文章编号:1007-9629(2024)07-0629-08

再生砖细骨料形态对混凝土流变行为与力学性能的影响

党钧陶[1,2], 刘耘池[1], 肖建庄[2,*], 李风兰[3], 杨金龙[1]
(1.华北水利水电大学 土木与交通学院,河南 郑州 450045; 2.同济大学 土木工程学院,上海 200092; 3.华北水利水电大学 河南省生态建材工程国际联合实验室,河南 郑州 450045)

摘要:评价了再生砖细骨料(RFCB)的几何形状和表面形态,研究了RFCB颗粒级配和初始饱水度对混凝土流变行为与力学性能的影响.结果表明:相比天然河砂,RFCB几何形状不规则且形状参数较低,表面形态呈凹陷凸起状且粗糙度较大;RFCB复杂的物理特性导致新拌混凝土的屈服应力与塑性黏度增大,劈裂抗拉强度有所提高且对抗压强度无较大不利影响;适当降低RFCB的最小粒径和初始饱水度,虽会使混凝土的流变性能变差,但有助于在混凝土中形成以再生砖细骨料为软核、界面为硬壳的结构,从而提高了混凝土的力学性能.

关键词:再生砖细骨料;再生混凝土;几何形状;表面形态;流变行为;力学性能
中图分类号:TU528.01 **文献标志码**:A **doi**:10.3969/j.issn.1007-9629.2024.07.008

Effect of Morphology of Recycled Fine Aggregate from Clay Bricks on Rheology Behavior and Mechanical Properties of Concrete

DANG Juntao[1,2], *LIU Yunchi*[1], *XIAO Jianzhuang*[2,*], *LI Fenglan*[3], *YANG Jinlong*[1]
(1. School of Civil Engineering and Communication, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450045, China; 2. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. International Joint Research Lab for Eco-building Materials and Engineering of Henan, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450045, China)

Abstract: The geometrical shape and surface morphology of recycled fine aggregate from clay brick(RFCB) were assessed, and the influence of particle size distribution and initial water saturation of RFCB on the rheology behavior and mechanical properties of concrete was explored. The results indicate that compared to natural river sand, the geometrical shape of RFCB shows irregular shape as well as lower morphological index, and the surface morphology of RFCB exhibites undulation topography with concave and convex as well as higher roughness value. Due to the complexity of physical characteristics of RFCB, both the yield stress and plastic viscosity of fresh concrete are increased, and the splitting tensile strength of hardened concrete is enhanced, but it has no significantly adverse effect on the compressive strength. Optimally reducing the minimum particle size and initial water saturation of RFCB result in a poor rheological behavior of fresh concrete, but it helps in forming soft core of inner RFCB and stiff shell of outer interface, thus enhances the mechanical properties.

Key words: recycled fine aggregate from clay brick; recycled concrete; geometrical shape; surface morphology; rheology behavior; mechanical property

收稿日期:2023-08-31; 修订日期:2023-11-06
基金项目:国家自然科学基金资助项目(52208247)
第一作者:党钧陶(1990—),男,河南郑州人,华北水利水电大学副教授,硕士生导师,博士.E-mail:dangjuntao@ncwu.edu.cn
通讯作者:肖建庄(1968—),男,山东沂南人,同济大学教授,博士生导师,博士.E-mail:jzx@tongji.edu.cn

随着城镇化的快速发展，建造新建筑、拆除旧建筑等导致天然资源过度消耗，建筑固废大量产生，从而造成不可逆的环境污染．据统计，拆除旧建筑所产生的砖混废弃物在建筑固废中的占比巨大，综合利用率较低，若采用简单堆放或填埋处置方式，则会占用大量土地[1-2]．与此同时，新建建筑对砂石骨料的需求量日益增长，滥挖、滥采天然砂石资源进一步加重了生态环境的负担．因此，消纳砖混废弃存量，缓解砂石资源短缺是实现中国“双碳”战略目标的关键．

目前，砖混废弃物经破碎、粉磨和筛分等处理后，得到的再生骨料和再生微粉可部分取代砂石骨料或掺合料来制备砂浆和混凝土，符合发展循环经济的要求[3-5]．相比再生砖粗骨料和再生砖粉，再生砖细骨料(RFCB)在一定程度上能够消除粗骨料孔洞较大和减小微粉活性不足的缺陷．然而，再生砖细骨料的吸水特性、几何形状和表面形态与天然河砂存在明显差异，会直接影响混凝土的宏微观性能[6-7]．因此，充分考虑再生砖细骨料的几何形状和表面形态，厘清其复杂物理特性对混凝土流变行为和力学性能的影响至关重要．

鉴于此，本文评价了不同种类、不同粒径再生砖细骨料的几何形状和表面形态，对比分析了其与天然河砂之间的物理特性差异；同时，探究了再生砖细骨料颗粒级配和初始饱水度对混凝土流变行为、抗压强度和劈裂抗拉强度的影响，揭示其对混凝土宏观性能和微观形貌的影响机理，以期为实现废砖再生利用提供科学依据．

1 试验

1.1 原材料

水泥选用P·O 42.5普通硅酸盐水泥，各项性能指标符合GB 175—2007《通用硅酸盐水泥》要求；减水剂采用聚羧酸高效减水剂，减水率(质量分数，文中涉及的减水率、水灰比等除特别注明外均为质量分数或质量比)25%，固含量为35%；天然粗骨料为5～20 mm连续级配的碎石；天然细骨料为普通河砂(NAF)；再生砖细骨料由拆除砌体结构中的废旧黏土砖和砂浆经二次机械破碎后筛分而得，控制其最小粒径，将再生砖细骨料分为RFCB-A(0～5.00 mm)和RFCB-B(0.15～5.00 mm)2种级配．天然河砂和再生砖细骨料的基本物理性能和颗粒级配曲线如表1和图1所示．

表1 天然河砂和再生砖细骨料的物理性能指标

Table 1 Physical characteristics of NAF and RFCB

Material	Apparent density /(kg·m^{-3})	Bulk density /(kg·m^{-3})	Fineness modulus	Saturated surface dry absorption (by mass)/%
NAF	2 500	1 465	2.65	1.5
RFCB-A	2 300	1 220	2.79	9.0
RFCB-B	2 411	1 326	2.88	11.4

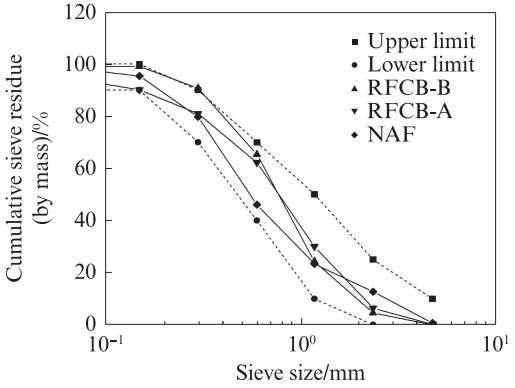


图1 天然河砂和再生砖细骨料的颗粒级配曲线

Fig. 1 Grading curves of NAF and RFCB

1.2 配合比设计

本试验配合比设计目标强度等级为C40，主要考虑再生砖细骨料的颗粒级配和初始饱水度．再生砖细骨料混凝土的水灰比(m_w/m_c)为0.45，其配合比如表2所示．其中，R0为天然河砂制备的基准混凝土；R50代表用再生砖细骨料取代天然河砂，取代率(体积分数)为50%；A和B分别代表再生砖细骨料颗粒级配为0～5.00 mm和0.15～5.00 mm；由于再生砖细骨料吸水能力较好，需要考虑其初始饱水度，控制水分引入量．用P表示再生砖细骨料的部分饱水度，即骨料搅拌过程中快速吸水后达到的状态；用F表示再生砖细骨料的完全饱水度，即骨料的饱和面干状态．为研究再生砖细骨料物理特性对流变行为的影响，适当调整减水剂掺量，使再生砖细骨料混凝土的坍

表2 混凝土配合比

Table 2 Mix proportions of concretes

Unit：kg

Specimen No.	Water	Cement	Coarse aggregate	River sand	RFCB	Initial water saturation
R0	171	380	1 077	780	0	0
R50AF	171	380	1 077	390	356	32
R50BF	171	380	1 077	390	375	42
R50AP	171	380	1 077	390	356	25
R50BP	171	380	1 077	390	375	36

落度保持在120～140 mm.

1.3　骨料物理特性测试

进行几何形状测试时，先将骨料按[0.075，0.15) mm、[0.15，0.3) mm、[0.3，0.6) mm、[0.6，1.18) mm、[1.18，2.36) mm和[2.36，4.75) mm这6类粒径区间进行分类；再取等质量的骨料均匀分散在测试面板上，采用Occhio Scan 700型粒度粒型分析仪进行图像扫描.基于骨料图像数据，借助Callisto 3D图形分析软件进行计算，获得骨料的长宽比、球度值和棱角度等参数.

进行表面形态测试时，将骨料切割、打磨至平整块状样品，暴露骨料固有的表面形态，采用原子力显微镜(AFM)技术和NanoScape Analysis分析软件，获得再生砖细骨料和天然河砂的表面形态及其特征参数(轮廓算数平均偏差R_a、高度均方根R_q和轮廓最大高度R_z).

1.4　再生砖细骨料混凝土性能测试

1.4.1　流变性能

利用eBT-V混凝土流变仪测试新拌混凝土的流变性能，基于Bingham方程获取其屈服应力和塑性黏度等参数.

1.4.2　力学性能

根据GB/T 50081—2019《混凝土物理力学性能试验方法标准》，制备尺寸为100 mm×100 mm×100 mm的立方体试件，测试7、28、60、120、180 d立方体抗压强度，以及28 d劈裂抗拉强度.试验值取3个试件的平均值.

1.4.3　微观形貌

从养护龄期180 d的再生砖细骨料混凝土试件中，选取包含天然河砂、再生砖细骨料和水泥石基体的试样，置于无水乙醇中浸泡，经干燥、喷金处理后，采用扫描电镜(SEM)观察其微观形貌.

2　结果与讨论

2.1　细骨料物理特性

骨料的几何形状和表面形态是其物理特性研究的关键，不仅影响颗粒之间的相互运动，而且影响骨架结构的堆积程度[8].因此，两者是决定混凝土流变行为和力学性能的重要因素.

2.1.1　几何形状

基于图像处理技术，不同粒径区间天然河砂和再生砖细骨料的二维几何形状如图2所示.由图2可见：天然河砂颗粒的棱角较少、细长颗粒较少且整体形状圆润；而再生砖细骨料的棱角突出、狭长颗粒较多且整体呈不规则几何形状.

为进一步对比分析再生砖细骨料与天然河砂几何形状的差异，借助图形分析软件，量化表征不同粒径细骨料的几何形状参数(长宽比、球度值和棱角度)，结果如图3所示.由图3可见：(1)相同粒径区间下，再生砖细骨料的长宽比集中在0.70左右，明显低于天然河砂；尤其是在细骨料颗粒级配占比最大的0.6～1.18 mm粒径区间，天然河砂长宽比高达0.80，而再生砖细骨料长宽比低至0.73.骨料的长宽比越低，其针状形状越明显.再生砖细骨料针状颗粒越多，混凝土的和易性就越差，并且在外力作用下易产生应力集中.(2)再生砖细骨料的球度值较天然河砂略有降低.骨料的球度值越高，颗粒越接近圆球状，更易于颗粒在水泥浆体中的滚动.(3)相比长宽比和球度值，再生砖细骨料的棱角度与天然河砂非常接近.总体而言，相比天然河砂，再生砖细骨料的内凹曲面较为显著，说明再生砖细骨料颗粒形态存在凹凸现象且凹凸程度不同.骨料棱角分明的形状有利于骨料颗粒与水泥石基体之间形成较好的机械互锁，从而获得较好的混凝土力学性能.相同粒径区间下，再生砖细骨料的几何形状参数值也低于天然河砂.这是因为天然河砂是长期受河水冲刷和岩石风化等自然影响而形成的，而再生砖细骨料是经高温烧制工艺和二次机械破碎而获得的.骨料形成机制的不同是造成两者几何形状存在差异的根本原因.

2.1.2　表面形态

采用AFM技术观测天然河砂和再生砖细骨料的表面形态，其三维形貌照片如图4所示，表面形态参数见表3.由图4和表3可见：(1)天然河砂和再生砖细骨料的表面局域形态(如山峰与山谷分布)存在明显变化.天然河砂表面相对光滑，条形流纹明显，表面粗糙度参数值较小；再生砖细骨料的表面凹陷凸起、起伏不平，且无明显间断.(2)天然河砂和再生砖细骨料的表面形态参数差异显著.再生砖细骨料的表面粗糙度较大，R_a、R_q和R_z分别为天然河砂的4～8倍.原因在于天然河砂长期受水流冲刷，经碰撞、磨损和老化等造成其表面纹理光滑、粗糙度降低.天然河砂的光滑表面无法提供可靠的摩擦力，导致外荷载作用下基准混凝土破坏路径通常沿着天然河砂与水泥石基体之间的界面发生开裂破坏.相反，由于经过高温烧结工艺和二次机械破碎，再生砖细骨料表面纹理粗糙，增加了骨料表面与水泥石的接触面积，有利于增强骨料表面与水泥石之间的黏附力，一定程度上提升了界面过渡区(ITZ)抵抗变形的能力.

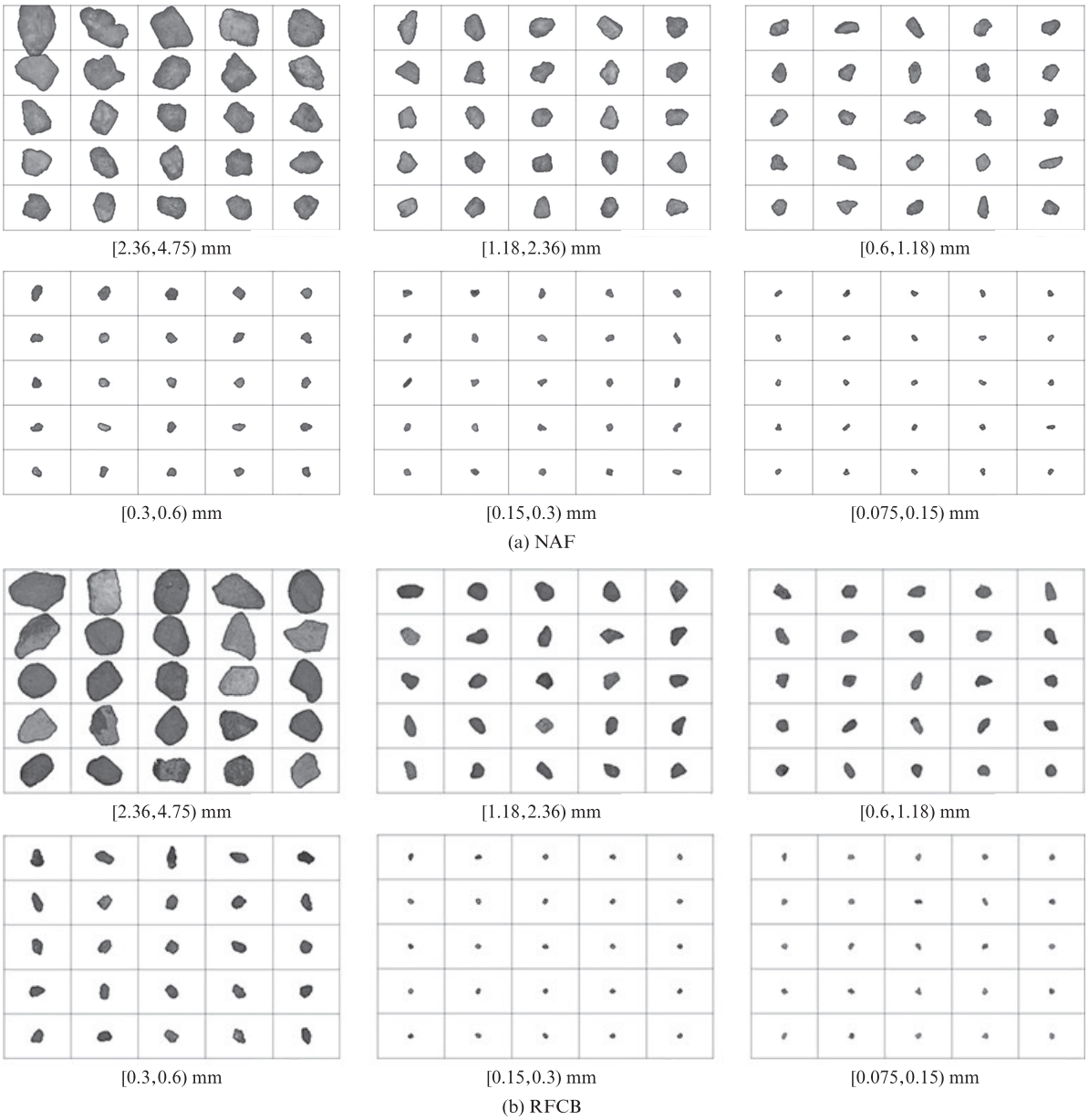


图2 天然河砂和再生砖细骨料的几何形状

Fig. 2 Geometrical shapes of NAF and RFCB

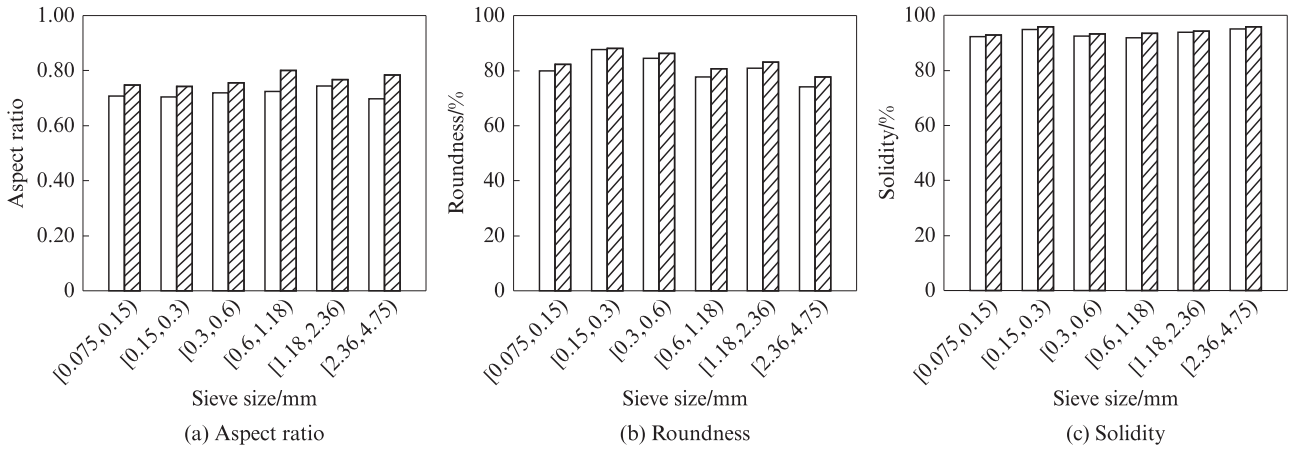
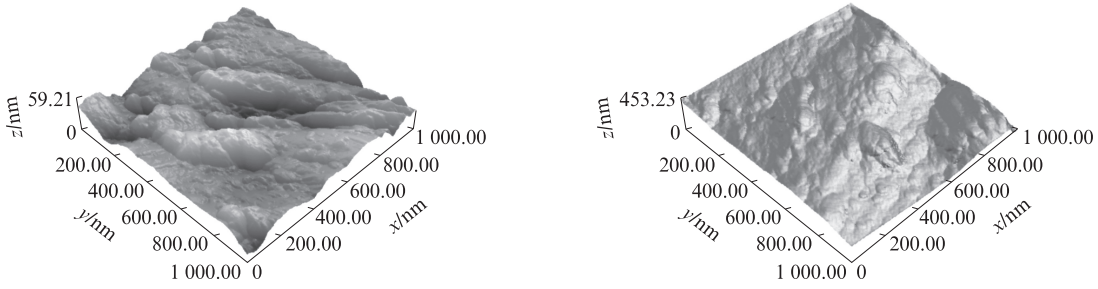


图3 天然河砂和再生砖细骨料的几何形状参数

Fig. 3 Geometrical shape parameters of NAF and RFCB



(a) NAF　(b) RFCB

图4　天然河砂和再生砖细骨料的三维形貌照片

Fig. 4　3D morphology images of NAF and RFCB

表3　天然河砂和再生砖细骨料的表面形态参数

Table 3　Surface morphological characteristic of NAF and RFCB

Material	R_a/nm	R_q/nm	R_z/nm
NAF	6.736	8.813	59.210
RFCB	27.967	32.615	453.230

2.2　再生砖细骨料混凝土宏观性能

2.2.1　流变性能

图5为新拌混凝土的流变性能.由图5可见，在和易性相似的条件下，新拌再生砖细骨料混凝土的屈服应力和塑性黏度普遍高于基准混凝土，表明再生砖细骨料部分取代天然河砂能够显著提高新拌混凝土的流变性能.这主要归因于再生砖细骨料自身吸水能力、几何形状和表面形态等复杂物理特性的耦合影响.一方面，相比天然河砂，形状不规则且表面粗糙的再生砖细骨料，增大了骨料颗粒间的摩擦力；另一方面，多孔结构的再生砖细骨料具有高吸水性，可能会进一步吸收拌和物中的自由水和减水剂，从而减少其中的游离态水含量和有效减水剂浓度，导致拌和物的屈服应力和塑形黏度增加[9-10].

由图5还可见：(1)再生砖细骨料的颗粒级配和初始饱水度对新拌混凝土的流变性能存在显著影响.当初始饱水度相同时，再生砖细骨料的最小粒径越小，新拌混凝土的屈服应力和塑性黏度就越大.具体来说，相比颗粒级配0.15～5 mm，颗粒级配为0～5 mm的再生砖细骨料造成拌和物的屈服应力和塑性黏度分别增加10%～23%和27%～40%.这是因为粒径小于0.15 mm的颗粒具有较大的比表面积，需要更多的水泥浆包裹，从而增加了拌和物的黏聚性.(2)当颗粒级配相同时，再生砖细骨料的初始饱水度越低，新拌混凝土的屈服应力和塑性黏度越高.相比初始饱水度为完全饱和面干状态，部分饱水度的再生砖细骨料导致拌和物屈服应力和塑性黏度分别增加24%～39%和17%～28%.这可能是因为尽管部分饱水度的再生砖细骨料可以使拌和物达到目标坍落度，但随着时间的延长，再生砖细骨料还会吸收一定量的自由水和减水剂，同时水泥水化的不断进行增大了水泥分子间的引力，从而导致新拌混凝土屈服应力和塑性黏度有所增大.

2.2.2　抗压强度

图6为不同养护龄期下再生砖细骨料混凝土的抗压强度.由图6可见：(1)再生砖细骨料混凝土和基准混凝土的抗压强度均随养护龄期的延长而增大.(2)各养护龄期下，再生砖细骨料部分取代天然河砂

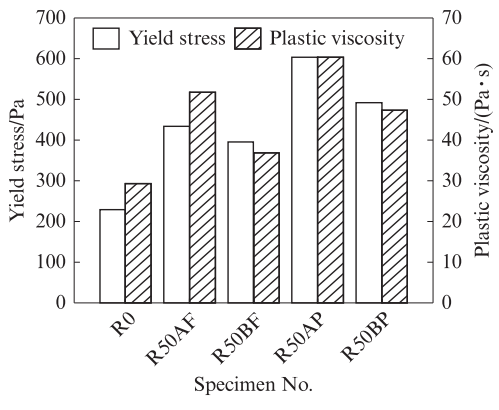


图5　新拌混凝土的流变性能

Fig. 5　Rheological properties of fresh concretes

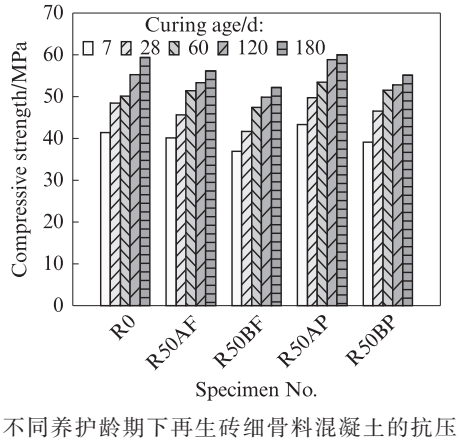


图6　不同养护龄期下再生砖细骨料混凝土的抗压强度

Fig. 6　Compressive strength of recycled concrete containing RFCB at different curing ages

使混凝土的抗压强度与基准混凝土相似或略有不同，说明再生砖细骨料自身复杂的物理特性对混凝土抗压强度的影响存在差异.相比基准混凝土R0，养护龄期为28、180 d时，再生砖细骨料混凝土R50BF的抗压强度分别减小14%和12%，R50AF、R50BP的抗压强度也降低5%左右，而R50AP的抗压强度无损失甚至略有提升.这主要是因为相比致密的天然河砂，再生砖细骨料自身存在低硬度、微裂缝、多孔结构和针片状粒形等物理缺陷，受力后容易发生开裂破坏，导致混凝土的抗压强度劣化[11-13]；然而，再生砖细骨料的粗糙纹理和不规则形态会增强骨料与水泥石之间的界面黏结力，在一定程度上可以弥补其自身物理缺陷带来的不利影响，因此其抗压强度与基准混凝土相同或略高.

由图6还可见：(1)再生砖细骨料的颗粒级配和初始饱水度对混凝土的抗压强度影响有所不同.(2)当颗粒级配相同时，再生砖细骨料初始饱水度越低，混凝土的抗压强度越高.相比初始饱水度为完全饱和面干状态，部分饱水度的再生砖细骨料使混凝土的抗压强度平均提高8%.这可能是因为再生砖细骨料在搅拌过程中未达到完全饱和状态，随着水泥水化的进行，再生砖细骨料会继续吸收浆体中的自由水，使得有效水灰比降低，从而提高混凝土的抗压强度；相反，完全饱水度的再生砖细骨料分散在基体中可能存在水分外渗现象，一定程度上增加了骨料附近的有效水灰比，导致混凝土的抗压强度降低.(3)当初始饱水度相同时，再生砖细骨料最小粒径越小，混凝土的抗压强度越大.相比颗粒级配0.15～5.00 mm，颗粒级配为0～5.00 mm的再生砖细骨料使混凝土抗压强度平均提高8%.这是因为再生砖细骨料最小粒径的降低相当于在骨架堆积体系中增加了一定量的再生砖粉，能够更加充分发挥火山灰效应和微填充作用，有效填充内部孔隙，并增强界面过渡区和水泥石基体的密实度，从而提高混凝土的抗压强度.上述研究表明，适当降低再生砖细骨料的最小粒径和初始饱水度，能够获得与基准混凝土相同的抗压强度.

2.2.3 劈裂抗拉强度

图7为再生砖细骨料混凝土养护28 d时的劈裂抗拉强度.由图7可见，再生砖细骨料混凝土的劈裂抗拉强度等于或高于基准混凝土，除再生砖细骨料混凝土R50BF外，R50AF、R50BP和R50AP的劈裂抗拉强度比基准混凝土R0分别提高7%、7%和14%.这是由于天然河砂表面光滑且形状圆润，其与水泥石基体之间的界面较薄弱，容易在劈裂受拉下引发界面损伤[14-15]；再生砖细骨料表面粗糙且为多孔结构，有助于发挥嵌挤、吸附等物理作用，使其与水泥石基体之间形成紧密的机械咬合，可有效提高界面黏结力，抵消再生砖细骨料低硬度、低弹性模量的不利影响，从而提升混凝土的劈裂抗拉强度.

由图7还可见，再生砖细骨料的颗粒级配和初始饱水度对混凝土劈裂抗拉强度的影响与抗压强度变化趋势相吻合.当颗粒级配相同时，再生砖细骨料初始饱水度越低，混凝土劈裂抗拉强度越高；当初始饱水度相同时，再生砖细骨料最小粒径越小，混凝土的劈裂抗拉强度越大.具体原因与其对抗压强度的影响相一致.相比抗压强度，再生砖细骨料的几何形状和表面形态更有利于提高混凝土的劈裂抗拉强度.

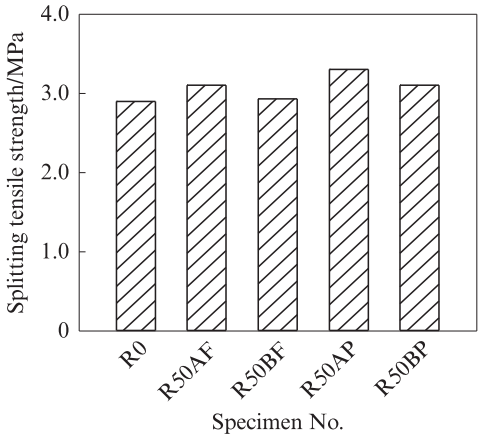


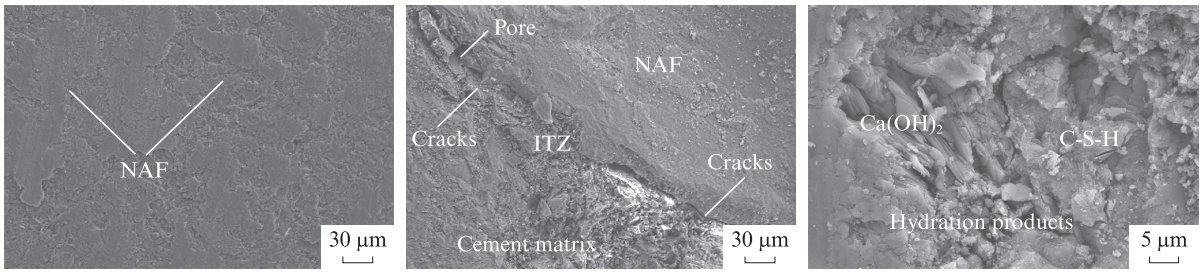
图7 再生砖细骨料混凝土养护28 d龄期时的劈裂抗拉强度

Fig. 7 Splitting tensile strength of recycled concrete containing RFCB curing for 28 d

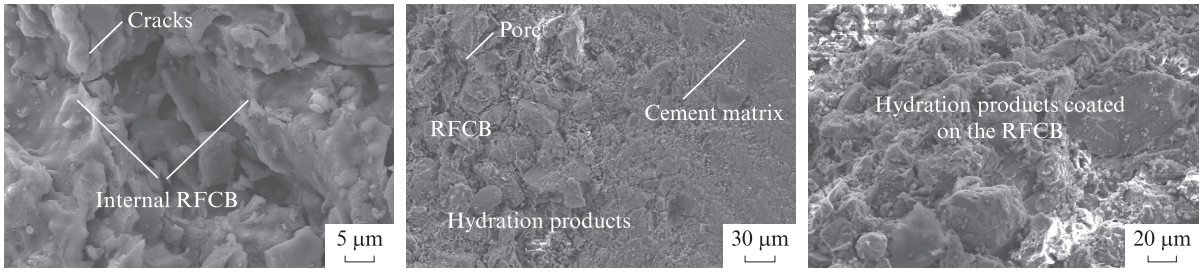
2.3 再生砖细骨料混凝土微观形貌

图8为再生砖细骨料混凝土养护180 d时的SEM照片.由图8(a)可见，天然河砂与水泥石基体之间存在明显的界面过渡区(ITZ)，并在ITZ附近观察到孔洞、微裂纹和水化产物$Ca(OH)_2$等.这是因为混凝土中的自由水逐渐向致密且光滑的天然河砂附近聚集，增加了骨料周围的有效水灰比，形成了以天然河砂为硬核，天然河砂与水泥石基体间界面为软壳的结构，该结构是导致水泥基体与天然河砂之间黏附力较差的主要原因[16].

由图8(b)可见，与天然河砂和水泥石基体之间界面相比，再生砖细骨料和水泥石基体之间较难观察到明显的ITZ及水化产物$Ca(OH)_2$，但发现水化硅酸钙(C-S-H)凝胶和钙矾石(AFt)等水化产物存在于再生砖细骨料表面孔洞中.一方面，这可能是再生砖细骨料表面活性成分与$Ca(OH)_2$发生火山灰反



(a) ITZ between cement matrix and NAF



(b) ITZ between cement matrix and RFCB

图8　再生砖细骨料混凝土养护180 d龄期时的SEM照片

Fig. 8　SEM images of recycled concretes containing RFCB curing for 180 d

应，生成了一定量的水化产物，填充于多孔骨料表面周围的孔隙和水泥石基体内，有助于细化混凝土的孔结构[17-18]；另一方面，再生砖细骨料不规则形状与粗糙纹理增强了骨料与水泥石之间界面的机械咬合. 因此，由于再生砖细骨料的形态和活性提高了再生骨料表面边缘、界面过渡区和水泥石基体的密实度，有助于形成以再生砖细骨料为软核，再生砖细骨料与水泥石基体间界面为硬壳的结构. 该结构抵消了多孔骨料的内在缺陷，是再生砖细骨料混凝土劈裂抗拉强度提高的主要原因.

3　结论

(1)相比天然河砂，由于高温烧制工艺和二次机械破碎的影响，再生砖细骨料的几何形状参数较低，表面粗糙度较大，其特征参数(轮廓算数平均偏差R_a、高度均方根R_q和轮廓最大高度R_z)分别为天然河砂的4～8倍.

(2)再生砖细骨料的掺入增大了新拌混凝土的屈服应力与塑性黏度，提高了硬化混凝土的劈裂抗拉强度且对抗压强度无较大不利影响. 此外，再生砖细骨料最小粒径越小、初始饱水度越低，新拌混凝土的流变性能就越大，硬化混凝土的劈裂抗拉强度最大提高14%.

(3)适当降低再生砖细骨料的最小粒径和初始饱水度，有助于在混凝土中形成以再生砖细骨料为软核、界面为硬壳的结构，该结构可抵消多孔骨料的内在缺陷，有利于增强混凝土的力学性能.

参考文献：

[1] 段珍华，邓琪，肖建庄，等. 再生混凝土冲击磨耗性能与调控方法[J]. 建筑材料学报，2022，25(11)：1136-1142.
DUAN Zhenhua，DENG Qi，XIAO Jianzhuang，et al. Impact wear performance and control methods of recycled concrete [J]. Journal of Building Materials，2022，25(11)：1136-1142.(in Chinese)

[2] 高文昌，张欢，耿悦，等. 再生混凝土棱柱体与立方体抗压强度关系模型[J]. 建筑材料学报，2022，25(11)：1121-1127.
GAO Wenchang，ZHANG Huan，GENG Yue，et al. The relationship between compressive strength of recycled concrete prisms and cubes [J]. Journal of Building Materials，2022，25(11)：1121-1127.(in Chinese)

[3] LIU Q，SINGH A，XIAO J Z，et al. Workability and mechanical properties of mortar containing recycled sand from aerated concrete blocks and sintered clay bricks [J]. Resources Conservation and Recycling，2020，157：104728.

[4] 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 Kunlin，HUANG Xinyu，HU Mingwen，et al. Damage constitutive relationship of brick-concrete regenerated coarse aggregate [J]. Journal of Building Materials，2022，25(2)：131-141.(in Chinese)

[5] 刘超，胡天峰，刘化威，等. 再生复合微粉对混凝土力学性能及微观结构的影响[J]. 建筑材料学报，2021，24(4)：726-735.
LIU Chao，HU Tianfeng，LIU Huawei，et al. Effects of recycled composite powder on mechanical properties and microstructure of concrete [J]. Journal of Building Materials，2021，24(4)：726-735.(in Chinese)

[6] LAM M N T，NGUYEN D T，NGUYEN D L. Potential use of clay brick waste powder and ceramic waste aggregate in

mortar[J]. Construction and Building Materials, 2021, 313: 125516.

[7] GE Z, FENG Y J, YUAN H Q, et al. Durability and shrinkage performance of self-compacting concrete containing recycled fine clay brick aggregate[J]. Construction and Building Materials, 2021, 308:125041.

[8] BARI H, SALAM M A, SAFIUDDIN M, et al. Fresh and hardened properties of brick aggregate concrete including coconut shell as a partial replacement of coarse aggregate[J]. Construction and Building Materials, 2021, 297:123745.

[9] MA K L, HUANG X Y, SHEN J T, et al. The morphological characteristics of brick-concrete recycled coarse aggregate based on the digital image processing technique[J]. Journal of Building Engineering, 2021, 44:103292.

[10] 段珍华, 侯少丹, 潘智生, 等. 再生细骨料混凝土流变性及其对强度和耐久性的影响[J]. 建筑结构学报, 2020, 41(增刊2): 420-426.
DUAN Zhenhua, HOU Shaodan, PAN Zhisheng, et al. Rheological properties of recycled fine aggregate concrete and their effects on strength and durability[J]. Journal of Building Structures, 2020, 41(Suppl 2):420-426. (in Chinese)

[11] 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 Zhenhua, JIANG Shanshan, XIAO Jianzhuang, et al. Effect of reclaimed coarse aggregate water content on concrete performance[J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(3): 545-550. (in Chinese)

[12] XU F M, LIN X S, ZHOU A N, et al. Effects of recycled ceramic aggregates on internal curing of high performance concrete[J]. Construction and Building Materials, 2022, 322:126484.

[13] HUANG Q, ZHU X H, XIONG G Q, et al. Recycling of crushed waste clay brick as aggregates in cement mortars: An approach from macro- and micro-scale investigation[J]. Construction and Building Materials, 2021, 274:122068.

[14] DANG J T, ZHAO J, PANG S D, et al. Durability and microstructural properties of concrete with recycled brick as fine aggregates[J]. Construction and Building Materials, 2020, 262: 120032.

[15] HONG L, GU X L, LIN F, et al. Influence of aggregate surface roughness on mechanical properties of interface and concrete[J]. Construction and Building Materials, 2014, 65: 348-349.

[16] CALISKAN S, KARIHALOO B L. Effect of surface roughness, type and size of model aggregates on the bond strength of aggregate/mortar interface[J]. Interface Science, 2004, 12(4): 361-374.

[17] SAEZDELBOSQUE I F, ZHU W, HOWIND T, et al. Properties of interfacial transition zones (ITZs) in concrete containing recycled mixed aggregate[J]. Cement and Concrete Composites, 2017, 81:25-34.

[18] DANG J T, ZHAO J. Influence of waste clay bricks as fine aggregate on the mechanical and microstructural properties of concrete[J]. Construction and Building Materials, 2019, 228: 116757.