

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2022.093



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



橡胶粉改性聚乙烯纤维增强水泥基复合材料的 静力和抗冲击性能

贺绍华, 陈焕伟, 江政, 禹智涛
(广东工业大学土木与交通工程学院, 广州 510006)

摘要:为研究橡胶粉改性聚乙烯纤维增强水泥基复合材料(PE-ECC)的物理力学性能,对掺入不同粒径橡胶粉的PE-ECC进行静力和抗冲击性能试验。通过分析橡胶粉PE-ECC的弹性模量、泊松比、立方体抗压强度、轴心抗压强度、劈裂抗拉强度和轴心抗拉强度,探讨不同橡胶粉粒径对PE-ECC基本力学性能的影响;利用分离式霍普金森压力杆进行橡胶粉PE-ECC的抗冲击性能试验,基于不同应变率下的动态应力-应变曲线,分析应变率对橡胶粉PE-ECC动态增长因子(DIF)、动态压缩强度和动态峰值应变的影响。结果表明:随着橡胶粉的加入,PE-ECC的各项物理力学性能均有一定程度下降;橡胶粉粒径为0.20~0.90 mm时,体积掺量为10%、橡胶粉粒径为0.30 mm的PE-ECC各项力学性能降幅最小,其立方体抗压强度、轴心抗压强度、弹性模量和动态抗压强度相对无橡胶粉PE-ECC分别减小了8.9%、15.6%、10.8%和23.4%;与无橡胶粉PE-ECC类似,橡胶粉PE-ECC的受拉应变硬化特征明显,掺入不同粒径(0.20~0.90 mm)橡胶粉的PE-ECC极限拉应变均稳定在4.6%左右。此外,橡胶粉粒径对PE-ECC动态峰值应变影响很小,随着冲击应变率的提高,橡胶粉PE-ECC的动态增长因子DIF和动态压缩强度呈逐渐增大趋势。

关键词:聚乙烯纤维;水泥基复合材料;橡胶粉;静力性能;抗冲击性能

中图分类号:TU599;TB332 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2024)06-0167-08

Static and impact properties of rubber powder modified polyethylene fiber-reinforced cement-based composites

HE Shaohua, CHEN Huanwei, JIANG Zheng, YU Zhitao

(School of Civil and Transportation Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, P. R. China)

Abstract: In order to investigate the mechanical properties of polyethylene fiber-reinforced engineered cementitious composites (PE-ECC) with rubber powder, static and impact resistance tests were carried out on the PE-ECC with varying parameters of rubber powder particle sizes and strain rates. Elastic modulus, Poisson's ratio, cubic compressive strength, primal strength, splitting tensile strength, and axial tensile strength of the rubber powder PE-ECC were experimentally obtained, and the influence of rubber powder particle sizes on static mechanical properties of the PE-ECC were analyzed. The impact performance of the PE-ECC with rubber

收稿日期:2022-06-03

基金项目:国家自然科学基金(51908138);广东省自然科学基金(2020A1515011355)

作者简介:贺绍华(1989-),男,博士,副教授,主要从事基于高性能材料的组合结构研究, E-mail: hesh@gdut.edu.cn.

Received: 2022-06-03

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No. 51908138); Natural Science Foundation of Guangdong Province (No. 2020A1515011355)

Author brief: HE Shaohua (1989-), PhD, associate professor, main research interest: steel-concrete composite structure based on high performance materials, E-mail: hesh@gdut.edu.cn.

powder was evaluated using a split Hopkinson pressure bar, and the dynamic growth factor of strain rate on the dynamic impact factor (DIF), peak dynamic stress, and peak dynamic strain were analyzed. The experimental results indicate that the mechanical properties of the PE-ECC decreased with the usage of rubber powder. For the particle size of rubber powder ranged from 0.2 mm to 0.9 mm, the PE-ECC with particle sizes of 0.3 mm for rubber powder exhibited acceptable static and dynamic performance. Comparing to the PE-ECC without any rubbers, the cubic compressive strength, primal strength, elastic modulus, and dynamic compressive strength of the PE-ECC using 0.30 mm-particle size rubber powder and a volume content of 10% decreased by 8.9%, 15.6%, 10.8%, and 23.4%. Similar to the PE-ECC without rubber powder, the tensile strain hardening effect of rubber powder P-ECC was significant and the ultimate tensile strain of PE-ECC with different partial size (0.20-0.90 mm) rubber powder remained at 4.6%. Moreover, with the increase of impact strain rate, the DIF and dynamic compressive strength of rubber powder PE-ECC gradually increased.

Keywords: polyethylene fiber; cement-based composites; rubber powder; static properties; impact properties

随着汽车成为现代交通工具的重要组成部分,中国生产和报废的汽车轮胎数量逐年递增,仅2020年生产的轮胎数量就超过8亿条^[1],传统废旧轮胎处理带来的环境污染问题不容忽视。探寻更为合理有效的废旧轮胎再生循环利用途径,对推动绿色交通发展、实现“双碳”目标意义重大^[2]。

利用废旧轮胎回收得到的橡胶颗粒替代部分细骨料制成橡胶混凝土,不仅能节约天然矿石资源,减少废旧轮胎带来的环境污染,还可以改善混凝土抗裂、抗冲击及降噪性能^[3-4]。目前,已有不少学者对橡胶混凝土的物理力学性能展开研究。薛刚等^[5]在混凝土中掺入橡胶粉,发现橡胶混凝土的弹性模量略有降低,但其在裂缝失稳扩展前的稳定扩展阶段更长。屠艳平等^[6]发现橡胶粉会增大混凝土内部含气量,削弱其抗压强度、劈裂抗拉强度和密实度。郭永昌等^[7]对橡胶混凝土的抗冲击性能进行了试验研究,发现其抗冲击性能明显优于普通混凝土。Xiao等^[8]对再生混凝土冲击性能的研究发现,再生骨料的添加会增加试件的峰值应变和DIF值。龙广成等^[9]进行的橡胶混凝土研究显示,随着橡胶掺量增加,水泥砂浆的动弹性模量和固有频率逐渐下降,但降噪性能提升明显。纤维增强水泥基复合材料(engineered cementitious composites, ECC)是一种具有超高韧性、应变硬化及多缝开裂特性的新型建筑材料,在土木工程领域应用前景广阔^[10]。以往有关橡胶改性ECC的研究成果表明:在ECC中掺入橡胶粉可显著增强压缩韧性,并改善其吸能能力。Huang等^[11]基于试验结果分析发现,由于基体内部孔隙率增加,橡胶粉ECC的抗裂性能削弱明显。夏叶飞等^[12]研究了橡胶粉掺量对ECC抗压性能的影响,发现橡胶掺量低于10%时,其压缩韧性提升显著。马昆林等^[13]和李艳等^[14]进行的ECC抗冲击性能研究表明,橡胶粉ECC具有较强的应变率

效应,其动态峰值应力、峰值应变和韧性均随应变率增加逐渐提高。目前,对橡胶粉ECC基本力学性能的研究正逐步展开,对冲击荷载作用下其动力性能的研究尚处于起步阶段。

为研究橡胶粉PE-ECC的静力性能和抗冲击性能,笔者设计了1组无橡胶粉PE-ECC和4组以橡胶粉粒径为基本参数的橡胶粉PE-ECC,对其立方体抗压强度、轴心抗压强度、弹性模量、泊松比、劈裂抗拉强度、轴向拉伸性能、动态抗压强度等进行试验研究,分析不同应变率下橡胶粉PE-ECC的动态压缩性能。

1 试验

1.1 试验材料

水泥:P·O 52.5普通硅酸盐水泥。高炉矿渣:细粒化高炉矿渣粉S105级。粉煤灰:F类I级粉煤灰。石英砂:粒径为0.15~0.25 mm。聚乙烯纤维:高强高模聚乙烯纤维,性能参数见表1。橡胶粉:废旧轮胎橡胶粉,如图1所示,粒径分0.20、0.30、0.45、0.90 mm。外加剂:浓度为40%的聚羧酸高效减水剂,其减水率为30%。

表1 PE纤维的性能

Table 1 Properties of PE Fiber

长度/ mm	直径/ μm	断裂伸 长率/%	拉伸模量/ MPa	拉伸强度/ MPa	密度/ (g/cm ³)
18	24	2	116×10 ³	3 000	0.97~0.98

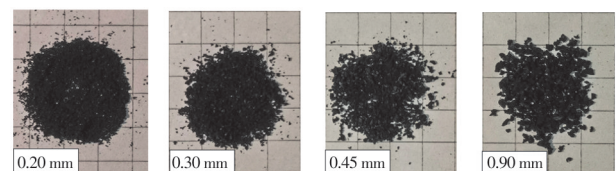


图1 不同粒径橡胶粉

Fig. 1 Rubber powder with different particle sizes

1.2 配合比与试件制备

以往研究表明^[12],ECC中橡胶粉掺量为10%时各项性能最佳。如表2所示,在对照组A基础上,利用橡胶粉按10%等体积替代细骨料石英砂。根据橡胶粉粒径大小,橡胶粉PE-ECC包括粒径为0.20 mm(与被替换的石英砂粒径接近)的B组、0.30 mm的C组、0.45 mm的D组和0.90 mm的E组。为确保搅拌过程中束状PE纤维分散均匀,采用空气压

缩机预先分散PE纤维。首先,将胶凝材料、橡胶粉和石英砂混合干拌;然后,加入部分水和减水剂的混合溶液,搅拌2 min后倒入剩余混合溶液,快速搅拌至出浆;最后,加入预先分散好的PE纤维并搅拌均匀。将搅拌好的PE-ECC装入试模,置于振捣台上振捣2 min,静置24 h后脱模,然后在20℃、RH95%的标准条件下养护28 d,测试其静力和抗冲击性能。

表2 橡胶粉PE-ECC配合比

Table 2 Mix proportions of rubber powder PE-ECC

分组	水泥 用量/%	粉煤灰 用量/%	高炉矿渣 用量/%	砂 用量/%	水 用量/%	减水剂 用量/%	PE纤维 掺量/%	橡胶粉 粒径/mm	橡胶粉 掺量/%
A组	43.68	5.82	8.74	29.12	14.56	1.00	2.00		
B组	43.68	5.82	8.74	26.21	14.56	1.00	2.00	0.20	10
C组	43.68	5.82	8.74	26.21	14.56	1.00	2.00	0.30	10
D组	43.68	5.82	8.74	26.21	14.56	1.00	2.00	0.45	10
E组	43.68	5.82	8.74	26.21	14.56	1.00	2.00	0.90	10

注:水泥、粉煤灰、高炉矿渣、砂、水和减水剂用量为占胶体总质量的百分比;PE纤维和橡胶粉掺量均为体积分数,其中橡胶粉为10%等体积替代细砂。

1.3 静力性能测试

参照《建筑砂浆基本性能试验方法标准》(JGJ/T 70—2009)^[15],立方体抗压强度和劈裂抗拉强度试验均采用边长为100 mm的立方体试件,通过DYE-3000型压力试验机进行加载。轴心抗压强度试验采用直径100 mm、高200 mm的圆柱体试件,通过MATSET材料压缩试验机进行加载。弹性模量和泊松比按ASTM-C469规范^[16]测试。抗拉强度试验采用JSCE CES82^[17]推荐的330 mm×60 mm×13 mm狗骨头试件,其中部受拉区尺寸为80 mm×30 mm×13 mm,通过STS-100微机控制电子万能试验机测试其拉伸性能。

1.4 SHPB冲击性能测试

如图2所示,动态压缩性能试验通过分离式霍普金森压力杆(SHPB)和直径100 mm、高50 mm的试件进行。SHPB由撞击杆、入射杆、透射杆、能量吸收杆和数据采集系统组成。当撞击杆撞击入射杆时,入射杆上的应变片记录入射脉冲 $\epsilon_i(t)$ 。由于入射杆和冲击试件的波阻抗不同,部分脉冲透过试件传递至透射杆,并由透射杆上的应变片记录透射脉冲 $\epsilon_t(t)$ 。沿入射脉冲原路径反射回入射杆的剩余脉冲,则通过入射杆上的应变片记录反射脉冲 $\epsilon_r(t)$ 。撞击杆、入射杆和透射杆的长度分别为1 000、5 500、3 500 mm,杆直径、弹性模量和密度分别为100 mm、206 GPa和7 710 kg/m³。控制气压为0.6、0.7、0.8 MPa,不同冲击速度对应的应变率为37、53、66 s⁻¹。应力 $\sigma_s(t)$ 、应变 ϵ_s 和应变率 $\dot{\epsilon}_s$ 分别按式(1)~式(3)计算^[18]。

$$\sigma_s(t) = \frac{AE_0}{A_s} \epsilon_i(t) \quad (1)$$

$$\epsilon_s = -\frac{2c_0}{l_0} \int_0^t \epsilon_r dt \quad (2)$$

$$\dot{\epsilon}_s = -\frac{2c_0}{l_0} \epsilon_r \quad (3)$$

式中: A 、 E_0 和 c_0 分别为杆的横截面积、弹性模量和波速; A_s 和 l_0 分别为试件的横截面积和长度; t 为时间。



(a) SHPB装置 (b) 打磨后的试件

图2 橡胶粉PE-ECC抗冲击性能试验

Fig. 2 Rubber powder PE-ECC impact resistance test

2 静力试验结果与分析

2.1 抗压强度

图3为立方体抗压试件的典型破坏形态。与其他学者观察到的PE-ECC破坏形态相似^[19],橡胶粉PE-ECC受压破坏后,其立方体侧面竖向开裂明显,但未发生明显的外鼓或剥落。这是由于PE纤维的桥连作用有效阻止了水泥基体中微裂纹的扩展,立方体受压破坏后仍保持了良好的完整性。

表3为测得的橡胶粉PE-ECC立方体抗压强度

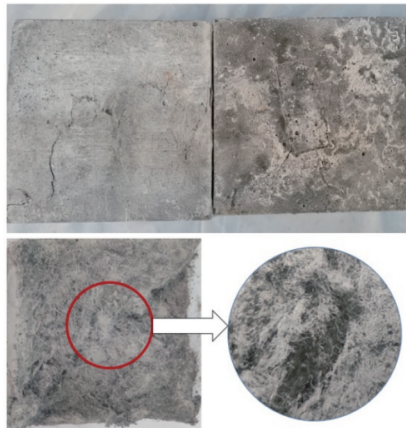


图 3 立方体试件典型破坏形态

Fig. 3 Typical failure modes of cube specimens

和轴心抗压强度。可以看出,随着橡胶粉的加入,PE-ECC 的抗压强度降低明显。橡胶粉粒径为 0.20 mm 时(粒径与等体积替换的细砂一致),橡胶粉 PE-ECC 的立方体抗压强度和轴心抗压强度相对 A 组(无橡胶粉对照组)降低了 17.3% 和 20.0%。对于试验选用的 0.20~0.90 mm 粒径橡胶粉,当粒径为 0.30 mm 时,橡胶粉 PE-ECC 的立方体抗压强度和轴心抗压强度均较高,表明该粒径的橡胶粉对其抗压强度削弱较小。橡胶粉作为一种惰性材料,难以与水直接反应形成水化产物,仅能起到填充内部空隙的作用。同一掺量下,橡胶粉粒径越小,其总比表面积越大,胶凝材料与石英砂的结合面被削弱得越严重^[20]。总体而言,在本试验选用的橡胶粉粒径范围内,橡胶粉 PE-ECC 的抗压强度随橡胶粉粒径增大呈增长趋势。

表 3 立方体抗压强度和轴心抗压强度

Table 3 Cube compressive strength and axial compressive strength

组别	立方体抗压强度/MPa	轴心抗压强度/MPa
A 组	84.90	68.09
B 组	70.17	54.47
C 组	77.37	57.47
D 组	71.24	55.43
E 组	72.77	57.07

根据《活性粉末混凝土》(GB/T 31387—2015)^[21],普通混凝土的立方体抗压强度和轴心抗压强度换算公式为 $f_{ck}=0.7f_{cu}$ 。采用该公式计算试验橡胶粉 PE-ECC 的轴心抗压强度,得到其与实测强度的比值为 0.89~0.94。在此基础上,给出修正后的橡胶粉 PE-ECC 抗压强度换算关系式为

$$f'_{ck}=0.77f'_{cu} \quad (4)$$

式中: f'_{ck} 、 f'_{cu} 分别为橡胶粉 PE-ECC 的轴心抗压强度和立方体抗压强度。

由式(4)计算得到的橡胶粉 PE-ECC 抗压强度回归系数 $R^2=0.86$,皮尔逊相关系数为 0.93,表明二者相关性较好。

2.2 弹性模量与泊松比

根据 ASTM-C469^[16],橡胶粉 PE-ECC 的弹性模量和泊松比参考式(5)、式(6)取值。

$$E = \frac{S_2 - S_1}{\epsilon_2 - 0.000\ 050} \quad (5)$$

$$\lambda = \frac{\epsilon_{t2} - \epsilon_{t1}}{\epsilon_2 - 0.000\ 050} \quad (6)$$

式中: S_2 为峰值应力的 40%; ϵ_2 为 S_2 对应的纵向应变; S_1 为纵向应变为 0.000 050 对应的应力; ϵ_{t2} 为 40% 峰值应力对应的横向应变; ϵ_{t1} 为纵向应变为 0.000 050 对应的横向应变。

表 4 为橡胶粉 PE-ECC 的弹性模量和泊松比。可以看出,随着橡胶粉的加入,PE-ECC 的弹性模量有所降低,而泊松比整体增大。橡胶粉粒径为 0.20 mm 时,B 组 PE-ECC 的弹性模量相对 A 组降低了 15.1%,泊松比则增大了 15.2%。这是由于橡胶粉的弹性模量远低于石英砂,且其与胶凝材料的黏结界面也相对更弱,受压更易变形。此外,橡胶粉的加入会削弱水泥基体对 PE 纤维的锚固作用,导致 PE 纤维的裂纹桥联作用消退,受压时的横向变形增大,因而橡胶粉 PE-ECC 的泊松比更大。随着粒径由 0.20 mm 增大至 0.90 mm,橡胶粉 PE-ECC 的弹性模量和泊松比波动明显,且橡胶粉粒径为 0.45 mm 时的泊松比最大,表明该粒径橡胶颗粒对纤维的裂纹桥联作用削弱最严重。

表 4 试件的弹性模量和泊松比

Table 4 Elastic modulus and Poisson's ratio of the specimen

组别	弹性模量/(10^4 MPa)	泊松比
A 组	2.79	0.165
B 组	2.37	0.190
C 组	2.49	0.186
D 组	2.40	0.214
E 组	2.51	0.209

2.3 劈裂抗拉强度

劈裂抗拉强度试验参照《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2019)进行。由于纤维桥联作用能抑制裂缝扩展,劈裂荷载作用下,PE-ECC 未发生剧烈的脆性破坏。加载过程中,裂缝两侧的 PE 纤维不断被拔出或拉断,纤维桥联作用逐渐失效,最终导致沿主裂缝缓慢劈裂破坏。

由于橡胶粉增加了 PE-ECC 内部的初始缺陷,劈裂荷载下,缺陷处的应力集中效应更明显^[22],图 4

显示不同粒径的橡胶粉PE-ECC劈裂抗拉强度相对无橡胶粉对照组均有不同程度的下降。橡胶粉粒径为0.20 mm时,橡胶粉PE-ECC的劈裂抗拉强度相对A组降低了22.2%。粒径由0.20 mm增大至0.90 mm,橡胶粉PE-ECC的劈裂抗拉强度稳定在4.6 MPa左右,橡胶粉粒径对PE-ECC劈裂抗拉强度的影响可忽略不计。

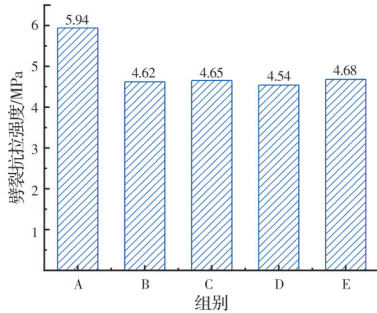


图4 PE-ECC劈裂抗拉强度

Fig.4 Splitting tensile strength of PE-ECC

2.4 轴向拉伸性能

图5为测得的橡胶粉PE-ECC轴向拉伸应力-应变曲线,轴心抗拉强度见表5。轴向拉伸加载时,橡胶粉PE-ECC呈现典型的多缝开裂特征。多缝开裂是由纤维的最大桥接应力大于基体开裂强度所致^[23],而橡胶粉的加入大幅削弱了PE纤维与水泥基体的界面黏结作用,加速主裂缝的形成,导致极限状态下橡胶粉PE-ECC的裂缝数量明显比无橡胶粉对照组更少。

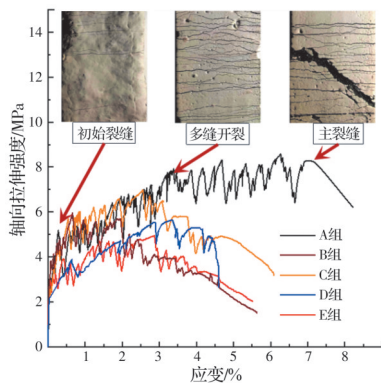


图5 各组轴向拉伸试件应力-应变曲线

Fig.5 The stress-strain curve of each group of axial tensile specimens

结合图5,各组PE-ECC的轴向拉伸应力-应变早期均保持线性增长,在裂缝出现后,拉伸应力短暂下降,而后波动回升并进入平台段,最后随主裂缝出现丧失承载能力。与无橡胶粉PE-ECC相比,粒径为0.20 mm的橡胶粉PE-ECC初裂抗拉强度、极限抗拉强度和极限拉应变分别减小了5.2%、30.2%和33.9%。与此同时,粒径由0.20 mm增大

表5 狗骨头试件拉伸试验结果

Table 5 Tensile test results of dog bone specimens

组别	初裂抗拉强度/ 极限抗拉强度/		极限拉应变/%
	MPa	MPa	
A组	4.03	8.53	6.96
B组	3.82	5.95	4.60
C组	3.54	6.91	4.69
D组	3.49	5.64	4.55
E组	3.10	4.95	4.58

至0.90 mm,橡胶粉PE-ECC的初裂抗拉强度进一步降低了18.8%。结合表5,粒径为0.30 mm的橡胶粉PE-ECC极限抗拉强度和极限拉应变相对其他橡胶粉PE-ECC均更高,表明该粒径橡胶粉对PE纤维与水泥基体的锚固及拉伸性能影响相对较小。

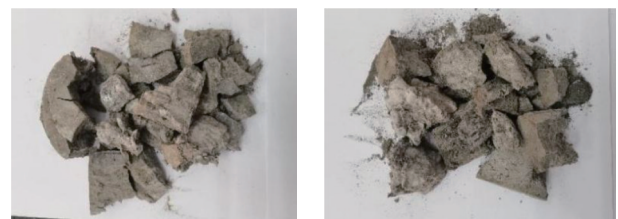
3 冲击试验结果与分析

3.1 破坏形态

图6为冲击加载后的PE-ECC破坏形态。可以看出,随着冲击应变率提高,试块的破碎程度越剧烈。不同于普通混凝土的完全碎裂破坏,试验观察到PE-ECC的大部分碎块被纤维连接在一起,且破碎面附近的纤维呈乱向分布。同一冲击应变率下,橡胶粉PE-ECC的破坏程度相对无橡胶粉对照组更剧烈。这是由于橡胶粉增加了PE-ECC内部的初始缺陷,冲击荷载作用下横向变形增大,致使破碎更严重。此外,不同粒径橡胶粉PE-ECC的冲击破坏形态相似,橡胶粉粒径对PE-ECC的冲击破坏形态影响较小。

3.2 动态应力-应变曲线

图7为不同应变率下无橡胶粉PE-ECC(A组)



(a) 应变率 37 s^{-1}

(b) 应变率 53 s^{-1}



(c) 应变率 66 s^{-1}

图6 不同应变率的橡胶粉PE-ECC破坏形态

Fig.6 Failure morphology of rubber powder PE-ECC at different strain rates

和 0.20 mm 粒径橡胶粉 PE-ECC(B 组)的动态应力-应变曲线。可以看出,由于橡胶颗粒具有更强的消能能力,冲击荷载作用下,B 组橡胶粉 PE-ECC 吸收了更多的冲击动能,其动态应力-应变曲线的下降段也相对更缓和。应变率由 37 s^{-1} 增大至 66 s^{-1} ,A 组和 B 组的动态抗压强度也分别提高了 7.9% 和 24.7%,其动态应力-应变曲线包络面积也逐渐增大。显然,橡胶粉 PE-ECC 的动态压缩性能受应变率影响更明显。这是由于应变率越大,冲击能量越高,根据功能原理,橡胶粉 PE-ECC 在沿多条裂缝扩展的同时,只能提高自身应力抵消外部能量^[13]。结合表 6,随着橡胶粉的加入,B 组的动态抗压强度相对 A 组降低了 21.2%。这是由于 PE-ECC 的动态抗压强度受纤维增韧作用影响较大^[24],橡胶粉削弱了 PE 纤维与胶凝材料的界面锚固作用,导致动态抗压强度降低。

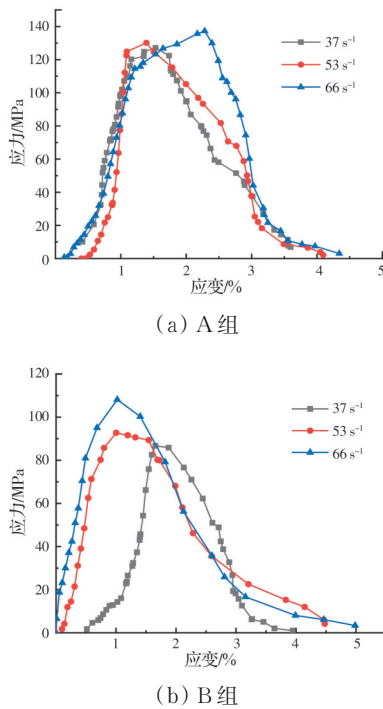


图 7 不同应变率下的应力-应变曲线

Fig. 7 Stress-strain curves of PE-ECC under different strain rates

表 6 不同应变率下的动态抗压强度

Table 6 Dynamic compressive strength at different strain rates

组别	动态抗压强度/MPa		
	应变率 37.2 s^{-1}	应变率 55.1 s^{-1}	应变率 66.5 s^{-1}
A 组	127.3	130.1	137.3
B 组	86.7	92.7	108.1
C 组	90.0	94.6	109.5
D 组	82.7	85.6	105.9
E 组	85.7	89.0	101.2

图 8 为冲击应变率为 66 s^{-1} 时的橡胶粉 PE-ECC 动态应力-应变曲线。可以发现,曲线上段最大斜率出现在橡胶粉粒径为 0.45 mm 的 D 组,而粒径为 0.30 mm 的 C 组其动态应力-应变曲线相对其他橡胶粉 PE-ECC 更为饱满。结合表 6,橡胶粉粒径由 0.20 mm 增大至 0.90 mm, PE-ECC 的动态抗压强度稳定在 105 MPa 左右,其中 C 组(粒径为 0.30 mm)的动态抗压强度相对最高,与橡胶粉 PE-ECC 的静态抗压强度分布特征一致。

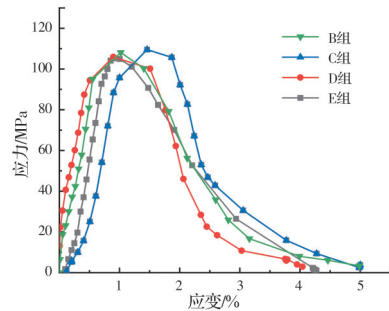


图 8 橡胶粉 PE-ECC 应力-应变曲线

Fig. 8 Stress-strain curves of rubber powder PE-ECC

3.3 动态增长因子 DIF

动态抗压强度增长因子 DIF 是指动态抗压强度与静态抗压强度的比值,可以较好地反映动态压缩荷载下材料强度的增幅^[25]。图 9 给出了冲击应变率对 PE-ECC 的 DIF 值的影响。可以看出,PE-ECC 应变率增强效应明显,随着冲击应变率的提高,PE-ECC 的 DIF 值逐渐增大,对应的动态抗压强度也越大,抗冲击性能也更好。应变率由 37 s^{-1} 增大至 66 s^{-1} ,A 组和 B 组的 DIF 值分别增长了 7.9% 和 24.7%。显然,橡胶粉作为弹性体增强了 PE-ECC 的应变率敏感性,并改善了其抗冲击性能。同一应变率下,橡胶粉粒径介于 0.20~0.90 mm 时,橡胶粉 PE-ECC 的 DIF 随橡胶粉粒径增大整体呈减小趋势。

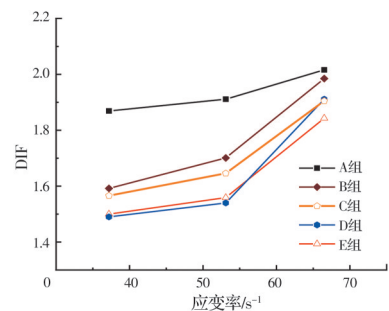


图 9 橡胶粉 PE-ECC 动态增长因子

Fig. 9 Dynamic increase factor of rubber powder PE-ECC

3.4 动态峰值应变分析

图 10 为不同冲击应变率下 PE-ECC 的动态峰值应变情况。可以看出,相同应变率下,橡胶粉 PE-

ECC的动态峰值应变均高于无橡胶粉对照组,其动态峰值应变的应变率增强效应也更明显。这是由于橡胶粉PE-ECC更多的内部孔隙提供了相对更大的冲击压缩变形空间^[26]。

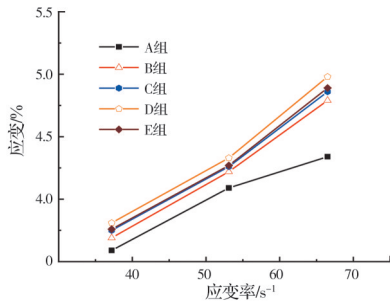


图10 不同应变率下的峰值应变

Fig. 10 Peak strain with different strain rates

与无橡胶粉PE-ECC相比,橡胶粉PE-ECC动态峰值应变的应变率增强效应更明显。应变率由 37 s^{-1} 增大至 66 s^{-1} ,A组和B组的动态峰值应变分别提高了20.9%和29.8%。同一应变率下,橡胶粉粒径对PE-ECC动态峰值应变的影响很小。冲击应变率为 66 s^{-1} 时,各橡胶粉PE-ECC的动态峰值应变稳定在4.8%左右。

4 结论与展望

对掺入不同粒径橡胶粉的PE-ECC进行了静力性能和抗冲击性能试验,探讨了其基本物理力学性能随橡胶粉粒径的变化规律,得到了不同应变率下橡胶粉PE-ECC的动态增长因子DIF、动态抗压强度和动态峰值应变,主要结论如下:

1)随着橡胶粉的加入,PE-ECC的静力抗压强度降低明显,橡胶粉粒径为0.30 mm、体积掺量为10%的PE-ECC抗压强度降幅较小,其立方体抗压强度、轴心抗压强度和弹性模量相比无橡胶粉PE-ECC分别减小了8.9%、15.6%和10.8%。在橡胶粉粒径在0.20~0.9 mm之间时,PE-ECC的抗压强度随橡胶粉粒径增大呈增长趋势。

2)橡胶粉PE-ECC的劈裂抗拉强度相对无橡胶粉PE-ECC有所减小,且受橡胶粉粒径影响很小,不同粒径橡胶粉PE-ECC受拉多缝开裂特征明显,极限拉应变均接近4.6%,橡胶粉PE-ECC受拉延性良好。

3)橡胶粉的掺入有利于PE-ECC吸收更多的冲击动能,其动态应力-应变曲线下降段相比无橡胶粉对照组更平缓。随着冲击应变率的提高,橡胶粉PE-ECC的动态增长因子DIF和动态压缩强度逐渐增大,橡胶粉PE-ECC的抗冲击性能良好。

4)冲击荷载作用下,橡胶粉PE-ECC动态峰值

应变的应变率增强效应明显,相同冲击应变率下,其动态峰值应变均高于无橡胶粉对照组,且橡胶粉粒径对动态峰值应变影响较小。应变率为 66 s^{-1} 时,各组橡胶粉PE-ECC的动态峰值应变均接近4.8%。

橡胶粉PE-ECC作为一种低弹模、抗冲击性能好的新型材料,有关其本构模型的研究目前还较少,不利环境等因素对其物理力学性能的研究也尚不成熟,围绕上述问题后续仍需开展更多的研究。

参考文献

- [1] 国家统计局. 中华人民共和国国家统计局年度数据报表[R]. 2020.
National Bureau of Statistics. Annual Data Statement of the National Bureau of Statistics of the People's Republic of China [R]. 2020. (in Chinese)
- [2] 政府工作报告[EB/OL]. (2022-03-12)[2022-3-12].http://www.gov.cn/premier/2022-03/12/content_5678750.htm.
Government Work Report [EB/OL](2022-03-12)[2022-3-12]. http://www.gov.cn/premier/2022-03/12/content_5678750.htm.(in Chinese)
- [3] 亢景付, 范昆. 橡胶混凝土抗冲磨性能[J]. 天津大学学报, 2011, 44(8): 727-731.
KANG J F, FAN K. Abrasion resistance of rubberized concrete [J]. Journal of Tianjin University, 2011, 44(8): 727-731. (in Chinese)
- [4] HERNÁNDEZ-OLIVARES F, BARLUENGA G. Fire performance of recycled rubber-filled high-strength concrete [J]. Cement and Concrete Research, 2004, 34(1): 109-117.
- [5] 薛刚, 董亚杰, 衣笑, 等. 橡胶混凝土断裂韧性试验研究[J]. 建筑结构, 2022, 52(2): 115-119, 126.
XUE G, DONG Y J, YI X, et al. Experimental study on fracture toughness of rubber concrete [J]. Building Structure, 2022, 52(2): 115-119, 126. (in Chinese)
- [6] 屠艳平, 程子扬, 程书凯, 等. 橡胶粒径和掺量对再生混凝土性能的影响[J]. 功能材料, 2021, 52(12): 12072-12078.
TU Y P, CHENG Z Y, CHENG S K, et al. Effect of rubber particle size and content on properties of recycled concrete [J]. Journal of Functional Materials, 2021, 52(12): 12072-12078. (in Chinese)
- [7] 郭永昌, 刘锋, 陈贵炫, 等. 橡胶混凝土的冲击压缩试验研究[J]. 建筑材料学报, 2012, 15(1): 139-144.
GUO Y C, LIU F, CHEN G X, et al. Experimental investigation on impact resistance of rubberized concrete [J]. Journal of Building Materials, 2012, 15(1): 139-144. (in Chinese)
- [8] XIAO J Z, LI L, SHEN L M, et al. Compressive behaviour of recycled aggregate concrete under impact

- loading [J]. *Cement and Concrete Research*, 2015, 71: 46-55.
- [9] 龙广成, 谢友均, 李建. 废旧橡胶颗粒改性水泥混凝土及其工程应用[J]. *粉煤灰*, 2005, 17(2): 3-4.
LONG G C, XIE Y J, LI J. Modified cement concrete mixed with waste rubber grain and its application in engineering [J]. *Coal Ash China*, 2005, 17(2): 3-4. (in Chinese)
- [10] 刘曙光, 常智慧, 张栋翔, 等. PVA-ECC材料在桥梁伸缩缝工程中的应用[J]. *混凝土与水泥制品*, 2016(2): 80-82.
LIU S G, CHANG Z H, ZHANG D X, et al. Application of high ductility fiber reinforced cementitious composites (PVA-ECC) material in bridge expansion joints engineering [J]. *China Concrete and Cement Products*, 2016(2): 80-82. (in Chinese)
- [11] HUANG X Y, RAVI R, NI W, et al. On the use of recycled tire rubber to develop low E-modulus ECC for durable concrete repairs [J]. *Construction and Building Materials*, 2013, 46: 134-141.
- [12] 夏叶飞, 郑业勇, 张为民, 等. 橡胶粉对PVA-ECC力学性能影响研究[J]. *实验力学*, 2018, 33(6): 987-993.
XIA Y F, ZHENG Y Y, ZHANG W M, et al. Study on the effect of rubber powder on mechanical properties of PVA-ECC [J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2018, 33(6): 987-993. (in Chinese)
- [13] 马昆林, 龙广成, 谢友均, 等. 橡胶颗粒对自密实混凝土性能的影响[J]. *硅酸盐学报*, 2014, 42(8): 966-973.
MA K L, LONG G C, XIE Y J, et al. Effect of rubber particles on properties of self-compacting concrete [J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2014, 42(8): 966-973. (in Chinese)
- [14] 李艳, 张文彬, 刘泽军. PVA-ECC动态压缩性能研究[J]. *建筑材料学报*, 2020, 23(3): 513-520.
LI Y, ZHANG W B, LIU Z J. Study on dynamic compressive properties of PVA-ECC [J]. *Journal of Building Materials*, 2020, 23(3): 513-520. (in Chinese)
- [15] 建筑砂浆基本性能试验方法标准: JGJ/T 70—2009 [S]. 北京: 中华人民共和国建设部, 2009: 6-7.
Standard for test method of performance on building mortar: JGJ/T 70—2009 [S]. Beijing: Ministry of Construction of the PRC, 2009: 6-7.
- [16] Standard test method for static modulus of elasticity and Poisson's ratio of concrete in compression: ASTM C469/C469M—2014 [S]. 2014.
- [17] JSCE. Recommendations for design and construction of high performance fiber reinforced cement composites with multiple fine cracks: JSCE CES82 [S]. Tokyo: Japan Society of Civil Engineers, 2008: 1.
- [18] LINDHOLM U S. Some experiments with the split Hopkinson pressure bar [J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 1964, 12(5): 317-335.
- [19] 胡苗, 周娟兰, 李永鹏. 橡胶粉对PVA纤维增强水泥基复合材料韧性的影响[J]. *混凝土*, 2015(4): 108-110, 114.
HU M, ZHOU J L, LI Y P. Effect of rubber powder on the toughness of PVA fiber reinforced cement-based composites [J]. *Concrete*, 2015(4): 108-110, 114. (in Chinese)
- [20] ASLANI F. Mechanical properties of waste tire rubber concrete [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2016, 28(3): 04015152.
- [21] 活性粉末混凝土: GB/T 31387—2015 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
Reactive powder concrete: GB/T 31387—2015 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2015. (in Chinese)
- [22] 蔡树元, 封婷, 陈舒, 等. 钢纤维增强自密实橡胶混凝土力学性能研究[J]. *盐城工学院学报(自然科学版)*, 2015, 28(3): 68-74.
CAI S Y, FENG T, CHEN S, et al. Research on mechanical properties of self-compacting rubberized concrete reinforced with steel-fiber [J]. *Journal of Yancheng Institute of Technology (Natural Science Edition)*, 2015, 28(3): 68-74. (in Chinese)
- [23] LI V C, LEUNG C K Y. Steady-state and multiple cracking of short random fiber composites [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1992, 118(11): 2246-2264.
- [24] 梁宁慧, 杨鹏, 刘新荣, 等. 高应变率下多尺寸聚丙烯纤维混凝土动态压缩力学性能研究[J]. *材料导报*, 2018, 32(2): 288-294.
LIANG N H, YANG P, LIU X R, et al. A study on dynamic compressive mechanical properties of multi-size polypropylene fiber concrete under high strain rate [J]. *Materials Review*, 2018, 32(2): 288-294. (in Chinese)
- [25] LOK T S, ZHAO P J. Impact response of steel fiber-reinforced concrete using a split Hopkinson pressure bar [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2004, 16(1): 54-59.
- [26] 刘俊良, 许金余, 任韦波. 高强混凝土在冲击荷载下的力学性能[J]. *硅酸盐通报*, 2016, 35(1): 261-266, 274.
LIU J L, XU J Y, REN W B. Mechanical properties of high strength concrete under impact loading [J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2016, 35(1): 261-266, 274. (in Chinese)