

引用本文:肖建庄,马旭伟,刘 琼,等.全再生混凝土概念的衍化与研究进展[J].建筑科学与工程学报,2021,38(2):1-15.

XIAO Jian-zhuang, MA Xu-wei, LIU Qiong, et al. Evolvement and Research Progress of Concept for Full Recycled Concrete[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2021, 38(2): 1-15.

DOI:10.19815/j.jace.2020.11036

## 全再生混凝土概念的衍化与研究进展

肖建庄,马旭伟,刘 琼,张航华,段珍华

(同济大学 土木工程学院,上海 200092)

**摘要:**全面梳理和分析了再生混凝土的发展历程与演变特点,提出了全再生混凝土的基本概念,基于文献分析,针对不同组分、不同取代率下再生混凝土的工作性能、力学性能和耐久性能开展了对比分析。整理了当再生粗骨料、再生细骨料分别单取代且取代率达到 100% 及再生粗、细骨料双取代的取代率都达到 100% 后混凝土各性能变化的量值,最后总结了再生粉体对混凝土的影响,在文献脉络梳理的基础上,明确了全再生混凝土的内涵和外延,并尝试总结了全再生混凝土的力学性能理论预测模型,给出了今后全再生混凝土的研究方向和建议。研究表明:在众多的配合比设计方法中,基于自由水灰比的配合比设计方法最为成熟,应用最为广泛;再生骨料单取代混凝土的工作性能、力学性能和耐久性能均随着取代率的增加而降低,对于再生粗、细骨料双取代的混凝土,再生粗骨料对抗压强度的影响要大于再生细骨料,再生细骨料对工作性能的影响要大于再生粗骨料。  
**关键词:**再生粗骨料;再生细骨料;再生粉体;全再生混凝土;配合比设计;工作性能;力学性能  
**中图分类号:**TU973.2      **文献标志码:**A      **文章编号:**1673-2049(2021)02-0001-15

## Evolvement and Research Progress of Concept for Full Recycled Concrete

XIAO Jian-zhuang, MA Xu-wei, LIU Qiong, ZHANG Hang-hua, DUAN Zhen-hua  
(College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** The development process and evolution characteristics of recycled concrete were comprehensively reviewed and analyzed, then a novel concept of full recycled concrete was put forward. Based on literature analysis, the work performance, mechanical property and durability of recycled concrete under different replacement rates of different recycled component were compared. The changes in concrete properties when the single replacement rate of recycled coarse aggregate and recycled fine aggregate reached 100% and the double replacement rate of recycled coarse and fine aggregates reached 100% were sorted out. Finally, the impact of recycled powder on concrete was also summarized. On the basis of literature, the connotation and extension of recycled concrete were defined, as well as the prediction model of mechanical properties was summarized. The suggestions for the future research direction of the full recycled concrete were provided. The results show that among all the mix design methods, the mix design method based

收稿日期:2020-11-20

基金项目:国家自然科学基金项目(52078358)

作者简介:肖建庄(1968-),男,山东沂南人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:jzx@tongji.edu.cn。

通信作者:刘 琼(1980-),男,河南南阳人,工学博士,E-mail:lq@tongji.edu.cn。

on free water-cement ratio is the most mature and widely used. The workability, mechanical property and durability of recycled concrete containing recycled coarse aggregate or recycled fine aggregate decrease with the increase of the replacement rate. When both recycled coarse aggregates and recycled fine aggregates are replaced, the effect of recycled fine aggregate on compressive strength is greater than that of recycled coarse aggregates, whereas for workability, the conclusion is opposite.

**Key words:** recycled coarse aggregate; recycled fine aggregate; recycled powder; full recycled concrete; mix design; work performance; mechanical property

## 0 引言

全球目前还处于大量建设的时期,一方面,新建建筑需要消耗大量的砂石;另一方面,大量的旧建筑物被拆除产生数量惊人的建筑固废。根据《2018~2023 年中国建筑垃圾处理行业发展前景与投资战略规划分析报告》测算,每 1 000 m<sup>2</sup> 建筑施工面积平均产生 55 t 建筑垃圾,建筑施工对城市建筑垃圾排放量的贡献率为 48%;每拆除 1 000 m<sup>2</sup> 建筑,平均产生 800 t 建筑垃圾;保守估计 2019 年中国产生建筑垃圾为 30×10<sup>8</sup> t 以上。建筑固废的大量堆积将会带来土地浪费及环境污染等问题<sup>[1]</sup>,肖建庄<sup>[2]</sup>总结发现再生混凝土可以很好解决建筑固废资源化问题,具有重要的社会效益;杜婷等<sup>[3]</sup>从定性、定量的角度及微观、宏观方面综合分析认为,再生骨料具有很大的经济效益,并且大规模工业化的生产可以扩大该效益;徐亦冬等<sup>[4]</sup>用生命周期评价的方法证明了再生混凝土可以将废弃物的排放量从正排放转为负排放,具有很大的环境效益。综上,再生混凝土技术的发展与应用符合国家可持续发展和绿色发展理念。

再生混凝土的发展经历了一个从认识到实践的过程,通过调研政策出台、研究开展、规范制定、应用实施等,总结得到再生混凝土的发展历程与未来趋势<sup>[5-7]</sup>,如图 1 所示。全再生混凝土将是今后再生混凝土发展的新方向,其内涵包括如下几方面:一种观点是再生粗骨料(RCA)或再生细骨料(RFA)达到 100% 取代后的混凝土可定义为全再生混凝土<sup>[8]</sup>;更普遍的观点是同时使用再生粗骨料和再生细骨料的混凝土可定义为全再生混凝土<sup>[9]</sup>;未来,全再生混凝土更完整的概念是同时使用再生粗骨料、再生细骨料和再生粉体的混凝土<sup>[10]</sup>。建筑固废处置加工再生粗、细骨料过程中会产生大量的再生粉体<sup>[11]</sup>,只有同时利用这几种再生材料,才能达到最全面消纳建筑固废的目的。

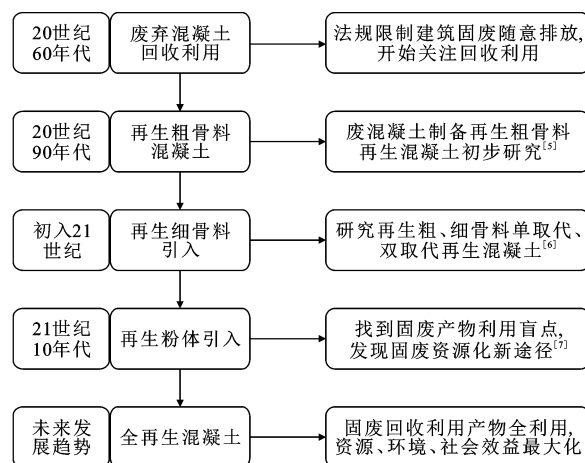


图 1 再生混凝土的发展历程

Fig. 1 Development History of Recycled Concrete

目前,大部分研究显示再生混凝土制品在性能方面异于普通混凝土<sup>[12-13]</sup>,并且取代率是影响再生混凝土性能的重要因素。全再生混凝土中包含建筑固废再生材料比例更高,性能的差异更加明显<sup>[14]</sup>,其研究、推广和应用前景尚不完全清晰,但全再生混凝土具有高效消纳建筑固废的能力,更能充分体现再生混凝土的社会效益、经济效益和环境效益,必然成为未来再生混凝土发展的新方向。因此,有必要对已有的研究成果进行梳理总结,从全再生混凝土概念衍化的角度出发,分别对其配合比设计、工作性能、力学性能以及耐久性能方面的研究进行总结分析,找到合理的配合比设计方法、全再生混凝土性能劣化的规律和再生粉体的掺加对全再生混凝土性能产生的影响,以及可能的再生材料取代率和取代方式的建议,为以后相关研究的开展提供科学参考。

## 1 再生粗、细骨料单取代的混凝土

### 1.1 再生骨料单取代的混凝土配合比设计

目前主要的配合比设计方法可以分为 3 类:

第一类为基于普通混凝土配合比设计方法衍生得到的方法。如保证坍落度的配合比设计方法<sup>[15]</sup>、基于正交试验的设计方法<sup>[16-17]</sup>、等质量/等体积替换

天然骨料的配合比设计方法<sup>[18]</sup>。这些方法以成熟的普通混凝土配合比设计理论为基础,可行性与可操作性强,但是较难体现出再生骨料的特性。

第二类为针对再生骨料特性的配合比设计方法。如基于取代率和骨料品质的再生混凝土配合比设计方法<sup>[19]</sup>、基于自由水灰比的混凝土配合比设计方法<sup>[20]</sup>。该方法将再生骨料品质、高吸水率等特征充分融入设计方法中,更加适合再生混凝土的配制,只是可操作性有所降低。

第三类为针对特殊再生骨料或配制特种再生混凝土的配合比设计方法。如基于密实骨架堆积设计法的石屑混凝土配合比设计方法<sup>[21-22]</sup>。该方法因为其对象的特殊性,应用范围有限。

## 1.2 再生骨料单取代的混凝土工作性能

### 1.2.1 再生粗骨料混凝土

从混凝土坍落度和达到相同坍落度所需的用水量(简称用水量)两方面分别观察再生粗骨料取代率 $R_C$ 和再生细骨料取代率 $R_F$ 对混凝土工作性能的影响。为了便于总结影响规律,将柯国军等<sup>[23]</sup>、孙家国等<sup>[24]</sup>、王雪芳等<sup>[25]</sup>、邵莲芬等<sup>[26]</sup>、郭远新等<sup>[27]</sup>、王晓飞<sup>[28]</sup>、于江等<sup>[29]</sup>的试验数据转化为与普通混凝土坍落度及用水量的比值,记为坍落度比和用水量比,结果如图2、3所示。

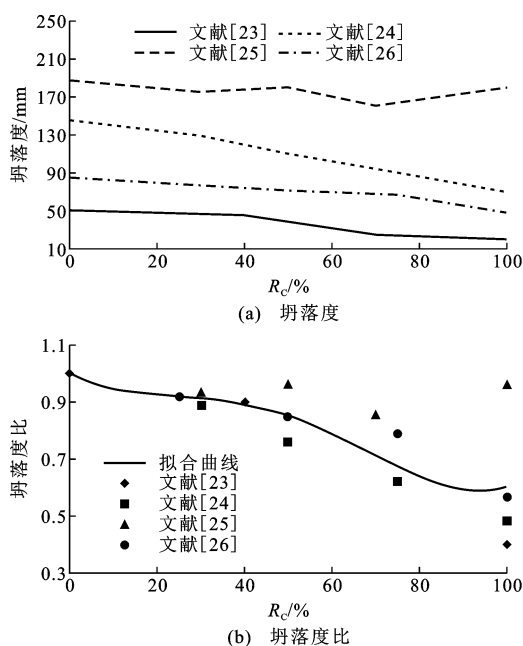


图2 再生粗骨料取代率对坍落度及坍落度比的影响

Fig. 2 Influence of RCA Replacement Rate on Slump and Slump Ratio

通过图2(a)及图3(b)可以看出:当取代率达到30%时坍落度下降趋势增大,用水量与取代率之间

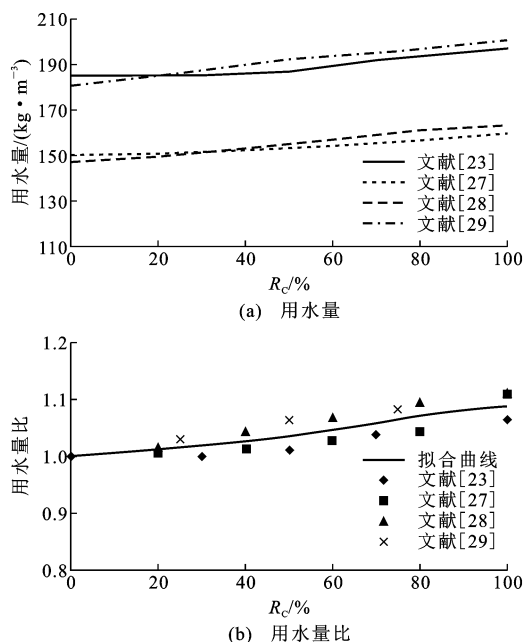


图3 再生粗骨料取代率对用水量及用水量比的影响

Fig. 3 Influence of RCA Replacement Rate on Water Consumption and Water Consumption Ratio

有较明显的线性关系;当100%取代时,坍落度下降了约40%,用水量增加了10%。其主要原因再生粗骨料表面粗糙、吸水率大、孔隙多、用浆量多,搅拌时须增加部分水来进行补偿,从而达到目标坍落度<sup>[30]</sup>。同时,肖建庄等<sup>[31]</sup>分析发现混凝土拌合物在拌合与浇筑时的摩擦阻力因骨料表面的粗糙而有所增大,从而黏聚性和保水性得以提高。

### 1.2.2 再生细骨料混凝土

同样分析孙宇坤等<sup>[32]</sup>、石莹等<sup>[33]</sup>、冯庆革等<sup>[34]</sup>、聂立武等<sup>[35]</sup>、肖建庄等<sup>[36]</sup>、李秋义等<sup>[37]</sup>的试验数据(图4、5,其中 $W/C$ 为水灰比, $w$ 为混凝土中的水泥用量),发现再生细骨料混凝土工作性能随着取代率的增加而降低。用水量和取代率之间同样存在着较为明显的正相关关系,当取代率在30%以内时,其坍落度变化幅度很小;当取代率达到100%时,混凝土的用水量增加5%~10%,坍落度降低了约20%。其原因在于再生细骨料颗粒表面粗糙造成骨料间摩擦力增大,降低了混凝土的流动性<sup>[38]</sup>,并且再生细骨料的孔隙率大,所需填充孔隙的水泥浆量也大,从而造成包裹骨料的水泥浆层厚度减小,润滑作用减小,进一步降低混凝土的工作性<sup>[39]</sup>。

## 1.3 再生骨料单取代的混凝土力学性能

### 1.3.1 再生粗骨料混凝土

根据胡敏萍<sup>[40]</sup>、Ngoc等<sup>[41]</sup>、Thomas等<sup>[42]</sup>、徐蔚<sup>[43]</sup>的试验数据,分析混凝土抗压强度与取代率的

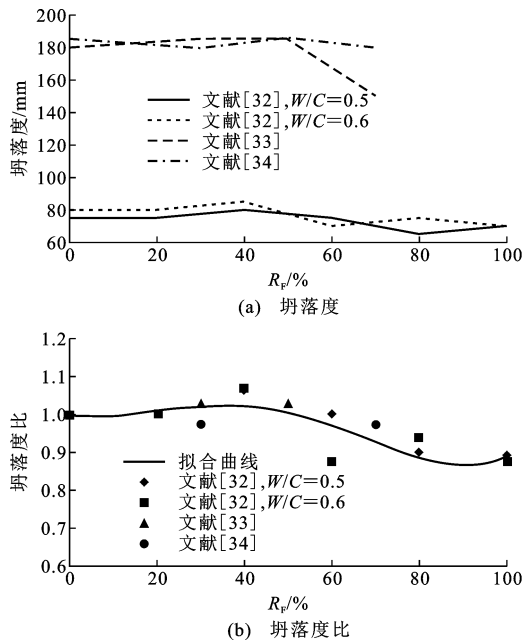


图4 再生细骨料取代率对坍落度及坍落度比的影响

Fig. 4 Influence of RFA Replacement Rate on Slump and Slump Ratio

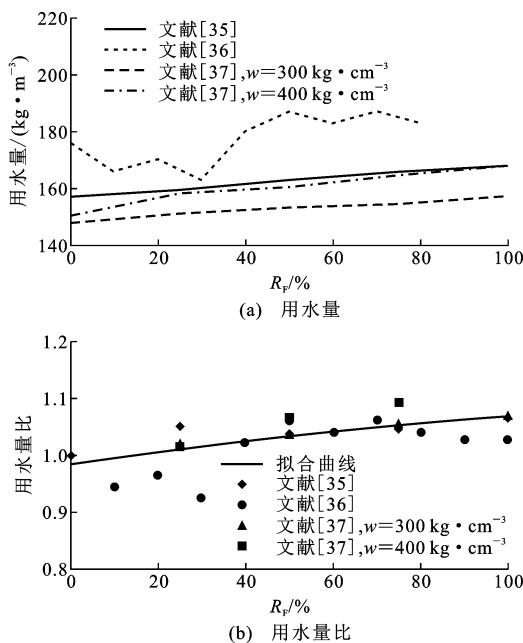


图5 再生细骨料取代率对用水量及用水量比的影响

Fig. 5 Influence of RFA Replacement Rate on Water Consumption and Water Consumption Ratio

关系,用不同试验数据的抗压强度比拟合曲线(图6)。总体而言,随着再生粗骨料取代率增加,混凝土抗压强度降低。当取代率较低时对强度的影响不明显,当取代率达到30%及更高时,强度降低趋势会增大,达到100%取代时,强度降低了约20%。文献[40],[42],[44]~[47]的试验数据表明,劈裂抗拉

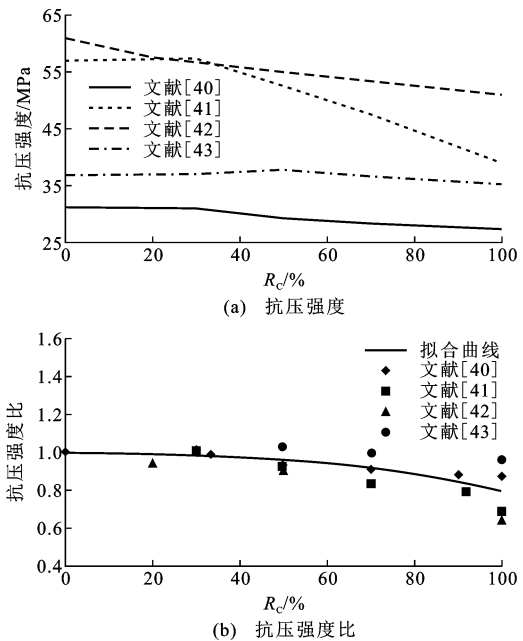


图6 再生粗骨料取代率对抗压强度及抗压强度比的影响

Fig. 6 Influence of RCA Replacement Rate on Compressive Strength and Compressive Strength Ratio

强度对取代率的变化更加敏感,会随着再生骨料取代率的增加而迅速降低,100%取代率时降低25%。弹性模量的变化趋势与抗压强度类似,在取代率达到30%后迅速降低,最高降低约40%。

从现有结果来看,当取代率低于30%时,再生粗骨料混凝土的抗压强度变化很小,超过30%后,其各项力学性能迅速下降。分析其原因为:一方面再生粗骨料表面粗糙,其取代率的增加会增大浆体与骨料间的黏结力<sup>[48]</sup>,即再生粗骨料的正面效应;另一方面根据耿欧等<sup>[49]</sup>、孙连波等<sup>[50]</sup>对细观结构的研究,再生骨料表面的粉尘增多,阻碍浆体与骨料之间的黏结作用,肖建庄等<sup>[51]</sup>的研究指明再生粗骨料在破碎过程中内部产生了许多微小裂缝,因此更容易形成应力集中,降低了其承载和传力能力,即再生粗骨料的负面效应。当取代率较小时,正面效应较大,但随着取代率的增大,负面效应渐渐超过正面效应,最终出现混凝土抗压强度随取代率的增加先上升后下降的试验结果<sup>[52]</sup>。

### 1.3.2 再生细骨料混凝土

分析聂立武等<sup>[35]</sup>、肖建庄等<sup>[36]</sup>、李秋义等<sup>[37]</sup>、郝彤等<sup>[53]</sup>的试验(图7),发现再生细骨料混凝土在取代率达到30%之前,抗压强度基本不会受到影响,在达到100%取代率后其抗压强度降低20%左右。根据Bravo等<sup>[54]</sup>、戴鹏<sup>[55]</sup>的试验结论,当再生细骨料取代率低于30%时,抗拉强度基本没有变

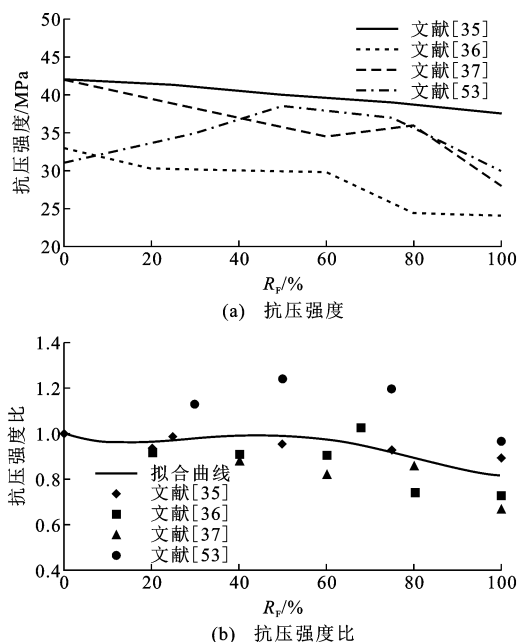


图7 再生细骨料取代率对抗压强度及抗压强度比的影响  
Fig. 7 Influence of RFA Replacement Rate on Compressive Strength and Compressive Strength Ratio

化,取代率超过30%后抗拉强度的减小速率加快,可降低15%~40%。

根据现有结论,再生细骨料混凝土在取代率低于30%之前,其基本性能无明显变化,超过30%后各项力学性能均下降。主要的原因有:一方面随着再生细骨料取代率增加,细骨料中裂缝增多,混凝土的孔隙率增大;另一方面再生细骨料中含有的水泥颗粒会继续进行水化反应,再生细骨料内部的吸附水将用于水化养护,提高混凝土后期强度发展,同时当取代率较小时,天然砂能与再生细骨料形成更加良好的级配,从而降低骨料的空隙率<sup>[56]</sup>。随着取代率增大,不利作用超过有利作用,混凝土的力学性能下降。

#### 1.4 再生骨料单取代的混凝土耐久性能

##### 1.4.1 再生粗骨料混凝土

针对再生粗骨料混凝土耐久性的相关研究也有很多,根据肖建庄等<sup>[57]</sup>的总结分析,再生粗骨料混凝土的抗碳化性能低于同水灰比的普通混凝土,但与同强度等级的普通混凝土接近,并且当取代率低于70%时,碳化深度随着取代率的增加而增大,取代率超过70%后,其碳化深度有所下降<sup>[58]</sup>。赵伟<sup>[59]</sup>试验发现再生粗骨料混凝土的干燥收缩变形大于普通混凝土,且随着取代率的增加而增加, Eguchi等<sup>[60]</sup>分析其原因因为再生骨料弹性模量较小,老砂浆吸水后收缩,使得粗骨料对水泥砂浆干燥收

缩变形的抑制作用降低。根据肖建庄等<sup>[57]</sup>的总结,再生粗骨料混凝土的抗气渗透和抗氯离子渗透性能均低于普通混凝土,申士军等<sup>[61]</sup>用 Fick 第二定律进行了解释, Limbachiya等<sup>[62]</sup>、肖开涛<sup>[63]</sup>分别通过试验得出再生粗骨料混凝土抗气渗透与抗氯离子渗透性能都随取代率的增大而降低,但当取代率低于30%时,其抗气渗透性能基本没有变化。这主要因为再生混凝土的孔隙率随着粗骨料取代率的增加而增大,但是 Medina等<sup>[64]</sup>发现当采用再生陶瓷骨料时,虽然混凝土的孔隙率有所增大,但其抗气渗透性能却没有变化。Dhir等<sup>[65]</sup>试验发现,当取代率低于50%时,再生粗骨料混凝土的耐磨性能和抗硫酸盐腐蚀性能基本没有变化,且与普通混凝土接近,当取代率超过50%后,其耐磨性能和抗硫酸盐磨损性能随着取代率的增加而下降。

##### 1.4.2 再生细骨料混凝土

刘星伟等<sup>[66]</sup>研究发现再生细骨料混凝土的碳化深度随着取代率的增加而增加,根据 Evangelista等<sup>[67]</sup>的研究结论,当取代率达到100%时,其碳化深度增大了35%。孙家瑛等<sup>[68]</sup>研究发现当取代率低于40%时,再生细骨料混凝土的抗塑性收缩性能基本没有变化,超过40%后,其抗塑性收缩能力降低幅度迅速加大,当达到100%取代率时,其裂缝最大宽度与普通混凝土相比增加了184%,最大长度增加了16%,裂缝面积增加了370%。肖开涛<sup>[63]</sup>通过试验发现再生细骨料混凝土的抗氯离子渗透性能随着取代率的增加而下降,并且再生细骨料对混凝土抗氯离子渗透性能的影响要大于再生粗骨料。分析其原因因为破碎后的再生细骨料空隙率大,表面存在微裂缝,同时试验中需要添加附加水来满足拌合物对工作性能的要求,导致再生细骨料混凝土的水灰比过高、密实度较低、孔隙率和孔径较大,最终表现为混凝土的耐久性能下降,并且相同取代率下的再生粗骨料混凝土表面附着老砂浆含量更高,导致再生粗骨料混凝土的密实度更低,耐久性更差。

## 2 再生粗、细骨料双取代的混凝土

### 2.1 再生骨料双取代的混凝土配合比设计

相比再生骨料单取代混凝土,再生骨料双取代混凝土的试验研究和工程应用较少。常见的再生骨料全取代的混凝土配合比设计方法如下:

(1)全面试验法。考虑所有变量的各种组合,找到其中的最优配合比。该方法结果准确,但是试验工作量庞大,周期长,数据繁杂。

(2)正交试验法。基于正交试验的配合比设计方法<sup>[69]</sup>用部分试验代替全面试验,减少不必要的工作量,易于分析出各因素的主效应。

(3)自由水灰比法。基于自由水灰比的配合比设计方法<sup>[70]</sup>充分体现了再生骨料的高吸水率特性,被广泛用于双取代再生混凝土的配制。

(4)等量砂浆法。基于等量砂浆法的再生混凝土配合比设计方法<sup>[71]</sup>通过调整再生骨料的量,使最终混凝土中骨料体积和浆体体积量值与相应普通混凝土中各量值相等。该方法充分体现了再生骨料中残余浆体的特性。

(5)基于再生骨料品质和取代率的再生混凝土配合比设计方法<sup>[72]</sup>。结合试验研究、数值分析和理论分析,建立高精度的用水量和强度计算公式,最终得到再生混凝土配合比。该方法可以提出精确的再生骨料双取代混凝土强度计算公式,但是需要大量的试验数据作为基础。

## 2.2 再生骨料双取代的混凝土工作性能

再生骨料双取代的混凝土工作性能与再生粗骨料和再生细骨料的取代率都有关系。根据苏林行等<sup>[73]</sup>的研究,再生骨料双取代的混凝土相比普通混凝土,其工作性能显著降低。当再生粗骨料取代率一定时,用水量随着再生细骨料取代率的增加而增加;再生细骨料取代率一定时,用水量同样随着再生粗骨料取代率的增加而增加,并且二者的变化规律均呈较好的线性关系,当再生粗骨料取代率达到 75% 或再生细骨料取代率达到 50% 时,用水量的增加趋势变缓。这是因为再生细骨料的表面附着有较多的微粉<sup>[74]</sup>,在搅拌过程中与水发生反应后附着在骨料的表面,从而减少了被再生骨料所吸收的水分,所以相比较再生粗骨料其用水量略少,如图 8 所示。

由图 8 可以看出,当再生粗骨料与再生细骨料均达到 100% 取代率时,用水量达到最大,比普通混凝土增加了 22%。标注出用水量增加 10% 的分界线,同样发现当再生粗骨料取代率达到 75% 或再生细骨料取代率达到 50% 时,用水量增加幅度将超过 10%,同时表明,再生细骨料取代对混凝土工作性能的影响大于再生粗骨料取代,张淑泉等<sup>[69]</sup>也用正交试验分析证明了这个结论。

## 2.3 再生骨料双取代的混凝土力学性能

### 2.3.1 立方体抗压强度

分析苏林行等<sup>[73]</sup>的试验,发现当再生粗骨料取代率一定时,混凝土抗压强度随再生细骨料取代率的增加而减小,且曲线随着再生粗骨料取代率的增

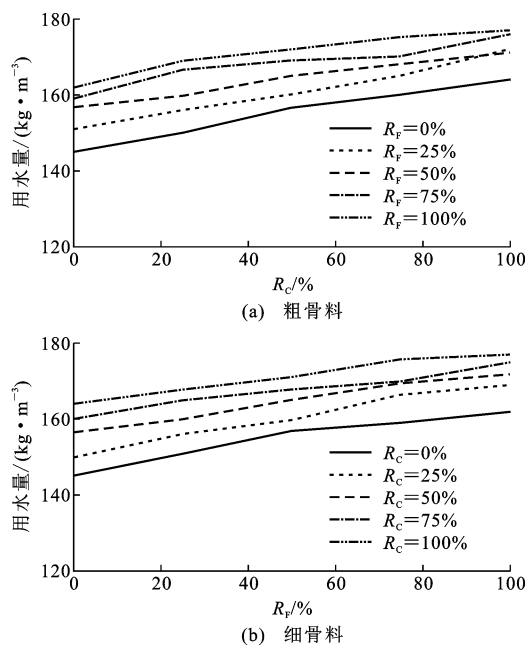


图 8 再生骨料取代率对用水量的影响

Fig. 8 Influence of RA Replacement Rate on Water Consumption

加而平缓,这表明再生粗骨料的添加弱化了再生细骨料取代率对抗压强度的影响,并且随着再生粗骨料取代率的增加,这种弱化效果更加明显。再生细骨料的添加也会带来同样的弱化效果。当再生粗骨料与再生细骨料均达到 100% 取代率时,抗压强度达到最低,比普通混凝土降低了 40%,当再生粗骨料取代率超过 50% 或再生细骨料取代率超过 50% 时,抗压强度的下降幅度超过 10%。采用郭樟根等<sup>[74]</sup>的试验数据对该结果进行验证,发现两者相吻合,如图 9,10 所示。对比分析再生粗骨料与再生细骨料各自 100% 取代的再生骨料双取代混凝土抗压强度降低幅度,发现前者大于后者,说明再生粗骨料取代对再生骨料双取代混凝土抗压强度的影响大于再生细骨料取代,张淑泉等<sup>[69]</sup>用正交试验、Cabral 等<sup>[75]</sup>对比抗压模型均得到了同样的结论。

将一些经过试验验证的再生骨料双取代的混凝土强度预测模型整理在表 1 中。可以看出,现有的再生骨料双取代的混凝土强度还没有形成公认的预测模型,当其粗骨料为再生混凝土骨料时,鲍罗米公式仍然在调整合理的参数后适用,当再生粗骨料为其他类型时,鲍罗米公式的适用性仍然有待验证。

### 2.3.2 其他力学性能与抗压强度的关系

将部分经试验验证的再生骨料双取代混凝土其他力学性能预测模型进行整理,并与普通混凝土预测模型计算结果进行对比,如表 2 所示。发现再生

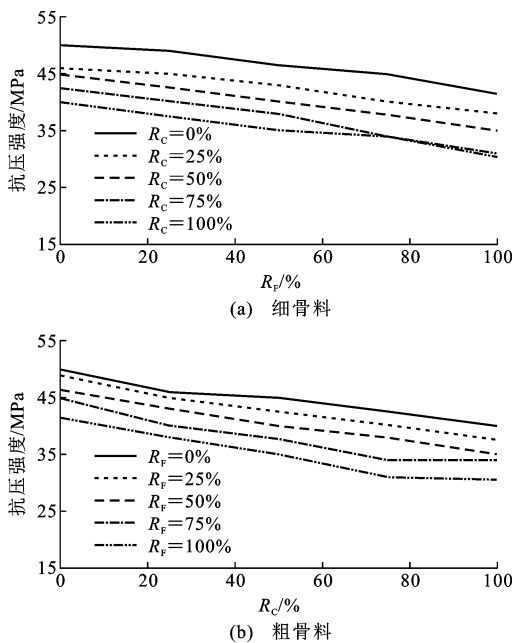


图 9 文献[73]再生骨料取代率对抗压强度的影响  
Fig. 9 Influence of RA Replacement Rate on Compressive Strength in Literature[73]

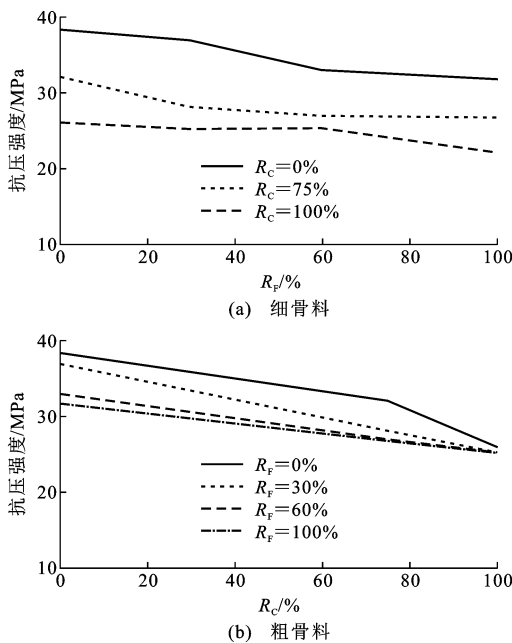


图 10 文献[74]再生骨料取代率对抗压强度的影响  
Fig. 10 Influence of RA Replacement Rate on Compressive Strength in Literature[74]

骨料双取代混凝土的其他力学性能评价模型均是以普通混凝土模型为基础,通过数据拟合的方式得到合适的参数,从而得到评价模型。对于轴心抗压强度而言,按照普通混凝土规范计算的结果偏于安全,对于劈裂抗拉强度及弹性模量,按照普通混凝土规范计算的结果偏于危险,因此当需要快速评估再生骨料双取代混凝土的其他力学性能时,轴心抗压强

表 1 再生骨料双取代的混凝土强度预测模型

Tab. 1 Strength Prediction Model of Recycled Aggregate Replacing Concrete

数据来源	预测模型	参数取值	骨料类型
鲍罗米公式 <sup>[76]</sup>	$\frac{f_{cu}}{f_{ce}} = \alpha_a \frac{W}{C} \alpha_{ab}$ $\alpha_{ab} = -\alpha_a \alpha_b$	$\alpha_a = 0.257$ $\alpha_b = 0.125$ $\alpha_{ab} = -0.032$	粗骨料为再生混凝土骨料,细骨料类型多样
成熟度法 <sup>[77]</sup>	$f_{cu} = a e^{-\frac{b}{t}}$	$a = 24.94$ $b = 2.06$	粗骨料为再生砖骨料,细
经验公式 <sup>[78]</sup>	$\frac{f_n}{f_{28}} = a \frac{\lg(n)}{\ln 28} + b$	$a = 0.4863$ $b = 0.4433$	骨料为再生混凝土骨料
鲍罗米公式 <sup>[72]</sup>	$\frac{f_{cu}}{f_{ce}} = A(W/C - B) \cdot (1 - \alpha_s \lambda_s)(1 - \alpha_g \lambda_g)$	$\alpha_s = 1.83\beta_w - 2.2$ $\alpha_g = 7.61\omega_a - 0.07$	粗、细骨料均为再生混凝土骨料

注: $f_{cu}$ 为立方体抗压强度; $f_{ce}$ 为水泥胶砂强度; $\alpha_a$ 、 $\alpha_b$ 为回归系数; $t$ 为时间; $f_n$ 为第 $n$ 天龄期的立方体抗压强度; $f_{28}$ 为混凝土28d的抗压强度; $\omega_a$ 为再生粗骨料吸水率; $\alpha_g$ 为再生粗骨料强度影响因子; $\alpha_s$ 为再生细骨料强度影响因子; $\beta_w$ 为再生细骨料的再生胶砂需水量比; $\lambda_s$ 为再生细骨料取代率; $A$ 、 $B$ 为量纲为一的线性回归系数; $\lambda_g$ 为再生粗骨料取代率。

表 2 再生骨料双取代的混凝土其他力学性能预测模型

Tab. 2 Mechanical Property Prediction Model of Recycled Aggregate Replacing Concrete

力学性能	数据来源	预测模型	普通混凝土模型
轴心抗压强度	文献[76] 文献[77] 文献[78] 文献[74]	$f_c = 0.90 f_{cu}$ $f_c = 0.86 f_{cu}$ $f_c = 2.73 + 0.81 f_{cu}$ $f_c = 0.76 f_{cu}$	$f_c = \alpha_{c1} \alpha_{c2} f_{cu}$
劈裂抗拉强度	文献[76]	$f_t = 0.20 f_{cu}^{0.721}$	$f_t = 0.395 f_{cu}^{0.55}$
弹性模量	文献[76] 文献[78] 文献[79]	$E_c = 10^5 / (2.24 + \frac{41.5}{f_{cu}})$ $E_c / E_{c,n} = 0.87 \sim 0.97$ $E_c = 10^5 / (5.2 + \frac{29.8}{f_{cu}})$	$E_c = 10^5 / (2.2 + \frac{34.7}{f_{cu}})$

注: $\alpha_{c1}$ 、 $\alpha_{c2}$ 为系数,按照《混凝土结构设计规范》取值; $f_c$ 为轴心抗压强度; $f_t$ 为劈裂抗拉强度; $E_c$ 为弹性模量; $E_{c,n}$ 为按照普通混凝土规范计算的弹性模量。

度可以按照普通混凝土规范中的模型进行计算,弹性模量和劈裂抗拉强度则不适用此类预测方法。

## 2.4 再生骨料双取代的混凝土耐久性能

牛海成等<sup>[80]</sup>通过试验对比发现碳化深度随着再生骨料取代率的增加而增加,并且再生细骨料对混凝土碳化深度的影响要小于再生粗骨料,当再生粗、细骨料均达到100%取代率时,混凝土的碳化深

度比普通混凝土增加了 73%。分析其原因为再生骨料一方面使得混凝土的孔隙率增大,抗碳化性能减弱,另一方面使得老砂浆含量上升,碳化物质增多,增加了抗碳化性能,骨料品质、取代率等因素不同,二者作用的大小不同。韦庆东等<sup>[81]</sup>采用电通量法研究混凝土的抗氯离子渗透性能,发现其随着再生粗骨料与再生细骨料取代率的增加而降低,Tangchirapat 等<sup>[82]</sup>的试验数据同时表明,相比普通混凝土,再生骨料双取代的混凝土抗气渗透性能会大幅度降低。Ravindrarajah 等<sup>[83]</sup>通过试验得出,再生粗、细骨料双取代的混凝土收缩变形明显大于普通混凝土,并且随着取代率的增加而增大。再生粗、细骨料双取代的混凝土耐久性能下降主要是因为再生骨料生产时裂缝较多及老砂浆使得界面过渡区增多,最终导致混凝土的孔隙率增大,耐久性能降低。

### 3 再生粉体对混凝土的影响

#### 3.1 再生粉体对工作性能的影响

试验研究表明,再生粉体中含有大量 C—S—H 凝胶体,其比表面积比较大,对减水剂的吸附能力强,因此高掺量再生粉体会导致混凝土坍落度损失过快。再生粉体的取代率和取代方式对于混凝土工作性能的影响程度不同,比如再生砖粉取代率增加,混凝土的流动度将降低<sup>[84]</sup>;再生混凝土粉和再生砖粉以一定比例取代粉煤灰,当取代率小于 10%时,掺合料有较好的复合效果<sup>[85]</sup>;当再生砖粉取代水泥或硅灰制备活性粉末混凝土时,随着再生砖粉取代率增加,混凝土的工作性能和力学性能都降低<sup>[86]</sup>。一般来说,复掺的效果优于再生粉体单掺,薛翠真等<sup>[87]</sup>研究了建筑垃圾复合粉体材料掺量对 C30 混凝土性能的影响并进行了机理分析,发现复合粉体材料颗粒级配良好,活性发挥较佳,能改善混凝土的孔径分布,促进混凝土中大孔向小孔转化,提高混凝土的性能。

#### 3.2 再生粉体对力学性能的影响

##### 3.2.1 单掺再生粉体

张修勤<sup>[88]</sup>、陈雪等<sup>[89]</sup>试验发现,随着再生粉体掺量的增加,混凝土强度减小,并且减小的幅度也在上升。当再生粉体掺量较低时,强度下降并不明显,甚至会出现强度增高的现象。这是因为:一方面,经过物理研磨活化后的再生粉体的细度比水泥小,能够稀释和分散水泥颗粒,促进水泥水化,填充水泥浆体的孔隙,提高密实度,即再生粉体对混凝土的正面效应<sup>[90]</sup>;另一方面,再生粉体取代水泥后,水泥质量

分数减少,降低了水化产物生成量,且再生粉体活性低,参与水泥水化反应的能力有限,造成混凝土强度的降低,即再生粉体对混凝土的负面效应<sup>[91]</sup>。随着再生粉体掺量增大,正面效应逐渐被负面效应掩盖,所以抗压强度逐渐降低。

##### 3.2.2 复掺再生粉体

常见的再生粉体包括再生混凝土粉与再生砖粉,试验表明再生混凝土粉与再生砖粉不同比例复掺后,所配制的混凝土早期抗压强度都比单掺再生粉体低<sup>[92]</sup>。比较后期强度时发现,复掺与单掺的同龄期抗压强度差距较小,并且复掺可以改善混凝土的工作性能。这是因为复合掺合料取代水泥的比例越高,参与早期水化反应的水泥就越少,而再生粉体发挥早期的活性作用不强,对增加早期强度的贡献较小;随着养护龄期的延长,水泥的水化更充分,混凝土体系中  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  浓度升高,再生粉活性被激发,二次水化作用增强,能够有效地减缓混凝土后期抗压强度的降低<sup>[93]</sup>。同时再生粉体与矿粉复掺时,早期和后期抗压强度相比单掺再生粉体都有所提高,且后期强度提高相比早期更明显<sup>[94]</sup>。分析认为,再生粉体和矿粉在混凝土中都能起到一定的微集料效应,但再生粉体的活性比矿粉低,矿粉早期和后期在碱性物质的激发下都能发生二次水化反应,从而有效提高混凝土的强度。

### 4 全再生混凝土问题及展望

全再生混凝土从最初的再生骨料单取代 100%,发展到再生粗细骨料双取代,其对建筑固废的消纳能力得到普遍认可,下一步要将再生粉体作为胶凝材料掺合料加入混凝土中,得到最符合全再生意义的生态混凝土。

研究表明,当再生粗骨料与再生细骨料取代率均达到 100%时,混凝土抗压强度下降了 40%左右,用水量增加了 20%左右。虽然合理的再生粉体掺量会改善再生骨料双取代混凝土的性能,但效果有限,全再生混凝土性能下降还是限制其应用的主要原因。目前全再生混凝土的研究还停留在初级阶段,关于全再生骨料引起的混凝土性能变化的机理研究、理论模型的建立等大量工作需要进一步开展。

智能破碎工艺可以解决传统的机械破碎作业带来的噪声及粉尘污染等问题,全再生混凝土与之结合可以更充分地体现绿色、可持续发展的特色。目前智能破碎的研究可以分为 2 类:第一类为智能破碎工艺,比如摆振水射流破碎混凝土技术<sup>[95]</sup>、超高



压水射流破拆机器人喷枪结构设计<sup>[96]</sup>等;第二类为破碎工艺的智能控制研究,比如基于 Marx 发生器充电电源智能控制方法<sup>[97]</sup>等。

在配合比设计方面,可以充分利用机器学习和大数据等现代技术方法。比如肖瑞敏<sup>[98]</sup>提出的混凝土配合比全计算及智能化设计,李顺<sup>[99]</sup>充分利用“数据挖掘技术”提出了混凝土配合比设计优化方法,龙宇<sup>[100]</sup>基于数据库系统提出了一种自密实混凝土配合比设计方法等。基于机器学习和大数据可以大幅度地减少配合比设计中的计算量及试验量,缩短全再生混凝土的配合比设计方法开发周期。

混凝土可靠性分析和安全性评价的基础是混凝土抗压强度的统计参数和概率分布,全再生混凝土抗压强度的概率分布与再生粗骨料、再生细骨料和再生粉体均有关,肖建庄及其团队在再生混凝土抗压强度概率分布方面做了大量研究<sup>[36,101-102]</sup>。研究发现:当再生粗骨料来源相同或性能相近的情况下,再生粗骨料取代率对混凝土抗压强度的变异系数影响不大;当再生粗骨料为不同来源废弃混凝土混合得到的集料时,混凝土的方差和变异系数将增大;再生细骨料混凝土的离散性要大于普通混凝土,当再生细骨料的取代率为40%时,混凝土的抗压强度标准差达到最大。因此,全再生混凝土抗压强度概率分布研究可以先采用来源相同或性能相近的再生粗骨料,在减少变量的情况下研究再生细骨料及再生微粉的影响。全再生混凝土的应用还面临着成本、风险等方面的问题,因此需要相关的政策支持来推动。

## 5 结 语

(1)整体上,再生粗骨料混凝土和再生细骨料混凝土的工作性能、力学性能和耐久性能随着再生骨料取代率的增加而降低。当再生粗骨料和再生细骨料单取代的取代率低于30%时,混凝土的工作性能和抗压强度变化不明显。当粗骨料取代率达到100%时,用水量增加10%,坍落度下降了约40%,强度降低了约20%。当细骨料取代率达到100%时,用水量增加5%~10%,坍落度下降了约20%,强度降低了15%~40%。

(2)对于再生粗、细骨料双取代混凝土,再生粗骨料对抗压强度有更明显的影响,再生细骨料对工作性能的影响更大。当二者均达到100%取代率时,用水量增加了10%,抗压强度降低了约40%,建议再生粗骨料取代率与再生细骨料取代率均不超

过50%。

(3)再生骨料双取代的混凝土轴心抗压强度根据现有普通混凝土规范进行取值时结果偏于安全;其抗拉强度和弹性模量根据现有普通混凝土规范进行取值时结果偏于危险。

(4)再生粉体常见的参与混凝土配制的方式有2种:一种是取代水泥,另一种是取代粉煤灰等掺合料。一般来说,不同种类的再生粉体复掺及再生粉体和矿粉复掺的效果要优于再生粉体单掺,但复掺很多情况会导致混凝土的早期强度降低。

(5)全再生混凝土具有巨大的经济效益、环境效益和社会效益,是今后再生混凝土发展的新方向。可以结合智能破碎工艺、机器学习和大数据等现代技术方法来促进其精细加工和精准设计;基于全再生混凝土构件和结构的可靠性分析,可以实现全再生混凝土的安全应用。

## 参考文献:

## References:

- [1] OIKONOMOU N D. Recycled Concrete Aggregates [J]. Cement & Concrete Composites, 2005, 27(2): 315-318.
- [2] 肖建庄. 再生混凝土[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.  
XIAO Jian-zhuang. Recycled Concrete[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008.
- [3] 杜 婷, 李惠强, 郭太平, 等. 废弃混凝土再生骨料应用的经济性分析[J]. 新型建筑材料, 2006(6): 30-33.  
DU Ting, LI Hui-qiang, GUO Tai-ping, et al. Economic Analysis of Application of Waste Concrete Recycled Aggregate[J]. New Building Materials, 2006(6): 30-33.
- [4] 徐亦冬, 吴 萍, 周士琼. 粉煤灰再生混凝土生命周期评价初探[J]. 混凝土, 2004(6): 29-33.  
XU Yi-dong, WU Ping, ZHOU Shi-qiong. Preliminary Study of Life Cycle Assessment of Recycled Concrete Containing Fly Ash[J]. Concrete, 2004(6): 29-33.
- [5] XIAO J Z, LI W G, FAN Y H, et al. An Overview of Study on Recycled Aggregate Concrete in China (1996-2011)[J]. Construction and Building Materials, 2012, 31: 364-383.
- [6] XIAO J Z, LI W G. Recent Studies on Mechanical Properties of Recycled Aggregate Concrete in China — A Review[J]. Science China Technological Sciences, 2012, 55(6): 1463-1480.
- [7] TAM V, SOOMRO M, EVANGELISTA A C. A Re-

- view of Recycled Aggregate in Concrete Applications (2000-2017)[J]. Construction and Building Materials, 2018, 172: 272-292.
- [8] 吕西林, 张翠强, 周颖, 等. 全再生混凝土框架抗震性能[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2014, 45(6): 1932-1942.
- LU Xi-lin, ZHANG Cui-qiang, ZHOU Ying, et al. Seismic Performance of Reinforced Totally-recycled Concrete Frame[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2014, 45(6): 1932-1942.
- [9] 张建伟, 池彦忠, 曹万林, 等. 全再生骨料混凝土高剪力墙的振动台试验[J]. 建筑科学与工程学报, 2012, 29(1): 21-26.
- ZHANG Jian-wei, CHI Yan-zhong, CAO Wan-lin, et al. Shaking Table Test on Recycled Aggregate Concrete High-rise Shear Walls[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2012, 29(1): 21-26.
- [10] 张领雷. 废弃混凝土全组分建材化再生利用的关键技术研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2018.
- ZHANG Ling-lei. Key Technologies on Reuse and Reactivation in Building Materials of All Components of Waste Concrete[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2018.
- [11] 李清海, 孙蓓. 国内外建筑垃圾再生利用的研究动态及发展趋势[J]. 中国建材科技, 2009, 18(4): 119-122.
- LI Qing-hai, SUN Bei. Research Trend of Construction Debris Reclamation Home and Abroad[J]. China Building Materials Science & Technology, 2009, 18(4): 119-122.
- [12] THOMAS C, SETIEN J, POLANCO J A, et al. Durability of Recycled Aggregate Concrete[J]. Construction and Building Materials, 2013, 40: 1054-1065.
- [13] ZHU Y G, KOU S C, POON C S, et al. Influence of Silane-based Water Repellent on the Durability Properties of Recycled Aggregate Concrete[J]. Cement & Concrete Composites, 2013, 35(1): 32-38.
- [14] KOU S C, POON C S, AGRELA F. Comparisons of Natural and Recycled Aggregate Concretes Prepared with the Addition of Different Mineral Admixtures[J]. Cement & Concrete Composites, 2011, 33(8): 788-795.
- [15] 王国林, 祁尚远, 李聚义, 等. 再生粗骨料混凝土力学性能试验研究[J]. 混凝土, 2020(3): 168-171, 176.
- WANG Guo-lin, QI Shang-yuan, LI Ju-yi, et al. Experimental Investigation on Mechanical Properties of Recycled Aggregate Concrete[J]. Concrete, 2020(3): 168-171, 176.
- [16] 李俊, 尹健, 周士琼, 等. 基于正交试验的再生骨料混凝土强度研究[J]. 土木工程学报, 2006, 39(9): 43-46.
- LI Jun, YIN Jian, ZHOU Shi-qiong, et al. Study on the Strength of Recycled Aggregate Concrete Based on Orthogonal Experiment[J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(9): 43-46.
- [17] GE Z, GAO Z L, SUN R J, et al. Mix Design of Concrete with Recycled Clay-brick-powder Using the Orthogonal Design Method[J]. Construction and Building Materials, 2012, 31: 289-293.
- [18] 郑子麟. 全再生细骨料的制备及其在砂浆和混凝土中的应用研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2014.
- ZHENG Zi-lin. Research on Production of Recycled Total-fine Aggregate and Its Application in Mortar and Concrete[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2014.
- [19] 郭远新, 李秋义, 单体庆, 等. 再生粗骨料混凝土配合比简易设计方法[J]. 沈阳建筑大学学报: 自然科学版, 2017, 33(6): 1029-1038.
- GUO Yuan-xin, LI Qiu-yi, SHAN Ti-qing, et al. Simplified Design Method for Mix Proportion of Recycled Coarse Aggregate Concrete[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University: Natural Science, 2017, 33(6): 1029-1038.
- [20] 史巍, 侯景鹏. 再生混凝土技术及其配合比设计方法[J]. 建筑技术开发, 2001, 28(8): 18-20.
- SHI Wei, HOU Jing-peng. Technology and Mix Design on Recycled Concrete[J]. Building Technology Development, 2001, 28(8): 18-20.
- [21] 谭世霖, 蒋雪琴, 丁新榜, 等. 粉煤灰石屑混凝土的配制技术及性能研究[J]. 混凝土, 2012(9): 126-128.
- TAN Shi-lin, JIANG Xue-qin, DING Xin-bang, et al. Study on Preparation Technology and Performance About Stone Chips of Concrete Mixed with Fly Ash[J]. Concrete, 2012(9): 126-128.
- [22] SUMAIYA B H M, SHAHRIA A. Mechanical Behavior of Three Generations of 100% Repeated Recycled Coarse Aggregates Concrete[J]. Construction and Building Materials, 2014, 65: 574-582.
- [23] 柯国军, 张育霖, 贺涛, 等. 再生混凝土的实用性研究[J]. 混凝土, 2002(4): 47-48, 55.
- KE Guo-jun, ZHANG Yu-lin, HE Tao, et al. Discussion on the Development of Regenerative Concrete in the Future[J]. Concrete, 2002(4): 47-48, 55.
- [24] 孙家国, 谷艳玲. 基于水胶比和再生粗骨料取代率对

- 混凝土性能的影响分析[J]. 混凝土, 2016(4):64-67.
- SUN Jia-guo, GU Yan-ling. Analysis of the Influence of Water Cement Ratio and Recycled Coarse Aggregate Replacement Rate on the Performance of Concrete[J]. Concrete, 2016(4):64-67.
- [25] 王雪芳, 肖祥栋, 方金杰, 等. 不同养护龄期下再生粗骨料混凝土拉伸本构关系[J]. 建筑材料学报, 2018, 21(6):977-983.
- WANG Xue-fang, XIAO Xiang-dong, FANG Jin-jie, et al. Tensile Constitutive Relationship of Recycled Coarse Aggregate Concrete at Different Curing Ages[J]. Journal of Building Materials, 2018, 21(6):977-983.
- [26] 邵莲芬, 张文忠. 陶瓷再生粗骨料混凝土力学性能与耐久性研究[J]. 新型建筑材料, 2016, 43(9):33-35.
- SHAO Lian-fen, ZHANG Wen-zhong. Research on Mechanical Property and Durability of Ceramic Recycled Coarse Aggregate Concrete[J]. New Building Materials, 2016, 43(9):33-35.
- [27] 郭远新, 李秋义, 李倩倩, 等. 高品质再生粗骨料混凝土配合比优化[J]. 沈阳建筑大学学报:自然科学版, 2017, 33(1):19-25.
- GUO Yuan-xin, LI Qiu-yi, LI Qian-qian, et al. Mix Proportion Optimization of High Quality Recycled Coarse Aggregate Concrete[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University: Natural Science, 2017, 33(1):19-25.
- [28] 王晓飞. 再生粗骨料品质和取代率对再生混凝土力学性能的影响[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2015.
- WANG Xiao-fei. Influence of Quality and Substitution Rate of Recycled Coarse Aggregate on Mechanical Properties of Recycled Concrete[D]. Qingdao: Qingdao Technological University, 2015.
- [29] 于江, 梁芮, 秦拥军. C30 再生粗骨料混凝土的性能试验研究[J]. 建筑科学, 2015, 31(1):59-63.
- YU Jiang, LIANG Rui, QIN Yong-jun. Study on Properties of C30 Recycled Coarse Aggregate Concrete[J]. Building Science, 2015, 31(1):59-63.
- [30] 严捍东, 吴仕成, 桂苗苗. 再生粗骨料最大堆积密度及其对混凝土性能影响[J]. 建筑材料学报, 2015, 18(3):482-486.
- YAN Han-dong, WU Shi-cheng, GUI Miao-miao. Maximum Packing Density of Recycled Coarse Aggregate and Its Effects on Properties of Concrete[J]. Journal of Building Materials, 2015, 18(3):482-486.
- [31] 肖建庄, 李佳彬, 兰阳. 再生混凝土技术研究最新进展与评述[J]. 混凝土, 2003(10):17-20, 57.
- XIAO Jian-zhuang, LI Jia-bin, LAN Yang. Research on Recycled Aggregate Concrete — A Review[J]. Concrete, 2003(10):17-20, 57.
- [32] 孙宇坤, 李丹乐, 徐云肖, 等. 实际生产再生细骨料混凝土力学性能及耐久性性能试验研究[J]. 建筑结构, 2019, 49(10):81-84, 11.
- SUN Yu-kun, LI Dan-le, XU Yun-xiao, et al. Experimental Research on Mechanical Properties and Durability of Recycled Fine Aggregate Concrete for Actual Production[J]. Building Structure, 2019, 49(10):81-84, 11.
- [33] 石莹, 杨善顺, 徐仁崇, 等. 再生细骨料混凝土影响因素试验研究[J]. 砖瓦, 2017(10):29-32.
- SHI Ying, YANG Shan-shun, XU Ren-chong, et al. Experimental Study on Influencing Factors of Recycled Fine Aggregate Concrete[J]. Brick-tile, 2017(10):29-32.
- [34] 冯庆革, 邵江, 周文安, 等. 再生细骨料对混凝土性能的影响研究[J]. 混凝土, 2013(5):62-64, 68.
- FENG Qing-ge, SHAO Jiang, ZHOU Wen-an, et al. Research on the Effect of the Fine Recycled Aggregate on the Performance of Concrete[J]. Concrete, 2013(5):62-64, 68.
- [35] 聂立武, 韩古月, 滕毓晨. 不同强度等级的高品质再生细骨料混凝土试验研究[J]. 混凝土, 2017(11):118-121.
- NIE Li-wu, HAN Gu-yue, TENG Yu-chen. Experimental Study on High Quality Recycled Fine Aggregate Concrete with Different Strength Grades[J]. Concrete, 2017(11):118-121.
- [36] 肖建庄, 范玉辉, 林壮斌. 再生细骨料混凝土抗压强度试验[J]. 建筑科学与工程学报, 2011, 28(4):26-29.
- XIAO Jian-zhuang, FAN Yu-hui, LIN Zhuang-bin. Experiment on Compressive Strength of Recycled Fine Aggregate Concrete[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2011, 28(4):26-29.
- [37] 李秋义, 孔哲, 郭远新, 等. 再生细骨料混凝土工作性能和力学性能试验研究[J]. 混凝土, 2016(1):131-136.
- LI Qiu-yi, KONG Zhe, GUO Yuan-xin, et al. Experimental Research on the Work Performance and Mechanical Properties of Recycled Fine Aggregate Concrete[J]. Concrete, 2016(1):131-136.
- [38] OGAWA H, NAW A T, OHYA K. Research on Characterization of Recycled Fine Aggregate[J]. Doboku Gakkai Ronbunshuu E, 2010, 66(1):107-118.
- [39] 杨医博, 郑子麟, 郭文瑛, 等. 全再生细骨料的制备及

- 其对混凝土性能影响的试验研究[J]. 功能材料, 2016, 47(4): 4157-4163.
- YANG Yi-bo, ZHENG Zi-lin, GUO Wen-ying, et al. Research on Production of Recycled Total-fine Aggregate and Its Influence on Concrete Performance [J]. Journal of Functional Materials, 2016, 47(4): 4157-4163.
- [40] 胡敏萍. 不同取代率再生粗骨料混凝土的力学性能[J]. 混凝土, 2007(2): 52-54.
- HU Min-ping. Mechanical Properties of Concrete Prepared with Different Recycled Coarse Aggregates Replacement Rate[J]. Concrete, 2007(2): 52-54.
- [41] NGOC K B, TOMOAKI S, HIROSHI T. Improvement of Mechanical Properties of Recycled Aggregate Concrete Basing on a New Combination Method Between Recycled Aggregate and Natural Aggregate [J]. Construction and Building Materials, 2017, 148: 376-385.
- [42] THOMAS C, SETIEN J, POLANCO J A. Structural Recycled Aggregate Concrete Made with Precast Wastes [J]. Construction and Building Materials, 2016, 114: 536-546.
- [43] 徐 蔚. 再生粗骨料取代率对混凝土基本性能的影响[J]. 混凝土, 2006(9): 45-47.
- XU Wei. Experimental Study on Influence of Recycled Coarse Aggregates Contents on Properties of Recycled Aggregate Concrete[J]. Concrete, 2006(9): 45-47.
- [44] 刘文乐, 平 乐, 杨 虹, 等. 再生粗骨料混凝土弹性模量规律的试验分析[J]. 特种结构, 2018, 35(6): 119-124.
- LIU Wen-le, PING Le, YANG Hong, et al. Experimental Analysis on Elastic Modulus Law of Recycled Coarse Aggregate Concrete [J]. Special Structures, 2018, 35(6): 119-124.
- [45] 陈爱玖, 王 静, 章 青. 正交法分析再生粗骨料混凝土的基本性能[J]. 混凝土, 2009(1): 79-83.
- CHEN Ai-jiu, WANG Jing, ZHANG Qing. Basic Properties of Recycled Coarse Aggregate Concrete by Orthogonal Analysis [J]. Concrete, 2009(1): 79-83.
- [46] 肖建庄. 再生混凝土单轴受压应力-应变全曲线试验研究[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2007, 35(11): 1445-1449.
- XIAO Jian-zhuang. Experimental Investigation on Complete Stress-strain Curve of Recycled Concrete Under Uniaxial Loading [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2007, 35(11): 1445-1449.
- [47] TOGAY O, ALIAKBAR G, XIE T Y. Mechanical and Durability Properties of Recycled Aggregate Concrete: Effect of Recycled Aggregate Properties and Content [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2018, 30(2): 04017275.
- [48] XIAO J Z. Recycled Aggregate Concrete Structures [M]. Berlin: Springer, 2018.
- [49] 耿 欧, 陈 辞, 顾荣军, 等. 再生粗集料混凝土界面微观结构的发展规律[J]. 建筑材料学报, 2012, 15(3): 340-344.
- GENG Ou, CHEN Ci, GU Rong-jun, et al. Development Law of Interfacial Microscopic Structure in Recycled Coarse Aggregate Concrete [J]. Journal of Building Materials, 2012, 15(3): 340-344.
- [50] 孙连波, 任福民, 葛大勇, 等. 再生骨料混凝土的微观形态特征及能谱[J]. 北京交通大学学报, 2014, 38(1): 24-28.
- SUN Lian-bo, REN Fu-min, GE Da-yong, et al. Microstructure Characteristic and X-ray Energy Dispersive Microanalysis of Recycled Aggregate Concrete [J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2014, 38(1): 24-28.
- [51] 肖建庄, 李佳彬, 孙振平, 等. 再生混凝土的抗压强度研究[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2004, 32(12): 1558-1561.
- XIAO Jian-zhuang, LI Jia-bin, SUN Zhen-ping, et al. Study on Compressive Strength of Recycled Aggregate Concrete [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2004, 32(12): 1558-1561.
- [52] 姚宇峰, 金宝宏, 章海刚, 等. 再生粗骨料替代率对再生混凝土力学性能影响[J]. 广西大学学报: 自然科学版, 2016, 41(4): 1187-1193.
- YAO Yu-feng, JIN Bao-hong, ZHANG Hai-gang, et al. Influence of Replacement Rate of Recycled Coarse Aggregate on Mechanical Properties of Recycled Concrete [J]. Journal of Guangxi University: Natural Science Edition, 2016, 41(4): 1187-1193.
- [53] 郝 彤, 赵文兰. 不同再生细骨料取代率混凝土的抗压及干燥收缩试验研究[J]. 新型建筑材料, 2011(2): 29-31, 45.
- HAO Tong, ZHAO Wen-lan. Both Compressive Test and Drying Shrinkage Test on Recycled Aggregate Concrete with Different Fine Recycled Aggregate Replacement Ratio [J]. New Building Materials, 2011(2): 29-31, 45.
- [54] BRAVO M, BRITO J D, PONTES J, et al. Mechanical Performance of Concrete Made with Aggregates from Construction and Demolition Waste Recycling Plants [J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 99:

- 59-74.
- [55] 戴 鹏. 废弃混凝土试块再生细骨料混凝土试验研究[J]. 砖瓦, 2017(11): 32-35.  
DAI Peng. Experimental Study on Recycled Fine Aggregate Concrete Made by Waste Concrete Block[J]. Brick-tile, 2017(11): 32-35.
- [56] ABDURRAHMAAN L, MAHMOUD A F. Performance Evaluation of Structural Concrete Using Controlled Quality Coarse and Fine Recycled Concrete Aggregate [J]. Cement & Concrete Composites, 2015, 61: 36-43.
- [57] 肖建庄, 雷 斌. 再生混凝土耐久性能研究[J]. 混凝土, 2008(5): 83-89.  
XIAO Jian-zhuang, LEI Bin. On Durability of Recycled Concrete[J]. Concrete, 2008(5): 83-89.
- [58] 雷 斌, 肖建庄. 再生混凝土抗碳化性能的研究[J]. 建筑材料学报, 2008, 11(5): 605-611.  
LEI Bin, XIAO Jian-zhuang. Research on Carbonation Resistance of Recycled Aggregate Concrete[J]. Journal of Building Materials, 2008, 11(5): 605-611.
- [59] 赵 伟. 绿色高强高性能再生混凝土试验研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2004.  
ZHAO Wei. Testing Research on Green High Strength and High Performance Concrete Made with Recycled Concrete Aggregate [D]. Wuhan: Wuhan University, 2004.
- [60] EGUCHI K, TERANISHI K, NARIKAWA M. Study on Mechanism of Drying Shrinkage and Water Loss of Recycled Aggregate Concrete[J]. Journal of Structural and Construction Engineering, 2003, 68(573): 1-7.
- [61] 申士军, 张智成, 邢 锋, 等. 氯盐侵蚀下再生混凝土氯离子侵蚀和钢筋锈蚀规律研究[J]. 混凝土, 2014(2): 18-20, 24.  
SHEN Shi-jun, ZHANG Zhi-cheng, XING Feng, et al. Research on Regularity of Chloride Ion Ingression and Reinforcement Corrosion Rate in Recycled Concrete[J]. Concrete, 2014(2): 18-20, 24.
- [62] LIMBACHIYA M C, LEELAWAR T, DHIR R K. Use of Recycled Concrete Aggregate in High-strength Concrete [J]. Materials and Structures, 2000, 33(10): 574-580.
- [63] 肖开涛. 再生混凝土的性能及其改性研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2004.  
XIAO Kai-tao. Study on the Properties and the Modification of Recycled Concrete [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2004.
- [64] MEDINA C, FRIAS M, SANCHEZ D R, et al. Gas Permeability in Concrete Containing Recycled Ceramic Sanitary Ware Aggregate [J]. Construction and Building Materials, 2012, 37: 597-605.
- [65] DHIR R K, LIMBACHIYA M C. Suitability of Recycled Concrete Aggregate for Use in BS 5328 Designated Mixes[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 1999, 134(3): 257-274.
- [66] 刘星伟, 李秋义, 李艳美, 等. 再生细骨料混凝土碳化性能的试验研究[J]. 青岛理工大学学报, 2009, 30(4): 159-161, 170.  
LIU Xing-wei, LI Qiu-yi, LI Yan-mei, et al. The Experimental Study on the Carbonation of the Recycled Fine Aggregate Concrete [J]. Journal of Qingdao Technological University, 2009, 30(4): 159-161, 170.
- [67] EVANGELISTA L, DE BRITO J. Durability Performance of Concrete Made with Fine Recycled Concrete Aggregates[J]. Cement & Concrete Composites, 2010, 30(1): 9-14.
- [68] 孙家瑛, 肖天翔, 陆阳升. 再生细骨料对混凝土塑性收缩开裂性能影响[J]. 建筑材料学报, 2014, 17(3): 475-480.  
SUN Jia-ying, XIAO Tian-xiang, LU Yang-sheng. Effect of Recycled Fine Aggregate on Plastic Shrinkage Cracking Properties of Concrete [J]. Journal of Building Materials, 2014, 17(3): 475-480.
- [69] 张淑泉, 田小革, 刘良俊. 基于正交试验方法的双掺再生骨料混凝土配合比设计研究[J]. 北方交通, 2016(9): 35-37, 41.  
ZHANG Shu-quan, TIAN Xiao-ge, LIU Liang-jun. Research on Mix Proportion Design of Double Mixing Recycled Aggregate Concrete Based on Orthogonal Experimental Method [J]. Northern Communications, 2016(9): 35-37, 41.
- [70] 陈晶晶. 全再生骨料混凝土配合比及其基本性能试验研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2012.  
CHEN Jing-jing. Experimental Study on the Mechanical Properties and Mixed Proportion of Full Recycled Aggregate Concrete [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2012.
- [71] 刘鹏宇. 等量砂浆法配制再生混凝土的力学性能和收缩及抗冻性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.  
LIU Peng-yu. Experimental Study on Mechanical Properties and Shrinkage Properties and Frost Resistance of Recycled Concrete Designed with Equivalent Mortar Volume Method [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.

- [72] 郭远新. 基于再生骨料品质和取代率的再生混凝土配合比设计方法研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2018.  
GUO Yuan-xin. Research on Mix Proportion Design Method of Recycled Concrete Based on Recycled Aggregate Quality and Replacement Rate[D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2018.
- [73] 苏林行, 郭远新, 李秋义. 双掺再生骨料混凝土工作性及力学性能试验研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2016(6): 1-6.  
SU Lin-xing, GUO Yuan-xin, LI Qiu-yi. Experimental Study on Workability and Mechanical Properties of Concrete with Double-mixed Recycled Aggregate[J]. China Concrete and Cement Products, 2016(6): 1-6.
- [74] 郭樟根, 陈晨, 范秉杰, 等. 再生粗细骨料混凝土基本力学性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2016, 37(增2): 94-102.  
GUO Zhang-gen, CHEN Chen, FAN Bing-jie, et al. Experimental Research on Mechanical Behavior of Concrete Made of Coarse and Fine Recycled Aggregates[J]. Journal of Building Structures, 2016, 37(S2): 94-102.
- [75] CABRAL A E B, SCHALCH V, MOLIN D C C D, et al. Mechanical Properties Modeling of Recycled Aggregate Concrete[J]. Construction and Building Materials, 2010, 24(4): 421-430.
- [76] 潘丽云, 梁娜, 胡飞佳, 等. 全再生粗骨料混凝土力学性能试验与评价研究[J]. 华北水利水电大学学报: 自然科学版, 2017, 38(6): 32-42.  
PAN Li-yun, LIANG Na, HU Fei-jia, et al. Experimental Study and Evaluation of Mechanical Properties of Full-recycled Coarse Aggregate Concrete[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power: Natural Science Edition, 2017, 38(6): 32-42.
- [77] 石磊. 全再生骨料混凝土配合比及其长期性能试验研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2013.  
SHI Lei. Experimental Study on the Long-term Properties and Mixed Proportion of Full Recycled Aggregate Concrete[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2013.
- [78] 李晓克, 郭琦, 赵顺波, 等. 全再生骨料混凝土配合比设计与试验研究[J]. 华北水利水电大学学报: 自然科学版, 2013, 34(4): 53-56.  
LI Xiao-ke, GUO Qi, ZHAO Shun-bo, et al. Experimental Study on Mix Design of Full-recycled-aggregate Concrete[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power: Natural Science Edition, 2013, 34(4): 53-56.
- [79] 张顺. 全再生骨料混凝土高性能化及再循环研究[D]. 南宁: 广西大学, 2014.  
ZHANG Shun. Testing Research on High Performance Recycled Concrete and Recycling[D]. Nanning: Guangxi University, 2014.
- [80] 牛海成, 范玉辉, 张向冈, 等. 再生混凝土抗碳化性能试验研究[J]. 硅酸盐通报, 2018, 37(1): 59-66.  
NIU Hai-cheng, FAN Yu-hui, ZHANG Xiang-gang, et al. Experiment Study on the Carbonization Resistance of Recycled Concrete[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2018, 37(1): 59-66.
- [81] 韦庆东, 孙俊, 黄沛增, 等. 再生骨料对混凝土的抗氯离子渗透性能影响[J]. 混凝土, 2014(12): 101-104.  
WEI Qing-dong, SUN Jun, HUANG Pei-zeng, et al. Influence of Recycled Aggregate on Resistance of Concrete to Chloride Penetration[J]. Concrete, 2014(12): 101-104.
- [82] TANGCHIRAPAT W, KHAMKLAI S, JATURAPITAKKUL C. Use of Ground Palm Oil Fuel Ash to Improve Strength, Sulfate Resistance, and Water Permeability of Concrete Containing High Amount of Recycled Concrete Aggregates[J]. Materials and Design, 2012, 41: 150-157.
- [83] RAVINDRARAJAH R S, LOO Y H, TAM C T. Recycled Concrete as Fine and Coarse Aggregates in Concrete[J]. Magazine of Concrete Research, 1987, 39(141): 214-220.
- [84] 葛智, 王昊, 郑丽, 等. 废黏土砖粉混凝土的性能研究[J]. 山东大学学报: 工学版, 2012, 42(1): 104-105, 108.  
GE Zhi, WANG Hao, ZHENG Li, et al. Properties of Concrete Containing Recycled Clay Brick Powder[J]. Journal of Shandong University: Engineering Science, 2012, 42(1): 104-105, 108.
- [85] 方倩倩, 於林锋, 王琼. 建筑垃圾再生微粉用于混凝土的试验研究[J]. 粉煤灰, 2015, 27(6): 27-28, 44.  
FANG Qian-qian, YU Lin-feng, WANG Qiong. Experimental Study of Recycled Fine Powder Prepared with Construction Debris for Concrete[J]. Coal Ash, 2015, 27(6): 27-28, 44.
- [86] ZHU P, MAO X Q, QU W, et al. Investigation of Using Recycled Powder from Waste of Clay Bricks and Cement Solids in Reactive Powder Concrete[J]. Construction and Building Materials, 2016, 113: 246-254.
- [87] 薛翠真, 申爱琴, 刘波, 等. 建筑垃圾复合粉体材料

- 对混凝土强度及抗渗性能的影响[J]. 合肥工业大学学报:自然科学版, 2017, 40(1): 71-76.
- XUE Cui-zhen, SHEN Ai-qin, LIU Bo, et al. Impact of Regeneration Composite Powder Material on C30 Concrete Strength and Anti-penetrability Performance[J]. Journal of Hefei University of Technology: Natural Science, 2017, 40(1): 71-76.
- [88] 张修勤. 再生微粉资源化利用试验研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2015.
- ZHANG Xiu-qin. Experimental Study on the Utilization of Renewable Micronized[D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2015.
- [89] 陈雪, 李秋义, 杨向宁, 等. 再生微粉的性能及应用[J]. 青岛理工大学学报, 2013, 34(3): 17-21.
- CHEN Xue, LI Qiu-yi, YANG Xiang-ning, et al. Properties and Application of Recycled Fine Powder[J]. Journal of Qingdao University of Technology, 2013, 34(3): 17-21.
- [90] 张伟. 利用废弃粘土砖制备泡沫混凝土的试验研究[D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2014.
- ZHANG Wei. Experimental Study on Preparation of Foam Concrete Making Use of Waste Clay Brick[D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science & Technology, 2014.
- [91] 刘斌. 建筑垃圾再生细骨料及微粉制备再生砂浆试验研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2019.
- LIU Bin. Experimental Study on Preparation of Recycled Mortar by Construction Waste Recycled Fine Aggregate and Powder[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2019.
- [92] 赵磊. 建筑垃圾再生微粉基本性能及应用研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2019.
- ZHAO Lei. Study on Basic Properties and Application of Recycled Fine Powder from Construction Waste[D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2019.
- [93] FAN C C, HUANG R, HWANG H, et al. The Effects of Different Fine Recycled Concrete Aggregates on the Properties of Mortar[J]. Materials, 2015, 8(5): 2658-2672.
- [94] 皋绍彬. 废弃混凝土全组分再生利用研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2019.
- GAO Shao-bin. Full-component of Waste Cement and Utilization of Recycled Concrete[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2019.
- [95] 鲁飞, 陈正文, 薛胜雄, 等. 摆振水射流破碎混凝土技术研究[J]. 流体机械, 2019, 47(12): 51-55.
- LU Fei, CHEN Zheng-wen, XUE Sheng-xiong, et al. Research on the Technology of Concrete Crushing by Shaking Water Jet[J]. Fluid Machinery, 2019, 47(12): 51-55.
- [96] 罗洋, 祁宇明, 黄贤振. 超高压水射流破拆机器人喷枪结构设计[J]. 装备制造技术, 2017(1): 73-75.
- LUO Yang, QI Yu-ming, HUANG Xian-zhen. Ultra High Pressure Water Jet Breaking Gun Structure Design of Robot[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2017(1): 73-75.
- [97] 潘琳琳. 基于Marx发生器充电电源智能控制方法的研究[D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2016.
- PAN Lin-lin. Research on Intelligent Control Method for Based on Marx Generator[D]. Shenyang: Shenyang Ligong University, 2016.
- [98] 肖瑞敏. 基于数据挖掘技术的混凝土配合比优化设计[D]. 上海: 同济大学, 2004.
- XIAO Rui-min. Mix Design Optimization of Concrete Based on Data Mining Technology[D]. Shanghai: Tongji University, 2004.
- [99] 李顺. 基于数据库系统的自密实混凝土配合比研究[D]. 宜昌: 三峡大学, 2016.
- LI Shun. Research on Mix Proportion Design of Self-compacting Concrete Based on Database System[D]. Yichang: China Three Gorges University, 2016.
- [100] 龙宇. 基于规程的混凝土配合比全计算及智能化设计[J]. 混凝土, 2008(10): 115-119.
- LONG Yu. Overall Calculation and Intelligent Design of Concrete Mix Proportion Based on Specification[J]. Concrete, 2008(10): 115-119.
- [101] 李佳彬, 肖建庄, 黄健. 再生粗骨料取代率对混凝土抗压强度的影响[J]. 建筑材料学报, 2006, 9(3): 297-301.
- LI Jia-bin, XIAO Jian-zhuang, HUANG Jian. Influence of Recycled Coarse Aggregate Replacement Percentages on Compressive Strength of Concrete[J]. Journal of Building Materials, 2006, 9(3): 297-301.
- [102] 肖建庄, 雷斌, 袁颢. 不同来源再生混凝土抗压强度分布特征研究[J]. 建筑结构学报, 2008, 29(5): 94-100.
- XIAO Jian-zhuang, LEI Bin, YUAN Biao. Compressive Strength Distribution of Recycled Aggregate Concrete Derived from Different Origins[J]. Journal of Building Structures, 2008, 29(5): 94-100.