

破碎卵石再生混凝土折压比试验研究

安新正,刘浩楠*,张翠霞,边金明,毕 峥

(河北工程大学 土木工程学院,河北 邯郸 056038)

摘要:以废弃混凝土粗骨料作为再生粗骨料取代破碎卵石粗骨料,设计取代率 r 分别为0%、15%、30%、45%,并以此为基础分别制作破碎卵石再生混凝土立方体试件、棱柱体试件各36个,并在试件养护龄期分别为3、14、28 d时,分别对其进行抗压强度、抗折强度试验。分析了在不同龄期下,破碎卵石再生混凝土抗压强度与抗折强度随 r 变化的规律,以及 r 对破碎卵石再生混凝土折压比与类折压比的影响。结果表明:不同龄期下,随着 r 的增加,抗压强度、抗折强度的变化趋势均表现为先增后降,当 $r=30\%$ 时,抗压强度、抗折强度达到最大值;3 d龄期下,折压比与类折压比随 r 的增加无统一显著变化规律;14 d和28 d龄期下,随着 r 的增加,折压比与类折压比均呈先增大后减小趋势;且在28 d龄期下, $r=30\%$ 时折压比与类折压比均达到最大值,分别建立了基于取代率 r 的折压比与类折压比计算公式。

关键词:破碎卵石再生混凝土;再生粗骨料;抗折强度;抗压强度;折压比与

中图分类号:TU528

文献标识码:A

Experimental Research on the Compression Ratio of Recycled Crushed Pebbles Concrete

AN Xinzheng, LIU Haonan*, ZHANG Cuixia, BIAN Jinming, MI Zheng

(College of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Handan, Hebei 056038, China)

Abstract: Waste concrete coarse aggregate used as recycled coarse aggregate was applied to replace crushed pebble coarse aggregate. The replacement ratio r was 0%, 15%, 30% and 45%, respectively. Based on this, 36 cube and prism specimens of recycled concrete with broken pebbles were made respectively, and when the curing ages were 3 d, 14 d and 28 d, the compressive strength and flexural strength tests were implemented. The variation law of compressive and flexural strength of crushed pebbles recycled concrete with r at different ages and the influence on the compression ratio and class discount ratio of crushed pebbles recycled concrete with r were analyzed. The results indicate that: With r increasing, the trends of change of compressive strength and flexural strength increase at early stage and then decrease at different ages. When $r=30\%$, it reaches maximizing compressive strength and flexural strength. At the age of 3 d, there is no uniform and significant change pattern in the compression ratio and the analogous compression ratio as r increases. At the age of 14 d and 28 d, with the increase of r , both the compression ratio and the similar compression ratio first increase and then decrease. At the age of 28 d, when $r=30\%$, both the compression ratio and the similar compression ratio reached their maximum values. The calculation models of the compression ratio and the similar compression ratio based on the replacement rate r were established respectively.

Key words: broken pebble recycled concrete; recycled coarse aggregate; flexural strength; compressive strength; compression ratio and analogous compression ratio

收稿日期:2020-11-17

基金项目:河北省自然科学基金资助项目(E2015204111);河北省科学技术研究与发展计划资助项目(15273609D)

作者简介:安新正(1963-),男,河南镇平人,博士,副教授,研究方向为结构耐久性理论与设计。

* 通讯作者:刘浩楠(1995-),男,黑龙江大庆人,硕士研究生,主要从事混凝土力学性能方面的研究。

近年来,建筑工业化进程的不断加快引发了环境问题和资源问题加剧。由于废弃旧建筑的拆除导致了大量建筑垃圾的随意堆弃,不仅污染环境,还占用大量土地资源^[1]。另外,卵石具有质地坚硬、抗压强度大的优点^[2],被广泛应用于工程中,但天然卵石资源的过渡开采导致了级配较好的优质卵石资源稀缺,而一些不符合工程要求的大块废弃卵石被随意丢弃河道内,阻碍船只通行,存在极大的安全隐患。将大块卵石进行破碎后制成粗骨料应用于混凝土材料中是解决废弃卵石随意丢弃的重要途径。目前破碎卵石粗骨料混凝土已在工程中得到了广泛应用,在此背景下,如果将废弃混凝土破碎后制成再生粗骨料,以部分(或全部)取代为破碎卵石粗骨料,来生产满足工程需要的混凝土,不仅可以节省大量优质卵石资源,还可以解决建筑垃圾的安置问题。目前,大多数国内外学者的相关研究都集中在碎石粗骨料再生混凝土的强度以及耐久性研究方面^[3-8],对破碎卵石粗骨料再生混凝土的研究鲜有涉及。基于此,本文以废弃混凝土粗骨料取代率作为参量,分别设计制作了 36 个立方体试件与 36 个棱柱体试件来开展相关试验研究。通过试验研究,分析了破碎卵石再生混凝土在不同龄期下的抗压强度、抗折强度随废弃混凝土粗骨料取代率变化的规律,并分别建立了破碎卵石再生混凝土折压比、类折压比与废弃混凝土粗骨料取代率的相关关系计算公式。

1 试验概况

水泥:P.O 42.5 级普通硅酸盐水泥;粉煤灰:Ⅱ级粉煤灰,掺量为 10%;细骨料:细度模数为 1.7 的天然河砂;粗骨料:包括天然粗骨料和再生粗骨料,其中天然粗骨料采用连续级配的破碎天然卵石粗骨料(图 1),再生粗骨料采用废弃混凝土梁构件(强度等级为 C30)经颚式破碎机破碎、筛分得到的连续级配的废弃混凝土再生粗骨料(主要成分为水泥砂浆块和表面粘连老旧砂浆的碎石块,其中水泥砂浆块含量约 20%~30%,见图 2),

粗骨料物理性能指标详见表 1;水:邯郸市饮用自来水;减水剂:减水率为 25% 的高效聚羧酸液态减水剂。由于再生粗骨料吸水率较高,在进行配合比设计时按 24 h 吸水率计算附加用水量^[9]。



图 1 破碎卵石粗骨料
Fig. 1 Broken pebble coarse aggregate



图 2 废弃混凝土再生粗骨料
Fig. 2 Recycled coarse aggregate from waste concrete

2 配合比及试件制作

2.1 配合比

试验用破碎卵石再生混凝土中,废弃混凝土再生粗骨料取代率 r 分别取 0%、15%、30%、45%,其对应的立方体试件组编号分别为 RCLF0、RCLF15、RCLF30、RCLF45,对应的棱柱体试件组编号分别为 RCLZ0、RCLZ15、RCLZ30、RCLZ45。破碎卵石再生混凝土详细配合比见表 2^[9]。减水

表 1 粗骨料物理性能指标

Tab. 1 Physical performance index of coarse aggregate

名称	粒径范围/mm	堆积密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	表观密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	含泥量/%	24 h 吸水率/%	压碎指标/%
天然粗骨料	5~25	1 590	2 689	0.40	2.45	11.3
再生粗骨料	5~25	1 310	2 567	0.41	5.01	14.5

表2 破碎卵石再生混凝土配合比

(单位: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)

Tab. 2 Mix proportion of crushed pebble recycled concrete

试件编号		水	水泥	粉煤灰	细骨料	天然粗骨料	再生粗骨料	附加用水量
立方体	棱柱体							
RCLF0	RCLZ0	160	346	38.4	642	1 192	0	0
RCLF15	RCLZ15	160	346	38.4	642	1 013	179	9
RCLF30	RCLZ30	160	346	38.4	642	834	358	18
RCLF45	RCLZ45	160	346	38.4	642	656	536	27

剂用量均取 4.17 kg/m^3 。

2.2 试件制作与试验方法

基于试验研究的要求, $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 的立方体试件和 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$ 的棱柱体试件依照表2的配合比设计进行再生混凝土配制和试件浇筑工作,并在24 h完成试件拆模后,将所有试件送入标准养护室(养护温度 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$,湿度为 $\geq 95\%$) 养护备用,养护龄期分别为3、14和28 d。

依照文献[10]要求的相关试验方法,各组试件的抗压强度、抗折强度试验在1 000 kN微机控制电液伺服万能试验机上进行,试验图见图3和图4。



图3 抗压强度试验

Fig. 3 Compressive strength test



图4 抗折强度试验

Fig. 4 Flexural strength test

3 试验结果与分析

3.1 抗压强度与抗折强度

破碎卵石再生混凝土抗压强度(f_{cu})以及抗折

强度(f_t)试验结果见表3和表4,为了更直观地反映出不同龄期下破碎卵石再生混凝土的抗压强度(f_{cu})以及抗折强度(f_t)随废弃混凝土再生粗骨料取代率 r 的变化关系,本文以折线图的形式呈现 f_{cu} 和 f_t 随 r 的变化关系(图5、图6)。由图5、图6可以看出,随 r 的增加, f_{cu} 与 f_t 变化趋势呈现先增后降,当 $r=30\%$ 时, f_{cu} 与 f_t 均达到最大值。这是因为再生粗骨料孔隙较多且表面粗糙,这可以增大与水泥砂浆的接触面积,进而使界面粘结强度增大^[11]。并且,在再生混凝土拌和过程中,再生粗骨料表面上粘连的砂浆块会快速吸收水分并与自由水结合形成薄膜,将吸收的水密封在内部^[12]。在养护阶段,密封水被未水化的水泥颗粒吸收并反应,对 f_{cu} 与 f_t 的提升起有利作用。当粗骨料掺入过多时, f_{cu} 、 f_t 均有所下降,这是由于再生粗骨料的强度极不平衡,又间接弱化了黏结界面的黏结强度。

表3 破碎卵石再生混凝土抗压强度试验结果

Tab. 3 Experimental results of compressive strength of recycled concrete with broken pebbles

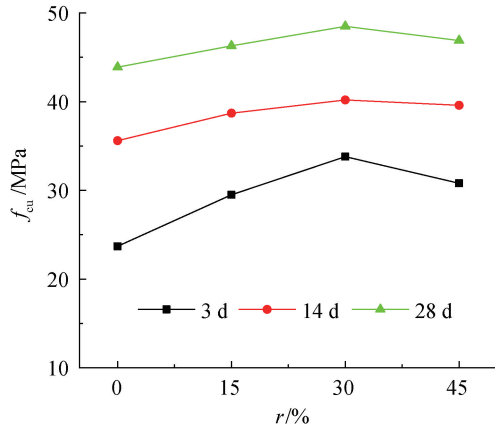
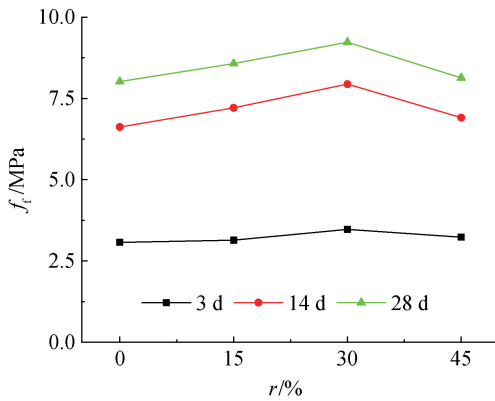
试验 编号	3 d		14 d		28 d	
	测值 /MPa	标准差	测值 /MPa	标准差	测值 /MPa	标准差
RCLF0	23.6	1.56	37.2	1.35	43.9	1.63
RCLF15	29.5	1.85	37.9	1.47	46.3	2.12
RCLF30	33.8	1.63	41.7	1.59	48.5	1.47
RCLF45	30.8	1.49	40.8	1.67	46.9	1.67

表4 破碎卵石再生混凝土抗折强度试验结果

Tab. 4 Experimental results of flexural strength of recycled concrete with broken pebbles

试验编号	3 d		14 d		28 d	
	测值 /MPa	标准差	测值 /MPa	标准差	测值 /MPa	标准差
RCLZ0	3.1	0.56	6.2	0.48	8	0.47
RCLZ15	3.1	0.49	7.2	0.35	8.6	0.56
RCLZ30	3.6	0.78	7.8	0.49	9.2	0.58
RCLZ45	3.1	0.63	6.2	0.54	8.1	0.74

注:表格中测值为各组试件的抗压强度或抗折强度平均值,并已考虑尺寸效应。

图5 不同龄期下试件 f_{cu} 随 r 的变化关系曲线Fig. 5 The relationship between f_{cu} and r in different ages图6 不同龄期下试件 f_t 随 r 的变化关系曲线Fig. 6 The relationship between f_t and r in different ages

3.2 折压比

折压比 α ($\alpha = f_t / f_{cu}$)可以反映混凝土材料的韧性和抗裂性能^[13-14]。当 α 较高时,材料的韧性和抗裂性能较好;相反, α 较低时,韧性和抗裂性能较差。折压比 α 随再生粗骨料取代率 r 的变化规律,如图7所示。由图7可知,与龄期为14、28 d相比,龄期为3 d的破碎卵石再生混凝土折压比 α 没有显著的统一变化规律,且 α 相对较小,总体范围在0.103 9~0.131 4之间。相比于 $r=0\%$, $r=15\%$ 时的 α 降幅约为24.8%,但随着 r 的进一步增大, α 变化幅度趋于稳定。当龄期为14 d时, α 随 r 的增加呈先增加后降低的趋势, α 在0.152~0.190范围内波动。与龄期为3 d和14 d相比,龄期为28 d时 α 变化幅度较小,在0.173~0.189范围内波动;且 α 随着 r 的增大呈先增大后减小的趋势,当 $r<30\%$ 时, α 随 r 的增加而增加,当 $r>30\%$ 时,折压比 α 随 r 的增加而显著下降,当 $r=30\%$ 时 α 达到最大,相比于 $r=0\%$ 其增幅为3.28%,此时抗裂

性能以及韧性最好。

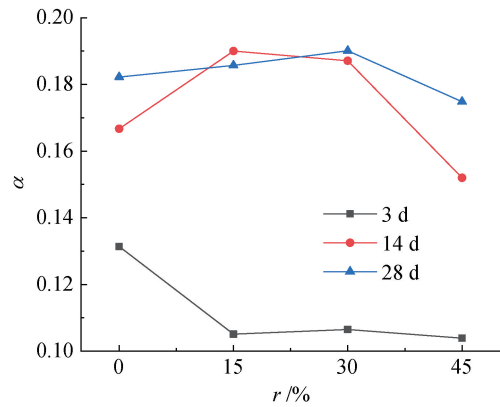
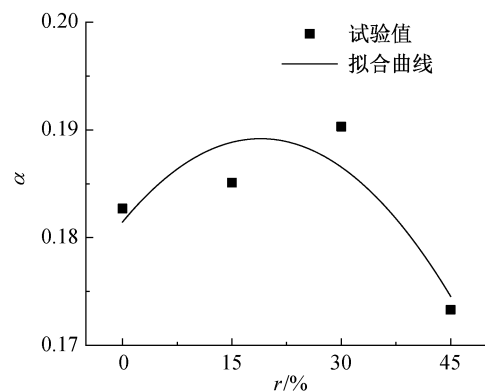
为了更直观地反映出28 d龄期下破碎卵石再生粗骨料取代率 r 对折压比 α 的影响规律,基于文献[15],建立了 α 与 r 的相关关系计算公式,即:

$$\alpha = -0.000\ 021\ 6r^2 + 0.000\ 82r + 0.181 \quad (1)$$

折压比 α 随粗骨料取代率 r 的变化趋势见图8。不难发现, r 对 f_t/f_{cu} 的变化趋势有重要影响,故根据公式(1),进一步得到了破碎卵石再生混凝土 f_t 关于 f_{cu} 与 r 的计算关系式,见式(2):

$$f_t = (-0.000\ 021\ 6r^2 + 0.000\ 82r + 0.181)f_{cu} \quad (2)$$

将实测值代入公式(2)中,得到计算值 f_t' 与实测值 f_t 的比值总体在0.99~1.01之间,其均值为0.996,标准差为0.012,可见采用式(2)得到的计算值与实测值吻合较好。

图7 破碎卵石再生混凝土 α 随 r 变化折线图Fig. 7 Broken line diagram of α changing with r of recycled concrete with broken pebbles图8 28 d龄期时试件 α 随 r 的变化趋势Fig. 8 The change trend of α with r at 28 d age

3.3 类折压比

为了进一步扩大折压比的研究范畴,依据文献[15],将 β ($\beta = f_t / f_{cu}^{1/2}$)定义为类折压比。类折压比 β 随再生粗骨料取代率 r 的变化规律,如图9

所示。由图9可以看出,破碎卵石再生混凝土类折压比 β 与折压比 α 的变化趋势基本相同,其中3 d龄期下 β 随 r 的增加变化幅度相对较小,变化范围在0.571~0.638之间,相比于14 d和28 d,3 d龄期下 β 无显著变化规律;龄期为14 d和28 d时, β 随着 r 的增加均呈现先增后降的趋势,其变化范围分别为0.971~1.208、1.183~1.321。且在28 d龄期下,当 $r < 30\%$ 时, β 随 r 的增加逐渐增大,当 $r = 30\%$ 时,相比于 $r = 0\%$ 时 β 增加了9.92%,达到最大值。当 $r > 30\%$ 时, β 由1.33降低到1.19。可以看出相对于破碎卵石再生混凝土折压比 α , β 不仅能反映 α 与 r 之间的关系,在一定程度上还可以将 α 与 r 之间的关系进一步放大。

为了进一步反映出龄期28 d时类折压比 β 随再生粗骨料取代率 r 的变化规律,基于文献[15],建立了 β 与 r 的相关关系计算公式,即:

$$\beta = -0.000189r^2 + 0.00843r + 1.20 \quad (3)$$

类折压比 β 与取代率 r 的相关关系变化趋势见图10。为更直观反映出 $(f_{cu})^{1/2}$ 与 r 对 f_t 的影响规律,根据公式(3),进一步得到了 f_t 关于 $(f_{cu})^{1/2}$ 与 r 的计算关系式:

$$f_t = (-0.000189r^2 + 0.00843r + 1.20)(f_{cu})^{1/2} \quad (4)$$

将实测值带入公式(4)中,得到破碎卵石再生混凝土的计算值 f_t' 与实测值 f_t 的比值总体在0.99~1.01之间,比值均值为0.995,标准差为0.016,可见采用式(4)得到的计算值与实测值吻合较好。由于试验测值较少,以及采用材料均来源于邯郸地区,现有数据并不全面,故 α 与 r 和 β 与 r 的相关关系公式仅可为破碎卵石再生混凝土抗压强度 f_{cu} 和抗折强度 f_t 随取代率 r 变化的关系提供参考。

4 结论

1)在不同龄期下,随着废弃混凝土再生粗骨料取代率 r 的增加,破碎卵石再生混凝土的抗压强度 f_{cu} 与抗折强度 f_t 的变化趋势均表现为先升后降,当废弃混凝土再生粗骨料取代率 r 为30%时,其抗压与抗折强度均达到最大值。

2)3 d龄期下的破碎卵石再生混凝土折压比 α 与类折压比 β 随再生粗骨料取代率 r 的变化无统一显著规律;14、28 d时破碎卵石再生混凝土的折压比 α 与类折压比 β 的变化趋势一致,折压比 α 与类折压比 β 均随 r 的增加均呈先增加后减小的

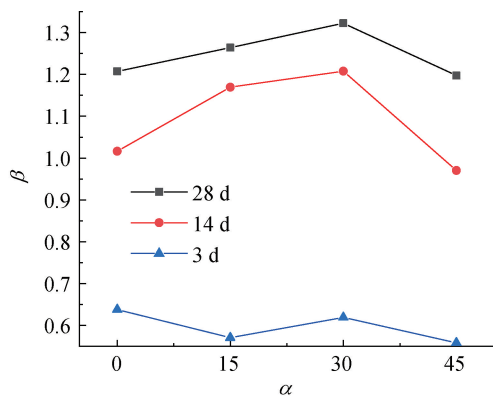


图9 破碎卵石再生混凝土 β 随 r 变化曲线

Fig. 9 Graph of β with r of recycled pebble concret

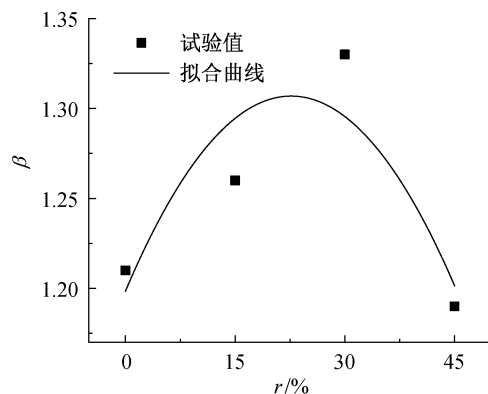


图10 28 d龄期时试件 β 随 r 的变化趋势

Fig. 10 The change trend of β with r at 28 d age

趋势, $r = 30\%$ 时,二者均达到最大值,此时破碎卵石再生混凝土的韧性以及抗裂性能达到最佳。

3)分别建立了龄期为28 d时破碎卵石再生混凝土折压比 α 和类折压比 β 与取代率 r 的计算公式,其计算结果与试验结果吻合较好。

参考文献:

- [1]王景建.邯郸市建筑垃圾管理与资源化利用[J].建设科技,2014(01):13-15.
- [2]苏益声,孟二从,陈宗平,等.火灾(高温)后破碎卵石混凝土三轴受力性能研究[J].建筑材料学报,2015,18(04):647-651+657.
- [3]任峰.集料对混凝土性能影响的试验研究[D].大连:大连理工大学,2008.
- [4]李英杰,张士萍,韩镭,等.再生混凝土耐久性研究综述[J].江苏建材,2019(03):61-63.
- [5]乔宏霞,关利娟,曹辉,等.再生骨料混凝土研究现状及进展[J].混凝土,2017(07):77-82.
- [6]肖建庄,林壮斌,朱军.再生骨料级配对混凝土抗压强度的影响[J].四川大学学报:工程科学版,2014,46(04):154-160.

(下转第103页)

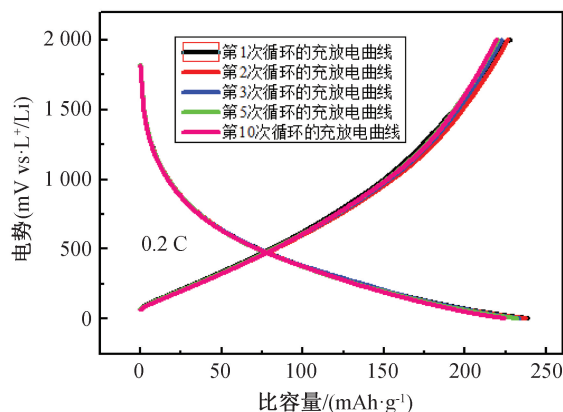


图6 多孔碳材料充放电曲线

Fig. 6 Discharge and charge curves of porous carbon cathode

锂离子电池在选择电极材料上,利用多孔碳材料可以有效地保持容量,达到95%以上,倍率性能稍差,可以作为锂离子电池的负极材料。

参考文献:

- [1] BALOGUN M S, YANG H, LUO Y, et al. Achieving High Gravimetric Energy Density for Flexible Lithium Ion Batteries Facilitated by COREDOUBLE-SHELL Electrodes [J]. *Energy Environ. Sci.*, 2018, 11: 1859-1869.
- [2] YU Z, JIANG L. Olivine LiFePO₄ Nanocrystals Grown on NITROGEN-DOPED Graphenesheets as HIGH-RATE Cathode for LITHIUM-ION Batteries [J]. *Solid State Ionics*, 2018, 325: 12-16.
- [3] ZHANG S, XIAO W, ZHANG Y, et al. Construction of a LOW-DEFECT and Highly Conductive 3D Graphene Network to Enable a High Sulphur Content Cathode for High Performance Li-S/Graphene Batteries [J]. *J. Mater. Chem.*, 2018, A 6: 22555-22565.
- [4] SHI Xiudong, PU Zonghua, CHI Bin, et al. Nitrogen and Atomic Fe DUAL-DOPED Porous Carbon Nanocubes as Superior Electrocatalysts for Acidic H₂-O₂ PEMFC and Alkaline Zn-air Battery [J]. *Journal of Energy Chemistry*, 2021, 59: 388-395.
- [5] 韩颖颖. 多孔碳材料的合成及其在锂离子电池中的应用[D]. 上海: 上海师范大学, 2020.
- [6] 沈家明. ZIF-8 衍生多孔碳材料的制备及其电容去离子性能研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2019.
- [7] 何赛玉, 王薇, 谭鸿, 等. ZIF-8 衍生的多孔碳作 DSSC 对电极[J]. *广东化工*, 2021, 48(438): 31+39-40.
- [8] 郑欣. 基于金属有机骨架的多孔碳复合材料制备及其性能研究[D]. 天津: 天津理工大学, 2020.
- [9] YAO F, PHAM D T, LEE Y H. Carbon-Based Materials for Lithium-Ion Batteries, Electrochemical Capacitors, and Their Hybrid Devices [J]. *ChemSusChem*, 2015, 8(14): 2284-2311.
- [10] 杨汪. 多孔碳材料的制备、掺杂改性及其复合材料在电化学储能中的应用研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2019.
- [11] MYSYK R, GAO Q, RAYMUNDO-Piñero E, et al. Microporous Carbons FINELY-TUNED by Cyclic HIGH-PRESSURE LOW-TEMPERATURE Oxidation and Their Use in Electrochemical Capacitors [J]. *Carbon*, 2012, 50(9): 3367-3374.
- [12] 高虹, 李亚楠, 刘燕. MOFs 多孔碳材料在锂电池中的应用及其性能表征[J]. *合成纤维*, 2020, 49(377): 50-53.
- [13] 王利君. 多孔碳材料的制备、掺杂改性及其复合材料在电化学储能中的应用研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2019.
- [14] 杨汪. 多孔碳材料的制备、掺杂改性及其复合材料在电化学储能中的应用研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2019.
- [15] 高虹, 李亚楠, 刘燕. MOFs 多孔碳材料在锂电池中的应用及其性能表征[J]. *合成纤维*, 2020, 49(377): 50-53.

(责任编辑 王利君)

(上接第18页)

- [7] CAI Haiyong, ZHANG Min, DANG Lingbo. Experimental Study on Compressive Strength of Recycled Aggregate Concrete with Different Substitution Ratios [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2012(6): 1277-1280.
- [8] CHEN X D, SHI D D, SHEN N, et al. Experimental Study and Analytical Modeling on Fatigue Properties of Pervious Concrete Made with Natural and Recycled Aggregates [J]. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 2019, 13(1): 1-13.
- [9] 邓寿昌, 罗冠祥. 混凝土配合比设计与再生混凝土配合比设计方法的比较与分析[J]. *惠州学院学报: 自然科学版*, 2011, 31(03): 9-18.
- [10] JGJ 55-2011, 普通混凝土配合比设计规程[S].

- [11] GB/T 50081-2002, 普通混凝土力学性能试验方法标准[S].
- [12] 陈宗平, 周春恒, 陈宇良, 等. 再生卵石骨料混凝土力学性能试验研究[J]. *建筑材料学报*, 2014, 17(03): 465-469+506.
- [13] 毕峥, 安新正, 边金明, 等. 再生粗骨料对破碎卵石混凝土抗压性能影响研究[J]. *河北工程大学学报: 自然科学版*, 2020, 37(01): 41-44.
- [14] CEB-FIPm, Model Code for Concrete Structures CEB-FIP International Recommendations [S]: London: Thomas Telford 1990.
- [15] 张向冈, 邓大鹏, 张轩轩, 等. 砂轻页岩集料混凝土抗压比试验研究[J]. *混凝土*, 2019(02): 57-60+64.

(责任编辑 王利君)