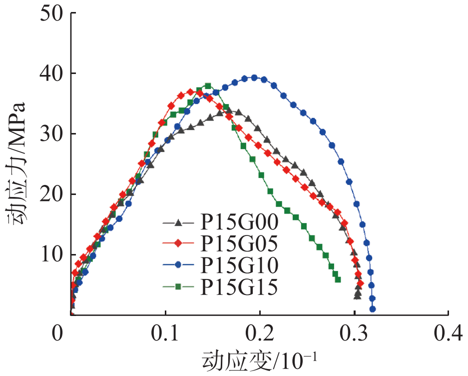
表 4 不同石墨烯掺量试样的动态试验结果

Tab. 4 Dynamic test results of specimens with varying graphene contents

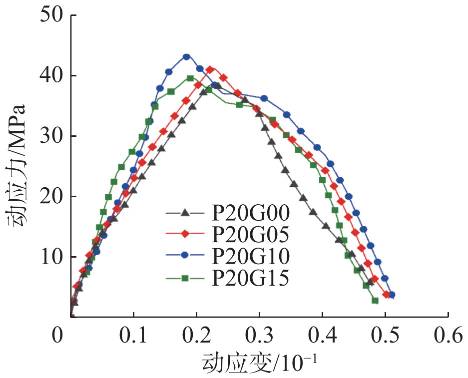
试样编号	冲击速度/(m/s)	平均应变率/s^{-1}	动应变/10^{-1}	峰值应力/MPa	静态抗压强度/MPa	DIF
P15G00	3.39	156.15±5.65	0.297±0.046 7	34.71±0.87	17.17±0.63	2.02±0.089 8
P15G05		166.35±4.45	0.302±0.036 8	37.47±0.94	18.97±0.74	1.98±0.091 6
P15G10		172.49±5.74	0.319±0.037 4	39.83±1.00	20.67±0.77	1.93±0.086 6
P15G15		161.54±4.58	0.289±0.040 3	38.21±0.96	19.34±0.68	1.98±0.085 4
P20G00	4.49	252.75±6.44	0.477±0.045 3	38.65±0.97	17.17±0.63	2.25±0.100 0
P20G05		255.86±5.63	0.504±0.043 7	41.41±1.04	18.97±0.74	2.18±0.101 3
P20G10		264.47±4.35	0.511±0.044 3	43.38±1.08	20.67±0.77	2.10±0.096 7
P20G15		256.73±4.39	0.485±0.043 9	39.83±1.00	19.34±0.68	2.06±0.089 0
P30G00	6.67	278.25±6.89	0.668±0.063 5	51.28±1.28	17.17±0.63	2.99±0.132 5
P30G05		298.67±7.00	0.682±0.056 4	54.82±1.37	18.97±0.74	2.89±0.133 9
P30G10		301.97±7.78	0.698±0.060 1	64.69±1.52	20.67±0.77	3.13±0.137 8
P30G15		277.78±5.86	0.683±0.063 4	59.16±1.48	19.34±0.68	3.06±0.132 0

注: P30G15 表示冲击气压 0.30 MPa(冲击速度 6.67 m/s) 下石墨烯掺量为 0.15% 试样, 其他试样编号以此类推; DIF 表示动态强度因子 (dynamic increase factor)。

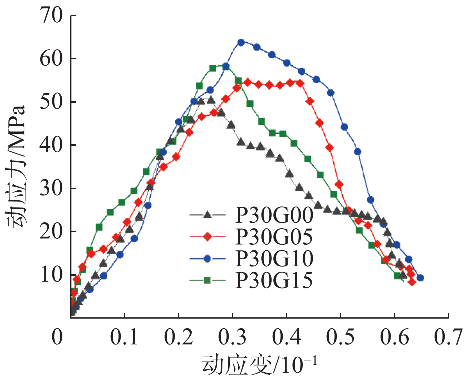
通过对图 4 和表 4 的数据分析, 掺入石墨烯的模拟月壤地聚合物的动态抗压强度 (峰值应力) 表现出明显的应变率效应, 即随冲击速度增加而显著提升。这种加载速度强化效应的原因在于: 模拟月壤地聚合物在受到冲击荷载作用发生破坏的过程中, 基体无法依靠裂缝的快速萌生和发展积累能量, 只能通过持续增加的应力状态来维持能量平衡[22]。试验数据显示, 在相同冲击速度条件下, 石墨烯增强试样的动态抗压强度普遍高于对照组, 其中当石墨烯掺量为 0.10%(质量分数) 时增强效果最为显著。以冲击速度为 3.39 m/s 为例, P15G05, P15G10, P15G15 试样的动态抗压强度分别为 37.47, 39.83, 38.21 MPa, 相较于对照组 P15G00(34.71 MPa)分别提高 7.95%, 14.75%, 10.08%, 最大强度增幅达 14.75%。该结果表明模拟月壤地聚合物的动态抗压强度随石墨烯掺量增加呈先增大后下降。这种规律源于石墨烯掺量的微观作用机制: 在最佳掺量 (0.10%)时, 均匀分散的石墨烯能够为地聚合反应提供充足的成核位点, 有效促进胶凝产物的生成; 当掺量不足时, 有限的石墨烯难以充分填补基体微孔隙并促进反应, 导致增强效果不明显; 而当掺量超过 0.10% 时, 石墨烯片层因范德华力作用发生团聚, 不仅会减小有效的增强作用面积, 还会在材料基体中引入应力集中点, 最终造成动态抗压强度的降低。



(a) 冲击速度3.39 m/s



(b) 冲击速度4.49 m/s

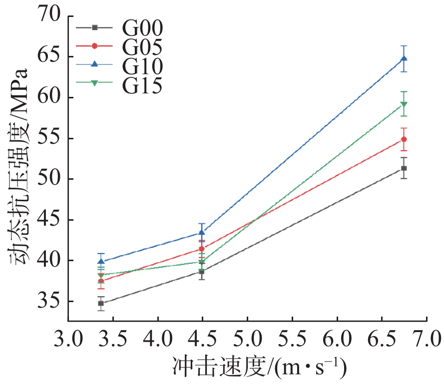


(c) 冲击速度6.67 m/s

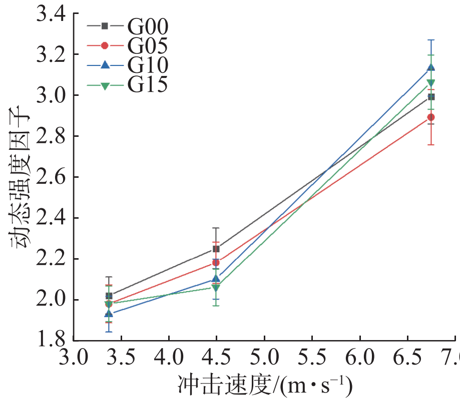
图4　不同石墨烯掺量试样的动应力–动应变曲线

Fig. 4　Dynamic stress–strain curves of specimens with different graphene contents

动态强度因子 (DIF) 定义为动态与静态抗压强度的比值, 用于表征材料的应变率敏感性。图 5 为不同石墨烯掺量试样的动态强度及其 DIF 与冲击速度的变化规律。由图 5 可看出: 随着冲击速度的增加, 对照组和石墨烯增强试样的 DIF 均呈良好的线性增长趋势。其中 G10(质量分数 0.10% 石墨烯) 试样表现出更为明显的应变率强化效应, 其 DIF–冲击速度曲线的斜率高于其他试样, 表明适量石墨烯 (0.10%) 的掺入能够有效增强模拟月壤地聚合物对应变率变化的响应能力。这种增强效应源于石墨烯独特的二维结构在动态荷载下能够更有效地传递应力并抑制微裂纹扩展。



(a) 动态抗压强度



(b) 动态强度因子

图5　不同石墨烯掺量试样动态抗压强度及强度因子与冲击速度的关系曲线

Fig. 5　Relationship curves of dynamic compressive strength and strength factor versus impact velocity for specimens with different graphene contents

2.2　应变率演化规律

以冲击速度 4.49 m/s 为例, 不同石墨烯掺量试样典型的应变与应变率时程变化规律如图 6, 由此对试样进行动态压缩损伤分析。

由图 6 可以看出不同石墨烯掺量试样 (P20G00, P20G05, P20G10 和 P20G15) 均呈现相似的应变率演化规律: 初始增长 (OA)、首次下降 (AB)、波动平台 (BC) 及二次下降 (CD) 阶段[23]。在 OA 阶段, 试样应变率近似线性增强, 动应变也迅速增大, 试样处于初级加载阶段, 表面无裂缝, 仅产生瞬时弹性变形; 在 AB 阶段, 应变率开始出现下降趋势, 而动应变不断上升, 此时试样内部开始产生损伤破坏, 外部也形成少量细微裂缝; 在 BC 阶段, 应变率继续增至最大后逐渐平稳下滑, 动应变近似线性快速增大, 试样进入塑性变形阶段, 微裂缝贯通形成主裂缝, 且沿试样薄弱面快速扩展, 局部地聚合物开始剥落, 表面出现粉末状碎屑; 在 CD 阶段, 应变率开始快速下降而动应变继续增大后趋于稳定, 试样丧失承载能力, 主裂缝完全贯穿, 内部结构解体为多个碎块。由图 6 还可以看出, 石墨烯掺量试样较对照组表现出更稳定

的 BC 平台和延后的应变发展，表明石墨烯可有效调控模拟月壤地聚合物在动态加载下的应变–时间 (ε–t) 及应变率–时间 ($\dot{\varepsilon}$–t) 特征，具体表现为应变发展延缓和能量耗散延长。

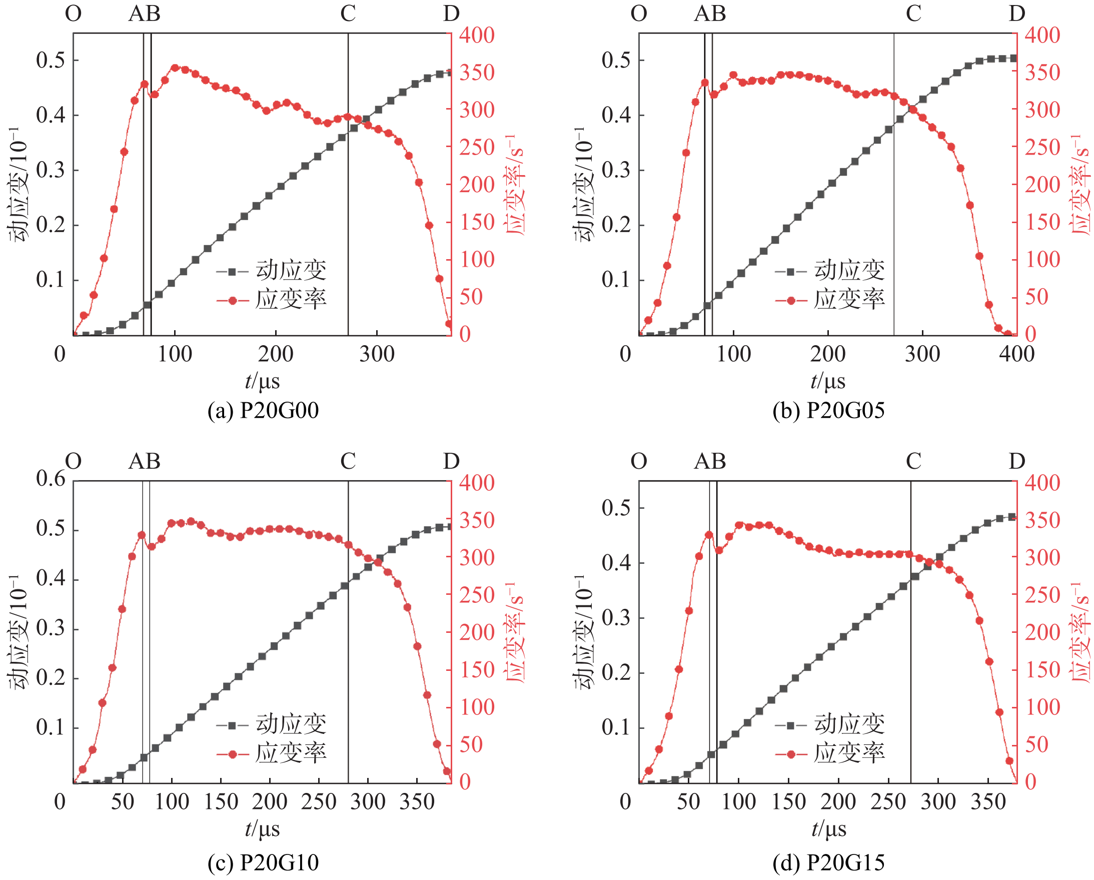


图6 在冲击速度 4.49 m/s 下不同石墨烯掺量试样的典型动应变–应变率时程曲线

Fig. 6 Typical dynamic strain–strain rate time-history curves for specimens with different graphene contents at an impact velocity of 4.49 m/s

2.3 冲击速度与应变率关联性

冲击速度对不同石墨烯掺量试样平均应变率的影响规律如图 7。

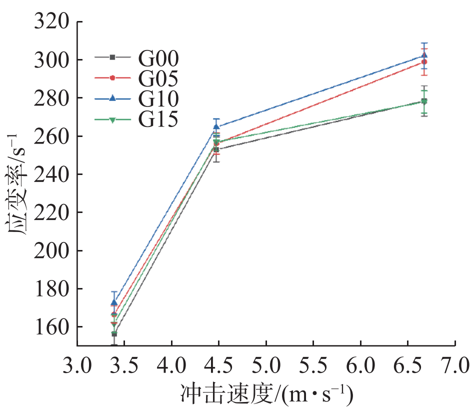


图7 冲击速度对石墨烯掺量试样平均应变率的影响

Fig. 7 Influence of impact velocity on the average strain rate of graphene-doped specimens

从图 7 可看出：在特定石墨烯掺量条件下，试样平均应变率随冲击速度的增加呈非线性增长特征。这种非线性关系主要在于：一方面，提高冲击速度直接增强加载速率；另一方面，高速冲击引发的显著材料损伤 (包括微裂纹扩展和结构破碎) 会削弱应变率的增长幅度。此外，在相同冲击速度工况下，石墨烯的掺入通过改善基体均匀性、提升致密程度和减少初始缺陷，有效提高了应力波传播速度，使得不同掺量石墨烯增强试样的平均应变率高于未掺石墨烯的对照组。

2.4 能量耗散机制

根据一维应力波理论、应力均匀性假设和能量守恒定律，计算石墨烯增强模拟月壤地聚合物的典型能量耗散。其入射能 (Q_{IE})、反射能 (Q_{RE})、透射能 (Q_{TE}) 与吸收能 (Q_{AE}) 的关系可表示为[24]：

$$Q_{AE} = Q_{IE}(t) - Q_{RE}(t) - Q_{TE}(t) = E_0C_0A_0\left(\int_0^{\tau}\varepsilon_{IE}^2(t)\mathrm{d}t - \int_0^{\tau}\varepsilon_{RE}^2(t)\mathrm{d}t - \int_0^{\tau}\varepsilon_{TE}^2(t)\mathrm{d}t\right) \tag{1}$$

式中：E_0, C_0 和 A_0 分别为杆件的弹性模量、纵波波速与横截面积；ε_{EI}, ε_{RE} 和 ε_{TE} 分别为入射应变、反射应变与透射应变。

冲击速度为 3.39 m/s 时，w=0.10% 石墨烯增强

模拟月壤地聚合物的典型能量演化特征如图 8。由图 8 可看出: 入射能、反射能和吸收能均随时间单调递增并最终达到稳定, 其中入射能始终最大而透射能保持最小。透射能始终维持在较低水平, 这主要是由于石墨烯增强试样与入射杆之间存在显著的波阻抗差异 (即试样波阻抗远低于入射杆)。当入射波传播至界面时, 大部分能量以反射波形式返回入射杆, 仅有少量能量能够穿透试样到达透射杆[16]。

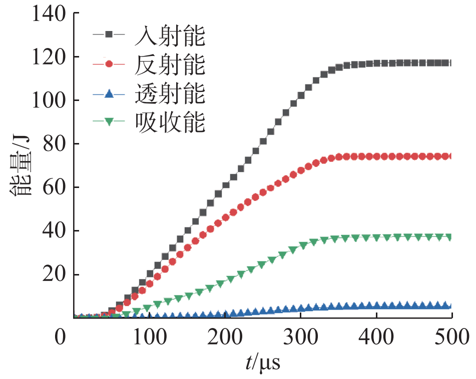


图8　石墨烯增强模拟月壤地聚合物的典型能量时程曲线 (v=3.39 m/s, w=0.10%)

Fig. 8　Typical energy time-history curves of graphene-reinforced simulated lunar soil geopolymer (v=3.39 m/s, w=0.10%)

不同冲击速度下石墨烯增强模拟月壤地聚合物 (w=0.10%) 的能量时程曲线如图 9。由图 9 可看出: 随冲击速度提高, 入射能和吸收能增长加快, 表现出显著速度相关性。冲击速度为 6.67 m/s 时, 两者达到最大值, 但吸收能始终远低于入射能; 在 6.67, 4.49, 3.39 m/s 冲击速度下, 入射能峰值分别为吸收能的 7.06, 6.66, 3.67 倍, 该比值随冲击速度升高而增大, 表明高速冲击下的能量转化效率反而越低。这是因为试样未能充分发生塑性变形等能量吸收机制, 冲击过程就已结束。

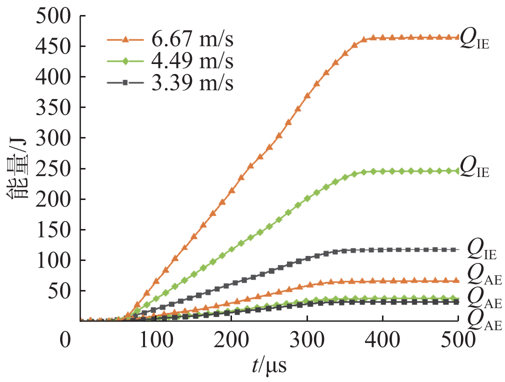


图9　不同冲击速度下石墨烯增强模拟月壤地聚合物的能量时程曲线 (w=0.10%)

Fig. 9　Energy time-history curves of graphene-reinforced simulated lunar soil geopolymer at different impact velocities (w=0.10%)

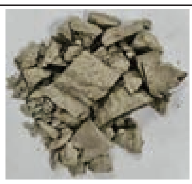
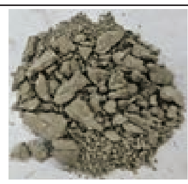
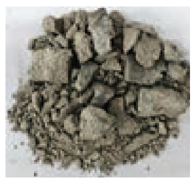
3　破坏模式表征

3.1　宏观破坏形态

最佳掺量组 G10 和对照组 G00 试样在冲击试验中的宏观损伤破坏特征如表 5。由表 5 可知: 随着冲击速度的提高, 两组试样均呈现显著的破坏形态; 但在相同冲击条件下, G10 组始终表现出相对较轻的损伤程度, 这与其更高的强度和损伤吸收能力相符。在冲击荷载作用下, 模拟月壤地聚合物的破坏过程表现为: 轴向压剪与横向拉伸复合作用引发主裂缝萌生, 随后通过微裂缝扩展导致材料整体性丧失, 最终形成具有粗糙断裂面的碎块状崩裂。石墨烯的掺入通过有效抑制裂缝扩展, 改善了材料的破坏模式。

表 5　不同石墨烯掺量试样的破坏状态特征

Tab. 5　Failure mode characteristics of specimens with different graphene contents

试样	损伤破坏状态		
G00	 3.39 m/s	 4.49 m/s	 6.67 m/s
G10	 3.39 m/s	 4.49 m/s	 6.67 m/s

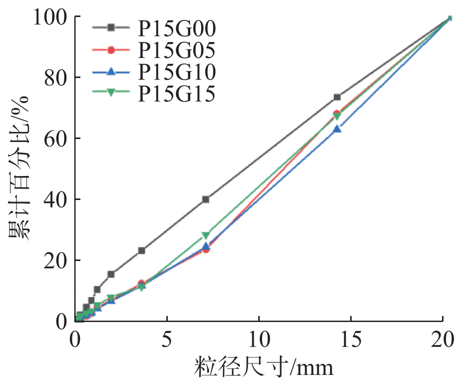
3.2 破碎分形特征

分形几何理论通过分形维数和无标度区间等参数,可有效表征破碎过程中呈现的统计自相似性特征,该方法在岩石破碎分析领域具有广泛应用。对于冲击破碎后的模拟月壤地聚合物块体,其质量分布通常遵循特定的分形规律,其数学表达式如下[25]:

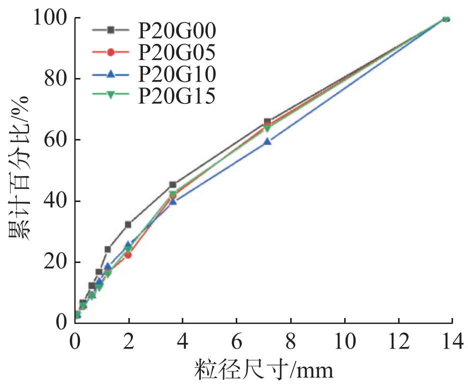
$$\frac{m_R}{m}=(\frac{R}{R'})^b$$
$$b=\frac{\lg(m_R/m)}{\lg(R/R')} \tag{2}$$
$$D=3-b$$

式中: D 为分形维数; m_R 为直径小于 R 的模拟月壤质量; R 为模拟月壤破碎物的等效直径; R' 为模拟月壤破碎物的平均粒径; m 为模拟月壤碎块质量; b 为双对数坐标系下 $\lg(m_R/m)/\lg(R/R')$ 的斜率。

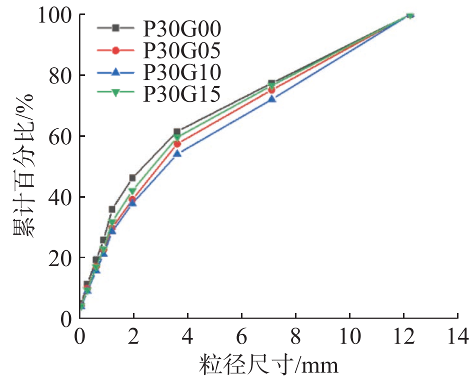
为分析冲击破坏后模拟月壤地聚合物的颗粒分布特征,收集动态压缩破坏后的试样碎块,采用孔径为 0.15, 0.45, 0.80, 1.00, 1.43, 2.50, 4.75, 9.50, 19.00 mm 的标准筛网进行分级筛分,并通过称量获得各粒径区间的质量分布数据,结果如图 10。由图 10 可以发现:在不同冲击速度条件下,掺入石墨烯的 G10 试样表现出较小比例的小粒径颗粒分布。这是由于掺入的石墨烯加速水化反应进程,促进地聚合物凝胶物质的形成;同时石墨烯凭借其独特的二维结构桥接基体微裂纹并减少孔隙缺陷,从而显著提升材料的结构密实性和抗破碎能力。



(a) 冲击速度3.39 m/s



(b) 冲击速度4.49 m/s

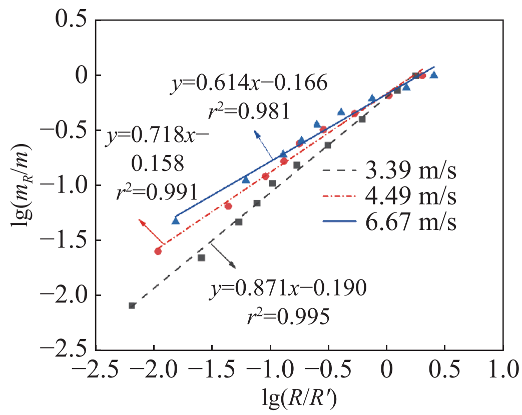


(c) 冲击速度6.67 m/s

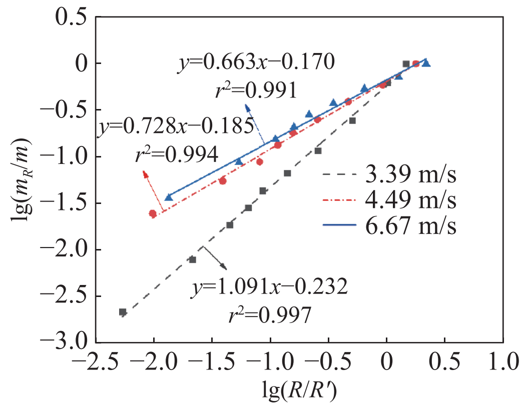
图10 不同掺量石墨烯试样破碎粒径累计占比

Fig. 10 Cumulative percentage distribution of fragment sizes for specimens with varying graphene contents

对照组 G00 和最佳掺量组 G10 试样破碎块度分形维数的拟合曲线如图 11。



(a) G00组



(b) G10组

图11 G00 和 G10 组试样破碎块度分形维数的拟合曲线

Fig. 11 Fractal dimension fitting curves of fragment size distribution for G00 and G10 group specimens

由图 11 可以看出:模拟月壤地聚合物破碎块度展现出良好的分形结构特征,呈近似直线的增长态势, r^2 均不小于 0.98; 当分形维数增大时试样的破碎度增加,破碎后剥落的小碎块占比增大,随着冲击速度的逐渐增大,其近似直线斜率 (b) 逐渐减小,而分

形维数 (D) 逐渐增大。这一变化反映出试样内部受到的损伤程度不断加剧, 最终表现为破损程度愈发严重。此结果与文献 [26−27] 中的研究结论一致, 同时表明采用分形维数表征冲击速度引发的模拟月壤地聚合物破碎块度是可行的。

分形维数与石墨烯掺量 (0~0.15%) 的关系曲线如图 12。由图 12 可以看出: 在相同冲击速度下, 分形维数随石墨烯掺量的增加而呈先减后增的态势。这是由于石墨烯能够有效调控模拟月壤地聚合物在动态冲击压缩下的破坏分形特征。当石墨烯掺量 (w=0.10%) 处于适宜水平时, 其可通过抑制裂纹无序扩展并优化碎片分布, 使裂纹扩展需额外消耗裂缝扩展能, 从而延缓材料破坏进程并增强材料的动态抗冲击韧性。然而, 当石墨烯掺量 (w>0.10%) 较高时易引发团聚效应, 导致其对材料性能的增强效果不显著。因此, 在相同冲击速度下, 当石墨烯掺量较低或较高时, 试样会发生整体碎裂破坏; 而石墨烯掺量适宜时试样仅在局部发生断裂破坏。这种差异直接导致前者碎块的分形维数大于后者。由图 12 可进一步看出, 固定石墨烯掺量, 模拟月壤地聚合物的分形维数与冲击速度呈正相关性, 随冲击速度的增加分形维数增大; 反之分形维数减小。

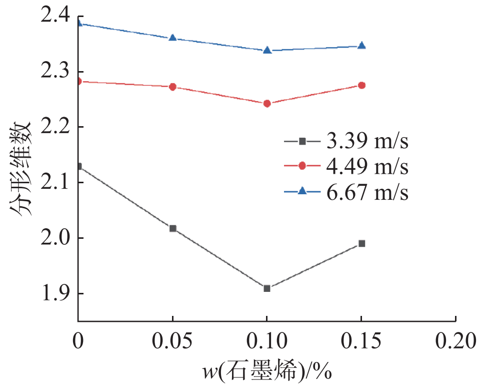


图12　试样破碎块度分形维数与石墨烯掺量的关系曲线

Fig. 12　Relationship between the fractal dimension of fragment size and graphene content

4　微观结构分析

对动态抗压破坏最佳掺量组 G10 和对照组 G00 试样的贯穿断裂面进行取样分析, 采用电子显微镜 (FlexSEM1000) 观察其断口特征, 结果如图 13。

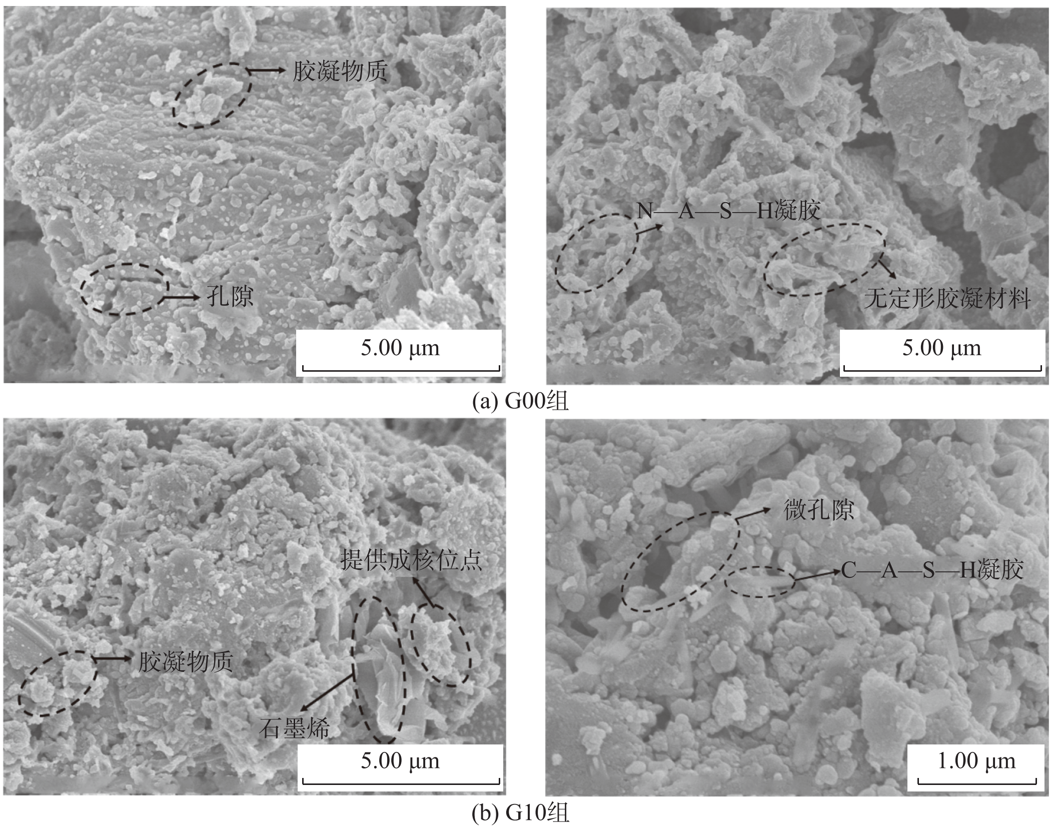


图13　G00 和 G10 试样在冲击试验下的微观断口特征

Fig. 13　Microscopic fracture characteristics of group G00 and G10 under impact tests

图 13 的界面过渡区 (interfacial transition zone, ITZ) 分析表明, G10 组试样局部结构断裂面致密性较高, 仅存在少量细孔隙, 石墨烯纳米片层结构有效填充 ITZ 区域孔隙, 并通过物理–化学作用增强界面

结合力。当裂缝扩展至石墨烯片层时,其独特的二维结构通过弹性变形和闭合应力机制显著提升裂纹扩展阻力。相比之下,G00 组试样整体结构断裂面较为疏松,分布大量细孔隙,ITZ 区域存在大量缺陷,在冲击荷载作用下易形成贯通裂纹路径。从反应机理看,石墨烯不仅可作为成核位点促进水化反应生成更多的 C—A—S—H 和 N—A—S—H 凝胶,更通过优化孔隙结构提升基体密实度;而对照组 (G00 组) 试样中未水化颗粒和毛细孔隙的广泛分布则成为材料破坏的薄弱环节。

5 结论

利用分离式霍普金森压杆 (SHPB) 系统对石墨烯增强的模拟月壤地聚合物开展冲击压缩试验,分析石墨烯掺量对模拟月壤地聚合物动态强度特性、能量耗散机制以及破碎分形特征的影响规律,得出以下主要结论:

1) 石墨烯增强模拟月壤地聚合物表现出显著的应变率强化效应,其动态抗压强度和动态强度因子均随冲击速度提高而单调递增。在冲击速度 3.39 m/s 条件下,材料强度随石墨烯掺量的变化呈现非线性响应特征,最佳掺量 0.10% 时强度提高效果 (增幅达 14.75%) 显著。动态变形过程分析表明,材料应变–应变率演化呈典型的四阶段特征,即初始增长、首次衰减、波动平台和二次衰减阶段,完整反映了从弹性变形到完全破坏的损伤累积过程。

2) 石墨烯增强模拟月壤地聚合物在动态冲击过程中,入射能、吸收能和反射能均呈先增长后稳定的变化趋势。当石墨烯掺量为 0.10% 时,不同冲击速度下入射能与吸收能的峰值比值存在显著差异,其中高速冲击工况下的能量转化效率反而降低。

3) 石墨烯增强模拟月壤地聚合物在动态冲击破碎后表现出典型的分形特征。石墨烯通过抑制裂纹随机扩展,显著改善了材料的微观结构完整性,从而有效提升了模拟月壤地聚合物在高应变率条件下的动态抗冲击性能。

4) 石墨烯在模拟月壤地聚合物体系中发挥多尺度增强作用:通过孔隙填充和微裂纹桥接效应有效限制损伤扩展,显著提升断裂过程中的能量吸收与耗散能力;同时作为成核位点促进地聚合反应,加速 C—A—S—H 和 N—A—S—H 胶凝相的生成,从而提升宏观力学性能,实现从纳米到宏观尺度的协同强化效果。

参考文献:

[1] 姜生元, 沈毅, 吴湘, 等. 月面广义资源探测及其原位利用技术构想 [J]. 深空探测学报, 2015, 2(4):291−301.
JIANG S Y, SHEN Y, WU X, et al. Technical schemes of investigation and in situ utilization for lunar surface generalized resources[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2015, 2(4):291−301.

[2] 马鹏程, 郭泽世, 苏秀中, 等. 月壤纤维材料研究进展与展望 [J]. 深空探测学报 (中英文), 2023, 10(5):532−543.
MA P C, GUO Z S, SU X Z, et al. Progress and perspect of lunar fiber materials[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2023, 10(5):532−543.

[3] 裴照宇, 王琼, 姜生元, 等. 面向月球科研站的原位资源利用活动展望 [J]. 前瞻科技, 2024, 3(1):9−21.
PEI Z Y, WANG Q, JIANG S Y, et al. Development prospect of in situ resource utilization activities in lunar research stations[J]. Science and Technology Foresight, 2024, 3(1):9−21.

[4] 裴照宇, 刘继忠, 王倩, 等. 月球探测进展与国际月球科研站 [J]. 科学通报, 2020, 65(24):2577−2586.
PEI Z Y, LIU J Z, WANG Q, et al. Overview of lunar exploration and international lunar research station[J]. Chinese Science Bulletin, 2020, 65(24):2577−2586.

[5] MA Q Y, ZHANG B B. Study on the performance mechanism of alumina-alkali activator synergistic solidified lunar soil simulant[J]. Case Studies in Construction Materials, 2024, 21:e03680.

[6] GU J H, MA Q Y. Experimental study on geopolymerization of lunar soil simulant under dry curing and sealed[J]. Materials, 2024, 17(6):1413.

[7] 姚羿舟, 刘超, 刘化威, 等. 热真空环境下碱激发模拟月壤物相分布特征与固化反应机理研究 [J]. 土木工程学报, 2025, 58(5):105−118.
YAO Y Z, LIU C, LIU H W, et al. Phase assemblage characteristics and solidification reaction mechanism of alkali-activated lunar regolith simulant in thermal vacuum environment[J]. China Civil Engineering Journal, 2025, 58(5):105−118.

[8] ZHANG R R, ZHOU S Q, LI F, et al. Mechanical and microstructural characterization of carbon nanofiber–reinforced geopolymer nanocomposite based on lunar regolith simulant[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2022, 34:04021387.

[9] 李峰, 陈姝予, 张荣荣, 等. 碳纳米纤维增强模拟月壤地聚合物抗冲击性能研究 [J]. 华中科技大学学报 (自然科学版), 2024, 52(8):76−83.
LI F, CHEN S Y, ZHANG R R, et al. Study on impact resistance of carbon nanofiber reinforced geopolymer based on lunar regolith simulant[J]. Journal of Huazhong

University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2024, 52(8):76−83.

[10] PAN Z, SANJAYAN J G, RANGAN B V. Fracture properties of geopolymer paste and concrete[J]. Magazine of Concrete Research, 2011, 63(10):763−771.

[11] FARHAN K Z, JOHARI M A M, DEMIRBOĞA R. Impact of fiber reinforcements on properties of geopolymer composites: a review[J]. Journal of Building Engineering, 2021, 44:102628.

[12] ZHANG W, LIANG Q, LI X J, et al. Discovery of natural few-layer graphene on the moon[J]. National Science Review, 2024, 11(12):211.

[13] LI J L, THAKUR A, LI Y X, et al. Phase formation and mechanical properties of graphene reinforced regolith composites[J]. Materials Today Communications, 2023, 35:106112.

[14] QIAN Y Q, XIAO L, YIN S, et al. The regolith properties of the Chang’E−5 landing region and the ground drilling experiments using lunar regolith simulants[J]. Icarus, 2020, 337:113508.

[15] WANG H Y, MA Q Y, WU Q Y. Damage constitutive model of lunar soil simulant geopolymer under impact loading[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2024, 16(3):1059−1071.

[16] 马芹永, 张波波, 简伟强, 等. 不同负温条件下模拟月壤动力学特性与能量耗散研究 [J]. 振动与冲击, 2025, 44(13):32−43.
MA Q Y, ZHANG B B, JIAN W Q, et al. Dynamic characteristics and energy dissipation of simulated lunar soil under different negative temperatures[J]. Journal of Vibration and Shock, 2025, 44(13):32−43.

[17] ZONG K Q, WANG Z C, LI J W, et al. Bulk compositions of the Chang’E−5 lunar soil: insights into chemical homogeneity, exotic addition, and origin of landing site basalts[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2022, 335:284−296.

[18] ZHOU S Q, LU C H, ZHU X Y, et al. Preparation and characterization of high-strength geopolymer based on BH−1 lunar soil simulant with low alkali content[J]. Engineering, 2021, 7(11):1631−1645.

[19] LI C Y, XIE K Y, LIU A M, et al. The preparation and characterization of NEU−1 lunar soil simulants[J]. JOM, 2019, 71(4):1471−1476.

[20] LI C L, HU H, YANG M F, et al. Nature of the lunar far-side samples returned by the Chang’E−6 mission[J]. National Science Review, 2024, 11(11):328.

[21] 李夕兵. 岩石动力学基础与应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2014.
LI X B. Fundamentals and Applications of Rock Dynamics[M]. Beijing: Science Press, 2014.

[22] 夏伟, 陆松, 白二雷, 等. 基于 SHPB 试验的碳纳米管增强混凝土动态压缩行为研究 [J]. 爆炸与冲击, 2024, 44(10):38−48.
XIA W, LU S, BAI E L, et al. A study of dynamic compression behavior of carbon nanotubes reinforced concrete based on SHPB test[J]. Explosion and Shock Waves, 2024, 44(10):38−48.

[23] 马芹永, 顾金辉. 两种纤维加筋模拟月壤地聚合物动态劈裂试验研究 [J]. 振动与冲击, 2024, 43(13):144−152,189.
MA Q Y, GU J H. Dynamic splitting tests of simulated lunar soil geopolymer reinforced with two types of fibers[J]. Journal of Vibration and Shock, 2024, 43(13):144−152,189.

[24] MA D D, XIANG H S, ZHOU Z W, et al. Study on energy dissipation characteristic of ice-rich frozen soil in SHPB compression tests[J]. Geofluids, 2022, 2022(1):1162357.

[25] LI G Z, SHI X S, GAO Y, et al. Reinforcing effects of carbon nanotubes on cement-based grouting materials under dynamic impact loading[J]. Construction and Building Materials, 2023, 382:131083.

[26] 李玉涛. 冲击荷载作用下混凝土破碎分形及能耗特性分析 [D]. 西安: 西安理工大学, 2020.
LI Y T. Fractal Characteristics and Energy Dissipation Analysis of Concrete under Impact Loading[D]. Xi’an: Xi’an University of Technology, 2020.

[27] 吴剑锋, 李慧剑, 王彩华, 等. 混凝土单轴压缩破碎分形研究 [J]. 硅酸盐通报, 2020, 39(7):2172−2177.
WU J F, LI H J, WANG C H, et al. Study on broken fractal of concrete under uniaxial compression[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2020, 39(7):2172−2177.

责任编辑: 何莉