

# ICF 掺合料对混凝土抗压性能 及微观结构的影响

孙艳丽<sup>1</sup>, 邹 桢<sup>1</sup>, 崔长青<sup>2</sup>, 魏颖晖<sup>1</sup>, 柳 强<sup>1</sup>

(1. 沈阳建筑大学管理学院, 辽宁 沈阳 110168; 2. 沈阳建筑大学土木工程学院, 辽宁 沈阳 110168)

**摘要** 目的 针对单一组分混凝土矿物掺合料由于性能单一而无法满足复杂工况的需求等问题, 对不同组分的固体废弃物进行复配, 制备复合掺合料。方法 采用铁尾矿、粉煤灰和陶瓷粉(ICF)制备三元体系掺合料, 研究不同质量比的 ICF 掺合料下的水泥胶砂活性指数、混凝土抗压强度、孔隙结构和界面过渡区性能变化规律。结果 活性指数和抗压强度测试表明含 ICF 掺合料混凝土在早期强度较低, 后期的活性指数明显提升, 且混凝土立方体抗压强度与普通混凝土相差不大; ICF 掺合料产生的填充效应与二次水化反应降低了混凝土的孔隙率, 尤其作用于界面过渡区, 但这种优化效果随着掺合料质量比的增加呈现降低趋势。结论 利用 ICF 三元体系制备掺合料, 既解决材料性能单一的问题, 又可以实现固体废弃物的资源化利用。

**关键词** 铁尾矿; 陶瓷粉; 粉煤灰; 固废资源化; 抗压强度

中图分类号 TU528.1 文献标志码 A

## Effect of ICF Admixture on Compressive Properties and Microstructure of Concrete

SUN Yanli<sup>1</sup>, ZOU Zhen<sup>1</sup>, CUI Chanqing<sup>2</sup>, WEI Yinghui<sup>1</sup>, LIU Qiang<sup>1</sup>

(1. School of Management, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

**Abstract:** In order to solve shortcoming of the single component concrete mineral admixture which has a single performance and cannot meet the needs of complex working conditions, the solid waste of different components compounded to prepare composite admixture is studied. The ternary admixture was prepared by iron tailings, ceramic powder and fly ash (ICF). The effects of different mass ratios of ICF admixture on the activity index of cement mortar, compressive strength of concrete, pore structure and interfacial transition zone were studied. The activity index and concrete cube compressive strength test showed that the activity index and concrete compressive strength of ICF admixture were low in the early stage, however, in the later stage the activity index was significantly improved and the concrete cube compressive strength was not much different

收稿日期: 2022-04-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(51978421); 辽宁省科技厅公益基金项目(2020JH4/10100048)

作者简介: 孙艳丽(1971—), 女, 教授, 主要从事固体废弃物有机生化处理等方面研究。

from that of ordinary concrete. The filling effect and secondary hydration reaction of ICF admixture reduce the porosity of concrete, especially in the interfacial transition zone, but this optimization effect decreases with the increase of the mass ratio of admixture. The ICF ternary admixture can be used as a way to solve a single performance of the single component admixture and as a way to realize industrial solid waste recycling.

**Key words:** iron tailings; ceramic powder; fly ash; solid waste resource; compressive strength

铁尾矿作为铁矿开采后的工业废弃物<sup>[1]</sup>, 含有大量的  $\text{SiO}_2$ , 但基本不具备火山灰活性, 铁尾矿与石英砂有类似的性质, 属于惰性材料。铁尾矿常常被磨细作为填充组分用作混凝土矿物掺和料<sup>[2]</sup>, 通过填充效应提供的强度极为有限, 为了进一步提高铁尾矿的应用, 需要开发含铁尾矿的多元组分掺和料<sup>[3]</sup>。我国陶瓷废料的年产量大约在1 000万吨左右<sup>[4]</sup>, 废弃陶瓷粉中含有活性  $\text{SiO}_2$  与  $\text{Al}_2\text{O}_3$  是二次水化反应良好的活性硅铝前驱体<sup>[5]</sup>, 但陶瓷粉灰标准稠度需水量较大, 会极大地影响其工作性能<sup>[6]</sup>。周淑春等<sup>[7]</sup>通过试验、数值计算和理论分析, 对复合石灰石粉-粉煤灰-矿渣掺合料的胶砂基本性能和混凝土配合比优化设计、水化热性能、混凝土自收缩性能、基本力学性能、单轴受压性能、与钢筋界面粘结性能、耐久性能给出了指导性的建议。陈旭鹏<sup>[8]</sup>采用正交试验的方法, 将偏高岭土、超细粉煤灰、硅灰三种掺合料按照不同质量比制备混凝土, 进行力学性能试验, 并给出了三种掺合料的最佳质量比下的水泥取代率为6%、15%、9%。岳光亮<sup>[9]</sup>研究了不同细度对复合掺合料的影响, 取三种细度复合掺合料(钢渣、煤矸石、锰渣)配制C30混凝土, 当45  $\mu\text{m}$  筛余量为5.6%时, 胶凝材料达到最佳级配, 工作性能最佳, 并且对强度的贡献最为明显。朱晓飞<sup>[10]</sup>的研究显示复合掺合料(超细粉煤灰、膨胀剂、硅灰)相较单一组份掺合料, 抗氯离子渗透性能与混凝土抗盐冻性能有明显改善。王珩<sup>[11]</sup>发现磷渣-石灰石粉复合掺合料对石英砂这种高活性骨料具有一定的碱活性抑制效果, 并且当质量比增大时, 抑制效果提高, 当质量比

为45%以上, 到养护后期时, 孔溶液碱度差异逐渐变小,  $\text{Na}^+$  略有升高,  $\text{Ca}^{2+}$  浓度升高, Si元素浓度基本稳定。

铁尾矿具备细小颗粒的性质, 在作为掺合料制备混凝土时, 可以充分发挥填充作用, 而粉煤灰与陶瓷粉拥有部分火山灰活性, 因此利用铁尾矿、粉煤灰、陶瓷粉协同制备复合混凝土矿物掺合料, 可以充分发挥三种物料各自的材料特性, 同时利用材料化学组成之间的耦合作用进一步提升掺和料的性能。B. A. Akinyemi 等<sup>[12]</sup>论述了铁尾矿作复合胶凝材料前驱体的可能性, 并指出未来应该关注耐久性问题。王安岭等<sup>[13]</sup>通过铁尾矿与矿渣的复配研制出高性能复合掺合料, 解决了单一铁尾矿强度不足的问题。周堂贵等<sup>[14]</sup>发现与单一组分掺合料混凝土产品相比, 复合掺合料混凝土产品28 d强度富余率略低, 60 d强度增长率较高, 总体质量稳定可控。Y. N. Zhang 等<sup>[15]</sup>将活化铁尾矿与粉煤灰和矿渣粉进行复配得到高活性辅助胶凝材料。

粉煤灰与陶瓷粉中均含有活性  $\text{SiO}_2$  与  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 可以提高铁尾矿中  $\text{SiO}_2$  的反应活性, 因此笔者通过将铁尾矿与粉煤灰、陶瓷粉复配制备得到三元体系掺合料(ICF), 研究不同质量比的 IFC 掺合料下的各项指标及变化规律。研究表明: 铁尾矿、粉煤灰、陶瓷粉复合混凝土矿物掺合料的开发既实现了大宗固废的综合利用, 又起到了保护环境、节约资源、降低能耗的作用。

## 1 试验

### 1.1 试验原料

水泥采用沈阳山水集团有限公司生产的

PO·42.5 级水泥;铁尾矿采用辽宁壹立方砂业有限公司的铁尾矿粉,原始粒径为 0.08 mm,通过行星式球磨机研磨 1.5 h 得到;粉煤灰采用亚泰集团沈阳建材有限公司的 I 级粉煤灰;陶瓷粉采用潮州市新环科技有限公司的 PT-TC68 型陶瓷粉。铁尾矿的比表面积为 $1\,290\text{ m}^2/\text{kg}$ ;粉煤灰的比表面积为 $1\,391\text{ m}^2/\text{kg}$ ;陶瓷粉的比表面积为 $1\,908\text{ m}^2/\text{kg}$ 。材料的化学成分见表 1,粒度分布见图 1。细骨料采用辽宁壹立方砂业有限公司制备的铁尾矿砂,颗粒级配见图 2;粗骨料采用辽宁壹立方砂业有限公司制备的铁

尾矿废石骨料,颗粒级配见图 3;减水剂采用辽宁某建材有限公司生产的 P-II 型引气减水剂,水采用普通自来水。

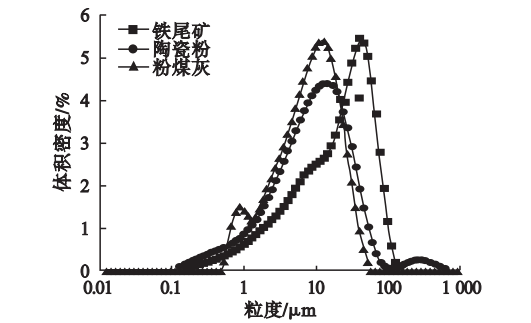


图 1 原料的粒度分布

Fig. 1 Particle size distribution of raw materials

表 1 原料化学成分

种类	Table 1 Chemical composition of raw material											%
	$w(\text{SiO}_2)$	$w(\text{Al}_2\text{O}_3)$	$w(\text{Fe}_2\text{O}_3)$	$w(\text{CaO})$	$w(\text{P}_2\text{O}_5)$	$w(\text{MgO})$	$w(\text{K}_2\text{O})$	$w(\text{Na}_2\text{O})$	$w(\text{TiO}_2)$	$w(\text{MnO})$	$w(\text{SO}_3)$	
铁尾矿	62.26	4.78	14.37	7.77	0.44	6.33	1.40	1.34	0.53	0.21	0.48	
粉煤灰	60.10	25.10	6.74	2.93	0.42	0.86	1.61	0.10	1.49	0.16	0.27	
陶瓷粉	62.56	23.41	1.32	6.34	0.02	1.56	1.34	0.91	0.12	0.09	0.06	

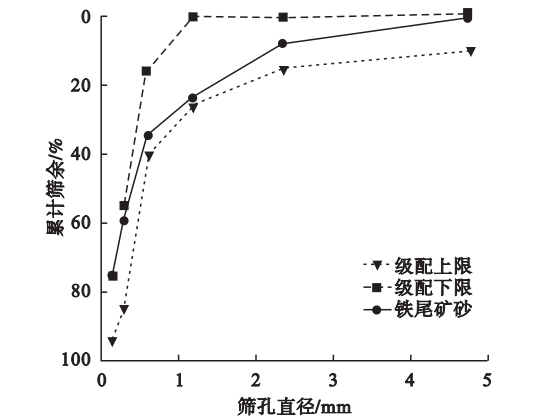


图 2 细骨料的级配曲线

Fig. 2 Gradation curve of fine aggregate

1.2 试验方法

1.2.1 配合比及试件制作

活性指数检验依据国家标准《用于水泥混合材的工业废渣活性试验方法》(GB/T 12957—2005)。混凝土试件制备参照《普通混凝土配合比设计规程》(JGJ 55—2000)。参照表 2 中配合比制备水泥胶砂试件,参照表 3 中配合比制备 C40 混凝土,其中,D0 为纯水泥的对照组,D20 为复合掺合料质量比 20% 的试验

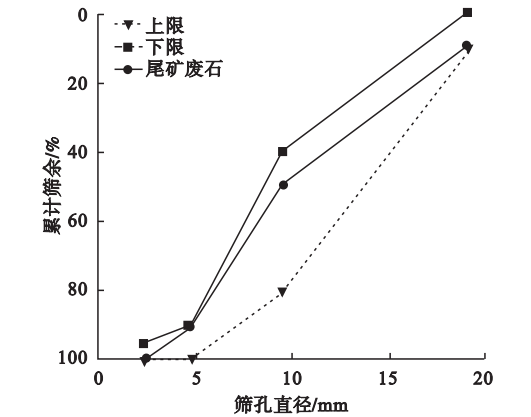


图 3 粗骨料的级配曲线

Fig. 3 Gradation curve of coarse aggregate  
组,D30 为复合掺合料质量比 30% 的试验组, IOT30 为单一铁尾矿质量比 30% 的对照组。

表 2 水泥胶砂配合比

Table 2		Cement mortar mix ratio			kg
编 号	$m$ (水泥)	$m$ (水)	掺合料		
			$m$ (铁尾矿)	$m$ (粉煤灰)	$m$ (陶瓷粉)
D0	450	225	0	0	0
D20	360	225	18	36	36
D30	315	225	27	54	54
IOT30	315	225	135	0	0

表 3 混凝土配合比

		Table 3 Concrete mix						kg
编号	m(水泥)	m(水)	掺合料			m(铁尾矿砂)	m(铁尾矿废石)	m(减水剂)
			m(铁尾矿)	m(粉煤灰)	m(陶瓷粉)			
CD0	420	184.8	0	0	0	740	1 110	4.5
CD20	336	184.8	16.8	33.6	33.6	740	1 110	4.5
CD30	294	184.8	25.2	50.4	50.4	740	1 110	4.5
CIOT30	294	184.8	126	0	0	740	1 110	4.5

1.2.2 强度测试

参照《水泥胶砂强度检验方法(ISO 法)》(GB/T 17671—1999),采用北京科达京威科技发展有限公司 JYE—300B 型全自动恒应力两用机对试样进行抗折、抗压强度测试。对测试结果进行分析时,取 3 个平行试样的平均值作为该组试样的代表值,并计算活性指数。活性指数按式(1)计算。

$$H = \frac{R_1}{R_0} \tag{1}$$

式中: $H$  为活性指数; $R_1$  为实验组试件抗压强度,MPa; $R_0$  为水泥试件抗压强度,MPa。

混凝土立方体抗压强度测试参照《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2019)进行。立方体抗压试验采用 100 mm×100 mm×100 mm 试件,试验中每个小组均制作 3 个试件。抗压强度试验利用规定的仪器与夹具,在半截棱柱体的侧面上进行,半截棱柱体中心与压力机压板受压中心差应在 0.5 mm 内,棱柱体露在压板外的部分约有 10 mm。在整个加荷过程中以 2 400 N/s 的速率均匀地加荷直至破坏。基于本试验所使用的试件尺寸,最终结果要乘以尺寸换算系数 0.95,并且取 3 个试件测值的算术平均值作为该组试件的强度值。混凝土立方体试件抗压强度应按式(2)计算。

$$F_{cc} = \frac{F}{A} \tag{2}$$

式中: $F_{cc}$  为混凝土立方体的抗压强度,MPa,计算结果精确至 0.1 MPa; $F$  为试件破坏荷载,N; $A$  为试件承压面积,mm<sup>2</sup>。

1.2.3 微观结构测试

通过压汞法测试混凝土的孔隙率和孔径分布,压汞测试样品取自养护 28 d 后的立方体混凝土试块,取样均来自同一深度同一截面,样品中不包含骨料。取样后将试样浸入无水乙醇 7 d 终止水化,试样在(50±2)℃下烘干 3 d 后进行压汞测试。为了防止上述样品的微观结构在制样过程中被破坏,将样品浸入环氧树脂自然硬化 24 h,紧接着进行打磨、抛光、超声清洗、烘干(烘干温度为 50±2℃),最后进行背散射电镜测试<sup>[14-15]</sup>。

2 结果分析

2.1 活性指数分析

图 4 为掺合料质量比对水泥胶砂性能的影响。从图 4(a)可以看出,当铁尾矿以单一组分作混凝土矿物掺合料的 IOT30 组的活性指数较低,因此引入铁尾矿、粉煤灰、陶瓷粉三元掺合料体系协同作混凝土矿物掺合料。D30 组 7 d、28 d 活性指数相较 IOT30 组提高了 12.7%、22.7%。由此可见粉煤灰、陶瓷粉的引入可以大幅度提高铁尾矿的活性指数。根据图 4(b)可知,对比 D30 与 D0 组的抗压强度发现铁尾矿、粉煤灰、陶瓷粉三元掺合料体系相较纯水泥试样的抗压强度相差依旧较大,主要原因在于铁尾矿在三元体系中主要起填充作用,其活性成分较少,二次水化程度较低,粉煤灰与陶瓷粉的引入虽然提高了铁尾矿的抗压强度,但其二次水化程度相较水泥水化的水化程度还是有所差

距。为了进一步优化铁尾矿、粉煤灰、陶瓷粉三元掺合料体系,当三元掺合料体系的质量比降低为 D20 组的 20% 时,对比 D30 组,其 7 d、28 d 活性指数分别提高了 2.9%、4.3%。

由此可见,当三元掺合料体系以 20% 的质量比取代水泥时,其力学性能较好,并且其 28 d 活性指数高于 90%,达到了 I 级混凝土矿物掺合料的使用标准。

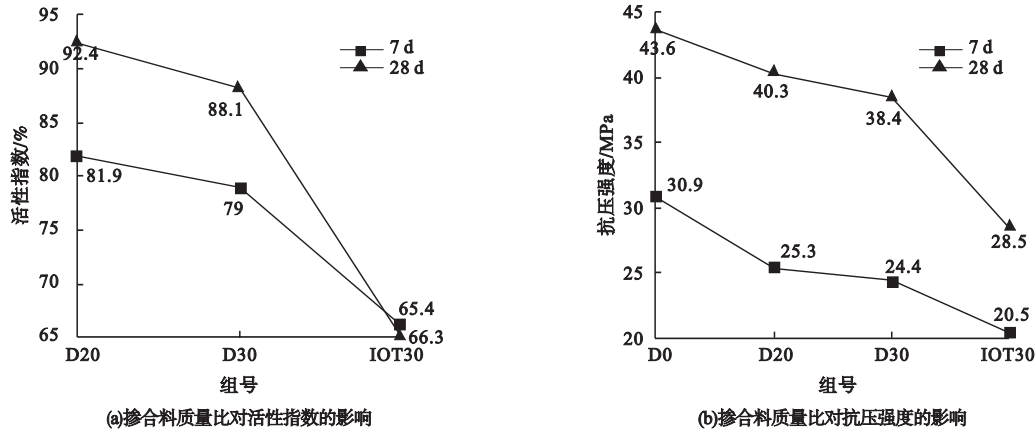


图 4 掺合料质量比对水泥胶砂性能的影响

Fig. 4 Influence of admixture mass ratio on concrete performance

2.2 抗压强度分析

图 5 为掺合料质量比对混凝土抗压强度的影响。从图 5 中看出,随着掺合料质量比的增加,混凝土抗压强度下降,CD0 组混凝土 7 d 抗压强度明显高于 CD20 组和 CD30 组。CD0 组中混凝土从 7 d 到 14 d 时,抗压强度增长了 15.69%,从 14 d 到 28 d 时,抗压强度增长了 11.95%;CD20 组混凝土从 7 d 到 14 d 时,抗压强度增长了 23.55%,从 14 d 到 28 d 时抗压强度增长了 5.19%;CD30 组混凝土从 7 d 到 14 d 时,抗压强度增长了 17.32%,从 14 d 到 28 d 时,抗压强度增长了 20.82%。掺入掺合料的混凝土抗压强度均低于普通混凝土,主要是因为掺合料对混凝土早期强度的贡献有限,其活性发挥更多依赖于水泥水化产生的氢氧化钙;水化早期时,水泥水化速率缓慢,无法为掺合料二次水化提供氢氧化钙,所以导致了 CD20 和 CD30 的早期抗压强度过低;从增长速率来看,7 d 后 CD20 组和 CD30 组的抗压强度增长速率都与 CD0 组接近,特别是 CD30 组,在后期增长速率上远高于 CD0 组。F. Han<sup>[16]</sup>的研究也发现矿物掺合料对混凝土的早期强度影

响较大,其原因在于掺合料中的氧化铝会消耗体系中硫酸盐,抑制了水泥中的硅酸三钙水化。

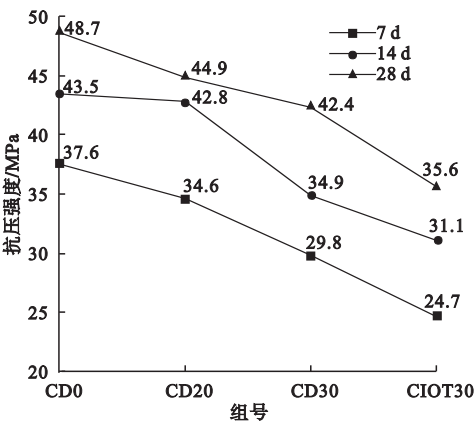


图 5 掺合料质量比对混凝土抗压强度的影响

Fig. 5 Influence of admixture mass ratio on compressive strength

对比 CD30 组与 CIOT30 组,单一铁尾矿 CIOT30 组的抗压强度均远远低于三元体系 CD30 组,相对于铁尾矿单一使用时,三元体系可以显著提升混凝土抗压强度。F. Han<sup>[17]</sup>的研究中揭示了单一铁尾矿的活性较低,使得含铁尾矿的混凝土强度偏低、孔隙大、微观结构松散。因此,笔者以粉煤灰和



陶瓷粉替换部分铁尾矿,有效改善单一铁尾矿对抗压强度的负面影响。

2.3 微观结构分析

2.3.1 孔结构分析

利用压汞测试法检测了混凝土养护 28 d 后的孔隙结构特性,如图 6(a) 示,掺合料的加入降低了混凝土基体的孔隙率;随着掺合料质量比增加孔隙率逐渐增大。当掺合料质

量比为 20% 时混凝土孔隙结构最佳。如图 6(b) 所示,CD20 组和 CD30 组的最可几孔径均小于 CD0 组,由于掺合料自身具备更细颗粒的性质,相比纯水泥体系可以发挥填充效应,填补了部分孔隙。但随着掺合料质量比的增加,这种填充效应并不能弥补由于胶凝材料缺少的空白而产生的孔隙,因此当质量比达到 30% 时孔隙率开始增加。

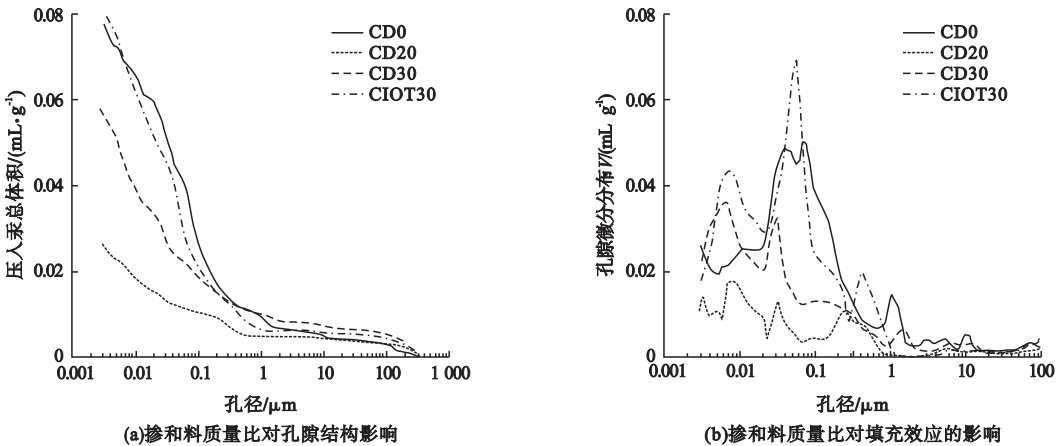


图 6 总孔体积和孔径分布

Fig. 6 Total pore volume and pore size distribution

三元体系掺合料相对于单掺铁尾矿,其孔隙率更低,最可几孔径也更小,因此用铁尾矿、粉煤灰和陶瓷粉搭配合料要优于铁尾矿单掺使用。但是结合 CD0 组、CD20 组、CD30 组和 CIOT30 组的强度表现来看,可以发现抗压性能和混凝土的孔隙结构特性关联并不大,例如:CD0 组的孔隙特性较差,但是其抗压性能表现却是最好的。进一步对比 CD20 组、CD30 组和 CIOT30 组的抗压性

能表现和孔隙结构特性,可以发现孔隙最低的 CD20 组却拥有最佳的抗压性能表现,这也说明在对比普通混凝土与掺入掺合料的混凝土的抗压性能时,孔隙结构特性并非主导因素,还应考虑颗粒之间的粘结力和界面过渡区的性能等因素。

2.3.2 界面过渡区分析

图 7 为混凝土背散射电镜图。

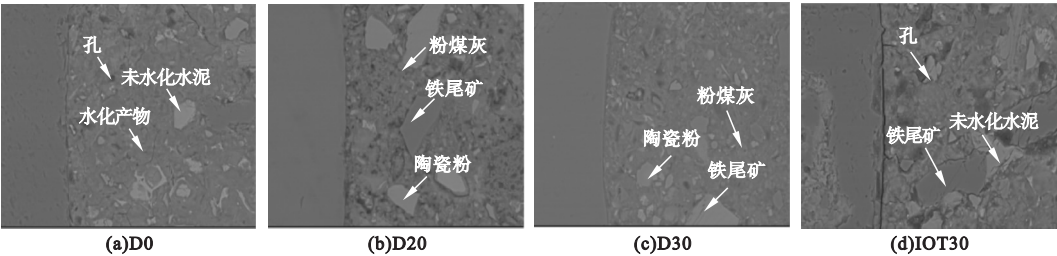


图 7 混凝土背散射电镜图(放大 10 000 倍)

Fig. 7 Picture of concrete backscattering( 10 000)

从图中可以看出,界面过渡区内主要有孔隙、未水化的水泥和水化产物,水化产物包裹着未水化的水泥,基体与骨料结合较为紧密。CD20 组和 CD30 组的过渡区内,除了水化产物、未水化的水泥和孔隙外,还存在未水化的粉煤灰、铁尾矿和陶瓷粉,CIOT30 组的界面过渡区内孔隙较多,水化产物与未水化颗粒之间的结合较为疏松,基体与骨料之间存在明显的缝隙。

图 8 对混凝土界面过渡区的参数进行了

定量分析,从图 8(a)中可以看到,距离骨料越近界面过渡区的孔隙率越大,随着距离增大孔隙率逐渐下降,并趋于平缓,这是壁效应作用的结果,界面过渡区的厚度在 30 ~ 40  $\mu\text{m}$ 。如图 8(b)所示,界面过渡区内未水化颗粒随着到距离的增大而增大,在靠近骨料的 0 ~ 20  $\mu\text{m}$  内,水化进程较深,这是因为壁效应作用下局部水胶比大,促进了胶凝材料的水化,同时也产生了更大的孔隙率。

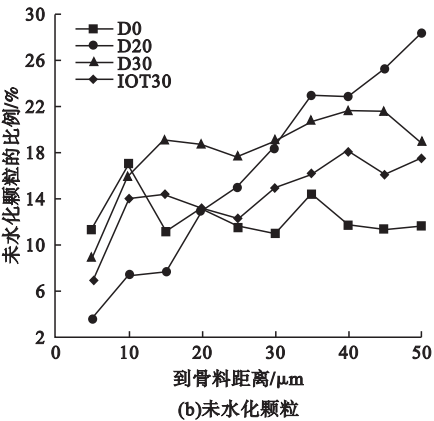
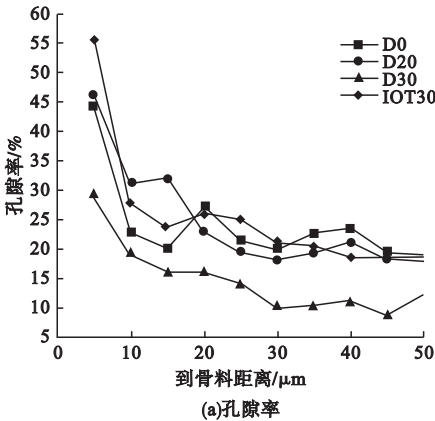


图 8 混凝土界面过渡区的参数

Fig. 8 Parameters of concrete interfacial transition zone

3 结 论

- (1)通过水泥胶砂活性指数测试发现:粉煤灰、陶瓷粉可以提高铁尾矿的活性指数,通过火山灰效应促进了二次水化的进程,铁尾矿可以发挥出更好的填充效应,三者可以发生较好的协同反应。当掺合料以质量比为 20% 的取代率代替水泥时,28 d 的活性指数可达 92.4%。
- (2)利用铁尾矿、粉煤灰、陶瓷粉制备三元体系掺合料,并配制 C40 混凝土,其抗压强度满足 C40 的混凝土要求,掺合料的最大质量比达 30%,三元体系掺合料解决了铁尾矿单掺对混凝土抗压强度带来的负面影响。
- (3)铁尾矿 - 粉煤灰 - 陶瓷粉三元体系掺合料的引入可以降低混凝土的孔隙率,优化混凝土的孔径分布,三元体系掺合料的优

- 化效果远好于单掺铁尾矿;孔隙结构特性的变化趋势并没有使含掺合料混凝土与普通混凝土在抗压性能方面产生差异。
- (4)界面过渡区的性质对铁尾矿 - 粉煤灰 - 陶瓷粉三元体系掺合料的混凝土有显著影响。普通混凝土在孔隙率表现和水化程度上最为均衡,引入掺合料后虽然孔隙率降低,填充效应增加,但水化程度降低,化学结合能力不足。

参考文献

[1] CHEN J S, ZHAO B, WANG X M, et al. Cemented backfilling performance of yellow phosphorus slag [J]. International journal of minerals, metallurgy and materials, 2010, 17 (1):121 - 126.

[2] 聂轶苗,张晋霞,王森,等. 提高特细低硅型铁尾矿掺入量的试验研究[J]. 混凝土,2015,36 (2):79 - 81.

(NIE Yimiao, ZHANG Jinxia, WANG Sen,

- et al. Experimental research to improve the ratio of super-fine iron tailing with low  $\text{SiO}_2$  content [J]. Concrete, 2015, 36(2): 79–81. )
- [3] 曾维, 李北星, 陈梦义, 等. 铁尾矿基复合掺合料混凝土性能的研究[J]. 混凝土, 2015, 36(10): 78–81.  
( ZENG Wei, LI Beixing, CHEN Mengyi, et al. Properties of concrete prepared from iron tailings based composite admixture [J]. Concrete, 2015, 36(10): 78–81. )
- [4] 陈梦成, 袁明胜, 刘宇翔. 陶瓷粉混凝土正交设计试验研究[J]. 混凝土, 2018, 39(4): 102–106.  
( CHEN Mengcheng, YUAN Mingsheng, LIU Yuxiang. Experimental study on orthogonal design of ceramic powder concrete [J]. Concrete, 2018, 39(4): 102–106. )
- [5] 贾志龙, 闻宝联, 张浩, 等. 瓷砖抛光粉对水泥砂浆性能的影响研究[J]. 混凝土, 2021, 42(6): 117–120.  
( JIA Zhilong, WEN Baolian, ZHANG Hao, et al. Study on the effect of ceramic tile polishing powder on the properties of cement mortar [J]. Concrete, 2021, 42(6): 117–120. )
- [6] 王功勋, 苏达根, 钟小敏. 陶瓷抛光砖粉对混凝土性能的影响[J]. 混凝土, 2008, 29(10): 64–66.  
( WANG Gongxun, SU Dagen, ZHONG Xiaomin. Effect of ceramic polishing powder as admixture on performance of concrete [J]. Concrete, 2008, 29(10): 64–66. )
- [7] 周淑春. 复合石灰石粉-粉煤灰-矿渣混凝土宏观性能演化规律与微观机理研究[D]. 北京: 中国矿业大学, 2019.  
( ZHOU Shuchun. Study on evolutionary regularity and micro mechanisms of macro properties of composite limestone powder-fly ash-slag concrete [D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2019. )
- [8] 陈旭鹏. 高活性掺合料混凝土力学性能和耐久性能的研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2020.  
( CHEN Xupeng. Study on the mechanical and durability concrete with high active mineral admixture [D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2020. )
- [9] 岳光亮, 谢瑞兴, 郭文倩, 等. 不同颗粒细度的复合掺合料对混凝土性能的影响[J]. 建材技术与应用, 2021, 41(4): 6–10.  
( YUE Guangliang, XIE Ruixing, GUO Wenqian, et al. Influence of composite admixtures with different particle fineness on concrete performance [J]. Research and application of building materials, 2021, 41(4): 6–10. )
- [10] 朱晓飞. 复合矿物掺合料对混凝土抗盐冻性的影响[J]. 北方交通, 2020, 42(8): 32–34.  
( ZHU Xiaofei. Influence of composite mineral admixture on the frost resistance of concrete [J]. Northern communications, 2020, 42(8): 32–34. )
- [11] 王珩, 刘伟宝. PL 复合掺合料对骨料碱活性的抑制及孔溶液分析[J]. 材料导报, 2019, 33(增刊1): 214–218.  
( WANG Yan, LIU Weibao. The inhibition of PL compound mineral additive on alkali aggregate reaction and analysis of its poresolution [J]. Materials reports, 2019, 33(S1): 214–218. )
- [12] AKINYEMI B A, ALABA P, RASHEDI A. Selected performance of alkali-activated mine tailings as cementitious composites: a review [J]. Journal of building engineering, 2022, 50: 104154.
- [13] 王安岭, 马雪英, 杨欣, 等. 铁尾矿粉用作混凝土掺和料的活性研究[J]. 混凝土世界, 2013, 33(8): 66–69.  
( WANG Anling, MA Xueying, YANG Xin, et al. Study on the activity of iron tailing powder as concrete admixture [J]. China concrete, 2013, 33(8): 66–69. )
- [14] 周堂贵, 丁晓青, 沈杨劼, 等. 复合掺合料预拌混凝土产品性能的对比研究[J]. 中国建材科技, 2020, 29(5): 67–69.  
( ZHOU Tanggui, DING Xiaoqing, SHEN Yangjie, et al. Comparative study on performance of ready-mixed concrete with composite mineral admixture [J]. China building materials science and technology, 2020, 29(5): 67–69. )
- [15] ZHANG Y N, LIU B N, GU X W, et al. Mechanochemical activation of iron ore tailing-based ternary supplementary cementitious materials [J]. Construction and building materials, 2022, 346: 128420.
- [16] DJERBI A. Effect of recycled coarse aggregate on the new interfacial transition zone concrete [J]. Construction and building materials, 2018, 190: 1023–1033.
- [17] GAO Y, DE SCHUTTER G, YE G, et al. The ITZ microstructure, thickness and porosity in blended cementitious composite: effects of curing age, water to binder ratio and aggregate content [J]. Composites part B: engineering, 2014, 60: 1–13.
- [18] HAN F, ZHOU Y, ZHANG Z. Effect of gypsum on the properties of composite binder containing high-volume slag and iron tailing powder [J]. Construction and building materials, 2020, 252: 199023.
- [19] HAN F, LUO A, LIU J, et al. Properties of high-volume iron tailing powder concrete under different curing conditions [J]. Construction and building materials, 2020, 241: 118108.  
( 责任编辑: 王国业 英文审校: 唐玉兰 )