

doi:10.12068/j.issn.1005-3026.2025.20230214

基于分形理论的RTPF混凝土冲击压缩性能

陈猛, 于航, 王瑜婷, 张通
(东北大学资源与土木工程学院, 辽宁沈阳 110819)

摘要: 为探寻回收轮胎聚合物纤维(RTPF)混凝土的冲击压缩性能与破碎后碎块尺寸分布规律的关系,利用直径100 mm的分离式霍普金森压杆对不同RTPF体积分数(0, 0.05%, 0.1%, 0.2%和0.4%)的混凝土进行冲击压缩试验.结果表明:应变率在 $38.2\sim 122.2\text{ s}^{-1}$ 时,不同掺量RTPF混凝土的分形维数范围为1.422~2.401;分形维数随应变率增加而增大,具有应变率效应;分形维数随RTPF掺量增加呈现先减小后增大的趋势,RTPF体积分数为0.1%时混凝土的分形维数最小;不同应变率下RTPF混凝土的动态抗压强度及耗散能均随分形维数的增加而增大;相同分形维数下,RTPF体积分数为0.1%时纤维与基体协同作用效果最佳,混凝土的动态抗压强度和耗散能提升幅度最大.利用分形理论建立RTPF混凝土的宏观损伤与冲击压缩性能的关系,可以确定混凝土中RTPF的最优掺量.

关键词: 纤维混凝土;回收轮胎聚合物纤维;分离式霍普金森压杆;分形维数;冲击压缩
中图分类号: TU 528.572 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2025)01-0127-07

Impact Compressive Properties of RTPF Reinforced Concrete Based on Fractal Theory

CHEN Meng, YU Hang, WANG Yu-ting, ZHANG Tong

(School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: ZHANG Tong, E-mail: zhangtong@mail.neu.edu.cn)

Abstract: In order to explore the relationship between the dynamic compressive performance of recycled tire polymer fiber (RTPF) reinforced concrete and the distribution rule of fragment size, the impact compression tests of concrete incorporating different volume fractions of RTPF (0, 0.05%, 0.1%, 0.2% and 0.4%) were conducted using a split Hopkinson pressure bar with a diameter of 100 mm. The results indicate that the fractal dimension of concrete with different RTPF contents ranges from 1.422 to 2.401 under the strain rates of $38.2\sim 122.2\text{ s}^{-1}$. The fractal dimension increases with the increase of strain rate, which has typical strain rate effect. The fractal dimension first decreases and then increases with the increase of RTPF content, and the fractal dimension of concrete reinforced with 0.1% RTPF is the lowest. The dynamic compressive strength and dissipated energy of RTPF reinforced concrete all increase with the increase of fractal dimension regardless of the strain rates. At the same fractal dimension, the fiber-matrix synergistic effect is the optimum under RTPF volume fraction of 0.1%, which provides the superior enhancement in the dynamic compressive strength and dissipative energy of concrete. The relationship between the macroscopic damage and dynamic compressive properties of RTPF reinforced concrete can be established using fractal theory to obtain the optimal content of RTPF for concrete.

Key words: fiber reinforced concrete; recycled tire polymer fiber (RTPF); split Hopkinson pressure bar (SHPB); fractal dimension; impact compression

混凝土结构在服役过程可能遭受地震、爆炸等冲击荷载作用^[1],在混凝土中掺入钢纤维、聚丙烯纤维等工业纤维可以提高混凝土的抗冲击性能^[2-3].近年来,国内外学者开展了回收轮胎聚合

收稿日期: 2023-07-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52178382, 52308395); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(N2201023, N2301023); 博士后创新人才支持计划项目(BX20230063); 中国博士后科学基金资助项目(2023M730526).

作者简介: 陈猛(1981—),男,辽宁开原人,东北大学教授,博士生导师.

物纤维(recycled tire polymer fiber, RTPF)混凝土的研究, Baričević 等^[4]及 Chen 等^[5-6]等研究表明 RTPF 能够抑制混凝土的早期收缩变形, 提高混凝土的抗冻融性能、动态力学性能与弯曲疲劳性能等, RTPF 可以替代工业聚丙烯纤维, 发挥节能减排的作用。

分形理论由 Mandelbrot 提出, 可用于研究在统计上具有自相似性的不规则形状和曲线特征^[7-8]. 混凝土冲击破坏的本质是混凝土由于抵抗冲击能量产生的微裂缝的不断萌发与扩展, 导致宏观上混凝土破坏的过程^[9]. 研究表明分形维数可以表征混凝土材料的冲击破碎特征^[10], 随着应变率的提高, 混凝土破碎程度加剧, 分形维数增加^[11]. 钢纤维混凝土的动态抗压强度与高温下玄武岩纤维混凝土的能耗密度均随分形维数的增加而增大^[12]. 目前没有关于 RTPF 混凝土破碎分形特征的研究, 需建立 RTPF 混凝土分形特征与力学性能的关系。

本文使用直径 100 mm 的分离式霍普金森压杆(split Hopkinson pressure bar, SHPB)对不同 RTPF 体积分数(0, 0.05%, 0.1%, 0.2% 和 0.4%)的混凝土进行冲击压缩试验, 对试验碎块进行筛分统计, 分析应变率和纤维掺量对分形维数的影响, 建立动态抗压强度和耗散能与分形维数的关系。

1 试验概况

1.1 原材料及配合比

试验采用 P.I 42.5 硅酸盐水泥; 细骨料采用天然河砂, 细度模数为 2.25; 粗骨料采用粒径为 5~10 mm 的碎石; 减水剂采用聚羧酸高性能减水剂, 减水率为 38%. RTPF 形貌如图 1 所示, 物理及力学性能见表 1. 混凝土配合比见表 2, RTPF 的体积质量分别为 0, 0.6, 1.2, 2.4 和 4.8 kg/m³(对应的体积分数分别为 0, 0.05%, 0.1%, 0.2% 和 0.4%)的混凝土, 编号分别记为 R0, R0.05, R0.1, R0.2 和 R0.4.

1.2 试件制备

将 RTPF 装入 500 mL 烧杯中, 根据配合比计算得到用水量, 取出 300 mL 的水倒入烧杯中, 浸泡 3 min 使 RTPF 完全湿润^[6]; 按照配合比将细骨料、粗骨料和水泥混合后干拌 1 min, 加入配合比中的减水剂和水搅拌不小于 2 min, 最后加入烧杯中的 RTPF 和水, 搅拌过程中观察并随机抽取拌合物直至无纤维结团现象^[13]. 将拌合物浇筑至直径 100 mm、高度 50 mm 的圆柱体模具内并振

捣密实, 静置 24 h 后脱模, 放入标准养护室(温度(20±2) °C、相对湿度≥95%)中养护至 28 d. 取出后对试件进行磨平, 保证试件两端面的平整度小于 0.05 mm.

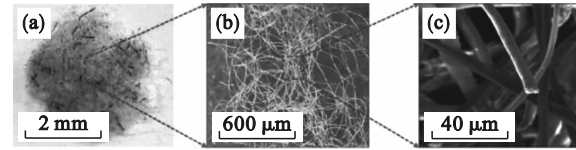


图 1 RTPF 形貌

Fig. 1 Morphology of RTPF

(a)—实物图; (b)—显微镜图; (c)—扫描电镜图.

表 1 RTPF 物理及力学性能

长度/mm	直径/ μm	密度/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	弹性模量/GPa
8.7±4.1	21.1±2.5	1 160	3.21

表 2 RTPF 混凝土配合比

试件编号	kg/m ³					
	水泥	粗骨料	细骨料	水	减水剂	RTPF
R0	472	1 144	616	218	2.36	0
R0.05	472	1 144	616	218	2.36	0.6
R0.1	472	1 144	616	218	2.36	1.2
R0.2	472	1 144	616	218	2.36	2.4
R0.4	472	1 144	616	218	2.36	4.8

1.3 试验设备及方法

试验采用直径为 100 mm 的 SHPB 装置, 如图 2 所示, 主要由气体储藏室、弹膛(4 500 mm)、撞击杆(600 mm)、入射杆(5 000 mm)、透射杆(3 500 mm)、吸收杆(1 200 mm)、激光测速仪和应变测试仪等组成. 冲击压缩试验中采用直径 50 mm, 厚度 2 mm 的橡胶垫片作为波形整形器, 试验的应变率范围约为 40~120 s⁻¹.

按照《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》测试混凝土拌合物的含气量. 高速冲击后试件产生破碎, 并伴随少量飞溅碎片, 试验后收集的碎块总质量相对于原试件质量减少约 5%. 采用孔径 1.18, 2.36, 4.75 和 9.5 mm 的标准方孔筛对碎块进行筛分, 使用精度 0.1 mg 的电子天平测得各级筛上的滞留碎块质量.

2 破坏形态及块度分布

2.1 破坏形态

RTPF 混凝土试件在不同应变率下的破坏形态见表 3, 随着应变率的增加, 试件破坏时碎块数

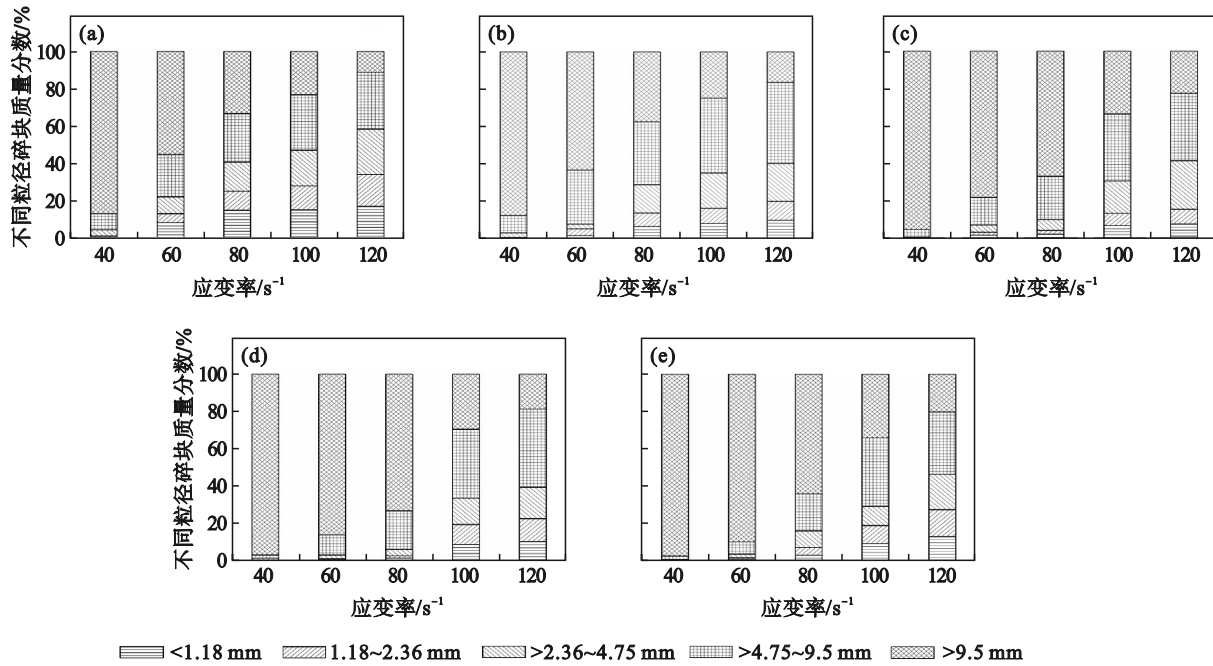


图 4 不同掺量 RTPF 混凝土试件破碎块度分布

Fig. 4 Fragment size distributions of concrete specimens reinforced by different RTPF contents

(a)—R0; (b)—R0.05; (c)—R0.1; (d)—R0.2; (e)—R0.4.

应变率小于 100 s^{-1} 时, 试件破碎后粒径 $>9.5 \text{ mm}$ 的碎块占比最高, RTPF 混凝土碎块的粒径主要为厘米级. 应变率达到 100 和 120 s^{-1} 左右时, RTPF 混凝土破坏时碎块趋于细粒化, 其中 R0.1 的粒径 $>9.5 \text{ mm}$ 碎块占比最大, 与 R0, R0.05, R0.2 和 R0.4 相比分别增加了 $44.6\% \sim 105.1\%$, $35.8\% \sim 38.7\%$, $12.2\% \sim 13.2\%$ 和 $0.4\% \sim 0.9\%$. RTPF 体积分数为 0.1% 时可以有效发挥桥连作用, RTPF 与混凝土协同工作处于最优状态, 纤维的掺入减缓了碎块粒径分布范围由厘米级向毫米级转化, 混凝土对冲击压缩荷载的抵抗能力有所提高.

3 分形特征

3.1 分形维数

分形维数 D_b 可用于描述冲击破碎特征, 通过建立质量与破碎尺寸的关系, 可得块度分布

方程^[15]:

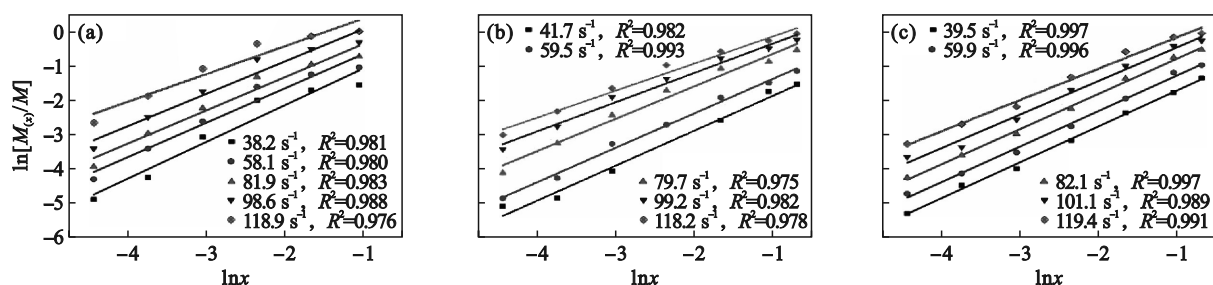
$$Y = M_{(x)}/M = (x/x_{\max})^{3-D_b} \quad (1)$$

式中: $M_{(x)}$ 为粒径小于 x 的碎块累计质量; M 为碎块总质量; x 为碎块粒径; x_{\max} 为碎块最大尺寸; D_b 为分形维数.

对式(1)两边同时取对数得

$$\ln Y = \ln [M_{(x)}/M] = (3 - D_b) \ln (x/x_{\max}) \quad (2)$$

由式(2)可知, $\ln [M_{(x)}/M] - \ln x$ 坐标中拟合的直线斜率为 $(3 - D_b)$, 即得到分形维数 D_b . 图 5 为不同掺量 RTPF 混凝土的 $\ln (M_{(x)}/M) - \ln x$ 曲线, 试验数据在双对数坐标下具有较好的线性相关性, 说明碎块分布为统计意义上的分形分布. 取不同应变率下分形维数最大值作为该材料的分形维数代表值, 当应变率为 $38.2 \sim 122.2 \text{ s}^{-1}$ 时, R0, R0.05, R0.1, R0.2 和 R0.4 的 D_b 变化范围分别为 $1.832 \sim 2.401$, $1.452 \sim 2.138$, $1.442 \sim 1.981$, $1.488 \sim 2.208$ 和 $1.506 \sim 2.338$.



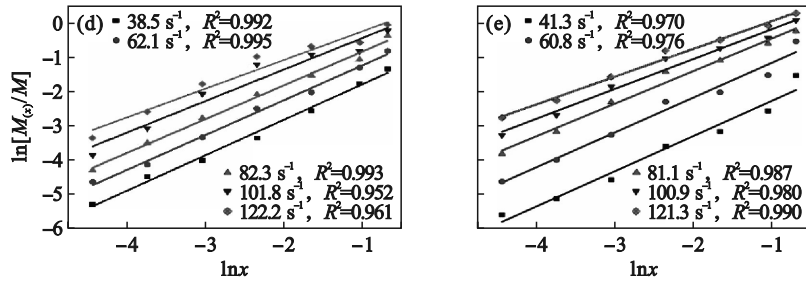


图 5 不同掺量 RTPF 混凝土的 $\ln [M_{(x)}/M]-\ln x$

Fig. 5 The $\ln [M_{(x)}/M]-\ln x$ curves of concrete reinforced by different RTPF contents

(a)—R0; (b)—R0.05; (c)—R0.1; (d)—R0.2; (e)—R0.4.

3.2 应变率对分形维数的影响

图 6 为不同掺量的 RTPF 混凝土分形维数随应变率的变化关系, RTPF 混凝土的分形维数随着应变率的增加而增大, 表现出较为显著的应变率效应^[16]. 当应变率在 40, 60, 80, 100 和 120 s^{-1} 左右时, RTPF 混凝土的分形维数与 R0 相比分别降低了 24.5%~34.6%, 7.2%~16.5%, 2.1%~16.6%, 1.1%~15.6% 和 3.3%~28.9%. 在高应变率作用下, 试件内部孕育并产生大量的微裂纹以耗散冲击能量^[6], 使混凝土的破碎程度加剧, 分形维数增大. 应变率为 40 s^{-1} 时, RTPF 混凝土的分形维数降低幅度最大, 随着应变率的增加, RTPF 混凝土的分形维数有所增大但整体仍小于 R0, 在 40~120 s^{-1} 应变率范围内, RTPF 有利于降低混凝土的宏观损伤.

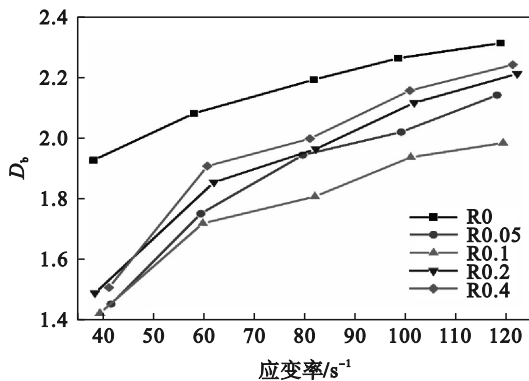


图 6 RTPF 混凝土分形维数随应变率的变化关系

Fig. 6 Variations of fractal dimension of RTPF reinforced concrete with strain rate

3.3 纤维掺量对分形维数的影响

图 7 为不同应变率下混凝土分形维数随 RTPF 掺量的变化关系, 分形维数随着 RTPF 的掺量增加呈先减小后增大的趋势, 当 RTPF 体积分数为 0.1% 时, 混凝土分形维数达到最小值, R0.1 与 R0, R0.05, R0.2 和 R0.4 相比分形维数分别下降了 2.1%~56.6%, 1.8%~17.4%, 7.0%~17.5%, 4.1%~16.2% 和 7.3%~17.5%.

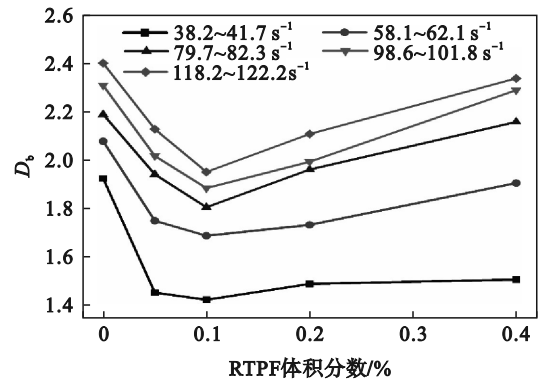


图 7 不同应变率下混凝土分形维数随 RTPF 掺量的变化关系

Fig. 7 Variations of fractal dimension of concrete with RTPF content under different strain rates

经测试, 试件编号 R0, R0.05, R0.1, R0.2 和 R0.4 中气体体积分数分别为 1.65%, 2.19%, 2.45%, 2.63% 和 2.85%. RTPF 混凝土的含气量随着 RTPF 掺量的增加而增加, 与 Chen 等^[6]的研究结论一致. R0 中气体的体积分数为 1.65%, R0.05, R0.1, R0.2 和 R0.4 中气体的体积分数分别比 R0 增加 32.7%, 48.5%, 59.4% 和 72.7%. 掺入适量的 RTPF 能够有效提升混凝土在受到冲击荷载作用时的完整性, 纤维在混凝土内发挥桥连裂缝的作用, 能够限制混凝土裂纹的扩展并吸收冲击荷载的能量^[17]; 当 RTPF 掺量过大时, 基体内部薄弱界面增多, 增加了混凝土的含气量并降低了密度^[18], 导致 RTPF 混凝土在冲击压缩荷载作用下分形维数增大. 综合国内外关于 RTPF 混凝土工作性能和静态力学性能的研究结论^[4-5, 19-20], RTPF 体积分数 0.1%~0.2% 为最优掺量范围.

4 冲击压缩性能与分形维数的关系

4.1 动态抗压强度与分形维数的关系

图 8 为 RTPF 混凝土的动态抗压强度随分形维数的变化关系, 不同 RTPF 掺量混凝土的动态

抗压强度均随着分形维数的增加而增大.对 RTPF 混凝土的分形维数和动态抗压强度进行拟合,拟合相关系数 R^2 均大于 0.9(见表 4),拟合方程与试验数据具有较好的相关性.原因是冲击作用下基体内部存在界面过渡区裂纹和贯穿骨料裂纹^[21-22],增多了裂纹网络,减小了破碎块度,造成分形维数增加;同时 RTPF 混凝土在冲击荷载下的横向惯性效应使应力状态由单向转为多向,增大了基体破坏的极限应力^[23-24],在相同破碎块度情况下,可以承受更大的冲击作用.从图 8 可以看出,相近分形维数(1.442~1.981)时,各掺量的 RTPF 混凝土中 R0.1 的动态抗压强度最大,表明在相同破碎程度时,体积分数为 0.1% 的 RTPF 与基体的协同作用最佳,限制了混凝土内部的裂纹扩展,降低了试件的破碎程度,在冲击荷载作用时对混凝土的动态抗压强度提升效果最明显.

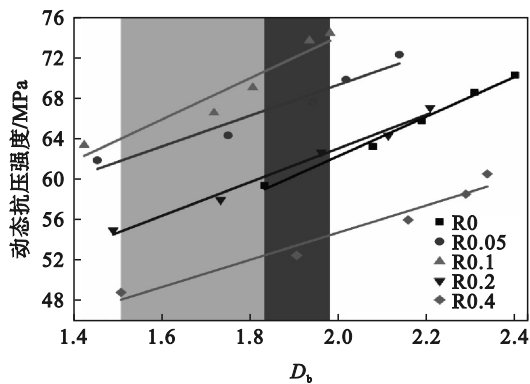


图 8 RTPF 混凝土动态抗压强度与分形维数的变化关系
Fig. 8 Variations of dynamic compressive strength of RTPF reinforced concrete with fractal dimension

表 4 动态抗压强度拟合方程

Table 4 Fitting equation for dynamic compressive strength

试件编号	拟合方程	R^2
R0	$f=19.42D_b+23.42$	0.992
R0.05	$f=15.10D_b+39.08$	0.948
R0.1	$f=20.24D_b+33.50$	0.923
R0.2	$f=16.52D_b+29.97$	0.986
R0.4	$f=13.34D_b+28.07$	0.957

注: f 为动态抗压强度.

4.2 耗散能与分形维数的关系

图 9 为 RTPF 混凝土的耗散能随分形维数的变化关系,由图可知 RTPF 混凝土的耗散能随分形维数增加的变化趋势与动态抗压强度相同,大致呈线性增长的趋势,与分形维数具有较好的拟合效果(见表 5).破碎块度与冲击荷载下试件的

裂纹数直接相关,裂纹的产生和扩展消耗了外部能量^[25].另外 RTPF 具有长度分布较广、长径比范围较大的特点,在 RTPF 混凝土中能够发挥长短纤维混杂的作用,在混凝土裂纹的产生和发展中与基体发生摩擦耗能^[26].相近分形维数(1.832~1.981)时,各掺量的 RTPF 混凝土的耗散能均大于 R0,其中 R0.1 的耗散能最大,表明掺入适量的 RTPF 可以抑制混凝土裂纹的发展,当新的微裂纹形成时,桥连在裂纹处的 RTPF 从基体中拔出消耗一部分能量,提高了混凝土在冲击荷载下的耗散能.当分形维数范围为 1.442~1.981 时,R0.2 和 R0.4 的耗散能小于 R0.1,这是因为 RTPF 过量掺入会增加混凝土的内部缺陷,纤维与混凝土基体的黏结性能减弱,在冲击荷载作用下裂纹扩展临界应力降低,导致混凝土内部裂纹迅速贯通,降低了对冲击能量的耗散能力.

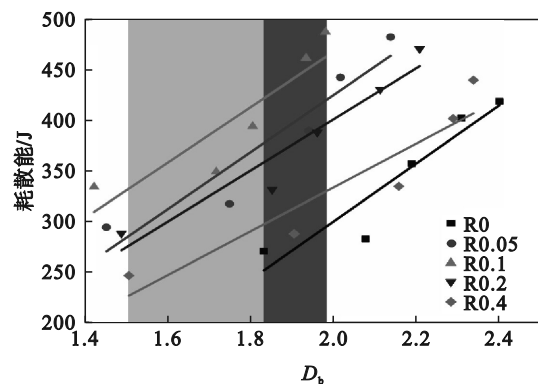


图 9 RTPF 混凝土耗散能与分形维数的变化关系
Fig. 9 Variations of dissipated energy of RTPF reinforced concrete with fractal dimension

表 5 耗散能拟合方程

Table 5 Fitting equation for dissipated energy

试件编号	拟合方程	R^2
R0	$W_d=373.13D_b-377.12$	0.957
R0.05	$W_d=317.95D_b-198.73$	0.995
R0.1	$W_d=321.44D_b-129.26$	0.999
R0.2	$W_d=399.40D_b-396.75$	0.973
R0.4	$W_d=392.01D_b-540.42$	0.959

注: W_d 为耗散能.

5 结 论

1) RTPF 混凝土冲击压缩破坏后的碎块满足统计意义上的分形规律.当应变率约为 40~120 s^{-1} 时,R0,R0.05,R0.1,R0.2 和 R0.4 的分形维数变化范围分别为 1.832~2.401, 1.452~2.138, 1.442~

1.981, 1.488~2.208 和 1.506~2.338.

2) 应变率越高, RTPF 混凝土的碎块数量越多, 尺寸越小, 分形维数越大. 随着 RTPF 掺量增加, RTPF 混凝土的分形维数呈先减小后增大的趋势, 且始终小于 R0 的分形维数, 其中 R0.1 的分形维数最小.

3) RTPF 混凝土的动态抗压强度和耗散能随着分形维数的增加而增大, 同时两者与分形维数近似呈线性关系. 相同分形维数下, R0.1 的动态抗压强度与耗散能最大, RTPF 可以有效提高混凝土的冲击压缩性能, 当 RTPF 体积分数为 0~0.2% 时, RTPF 体积分数 0.1% 为最优掺量.

参考文献:

- [1] Ossa A, Gaxiola A. Effect of water on the triaxial behavior under dynamic loading of asphalt concrete used in impervious barriers [J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 208: 333–342.
- [2] Li N, Jin Z Q, Long G C, et al. Impact resistance of steel fiber-reinforced self-compacting concrete (SCC) at high strain rates [J]. *Journal of Building Engineering*, 2021, 38: 102212.
- [3] Sun X W, Zhao K, Li Y C, et al. A study of strain-rate effect and fiber reinforcement effect on dynamic behavior of steel fiber-reinforced concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 158: 657–669.
- [4] Baričević A, Rukavina M J, Pezer M, et al. Influence of recycled tire polymer fibers on concrete properties [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2018, 91: 29–41.
- [5] Chen M, Chen W, Zhong H, et al. Experimental study on dynamic compressive behaviour of recycled tyre polymer fibre reinforced concrete [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2019, 98: 95–112.
- [6] Chen M, Zhong H, Zhang M Z. Flexural fatigue behaviour of recycled tyre polymer fibre reinforced concrete [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2020, 105: 103441.
- [7] Lan X L, Zeng X H, Zhu H S, et al. Experimental investigation on fractal characteristics of pores in air-entrained concrete at low atmospheric pressure [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2022, 130: 104509.
- [8] Mandelbrot B B, Passoja D E, Paullay A J. Fractal character of fracture surfaces of metals [J]. *Nature*, 1984, 308 (19): 721–722.
- [9] Xia W, Xu J Y, Nie L X. Research on the mechanical performance of carbon nanofiber reinforced concrete under impact load based on fractal theory [J]. *Crystals*, 2021, 11 (4): 387.
- [10] 赵昕, 徐世焱, 李庆华. 高温后超高韧性水泥基复合材料冲击破碎分形特征分析 [J]. *土木工程学报*, 2019, 52 (2): 44–55.
(Zhao Xin, Xu Shi-lang, Li Qing-hua. Fractal characteristics of fire-damaged ultra high toughness cementitious composite after impact loading [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2019, 52 (2): 44–55.)
- [11] 许金余, 刘石. 大理岩冲击加载试验碎块的分形特征分析 [J]. *岩土力学*, 2012, 33 (11): 3225–3229.
(Xu Jin-yu, Liu Shi. Research on fractal characteristics of marble fragments subjected to impact loading [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, 33 (11): 3225–3229.)
- [12] 任韦波, 许金余, 刘远飞, 等. 高温后玄武岩纤维混凝土冲击破碎分形特征 [J]. *振动与冲击*, 2014, 33 (10): 167–171, 188.
(Ren Wei-bo, Xu Jin-yu, Liu Yuan-fei, et al. Fractal characteristics of fragments of basalt fiber reinforced concrete after elevated temperatures under impact loading [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2014, 33 (10): 167–171, 188.)
- [13] Onuaguluchi O, Banthia N. Value-added reuse of scrap tire polymeric fibers in cement-based structural applications [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 231: 543–555.
- [14] Li Y, Zhang Y, Yang E H, et al. Effects of geometry and fraction of polypropylene fibers on permeability of ultra-high performance concrete after heat exposure [J]. *Cement and Concrete Research*, 2019, 116: 168–178.
- [15] Zhou Z L, Li X B, Zuo Y J, et al. Fractal characteristics of rock fragmentation at strain rate of 100 ~ 102 s⁻¹ [J]. *Journal of Central South University of Technology*, 2006, 13 (3): 290–294.
- [16] Zhang H, Wang L, Zheng K, et al. Research on compressive impact dynamic behavior and constitutive model of polypropylene fiber reinforced concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 187: 584–595.
- [17] Wu Z M, Shi C J, He W, et al. Static and dynamic compressive properties of ultra-high performance concrete (UHPC) with hybrid steel fiber reinforcements [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2017, 79: 148–157.
- [18] Hild F. On characteristic parameters involved in dynamic fragmentation processes [J]. *Mechanics of Materials*, 2015, 80: 340–350.
- [19] Baricevic A, Pezer M, Rukavina M J, et al. Effect of polymer fibers recycled from waste tires on properties of wet-sprayed concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 176: 135–144.
- [20] Chen M, Sun Z H, Tu W L, et al. Behaviour of recycled tyre polymer fibre reinforced concrete at elevated temperatures [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2021, 124: 104257.
- [21] Sukontasukkul P, Nimityongskul P, Mindess S. Effect of loading rate on damage of concrete [J]. *Cement and Concrete Research*, 2004, 34 (11): 2127–2134.
- [22] Wang S S, Zhang M H, Quek S T. Mechanical behavior of fiber-reinforced high-strength concrete subjected to high strain-rate compressive loading [J]. *Construction and Building Materials*, 2012, 31: 1–11.
- [23] Kotsovos M D. Effect of testing techniques on the post-ultimate behaviour of concrete in compression [J]. *Materiaux et Construction*, 1983, 16 (1): 3–12.
- [24] Li Q M, Meng H. About the dynamic strength enhancement of concrete-like materials in a split Hopkinson pressure bar test [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2003, 40 (2): 343–360.
- [25] Liu P F, Liu J, Bi J. Experimental and theoretical study of dynamic mechanical behavior of concrete subjected to triaxial confining and impact loads [J]. *Journal of Building Engineering*, 2023, 64: 105715.
- [26] Zhang H, Wang L, Bai L Y, et al. Research on the impact response and model of hybrid basalt-macro synthetic polypropylene fiber reinforced concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 204: 303–316.