

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2022.123



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



# 钢纤维增强碱矿渣再生骨料混凝土的力学性能

陈庞, 王政轩, 张健新, 王辉, 史朝悦  
(河北工业大学土木与交通学院, 天津 300401)

**摘要:**碱矿渣再生混凝土是以碱激发胶凝材料替代水泥、再生骨料取代天然石子制备而成的新型混凝土,能有效降低波特兰水泥用量,提高废弃混凝土利用率,但未见对其力学性能的相关研究。为研究碱矿渣再生混凝土的基本力学性能,以钢纤维取代率和再生骨料取代率为主要试验参数,进行抗压试验、劈裂抗拉试验和抗折试验。研究表明:随着再生粗骨料取代率的增加,碱矿渣再生混凝土的抗压强度 $f_{cu}$ 、劈裂抗拉强度 $f_t$ 和抗折强度 $f_w$ 均降低,再生粗骨料取代率为 100% 时的降低幅度分别为 30%、10%、15%;碱矿渣再生混凝土抗压强度和劈裂抗拉强度随钢纤维体积取代率增加先提高后降低,钢纤维体积取代率为 0.6% 时,抗压强度和抗折强度达到最大值;碱矿渣再生混凝土抗折强度随钢纤维体积取代率增加而增加。

**关键词:**再生骨料混凝土;抗压强度;抗拉强度;抗折强度;钢纤维;体积取代率

中图分类号:TU528.572 文献标志码:A 文章编号:2096-6717(2025)01-0188-08

## Mechanical properties of fiber reinforced alkali-slag recycled aggregate concrete

CHEN Pang, WANG Zhengxuan, ZHANG Jianxin, WANG Hui, SHI Zhaoyue  
(School of Civil and Transportation Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, P. R. China)

**Abstract:** Alkali slag recycled concrete is a new type of concrete prepared by replacing cement with alkali excited cementing material and natural stone with recycled aggregate, which can effectively reduce the amount of Portland cement and improve the utilization rate of waste concrete. However, there has been no relevant research on its mechanical properties. In order to study the basic mechanical properties of alkali slag recycled concrete, the compression test, splitting tensile test and flexure test were carried out with the steel fiber replacement rate and the recycled aggregate replacement rate as the main test parameters. The results show that: With the increase of recycled aggregate, the cube strength $f_{cu}$ , splitting tensile strength $f_t$  and flexural strength $f_w$  of recycled alkali slag concrete all decrease, and the reduction range is 30%, 10% and 15% respectively when the substitution rate of recycled coarse aggregate is 100%. The cube strength and splitting tensile strength of

收稿日期:2022-08-11

基金项目:国家自然科学基金(52108132);河北省自然科学基金(E2021202067);河北省高等学校科学技术研究项目(QN2021037)

作者简介:陈庞(1988-),男,博士,主要从事绿色建材研究,E-mail:hitchenpang@126.com。  
张健新(通信作者),女,博士,E-mail:zhangjianxin505@hebut.edu.cn。

Received: 2022-08-11

**Foundation items:** National Natural Science Foundation of China (No. 52108132); Natural Science Foundation of Hebei Province (No. E2021202067); Science and Technology Research Project of Colleges and Universities of Hebei Province (No. QN2021037)

**Author brief:** CHEN Pang (1988-), PhD, main research interest: green building materials, E-mail: hitchenpang@126.com.  
ZHANG Jianxin (corresponding author), PhD, E-mail: zhangjianxin505@hebut.edu.cn.

alkali-slag recycled coarse aggregate concrete with increase first and then decrease with the increase of steel fiber volume substitution rate. When the steel fiber volume substitution rate is 0.6%, the compressive strength and flexural strength reach the maximum value. The flexural strength of alkali slag recycled concrete increases with the increase of steel fiber volume substitution rate.

**Keywords:** recycled aggregate concrete; cube compressive strength; splitting tensile strength; flexural strength; steel fiber; volume substitution rate

水泥生产消耗大量的化石燃料,排放大量的二氧化碳,据统计,水泥生产碳排放量约占全球碳排放总量的7%,因此,寻找可替代水泥的建筑材料具有极大的工程应用价值<sup>[1-3]</sup>。碱矿渣混凝土(alkali-activated slag concrete, AASC)是以废弃矿渣为胶凝材料,以氢氧化钠和水玻璃等为碱性激发剂制备而成的混凝土<sup>[4-5]</sup>。碱矿渣混凝土可以有效利用废弃矿渣,是绿色建材未来的发展趋势之一<sup>[6-8]</sup>。混凝土废块经过破碎、清洗和筛分等工序后,制成再生粗骨料。由再生粗骨料制作而成的混凝土称为再生混凝土(recycled aggregate concrete, RAC)。RAC用于工程建设,既可以缓解天然骨料短缺的问题,又可以对建筑废弃物进行合理利用,符合建筑业绿色、环保、可持续的发展方向<sup>[9-10]</sup>。碱矿渣再生混凝土(alkali-activated slag recycled aggregate concrete, AAS-RAC)是以碱激发矿渣为胶凝材料,以再生骨料为粗骨料制备而成的新型混凝土,可充分利用碱矿渣胶凝材料和再生骨料的优点,是可持续发展的绿色建材之一。

与普通混凝土相比,AASC具有凝结速度快、早期强度高、热稳定强、耐火性能强<sup>[11]</sup>、耐久性好的优点<sup>[12-14]</sup>。Laskar等<sup>[15]</sup>研究表明,AASC的凝结速度远快于普通硅酸盐水泥,其初凝时间和终凝时间分别为11、21 min。Atis等<sup>[16]</sup>发现,AASC具有早强和快硬的特点,在115℃热养护的条件下,AASC的24 h强度最高可达120 MPa。Pan等<sup>[17]</sup>研究发现,AASC在200℃和400℃下抗压强度增加约22%和15%。Palomo等<sup>[18]</sup>指出,碱矿渣砂浆在浸入各种侵蚀性溶液(去离子水、硫酸钠溶液和硫酸)中时性能非常稳定。虽然AASC具有诸多优势,但其同样存在收缩大、韧性差的缺点<sup>[19]</sup>。Duran等<sup>[20]</sup>研究发现,碱矿渣砂浆的收缩是普通硅酸盐水泥的3~6倍。这是由于AAS生成的水化硅酸钙(C-S-H)密度较高,使得AASC试件的体积变小,多余水分流失,进而增加了AASC干燥收缩<sup>[21]</sup>。AASC由于其材料内部广泛存在微裂缝,表现出较高的脆性<sup>[22]</sup>。为降低AASC收缩,增加其延性,研究者做了大量的努力,通常的做法为在AASC中掺入纤维<sup>[23-24]</sup>。Zhou等<sup>[25]</sup>研究表明,玄武岩纤维对强度提高效果优于聚丙烯

纤维。Zhang等<sup>[26]</sup>将0.5%含量的聚丙烯纤维掺入后,试件的早期抗压强度在第1天和第3天分别提高至68%和20%。Bernal等<sup>[27]</sup>将SF掺入AASC内,其研究表明,当SF体积含量为1.5%时,AASC的抗拉强度和抗折强度分别提高了24%和38%。与天然骨料相比,再生骨料内部存在更多的孔隙,其表观密度更低,压碎值更高<sup>[28]</sup>,因此,与普通混凝土相比,RAC的强度明显降低。为了改善RAC的力学性能,提高其在工程中的泛用性,许多学者进行了尝试。肖建庄等<sup>[29]</sup>采用热处理去除再生骨料表层黏附的残留砂浆,研究表明,处理后再生骨料的残留砂浆含量、吸水率和压碎指标分别降低了8.2%、1.9%和4.3%。Katkhuda等<sup>[30]</sup>利用酸处理去除其表面附着的砂浆,同时加入玄武岩纤维,RAC的劈裂抗拉强度和抗折强度分别提高了40.17%和82.65%。

AAS-RAC具有AASC和RAC优势的同时,也存在脆性较大和强度较低的问题。笔者通过掺入钢纤维来改善AAS-RAC的力学性能,制备了8组共72个不同配比的AAS-RAC试件,研究再生骨料取代率和钢纤维体积取代率对AAS-RAC立方体抗压强度 $f_{cu}$ 、劈裂抗拉强度 $f_t$ 和抗折强度 $f_w$ 的影响。

## 1 试验准备

### 1.1 试验材料

粒化高炉矿渣的比表面积和比重分别为440 m<sup>2</sup>/kg和2.45,平均粒径为2.4 μm,其化学成分和粒度分布图分别见表1和图1。粗骨料采用再生骨料。细骨料选用河沙,细度模量为2.6,容重为2480 kg/m<sup>3</sup>。天然粗骨料选用碎石,粒径范围为5~25 mm,容重为2620 kg/m<sup>3</sup>。试验中的水均采用天津市自来水。

碱激发剂由液态硅酸钠、固体氢氧化钠组成,

表1 粒化高炉矿渣化学成分

Table 1 Chemical composition of granulated blast

furnace slag					%
CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	其他
41	34	13	7	1	4

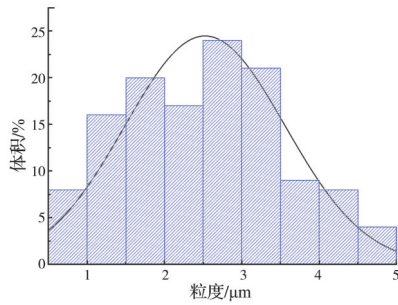


图 1 粒度分布图

Fig. 1 Particle size distribution diagram

激发剂中  $\text{SiO}_2$  和  $\text{Na}_2\text{O}$  的摩尔比为 1.7, 碱激发剂中含水量为 56%。固体  $\text{NaOH}$  的纯度为 96%。试验选取钢纤维用来改善碱矿渣再生骨料混凝土的力学性能。钢纤维由苏州史尉康金属制品有限公司提供, 纤维的详细力学性能如表 2 所示。

表 2 钢纤维力学性能

Table 2 Mechanical properties of steel fibers

密度/ ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	长度/mm	直径/ $\mu\text{m}$	抗拉强 度/MPa	弹性模量/ GPa
7 800	12	210	2 969	200.0

## 1.2 试件设计及配合比

制作 8 种不同配比的碱矿渣再生混凝土试件。试件设计考虑了钢纤维体积取代率 (0、0.3%、0.6%、0.9%) 和再生骨料取代率 (0、25%、50%、75%、100%) 的影响。具体试件设计及配合比如表 3 所示, 表中组别由 3 部分组成: 纤维/钢纤维体积取代率/再生骨料取代率。以 S/0.3/100 为例, 表示钢纤维体积取代率为 0.3%, 再生骨料取代率为 100%。每组试件的抗压强度、劈裂抗拉强度和抗折强度均取 3 个同条件试件的平均值。

表 3 试件基本参数

Tab.2 Parameters of specimens

试件	$V_{sf}/\%$	$V_{RAC}/\%$	$M_{NA}/$ ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	$M_{sf}/$ ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	$M_{RCA}/$ ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	矿渣/ ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	$\text{Na}_2\text{SiO}_3/$ ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	$\text{NaOH}/$ ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	水/ ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	砂/ ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )
N/0/0	0	0	1 334	0	0	625	164	27.8	152	833
N/0/25	0	25	990	0	330	625	164	27.8	152	833
N/0/50	0	50	660	0	660	625	164	27.8	152	833
N/0/75	0	75	330	0	990	625	164	27.8	152	833
N/0/100	0	100	0	0	1 320	625	164	27.8	152	833
S/0.3/100	0.3	100	0	23.4	1 320	625	164	27.8	152	833
S/0.6/100	0.6	100	0	46.8	1 320	625	164	27.8	152	833
S/0.9/100	0.9	100	0	70.2	1 320	625	164	27.8	152	833

注:  $V_{sf}$  为混凝土钢纤维体积分数;  $V_{RAC}$  为再生骨料体积分数 ( $V_{RAC}/(V_{RAC}+V_{NA})$ );  $M_{NA}$  为每立方米混凝土的天然粗骨料质量;  $M_{sf}$  为每立方米混凝土的钢纤维质量;  $M_{RAC}$  为每立方米混凝土再生骨料质量。

AAS-RAC 试件制备时, 首先将再生骨料与部分水混合, 进行预湿处理; 其次将液态  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ 、固态  $\text{NaOH}$  和水按比例均匀混合; 再次将预湿后再生骨料、矿粉、砂置于搅拌机中均匀搅拌 60 s; 随后加入碱性激发剂, 并均匀搅拌 60 s; 最后将混合物置于试模内, 放在振动台上振动 30 s。为防止试件中的水分蒸发影响试件性能, 将试件用塑料薄膜完全密封, 放于温度 ( $20 \pm 2$ ) $^\circ\text{C}$ 、相对湿度 ( $90 \pm 2$ )% 的养护室, 直至试验开始。

## 1.3 试验方法

对 AAS-RAC 的立方体抗压强度、劈裂抗拉强度和抗折强度进行了测试。立方体受压试件尺寸为  $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ , 劈裂抗拉强度试验试件尺寸为  $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ , 抗折强度试验试件尺寸为  $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$ 。试验按《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2019)<sup>[31]</sup> 进行, 立方体抗压试验加载速率为  $0.6 \text{ MPa/s}$ , 劈裂抗拉试验和抗折试验加载速率为

$0.06 \text{ MPa/s}$ 。

## 2 试验结果与讨论

### 2.1 AAS-RAC 立方体抗压强度

#### 2.1.1 再生骨料取代率的影响

再生骨料取代率对 AAS-RAC 立方体抗压强度的影响如图 2 所示。当再生骨料取代率为 100% 时, AAS-RAC 立方体抗压强度最低, 为  $47.7 \text{ MPa}$ 。以天然骨料为粗骨料的碱矿渣混凝土的立方体抗压强度最高, 为  $67.4 \text{ MPa}$ 。且随着再生骨料取代率的增加, AAS-RAC 的立方体抗压强度降低。再生骨料取代率为 25%、50%、75%、100% 时, AAS-RAC 的立方体抗压强度分别比天然骨料混凝土低 7.2%、10.5%、24.8%、30.3%。这是由于再生骨料的强度低于天然骨料, 随着低强度骨料的掺入, AAS-RAC 的立方体抗压强度降低。Nazari-mofrad 等<sup>[32]</sup> 研究指出, 再生骨料强度对 RAC 抗压强度影响较为显著。再生骨料在制作时, 材料内部会出现微



裂缝,这使得 RAC 孔隙率增大,受压时在裂缝空隙处产生应力集中<sup>[33]</sup>,进而降低了 AAS-RAC 的立方体抗压强度。

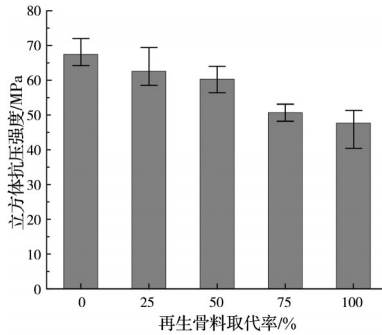


图 2 再生骨料取代率对 AAS-RAC 立方体抗压强度的影响  
Fig. 2 Influence of recycled aggregate content substitution rate on compressive strength of AAS-RAC

### 2.1.2 钢纤维体积取代率的影响

试验研究表明,钢纤维的掺入可有效增加 AAS-RAC 立方体抗压强度。为研究钢纤维体积取代率对 AAS-RAC 立方体抗压强度的影响,将不同钢纤维体积取代率试件立方体抗压强度列于图 3。可以看出,随钢纤维体积取代率的提高,AAS-RAC 立方体抗压强度先增加后降低,相比未掺纤维 AAS-RAC 立方体抗压强度,钢纤维体积取代率为 0.3%、0.6%、0.9% 时,立方体抗压强度的提高 37%、51%、41%。适量的钢纤维可以提高立方体抗压强度,过量则会降低。主要原因为适量的钢纤维可有效抑制 AAS-RAC 试件内部微裂缝发展,进而增加了混凝土强度。过多的钢纤维掺入易在混凝土内部成团,无法均匀分布,成团的钢纤维周围存在空隙,进而降低了碱矿渣再生骨料的立方体抗压强度<sup>[34]</sup>。

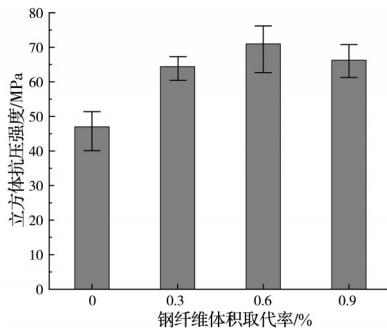


图 3 钢纤维体积取代率对 AAS-RAC 立方体抗压强度的影响  
Fig. 3 Influence of steel fiber volume substitution rate on compressive strength of AAS-RAC

## 2.2 AAS-RAC 劈裂抗拉强度

### 2.2.1 再生骨料取代率的影响

再生骨料取代率对 AAS-RAC 劈裂抗拉强度的影响如图 4 所示。可以看出,与没有掺入再生骨料

的 AAS-RAC 相比,再生骨料取代率为 25%、50%、75% 和 100% 时,AAS-RAC 劈裂抗拉强度分别降低了 0.5%、1.8%、1.9% 和 9.7%。对混凝土废块进行二次处理过程中,再生骨料内部会产生许多微裂缝,进而降低了 AAS-RAC 劈裂抗拉强度<sup>[35]</sup>。随着再生骨料取代率的增加,AAS-RAC 的劈裂抗拉强度减小,这是由于骨料强度降低,从而降低了 AAS-RAC 劈裂抗拉强度,但减小幅度不大。张丽娟<sup>[36]</sup>对不同配比的钢纤维再生混凝土进行研究,结果表明,再生骨料取代率对劈裂抗拉强度影响最小,钢纤维体积率对劈裂抗拉强度影响显著。

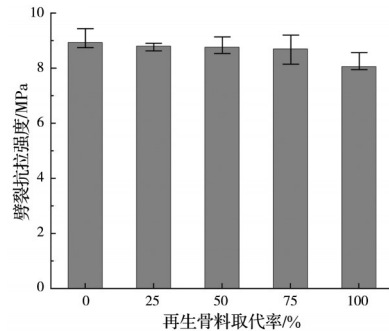


图 4 再生骨料取代率对 AAS-RAC 劈裂抗拉强度的影响  
Fig. 4 Influence of recycled aggregate content substitution rate on splitting tensile strength of AAS-RAC

### 2.2.2 钢纤维体积取代率的影响

钢纤维体积取代率对 AAS-RAC 劈裂抗拉强度的影响如图 5 所示。可以看出,与无钢纤维的 AAS-RAC 相比,钢纤维体积取代率为 0.3%、0.6%、0.9% 的 AAS-RAC 的劈裂抗拉强度分别提高了 10%、60%、43%。章文娇等<sup>[37]</sup>试验表明,将钢纤维掺入再生混凝土中,可显著增强其劈裂抗拉强度,当掺量为  $117 \text{ kg/m}^3$  时,抗拉强度增强率达 49.2%。Afrouhsabet 等<sup>[38]</sup>试验发现,将 1% 的钢纤维分别掺入再生混凝土和普通混凝土中,钢纤维的掺入对 RAC 劈裂强度的提升效果更为显著,这是由于钢纤维与再生骨料之间产生了更强的黏结力。但过量加入钢纤维会对 AAS-RAC 的强度产生负面影响,这与钢纤维对 AAS-RAC 抗压强度的影响类似。混凝土在外部荷载作用下产生纵向和横向变形,随着外部荷载增加,试件中部的横向变形达到混凝土的极限值产生纵向裂纹,当试件中部混凝土拉应变达到极限拉应变混凝土发生破坏<sup>[39]</sup>。而混凝土劈裂抗拉破坏同样为试件劈裂中截面混凝土受拉破坏<sup>[40]</sup>,因此,钢纤维对 AAS-RAC 的抗压强度和劈裂抗拉强度有类似的影响。

## 2.3 AAS-RAC 抗折强度

### 2.3.1 再生骨料取代率的影响

再生骨料取代率对 AAS-RAC 抗折强度的影响

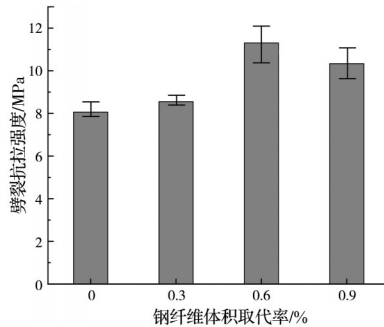


图 5 钢纤维体积取代率对 AAS-RAC 劈裂抗拉强度的影响  
Fig. 5 Influence of steel fiber volume substitution rate on splitting tensile strength of AAS-RAC

如图 6 所示。可以看出,再生骨料取代率的增加会使 AAS-RAC 抗折强度降低。再生骨料取代率为 25%、50%、75%、100% 时, AAS-RAC 抗折强度分别降低了 6.7%、9.7%、11.7%、15.3%。这是因为再生骨料的强度远低于天然骨料,这与再生骨料对 AAS-RAC 抗压强度的影响相似。秦红杰<sup>[41]</sup>研究指出,再生混凝土试件的破坏裂缝通常穿过再生骨料发展,再生骨料的初始损伤使再生骨料强度较天然骨料低,当构件出现裂缝时,裂缝会贯穿再生骨料,导致再生混凝土抗折强度降低。

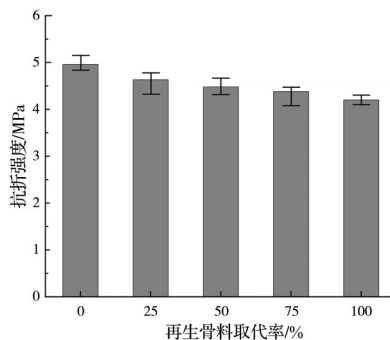


图 6 再生骨料取代率对 AAS-RAC 抗折强度的影响  
Fig. 6 Influence of recycled aggregate content substitution rate on flexural strength of AAS-RAC

### 2.3.2 钢纤维体积取代率的影响

钢纤维体积取代率对 AAS-RAC 抗折强度的影响如图 7 所示。可以观察到,随着钢纤维体积取代率的增加, AAS-RAC 抗折强度增加。当钢纤维体积取代率为 0.9% 时,抗折强度最大为 5.16 MPa,比无纤维 AAS-RAC 提高 22.9%。霍俊芳等<sup>[42]</sup>研究发现, RAC 的抗折强度随着钢纤维体积取代率的增加而增加,当钢纤维体积取代率分别为 0.5%、1.5%、2% 时,抗折强度分别增加 17.0%、26.4%、34.0%。钢纤维可以有效抑制碱矿渣再生骨料混凝土试件内部裂缝的产生,同时钢纤维可桥接于 AAS-RAC 材料内部微裂缝两侧,进而限制了微裂缝的发展和延伸,提高 AAS-RAC 抗折强度<sup>[43-44]</sup>。

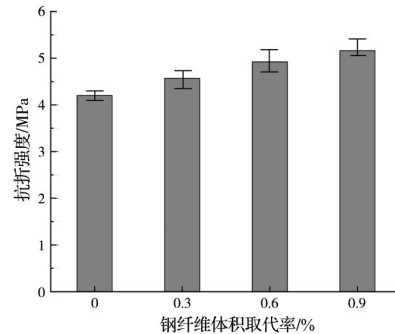


图 7 钢纤维体积取代率对 AAS-RAC 抗折强度的影响  
Fig. 7 Influence of steel fiber volume substitution rate on flexural strength of AAS-RAC

## 2.4 机理分析

### 2.4.1 再生骨料取代率的影响

再生骨料取代率对 AAS-RAC 基本力学性能的影响如图 8 所示,其中  $f$  为试件的强度,  $f_{N0}$  为再生骨料取代率为 0 时试件的强度。从图 8 可以看出, 3 条曲线的趋势较为一致,立方体抗压强度、劈裂抗拉强度和抗折强度均随着再生骨料取代率的增加而降低。这是由于 AAS-RAC 与普通混凝土的破坏形态存在一定差异,普通混凝土的破坏为界面过渡区微裂缝开展及延伸导致的最终破坏。而再生粗骨料力学性能弱于天然粗骨料,导致碱矿渣再生混凝土除界面过渡区微裂缝破坏,还存在大量贯穿粗骨料材料内部的破坏。同时可以看出,再生粗骨料取代率对 AAS-RAC 抗压强度影响最为显著,对劈裂抗拉强度影响最小,当再生粗骨料取代率为 100% 时,抗压强度和劈裂抗拉强度分别降低了 30.3% 和 9.7%。

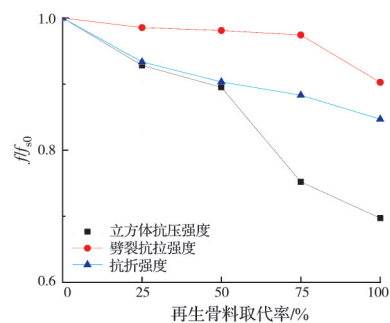


图 8 再生骨料取代率对 AAS-RAC 力学性能的影响  
Fig. 8 Influence of recycled aggregate content substitution rate on mechanical properties of AAS-RAC

### 2.4.2 钢纤维体积取代率的影响

钢纤维体积取代率对 AAS-RAC 基本力学性能的影响如图 9 所示,其中  $f$  为试件的强度,  $f_{S0}$  为未掺钢纤维试件的强度。从图 9 可以看出,钢纤维体积取代率对 AAS-RAC 的立方体抗压强度和劈裂抗拉强度的影响效果较为一致,均为先增加后降低。适量的钢纤维可桥接于裂缝两侧,有效抑制 AAS-

RAC 试件内部微裂缝发展延伸, 进而增加了混凝土强度<sup>[45]</sup>。当掺入过多的钢纤维时, 钢纤维在 AAS-RAC 内部出现成团的现象, 成团的钢纤维使得混凝土中孔洞的数量和大小增加, 进而降低了 AAS-RAC 的立方体抗压强度和劈裂抗拉强度。抗折强度随钢纤维体积取代率的增加而增加。主要原因是钢纤维的抗拉强度远高于混凝土, 而抗折破坏的实质为试件受拉区混凝土受拉破坏导致, 高强度、高弹模的钢纤维搭接于开裂混凝土两侧, 混凝土开裂后可继续承担拉应力, 进而增加了 AAS-LWAC 抗折强度。同时可以看出, 钢纤维体积取代率对立方体抗压强度影响最为显著, 对抗折强度的影响最小, 虽然纤维的掺入会使 AAS-RAC 的抗折强度不断增加, 但在钢纤维体积取代率为 0.9% 时, 抗折强度的增加幅度小于劈裂抗拉强度和立方体抗压强度。

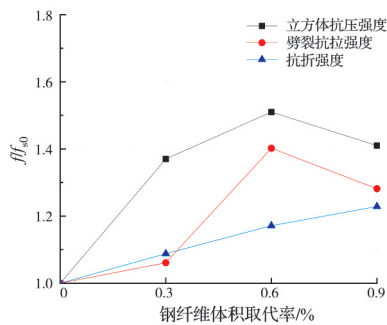


图 9 钢纤维体积取代率对 AAS-RAC 力学性能的影响

Fig. 9 Influence of steel fiber volume substitution rate on mechanical properties of AAS-RAC

### 3 结论

研究了碱矿渣再生粗骨料混凝土抗压性能、劈裂抗拉性能和抗折性能, 考虑了再生粗骨料取代率和钢纤维体积取代率对其力学性能影响, 主要结论如下:

1) AAS-RAC 抗压强度  $f_{cu}$ 、劈裂抗拉强度  $f_t$  和抗折强度  $f_w$  均随再生粗骨料取代率增加而降低。这是由于再生粗骨料内部存在原始界面过渡区, 表面存在大量微裂缝, 这使得再生粗骨料力学性能较弱, 进而降低了 AAS-RAC 力学性能。

2) 适量钢纤维会提高 AAS-RAC 抗压强度  $f_{cu}$  和劈裂抗拉强度  $f_t$ , 但过量钢纤维反而会降低 AAS-RAC 的  $f_{cu}$  和  $f_t$ 。这是由于适量钢纤维可桥接于荷载作用下产生的微裂缝两侧, 进而抑制了微裂缝发展及延伸, 提高了 AAS-RAC 强度。过量钢纤维易在混凝土材料内部产生团簇效应, 进而降低了 AAS-RAC 强度。

3) 与钢纤维对 AAS-RAC 抗压强度  $f_{cu}$  和劈裂抗

拉强度  $f_t$  影响不同, 钢纤维体积取代率小于 0.9% 时, AAS-RAC 抗折强度  $f_w$  随钢纤维体积取代率的增加而提高。这是由于 AAS-RAC 抗折破坏为试件受拉区混凝土受拉失效破坏, 发展较为迅速, 而受拉区钢纤维桥接于裂缝两侧, 抑制受拉区裂缝开展, 同时可替代受拉区开裂混凝土承受部分拉应力, 进而提高了 AAS-RAC 的抗折强度  $f_w$ 。

4) 再生粗骨料取代率对 AAS-RAC 的抗压强度  $f_{cu}$  的影响最为显著, 而对劈裂抗拉强度  $f_t$  的影响最弱。钢纤维体积取代率对 AAS-RAC 抗压强度  $f_{cu}$  的影响最为显著, 其次为劈裂抗拉强度  $f_t$ , 而对抗折强度  $f_w$  影响最弱。

### 参考文献

- [1] FLOWER D J M, SANJAYAN J G. Green house gas emissions due to concrete manufacture [J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2007, 12(5): 282-288.
- [2] VISHWAKARMA V, RAMACHANDRAN D. Green Concrete mix using solid waste and nanoparticles as alternatives-A review [J]. Construction and Building Materials, 2018, 162: 96-103.
- [3] MALHOTRA V M. Introduction: Sustainable development and concrete technology [J]. Concrete International, 2002, 24(7): 22.
- [4] PROVVIS J L, VAN DEVENTER J S J. Alkali activated materials [M]. Dordrecht: Springer Netherlands, 2014.
- [5] DAS S, SAHA P, JENA S P, et al. Geopolymer concrete: Sustainable green concrete for reduced greenhouse gas emission-A review [J]. Materials Today: Proceedings, 2022, 60: 62-71.
- [6] AMER I, SAHA P, JENA S P, et al. A review on alkali-activated slag concrete [J]. Ain Shams Engineering Journal, 2021, 12(2): 1475-1499.
- [7] PROVVIS J L. Alkali-activated materials [J]. Cement and Concrete Research, 2018, 114: 40-48.
- [8] SANDANAYAKE M, GUNASEKARA C, LAW D, et al. Greenhouse gas emissions of different fly ash based geopolymer concretes in building construction [J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 204: 399-408.
- [9] SILVA R V, DE BRITO J, DHIR R K. Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production [J]. Construction and Building Materials, 2014, 65(1): 201-217.
- [10] EGUCHI K, TERANISHI K, NAKAGOMEA, et al. Application of recycled coarse aggregate by mixture to concrete construction [J]. Construction and Building Materials, 2007, 21(7): 1542-1551.

- [11] HOSAN A, HAQUE S, SHAIKH F. Compressive behaviour of sodium and potassium activators synthesized fly ash geopolymer at elevated temperatures: A comparative study [J]. *Journal of Building Engineering*, 2016, 8: 123-130.
- [12] MONTICELLI C, NATALI M E, BALBO A, et al. Corrosion behavior of steel in alkali-activated fly ash mortars in the light of their microstructural, mechanical and chemical characterization [J]. *Cement and Concrete Research*, 2016, 80: 60-68.
- [13] BABAEE M. Chloride-induced corrosion of reinforcement in low-calcium fly ash-based geopolymer concrete [J]. *Cement and Concrete Research*, 2016, 88: 96-107.
- [14] FERNANDEZ-JIMENEZ A, GARCÍA-LODEIRO I, PALOMO A. Durability of alkali-activated fly ash cementitious materials [J]. *Journal of Materials Science*, 2007, 42(9): 3055-3065.
- [15] LASKAR S M, TALUKDAR S. Development of ultra-fine slag-based geopolymer mortar for use as repairing mortar [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2017, 29(5): 04016292.
- [16] ATIŞ C D, GÖRÜR E B, KARAHAN O, et al. Very high strength (120 MPa) class F fly ash geopolymer mortar activated at different NaOH amount, heat curing temperature and heat curing duration [J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 96: 673-678.
- [17] PAN Z, SANJAYAN J G. Stress-strain behaviour and abrupt loss of stiffness of geopolymer at elevated temperatures [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2010, 32(9): 657-664.
- [18] PALOMO A, BLANCO-VARELA M T, GRANIZO M L, et al. Chemical stability of cementitious materials based on metakaolin [J]. *Cement and Concrete Research*, 1999, 29(7): 997-1004.
- [19] COLLINS F, SANJAYAN J G. Effect of pore size distribution on drying shrinking of alkali-activated slag concrete [J]. *Cement and Concrete Research*, 2000, 30(9): 1401-1406.
- [20] DURAN ATIŞ C, BILIM C, ÇELİK Ö, et al. Influence of activator on the strength and drying shrinkage of alkali-activated slag mortar [J]. *Construction and Building Materials*, 2009, 23(1): 548-555.
- [21] THOMAS J J, ALLEN A J, JENNINGS H M. Density and water content of nanoscale solid C-S-H formed in alkali-activated slag (AAS) paste and implications for chemical shrinkage [J]. *Cement and Concrete Research*, 2012, 42(2): 377-383.
- [22] COLLINS F, SANJAYAN J G. Microcracking and strength development of alkali activated slag concrete [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2001, 23(4/5): 345-352.
- [23] RANJBAR N, ZHANG M. Fiber-reinforced geopolymer composites: A review [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2020, 107: 103498.
- [24] ALOMAYRI T, SHAIKH F U A, LOW I M. Synthesis and mechanical properties of cotton fabric reinforced geopolymer composites [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2014, 60: 36-42.
- [25] ZHOU X Y, ZENG Y S, CHEN P, et al. Mechanical properties of basalt and polypropylene fibre-reinforced alkali-activated slag concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 269: 121284.
- [26] ZHANG Z H, YAO X, ZHU H J, et al. Preparation and mechanical properties of polypropylene fiber reinforced calcined Kaolin-fly ash based geopolymer [J]. *Journal of Central South University of Technology*, 2009, 16(1): 49-52.
- [27] BERNAL S, DE GUTIERREZ R, DELVASTO S, et al. Performance of an alkali-activated slag concrete reinforced with steel fibers [J]. *Construction and Building Materials*, 2010, 24(2): 208-214.
- [28] SOARES D, DE BRITO J, FERREIRA J, et al. Use of coarse recycled aggregates from precast concrete rejects: Mechanical and durability performance [J]. *Construction and Building Materials*, 2014, 71: 263-272.
- [29] 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 J Z, WU L, FAN Y H. Test on modification of recycled coarse aggregate by microwave heating [J]. *Concrete*, 2012(7): 55-57. (in Chinese)
- [30] KATKHUDA H, SHATARAT N. Improving the mechanical properties of recycled concrete aggregate using chopped basalt fibers and acid treatment [J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 140: 328-335.
- [31] 混凝土物理力学性能试验方法标准: GB/T 50081—2019 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
- Standard for test methods of concrete physical and mechanical properties: GB/T 50081—2019 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019. (in Chinese)
- [32] NAZARIMOFRAD E, SHAIKH F U A, NILI M. Effects of steel fibre and silica fume on impact behaviour of recycled aggregate concrete [J]. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, 2017, 6(1): 54-68.
- [33] 郭樟根, 陈晨, 范秉杰, 等. 再生粗细骨料混凝土基本力学性能试验研究 [J]. *建筑结构学报*, 2016, 37(Sup2): 94-102.
- GUO Z G, CHEN C, FAN B J, et al. Experimental research on mechanical behavior of concrete made of coarse and fine recycled aggregates [J]. *Journal of Building Structures*, 2016, 37(Sup2): 94-102. (in Chinese)
- [34] ANIKE E E, SAIDANI M, OLUBANWO A O, et al. Effect of mix design methods on the mechanical proper-



- ties of steel fibre-reinforced concrete prepared with recycled aggregates from precast waste [J]. Structures, 2020, 27: 664-672.
- [35] 陈会凡, 管巧艳, 刘洪波. 矿渣再生骨料混凝土力学性能研究[J]. 混凝土, 2012(5): 91-93.  
CHEN H F, GUAN Q Y, LIU H B. Study on the mechanical behavior of concrete containing slag and recycled concrete aggregate [J]. Concrete, 2012(5): 91-93. (in Chinese)
- [36] 张丽娟. 钢纤维再生混凝土配合比设计及其性能计算方法[D]. 郑州: 郑州大学, 2017.  
ZHANG L J. Mixture design and performance calculation method of steel fiber reinforced recycled concrete [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2017. (in Chinese)
- [37] 章文姣, 鲍成成, 孔祥清, 等. 混杂纤维掺量对再生混凝土力学性能的影响研究[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(13): 106-112, 123.  
ZHANG W J, BAO C C, KONG X Q, et al. Experimental study on mechanical properties of hybrid fiber basic of recycled concrete [J]. Science Technology and Engineering, 2016, 16(13): 106-112, 123. (in Chinese)
- [38] AFROUGHSABET V, BIOLZI L, OZBAKK-ALOGLU T. Influence of double hooked-end steel fibers and slag on mechanical and durability properties of high performance recycled aggregate concrete [J]. Composite Structures, 2017, 181: 273-284.
- [39] 张义顺, 金祖权, 李小雷. 混凝土在受压下的破坏机理研究[J]. 焦作工学院学报(自然科学版), 2002, 21(2): 123-126.  
ZHANG Y S, JIN Z Q, LI X L. Study on the destruction mechanism of concrete under the pressure [J]. Journal of Jiaozuo Institute of Technology, 2002, 21(2): 123-126. (in Chinese)
- [40] 程文灏, 王铁成, 颜德姮, 等. 混凝土结构[M]. 3版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005: 10.  
CHENG W R, WANG T C, YAN D H. Concrete structure [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2005: 10. (in Chinese)
- [41] 秦红杰. 再生混凝土抗折强度尺寸效应的试验研究及细观数值模拟[D]. 长沙: 湖南大学, 2020.  
QIN H J. Experimental study and mesoscopic numerical simulation on the size effect of flexural strength of recycled aggregate concrete [D]. Changsha: Hunan University, 2020. (in Chinese)
- [42] 霍俊芳, 白笑笑, 姜鹏飞, 等. 钢纤维和聚丙烯纤维再生混凝土力学性能研究[J]. 混凝土, 2019(8): 92-95, 99.  
HUO J F, BAI X X, JIANG P F, et al. Research on mechanical properties of steel fiber and polypropylene fiber recycled concrete [J]. Concrete, 2019(8): 92-95, 99. (in Chinese)
- [43] 张学兵, 匡成钢, 方志, 等. 钢纤维粉煤灰再生混凝土强度正交试验研究[J]. 建筑材料学报, 2014, 17(4): 677-684, 694.  
ZHANG X B, KUANG C G, FANG Z, et al. Orthogonal experimental study on strength of steel fiber reinforced fly ash recycled concrete [J]. Journal of Building Materials, 2014, 17(4): 677-684, 694. (in Chinese)
- [44] 杨粉, 陈爱玖, 王静, 等. 钢纤维再生混凝土劈拉、抗折强度试验研究[J]. 混凝土, 2012(12): 11-14.  
YANG F, CHEN A J, WANG J, et al. Experiments of splitting tensile and flexural strength mechanical properties of steel fiber recycled concrete [J]. Concrete, 2012(12): 11-14. (in Chinese)
- [45] SHAH S F A, CHEN B, ODERJI S Y, et al. Comparative study on the effect of fiber type and content on the performance of one-part alkali-activated mortar [J]. Construction and Building Materials, 2020, 243: 118221.

(编辑 胡玲)