

再生骨料强化技术及对再生混凝土 性能影响研究综述

何子明^{1,2}, 申爱琴², 王路生², 郭寅川², 何江飞¹

(1. 辽宁工业大学土木建筑工程学院, 辽宁 锦州, 121001; 2. 长安大学公路学院, 西安 710064)

摘要:为厘清国内外关于再生骨料强化技术的研究进展,系统梳理了再生骨料强化方法及提质效能,评析了不同强化方法对再生骨料混凝土性能的影响规律,总结了现有强化方法在应用过程中存在的问题并提出了建设性意见,以期研究者设计和开发绿色高性能再生骨料混凝土提供参考和依据。

关键词:土木工程材料;再生骨料;强化技术;提质效能;再生骨料混凝土;性能评价

中图分类号:TU528 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5497(2025)03-0790-21

DOI:10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20231352

Review on strengthening technology of recycled concrete aggregate and its effect on performance of recycled aggregate concrete

HE Zi-ming^{1,2}, SHEN Ai-qin², WANG Lu-sheng², GUO Yin-chuan², HE Jiang-fei¹

(1. School of Civil and Architectural Engineering, Liaoning University of Technology, Jinzhou 121001, China; 2. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: To clarify the research progress of strengthening technology of recycled concrete aggregate, the strengthening methods of recycled concrete aggregate and its improvement effect were reviewed systematically. The effect of different strengthening treatments on the performance of recycled aggregate concrete was evaluated. The problems existing in the application of strengthening methods were summarized, and constructive suggestions were put forward to provide a scientific basis for researchers to design and develop green high-performance recycled aggregate concrete.

Key words: civil engineering material; recycled concrete aggregate; strengthening technology; improvement effect; recycled aggregate concrete; performance evaluation

0 引言

随着交通强国战略和城市化进程不断推进,我国新建、改扩建基础设施日益增多,对砂石材料

需求量长期居高不下。但出于对生态环境的保护,开山采石受到了严格限制,部分地区已面临严重的天然砂石资源短缺。与此同时,建筑物在拆建过程

收稿日期:2023-12-05.

基金项目:陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2020JZ-22);辽宁省教育厅高等学校基本科研项目(LJ212410154035).

作者简介:何子明(1992-),男,讲师,博士.研究方向:路面再生与养护技术.E-mail:heziming9281@163.com

通信作者:申爱琴(1957-),女,教授,博士.研究方向:道路工程材料与结构.E-mail:saq6305@163.com

中会产生大量固体废弃物且逐年攀升^[1]。实际上,建筑固废是一种潜在资源,经过破碎、分选等处理后可制备成再生骨料,将其重新应用于工程建设中,既可缓解天然砂石材料的供需矛盾,又能减少建筑固废的占地和环境污染,是促进基础设施建设向着绿色可持续方向发展的有力举措。

废旧混凝土在建筑固废中占比较高(约占40%以上),由其生产的再生骨料(Recycled concrete aggregate, RCA)可成为天然骨料的有力替代品^[2]。但再生骨料通常由原生骨料和附着旧砂浆组成,存在孔隙率高、强度低、吸水率大等性能缺点,严重制约了其在工程建设中的大规模及高掺量使用^[3,4]。尽管采用改善拌和方式、掺加活性矿物掺合料、优化混凝土配合比设计等方法能够在一定程度上弥补再生骨料对混凝土性能的不利影响,但并未从本质上解决再生骨料自身缺陷所导致的混凝土弊病^[5]。因此,有必要对再生骨料进行强化预处理,制备出性能优良的再生骨料混凝土(Recycled aggregate concrete, RAC)及其制品,符合当前绿色混凝土的发展要求。

针对上述研究需求,本文结合近年来国内外相关研究成果,归纳总结了再生骨料强化原理及方法,详细论述了强化处理对再生骨料混凝土性能的影响规律,对比分析了不同强化方法的工程局限性,最后对未来可能的研究发展方向进行了展望。

1 再生骨料强化原理与方法

根据再生骨料强化原理,可以归纳为剥离旧砂浆、增强旧砂浆和表面疏水隔离,相关强化方法及主要材料、设备如表1所示。

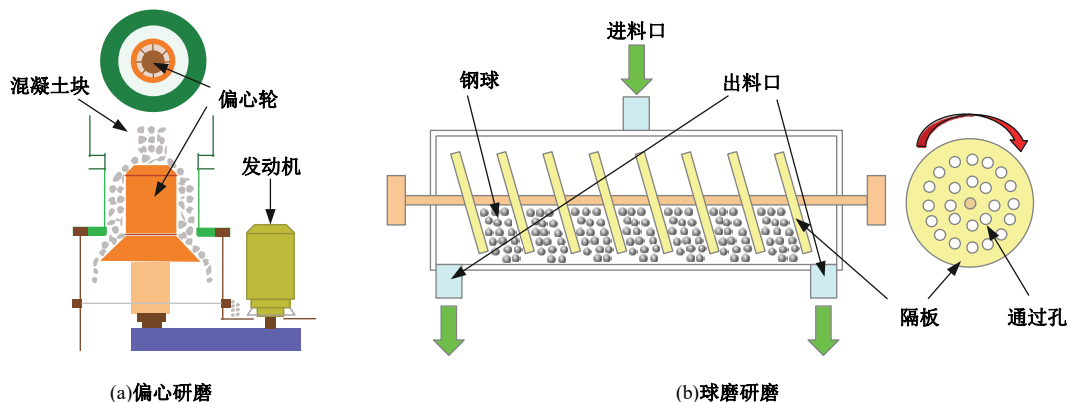


图1 机械研磨设备示意图^[24]

Fig. 1 Schematic diagram of mechanical grinding equipment^[24]

表1 再生骨料强化技术

Table 1 Strengthening technology of RCA			
强化原理	强化方法	主要材料、设备	文献
剥离旧砂浆	研磨处理	研磨机、球磨机、微波加热装置	[6-8]
	酸溶液浸泡	盐酸、硫酸、磷酸、硝酸、乙酸	[9-11]
增强旧砂浆	裹浆处理	水泥、粉煤灰、纳米材料、矿粉	[12-14]
	微生物矿化沉积	好氧型微生物、厌氧型微生物	[15-17]
	加速碳化	二氧化碳、碳化装置	[18-20]
表面疏水隔离	聚合物乳液浸渍	聚乙烯醇、硅(氧)烷乳液、聚合硫酸铝	[21-23]

1.1 剥离旧砂浆

1.1.1 机械研磨法

机械研磨法是指采用专业设备对再生骨料进行加工处理,利用骨料之间的相互碰撞去除颗粒棱角并剥离表面旧砂浆,主要包括偏心研磨法和球磨研磨法,相关设备如图1所示^[24]。

由图1(a)可知,偏心研磨装置由外部壁筒、内部高速旋转的偏心轮和驱动装置组成。当再生骨料进入内部和外部装置之间的空腔后,会受到高速旋转偏心轮的研磨作用,再生骨料的突出棱角以及表面旧砂浆均会被去除。球磨研磨法通过隔板回转,利用钢球与再生骨料之间的相互作用去除再生骨料表面旧砂浆,如图1(b)所示。李秋义等^[25]研究结果显示,经过机械研磨处理的再生骨料表观密度提高了3.5%,吸水率和压碎值分别降低了38.3%和9.5%。相比于简单破碎处理,机械研磨法能够有效去除再生骨料表面旧砂浆,但该方法在实施过程中容易使再生骨料产生细微裂隙,从而造成再生骨料的二次损伤。

1.1.2 加热研磨法

所谓加热研磨法,即利用骨料和砂浆受热后所产生的不同膨胀应力来去除再生骨料表面旧砂浆。Shima等^[26]研究发现,再生骨料在经过300℃热处理后,原生骨料和旧砂浆之间的界面会因脱水而变弱,而后对其进行机械研磨处理,可有效去除再生骨料表面旧砂浆。根据Mulder等^[27]试验结果,再生骨料在经过700℃热处理后,其表面残余旧砂浆仅剩2%。虽然加热研磨处理的温度越高,再生骨料表面旧砂浆越容易去除,但当加热温度超过500℃时,石英相会发生同素异形转变并导致骨料膨胀,致使再生骨料内部产生更多细微裂隙,故采用此方法时应慎重选择加热温度。此外,Quattrone等^[28]研究结果显示,利用加热研磨法处理1t再生骨料较传统研磨工艺所需的燃料高出36~62倍。基于上述,加热研磨法不仅对处理设备要求高,而且存在能耗大等不足,故考虑改进机械设备、降低碳排放是该方法大规模推广应用的关键。

1.1.3 酸溶液浸泡法

该方法利用酸溶液溶解再生骨料表面旧砂浆中的矿物成分(如CaO、Al₂O₃、Fe₂O₃等),使旧砂浆从原生骨料表面剥离,进而提升再生骨料性能。常用的酸溶液有硫酸(H₂SO₄)、盐酸(HCl)、磷酸(H₃PO₄)和乙酸(CH₃COOH)等,其主要化学反应如式(1)~(12)所示^[29]。

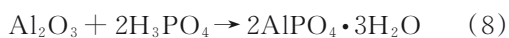
H₂SO₄溶液浸泡再生骨料发生如下化学反应:



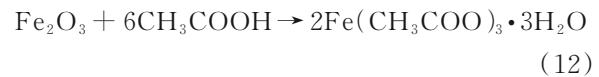
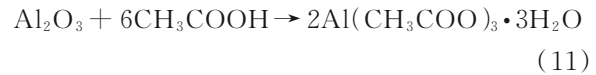
HCl溶液浸泡再生骨料发生如下化学反应:



H₃PO₄溶液浸泡再生骨料发生如下化学反应:



CH₃COOH溶液浸泡再生骨料发生如下化学反应:



Akbamezhad等^[30]研究结果显示,再生骨料吸水率、堆积密度和磨耗值与旧砂浆含量之间存在线性关系,同时发现用2mol/L的H₂SO₄溶液浸泡5d以上才能完全去除再生骨料表面旧砂浆。Tam等^[10]分别采用0.1mol/L的H₂SO₄、HCl和H₃PO₄溶液对再生骨料进行24h浸泡处理,结果显示处理后的再生骨料吸水率降低7.27%~12.17%,其中H₂SO₄和HCl的强化效果较好,H₃PO₄次之。Ismail等^[31]使用不同浓度(0.1、0.5、0.8mol/L)HCl溶液对再生骨料分别浸泡1、3、7d,结果显示旧砂浆剥离量随着HCl浓度的增加而增加,但浸泡时间对旧砂浆剥离量无显著影响。

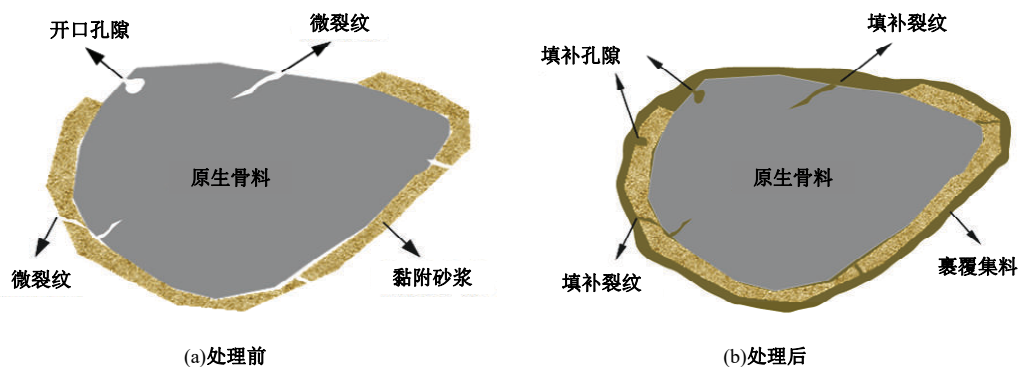
Al-Bayati等^[32]对比相同浓度和浸泡时间下的HCl和CH₃COOH溶液的强化处理效果,结果显示两种酸溶液在改善再生骨料性能方面的效果相似。王亮^[33]研究了不同质量分数CH₃COOH溶液(1%、3%、5%)和浸泡时间(1、3、5d)对再生骨料性能的影响,发现处理后的再生骨料吸水率降低了9%~19%,并确定了在3%质量分数的CH₃COOH溶液中浸泡1d为最佳方案。值得注意的是,由于酸溶液具有腐蚀性,在处理过程中要采取安全防护措施,且酸溶液处理会增加再生骨料表面的化学杂质含量,故应对处理后的再生骨料进行清洗,然而清洗过程需要消耗大量的水,同时还会面临废液的处理问题。

1.2 增强旧砂浆

1.2.1 裹浆处理法

裹浆处理法是将再生骨料浸渍在火山灰材料浆液中,旧砂浆中的氢氧化钙(CH)会与火山灰材料中的活性组分(如SiO₂、Al₂O₃等)发生化学反应,利用生成的胶凝产物填充再生骨料的细微裂隙^[34]。此外,火山灰材料浆液硬化后会在再生骨料表面形成一层固化外壳(见图2),可提升其力学性能^[35]。

Shaban等^[36]采用不同类型火山灰材料浆液对再生骨料进行了浸渍处理,结果显示再生骨料在粉煤灰-水泥-纳米SiO₂浆液中的强化效果最优。张学兵^[37]研究发现,经过活性粉末浆液强化处理的再生骨料表观密度和堆积密度分别增加了5.8%和8.0%,吸水率和压碎值分别降低了10%

图2 再生骨料裹浆处理前后的外观形貌^[35]Fig. 2 Appearance diagram of RCA before and after coating treatment^[35]

和26.4%。根据Zhang等^[38]研究结果,经过纯硫酸盐水泥浆液、玄武岩微粉-硫酸盐水泥浆液(w/c=0.8)强化处理的再生骨料吸水率分别降低了9.77%和18.83%,压碎值分别降低了10.99%和23.08%,但表观密度无明显变化。Zhao等^[12]采用具有不同水灰比的水泥浆液对再生骨料进行了浸渍处理,结果显示再生骨料吸水率和压碎值随着水灰比的增加表现为先降低、后增加,表观密度则先增加、后降低,当浆液裹覆厚度为0.035 mm时的再生骨料性能提升最为显著。Li等^[39]分别采用浸渍和喷涂方式对再生骨料进行了纳米SiO₂浆液强化处理,通过测试再生混凝土抗压强度,发现喷涂处理效果较好,而纳米SiO₂粒径对强化效果影响并不明显。

然而部分研究结果显示,再生骨料在经过火山灰材料浆液预处理后的性能并非全部提升。翁志英^[40]研究发现,水泥浆液浸渍处理可提高再生骨料表观密度,但同时也增加了吸水率。根据陈钿渊^[41]研究结果,经过粉煤灰-水泥浆液浸渍处理的再生骨料表观密度和吸水率分别增加了2%和6.3%、压碎值降低了3.3%,而经过硅灰-水泥浆液浸渍处理的再生骨料表观密度和吸水率分别增加了3.2%和7.8%、压碎值降低了13.2%。Lee等^[42]采用矿渣-水泥浆液对再生骨料进行浸渍处理,结果显示再生骨料吸水率随着裹浆厚度的增加而增大。综上所述,影响裹浆处理效果的主要因素包括火山灰材料类型、浆液浓度和裹浆方式等,通过优化裹浆处理工艺可有效提升再生骨料力学性能,但在改善吸水率方面仍有待进一步研究。

1.2.2 微生物矿化沉积法

微生物矿化沉积法是通过诱导微生物所具有的碳酸钙(CaCO₃)沉积功能,选择性填充再生骨料的细微裂隙^[16]。目前,关于微生物矿化沉积的研究

主要集中在厌氧菌酶化作用和好氧菌呼吸作用。

厌氧微生物会在尿素-氯化钙培养液中新陈代谢并生成脲酶,脲酶水解尿素生成NH₄⁺和CO₃²⁻,同时带负电荷的菌体细胞壁能够螯合Ca²⁺,并与尿素水解产生的CO₃²⁻反应生成CaCO₃,其矿化沉积过程如图3所示^[43]。Grabiec等^[44]利用巴氏芽孢杆菌对再生骨料进行了矿化沉积处理,研究发现处理后的再生骨料吸水率降低了21%,由于生成的CaCO₃填充了再生骨料表面旧砂浆,故再生骨料力学性能也有所改善。Wang等^[15]对再生骨料进行球形芽孢杆菌矿化沉积处理,研究结果显示经过处理的再生骨料质量增加、吸水率降低。

由于厌氧微生物新陈代谢产生氨气,会造成环境污染,故目前较多采用好氧微生物呼吸作用诱导产生CaCO₃沉积法对再生骨料进行强化处理。总结分析表明,影响微生物矿化沉积效果的因素较多,主要包括细菌菌种、培养基组分和处理方式。徐培蓁等^[16]研究结果显示,经过假坚强芽孢杆菌DSM8715和嗜碱芽孢杆菌H14处理的再生骨料力学性能明显提升,因假坚强芽孢杆菌产生的CaCO₃沉淀量较多,故其强化效果更优。朱亚光等^[45]分析了不同供氧剂浓度和浸泡位置对微生物矿化沉积再生骨料性能的影响,结果表明当过氧化钙浓度为15 g/L、浸泡位置在培养液中部时的矿化沉积效果最佳,且再生骨料的吸水率和压碎值分别降低40.4%和19.7%。Wu等^[46]对再生骨料分别采用了浸泡和喷淋两种微生物矿化处理方式,研究发现喷淋处理能够使好氧微生物获得更强的CaCO₃沉积能力。由此可见,好氧微生物矿化沉积法具有生态相容性好、绿色可持续等优点,但处理工艺较为繁杂,在一定程度上限制了对再生骨料的规模化处理。此外,微生物在

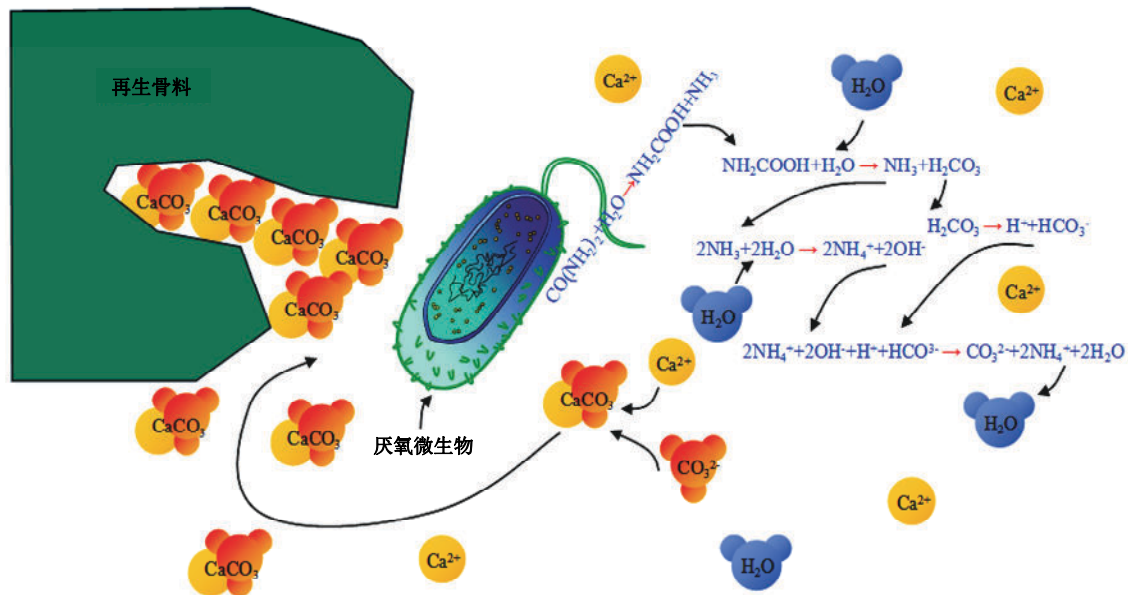


图 3 微生物矿化沉积过程^[43]

Fig. 3 Microbial carbonate precipitation process^[43]

水泥混凝土中的生存能力相对较弱,其失去活性后会在基体内部残留孔隙,从而对再生骨料混凝土性能造成不利影响^[47]。

1.2.3 碳化法

现有研究显示,再生骨料表面旧砂浆中的水化相主要为氢氧化钙(Ca(OH)₂)、水化硅酸钙(C-S-H)以及未完全水化的硅酸二钙(2CaO·SiO₂)、硅酸三钙(3CaO·SiO₂)等^[12]。所谓碳化法,即在具有一定湿度的密闭环境中通过二氧化碳(CO₂)与旧砂浆中的水化相及未水化相发生反应,利用生成的CaCO₃填充密实再生骨料的细微裂隙^[48]。具体地,可将再生骨料的碳化过程分为3个阶段:①密闭环境中的高浓度CO₂扩散到再生骨料的细微裂隙中并溶于孔隙水,形成碳酸根离子;②钙离子从水化相和未水化相中溶出到孔

隙水中;③孔溶液中的碳酸根离子和钙离子反应生成CaCO₃沉淀,其反应过程如图4所示^[49]。

碳化法主要包括标准碳化和加压碳化。Li等^[50]研究了再生骨料在标准碳化室中(CO₂浓度为20%,相对湿度为(70±5)%养护3d后的微观力学性能演变规律,结果显示,经过碳化处理的再生骨料表面旧砂浆、旧砂浆-骨料界面区的显微硬度分别提高了17.4%和31%。为了加速碳化进程,可通过调整气体压力、CO₂浓度、养护时间、相对湿度以及再生骨料初始含水量获取更好的碳化效果。

Pan等^[51]研究发现,当CO₂体积分数介于20%~50%时,再生骨料的碳化程度随着CO₂体积分数的增加而增加,当CO₂体积分数增至100%时,碳化程度并未进一步增加。Galan等^[52]根据试验结果和计算模型,提出相对湿度在40%~65%

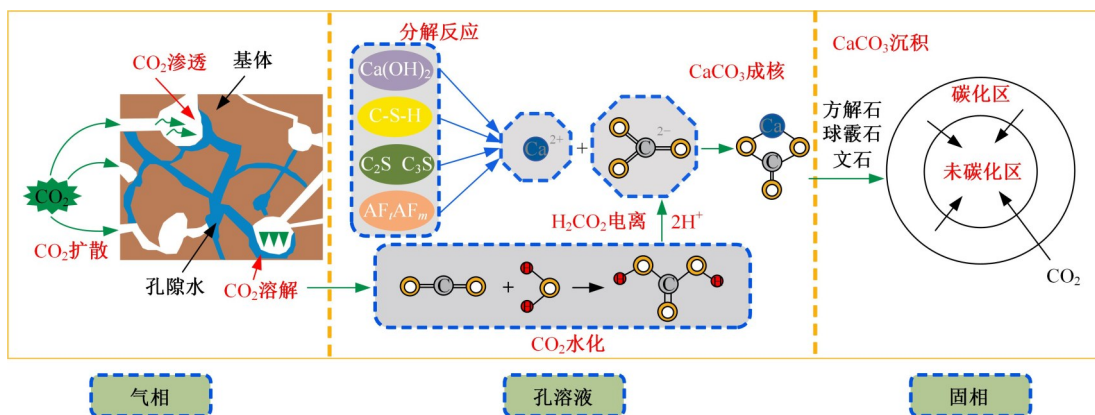


图 4 碳化处理反应过程^[49]

Fig. 4 Reaction process of carbonation treatment^[49]

时的碳化效果最佳。Kou等^[53]提出,再生骨料的密度和强度随着碳化时间(6、12、24、48、72 h)的延长而增加。根据Gholizadeh-Vayghan等^[54]研究结果,在较高湿度环境下进行碳化处理,再生骨料性能并未得到改善,甚至会有负面影响。Wu等^[55]研究了气体压力、养护时间和再生骨料初始含水率对碳化效果的影响,结果表明当气体压力超过 10^5 Pa,养护时间超过3 h,碳化速率明显降低,并认为再生骨料初始含水率为1.81%时的碳化效果最优。综上,碳化效果通常随着气体压力/ CO_2 体积分数的增大、碳化时间的延长而加强,这是由于较大的气体压力/ CO_2 体积分数加速了 CaCO_3 的生成速率,而碳化时间的延长则使 CaCO_3 的生成量增多。需要注意的是,气体压力/ CO_2 体积分数过大、碳化时间过长、再生骨料初始含水率过大,在提升再生骨料性能上并没有显著差异,甚至会有负面影响,而且是不经济的^[29,56]。

此外,再生骨料粒径也会影响碳化效率。Zhang等^[18]研究结果显示,粒径越小的再生骨料的碳化速率越快,主要归因于小粒径再生骨料具有较大的比表面积,其吸收 CO_2 的能力更强。根据应敬伟等^[57]研究结果,经过碳化处理的再生骨料表观密度增大了1.2%,吸水率和压碎指标分别降低了27.3%和10.5%。Xuan等^[48]研究发现,在采用碳化法处理时,每吨再生骨料(粒径为5~20 mm)可吸收7.9 kg的 CO_2 。由此可见,碳化处理不仅能够提高再生骨料性能,还能减轻自然界中的 CO_2 含量,在全球降碳背景下具有广阔的应用前景。

1.3 表面疏水隔离

此方法采用聚合物乳液对再生骨料进行浸渍处理,利用聚合物分子填充细微裂隙以及表面固化成膜来实现再生骨料物理力学性能的改善。目前常用的聚合物乳液包括水溶性聚乙烯醇乳液和硅(氧)烷聚合物乳液等^[22,58,59]。

聚乙烯醇(Polyvinyl alcohol, PVA)是一种有机化合物,通常为白色片状、絮状或粉末状的固体颗粒,因其具有良好的水溶性和固化成膜特性,被认为是一种有效的再生骨料强化材料^[60]。Kou等^[21]利用真空加压装置使再生骨料在不同质量分数(6%、8%、10%、12%)的PVA乳液中充分浸渍,通过测试再生骨料物理力学性能,确定了PVA乳液的最佳质量分数为10%。总的来说,PVA乳

液强化再生骨料的效果随着乳液质量分数增大而增强,但当乳液质量分数过大时,对再生骨料强化效果提升并不明显,而且会增加强化处理成本,故确定最佳PVA乳液质量分数尤为重要。

采用硅(氧)烷聚合物乳液浸渍再生骨料时,进入再生骨料内部的聚合物乳液通过填充部分细微裂隙,并与表面旧砂浆中的羟基反应生成疏水性薄膜,从而改善再生骨料品质。鲍玖文等^[22]研究结果表明,经过质量分数为8%的硅烷聚合物乳液浸渍后的再生骨料吸水率和压碎值分别降低了38.2%和8.6%,但表观密度无明显变化。Tsujiino等^[61]对比分析了油型表面改性剂和硅烷型表面改性剂对再生骨料吸水率的降低效果,结果显示两种表面改性剂均可降低再生骨料吸水率,其中硅烷型表面改性剂的改善效果更优,并将其归因于硅烷型表面改性剂水解缩合后生成的薄膜疏水性优于油型表面改性剂生成的碱金属薄膜,其反应原理如图5所示。Spaeth等^[62]将硅酸钠添加到硅(氧)烷聚合物乳液中解决其水解问题,研究发现硅酸钠通过形成较薄的疏水层来降低硅(氧)烷的水解,处理后的再生骨料吸水率和磨耗值均显著降低。

1.4 强化方法总结

目前再生骨料强化技术主要以表面旧砂浆为研究对象,通过剥离、增强或疏水隔离的方式,降低其对再生骨料的负面影响。剥离旧砂浆包括研磨法和酸溶液浸泡法,前者通过机械研磨或加热研磨等方式达到物理剥离再生骨料表面旧砂浆的效果,主要影响因素为研磨次数、研磨时间和加热功率;后者利用酸溶液溶解再生骨料表面旧砂浆达到化学剥离效果,主要影响因素为酸溶液类型、酸溶液浓度和浸泡时间。在适当条件下,剥离旧砂浆能够快速有效地提升再生骨料物理力学性能,但研磨处理不当极易造成再生骨料的二次损伤,且存在能耗大、噪声/粉尘污染等问题。酸溶液浸泡处理会增加再生骨料表面化学杂质含量并面临废液的处理问题。

增强旧砂浆主要包括裹浆处理法、微生物矿化沉积法和碳化法。裹浆处理法通过火山灰材料填充表面旧砂浆细微裂隙及固化成壳作用来提高再生骨料的密度和强度,主要影响因素为火山灰材料类型、浆液浓度和裹浆方式,但该方法可能存在吸水率增大问题。微生物矿化沉积法利用细菌

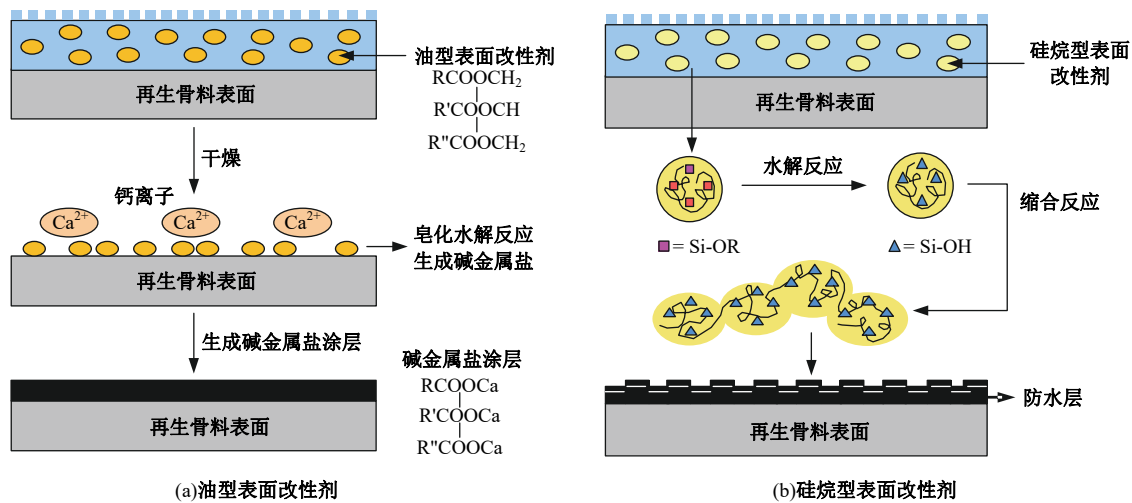


图 5 表面改性剂改性原理示意图^[61]

Fig. 5 Schematic diagram of surface improvement agent^[61]

的 CaCO_3 沉积作用来改善再生骨料性能, 主要影响因素为菌种类型、浓度和培养基组分, 但该方法操作工艺复杂且受环境影响较大, 目前尚处于实验室研究阶段。碳化法是利用 CO_2 与旧砂浆中的水化相及未水化相反应生成致密的 CaCO_3 以增强再生骨料, 主要影响因素为 CO_2 的体积分数、气体压力、养护时间和再生骨料初始含水量, 但该方法对碳化设备要求较高, 在一定程度上限制了对再生骨料的规模化处理。表面疏水隔离主要采用聚合物乳液浸渍法, 处理后的再生骨料表面形成的疏水薄膜可有效降低其吸水率, 主要影响因素有聚合物乳液类型和质量分数, 但该方法对再生骨料密度和强度的提升效果有限, 且形成的疏水性薄膜可能会弱化其与水泥石的粘结作用。

针对再生骨料的多方面性能缺陷, 现有强化方法对于指导再生骨料实现高性能化发挥了重要作用。今后可进一步优化升级研磨设备, 采用清洁能源并增加粉尘回收等装置以降低能耗、减少环境污染; 也可对几种单一强化方法进行择优组合研究, 从而实现对再生骨料的复合强化处理, 以期达到更优的提质效果, 但应兼顾实操性和处理成本。此外, 再生骨料的物理力学性能会因来源不同而表现出较大的离散性, 故开展强化方法的普适性研究并提出强化准则具有重要现实意义。

2 再生骨料强化对混凝土性能的影响

2.1 工作性能

由于再生骨料表面旧砂浆会吸收一部分自由

水, 致使新拌再生混凝土的工作性较差。段珍华等^[63]研究结果显示, 气干和饱和面干状态下的再生骨料对新拌再生混凝土工作性能的不利影响小于绝干状态下的再生骨料。因此, 为获得与普通混凝土相当的工作性能, 目前广泛采用对再生骨料进行预吸水或对再生混凝土单位用水量进行调整的方法^[64, 65]。

对于经过预吸水处理的饱和面干状态下的再生骨料, 其在混凝土拌合过程中会释放内部所含水分, 致使拌和物中的自由水含量增加, 尽管能够改善新拌再生混凝土工作性能, 但亦会对硬化再生混凝土力学性能造成不利影响^[66]。对于调整再生混凝土单位用水量, 主要以再生骨料 24 h 吸水率为依据确定附加水用量。由于拌合过程中再生骨料并不能在短时间内迅速吸收这部分附加水, 使新拌再生混凝土的初始坍落度较大, 甚至会造成混凝土的泌水和离析^[67]。对再生骨料进行强化处理, 不仅可以改善新拌再生混凝土的工作性能, 还会影响硬化再生混凝土的力学性能和耐久性能, 故对比分析不同强化方法对再生混凝土坍落度的影响显得十分必要, 相关统计结果如表 2 所示。

Chen 等^[68]对再生骨料进行了微波加热研磨处理, 研究发现采用高微波功率 ($\geq 3 \text{ kW}$) 会增加再生骨料的孔隙率和吸水率, 进而降低新拌再生混凝土坍落度。根据 Güneçyisi 等^[69]试验结果, 经过 HCl 溶液、硅酸钠溶液和水泥-硅灰浆液处理的再生骨料自密实混凝土的坍落度分别为 725、720、715 mm, 而未强化再生骨料自密实混凝土

表2 强化处理对再生骨料混凝土坍落度的影响
Table 2 Effect of strengthening treatment on slump of RAC

方法	强化处理工艺		RCA取代率/%	坍落度增长率/%	文献
	条件				
微波加热研磨	功率5 kW、加热400 s		100	-28.6	[68]
HCl溶液浸泡	浓度0.1 mol/L、浸泡1 d		100	3.6	[69]
CH ₃ COOH溶液浸泡	质量分数1%、浸泡1 d		100	25.0	[11]
水泥-硅灰浆液浸渍	浸渍30 min、干燥1 d、养护28 d		100	2.1	[69]
硫酸铝盐水泥浆液浸渍	水灰比0.8、浸渍5 min、干燥3 d		100	9.2	[38]
巴氏芽孢杆菌矿化沉积	浓度0.5 mol/L、pH值9.5、时间7 d		100	54.5	[70]
球形芽孢杆菌矿化沉积	细菌含量 3×10^8 cells/mL		100	13.2	[15]
加速碳化	压力0.5/1/2/4 MPa、温度30 ℃、RCA初始含水率1.81%、时间1 h		100	5.3~26.3(低强) 3.0~9.1(高强)	[55]
	压力75/150 kPa、时间30/90 min		100	57.1/50.0(30 min)35.7/50.0(90 min)	[71]

的坍落度为700 mm。Wang等^[11]研究发现,经过CH₃COOH溶液处理的再生骨料所配制混凝土的坍落度较未强化再生骨料混凝土提高了25%。

Wu等^[55]采用加速碳化法对再生骨料进行了处理,结果显示碳化处理可使低强($w/b=0.66$)和高强($w/b=0.4$)再生混凝土的坍落度分别提高5~25 mm和5~15 mm。根据丁子奇^[70]研究结果,经过巴氏芽孢杆菌矿化沉积处理的再生骨料混凝土坍落度提高了54.5%,这是因为处理前已经在再生骨料表面裹覆了一层壳聚糖,壳聚糖一方面会在再生骨料表面成膜降低其吸水率,另一方面可增强巴氏芽孢杆菌矿化沉积效果并改善再生骨料表面形态,最终使得再生骨料混凝土的坍落度明显提升。Li等^[72]研究结果显示,经过纳米SiO₂浆液预喷洒并风干处理的再生骨料表面会形成凝胶层,可降低再生骨料吸水率并提高由其配制再生混凝土坍落度,但改善效果并不明显。Tsuji no等^[61]采用表面改性剂对再生骨料进行了浸渍处理并配制了再生混凝土,结果显示强化再生骨料混凝土的工作性良好,且30 min时的坍落度损失率较小。

综上所述,对再生骨料进行强化处理有助于改善新拌再生混凝土的工作性能,这主要与强化处理后的再生骨料吸水率降低有关。但需要注意

的是,在采用研磨法处理时要避免对再生骨料造成二次损伤,否则会降低再生混凝土拌合物的流动性。除此之外,再生骨料在经过强化处理后,除物理力学性能发生变化外,其几何特性也会随之改变,今后应积极探索强化处理后的再生骨料颗粒形状和表面粗糙度等几何特性的改变对再生混凝土工作性能的影响规律。

2.2 力学性能

由于再生骨料的物理力学性能明显劣于天然骨料,故再生混凝土的力学性能会随着再生骨料取代天然骨料比例增大而减小^[31,73]。一方面是由于再生骨料掺量越多,其表面旧砂浆会增加再生混凝土中的薄弱环节,在承受外力作用时更容易破坏;另一方面,也可能是采用再生骨料预吸水或调整单位用水量配制再生混凝土时,再生骨料预吸收的水分被释放或附加用水量未被再生骨料全部吸收,使得混凝土的实际水灰比偏大,进而导致硬化再生混凝土内部残留孔隙增加。根据张鸿儒^[74]的统计结果,全再生骨料混凝土(再生骨料取代率为100%)的抗压强度、抗拉强度和弹性模量较普通混凝土分别降低了12%~30%、10%~45%和17%~30%。对再生骨料进行强化处理是提高再生混凝土力学性能的有效技术途径,相关统计结果如表3所示。

表 3 强化处理对再生骨料混凝土力学性能的影响

Table 3 Effect of strengthening treatment on mechanical properties of RAC

强化处理工艺		力学性能 分类	RCA取 代率/%	力学性能指标* /MPa	28 d增长率/%	文献
方法	条件					
球磨研磨	钢球数 10、转数 500	抗压强度 弹性模量	20/40/60	32.9/27.9/24.8 26 658/22 070/18 492	20.1/37.3/54.0 10.3/13.3/38.6	[7]
微波加热研磨	功率 10 kW、 时间 1 min	抗压强度 弯拉强度 弹性模量	20/40/ 60/80/ 100	56.0/51.9/47.8/43.6/39.5 6.11/5.92/5.73/5.54/5.35 32 930/31 510/30 090/ 28 670/27 250	5.2/11.2/18.2/26.6/36.7 1.1/2.3/3.6/4.9/6.4 2.2/4.6/7.2/10.0/13.2	[75]
酸溶液浸泡 (HCl/H ₂ SO ₄)	浓度 0.1 mol/L、浸泡 1 d	抗压强度	100	20.2(7 d) 34.6(28 d) 37.5(56 d) 40.6(90 d)	12.9/18.8(7 d) 12.4/16.5(28 d) 10.1/13.6(56 d) 10.6/15.5(90 d)	[9]
酸溶液浸泡 (HCl/HNO ₃ /H ₂ SO ₄)	质量分数 10%、 浸泡 1 d	抗压强度	100	—	18.0/18.5/20.0(90 d)	[76]
水泥-纳米 SiO ₂ 浆液 浸渍	水灰比 0.5、浸渍 45 min、干燥 ≥3 d	抗压强度	100	35.5	14.3	[14]
纳米 SiO ₂ -纳米 Ca- CO ₃ 浆液浸渍	水灰比 9、浸渍 45 min、 干燥 ≥3 d	抗压强度	100	—	3.4	
硅酸钠溶液浸泡	质量分数 5%、浸泡 5 h	抗压强度	30/50/ 70/100	33.8/32.4/31.6/31.8(低强) 40.5/39.1/35.2/34.1(高强)	5.9/5.6/9.8/7.9(低强) 4.9/14.1/19.6/18.2(高强)	[77]
球形芽孢杆菌矿化 沉积	细菌含量 3×10 ⁸ cells/mL	抗压强度 弹性模量	100	54 33 200	40.7 32.8	[15]
加速碳化	压力 0.5/1/2/4 MPa、 温度 30℃、RCA 含水 率 1.81%、时间 1 h	抗压强度	100	27.9(低强) 49.3(高强)	9.4/15.5/17.7/22.5(低强) 5.0/6.8/8.7/9.0(高强)	[55]
PVA 乳液浸渍	质量分数 10%、浸渍 1 d、加压 9.2×10 ⁴ Pa、烘 干 1 d/风干 2 d	抗压强度 劈裂抗拉 强度	100	—	1.1/5.6(28 d) 4.4/8.8(90 d) -6.5/1.1(28 d) -8.9/2.0(90 d)	[21]
硅烷乳液浸渍	质量分数 8%、浸渍 1 d	抗压强度	30/50	—	-7.0/-3.0(56 d)	[22]

注：*表示未强化再生骨料混凝土力学性能指标。

Dilbas 等^[7]研究结果显示,采用球磨研磨法处理的再生骨料取代天然骨料(取代率为 60%)所配制再生混凝土的 28 d 抗压强度和弹性模量分别为 38.2 MPa 和 25.64 MPa,是相同条件下未强化再生骨料混凝土的 1.54 倍和 1.39 倍。Akbarnezhad 等^[75]采用微波加热研磨法对再生骨料进行了处理,并发现强化再生骨料混凝土的 28d 抗压强度、弯拉强度和弹性模量较未强化再生骨料混凝土分别提高了 36.7%、6.4% 和 13.2%。Purushothaman 等^[9]研究发现,经过 HCl、H₂SO₄ 溶液浸泡处理的再生骨料所配制再生混凝土的 28 d

抗压强度为普通混凝土的 90%~95%,而未强化再生骨料混凝土在相同龄期下的抗压强度仅为普通混凝土的 81%。类似地, Saravanakumar 等^[76]研究结果显示,采用 HCl、H₂SO₄ 和 HNO₃ 溶液浸泡处理再生骨料可使由其配制再生混凝土的 28 d 抗压强度提高 8%~18%,且随着养护龄期越长,抗压强度增幅越大。总结分析表明,再生骨料在剥离旧砂浆后的物理性能及表面特性得到明显改善,使处理后的再生骨料与新砂浆之间的界面区变得更加致密,从而促进了再生混凝土力学性能的提升。

Zhao等^[12]测试了经过水泥裹浆处理的再生骨料所配制混凝土的抗压强度,结果显示强化再生骨料混凝土的28 d抗压强度提高了16%。Zhang等^[14]研究发现,经过纳米SiO₂-纳米CaCO₃-水泥-纳米SiO₂浆液强化处理的再生骨料混凝土的28 d抗压强度分别为36.67 MPa和40.52 MPa,而未强化再生骨料混凝土在相同条件下的抗压强度为35.46 MPa。Yang等^[78]分别采用粉煤灰-硅灰、粉煤灰-水泥和粉煤灰-水泥-纳米SiO₂浆液对再生砖骨料进行了裹浆处理,结果显示强化再生骨料混凝土的28 d抗压强度、弯拉强度和弹性模量分别提高了22%~34%、12%~31%和16%~30%。根据Wang等^[15]试验结果,经过球形芽孢杆菌矿化沉积处理的再生骨料所配制混凝土的抗压强度和弹性模量较未强化再生骨料混凝土分别增长了22 MPa和10.9 GPa。Xuan等^[48]研究发现,采用经过碳化处理的再生骨料所配制混凝土的抗压强度提升了22.6%,弯拉强度提升了28.7%。总结分析表明,对再生骨料进行强化处理后,生成的新产物会填充再生骨料表面薄弱旧砂浆,同时会增强再生骨料与新砂浆之间的界面区性能。因此,经由火山灰材料浆液裹浆、微生物矿化沉积及碳化处理的再生骨料所配制混凝土的力学性能得以提升。

Kou等^[21]研究结果显示,采用10%质量分数PVA乳液强化再生骨料混凝土的28 d和90 d抗压强度较未强化再生骨料混凝土分别提高了5.6%和8.8%。类似地,根据吴素瑶^[60]试验结果,掺加PVA乳液浸渍处理的再生骨料会降低再生混凝土的早期强度,但对提升其后期强度效果显著。鲍玖文等^[22]研究发现,硅烷乳液强化再生骨料混凝土的56 d抗压强度较未强化再生骨料混凝土稍有下降(3%~7%)。总结分析表明,表面疏水隔离处理可显著降低再生骨料吸水率,能够减少再生混凝土中的自由水含量,对提升其力学性能是有利的。但是,再生骨料表面形成的疏水性薄膜也会弱化其与新砂浆的粘结作用,可能会对再生混凝土力学性能造成一定负面影响。因此,为降低表面疏水隔离处理对再生骨料混凝土力学性能的不利影响,未来应探索具有时效性的聚合物乳液,使再生骨料表面形成的疏水性薄膜能够在硬化后的混凝土碱性环境中及时分解,从而提升聚合物乳液强化再生骨料混凝土的力学性能。

总体上看,与未强化再生骨料混凝土相比,强化再生骨料混凝土的力学性能得到了有效提升,但由于各项研究中的再生骨料品质、配合比设计和试验方法存在差异,导致不同研究中的强化再生骨料混凝土力学性能的改善程度不同,相关研究结果较难总结共性及差异性。因此,今后有必要在原材料、配合比设计和试验方法保持一致的情况下,探究不同强化方法对再生骨料混凝土力学性能的影响规律,从而实现对各强化方法提质效果的综合评价。

2.3 收缩性能

再生骨料表面旧砂浆的存在会增加由其配制的再生混凝土中孔隙含量,导致相同配合比条件下的再生混凝土收缩变形明显大于普通混凝土^[79, 80]。根据肖建庄等^[81]试验结果,当再生骨料取代率为50%和100%时,再生混凝土的总收缩较普通混凝土分别增长了17%和59%。一些研究结果表明,再生混凝土的干燥收缩主要与再生骨料表面旧砂浆的存在有关,并提出了考虑再生骨料表面旧砂浆的干燥收缩预测模型^[82-84]。也有研究者认为多孔的再生骨料具有内养生作用,可以在一定程度上减少再生混凝土的早期自收缩^[85, 86]。

对再生骨料进行强化处理,可降低再生骨料孔隙率和吸水率,这对于减少再生混凝土内部水分蒸发、降低其干燥收缩具有积极作用^[87, 88]。Wang等^[89]和Tam等^[90]研究结果显示,由火山灰浆液浸渍和碳化处理的再生骨料所配制混凝土的干缩率较未强化再生骨料混凝土有明显降低。Zhang等^[18]研究发现,经过碳化处理的再生细骨料所配制再生砂浆的56 d干燥收缩与未强化再生砂浆相比降低了8%~13%。Tsuji no等^[61]测试了表面改性剂强化再生骨料混凝土的干缩率,结果显示油型表面改性剂强化再生骨料混凝土的干缩率小于未强化再生骨料混凝土,而硅烷型表面改性剂强化再生骨料混凝土的干缩率与未强化再生骨料混凝土相比无明显差别。此外,一些研究结果也显示,通过优化配合比设计及拌合方式、掺加活性矿物掺合料也可降低再生混凝土的干燥收缩^[91-93]。

2.4 耐久性能

2.4.1 抗氯离子渗透性能

再生骨料内部含有相互连通的细微裂隙,为

氯化物在再生混凝土中扩散提供了大量通道,导致再生混凝土的抗氯离子渗透性能明显劣于普通混凝土。对再生骨料进行强化处理能够改善其物理性能,故对比分析各强化方法对再生混凝土抗氯离子渗透性能的改善效果具有重要意义。

有研究结果显示,采用机械研磨法或酸溶液浸泡法去除再生骨料表面旧砂浆,可有效提升再生混凝土的抗氯离子渗透性能^[94, 95]。此外,增强再生骨料表面旧砂浆对提升再生混凝土抗氯离子渗透性能也是有效的。根据 Zhang 等^[38]研究结果,由硫铝酸盐水泥-玄武岩微粉浆液强化处理的再生骨料所配制混凝土在 28 d 龄期下的总电通量较未强化再生骨料混凝土降低了 10.6%。Shaban 等^[34]采用不同类型火山灰浆液对再生骨料进行了裹浆处理,研究发现强化再生骨料混凝土的抗氯离子渗透性能较未强化再生骨料混凝土提高了 20%~46%,其中粉煤灰-硅灰浆液的强化效果优于粉煤灰-水泥浆液。Zhang 等^[18]和 Shi 等^[96]研究结果表明,对再生骨料进行碳化处理可提升由其配制混凝土的抗氯离子渗透性能,并提出再生混凝土抗压强度与氯离子迁移系数之间存在线性关系。

Zhu 等^[97]采用电通量法测试了再生骨料混凝土的抗氯离子渗透性能,结果显示硅烷乳液强化再生骨料混凝土的总电通量较未强化再生骨料混凝土降低了 68.4%。根据鲍玖文等^[22]试验结果,RCA 取代率为 30% 和 50% 的硅烷乳液强化再生骨料混凝土的氯离子扩散系数较相同条件下未强化再生骨料混凝土分别降低了 20% 和 37.5%,并将其归因于硅烷水解缩合后在再生骨料表面形成了疏水性薄膜及其在水泥石内部生成了致密针状物质,从而有效阻碍了氯离子在再生混凝土内部扩散。

2.4.2 抗硫酸盐侵蚀性能

硫酸盐侵蚀对混凝土的破坏作用较大,其会加速混凝土的脱落和开裂。与普通混凝土相比,硫酸盐更容易进入再生混凝土内部,致使硫酸根离子与水泥水化产物发生化学反应生成大量膨胀性物质,从而诱发基体开裂并促使硫酸盐持续侵入,最终会加速再生混凝土的损伤劣化^[98, 99]。

Bulatovic 等^[100]研究发现,再生混凝土在硫酸盐侵蚀 180 d 时开始出现裂缝,在侵蚀 365 d 后出现明显的骨料剥落现象。易超^[101]测试了再生混

凝土在硫酸钠溶液中浸泡 28 d 后的力学强度,发现侵蚀后的再生混凝土抗压强度和劈裂抗拉强度较相同条件下的普通混凝土分别降低了 4.9% 和 3.8%。根据祁兵^[99]试验结果,当再生骨料取代率小于 50% 时,再生混凝土具备较好的抗硫酸盐侵蚀性能,但当再生骨料取代率大于 50% 时,再生混凝土的抗硫酸盐侵蚀性能会急剧下降。安新正^[102]研究了再生骨料混凝土在硫酸钠干湿交替作用下的性能演变规律,结果表明再生混凝土的线膨胀率随着再生骨料取代率和硫酸钠溶液分数的增加而增大。由此可见,影响再生骨料混凝土抗硫酸盐侵蚀性能的因素主要有再生骨料取代率、侵蚀龄期和侵蚀液质量分数等。随着再生骨料取代率、侵蚀龄期和侵蚀液质量分数增加,再生混凝土抗氯离子渗透性能逐渐降低,主要表现为裂缝产生、线膨胀率增大以及力学性能降低。

对再生骨料进行强化处理可在一定程度上优化再生混凝土内部孔隙结构,是提升再生混凝土抗硫酸盐侵蚀性能的有效技术途径。程海丽等^[103]研究发现,经过硅酸钠溶液浸泡处理的再生骨料所配制的混凝土在硫酸钠溶液中侵蚀 28 d 后的抗压强度仅降低 2.4%,而相同条件下未强化再生骨料混凝土的抗压强度则降低了 4.1%。Kazmi 等^[104]研究结果显示,经过 CH_3COOH 溶液及碳化处理的再生骨料混凝土在相同硫酸盐侵蚀龄期下的抗压强度较未强化再生骨料混凝土分别提高了 19% 和 24%。综上所述可以看出,对强化再生骨料混凝土抗硫酸盐侵蚀性能的研究较少,为了更加全面地评价各类强化方法对再生骨料混凝土抗硫酸盐侵蚀性能的改善效果,未来应开展更多相关试验研究。

2.4.3 抗冻性能

我国寒冷地区的冬季早晚温差较大,混凝土结构在正负温度的往复作用下会产生冻融损伤,这是由于混凝土毛细孔中的自由水在正负温度的往复作用下不断发生融化和结冰,混凝土毛细孔在膨胀疲劳应力作用下会出现表面剥蚀及内部疏松,最终导致混凝土性能下降^[105]。国内外研究者针对未强化再生骨料混凝土抗冻性能开展了大量研究,结果显示再生混凝土的抗冻性能远不及普通混凝土,且随着再生骨料取代率增加,其抗冻性能降低^[106, 107]。

相关研究结果显示,对再生骨料进行强化处

理可有效提升再生混凝土的抗冻性能。根据 Kazmi 等^[104] 试验结果,在经历 66 次冻融循环后, CH_3COOH 溶液和碳化强化再生骨料混凝土的质量损失较未强化再生骨料混凝土分别降低了 17% 和 23%。Güneyisi 等^[69] 通过测试再生骨料混凝土的超声脉冲速度来评价其抗冻性能,结果显示在经历 100 次冻融循环后,未强化、 HCl 溶液强化和硅灰-水泥浆液强化再生骨料混凝土的超声脉冲速度分别降低了 1.5%、1.7% 和 1.9%。Liu 等^[108] 研究结果显示,反硝化细菌矿化沉积强化再生骨料混凝土的抗冻等级能够达到 F225,而未强化再生骨料混凝土的抗冻等级为 F150。此外,有研究者提出掺加引气剂、活性矿物掺合料或选择合适的配合比设计方法也能够改善再生骨料混凝土的抗冻性能^[109, 110]。

2.4.4 其他性能

混凝土结构的实际工作环境主要为荷载、温湿度、侵蚀介质等共同作用。因此,一些研究者针对不同服役条件下的再生骨料混凝土宏观性能损伤进行了研究。对于再生骨料混凝土的疲劳性能和高温稳定性,Xiao 等^[111] 和 Tan 等^[112] 提出再生骨料混凝土在疲劳荷载作用下的应变发展规律,分为循环蠕变阶段、蠕变-疲劳耦合阶段和疲劳阶段,其中循环蠕变阶段和疲劳阶段的持续时间约占整个疲劳过程的 20%,而蠕变-疲劳耦合阶段的持续时间则占整个疲劳过程的 80%。Saini 等^[113] 和 Zhou 等^[114] 分别结合 S-N 曲线与 Weibull 理论预测了 50% 失效概率的再生混凝土疲劳寿命,并发现掺加碳化硅、硅粉和偏高岭土有利于提高再生混凝土疲劳寿命。徐明等^[115] 研究了高温条件下(100~800 °C)再生混凝土的应力-应变关系,建立了再生混凝土单轴受压分段式应力-应变本构方程。

对于多因素耦合作用下的再生骨料混凝土性能,Wang 等^[116] 研究了持压荷载作用对再生骨料混凝土氯离子传输性能的影响规律,研究发现随着应力水平增加,氯离子传输系数呈现出先降低后增加的趋势。鲍玖文等^[117] 开展了持压荷载与干湿循环共同作用下再生骨料混凝土氯离子传输试验,并基于再生骨料取代率与荷载应力水平,建立了干湿循环下非饱和再生骨料混凝土的氯离子传输模型。Qi 等^[118] 研究了再生骨料混凝土在弯曲荷载与硫酸盐干湿循环共同作用下的损伤劣化

过程,分析了再生骨料取代率、水灰比、矿物掺合料及干湿循环制度对其损伤劣化过程的影响规律。王建刚^[119] 开展了再生骨料混凝土在碳化-干湿-冻融三场耦合作用下的耐久性试验,建立了孔隙迂曲度与氯离子传输系数及相对动弹性模量之间的相关关系。

综上所述,目前国内外研究者针对再生骨料混凝土耐久性开展了大量研究,但多数研究以未强化再生骨料混凝土和普通混凝土的耐久性对比评价为主,关于强化再生骨料混凝土耐久性的研究相对较少,其中多因素耦合作用下的性能衰减研究更是鲜有报道。此外,已有耐久性研究主要针对再生骨料混凝土表面现象和力学性能,缺少相应的预测模型以指导工程实践。因此,今后应针对强化再生骨料混凝土损伤演化过程开展深入研究,以期对再生骨料混凝土耐久性优化设计及使用寿命评估提供理论基础。

2.5 界面过渡区微观结构

混凝土是一种由水泥浆体、骨料和界面过渡区(Interfacial transition zone, ITZ)组成的多相复合材料。ITZ 的形成是混凝土在水化初期的“边壁效应”和“微区泌水效应”共同作用的结果,同时还会受到施工工艺的影响^[120, 121]。混凝土在服役过程中不可避免地要承受荷载作用,在单轴压缩荷载达到极限荷载的 30% 左右时,ITZ 内部裂纹保持稳定,当单轴压缩荷载达到极限荷载的 70%~90% 时,裂缝开始向基体发展并互相连通^[122]。与普通混凝土相比,再生骨料混凝土存在更多界面薄弱区域,这也是再生骨料混凝土宏观性能劣于普通混凝土的根本原因。

图 6 为再生骨料混凝土的界面过渡区示意图,由图可知再生骨料混凝土主要包含 3 种类型 ITZ:再生骨料-新砂浆界面(ITZ_1)、旧砂浆-新砂浆界面(ITZ_2) 和再生骨料-旧砂浆界面(ITZ_3)^[123, 124]。

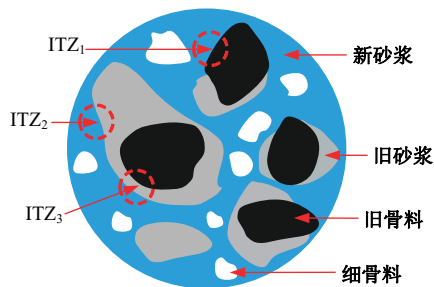


图 6 再生骨料混凝土界面过渡区示意图^[124]

Fig. 6 Schematic diagram of ITZ of RAC^[124]

水中中等^[125,126]借助光学显微镜、扫描电子显微镜和电子探针测试分析了再生骨料界面区的物相组成,结果显示再生骨料界面区的水化生成物多、密实度高,且再生骨料表面的钙元素含量较多,而钾、铁、铝、硫和镁等元素则主要聚集在界面区。万惠文等^[127]和 Poon 等^[128]通过扫描电子显微镜测试了再生骨料混凝土 ITZ 微观结构,发现 ITZ 结构疏松、多孔,其主要水化相有 CH、CSH 和钙矾石。张鸿儒^[74]采用光学显微镜结合图像处理技术、纳米压痕技术测试了再生骨料混凝土 ITZ 的几何特性和纳观力学性能,结果显示再生骨料取代率越大的再生混凝土内部 ITZ 数量越多,且各类 ITZ 厚度和模量存在显著差异性。Xiao 等^[129]研究发现,再生骨料混凝土中新 ITZ 和旧 ITZ 中均存在明显空隙和高浓度 CH,其厚度分别为 40~50 μm 和 55~65 μm ,模量分别为新砂浆的 80%~90% 和旧砂浆模量的 70%~80%。

Zhang 等^[130,131]研究发现,干湿循环作用会加速硫酸根离子进入再生骨料混凝土内部,从而使其产生严重的表面剥落和开裂,且随着侵蚀龄期增长,再生骨料混凝土 ITZ 显微硬度表现为先增加后降低,其中旧 ITZ 在硫酸盐侵蚀环境下的性能较新 ITZ 更稳定。Yue 等^[132]研究了氯盐和硫酸盐侵蚀环境对再生骨料混凝土 ITZ 性能的影响,结果显示氯盐侵蚀会导致 ITZ 显微硬度降低,且随着氯盐侵蚀龄期增长,ITZ 显微硬度呈线性降低,而在硫酸盐侵蚀作用下,ITZ 显微硬度与侵蚀龄期之间呈二项式关系。Shaban 等^[34]研究了裹浆处理对再生骨料混凝土 ITZ 微观结构的影响规律,从图 7 中可以看出,火山灰材料填充了再生骨料表面旧砂浆中的微裂隙,使再生混凝土 ITZ 微观结构变得更加致密。根据 Liu 等^[108,133]研究结果,反硝化细菌通过消耗 ITZ 附近的 CH 并生成 CaCO_3 来填充细微裂隙,可提高再生骨料与水泥石之间的粘结力,进而改善再生混凝土耐久性能。

基于上述,与普通混凝土相比,再生骨料混凝土 ITZ 结构更加复杂。现有研究多针对未强化再生骨料混凝土 ITZ 性能,且多集中在对 ITZ 微观形貌观测的定性分析。今后应开发更加先进的表征测试新技术,同时采用定性定量相结合的方法系统研究不同强化处理方法对再生骨料混凝土 ITZ 微观结构特征的影响规律,并探究其与宏观

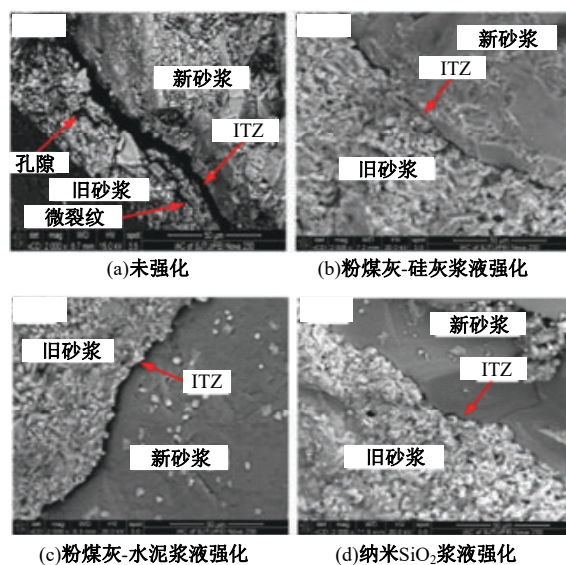


图 7 再生骨料混凝土界面过渡区微观结构^[34]

Fig. 7 ITZ microstructure of RAC^[34]

性能之间的相关关系,从而准确揭示强化再生骨料混凝土宏观性能的改善机理。

3 结论与展望

3.1 结论

为促进再生骨料的工程应用,推动低碳混凝土研究发展,本文综述了国内外再生骨料强化原理、方法及对再生混凝土性能的影响研究,主要得到以下结论。

(1)再生骨料强化原理分为剥离旧砂浆、增强旧砂浆以及表面疏水隔离。剥离旧砂浆主要包括研磨法和酸溶液浸泡法,增强旧砂浆主要有裹浆法、微生物矿化沉积法和碳化法,表面疏水隔离常采用聚合物乳液浸渍法。

(2)采用剥离旧砂浆处理方法时,应控制研磨工艺及酸溶液浸泡制度,降低对自然环境的不利影响。采用增强旧砂浆处理方法时,应对裹浆处理工艺进行优化以提升强化效果、提高微生物矿化沉积和碳化处理的工程实操性。采用表面疏水隔离处理方法时,应注意再生骨料表面形成的疏水薄膜与水泥石的相容性问题。

(3)强化处理可有效提升再生骨料混凝土的力学性能,这主要与再生骨料薄弱环节减少、物理性能改善有关,其中剥离旧砂浆处理较好,增强旧砂浆处理次之,表面疏水隔离处理相对较差。强化处理对再生骨料混凝土收缩及耐久性能的提升效果需要进一步研究确定。

(4)目前主要采用光学/电子显微镜、电子探

针和纳米压痕测试技术等对再生骨料混凝土 ITZ 微观形貌、物相组成和纳观力学性能进行表征。今后应开发更加先进的表征测试新技术,在此基础上研究不同强化方法对再生骨料混凝土 ITZ 微观结构的影响规律,并建立其与宏观性能之间的相关关系。

3.2 展望

再生骨料强化技术相关研究已经取得了丰硕成果,但并未在实际工程中得到广泛应用,表明已有研究仍有不足。因此,本文提出了一些未来可能的研究发展方向以供参考。

(1)应进一步优化研磨设备,采用清洁能源并增加粉尘回收等装置以减小对自然环境的不利影响。基于协同增强效应,开发出两种及以上的复合强化方法,使再生骨料提质效果更加显著,但要控制复合强化处理成本。

(2)再生骨料因料源不同而表现出较大的随机性和变异性,故开展再生骨料强化方法普适性研究并提出再生骨料强化准则具有重要现实意义。

(3)经过强化处理的再生骨料,其几何特征会随之改变。未来应开展再生骨料颗粒形状和表面特性对再生混凝土性能的影响研究。进行多因素耦合条件下的强化再生骨料混凝土性能演化研究,同时进行实际工况下的暴露试验,建立其与室内加速试验之间的关系,为其推广应用奠定理论基础。

(4)将再生骨料应用于水泥混凝土中,可促进工程建设向着低碳可持续方向发展。未来应采用生命周期评价方法对强化再生骨料混凝土的碳排放量进行计算,并建立碳排放量化模型,从而为强化再生骨料混凝土的减碳效果及对自然环境的影响分析研究提供理论依据。

参考文献:

- [1] 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[J]. 科学通报, 2023, 68(5): 510-523.
Xiao Jian-zhuang, Zhang Hang-hua, Tang Yu-xiang, et al. Principles for waste concrete recycling and basic problems of recycled concrete[J]. Chinese Science Bulletin, 2023, 68(5): 510-523.
- [2] 王佃超,肖建庄,夏冰,等. 再生骨料碳化改性及其减碳贡献分析[J]. 同济大学学报:自然科学版, 2022, 50(11): 1610-1619.
Wang Dian-chao, Xiao Jian-zhuang, Xia Bing, et al. Carbonation modification of recycled aggregate and carbon dioxide sequestration analysis[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2022, 50(11): 1610-1619.
- [3] Belin P, Habert G, Thiery M, et al. Cement paste content and water absorption of recycled concrete coarse aggregates[J]. Materials and Structures, 2014, 47: 1451-1465.
- [4] Agrela F, de Juan M S, Ayuso J, et al. Limiting properties in the characterisation of mixed recycled aggregates for use in the manufacture of concrete[J]. Construction and Building Materials, 2011, 25: 3950-3955.
- [5] 王雅思,郑建岚,游帆. 再生骨料强化方法研究进展[J]. 材料导报, 2021, 35(5): 5053-5061.
Wang Ya-si, Zheng Jian-lan, You Fan. Review on enhancement methods of recycled aggregate[J]. Materials Reports, 2021, 35(5): 5053-5061.
- [6] Sui Y, Mueller A. Development of thermo-mechanical treatment for recycling of used concrete[J]. Materials and Structures, 2012, 45: 1487-1495.
- [7] Dilbas H, Çakır Ö, Atis C D. Experimental investigation on properties of recycled aggregate concrete with optimized ball milling method[J]. Construction and Building Materials, 2019, 212: 716-726.
- [8] 肖建庄,吴磊,范玉辉. 微波加热再生粗骨料改性试验[J]. 混凝土, 2012(7): 55-57.
Xiao Jian-zhuang, Wu Lei, Fan Yu-hui. Test on modification of recycled coarse aggregate by microwave heating[J]. Concrete, 2012(7): 55-57.
- [9] Purushothaman R, Amirthavalli R R, Karan L. Influence of treatment methods on the strength and performance characteristics of recycled aggregate concrete [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2015, 27: No. 04014168.
- [10] Tam V W Y, Tam C M, Le K N. Removal of cement mortar remains from recycled aggregate using pre-soaking approaches[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2007, 50: 82-101.
- [11] Wang L, Wang J, Qian X. An environmentally friendly method to improve the quality of recycled concrete aggregates[J]. Construction and Building Materials, 2017, 144: 432-441.
- [12] Zhao Z, Wang S, Lu L, et al. Evaluation of pre-coated recycled aggregate for concrete and mortar[J]. Construction and Building Materials, 2013, 43:

- 191-196.
- [13] Siletani A H, Asayesh S, Javid A A S, et al. Influence of coating recycled aggregate surface with different pozzolanic slurries on mechanical performance, durability, and micro-structure properties of recycled aggregate concrete[J]. *Journal of Building Engineering*, 2024, 83: No. 108457.
- [14] Zhang H, Zhao Y, Meng T, et al. Surface treatment on recycled coarse aggregates with nanomaterials[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2016, 28: No. 04015094.
- [15] Wang J, Vandevyvere B, Vanhessche S, et al. Microbial carbonate precipitation for the improvement of quality of recycled aggregates[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 156: 355-366.
- [16] 徐培蓁, 陈发滨, 李泉荃, 等. 微生物矿化沉积对再生骨料界面过渡区的影响[J]. *材料导报*, 2020, 34(3): 6095-6099.
- Xu Pei-zhen, Chen Fa-bin, Li Quan-quan, et al. Effect of microbial mineralization deposition on interfacial transition zone of recycled aggregate[J]. *Materials Reports*, 2020, 34(3): 6095-6099.
- [17] Feng C, Cui B, Wang J, et al. Changing the soaking method of microbially induced calcium carbonate precipitation technology to improve the reinforcement effect of recycled concrete aggregates[J]. *Journal of Building Engineering*, 2023, 68: No. 106128.
- [18] Zhang J, Shi C, Li Y, et al. Influence of carbonated recycled concrete aggregate on properties of cement mortar[J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 98: 1-7.
- [19] Zhan B J, Xuan D X, Poon C S. Enhancement of recycled aggregate properties by accelerated CO₂ curing coupled with limewater soaking process[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2018, 89: 230-237.
- [20] 赵增丰, 姚磊, 肖建庄, 等. 再生骨料CO₂碳化强化技术研究进展[J]. *硅酸盐学报*, 2022, 50(8): 2296-2304.
- Zhao Zeng-feng, Yao Lei, Xiao Jian-zhuang, et al. Development on accelerated carbonation technology to enhance recycled aggregates[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2022, 50(8): 2296-2304.
- [21] Kou S C, Poon C S. Properties of concrete prepared with PVA-impregnated recycled concrete aggregates[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2010, 32: 649-654.
- [22] 鲍玖文, 李树国, 张鹏, 等. 再生粗骨料硅烷浸渍处理对混凝土介质传输性能的影响[J]. *复合材料学报*, 2020, 37(10): 2602-2609.
- Bao Jiu-wen, Li Shu-guo, Zhang Peng, et al. Effect of recycled coarse aggregate after strengthening by silane impregnation on mass transport of concrete[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2020, 37(10): 2602-2609.
- [23] Song X, Qiao P, Wen H. Recycled aggregate concrete enhanced with polymer aluminium sulfate[J]. *Magazine of Concrete Research*, 2015, 67(10): 496-502.
- [24] Shaban W M, Yang J, Su H, et al. Quality improvement techniques for recycled concrete aggregate: a review[J]. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 2019, 17: 151-167.
- [25] 李秋义, 朱亚光, 高嵩. 我国高品质再生骨料制备技术及质量评定方法[J]. *青岛理工大学学报*, 2009, 30(4): 1-4, 23.
- Li Qiu-yi, Zhu Ya-guang, Gao Song. Study on the preparation technique and quality evaluation method of high quality recycled aggregate[J]. *Journal of Qingdao Technological University*, 2009, 30(4): 1-4, 23.
- [26] Shima H, Tateyashiki H, Matsuhashi R, et al. An advanced concrete recycling technology and its applicability assessment through input-output analysis[J]. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 2005, 3(1): 53-67.
- [27] Mulder E, de Jong T P R, Feenstra L. Closed cycle construction: an integrated process for the separation and reuse of C&D waste[J]. *Waste Management*, 2007, 27: 1408-1415.
- [28] Quattrone M, Angulo S C, John V M. Energy and CO₂ from high performance recycled aggregate production[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2014, 90: 21-33.
- [29] Yang X, Liu Y, Liang J, et al. Straightening methods for RCA and RAC: a review[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2023, 141: No. 105145.
- [30] Akbarnezhad A, Ong K C G, Zhang M H, et al. Acid treatment technique for determining the mortar content of recycled concrete aggregates[J]. *Journal of Testing and Evaluation*, 2013, 41(3): 1-10.
- [31] Ismail S, Ramli M. Engineering properties of treated recycled concrete aggregate (RCA) for structural applications[J]. *Construction and Building Materials*, 2013, 44: 464-476.
- [32] Al-Bayati H K A, Das P K, Tighe S L, et al. Evaluation of various treatment methods for enhancing the physical and morphological properties of coarse recycled concrete aggregate[J]. *Journal of Building Engineering*, 2024, 83: No. 108457.

- cled concrete aggregate[J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 112: 284-298.
- [33] 王亮. 再生骨料提质的绿色化学方法研究[D]. 淮南: 安徽理工大学土木建筑学院, 2018.
Wang Liang. Study on green chemical methods to improve the quality of recycled concrete aggregates[D]. Huainan: School of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Science and Technology, 2018.
- [34] Shaban W, Elbaz K, Yang J, et al. Effect of pozzolan slurries on recycled aggregate concrete: mechanical and durability performance[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 276: No. 121940.
- [35] He Z, Shen A, Wu H, et al. Properties and mechanisms of brick-concrete recycled aggregate strengthened by compound modification treatment[J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 315: No. 125678.
- [36] Shaban W M, Yang J, Su H, et al. Properties of recycled concrete aggregates strengthened by different types of pozzolan slurry[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 216: 632-647.
- [37] 张学兵. 再生混凝土改性及配合比设计研究[D]. 长沙: 湖南大学土木工程学院, 2015.
Zhang Xue-bing. Modification and mix proportion design of recycled concrete[D]. Changsha: College of Civil Engineering, Hunan University, 2015.
- [38] Zhang H, Ji T, Liu H, et al. Modifying recycled aggregate concrete by aggregate surface treatment using sulphoaluminate cement and basalt powder[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 192: 526-537.
- [39] Li L, Xuan D, Chu S H, et al. Efficiency and mechanism of nano-silica pre-spraying treatment in performance enhancement of recycled aggregate concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 301: No. 124093.
- [40] 翁志英. 再生粗骨料强化预处理对高性能再生混凝土微观结构影响的试验研究[D]. 福州: 福州大学土木工程学院, 2013.
Weng Zhi-ying. Experimental study on microstructure of recycled high performance concrete affected by intensified test[D]. Fuzhou: College of Civil Engineering, Fuzhou University, 2013.
- [41] 陈钿渊. 再生粗骨料强化对再生混凝土力学性能及耐久性能的影响[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学土木工程学院, 2016.
Chen Dian-yuan. The influence of reinforced recycled coarse aggregate on the mechanical performance and durability of recycled concrete[D]. Harbin: School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, 2016.
- [42] Lee C H, Du J C, Shen D H. Evaluation of pre-coated recycled concrete aggregate for hot mix asphalt[J]. *Construction and Building Materials*, 2012, 28: 66-71.
- [43] Tam V W Y, Wattage H, Le K N, et al. Methods to improve microstructural properties of recycled concrete aggregate: a critical review[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 270: No. 121490.
- [44] Grabiec A M, Klama J, Zawal D, et al. Modification of recycled concrete aggregate by calcium carbonate biodeposition[J]. *Construction and Building Materials*, 2012, 34: 145-150.
- [45] 朱亚光, 戎丹萍, 徐培蓁, 等. 供氧剂浓度和浸泡位置对 MICP 再生骨料性能的影响[J]. *材料导报*, 2021, 35(4): 4074-4078, 4087.
Zhu Ya-guang, Rong Dan-ping, Xu Pei-zhen, et al. Influence of oxygen supply agent concentration and soaking position on MICP recycled aggregate properties[J]. *Materials Reports*, 2021, 35(4): 4074-4078, 4087.
- [46] Wu C R, Hong Z Q, Zhang J L, et al. Pore size distribution and ITZ performance of mortars prepared with different bio-deposition approaches for the treatment of recycled concrete aggregate[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2020, 111: No. 103631.
- [47] 黄燕, 胡翔, 史才军, 等. 混凝土中水泥浆体与骨料界面过渡区的形成和改进综述[J]. *材料导报*, 2023, 37(1): 106-107.
Huang Yan, Hu Xiang, Shi Cai-jun, et al. Review on the formation and improvement of interfacial transition zone between cement paste and aggregate in concrete[J]. *Materials Reports*, 2023, 37(1): 106-107.
- [48] Xuan D, Zhan B, Poon C S. Assessment of mechanical properties of concrete incorporating carbonated recycled concrete aggregates[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2016, 65: 67-74.
- [49] Pu Y, Li L, Wang Q, et al. Accelerated carbonation technology for enhanced treatment of recycled concrete aggregates: a state-of-the-art review[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 282: No. 122671.
- [50] Li Y, Fu T, Wang R, et al. An assessment of microcracks in the interfacial transition zone of recycled concrete aggregates cured by CO₂[J]. *Construction and*

- Building Materials, 2020, 236: No. 117543.
- [51] Pan G, Zhan M, Fu M, et al. Effect of CO₂ curing on demolition recycled fine aggregates enhanced by calcium hydroxide pre-soaking[J]. Construction and Building Materials, 2017, 154: 810-818.
- [52] Galan I, Andrade C, Castellote M. Natural and accelerated CO₂ binding kinetics in cement paste at different relative humidities[J]. Cement and Concrete Research, 2013, 49: 21-28.
- [53] Kou S C, Zhan B J, Poon C S. Use of a CO₂ curing step to improve the properties of concrete prepared with recycled aggregates[J]. Cement and Concrete Composites, 2014, 45: 22-28.
- [54] Gholizadeh-Vayghan A, Bellinkx A, Snellings R, et al. The effects of carbonation conditions on the physical and microstructural properties of recycled concrete coarse aggregates[J]. Construction and Building Materials, 2020, 257: No. 119486.
- [55] Wu K, Luo S, Zheng J, et al. Influence of carbonation treatment on the properties of multiple interface transition zones and recycled aggregate concrete[J]. Cement and Concrete Composites, 2022, 127: No. 104402.
- [56] Wu L, Zhang W, Jiang H, et al. Synergistic effects of environmental relative humidity and initial water content of recycled concrete aggregate on the improvement in properties via carbonation reactions[J]. Materials, 2023, 16: No. 5251.
- [57] 应敬伟, 蒙秋江, 肖建庄. 再生骨料CO₂强化及其对混凝土抗压强度的影响[J]. 建筑材料学报, 2017, 20(2): 277-282.
- Ying Jing-wei, Meng Qiu-jiang, Xiao Jian-zhuang. Effect of CO₂-modified recycled aggregate on compressive strength of concrete[J]. Journal of Building Materials, 2017, 20(2): 277-282.
- [58] 朱亚光, 徐培蓁. 硅烷与PVA对再生混凝土粗骨料改性试验研究[J]. 混凝土, 2015(3): 93-95, 101.
- Zhu Ya-guang, Xu Pei-zhen. Experimental research on modified of recycled aggregate concrete by silane and PVA[J]. Concrete, 2015(3): 93-95, 101.
- [59] Qiu J, Zhang Y, Qin Q, et al. Study on mechanical properties and microscopic mechanism of PVA-modified recycled brick aggregate concrete[J]. Sustainability, 2024, 16: No. 1292.
- [60] 吴素瑶. PVA改性再生骨料对再生混凝土性能的影响[D]. 淮南: 安徽理工大学土木建筑学院, 2019.
- Wu Su-yao. Effect of PVA modified recycled aggregate on properties of recycled concrete[D]. Huainan: School of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Science and Technology, 2019.
- [61] Tsujino M, Noguchi T, Tamura M, et al. Application of conventionally recycled coarse aggregate to concrete structure by surface modification treatment[J]. Journal of Advanced Concrete Technology, 2007, 5(1): 13-25.
- [62] Spaeth V, Tegger A D. Improvement of recycled concrete aggregate properties by polymer treatments[J]. International Journal of Sustainable Built Environment, 2013, 2: 143-152.
- [63] 段珍华, 江山山, 肖建庄, 等. 再生粗骨料含水状态对混凝土性能的影响[J]. 建筑材料学报, 2021, 24(3): 545-550.
- Duan Zhen-hua, Jiang Shan-shan, Xiao Jian-zhuang, et al. Effect of moisture condition of recycled coarse aggregate on the properties of concrete[J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(3): 545-550.
- [64] Pepe M, Filho R D T, Koenders E A B, et al. A novel mix design methodology for recycled aggregate concrete[J]. Construction and Building Materials, 2016, 122: 362-372.
- [65] Ferreira L, Barra M, de Brito J. Influence of the pre-saturation of recycled coarse concrete aggregates on concrete properties[J]. Magazine of Concrete Research, 2011, 63(8): 617-627.
- [66] Brand A S, Roesler J R, Salas A. Initial moisture and mixing effects on higher quality recycled coarse aggregate concrete[J]. Construction and Building Materials, 2015, 79: 83-89.
- [67] 马昆林, 黄新宇, 胡明文, 等. 砖混再生粗骨料混凝土损伤本构关系[J]. 建筑材料学报, 2022, 25(2): 131-141.
- Ma Kun-lin, Huang Xin-yu, Hu Ming-wen, et al. Damage constitutive model of brick-concrete recycled coarse aggregates concrete[J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(2): 131-141.
- [68] Chen W, Shao Z, Wei W, et al. Properties of concrete incorporating microwave treated coarse aggregate: an experimental study[J]. Structures, 2021, 33: 693-702.
- [69] Güneysi E, Gesoglu M, Algm Z, et al. Effect of surface treatment methods on the properties of self-compacting concrete with recycled aggregates[J]. Construction and Building Materials, 2014, 64: 172-183.
- [70] 丁子奇. 再生混凝土骨料微生物矿化改性及其机理研究[D]. 扬州: 扬州大学建筑科学与工程学院, 2022.

- Ding Zi-qi. Properties modification of recycled concrete aggregate based on microbial mineralization and its mechanism[D]. Yangzhou: College of Architectural Science and Engineering, Yangzhou University, 2022.
- [71] Tam V W Y, Butera A, Le K N. Carbon-conditioned recycled aggregate in concrete production[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 133: 672-680.
- [72] Li L, Xuan D, Sojobi A O, et al. Development of nano-silica treatment methods to enhance recycled aggregate concrete[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2021, 118: No. 103963.
- [73] 秦拥军, 陈楠, 蔺鹏杰, 等. 掺锂渣再生混凝土三点弯曲梁双K断裂特性[J]. *吉林大学学报: 工学版*, 2021, 51(6): 2121-2127.
- Qin Yong-jun, Chen Nan, Lin Peng-jie, et al. Double K fracture characteristics of recycled concrete three-point bending beam mixed with lithium slag[J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2021, 51(6): 2121-2127.
- [74] 张鸿儒. 基于界面参数的再生骨料混凝土性能劣化机理及工程应用[D]. 杭州: 浙江大学建筑工程学院, 2016.
- Zhang Hong-ru. Deterioration mechanism of recycled aggregate concrete (RAC) based on interface parameters and the application of RAC[D]. Hangzhou: College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, 2016.
- [75] Akbarnezhad A, Ong K C G, Zhang M H, et al. Microwave-assisted beneficiation of recycled concrete aggregates[J]. *Construction and Building Materials*, 2011, 25: 3469-3479.
- [76] Saravanakumar P, Abhiram K, Manoj B. Properties of treated recycled aggregates and its influence on concrete strength characteristics[J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 111: 611-617.
- [77] 徐洪坡. 水玻璃强化再生粗骨料混凝土力学性能的试验研究[D]. 青岛: 青岛理工大学土木工程学院, 2018.
- Xu Hong-po. Experimental study on mechanical properties of recycled coarse aggregate concrete strengthened with sodium silicate[D]. Qingdao: School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, 2018.
- [78] Yang J, Shaban W M, Elbaz K, et al. Properties of concrete containing strengthened crushed brick aggregate by pozzolan slurry[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 247: No. 118612.
- [79] 孙道胜, 李泽英, 刘开伟, 等. 再生粗骨料的形态及缺陷对再生混凝土干燥收缩和力学性能的影响[J]. *材料导报*, 2021, 35(11): 11027-11033, 11056.
- Sun Dao-sheng, Li Ze-ying, Liu Kai-wei, et al. Influence of shapes and defects in recycled aggregate on drying shrinkage and mechanical properties of recycled aggregate concrete[J]. *Materials Reports*, 2021, 35(11): 11027-11033, 11056.
- [80] 崔正龙, 张含. 再生粗骨料释水特性对混凝土干燥收缩性能影响[J]. *工程科学与技术*, 2020, 52(6): 139-144.
- Cui Zheng-long, Zhang Han. Effect of recycled coarse aggregate suction and drainage on drying shrinkage of concrete[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2020, 52(6): 139-144.
- [81] 肖建庄, 许向东, 范玉辉. 再生混凝土收缩徐变试验及徐变神经网络预测[J]. *建筑材料学报*, 2013, 16(5): 752-757.
- Xiao Jian-zhuang, Xu Xiang-dong, Fan Yu-hui. Shrinkage and creep of recycled aggregate concrete and their prediction by ANN method[J]. *Journal of Building Materials*, 2013, 16(5): 752-757.
- [82] Silva S, Evangelista L, de Brito J. Durability and shrinkage performance of concrete made with coarse multi-recycled concrete aggregates[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 272: No. 121645.
- [83] Wang Q, Geng Y, Wang Y, et al. Drying shrinkage model for recycled aggregate concrete accounting for the influence of parent concrete[J]. *Engineering Structures*, 2020, 202: No. 109888.
- [84] Mao Y, Liu J, Shi C. Autogenous shrinkage and drying shrinkage of recycled aggregate concrete: a review [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 295: No. 126435.
- [85] Pedro D, de Brito J, Evangelista L. Structural concrete with simultaneous incorporation of fine and coarse recycled concrete aggregates: mechanical, durability and long-term properties[J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 154: 294-309.
- [86] 陈欣. 基于水化特性的再生骨料混凝土收缩性能研究[D]. 福州: 福州大学土木工程学院, 2017.
- Chen Xin. Shrinkage property of recycled concrete based on hydration characteristics[D]. Fuzhou: College of Civil Engineering, Fuzhou University, 2017.
- [87] Chinzorigt G, Lim M K, Yu M, et al. Strength, shrinkage and creep and durability aspects of concrete including CO₂ treated recycled fine aggregate[J]. *Cement and Concrete Research*, 2020, 136: No.

- 106062.
- [88] Ismail S, Ramli M. Mechanical strength and drying shrinkage properties of concrete containing treated coarse recycled concrete aggregates[J]. *Construction and Building Materials*, 2014, 68: 726-739.
- [89] Wang J, Zhang J, Cao D, et al. Comparison of recycled aggregate treatment methods on the performance for recycled concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 234: No. 117366.
- [90] Tam V W Y, Butera A, Le K N. An investigation of the shrinkage, concrete shrinkage reversibility and permeability of CO₂-treated concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 365: No. 130120.
- [91] Fathifazl G, Razaqpur A G, Isgor O B, et al. Creep and drying shrinkage characteristics of concrete produced with coarse recycled concrete aggregate[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2011, 33: 1026-1037.
- [92] 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 and Concrete Composites*, 2011, 33: 788-795.
- [93] Kisku N, Rajhans P, Panda S K, et al. Microstructural investigation of recycled aggregate concrete produced by adopting equal mortar volume method along with two stage mixing approach[J]. *Structures*, 2020, 24: 742-753.
- [94] 李秋义, 韩帅, 莫建, 等. 物理化学强化对再生混凝土抗氯离子渗透性能的影响[J]. *材料科学与工程学报*, 2016, 34(3): 432-436, 459.
Li Qiu-yi, Han Shuai, Mo Jian, et al. Influence of physical and chemical enhancement of recycled coarse aggregate on coefficient of chloride migration of recycled concrete[J]. *Journal of Materials Science and Engineering*, 2016, 34(3): 432-436, 459.
- [95] Kim Y, Hanif A, Kazmi S M S, et al. Properties enhancement of recycled aggregate concrete through pretreatment of coarse aggregates: comparative assessment of assorted techniques[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 191: 339-349.
- [96] Shi C, Wu Z, Cao Z, et al. Performance of mortar prepared with recycled concrete aggregate enhanced by CO₂ and pozzolan slurry[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2018, 86: 130-138.
- [97] 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 and Concrete Composites*, 2013, 35: 32-38.
- [98] 岳公冰. 再生混凝土多重界面结构与性能损伤机理研究[D]. 青岛: 青岛理工大学土木工程学院, 2018.
Yue Gong-bing. Study on the recycled concrete multi-interface structure and the damage mechanism of performance[D]. Qingdao: School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, 2018.
- [99] 祁兵. 多因素耦合作用下再生混凝土抗侵蚀性能与机理研究[D]. 南京: 东南大学材料科学与工程学院, 2017.
Qi Bing. Erosion resistance and mechanism of recycled aggregate concrete under multi coupling factors [D]. Nanjing: School of Materials Science and Engineering, Southeast University, 2017.
- [100] Bulatovic V, Melešev M, Radeka M, et al. Evaluation of sulfate resistance of concrete with recycled and natural aggregates[J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 152: 614-631.
- [101] 易超. 建筑垃圾资源化制备再生骨料混凝土的研究[D]. 广州: 暨南大学力学与建筑工程学院, 2014.
Yi Chao. The study on the resource recovery of construction waste for recycled aggregate concrete[D]. Guangzhou: School of Mechanics and Construction Engineering, Jinan University, 2014.
- [102] 安新正. 腐蚀环境下再生混凝土结构耐久性试验研究[D]. 北京: 中国矿业大学力学与土木工程学院, 2012.
An Xin-zheng. Experimental study on durability of recycled concrete structure exposed in corroded environment[D]. Beijing: School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, 2012.
- [103] 程海丽, 张迪. 水玻璃强化再生骨料混凝土的抗冻性和抗侵蚀性探析[J]. *新型建筑材料*, 2008(8): 5-7.
Cheng Hai-li, Zhang Di. Discussions on frost resistance and resistance to sulfate attack of water glass reinforced reclaimed aggregate concrete[J]. *New Building Materials*, 2008(8): 5-7.
- [104] Kazmi S M S, Munir M J, Wu Y F, et al. Effect of different aggregate treatment techniques on the freeze-thaw and sulfate resistance of recycled aggregate concrete[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2020, 178: No. 103126.
- [105] 王家滨. 喷射混凝土耐久性能劣化规律及机理研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学土木工程学院, 2016.
Wang Jia-bin. Study of deterioration law and mechanism of shotcrete durability performance[D]. Xi'an: School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, 2016.

- [106] Li Y, Wang R, Li S, et al. Resistance of recycled aggregate concrete containing low- and high-volume fly ash against the combined action of freeze-thaw cycles and sulfate attack[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 166: 23-34.
- [107] Kazmi S M S, Munir M J, Wu Y F, et al. Effect of recycled aggregate treatment techniques on the durability of concrete: a comparative evaluation[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 264: No. 120284.
- [108] Liu Z, Chin C S, Xia J. Novel method for enhancing freeze-thaw resistance of recycled coarse aggregate concrete via two-stage introduction of denitrifying bacteria[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 346: No. 131159.
- [109] 鲍玖文, 于子浩, 张鹏, 等. 再生粗骨料混凝土及其构件抗冻性能研究进展[J]. *建筑结构学报*, 2022, 43(4): 142-157.
Bao Jiu-wen, Yu Zi-hao, Zhang Peng, et al. Review on frost resistance property of recycled coarse aggregate concrete and its structural components[J]. *Journal of Building Structures*, 2022, 43(4): 142-157.
- [110] 陈德玉, 刘来宝, 严云, 等. 不同因素对再生骨料混凝土抗冻性的影响[J]. *武汉理工大学学报*, 2011, 33(5): 54-58.
Chen De-yu, Liu Lai-bao, Yan Yun, et al. Effect of different factors on frost resistance of recycled aggregate concrete[J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2011, 33(5): 54-58.
- [111] Xiao J, Li H, Yang Z. Fatigue behavior of recycled aggregate concrete under compression and bending cyclic loadings[J]. *Construction and Building Materials*, 2013, 38: 681-688.
- [112] Tan Y, Zhou C, Zhou J. Influence of the steel fiber content on the flexural fatigue behavior of recycled aggregate concrete[J]. *Advances in Civil Engineering*, 2020, 2020: No. 8839271.
- [113] Saini B S, Singh S P. Flexural fatigue strength prediction of self compacting concrete made with recycled concrete aggregates and blended cements[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 264: No. 120233.
- [114] Zhou J, Fu T, Zhong C, et al. Flexural fatigue behaviors of silicon carbide recycled concrete in corrosive environments[J]. *Advances in Civil Engineering*, 2021, 2021: No. 7459777.
- [115] 徐明, 王韬, 陈忠范. 高温后再生混凝土单轴受压应力-应变关系试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2015, 36(2): 158-164.
Xu Ming, Wang Tao, Chen Zhong-fan. Experimental research on uniaxial compressive stress-strain relationship of recycled concrete after high temperature[J]. *Journal of Building Structures*, 2015, 36(2): 158-164.
- [116] Wang W, Wu J, Wang Z, et al. Chloride diffusion coefficient of recycled aggregate concrete under compressive loading[J]. *Materials and Structures*, 2016, 49: 4729-4736.
- [117] 鲍玖文, 王云伟, 牟新宇, 等. 持压荷载与干湿循环作用下再生混凝土氯盐侵蚀行为[J]. *复合材料学报*, 2023, 40(2): 1015-1024.
Bao Jiu-wen, Wang Yun-wei, Mou Xin-yu, et al. Chloride ingress behavior of recycled aggregate concrete subjected to sustained compressive loading and drying-wetting cycles[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2023, 40(2): 1015-1024.
- [118] Qi B, Gao J, Chen F, et al. Chloride penetration into recycled aggregate concrete subjected to wetting-drying cycles and flexural loading[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 174: 130-137.
- [119] 王建刚. 复杂环境条件下再生混凝土耐久性衰变规律及改善机理[D]. 北京: 北京工业大学城市交通学院, 2020.
Wang Jian-gang. Decay law and improvement mechanism of durability of recycled concrete under complex environmental conditions[D]. Beijing: College of Metropolitan Transportation, Beijing University of Technology, 2020.
- [120] 水中和, 潘智生, 朱文琪, 等. 再生集料混凝土的微观结构特征[J]. *武汉理工大学学报*, 2003, 25(12): 99-102.
Shui Zhong-he, Pan Zhi-sheng, Zhu Wen-qi, et al. Microscopic structural features of the recycled aggregate concrete[J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2003, 25(12): 99-102.
- [121] 黄庆华, 周承宗, 顾祥林, 等. 混凝土界面过渡区水分传输特性试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2019, 40(1): 174-180.
Huang Qing-hua, Zhou Cheng-zong, Gu Xiang-lin, et al. Microscopic structural features of the recycled aggregate concrete[J]. *Journal of Building Structures*, 2019, 40(1): 174-180.
- [122] 陈惠苏, 孙伟, Stroeven Piet. 水泥基复合材料集料与浆体界面研究综述(二): 界面微观结构的形成、劣化机理及其影响因素[J]. *硅酸盐学报*, 2004, 32(1): 70-79.

- Chen Hui-su, Sun Wei, Strpven Piet. Interfacial transition zone between aggregate and paste in cementitious composites (II): Mechanism of formation and degradation of interfacial transition zone microstructure, and its influence factors[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2004, 32(1): 70-79.
- [123] Zeng W, Zhao Y, Zheng H, et al. Improvement in corrosion resistance of recycled aggregate concrete by nano silica suspension modification on recycled aggregates[J]. Cement and Concrete Composites, 2020, 106: No. 103476.
- [124] 李恒, 郭庆军, 王家滨, 等. 再生混凝土界面结构及耐久性综述[J]. 材料导报, 2020, 34(7): 13050-13057.
- Li Heng, Guo Qing-jun, Wang Jia-bin, et al. Meso-/Micro-structure of interfacial transition zone and durability of recycled aggregate concrete: a review[J]. Materials Reports, 2020, 34(7): 13050-13057.
- [125] 水中和, 万惠文. 老混凝土中骨料-水泥界面过渡区(ITZ)(I):元素与化合物在ITZ的富集现象[J]. 武汉理工大学学报, 2002, 24(4): 21-23, 74.
- Shui Zhong-he, Wan Hui-wen. Aggregate cement interfacial transition zone (ITZ) in old concrete(I): concentrations of elements and compounds to the ITZ [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2002, 24(4): 21-23, 74.
- [126] 水中和, 万惠文. 老混凝土中骨料-水泥界面过渡区(ITZ)(II):元素在界面区的分布特征[J]. 武汉理工大学学报, 2002, 24(5): 22-25.
- Shui Zhong-he, Wan Hui-wen. Distributions of chemical elements in aggregate cement interfacial transition zone in old concrete(II) [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2002, 24(5): 22-25.
- [127] 万惠文, 徐金龙, 水中和, 等. 再生混凝土ITZ结构与性质的研究[J]. 武汉理工大学学报, 2004, 26(11): 29-32.
- Wan Hui-wen, Xu Jin-long, Shui Zhong-he, et al. Study on the structure and properties of interfacial transition zone(ITZ) of the regenerated concrete[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2004, 26(11): 29-32.
- [128] Poon C S, Shui Z H, Lam L. Effect of microstructure of ITZ on compressive strength of concrete prepared with recycled aggregates[J]. Construction and Building Materials, 2004, 18: 461-468.
- [129] Xiao J, Li W, Sun Z, et al. Properties of interfacial transition zones in recycled aggregate concrete tested by nanoindentation[J]. Cement and Concrete Composites, 2013, 37: 276-292.
- [130] Zhang H, Ji T, Liu H. Performance evolution of the interfacial transition zone (ITZ) in recycled aggregate concrete under external sulfate attacks and dry-wet cycling[J]. Construction and Building Materials, 2019, 229: No. 116938.
- [131] Zhang H, Ji T, Liu H. Improving the sulfate resistance of recycled aggregate concrete (RAC) by using surface-treated aggregate with sulfoaluminate cement (SAC) [J]. Construction and Building Materials, 2021, 297: No. 123535.
- [132] Yue G, Ma Z, Liu M, et al. Damage behavior of the multiple ITZs in recycled aggregate concrete subjected to aggressive ion environment[J]. Construction and Building Materials, 2020, 245: No. 118419.
- [133] Liu Z, Chin C S, Xia J. Improving recycled coarse aggregate (RCA) and recycled coarse aggregate concrete (RCAC) by biological denitrification phenomenon[J]. Construction and Building Materials, 2021, 301: No. 124338.