

文章编号:1007-9629(2023)03-0228-08

纳米 CaCO_3 对粉煤灰再生骨料 混凝土性能及微结构的影响

程子扬¹, 陈国夫¹, 屠艳平^{1,2,*}

(1. 武汉工程大学 土木工程与建筑学院, 湖北 武汉 430073;

2. 武汉工程大学 湖北省绿色土木工程材料与结构工程研究中心, 湖北 武汉 430073)

摘要:研究了纳米 CaCO_3 (NC) 和粉煤灰 (FA) 单掺及复掺对再生骨料混凝土 (RAC) 坍落度、力学性能、抗氯离子渗透性能、水化反应和微观结构的影响。结果表明: NC 能够提高 RAC 的力学性能、抗氯离子渗透性能及水化反应速率, 但会降低其坍落度; FA 能够提高 RAC 的抗氯离子渗透性能和后期力学性能, 但会降低其水化反应速率和早期力学性能; 两者复掺后, 单掺 NC、FA 时的负面影响得到改善, RAC 具有较优的坍落度、力学性能、抗氯离子渗透性能和水化反应速率; 复掺 NC 和 FA 可以降低 RAC 中氢氧化钙 (CH) 晶体的含量, 填充 RAC 浆体结构的孔隙, 修复新旧砂浆之间的界面过渡区 (ITZ), 提高 RAC 的密实度。

关键词: 纳米 CaCO_3 ; 粉煤灰; 再生粗骨料混凝土; 抗压强度; 微观结构

中图分类号: TU528.01

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1007-9629.2023.03.002

Effect of Nano CaCO_3 on Properties and Microstructure of Fly Ash Recycled Aggregate Concrete

CHENG Ziyang¹, CHEN Guofu¹, TU Yanping^{1,2,*}

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430073, China;

2. Hubei Provincial Engineering Research Center for Green Civil Engineering Materials and Structures, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430073, China)

Abstract: The effects of single bending and compound bending of nano CaCO_3 (NC) and fly ash (FA) on the slump, mechanical properties, chloride penetration resistance, hydration reaction and microstructure of recycled aggregate concrete (RAC) were studied. The results show that NC can improve the mechanical properties, chloride penetration resistance and hydration reaction rate of RAC, but reduce its slump. FA can improve the resistance to chloride penetration and the late mechanical properties of RAC, but reduce its hydration reaction rate and early mechanical properties. The negative effects of single addition of NC and FA are improved after the two compounds are mixed. RAC has better slump, mechanical properties, chloride penetration resistance and hydration reaction. The compound bending of NC and FA can reduce the content of calcium hydroxide (CH) crystals in RAC, fill the pores of RAC slurry structure, repair the interface transition zone (ITZ) between new and old mortar, and improve the compactness of RAC.

Key words: nano CaCO_3 ; fly ash; recycled coarse aggregate concrete; compressive strength; microstructure

再生粗骨料 (RCA) 表面附着大量老旧砂浆, 吸水率和压碎值较高, 导致由 RCA 制备的再生骨料混凝土

收稿日期: 2022-03-07; 修订日期: 2022-11-03

基金项目: 湖北省重点研发计划项目 (2020BAB071); 武汉工程大学研究生创新基金资助项目 (CX2021119)

第一作者: 程子扬 (1996—), 男, 河南南阳人, 武汉工程大学硕士生. E-mail: 8402044428@qq.com

通讯作者: 屠艳平 (1977—), 女, 湖北武汉人, 武汉工程大学副教授, 硕士生导师, 博士. E-mail: 121552188@qq.com

土(RAC)无法媲美天然骨料混凝土(NAC)^[1-3].鉴于此,需要添加一种辅助胶凝材料来提升RAC的性能.纳米CaCO₃(NC)具有填充效应和晶核效应,是极具性价比的辅助胶凝材料^[4].NC可以填充RCA表面附着老旧砂浆的孔隙,促进水泥水化反应,改善界面过渡区(ITZ)的密实度^[5].然而,掺入NC后,水泥前期水化反应加快,导致水化产物包裹未水化的水泥颗粒,阻碍水泥后期的水化反应,影响混凝土后期强度的发展^[6].同时,由于NC表面能较大,对游离水分子的吸附能力极强,使拌和物中的自由水减少,导致混凝土的坍落度明显降低^[7-9].粉煤灰(FA)在混凝土中充当矿物掺和料,当其掺量为30%时,RAC的7d抗压强度降低,但长期抗压强度会持续发展,且在较长龄期内维持较高的强度增长速率,甚至超过基准值^[10-11].Kou等^[12]指出,FA能够改善RAC的抗氯离子渗透能力.同时,FA可以有效改善RAC的工作性能^[13-15].

综上,单掺NC、FA对RAC的性能改善都存在一定的不足,但二者对RAC性能改善的优点可以弥补彼此带来的缺陷.因此,本文采用NC、FA作为辅助胶凝材料,分析了NC、FA单掺及复掺对RAC坍落度、抗压强度及劈裂抗拉强度的影响,同时通过水化热测试、热重-差热分析(TG-DSC)和扫描电镜(SEM),研究了NC、FA单掺及复掺对于RAC水化反应、水化产物和微观结构的影响.

1 试验

1.1 原材料

水泥(C)为湖北省华新水泥有限公司生产的P·O 42.5级普通硅酸盐水泥,密度为3 150 kg/m³;粉煤灰(FA)为武汉阳逻电厂生产的I级粉煤灰,密度为2 380 kg/m³,粒径为(20±5) μm.水泥及粉煤灰的化学组成(质量分数,文中涉及的组成、掺量等均为质量分数)见表1. NC为上海缘江化工有限公司生产,粒径为(30±5) nm,纯度为98%,比表面积为500 m²/g,pH值为8.5;细骨料(NFA)为湖北省黄石市生产的天然河砂(中砂),表观密度为2 636 kg/m³,细度模数为2.72;水(W)为武汉市自来水;减水剂(S)为减水率17%的聚羧酸高效减水剂;天然粗骨料(NCA)为5~25 mm连续级配的碎石;RCA为武汉慧迪公司生产的5~20 mm连续级配再生粗骨料.粗骨料的物理性能指标见表2.

表1 水泥与粉煤灰的化学组成										
Table 1 Chemical compositions of cement and fly ash										
w/%										
Material	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	Al ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	CaO	SO ₃	IL	
Cement	21.76	3.41	0.07	5.86	1.22	1.72	62.69	1.09	2.18	
FA	46.44	3.12	0.33	38.01	0.88	0.23	7.50	0.69	2.81	

表2 粗骨料的物理性能指标
Table 2 Physical properties of coarse aggregates

Aggregate	Crushing value (by mass)/%	Apparent density/(kg·m ⁻³)	Packing density/(kg·m ⁻³)	Moisture content (by mass)/%	Bibulous rate (by mass)/%
NCA	10	2 690	1 321	0.40	0.7
RCA	17	2 553	1 220	2.01	5.7

1.2 配合比设计

混凝土强度等级为C30;RCA等质量全部替代NCA;NC和FA等质量替代水泥,NC、FA的掺量分

别记为 w_{NC} 、 w_{FA} .混凝土试件的配合比见表3.试件RAC-1.5-0为 $w_{NC}=1.5\%$ 、 $w_{FA}=0\%$ 的再生骨料混凝土,其他类推.

表3 混凝土试件的配合比
Table 3 Mix proportions of concrete specimens

Specimen	$w_{NC}/\%$	$w_{FA}/\%$	Mix proportion/(kg·m ⁻³)								
			C	NC	NFA	RCA	NCA	W	FA	S	Additional water
NAC-0-0	0	0	367.4	0	686.5	0	1 167.2	180.0	0	3.4	0
RAC-0-0	0	0	367.4	0	686.5	1 167.2	0	180.0	0	3.4	58.4
RAC-1.5-0	1.5	0	361.8	5.6	686.5	1 167.2	0	180.0	0	3.4	58.4
RAC-0-15	0	15.0	312.2	0	686.5	1 167.2	0	180.0	55.2	3.4	58.4
RAC-1.5-15	1.5	15.0	306.6	5.6	686.5	1 167.2	0	180.0	55.2	3.4	58.4

1.3 试验方法

NAC的制备过程:先称取所需原材料,将减水剂倒入水中搅拌120 s;接着将NFA、C、NCA按由细

到粗的顺序倒入搅拌机中,干拌80 s;然后倒入减水剂与水的混合液中,连续搅拌200 s;最后倒出拌和物. RAC的制备过程:先称取所需原材料,将减水剂倒

入水(包含附加水)中搅拌120 s;接着将NC倒入其中均匀搅拌180 s;然后将NFA、C、FA、RCA按由细到粗的顺序倒入搅拌机中,干拌80 s;最后倒入NC、减水剂与水的混合液中,连续搅拌200 s,倒出拌和物。

根据GB/T 50080—2016《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》,进行坍落度试验。浇筑边长为100 mm的立方体试件和 $\phi 100 \times 50$ mm的圆柱体试件,在20℃、相对湿度 $RH \geq 90\%$ 的养护室养护至相应龄期 t 后,根据GB/T 50081—2002《普通混凝土力学性能试验方法标准》、GB/T 50082—2009《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》,测试试件3、7、28、90 d的抗压强度、28 d的劈裂抗拉强度和28 d的电通量 Φ_e ,并取28 d力学性能测试后的试件,放入装有无水乙醇的容器中,后续对其进行TG-DSC和SEM测试。水化热测试试件按试验配合比进行设计:用净浆搅拌机制备净浆,设置测试温度为25℃,在安瓿瓶中装入10 g净浆,密封放入微量热仪中,设定测试时长为72 h。

2 结果与分析

2.1 坍落度

混凝土的坍落度见图1。由图1可见:试件RAC-0-0的坍落度大于试件NAC-0-0,这是因为RCA在拌制过程中无法将添加的附加水完全吸收,导致拌和物中游离状态的水较NAC有所增多,从而提高了RAC的坍落度;试件RAC-0-15的坍落度比试件RAC-1.5-0高出27%,这是由于NC粒径小,且具有较高的表面能,对游离状态的水分子的吸附能力极强^[16],降低了拌和物的流动性,导致试件RAC-1.5-0的坍落

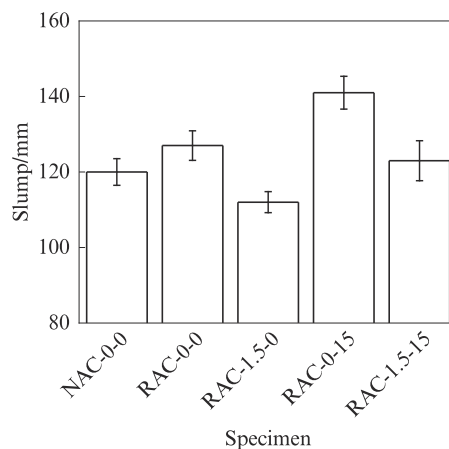


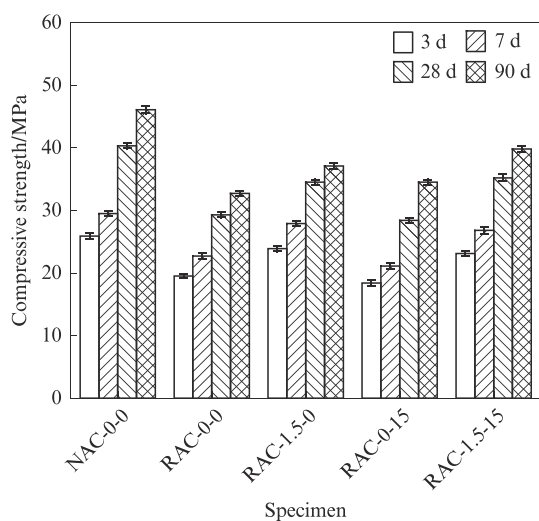
图1 混凝土的坍落度

Fig. 1 Slump of concretes

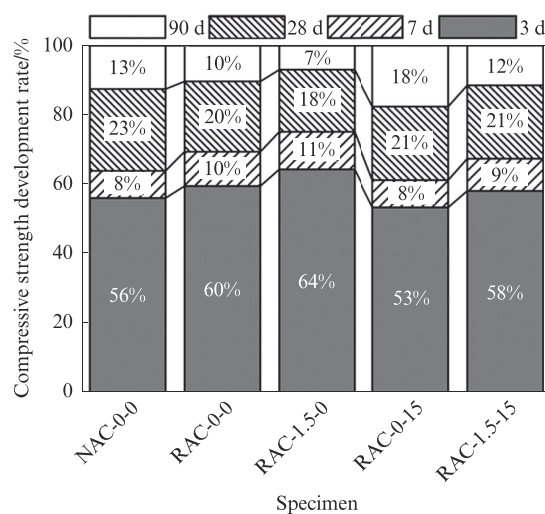
度降低,而FA中含有大量的珠状物,表面光滑,能够降低骨料颗粒之间的摩擦阻力,在拌和物中起到滚珠作用,同时其水化速率慢于水泥,减少了前期结合水的消耗,从而提升RAC的坍落度。

2.2 抗压强度

将每个测试龄期混凝土的抗压强度增长值与其90 d抗压强度总增长值的比值定义为抗压强度发展速率。混凝土的抗压强度及其发展速率见图2。由图2可见:试件RAC-0-0的抗压强度低于试件NAC-0-0,这是由于RCA表面覆盖着大量的老砂浆,使得老砂浆-新砂浆界面黏结力变差,同时老砂浆与RCA之间存在薄弱界面,导致试件RAC-0-0的抗压强度降低^[17];单掺NC后,相较于试件NAC-0-0,养护前期RAC的抗压强度发展速率较快,而7 d之后其抗压强度发展速率减慢;单掺FA后,相较于试件NAC-0-0,养护前期RAC的抗压强度发展缓慢,7 d之后其抗压强度发



(a) Compressive strength



(b) Compressive strength development rate

图2 混凝土抗压强度及其发展速率

Fig. 2 Compressive strength and its development rate of concretes

展速率比养护前期显著提升;NC、FA复掺后,试件RAC-1.5-15抗压强度发展速率相较单掺时,均得到不同程度的改善,其7 d之前的抗压强度发展速率高于试件NAC-0-0,而养护中后期的强度发展速率与试件NAC-0-0差距较小,这表明复掺NC和FA有效改善了两者的单掺对RAC强度发展不均衡的缺点。

单掺FA时,与试件RAC-0-0相比,试件RAC-0-15的3、7、28 d抗压强度略有降低,90 d抗压强度提高了1.8 MPa,可见单掺FA限制了RAC早期抗压强度的发展。单掺NC时,与试件RAC-0-0相比,试件RAC-1.5-0的各龄期抗压强度均有明显的提升,其3、7、28、90 d抗压强度分别提高了22.6%、22.9%、17.7%、13.4%,可见NC对RAC早期抗压强度的提升效果较为显著。NC和FA复掺后,RAC各龄期的抗压强度均得到提升,试件RAC-1.5-15的28、90 d抗压强度分别比试件RAC-0-0分别提高了5.9、7.1 MPa。这是由于NC填充了RCA和表面旧砂浆之间的孔隙,增强了新-旧砂浆和旧砂浆-RCA之间的界面黏接;同时NC能够促进水泥水化反应,水化硅酸钙(C-S-H)等水化产物增多,促进了RAC抗压强度的提升。FA早期活性低,水化较慢,而后期随着水泥水化产物氢氧化钙(CH)的大量生成,促进了FA的水化反应,从而不断密实水泥基体,使得RAC后期抗压强度迅速发展,这也得到了Ghazy等^[18]的证实。综上,在粉煤灰RAC中掺入NC,不仅弥补了粉煤灰RAC早期抗压强度不足的缺陷,还改善了NC对RAC后期抗压强度发展减缓的影响。

2.3 劈裂抗拉强度和拉压比

龄期为28 d时,混凝土的劈裂抗拉强度和拉压比(抗拉强度与抗压强度之比)见图3。由图3可见:试件RAC-0-0的劈裂抗拉强度比试件NAC-0-0降低了

27.6%,拉压比也略有降低,这是因为RAC内部存在老砂浆-新砂浆、老砂浆-再生骨料的ITZ,限制了其劈裂抗拉强度和延性的发展;单掺FA、NC后,与试件NAC-0-0相比,试件RAC-0-15、RAC-1.5-0的劈裂抗拉强度分别降低了29.5%、8.5%;NC和FA复掺后,试件RAC-1.5-15的劈裂抗拉强度相较试件NAC-0-0降低了10.7%,表明复掺能够有效弥补FA前中期对强度的负影响,缩小RAC与NAC劈裂抗拉强度的差距,提高了RAC的延性;与试件RAC-0-0相比,试件RAC-1.5-0的劈裂抗拉强度和拉压比分别提高了26.4%、7.0%,试件RAC-0-15的劈裂抗拉强度和拉压比与其基本持平,但试件RAC-1.5-15的劈裂抗拉强度提高了23.3%,拉压比明显提升,这说明NC能够提高RAC的劈裂抗拉强度,并改善其延性,且FA对RAC的劈裂抗拉强度和拉压比增益作用不明显,通过添加NC可以弥补这一缺陷。这是因为FA在早期活性低,对RAC力学性能的提升作用不明显,而NC能够强化RAC内部的ITZ,增强老砂浆与RCA、新砂浆之间的黏结能力。

2.4 电通量

龄期为28 d时,混凝土的6 h电通量见图4。由图4可见:试件RAC-0-0的电通量比试件NAC-0-0提高了41.6%,抗氯离子渗透性能明显降低,这是因为试件RAC-0-0内部存在较多薄弱的ITZ和孔隙,从而导致其抗氯离子渗透性能降低^[19-20];与试件NAC-0-0相比,单掺FA、NC后,试件RAC-0-15、RAC-1.5-0的电通量分别增加了26.8%、10.3%;NC、FA复掺后,试件RAC-1.5-15的电通量相较试件NAC-0-0增加了13.8%,表明NC和FA可以有效地填充和细化RAC内部的孔隙,缩短RAC与NAC抗氯离子渗透性能的差距;与试件RAC-0-0相比,试件RAC-0-15的电通量降

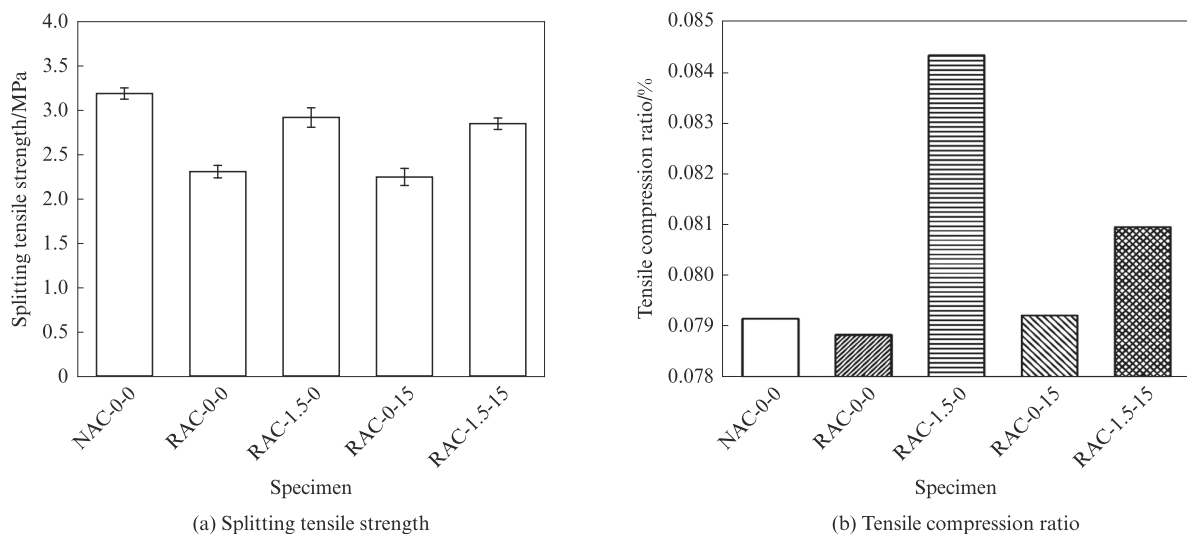


图3 混凝土劈裂抗拉强度和拉压比

Fig. 3 Splitting tensile strength and tensile compression ratio of each group of concrete (28 d)

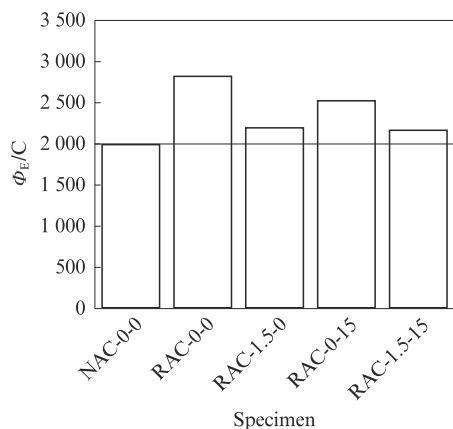


图4 混凝土的6 h电通量

Fig. 4 Charge passed of concretes for 6 h (28 d)

低了10.5%,而试件RAC-1.5-15降低了23.2%,且略低于试件RAC-1.5-0,这是因为NC和FA具有填充效应,能够填充RAC内部孔隙,且NC粒径更小,其填充效应更优,且NC的晶核作用可以吸附水化产物对微孔隙进行修补,最终使得RAC内部结构更为密实,对氯离子渗透的抑制效果更优,具有较好的抗氯离子渗透性能.综上,混凝土的电通量测试结果印证了其力学性能的变化规律,电通量越低,表明RAC中孔隙含量越少,内部结构的密实程度越高,RAC的力学性能越好.

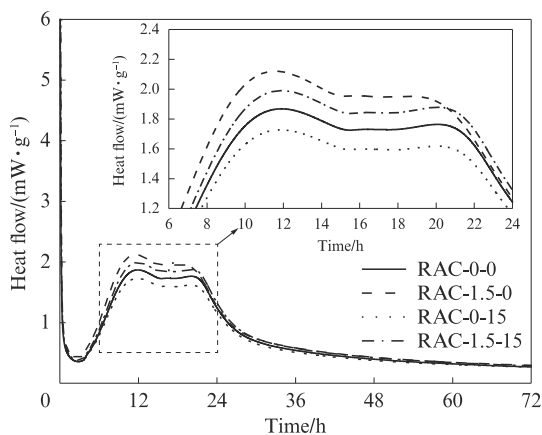
2.5 水化热

水泥净浆的水化放热特性见图5.由图5可见:与试件RAC-0-0相比,试件RAC-1.5-0、RAC-0-15、RAC-1.5-15放热峰峰值分别提前了0.245、0.075、0.051 h;单掺FA时,RAC的放热速率峰值由1.86 mW/g降至1.72 mW/g,72 h总放热量也由215 J/g降至192 J/g,降低了10.7%;单掺NC时,试件RC-1.5-0前20 h水化放热速率在所有测试组中最高,而后逐渐变缓;试件RAC-1.5-0的72 h总放热量为224 J/g,高于其他测试组;当NC、FA复掺时,试件

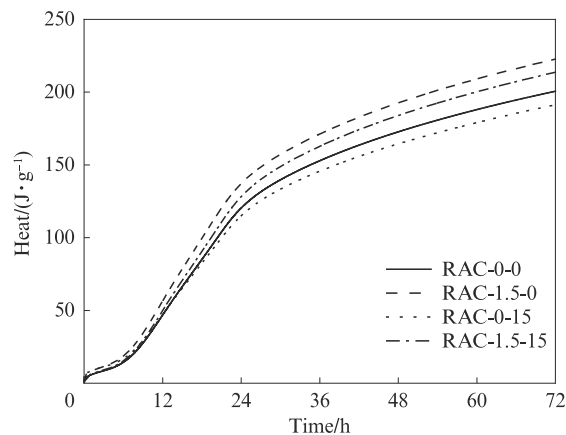
RAC-15-1.5的放热速率峰值和72 h总放热量较试件RAC-1.5-0分别降至1.98 mW/g、215 J/g.综上,FA对水泥的水化反应起到了抑制作用,而NC提高了水泥水化早期的放热速率及放热量,能有效提高水泥的水化程度.这是由于NC可以促进硅酸三钙(C_3S)的水化,当水化开始后,水化产物在浆体中分散,且 C_3S 水化产生的 Ca^{2+} 和 OH^- 被吸附到NC表面,以NC为晶核,加速C-S-H的生成,使 C_3S 颗粒周围的 Ca^{2+} 和 OH^- 浓度减小,从而加速 C_3S 的水化^[21].但随着水化反应的进行,大量的NC颗粒包裹在水泥颗粒周围,吸附了大量的水化产物,在一定程度上阻碍了水泥颗粒的水化,减缓了水化反应速率,Wu等^[6]的研究中也得到类似的结论.FA早期水化活性较弱,其填充效应会导致水泥颗粒间的空隙变大,对整个反应体系起到稀释作用,从而降低水化放热速率和放热量^[22-23],也在一定程度上缓解了NC颗粒包裹在水泥颗粒周围导致的水化反应被抑制的现象.由测试结果可见,NC可以显著提高水泥早期水化的反应速率和水化热,而FA由于早期活性弱,对于水泥早期水化存在着抑制作用,这也解释了不同龄期RAC抗压强度的发展规律,表明随着龄期的增加,NC对于RAC的性能提升作用逐渐减弱,FA的增强作用则逐渐增强.

2.6 TG-DSC分析

龄期为28 d时,对混凝土进行TG-DSC分析,结果见图6.由图6可见:400~450 °C是CH分解的阶段;660~770 °C是 $CaCO_3$ 受热分解的阶段.通过TG计算质量损失率和CH含量 w_{CH} ,结果见表4.由表4可见:单掺FA、NC后,CH的含量均有不同程度的降低;当NC、FA复掺时,CH含量降至最低,这可能是由于FA的火山灰活性,使其可以与CH发生二次水化反应,消耗水泥水化产生的CH;NC的晶核效应能在一定程度上促进粉煤灰RAC的水化反应,从而进一步降低CH的含量.



(a) Hydration heat release rate curve



(b) Hydration heat release

图5 水泥净浆的水化放热特性

Fig. 5 Hydration heat properties of cement pastes

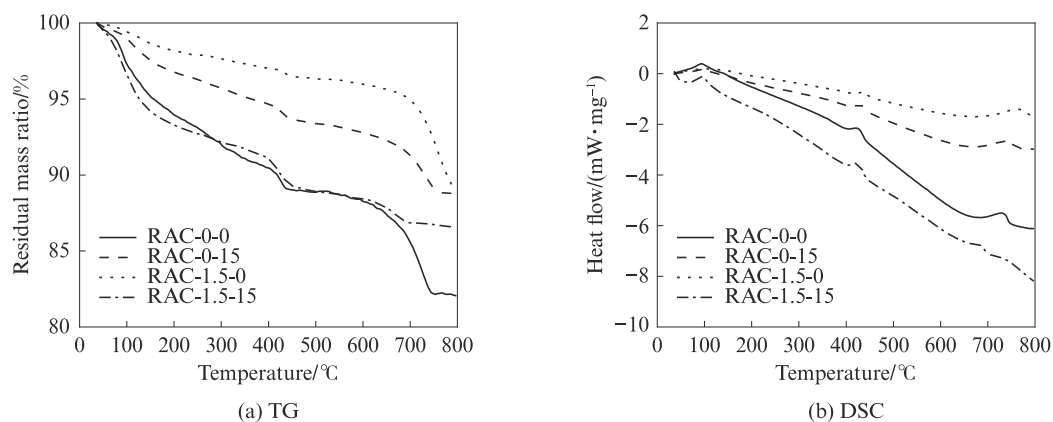


图6 混凝土的TG-DSC图谱

Fig. 6 TG-DSC spectra of concretes (28 d)

表4 混凝土的质量损失率和CH的含量

Table 4 Mass loss ratio and CH content of concretes

Specimen	Mass loss ratio/%		$w_{CH}/\%$
	400–450 °C	660–770 °C	
RAC-0-0	1.45	4.89	14.22
RAC-0-15	1.04	3.29	9.82
RAC-1.5-0	0.96	5.06	12.82
RAC-1.5-15	1.83	0.96	9.12

2.7 微观结构分析

龄期为28 d时,混凝土的SEM图见图7.由图7可见:试件RAC-0-0中新旧砂浆界面存在着明显的裂缝,有较多的孔隙,且砂浆表面存在未水化的水泥颗粒,各种水化产物分布杂乱,整体结构较为疏松,是影响其力学性能的主要原因之一^[24];单掺FA时,未水化的FA嵌在水泥砂浆中,而FA粒径较大,对孔隙的填充作用有限,导致试件RAC-0-15存在明显的

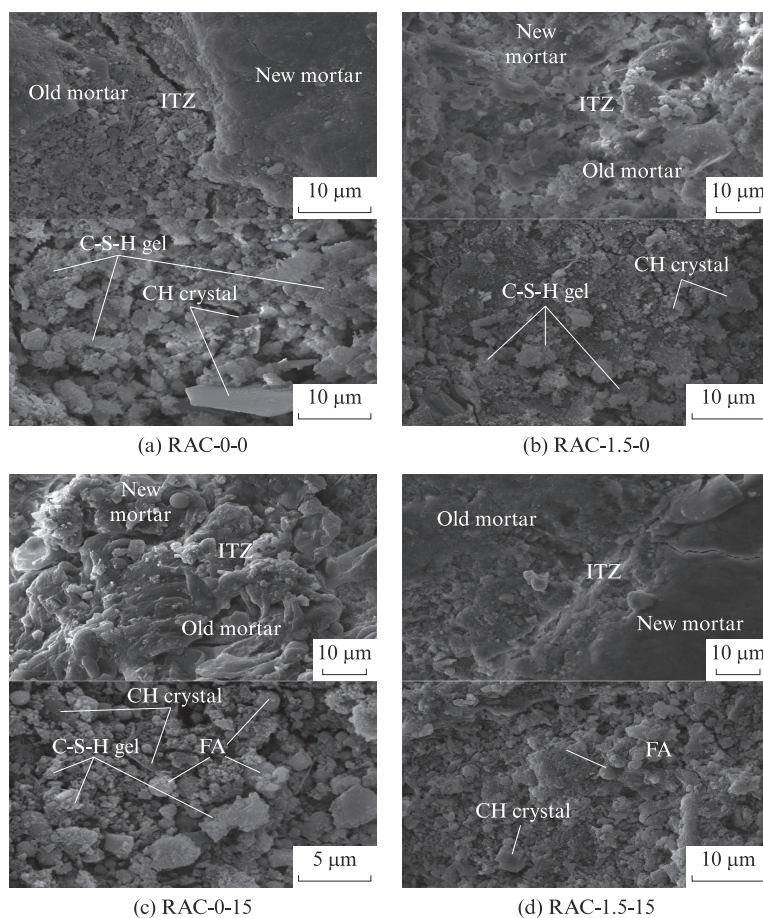


图7 混凝土的SEM图

Fig. 7 SEM images of concretes (28 d)

微孔洞,新旧砂浆黏结不够紧密,是RAC内部的薄弱界面之一;单掺NC时,生成了大量的水化产物,C-S-H等水化产物相互连接形成致密的连续相结构,且NC粒径小,具有晶核效应,大量孔隙被修补,使得试件RAC-1.5-0基体更加密实;NC、FA复掺后,试件RAC-1.5-15内部新旧砂浆的微孔洞情况较试件RAC-0-15得到改善,水化产物相互交联,NC吸附水化产物修补FA无法填充的孔隙,浆体和ITZ的密实程度提升,进一步提高了RAC的密实度。综上,从微观层面上印证了电通量测试结果,结构越密实,则电通量越低,RAC内部的孔隙越少,混凝土的力学性能更佳。

3 结论

(1)纳米 CaCO_3 (NC)的掺入降低了再生骨料混凝土(RAC)的坍落度,复掺粉煤灰(FA)能够弥补NC对RAC坍落度的负面影响。复掺NC和FA比单掺更能有效提高RAC的力学性能,且具有较高的后期抗压强度发展速率。

(2)单掺NC和FA可以降低RAC的6 h电通量,提高RAC的抗氯离子渗透性能,两者复掺后,其6 h电通量相较RAC降低了23.2%,具有较好的抗氯离子渗透性能。

(3)NC的掺入提高了水泥的水化反应速率,使得水泥的水化程度增加,但也使得大量水化产物包裹水泥颗粒,水泥的水化被抑制,而复掺FA可以缓解NC导致的水泥水化反应被抑制现象。

(4)NC和FA的掺入降低了氢氧化钙(CH)的含量,但NC会导致 CaCO_3 含量增加;两者复掺后,NC能够促进水泥-FA体系的水化反应,显著降低其CH的含量。

(5)NC和FA能够填充RAC浆体内部的孔隙,修复老旧砂浆之间的界面过渡区,而NC能够吸附水化产物修补FA无法填充的孔隙;二者复掺进一步改善了RAC的孔隙结构,提高了RAC的密实度。

参考文献:

- [1] SINGH R, NAYAK D, PANDEY A, et al. Effects of recycled fine aggregates on properties of concrete containing natural or recycled coarse aggregates: A comparative study[J]. Journal of Building Engineering, 2022, 45:103442.
- [2] CHEN X Y, XIAO X H, WU Q Y, et al. Effect of magnesium phosphate cement on the mechanical properties and microstructure of recycled aggregate and recycled aggregate concrete[J]. Journal of Building Engineering, 2022, 46:103611.
- [3] 张卫东,董云,彭宁波,等.冻融循环下透水再生混凝土力学性能损伤分析[J].建筑材料学报,2020,23(2):292-296.
- ZHANG Weidong, DONG Yun, PENG Ningbo, et al. Analysis on mechanical properties of previous recycled concrete by damage under freeze-thaw cycles[J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(2):292-296. (in Chinese)
- [4] SANCHEZ F, SOBOLEV K. Nanotechnology in concrete—A review[J]. Construction and Building Materials, 2010, 24(11):2060-2071.
- [5] SINGH N B, KALRA M, SAXENA S K. Nanoscience of cement and concrete[J]. Materials Today:Proceedings, 2017, 4(4):5478-5487.
- [6] WU Z M, SHI C J, KHAYAT K H, et al. Effects of different nanomaterials on hardening and performance of ultra-high strength concrete (UHSC) [J]. Cement and Concrete Composites, 2016, 70:24-43.
- [7] WANG D H, SHI C J, FARZADNIA N, et al. A review on use of limestone powder in cement-based materials: Mechanism, hydration and microstructures [J]. Construction and Building Materials, 2018, 181:659-672.
- [8] LI L, CAO M L, YIN H. Comparative roles between aragonite and calcite calcium carbonate whiskers in the hydration and strength of cement paste[J]. Cement and Concrete Composites, 2019, 104:103350.
- [9] CAMILETTI J, SOLIMAN A M, NEHDI M L. Effect of nano-calcium carbonate on early-age properties of ultra-high-performance concrete[J]. Magazine of Concrete Research, 2013, 65(5):297-307.
- [10] LIMBACHIYA M, MEDDAH M S, OUCHAGOUR Y. Use of recycled concrete aggregate in fly-ash concrete[J]. Construction and Building Materials, 2012, 27(1):439-449.
- [11] 肖建庄,陈祥磊,李标,等.纳米 SiO_2 和粉煤灰复掺对再生混凝土性能的影响[J].建筑科学与工程学报,2020,37(1):26-32.
- XIAO Jianzhuang, CHEN Xianglei, LI Biao, et al. Effect of mixed nano- SiO_2 and fly ash on properties of recycled aggregate concrete[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2020, 37(1):26-32. (in Chinese)
- [12] KOU S C, POON C S. Long-term mechanical and durability properties of recycled aggregate concrete prepared with the incorporation of fly ash[J]. Cement and Concrete Composites, 2013, 37:12-19.
- [13] GUO Z G, JIANG T, ZHANG J, et al. Mechanical and durability properties of sustainable self-compacting concrete with recycled concrete aggregate and fly ash, slag and silica fume [J]. Construction and Building Materials, 2020, 231:117115.
- [14] GENG J, SUN J Y. Characteristics of the carbonation resistance of recycled fine aggregate concrete[J]. Construction and Building Materials, 2013, 49(12):814-820.
- [15] YAO Z T, JI X S, SARKER P K, et al. A comprehensive review on the applications of coal fly ash[J]. Earth-Science Reviews, 2015, 141:105-121.
- [16] KAWASHIMA F, HOU P, CORR D J, et al. Modification of cement-based materials with nanoparticles [J]. Cement and Concrete Composites, 2013, 36:8-15.

- [17] DJERBI A. Effect of recycled coarse aggregate on the new interfacial transition zone concrete[J]. Construction and Building Materials, 2018, 190:1023-1033.
- [18] GHAZY A, BASSUONI M T, SHALABY A, et al. Nano-modified fly ash concrete: A repair option for concrete pavements[J]. ACI Materials Journal, 2016, 133(2):231-242.
- [19] 陈春红, 刘荣桂, 朱平华, 等. 黏附砂浆含量对再生混凝土抗氯离子侵蚀性能影响[J]. 建筑材料学报, 2021, 24(6):1216-1223. CHEN Chunhong, LIU Ronggui, ZHU Pinghua, et al. Effect of attached mortar content on chloride ion erosion resistance of recycled concrete [J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(6): 1216-1223. (in Chinese)
- [20] YING J W, ZHOU B, XIAO J Z. Pore structure and chloride diffusivity of recycled aggregate concrete with nano- SiO_2 and nano- TiO_2 [J]. Construction and Building Materials, 2017, 150: 49-55.
- [21] 王冲, 张聪, 刘俊超, 等. 纳米 CaCO_3 对硅酸盐水泥水化特性的影响[J]. 硅酸盐通报, 2016, 35(3):824-830.
- WANG Chong, ZHANG Cong, LIU Junchao, et al. Influence of nano- CaCO_3 on hydration characteristic of Portland cement[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2016, 35(3):824-830. (in Chinese)
- [22] SHAIKH F U A, SUPIT S W M. Mechanical and durability properties of high volume fly ash (HVFA) concrete containing calcium carbonate (CaCO_3) nanoparticles[J]. Construction and Building Materials, 2014, 70:309-321.
- [23] SUN J F, SHEN X D, TAN G, et al. Compressive strength and hydration characteristics of high-volume fly ash concrete prepared from fly ash[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2019, 136(2):565-580.
- [24] LIU C, LIU H W, XIAO J Z, et al. Effect of old mortar pore structure on relative humidity response of recycled aggregate concrete[J]. Construction and Building Materials, 2020, 247: 118600.