



废弃混凝土再生原理与再生混凝土基本问题

肖建庄^{1,2,3,4*}, 张航华¹, 唐宇翔¹, 吕振源¹, 叶涛华¹, 段珍华¹, 隋同波^{1,5}, 肖绪文¹

1. 同济大学土木工程学院建筑工程系, 上海 200092;
2. 同济大学, 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092;
3. 同济大学, 先进土木工程材料教育部重点实验室, 上海 201804;
4. 同济大学, 工程结构性能演化与控制教育部重点实验室, 上海 200092;
5. 中国中材国际工程股份有限公司, 北京 100102

* 联系人, E-mail: jzx@tongji.edu.cn

2022-05-05 收稿, 2022-07-02 修回, 2022-07-04 接受

国家杰出青年科学基金(51325802)资助

摘要 从混凝土的历史沿革入手, 本文首先阐述了砂石骨料与胶凝材料经科学设计实现原料到产品的制备合成原理; 而后针对服役后废弃混凝土的分离、分解和分级, 剖析了混凝土再生的路径与原则, 揭示了废弃混凝土加工成再生骨料和再生粉料演变机理; 进一步分析了再生原料制备新混凝土面临的基本问题以及多尺度性能改善机制, 并对比传统与现代配合比设计方法, 提出了基于机器学习的再生混凝土设计与制备模式, 提炼了再生混凝土性能设计与应用的三方面准则。最后, 围绕全再生骨料混凝土、碱激发再生骨料混凝土和3D打印再生混凝土等技术, 对再生混凝土的创新与未来发展提出了建议。本文旨在充分发挥废弃混凝土的资源化再利用价值与低碳潜力, 构建混凝土循环再生新范式, 助力建筑业绿色低碳转型。

关键词 废弃混凝土再生, 再生混凝土, 再生骨料, 再生粉料, 全再生骨料混凝土, 面向再生的混凝土设计

由水泥、骨料和水为主要原料, 按适当比例混合拌制并成型硬化所得的人造石材统称为混凝土, 是目前世界上仅次于水的第二大消费品^[1]。1824年, 波特兰水泥的发明成为近代混凝土的开端。1918年, Duff. Abrams提出混凝土强度的水灰比理论, 标志着近代混凝土材料科学研究的开始。由于砂、石等原料可以就地取材且成本低廉, 混凝土被广泛应用于各种建筑结构和土木工程基础设施^[2]。

随着社会经济的进步, 建筑业对混凝土性能的要求也不断提高。为减少构件断面, 追求高强度^[3]; 为适应新型施工工艺以提高效率, 需要高工作性能^[4]; 为避免混凝土变形开裂后引发的安全服役问题, 呼唤高体积稳定性^[5]; 为满足工程结构在海洋、盐卤、极端气

候等复杂大气环境中可持久性要求, 渴望高耐久性^[6]。为响应我国可持续发展战略, 吴中伟^[7]于1998年提出“绿色高性能混凝土(green high-performance concrete, GHPC)”的概念, 旨在节约更多的资源能源, 降低对生态环境的破坏。GHPC的研究工作必须遵循整体论(综合)与还原论(分解)相结合的思维方式, 不断创新与前进。

在满足经济和社会需求的同时, 混凝土也带来了显著的资源 and 生态问题, 如碳排放激增、砂石资源短缺、建筑固废排放量等大。水泥生产是混凝土生命周期碳排放占比最大的部分, 每生产1 t水泥熟料, 约直接排放0.85 t的二氧化碳, 每年全球水泥生产约40亿吨, 占总碳排放的7%以上^[8,9]。另一方面, Bendixen等人^[10]在*Nature*发文, 指出砂子和砾石被开采的速度过快, 应当

引用格式: 肖建庄, 张航华, 唐宇翔, 等. 废弃混凝土再生原理与再生混凝土基本问题. 科学通报, 2022, 67

Xiao J Z, Zhang H H, Tang Y X, et al. Principles for waste concrete recycling and basic problems of recycled concrete (in Chinese). Chin Sci Bull, 2022, 67, doi: 10.1360/TB-2022-0521

在全球范围内监控和管理砂石资源. 近年来, 我国建筑业整体增速放缓, 但每年新增建筑面积依然超20亿平方米, 这与当前砂石资源短缺、价格飞涨的现实形成鲜明对比. 据中国砂石协会统计, 2022年1月份天然河砂均价高达145元/t, 约是2017年均价的2.14倍. 与此同时, 2021年我国建筑固废排放量高达30亿吨, 其中废弃混凝土约占40%, 传统消纳方式占用了大量土地资源, 而且不能够物尽其用; 此外, 天然砂石跨区域长距离运输, 易诱发交通运输安全事故. 因此, 为缓解上述问题, 亟待改变混凝土传统“开环”发展模式, 通过合并“原材料获取”和“消纳与处置”两个阶段, 构建如图1所示的“闭环”模式, 以缩短生命周期, 实现其低碳与可持续发展.

开发废弃混凝土这座“城市矿山”^[11], 将其加工成再生原料并制备新的混凝土, 一般统称为再生混凝土, 可以解决废弃混凝土消纳难题, 同时缓解天然砂石资源短缺现状, 为混凝土原料获取的便捷性、经济性和低碳性提供新的依托^[12,13]. 如何充分发挥废弃混凝土的资源化再利用与低碳潜力, 构建混凝土循环经济发展范式, 打造源于废弃混凝土的新混凝土产业链, 成为突破“建筑业绿色低碳发展”的瓶颈之一, 同时也是全球学术界和工程界的研究热点.

在以往废弃混凝土的再生利用研究中^[12], 多数只参加了部分再生粗骨料(质量取代率一般取30%~70%),

相关研究多借鉴普通混凝土的研究思路, 采用替代与“修正”方案, 未充分考虑“双向设计”及低碳属性. 为此, 本文从合成与分解两个角度, 对混凝土的再生理论和技术进一步剖析, 探究混凝土再生原则与方法, 提出再生混凝土制备理论与应用准则, 使再生骨料的使用由混凝土制备过程中的“附属”作用向主导作用转变, 并讨论再生混凝土的低碳未来与创新新发展.

1 混凝土再生原则与方法

随着材料科学的进步, 混凝土材料不断发展, 但囿于原料-材料-产品的“单向设计”的藩篱, 仍缺少混凝土退役废弃后逆向分解及再生利用的理论. 现有的废混凝土破碎拆分工艺多沿用传统矿山破碎技术, 而缺乏适用于混凝土再利用的技术革新, 就是一个有力佐证. 分离及分解产物通常需要二次乃至多次加工处理才能满足再利用的品质需求, 再生利用工艺流程复杂且产品低碳性、经济性与可持续性不够突出, 阻碍了混凝土的低碳与绿色发展. 如图2所示, 构建混凝土再生原则与方法, 实现原料→产品→废料→再生的闭环, 是解决上述问题的出发点.

1.1 混凝土制备合成

1.1.1 物理组合

混凝土制备合成本质上是寻求混凝土各组分物理

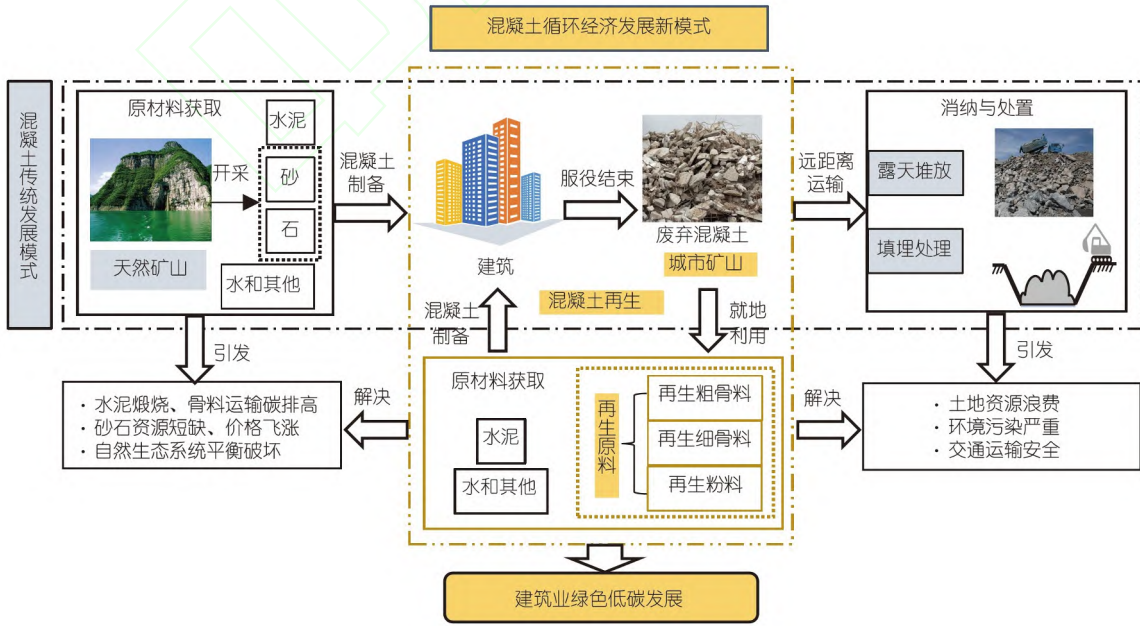


图1 混凝土循环经济发展新模式与传统发展模式对比

Figure 1 Comparison between the new circular and the traditional development paradigms of concrete economy

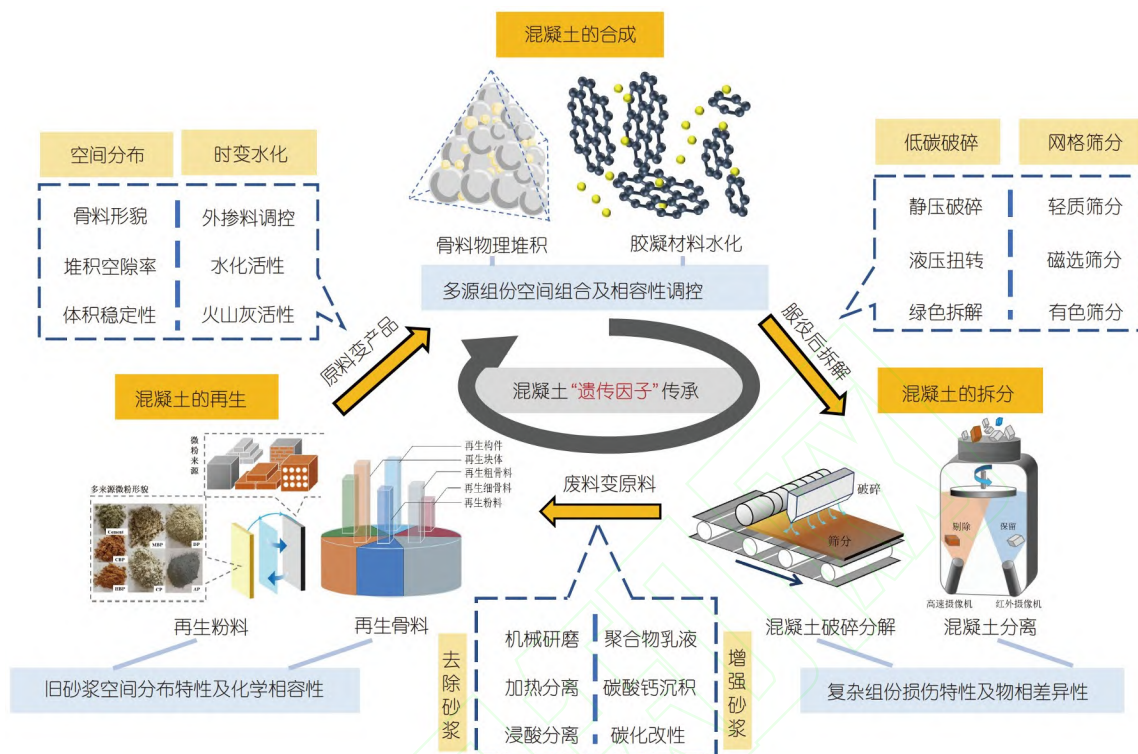


图 2 混凝土再生原则与方法机制图

Figure 2 Principle and methodology of concrete recycling

组合与化学成键协同作用的最优解。骨料对混凝土而言犹如“骨骼”，骨料空间堆积实现了混凝土多源组分的空间组合架构。粗骨料与细骨料是形成骨料颗粒间堆积、传递骨料堆积应力及整体稳定性的重要一环，约占混凝土总体积的70%~80%^[14]。物理组合基于最紧密堆积理论连续级配下最小空隙率参数，依据不同材料粒度分布优化颗粒堆积空间结构、调控骨料间应力分配及降低空隙空间离散分布^[8]。目前，考虑颗粒尺寸和堆积优化关键参数的经典模型包括Furnas模型^[15]、Modified Toufar模型^[16]、Linear Packing模型^[17]及Compressible Packing模型^[17]等，而松动效应与壁效应作为表征骨料颗粒间相互作用力较广泛的两种解释，描述了粗细颗粒间堆积结构影响机制。

1.1.2 化学成键

胶凝材料对混凝土而言犹如“肌肉”，其水化、硬化实现了混凝土由骨料个体形成为整体结构的蜕变^[18]。具体而言，水泥等胶凝材料与水作用生成水化硅酸钙、氢氧化钙、水化硫铝酸钙等产物，包裹骨料及填充空间分布空隙，由可塑体逐渐转变为硬化石状体^[9]。减水剂中含诸多羧基、磺酸基、羟基等亲水官

能团，具备吸附水泥颗粒及提升分散性能的作用。此外，主链上的脂肪族接枝嵌段型柔性憎水基团提供良好的空间位阻作用，能够进一步提升水泥颗粒分散性，使混凝土在相同工作条件下的性能全面提升，混凝土水化硅酸钙凝胶结构致密，实现骨料紧密堆积下宏观性能提升。水化反应伴随离子的断键与成键，映射为生成水化物水解和溶解过程，直至溶解呈饱和状态；随着水泥颗粒分散，矿物熟料发生局部反应而生成凝胶并放热，最终转变为交织的凝胶体^[19]，组间生成强度将骨料个体与凝胶体紧密结合为混凝土。

随着胶凝材料研究的推进，研究发现，水泥石的孔隙率、孔径大小及其分布、孔几何形态是影响混凝土宏观性能的主要因素。减水剂和复合型外加剂等作为调控材料强化了微结构界面，但也增大了混凝土破碎时骨料与硬化浆体分离难度。骨料与高强度浆体间的较高黏结性能增大了混凝土破碎分解能耗，提高了混凝土分离后组分再利用成本。此外，再生骨料来源随机性受胶凝材料、减水剂与外加剂经初次水化后形成附着旧砂浆复杂化学产物多样性影响，随着不同外加剂掺入下混凝土性能多目标调控，复杂组分与减水剂间

的相容性问题也愈加凸显。

1.2 混凝土的拆分

1.2.1 混凝土分离

废弃混凝土在分解破碎前,需经结构拆解及杂料分离才可进一步破碎,如图3所示。分离包括轻质物筛分(如风选法和水选法)、磁力筛分、有色筛分及图像识别智能筛分等^[20]。轻质物筛分是利用固废密度差异,通过风力或水浮力作用将塑料、轻质板及纤维类废物等与混凝土分离。钢筋与混凝土的分离可以通过在外力作用下两者的不同变形特性实现,也可通过磁力筛分利用大功率磁铁摄取混凝土中含铁磁性材料。混凝土和红砖的分离,可以通过有色筛分方法借助高速摄像系统实时反馈颜色及形貌特征。图像识别智能筛分则经人工智能识别图片特征反馈分选机剔除废弃混凝土中的红砖、瓷片及玻璃等异形杂质^[21]。

1.2.2 混凝土分解

混凝土分解是将合成组分中胶凝材料与骨料逆向剥离的过程,聚焦分解凝胶体系可获取多类别高价值产物^[22]。机械破碎、酸浸溶解及加热剥离等传统分解方法,一定程度上可使骨料与表面附着水泥砂浆分离,但存在破碎程度有限、耗能高和所得再生骨料性能差

等问题。而化学处理后骨料表面含有较多盐类物质,直接应用将削弱再生混凝土耐久性能^[23]。传统分解产物中骨料约占破碎总体积的65%,砂浆块、土及轻质废物约占35%,高性价比原料产出效率较低。而基于拆解和破坏力学原理的静压破碎、液压扭转破碎及高压脉冲破碎等新型分解工艺相较于传统冲击破碎具有更低的能耗,其低噪音、低碳排、低能耗及破碎效果好等特性符合建筑绿色拆解理念,并且有助于废料的网格化分置,降低多层次原料再应用成本^[24]。但现有分解工艺一般关注从废料到资源化骨料的整体产率,而缺乏对不同来源废弃混凝土特性的考虑,通过以产品质量为导向的逆向反馈工艺设计,有助于优化在资源化利用过程中产生的高价值再生粉料与骨料占总体的比例。基于混凝土微观界面水化特征,建立多源废弃混凝土适用性分解比(各分解产物占拆除总量体积比),开发动态智能破碎-在线监测反馈体系,是解决上述问题的有效途径。

1.3 混凝土再生

1.3.1 再生骨料

由废弃混凝土分解生成、包含天然碎石与随机分布附着老砂浆的产物称为再生骨料。附着老砂浆承载

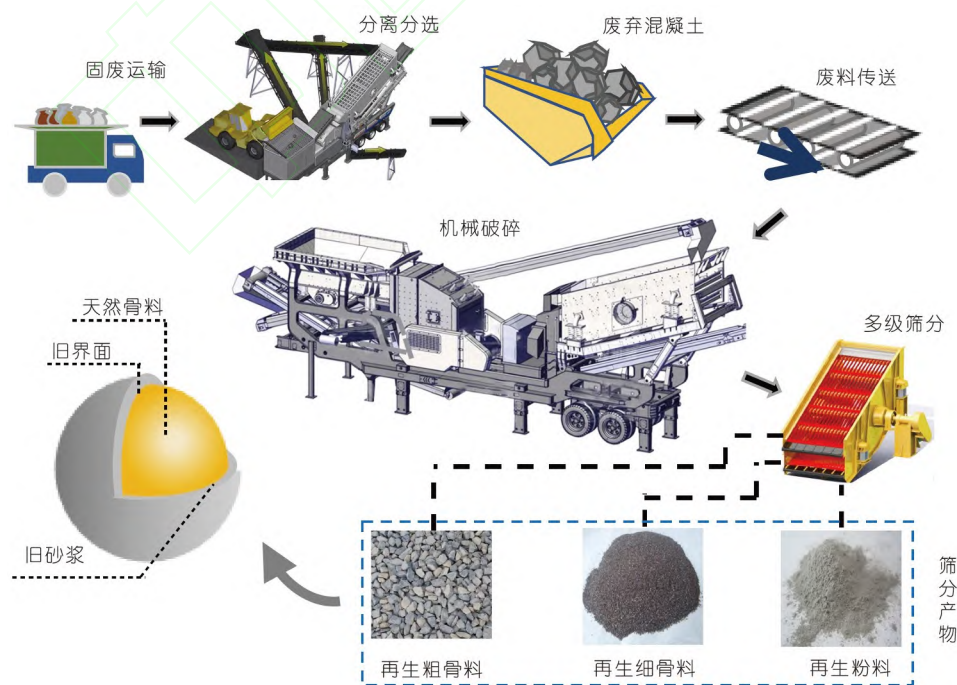


图3 (网络版彩色)混凝土再生全流程

Figure 3 (Color online) Whole process of concrete recycling

着原始(废弃)混凝土的“基因”,是再生骨料与天然骨料的主要差别,老砂浆的时空随机分布是再生混凝土劣化和离散问题的根源,传承并记录着上一代(原生)混凝土的详细信息(如配合比信息、损伤演化等)。如表1所示,通过多级筛网分置,可依据粒径差异分为大粒径再生粗骨料、一般再生粗骨料、再生细骨料及再生粉料等。其中,再生骨料颗粒形貌呈现棱角多、表面粗糙、附着有硬化水泥砂浆等特点,且在破碎过程中因损伤累积微裂纹,导致其孔隙率高、吸水率大、堆积密度小、压碎指标高^[25]。GB/T 25177基于表观密度、压碎值及吸水率等参数将再生粗骨料分级为I类、II类及III类等,其中I类为性能接近天然骨料的高品质再生骨料。II类与III类再生粗骨料可通过去除或增强旧砂浆,利用工业微波、工业尾气碳化、纳米材料填充等科学改性手段优化骨料品质,提升其再利用价值^[26]。另外,可以通过颗粒整形优化、级配调整等方法,提升再生骨料体系的整体性能^[27]。

1.3.2 再生粉料

除再生骨料外,再生粉料作为废弃混凝土资源化产物的另一种形态,其颗粒尺寸和化学组成接近粉煤灰。再生微粉为混凝土资源化粒径小于75 μm 的颗粒产物,依据细度、活性指数及需水比等参数经《混凝土和砂浆用再生微粉》(JG-T 753-2020)分为I类及II类。除混凝土资源化方式,其来源也包括黏土砖、空心红砖、加气砖及收尘等。其中,活性 SiO_2 、活性 Al_2O_3 等组分与氢氧化钙反应,生成水化硅酸钙、水化铝酸钙或水化硅铝酸钙等反应产物,表现为粉料的火山灰活性^[28]。而 C_2S 、 C_3S 、 C_3A 及 C_4AF 等未水化的水泥矿物成分使混凝土粉料具备水化活性,能够经水化作用生成水化硅酸钙凝胶、AFt、AFm等产物,有效降低水泥用量。现有提升再生粉料活化手段包括热激活、物理研磨(机械激活)及化学激发形式。热激活通过使水化产物在数百摄氏度高温下脱水形成脱水相,从而具备一定活性。机械激活通过研磨使未水化的水泥颗粒破碎

并暴露出活性成分进而获得水化能力,并通过增加粉料比表面积,从而提升粉料与液相组分接触面积,加快胶凝体系水化速率。化学激发则促进水泥浆体碱度提高,使硅酸盐和铝酸盐中的Si-O和Al-O键发生断裂,更易发生缩聚反应生成凝胶产物,从而提高胶砂强度。已有研究表明,掺量 $\leq 20\%$ 时,经碳化改性后颗粒粒径 $\leq 100 \mu\text{m}$ 的再生粉料不会降低混凝土抗压强度^[29],且激发剂(如 CaO 、 Na_2SO_4 、 NaOH 等)的应用不同程度地提升了再生混凝土的力学性能^[30]。此外,再生粉料可掺入聚合物、建筑涂料、路基填料、人造骨料及景观净水材料,应用于多领域、多场景,其中作为活性辅助胶凝材料取代水泥能够显著减少碳排放,凸显再生粉料建造应用低碳属性。但再生粉料存在原生混凝土制备过程中添加外掺料和外加剂残留问题及多源性再生粉料间化学相容性问题,值得深入研究。

2 再生混凝土制备理论

采用废弃混凝土分解得到的再生骨料和(或)再生粉料等再生原料制备的混凝土,统称为再生混凝土。由于再生骨料存在初始缺陷较多、级配不规整等问题,再生粉料具有高吸水性及反应活性差异大等缺陷,再生混凝土与相同配合比的普通混凝土相比,表现出强度和弹性模量等下降,而收缩和徐变等增加的特点。为探索适合再生混凝土设计、制备、施工的方法与理论,应先攻克再生混凝土从原料、材料到结构的多尺度性能变化与基本问题,进而比较研究适用于再生混凝土的性能预测与配合比调控方法,最终形成指导再生混凝土制备的性能与应用准则。

2.1 再生混凝土多尺度性能

2.1.1 再生原料复杂特性

再生原料通常具有成分复杂、性质离散性高的特点。受限于现有破碎与筛分工艺,再生骨料的颗粒级配相对于天然骨料有显著的区别,且同一级配区间内的

表 1 再生原料基本性能及分类方法

Table 1 Basic properties and classification methods of recycled materials

原料类型	表观密度(kg/m^3)	粒径范围(mm)	老砂浆含量(%)	老砂浆空间分布	推荐应用场景
大粒径再生粗骨料	2450~2750	>31.5	30~50	环绕、附着、独立	大体积混凝土、防浪块
一般再生粗骨料	2300~2800	4.75~31.50	20~40	环绕、附着	混凝土
再生细骨料	2200~2500	0.15~4.75	30~60	包裹、独立	混凝土、砂浆、填料
再生粉料	2500~2800	<0.15	70~90	研磨后分散	混凝土、砂浆、涂料

再生骨料物理(吸水率、粒径、表面形貌等)与化学性质(物相组成)离散性较大^[31]. 再生粉料的粒径分布可由调控研磨工艺基本实现控制, 但其化学组成的变异性则更加明显. 再生原料性能控制难的特点为品质稳定的再生混凝土生产带来了挑战, 亟需有效的新技术与完善的制备理论, 实现再生混凝土的性能可控.

2.1.2 再生混凝土水化进程与细观结构特征

由于引入了再生骨料(部分或全部取代天然骨料)或再生粉料(作为辅助胶凝材料部分取代水泥), 再生混凝土的物相组成相较普通混凝土发生了较大的变化; 约占天然粗骨料质量20%~40%旧砂浆的引入使再生混凝土由原本“硬化浆体-骨料-孔隙”的三元体系转变为“硬化浆体-旧砂浆-骨料-孔隙”的四元体系, 致使其性能劣于普通混凝土^[31]; 同时, 由于再生骨料性能存在时间和空间的变异性, 致使用于制备再生骨料混凝土的细观结构更加复杂^[32](图4).

再生骨料引入的旧浆体不仅提高了骨料的吸水率及其离散性, 且在硬化浆体-骨料交界处形成了双重的界面过渡区. 基于扫描电子显微镜、纳米压痕等纳微观测试的再生骨料混凝土模型化研究^[33], 证明了界面过渡区纳观力学性能与微观结构的复杂特性, 天然骨

料与旧砂浆间形成的旧界面过渡区有显著较低的弹性模量, 而再生骨料新旧界面过渡区的致密与疏松直接影响着再生混凝土宏观性能的优劣^[34]. 再生混凝土在受力破坏时裂缝最有可能首先出现在旧界面过渡区处并进一步向旧砂浆发展^[35]. 此外, 再生骨料表面的旧砂浆与加入新砂浆中的再生粉料都对混凝土水化反应的发展进程与产物带来较大影响. 旧砂浆中的未水化颗粒会部分参与新混凝土形成时的水化反应^[36], 而再生粉料与普通硅酸盐水泥在元素组成上的差异造成了硬化浆体中 SiO_2 含量的提高, 并通过微填充效应提高混凝土内骨料表面的密实度, 均影响着再生混凝土的基本性能^[37].

2.1.3 再生混凝土基本性能

再生骨料和再生粉料的引入对混凝土的材料性能造成重要影响. 由于旧砂浆的引入与孔隙结构的改变, 再生混凝土在工作性能、力学性能^[38]、收缩与徐变性能^[37,39]以及耐久性^[40]方面均较普通混凝土有一定的下降. 再生骨料附着品质较差且分布不均匀的旧砂浆, 改变了混凝土中的孔隙结构及其演化规律, 同时也带来了新-老界面层的多重界面损伤^[41]. 随着再生骨料含量的增加, 荷载作用下的混凝土细观结构变化与裂

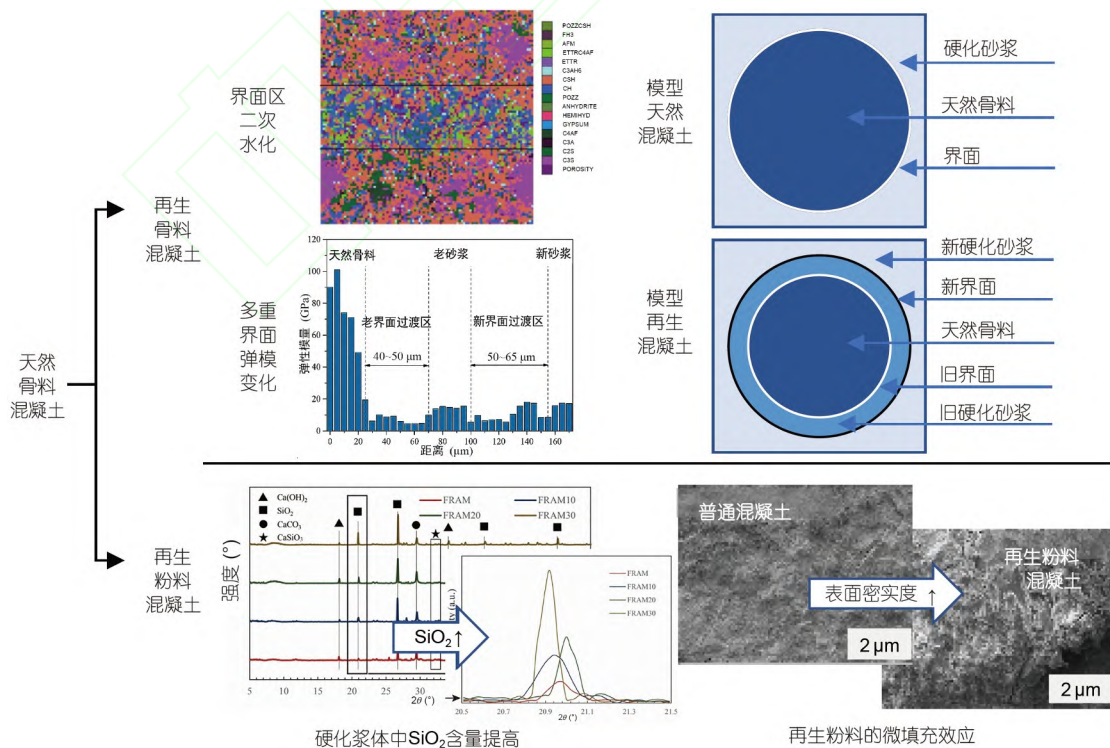


图4 再生混凝土细观结构特征转变示意图

Figure 4 Schematic diagram for the microstructure characteristics of recycled concrete

缝损伤发展规律亦随之改变。再生骨料的掺入降低了混凝土的峰值应力且提高了峰值应变,其弹性模量与割线模量均减小,改变了混凝土的本构特征,进而影响再生混凝土结构受力行为^[42]。此外,研究发现,再生混凝土与普通混凝土相比具有相近的抗冲击能力、较高的阻尼、较强的高温下抗爆裂能力等优势,在材料与结构设计中扬长避短,可进一步利用再生混凝土的优势^[31]。

为了保障再生混凝土的安全应用,众多学者探索了各类优化再生混凝土材料基本性能的路径与方法,并发现通过优化再生骨料品质^[43]、调整级配和混凝土配合比与制备工艺等方法,能够显著提升再生混凝土的宏观性能,如图5所示。以碳化改性为例,研究表明,碳化处理再生骨料能够显著提高再生骨料混凝土的基本性能,其中抗压强度提升约13%^[44],长期收缩应变减少约31%^[45]。为使再生混凝土能够安全、经济地应用于结构构件,其结构行为特征也成为再生混凝土研究的基本问题之一。钢筋再生骨料混凝土结构构件通过合理配筋设计,可实现与普通混凝土构件接近的承载能力。同时,将再生混凝土与钢材、普通或高强混凝土组合衍生的构件^[46,47],可充分利用材料特性(图5)。另外,通过适当措施能够显著减轻再生混凝土耐久性劣化带

来的负面作用,如采用纤维增强复合材料(fiber reinforced polymer, FRP)筋替换钢筋作为加筋材料(图5)^[48]。为保证再生骨料混凝土构件服役期内安全可靠,应在设计时考虑再生骨料混凝土构件时变可靠度分析。

综上,再生原料的掺入影响着再生混凝土的多尺度性能,为应对以上的性能变化,在再生混凝土的制备阶段需要对其配合比设计方法进行完善与创新,并进一步对其制备提出安全应用、经济耐久以及低碳可持续三方面准则,以实现原生与再生混凝土的统一制备理论。

2.2 再生混凝土配合比设计方法

再生材料的引入增大了混凝土原材料的复杂性、多样性与离散性,给再生混凝土的配合比设计提出更高要求。现有研究多致力于修正传统配合比设计方法^[49],近几年在开发基于大数据的智能配合比设计方法^[50]方面进行了积极探索,有望提出适用于再生混凝土特征的精准配合比设计方法。

2.2.1 再生混凝土传统配合比设计

混凝土的传统配合比设计方法主要包括以下步骤:

(1) 依据经验公式推算水泥用量与水胶比; (2) 根据体积法或质量法推算骨料用量; (3) 采用“试错法”将所得配

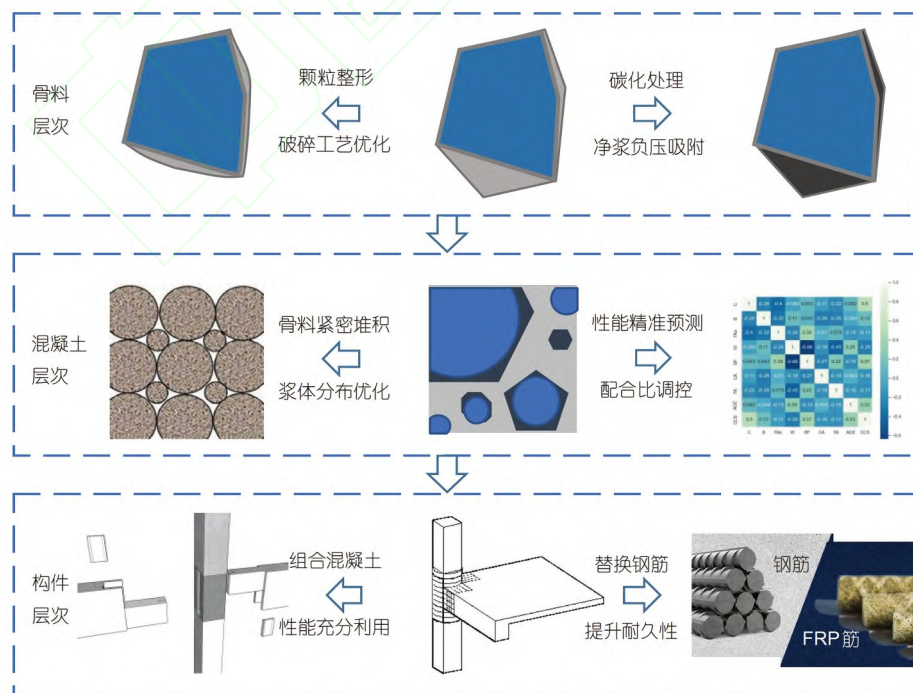


图5 (网络版彩色)再生混凝土多层次性能提升

Figure 5 (Color online) Multi-level performance improvement of recycled concrete

合比进行试配, 进行预实验并调整配合比. 该配合比设计方法主要基于沿用百年的鲍罗米公式:

$$f_R = af_{ce} \left(\frac{B}{W} - b \right), \quad (1)$$

该公式建立了混凝土的水胶比与强度之间的关系, 可以快捷、简化地指导试配法设计中的初始配合比估算. 然而, 简单的拟合系数很难表达性质复杂、离散性大的再生原料对混凝土强度的影响. 因此, 大量学者展开了基于经验回归的再生混凝土鲍罗米公式修正研究, 如式(2), 设计了双掺(再生粗、细骨料)再生混凝土的强度-水灰比公式^[49]:

$$f_R = af_{ce} \left(\frac{B}{W} - b \right) \cdot k_{RCA} \cdot k_{RFA}, \quad (2)$$

其中, f_R 和 f_{ce} 分别为混凝土与胶凝材料的28 d抗压强度(MPa); B 和 W 分别为胶凝材料与水的质量(kg/m^3); a 和 b 分别为线性回归系数; k_{RCA} 和 k_{RFA} 分别为再生粗、细骨料修正系数, 由再生骨料的取代率与吸水率确定.

上述修正方法考虑了再生粗、细骨料的吸水特征, 能够一定程度上指导再生混凝土配合比设计. 当前再生骨料混凝土的配合比设计方法大多参照普通混凝土进行调整, 可初步满足再生骨料混凝土的应用需求, 但难以准确刻画再生骨料本身的复杂品质特征与再生粗、细骨料的复合影响.

2.2.2 基于人工智能的再生混凝土配合比设计

为了实现材料复杂组分最优组合, 并兼顾基本性能提升需求, 依靠大量数据、适应多变量多目标的机器学习方法被用以指导再生骨料混凝土的配合比设计^[50].

当前基于机器学习的再生骨料混凝土性能预测模型, 包括人工神经网络^[51]及决策树算法^[52]等, 可以实现针对再生骨料特性的混凝土性能预测. 另一方面, 再生骨料混凝土的性能受再生骨料来源、品质、级配及取代率等诸多因素影响, 其波动性已引起学者的关注, 但仍缺乏有效的控制措施^[53]. 此外, 再生骨料高取代乃至全取代下混凝土性能离散较大是影响再生混凝土应用的关键问题. 在进一步研究中, 应从材料组成角度剖析传统数据, 注重开发具备泛化能力强的再生骨料混凝土离散性表征与控制方法, 达到精准预测再生混凝土性能并准确设计再生混凝土配合比的目的, 实现再生混凝土性能的提高与离散性的降低.

综上, 通过优化再生混凝土的性能预测方法, 逐步

实现更精准的配合比设计, 有望提高混凝土性能(μ)的同时降低其性能方差(σ^2), 如图6所示. 制备再生混凝土时应充分考虑再生骨料的基本特性修正传统拟合模型, 进一步通过机器学习的手段, 综合考虑多因素的再生混凝土原材料及其性质、多目标的再生混凝土性能, 实现再生混凝土配合比精准设计.

2.3 再生混凝土性能与应用准则

在深入研究再生混凝土的多尺度性能与配合比设计以尝试解决再生混凝土基本问题的同时, 还需要为再生混凝土的应用确定性能设计策略与工程应用准则. 基于以上分析研究并结合工程设计方法, 本文总结了三方面的再生混凝土性能与应用准则, 便于今后科研工作者和技术人员参考.

2.3.1 安全应用准则

相较于同配合比的普通混凝土, 再生混凝土的性能降低且离散性较大, 在制备阶段应首要考虑其性能满足混凝土材料与结构安全应用的需求. 现有研究厘清了再生混凝土材料性能劣化机理与纳微结构特征, 在再生混凝土多层次设计过程中提供了多种性能改善路径. 应在充分利用再生混凝土强度的基础上, 进一步完善再生混凝土离散性系统控制策略, 通过优化的配合比设计与合理的制备工艺选用, 降低再生混凝土性能的均方差, 并结合再生混凝土结构构件时变可靠度与安全性能调控设计方法^[54], 构建适用于不同再生混凝土的材料分项系数选择规则, 充分考虑再生混凝土损伤本构与高阻尼比, 开展全过程非线性分析等, 实现再生与原生混凝土结构统一的安全设计理论.

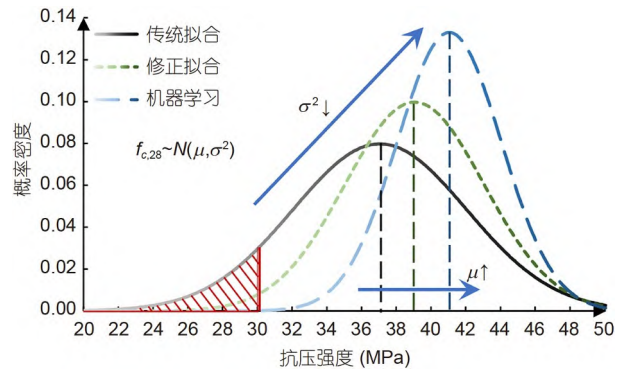


图6 (网络版彩色)不同配合比设计方法对再生混凝土抗压强度离散性调控预测

Figure 6 (Color online) Prediction for the discrete control of recycled concrete compressive strength by different mixture design methods

2.3.2 经济耐久准则

充分考虑就地取材、减少运输和填埋等特点,再生混凝土在规模化应用后,其经济效益可以进一步提高^[55]。此外,在不同服役环境下(如碳化、氯离子等),需重点关注再生混凝土由有害介质侵蚀作用引起的内部筋材锈蚀退化的进程与规律,并针对其耐久性问题对具体设计参数进行限制,如在氯盐侵蚀下考虑适用于不同再生混凝土的氯离子扩散系数等关键参数。基于此,进一步限制再生混凝土结构的钢筋保护层厚度、适用环境等级等,以提高再生混凝土材料与结构的耐久性及设计使用年限,使原生与再生混凝土在相同设计水准下达到相当的服役寿命,进一步提高再生混凝土生命周期内的经济效益。

2.3.3 低碳可持续性准则

将废弃混凝土生产的再生骨料与再生粉料应用于混凝土,在提高经济效益的同时,也赋予了再生混凝土较高的减碳特性。开发当地“城市矿山”,利用再生原料和再生混凝土的低碳属性与再生原料碳化改性增强方法赋予的吸碳特性,并进一步研究再生粉料作为辅助胶凝材料再利用的潜质,能够在实现安全与经济的基础上,同时兼顾再生混凝土的低碳可持续性设计,关注再生混凝土生命周期中的碳排放量、碳吸收量等评价指标,在安全、经济的基础上叠加碳减量、碳再用与碳循环的低碳技术3R⁺C原则,建立高效的生命周期碳分析平台与调控机制,充分挖掘再生混凝土的低碳潜质^[56]。

3 再生混凝土创新发展

废弃混凝土再生利用的研究仍在不断深入。为了充分发挥废弃混凝土的资源化再利用价值与低碳潜力,构建混凝土循环再生新范式,本文从全再生骨料混凝土(full recycled aggregate concrete)、碱激发再生骨料混凝土(alkali-activated recycled aggregate concrete)以及3D打印再生混凝土(3D printed recycled concrete)等方面,进一步展望再生混凝土的创新发展。

3.1 全再生骨料混凝土

为进一步提高再生骨料的低碳效益及效率,建议发展全再生骨料混凝土技术^[37,57]。全再生骨料混凝土指通过应用100%的再生粗、细骨料替代天然砂石制备而成的混凝土。全再生骨料体系的制备,通过在筛分阶段结合级配调控,可避免骨料先筛分成不同的粒径、分开运输、分仓储备和再次混掺拌合的复杂工序,

智能破碎技术可实现其优化生产。由于再生骨料皆由当地已有废弃混凝土破碎而得,全再生骨料混凝土的应用可以大幅降低由骨料开采和运输所带来的碳排放。一般认为,超过30%掺量再生骨料的使用会导致混凝土性能出现一定程度的劣化,但是我们的前期研究表明,与普通混凝土相比,采用适宜配比全再生骨料混凝土的28 d抗压强度降低15%左右,180 d抗压强度相较于普通混凝土降低约12%,全再生骨料混凝土的28 d立方体抗压强度可达46.73 MPa(再生粗骨料替代率为100%、再生细骨料替代率为100%、水泥用量为400 kg/m³、水胶比为0.45、砂率约为36.6%),考虑其离散性并根据GB/T 50107-2010的规则进行评价,其抗压强度设计值为24.7 N/mm²,满足C35的混凝土强度要求(GB/T 50010规定,C35混凝土强度设计值为23.4 N/mm²)^[37]。由于相同配比下较低的工作性能与较高的坍落度损失,预制装配式被认为是推广应用再生混凝土乃至全再生骨料混凝土较优的工业化建造方式,能够更好地实现再生混凝土的质量控制。

对再生骨料进行多次循环也是提高再生混凝土低碳效益及环保潜力的有效手段。de Brito团队^[58]验证了多次再生骨料混凝土(应用多次循环利用的再生骨料制备而成的混凝土)的低碳效益会随再生骨料循环次数增加而不断累加。

3.2 碱激发再生骨料混凝土

水泥生产占混凝土生产碳排放的约70%,通过减少水泥用量,可以显著降低混凝土碳排放^[59]。应用碱激发胶凝材料完全替代水泥提供了减排的高效路径,由此复合掺加再生骨料制备的混凝土,即碱激发再生骨料混凝土。通常,碱激发胶凝材料是通过强碱性溶液与铝硅酸盐之间的“溶解-再聚合”反应而成。目前,碱激发再生骨料混凝土已被大量研究^[60]。然而,随着全球低碳行动的推进以及工业产业模式的升级转型,可用于碱激发的铝硅酸盐工业废弃物面临着产量降低、地区分布不均、行业间需求竞争等问题^[61]。因此,为了使碱激发再生骨料混凝土的应用得到普及,学者尝试采用建筑废弃物作为前驱体制备碱激发胶凝材料。特别地,与硅酸盐水泥(PⅡ 42.5)相比,碱激发再生粉在同强度等级下的单位碳排放可以从18.79 kg/(MPa·t)显著降低至13.15 kg/(MPa·t)^[62]。因此,未来可以进一步通过将碱激发再生粉与再生骨料结合以制备更绿色、更实用的新型低碳再生混凝土。类似地,其他低碳胶凝材料体系也有望用于制备低碳

再生骨料混凝土, 如LC3水泥、贝利特水泥和基于颗粒堆积模型优化的低水泥用量胶凝体系。

3.3 3D打印再生混凝土

除了上述“可计算”的水泥用量以外, 还需要考虑“不可计算”的水泥用量对再生混凝土碳排放的影响。后者主要指由现浇混凝土施工过程中材料用量富余导致额外的水泥和骨料消耗以及施工模板的消耗, 而以再生骨料和再生粉料制备3D打印油墨, 可以减少“不可计算”的碳排放。一方面, 通过数字化精准控制的方式对再生混凝土进行设计, 3D打印再生混凝土可以极大地减少混凝土的用量富余, 进而减少水泥及骨料的浪费。另一方面, 通过结合拆楼机、智能破碎机、混凝土打印机等新型工业装备, “就地拆解-就地重建”的新兴施工方式可以被实现, 如图7所示。基于这种施工方式, 3D打印再生混凝土的应用还可以减少混凝土运输和振捣等环节的碳排放。研究表明, 3D打印再生混凝土具有良好的可建造性、力学性能及抗裂性^[63]。即使采用100%再生粗、细骨料, 3D打印再生混凝土的各向异性抗压强度仍可达现浇再生混凝土抗压强度的80%^[63]。

3.4 面向再生的混凝土设计

现有混凝土材料设计中, 未主动或超前考虑混凝土

土废弃后处理的问题, 因此再生骨料的高效利用常受限于其附着砂浆的各项性能。基于此, 本文提出一种考虑未来再生骨料回收利用的混凝土材料设计方法, 即在传统混凝土组分的基础上增加分解剂组分。当该混凝土进入废弃回收阶段并通过破碎得到相应再生骨料后, 可以利用微波处理诱导其附着砂浆内均匀分散的分解剂(如纳米 TiO_2 ^[64])发生共振, 进而使附着砂浆从再生骨料表面剥离, 从而得到性能优异的高品质再生骨料和纳米 TiO_2 增强再生砂粉。

进一步, 还可以考虑具有固碳释氧功能的混凝土(又称“光合作用”混凝土)设计方法。据估计, 由于设计使用年限内的持续碳化作用, 混凝土可以“回收”来自其制备所用水泥生产过程碳排放的17%~25%^[65]。因此, 在混凝土使用过程中, 增强其碳化作用, 同时赋予其释氧功能以实现接近与植物、微生物“光合作用”的功效, 是一种新颖且具有突破性的减碳手段。具体而言, 固碳释氧混凝土在本体中设有贯穿的光学纤维。其中, 混凝土本体所增加的光电材料(如 TiO_2)还需要满足光照下反应势 E_{VB} 和 E_{CB} 分别大于2 V和小于1 V的条件^[66,67]。由于碳化过程会使混凝土内部钢筋锈蚀的风险增大, 因此, 我们建议“光合作用”混凝土用于非承重构件, 如建筑填充外墙等; 但是采用不锈钢筋或FRP筋, 则可以考虑应用于接触光环境的承重结构中。

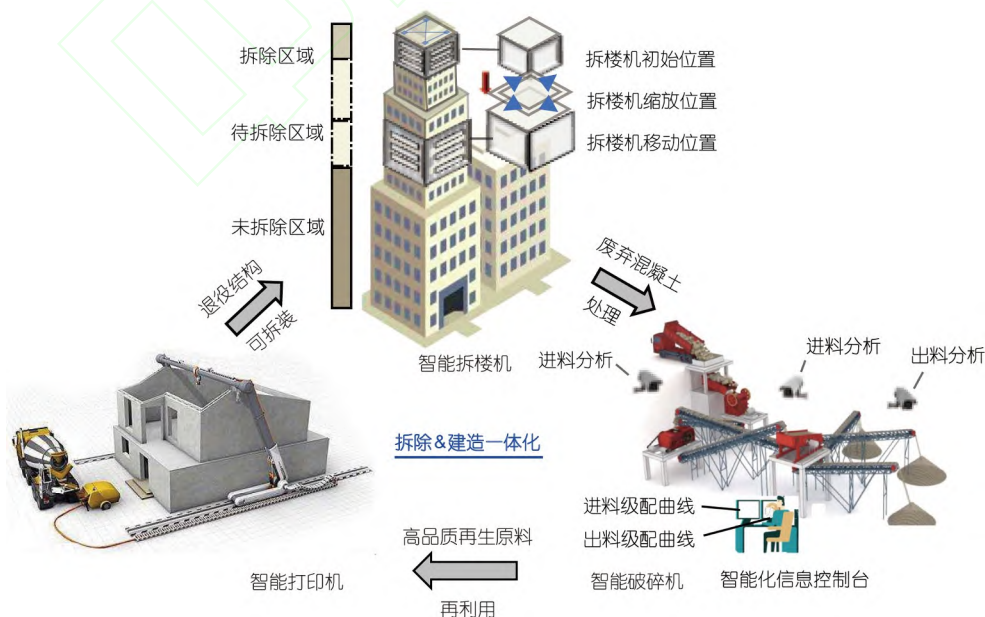


图7 (网络版彩色)基于拆楼机、破碎机和打印机的未来建造范式

Figure 7 (Color online) Future construction paradigm based on demolition robots, crushers and printers

4 结语

本文探究了混凝土制备合成、拆除分解和再生利用的基本原则及方法,明晰了再生混凝土的关键问题根源,对比了配合比设计方法,提出了基于性能设计的再生混凝土制备准则,并对未来再生混凝土的创新发展进行了展望。

使用再生骨料与再生粉料作为再生原料制备再生混凝土,面临着来源不确定、性质复杂、水化进程与微观结构改变以及基本性能变化等多尺度性能变化等挑战。为了实现将难控原料转换为可控材料,需要采用科学手段对再生原料进行改性。通过引入基于大数据的机器学习方法实现材料复杂配合比的最优化设计,提高再生骨料混凝土性能的同时降低其性能离散性。进一步,提出了再生混凝土制备中的性能与应用三准则,即安全应用准则、经济耐久准则与低碳可持续性准则,以推广再生混凝土的应用并提高其经济与生态效益。

混凝土再生利用过程中,附着砂浆的存在及其时空随机分布是各类关键问题的根源,也成为再生混凝土的“遗传因子”。为大幅提高再生混凝土的经济与低碳效益,通过使用100%再生粗、细骨料制备全再生骨料混凝土有望成为新一代再生混凝土,同时,可考虑采用低碳胶凝体系制备全再生骨料混凝土以进一步减碳。利用3D打印技术作为增材建造新方法,可以通过数字化精准控制以减少混凝土的用量富余,进一步挖掘掺加再生骨料和再生粉料混凝土的低碳潜力。此外,可引入考虑再利用的制备设计思想,使用分解剂(如纳米 TiO_2)等措施高效剥离附着砂浆。采用具有光电效应的纳米材料,可用以制备具有固碳释氧功能的混凝土。

再生混凝土的应用需贯彻安全、经济和低碳原则,尚有许多基础问题和配套关键技术需要攻克。相信随着材料科学、力学分析方法以及结构设计理论的不完善,可以实现再生混凝土全过程低碳制备与智能建造。

参考文献

- Newell P. An ancient battle between environment and concrete. *Nat Rev Chem*, 2021, 5: 513–514
- Zhao G F. Development and applications of concrete and its reinforcing materials (in Chinese). *J Build Mater*, 2000, (1): 8–13 [赵国藩. 混凝土及其增强材料的发展与应用. 建筑材料学报, 2000, (1): 8–13]
- Jahren P, Sui T. History of Concrete: A very Old and Modern Material. Singapore: World Scientific Publishing House, 2018
- Chen Z Y. Development and utilization of high-strength and high-performance concrete (in Chinese). *Chin Civ Eng J*, 1997, (5): 3–11 [陈肇元. 高强与高性能混凝土的发展及应用. 土木工程学报, 1997, (5): 3–11]
- Tang M S. Some theoretical problems of alkali-aggregate reaction (in Chinese). *J Chin Ceram Soc*, 1990, (4): 365–373 [唐明述. 关于碱-集料反应的几个理论问题. 硅酸盐学报, 1990, (4): 365–373]
- Sun W. Durability and service life of structure concrete under load and environment coupling effects (in Chinese). *J Southeast Univ (Nat Sci)*, 2006, (S2): 7–14 [孙伟. 荷载与环境因素耦合作用下结构混凝土的耐久性与服役寿命. 东南大学学报(自然科学版), 2006, (S2): 7–14]
- Wu Z W. Green high performance concrete and innovation (in Chinese). *J Build Mater*, 1998, (1): 3–9 [吴中伟. 绿色高性能混凝土与科技创新. 建筑材料学报, 1998, (1): 3–9]
- Editorial. Concrete needs to lose its colossal carbon footprint. *Nature*, 2021, 597: 593–594
- Fennell P, Driver J, Bataille C, et al. Cement and steel—Nine steps to net zero. *Nature*, 2022, 603: 574–577
- Bendixen M, Best J, Hackney C, et al. Time is running out for sand. *Nature*, 2019, 571: 29–31
- Arora M, Raspall F, Fearnley L, et al. Urban mining in buildings for a circular economy: Planning, process and feasibility prospects. *Resour Conserv Recycl*, 2021, 174: 105754
- Xiao J, Li W, Fan Y, et al. An overview of study on recycled aggregate concrete in China (1996–2011). *Constr Build Mater*, 2012, 31: 364–383
- Behera M, Bhattacharyya S K, Minocha A K, et al. Recycled aggregate from C&D waste & and its use in concrete—A breakthrough towards sustainability in construction sector: A review. *Constr Build Mater*, 2014, 68: 501–516
- Glausiusz J. Hundreds of Israel's archaeological sites are vanishing under concrete. *Nature*, 2020, 582: 474–477
- Cox G L, Roetheli B E. Effect of oxygen concentration on corrosion rates of steel and composition of corrosion products formed in oxygenated water. *Ind Eng Chem*, 1931, 23: 1012–1016
- Toufar W, Born E K M. Berechnung der packungsdichte von korngemischen. *Aubereitungs-Technik*, 1977, 18: 603–608
- Fayed M E, Otten L. Handbook of Powder Science and Technology. New York: Chapman and William Hall, 1997
- Fox M D, Puffer L G. Analysis of transient plant movements by holographic interferometry. *Nature*, 1976, 261: 488–490

- 19 Double D D. Cement—A respectable material? *Nature*, 1981, 289: 348–349
- 20 Mora C F, Kwan A K H, Chan H C. Particle size distribution analysis of coarse aggregate using digital image processing. *Cem Concr Res*, 1998, 28: 921–932
- 21 Olorunnisola A O. Effects of pre-treatment of rattan (*Laccosperma secundiflorum*) on the hydration of Portland cement and the development of a new compatibility index. *Cem Concr Compos*, 2008, 30: 37–43
- 22 Andersen M D, Jakobsen H J, Skibsted J. A new aluminium-hydrate species in hydrated Portland cements characterized by ^{27}Al and ^{29}Si MAS NMR spectroscopy. *Cem Concr Res*, 2006, 36: 3–17
- 23 Shi C J, Li Y K, Zhang J K, et al. Performance enhancement of recycled concrete aggregate—A review. *J Clean Prod*, 2016, 112: 446–472
- 24 Xiao J Z, Han N, Liu Q, et al. An intelligent crushing integrated system for continuous graded recycled aggregate (in Chinese). PRC Patent, CN113117857A, 2022-03-08 [肖建庄, 韩女, 刘琼, 等. 一种连续级配再生骨料智能破碎集成系统. 中国专利, CN113117857A, 2022-03-08]
- 25 Kim J. Influence of quality of recycled aggregates on the mechanical properties of recycled aggregate concretes: An overview. *Constr Build Mater*, 2022, 328: 127071
- 26 Li L, Wu M. An overview of utilizing CO_2 for accelerated carbonation treatment in the concrete industry. *J CO_2 Util*, 2022, 60: 102000
- 27 Ulsen C, Tseng E, Angulo S C, et al. Concrete aggregates properties crushed by jaw and impact secondary crushing. *J Mater Res Technol*, 2019, 8: 494–502
- 28 Yu K Q, Zhu W J, Ding Y, et al. Micro-structural and mechanical properties of ultra-high performance engineered cementitious composites (UHP-ECC) incorporation of recycled fine powder (RFP). *Cem Concr Res*, 2019, 124: 105813
- 29 Lu B, Shi C, Zhang J, et al. Effects of carbonated hardened cement paste powder on hydration and microstructure of Portland cement. *Constr Build Mater*, 2018, 186: 699–708
- 30 Corinaldesi V, Moriconi G. Characterization of self-compacting concretes prepared with different fibers and mineral additions. *Cem Concr Compos*, 2011, 33: 596–601
- 31 Xiao J Z. Recycled Aggregate Concrete Structures. Berlin: Springer, 2018
- 32 Leite M B, Monteiro P J M. Microstructural analysis of recycled concrete using X-ray microtomography. *Cem Concr Res*, 2016, 81: 38–48
- 33 Xiao J, Li W, Corr D J, et al. Effects of interfacial transition zones on the stress-strain behavior of modeled recycled aggregate concrete. *Cem Concr Res*, 2013, 52: 82–99
- 34 Poon C S, Shui Z H, Lam L. Effect of microstructure of ITZ on compressive strength of concrete prepared with recycled aggregates. *Constr Build Mater*, 2004, 18: 461–468
- 35 Liu Q, Xiao J, Sun Z. Experimental study on the failure mechanism of recycled concrete. *Cem Concr Res*, 2011, 41: 1050–1057
- 36 Li T, Xiao J, Zhu C. Hydration process modeling of ITZ between new and old cement paste. *Constr Build Mater*, 2016, 109: 120–127
- 37 Zhang H, Xiao J, Tang Y, et al. Long-term shrinkage and mechanical properties of fully recycled aggregate concrete: Testing and modelling. *Cem Concr Compos*, 2022, 130: 104527
- 38 Kou S C, Poon C S, Etxeberria M. Influence of recycled aggregates on long term mechanical properties and pore size distribution of concrete. *Cem Concr Compos*, 2011, 33: 286–291
- 39 Zhang H, Wang Y, Lehman D E, et al. Time-dependent drying shrinkage model for concrete with coarse and fine recycled aggregate. *Cem Concr Compos*, 2020, 105: 103426
- 40 Evangelista L, de Brito J. Durability performance of concrete made with fine recycled concrete aggregates. *Cem Concr Compos*, 2010, 32: 9–14
- 41 Ryu J S. An experimental study on the effect of recycled aggregate on concrete properties. *Mag Concr Res*, 2002, 54: 7–12
- 42 Xiao J, Li L, Shen L, et al. Compressive behaviour of recycled aggregate concrete under impact loading. *Cem Concr Res*, 2015, 71: 46–55
- 43 Chinzorigt G, Lim M K, Yu M, et al. Strength, shrinkage and creep and durability aspects of concrete including CO_2 treated recycled fine aggregate. *Cem Concr Res*, 2020, 136: 106062
- 44 Luo S, Ye S, Xiao J, et al. Carbonated recycled coarse aggregate and uniaxial compressive stress-strain relation of recycled aggregate concrete. *Constr Build Mater*, 2018, 188: 956–965
- 45 Lu B, Shi C, Cao Z, et al. Effect of carbonated coarse recycled concrete aggregate on the properties and microstructure of recycled concrete. *J Clean Prod*, 2019, 233: 421–428
- 46 Yang Y F, Han L H. Experimental behaviour of recycled aggregate concrete filled steel tubular columns. *J Constr Steel Res*, 2006, 62: 1310–1324
- 47 Qiao Z, Pan Z, Xue W, et al. Experimental study on flexural behavior of ECC/RC composite beams with U-shaped ECC permanent formwork. *Front Struct Civ Eng*, 2019, 13: 1271–1287
- 48 Zhou Y, Gao H, Hu Z, et al. Ductile, durable, and reliable alternative to FRP bars for reinforcing seawater sea-sand recycled concrete beams: Steel/FRP composite bars. *Constr Build Mater*, 2021, 269: 121264
- 49 Li Q Y, Yue G B, Guo Y X. Performance Regulation and Mixture Design of Recycled Concrete (in Chinese). Beijing: China Construction Industry Press, 2019 [李秋义, 岳公冰, 郭远新. 再生混凝土性能调控与配合比设计. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019]

- 50 DeRousseau M A, Kasprzyk J R, Srubar Iii W V. Computational design optimization of concrete mixtures: A review. *Cem Concr Res*, 2018, 109: 42–53
- 51 Duan Z, Poon C S, Xiao J. Using artificial neural networks to assess the applicability of recycled aggregate classification by different specifications. *Mater Struct*, 2017, 50: 107–120
- 52 Behnood A, Olek J, Glinicki M A. Predicting modulus elasticity of recycled aggregate concrete using M5' model tree algorithm. *Constr Build Mater*, 2015, 94: 137–147
- 53 Pacheco J, de Brito J, Chastre C, et al. Experimental investigation on the variability of the main mechanical properties of concrete produced with coarse recycled concrete aggregates. *Constr Build Mater*, 2019, 201: 110–120
- 54 Xiao J Z, Zhang K J, Cao W L, et al. Time-dependent reliability-based design of recycled aggregate concrete structures (in Chinese). *J Build Struct*, 2020, 41: 17–27 [肖建庄, 张凯建, 曹万林, 等. 考虑时变可靠度的再生混凝土结构设计. *建筑结构学报*, 2020, 41: 17–27]
- 55 Xiao J, Ma Z, Ding T. Reclamation chain of waste concrete: A case study of Shanghai. *Waste Manage*, 2016, 48: 334–343
- 56 Xiao J Z, Xiao B, Xiao X W, et al. Prospects for low-carbon design theory of concrete structures (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2022, 67: 3425–3438 [肖建庄, 夏冰, 肖绪文, 等. 混凝土结构低碳设计理论前瞻. *科学通报*, 2022, 67: 3425–3438]
- 57 Xiao J Z, Liu Q, Ding T, et al. A preparation method for fully recycled aggregate concrete (in Chinese). PRC Patent, CN113121165A, 2021-07-16 [肖建庄, 刘琼, 丁陶, 等. 一种全再生混凝土及其制备方法. 中国专利, CN113121165A, 2021-07-16]
- 58 Abreu V, Evangelista L, de Brito J. The effect of multi-recycling on the mechanical performance of coarse recycled aggregates concrete. *Constr Build Mater*, 2018, 188: 480–489
- 59 Habert G, Miller S A, John V M, et al. Environmental impacts and decarbonization strategies in the cement and concrete industries. *Nat Rev Earth Environ*, 2020, 1: 559–573
- 60 Xie J, Wang J, Rao R, et al. Effects of combined usage of GGBS and fly ash on workability and mechanical properties of alkali activated geopolymer concrete with recycled aggregate. *Compos Part B-Eng*, 2019, 164: 179–190
- 61 Ye T, Xiao J, Duan Z, et al. Geopolymers made of recycled brick and concrete powder—A critical review. *Constr Build Mater*, 2022, 330: 127232
- 62 Li C, Cui S, Nie Z, et al. The LCA of portland cement production in China. *Int J Life Cycle Assess*, 2015, 20: 117–127
- 63 Xiao J, Lv Z, Duan Z, et al. Study on preparation and mechanical properties of 3D printed concrete with different aggregate combinations. *J Build Eng*, 2022, 51: 104282
- 64 Sumesh K R, Kanthavel K. Effect of TiO₂ nano-filler in mechanical and free vibration damping behavior of hybrid natural fiber composites. *J Braz Soc Mech Sci Eng*, 2020, 42: 211–222
- 65 Xi F, Davis S J, Ciais P, et al. Substantial global carbon uptake by cement carbonation. *Nat Geosci*, 2016, 9: 880–883
- 66 Rossmeisl J, Qu Z W, Zhu H, et al. Electrolysis of water on oxide surfaces. *J Electroanal Chem*, 2007, 607: 83–89
- 67 Valdés Á, Qu Z W, Kroes G J, et al. Oxidation and photo-oxidation of water on TiO₂ surface. *J Phys Chem C*, 2008, 112: 9872–9879

Summary for “废弃混凝土再生原理与再生混凝土基本问题”

Principles for waste concrete recycling and basic problems of recycled concrete

Jianzhuang Xiao^{1,2,3,4*}, Hanghua Zhang¹, Yuxiang Tang¹, Zhenyuan Lü¹, Taohua Ye¹, Zhenhua Duan¹, Tongbo Sui^{1,5} & Xuwen Xiao¹

¹ Department of Building Engineer, College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

² State Key Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineer, Tongji University, Shanghai 200092, China;

³ Key Laboratory of Advanced Civil Engineering Materials, Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China;

⁴ Key Laboratory of Performance Evolution and Control for Engineering Structures, Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China;

⁵ Sinoma International Engineering Co., Ltd., Beijing 100102, China

* Corresponding author, E-mail: jzx@tongji.edu.cn

The discovery and development of contemporary concrete have made substantial contributions to the industrial revolution and urbanization over the last two centuries. The tremendous use of concrete results in a large amount of solid waste and considerable carbon emissions. The effort on waste concrete recycling is significant and vital in light of the national strategy of “carbon peaking and neutrality”. The previous research on the recycled concrete focused on the traditional ideas of aggregate substitution and parameter modification to normal concrete. However, new ideas for waste concrete recycling and low-carbon application of recycled concrete should be further investigated.

The theory and methods of concrete composition, decomposition, and recycling are examined. In general, the synthesis of concrete necessitates managing the characteristics of raw ingredients to increase overall performance. A mature concrete synthesis system was established by the steady physical qualities of sand and gravels, the hydration reaction of cementitious materials, and scientific combination design. Furthermore, the changes in the physical qualities of concrete components provide a theoretical foundation for crushing and sieving to produce recycled materials.

To make recycled concrete (RC), recycled aggregates (RAs) and recycled powder are employed. However, the use of RC is complicated by the uncertainty of raw material sources, variations in the hydration process and microstructures, and discrepancies in basic attributes. Multi-way modification strategies have been developed to improve the qualities of RAs and RC to realize the conversion of difficult-to-control wastes into controllable recycled materials. The qualities of RC are improved and the variability of these features is reduced by incorporating artificial intelligence technologies into the mixture design of RC based on big data. In addition, three criteria for the preparation of RC are proposed, including a safe application criterion, an economically durable criterion, and a low-carbon sustainable criterion, to encourage the promotion of RC and improve its economic and environmental benefits.

For the further development of waste concrete recycling, full recycled aggregate concrete (FRAC), which uses 100% recycled coarse and fine aggregates, is proposed as a new generation of RC to increase the economic and low-carbon benefits of RC. Meanwhile, alkali-activated cementitious materials are being used to prepare recycled aggregate concrete for even further carbon reduction, and 3D printing RC technology is being used to reduce carbon emission and fresh concrete waste during construction. We also suggest a specific concrete design concept for recycling, in which decomposition agents (such as nano-TiO₂) could be employed to easily peel off the attached old mortar from RAs during microwave treatment. The photoelectric effect of nano-TiO₂ could also be used to make concrete with oxygen-releasing properties.

The low-carbon properties of concrete would be a consensus to accomplish its green and high performance with the development of the construction materials sector. Waste concrete recycling is beneficial to enhance waste concrete's resource reuse value and low-carbon potential, as well as create a concrete circular economy development model.

waste concrete recycling, recycled concrete, recycled aggregate, recycled powder, full recycled aggregate concrete, mixture design for recycling

doi: [10.1360/TB-2022-0521](https://doi.org/10.1360/TB-2022-0521)