

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2013.03.023

## 冶金渣制备生态型人工鱼礁混凝土的试验研究

倪文, 李颖, 陈德平, 王中杰

(北京科技大学土木与环境工程学院; 金属矿山高效开采与安全教育部重点实验室, 北京 100083)

**摘要:**通过正交试验研究了矿渣-钢渣-熟料-石膏体系胶凝材料的强度。胶凝材料正交试验表明: 矿渣:钢渣的复合比为7:1, 矿渣和钢渣的比表面积分别为  $480 \text{ m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$  和  $550 \text{ m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$ , 并与10%的水泥熟料和10%的脱硫石膏复合的胶凝材料具有较高的强度。以优化后的胶凝材料代替水泥, 并以热闷法稳定化的钢渣颗粒为骨料, 可以制备出抗压强度达到65 MPa以上的人工鱼礁混凝土。利用XRD和SEM方法分析胶凝材料的水化过程, 结果表明, 水化反应主要生成AFt相和C-S-H凝胶, 钢渣、水泥熟料和脱硫石膏的协同作用对矿渣的火山灰活性反应具有重要促进作用。

**关键词:**矿渣; 钢渣; 胶凝材料; 混凝土; 人工鱼礁

**中图分类号:** TU528.3    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1674-4764(2013)03-0145-06

## A Primary Investigation on Concrete Made from Iron and Steel Slags for Building Ecological Artificial Reefs

Ni Wen, Li Ying, Chen Deping, Wang Zhongjie

(Civil and Environmental Engineering School; Key Laboratory of High-Efficient Mining and Safety of Metal Mines (Ministry of Education of China), University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, P. R. China)

**Abstract:** A method of orthogonal test was used to optimize the strength of the cementitious material for preparing the concrete of high-strength artificial reefs. The results show that with the ratio of iron slag: steel slag=7:1, and when 10% cement clinker and 10% gypsum of Flue Gas Desulfurization Waste (FGDW) was mixed with 80% iron and steel slags powder, the mixed cementitious material had an optimized strength. The optimized specific surface area are  $480 \text{ m}^2/\text{kg}$  and  $550 \text{ m}^2/\text{kg}$  for iron slag and steel slag powder respectively. The ordinary portland cement can be totally substituted by such a mixed cementitious material with iron and steel slags as its major components in preparing the concrete for building high-strength artificial reefs. A concrete with a compressive strength over 65MPa can be prepared by using such a mixture as a cementitious material and steel slag grains as its fine and coarse aggregates which have been stabilized by a hot-simmering method. Hydration processes of net slurry were analyzed by XRD and SEM methods. The results show that the hydration products in the system are mainly AFt and C-S-H gel. The results also show that the pozzolanic reaction of iron slags could be largely promoted by the coordinations of steel slags, clinker and FGDW.

**Key words:** iron slags; steel slags; cementitious material; concrete; artificial reefs

收稿日期: 2012-11-25

基金项目: 国家海洋局海洋公益性行业科研专项经费重点项目(200805030)

作者简介: 倪文(1961-), 男, 教授, 博士, 主要从事固体废弃物资源化研究, (E-mail)niwen@ces.ustb.edu.cn.

矿渣和钢渣作为冶金工业的主要废渣,一直以来都是固体废弃物资源化研究的重点对象。近年来,中国的高性能矿渣粉在生产规模和装备水平上已处于国际前列,矿渣粉的生产也已经独立于传统的水泥行业,成为 1 个全新的绿色建材行业<sup>[1]</sup>。伴随钢铁产业的发展,钢渣的排放量也不断增加,但低利用率造成钢渣大量堆积,占用良田,污染环境,而且降低了钢铁企业的经济效益<sup>[2]</sup>,这就要求要利用现有的钢渣矿渣作为二次资源再利用,开发出高附加值的产品<sup>[3-4]</sup>。采用热闷法稳定化的钢渣颗粒作为混凝土骨料,可以使混凝土中钢渣成分的总量达到 75%~85%,能将大量钢渣转化为工程材料<sup>[5-6]</sup>。

矿渣粉的胶凝性来源于玻璃体结构的解体,可以与水泥水化释放的  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  反应从而促进水化,表现出很强的吸碱能力<sup>[7]</sup>,而钢渣中的 f-CaO 和 RO 相遇水后生成  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ,使得混凝土体系的液相碱度提高,因此,适量掺入钢渣微粉的混凝土具有强度高特性。钢渣和矿渣双掺可以在保证混凝土优良性能的同时,提高矿渣粉在混凝土中替代水泥的比例<sup>[8-9]</sup>。

人工鱼礁是以改善海域生态环境为目的,人为在海中设置的构造物,为鱼类等提供繁殖、生长、索饵和庇敌的场所,保护鱼类、促进鱼类增殖进而提高渔获量<sup>[10]</sup>。广泛开展了人工鱼礁的建设,进行近海海洋生物栖息地和渔场的修复,取得了较好的效果。日本、欧美等国的人工鱼礁起步早,近年来正在向大体积、大孔洞率、结构复杂的方向发展。日本已经建成多处钢结构高层鱼礁,结构高度超过 70 m<sup>[11]</sup>。建造人工鱼礁的材料多样,混凝土就是其中最重要的一种。混凝土人工鱼礁易于进行结构设计,适合制造出复杂的形状和孔洞结构,而且对鱼类的诱集性能也很好<sup>[12-13]</sup>。开发出 C60 以上的高强混凝土,可

用于制备出大体积、大孔洞率和形状复杂的人工鱼礁,对于进一步提高投礁地区的海洋生物多样性,扩大海洋牧场范围和消纳大量钢渣都具有重要意义。

## 1 试验原料与方法

### 1.1 试验原料

#### 1) 胶凝材料原料

矿渣采用鞍钢集团矿渣开发公司的高炉矿渣粉。钢渣采用鞍钢集团矿渣开发公司的转炉钢渣经多段破碎和多段磁选后的尾渣, f-CaO 含量为 0.75%, TFe 含量为 28.62%, MFe 含量为 2.16%。水泥熟料采用河北唐山冀东水泥厂提供的普通硅酸盐水泥熟料,主要化学成分为 CaO、SiO<sub>2</sub> 和少量的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>。熟料中 CaO、SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 不是以单独的氧化物存在的,而是 2 种或 2 种以上的氧化物经高温化学反应生成的多种矿物的集合体。主要矿物组成为硅酸三钙(3CaO·SiO<sub>2</sub>, C<sub>3</sub>S)、硅酸二钙(3CaO·SiO<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>S)、铝酸三钙(3CaO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, C<sub>3</sub>A)和铁铝酸四钙(4CaO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, C<sub>4</sub>AF)<sup>[14]</sup>。脱硫石膏采用北京石景山热电厂提供的脱硫石膏。主要矿物成分为二水石膏(CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O)<sup>[15]</sup>,含有少量其它杂质。

#### 2) 骨料

细骨料为鞍钢集团矿渣开发公司生产的钢渣砂,细度模数为 3.12,含泥量 < 1.0%,密度 3.39 g·cm<sup>-3</sup>。粗骨料为鞍钢集团矿渣开发公司生产的钢渣颗粒,粒径为 4.7~19 mm,含泥量 < 0.3%,密度 3.62 g·cm<sup>-3</sup>。

#### 3) 外加剂

采用北京慕湖外加剂有限公司生产的聚羧酸高效减水剂 PC(粉状)。

表 1 矿渣、钢渣、水泥熟料和脱硫石膏的化学成分

成分	Loss	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	FeO	SO <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	%
矿渣		37.80	9.65	1.26	42.83	6.62				
钢渣	6.94	12.50	1.98	23.29	41.72	11.41	10.82			
水泥熟料		22.50	4.86	3.43	66.30	0.83		0.31	0.81	
脱硫石膏	8.28	3.16	1.35	0.47	33.38	7.49	0.09	45.70		

### 1.2 试验方法

#### 1) 原料准备

将需要粉磨的各种物料烘至含水率小于 1%后进行磨细,物料的磨细采用 SMΦ 500×500 试验磨机,各物料的研磨过程是首先进行单独磨细然后再

混合。物料单独磨细的细度为:脱硫石膏比表面积 350 m<sup>2</sup>·kg<sup>-1</sup>,矿渣比表面积 480 m<sup>2</sup>·kg<sup>-1</sup>,钢渣依不同的磨细时间有不同的比表面积。胶凝材料按试验设计的比例混合后,采用球磨机再混磨 10 min。混磨后的原料密封备用。

## 2) 试块成型与养护

净浆试块:将预处理后的物料充分混合后,采用水泥净浆搅拌机,按照 GB/T 1346—2001《水泥标准稠度用水量、凝结时间、安定性检验方法》中水泥净浆的拌制相关规定进行搅拌,搅拌之后浇注在尺寸为 30 mm×30 mm×50 mm 的模具中,振动成型。

混凝土试块:采用单卧轴强制式混凝土搅拌机搅拌物料,按照 GB/T 50107—2010《混凝土强度检验评定标准》中混凝土的拌制相关规定进行搅拌,搅拌之后浇注在尺寸为 100 mm×100 mm×100 mm 的模具中,振动成型。

试块成型后的试件在 20±1℃、不低于 90% 相对湿度的标准养护条件下养护至 28 d。

## 3) 抗压强度测试

净浆试块参照 GB/T17671—1999《水泥胶砂强度检验方法(ISO法)》,混凝土试块按照 GB/T50081—2002《普通混凝土力学性能试验方法标准》进行检测。

## 4) 主要分析设备

利用 DBT-127 型勃氏透气比表面积仪测定物料的比表面积;利用日本玛珂科学仪器公司 Rigaku DMAX-RB 型 X 射线衍射仪(Cu 靶,λ = 1.540 6Å,衍射角度:0~70°)进行物相分析;利用德国蔡司 EVO18 型扫描电镜进行微观形貌分析。

## 2 胶凝材料配合比的确定

### 2.1 抗压强度影响因素正交试验

试验因素和水平的确定:试验采用 4 个因素,按照 3 个水平进行正交试验设计,表 2 给出了各个影响因素及水平。

表 2 正交试验影响因素和水平

水平	因素			
	A 矿钢渣比	B 钢渣粉磨时间/min	C 水胶比	D 减水剂掺量/%
1	7:1	90	0.22	0.2
2	3:1	60	0.21	0.3
3	1:1	30	0.20	0.4

注:钢渣粉磨 30、60、90 min 后所对应的比表面积分别为 450、550、595 m<sup>2</sup>·kg<sup>-1</sup>。

### 2.2 正交试验结果分析

采用功效系数法对试验结果进行分析。功效系数法是一种在多指标等水平正交设计中,找出使各项指标都比较好的实验条件的方法。设正交设计考察 3 个指标,功效系数为  $d$ ,如第  $i$  个考核指标的效果最好,规定该指标的功效系数  $d = 1$ ;其余各考核指标的功效系数规定为该指标值与最好指标值的比值。3 个考核指标的总功效系数  $d = \sqrt[3]{d_1 d_2 d_3}$ 。在多指标的正交设计中,只比较总功效系数可大大简化分析步骤。以试样 3、7、28 d 的抗压强度作为考察指标,试验方案与功效系数法的分析结果见表 3。

表 3 3、7 和 28 d 抗压强度的功效系数与极差计算表

编号	1 (因素 A)	2 (因素 B)	3 (因素 C)	4 (因素 D)	抗压强度/(MPa·d <sup>-1</sup> )			功效系数			总功效系数 $d = \sqrt[3]{d_1 d_2 d_3}$
					3 d	7 d	28 d	$d_1$	$d_2$	$d_3$	
1	1(7:1)	1(90)	1(0.22)	1(0.2)	64.00	82.84	89.68	0.99	0.90	0.95	0.95
2	1(7:1)	2(60)	2(0.21)	2(0.3)	64.12	91.28	94.28	0.99	1.00	1.00	0.99
3	1(7:1)	3(30)	3(0.20)	3(0.4)	42.12	80.84	91.84	0.65	0.89	0.97	0.82
4	2(3:1)	1(90)	2(0.21)	3(0.4)	27.56	82.84	92.36	0.43	0.91	0.98	0.73
5	2(3:1)	2(60)	3(0.20)	1(0.2)	64.56	81.12	91.52	1.00	0.89	0.97	0.95
6	2(3:1)	3(30)	1(0.22)	2(0.3)	56.28	74.72	76.68	0.87	0.82	0.81	0.83
7	3(1:1)	1(90)	3(0.20)	2(0.3)	36.64	77.76	79.68	0.57	0.85	0.85	0.74
8	3(1:1)	2(60)	1(0.22)	3(0.4)	26.08	72.40	79.36	0.40	0.79	0.84	0.64
9	3(1:1)	3(30)	2(0.21)	1(0.2)	49.60	68.80	74.28	0.77	0.75	0.79	0.77
$\bar{K}_1$	2.77	2.42	2.42	2.67							
$\bar{K}_2$	2.51	2.59	2.50	2.57							
$\bar{K}_3$	2.15	2.42	2.51	2.19							
R	0.62	0.17	0.09	0.48							

$$\bar{K}_1 + \bar{K}_2 + \bar{K}_3 = 7.43$$

由表 3 可知,综合考虑 3、7、28 d 的抗压强度 3 个指标,编号 2(即矿钢渣比为 7:1,钢渣粉磨时间为 60 min,水胶比为 0.21,减水剂掺量为 0.3%)试样的总功效系数  $d=0.99$ ,其值最大,相应的试验条件是  $A_1B_2C_2D_2$ 。由  $K$  值看出最好的试验条件是  $A_1B_2C_3D_1$ ,又由极差  $R$  值的大小看出,对于总功效系数  $d$ ,因素的主次顺序是  $A>D>B>C$ ,即影响抗压强度的主要因素是矿渣与钢渣的比例和减水剂掺量,次要钢渣的粉磨时间因素是和水胶比。综上所述,优化出的试验条件是  $A_1B_2C_3D_1$ 。即矿钢渣比为 7:1,钢渣粉磨时间为 60 min(比表面积为  $550 \text{ m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$ ),水胶比为 0.20,减水剂掺量为 0.2%。由于这种配合比不在正交试验的 1~9 号试验方案中,故将这种配比定义为 10 号,进行后续平行试验。

### 2.3 平行试验

根据正交试验结果,选取最佳试验条件和试验配比,进行平行实验,采用 10 号配比,用标准养护的方式进行强度平行试验,具体物料配比见表 4。

表 4 平行试验物料配比 %

矿渣	钢渣	熟料	脱硫石膏	减水剂
70	10	10	10	0.2

表 5 平行试验结果  $\text{MPa} \cdot \text{d}^{-1}$

编号	抗压强度		
	3 d	7 d	28 d
I	67.22	90.24	95.06
II	60.14	93.10	94.80
III	66.88	93.28	94.22

平行试验结果见表 5。由表 5 可以看出,10 号试块的 3、7、28 d 抗压强度平均值分别为 64.75、92.21、94.69 MPa,分别优于正交试验中 3、7、28 d 抗压强度的最高值 64.56、91.28、94.28 MPa,故依照最佳试验条件  $A_1B_2C_3D_1$ ,可以确定优化胶凝材料的配方为:矿渣 70%,钢渣 10%(比表面积为  $550 \text{ m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$ ),水泥熟料 10%,脱硫石膏 10%,水胶比 0.20,减水剂(PC)掺量 0.2%。

## 3 胶凝材料水化产物分析

### 3.1 胶凝材料水化过程 XRD 分析

从图 1 中可以看出:胶凝材料在标准养护条件下,水化产物主要是 C—S—H 凝胶和 AFt,还有一部分未反应的  $C_3S$  和  $C_2S$ ,这部分  $C_3S$  和  $C_2S$  在后期的水化过程中会使试样强度继续提高。随着水化

反应的进行, $C_3S$  和  $C_2S$  的衍射强度先上升后下降,总体上来说有所降低,说明水泥熟料中  $C_3S$  和  $C_2S$  参与了反应。C—S—H 凝胶( $20\sim 50^\circ$ 的鼓包)主要由矿渣的火山灰活性反应生成,水泥熟料水化生成  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  以及钢渣中的 f-CaO 及 RO 相水化生成  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ,对矿渣在反应中后期的火山灰活性反应具有促进作用<sup>[12-13]</sup>。体系中并没有明显的  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  相和石膏相。这表明矿渣中的活性  $\text{Al}_2\text{O}_3$  与水化产物  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  和石膏生成了 AFt,胶凝材料的强度主要由 C—S—H 凝胶和 AFt 提供。

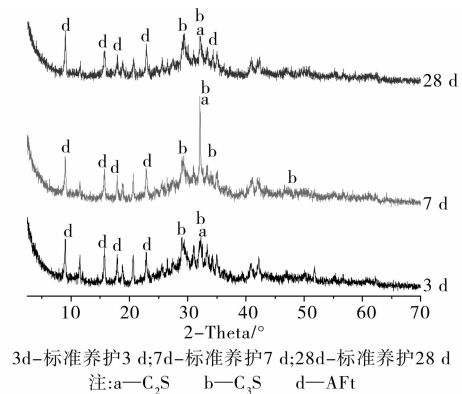


图 1 10 号胶凝材料水化 3、7、28 d 的 XRD 图谱

### 3.2 胶凝材料水化过程 SEM 分析

图 2、3 和 4 分别为 10 号胶凝材料水化 3、7 和 28 d 的 SEM 照片。

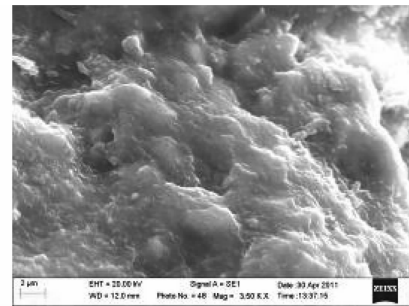


图 2 10 号胶凝材料水化 3 d 的 SEM 照片

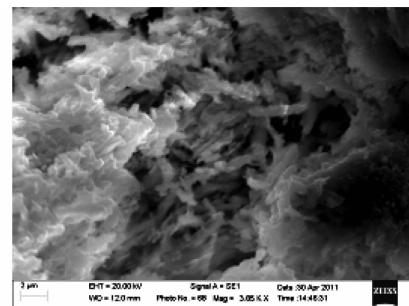


图 3 10 号胶凝材料水化 7 d 的 SEM 照片

图 2 中可以看到较为致密的片状 C—S—H 凝

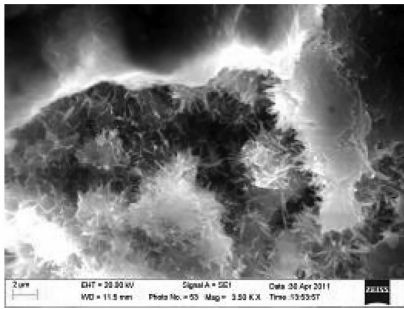


图4 10号胶凝材料水化28d的SEM照片

胶,这部分凝胶对于早期强度起到决定性作用;图3中可以看到一些片状、条状的C-S-H凝胶填充材料的孔洞部分,但结构还比较疏松;图4显示随着水化过程的深入,产生了更多的针状和团簇状的AFt,尤其是材料孔洞处产生的AFt更为明显,这部分AFt与C-S-H凝胶共同作用,提高的胶凝材料的整体密实度,使该龄期的试块强度进一步提高。

## 4 混凝土的制备及其生态友好性分析

### 4.1 混凝土的制备

为检验最优配比的胶凝材料在混凝土中应用的效果,采用10号胶凝材料配方,设计混凝土配合比。表6为混凝土配合比(采用自来水作为拌合水)。

表6 混凝土配合比  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 

水胶比	胶凝材料	钢渣细骨料	钢渣粗骨料	减水剂
0.3	561	872.8	1303	1.7

表7 不同龄期混凝土试块的抗压强度 MPa

养护方式	龄期		
	3 d	7 d	28 d
标准养护	44.12	66.35	68.81

表7为混凝土试块在标准养护条件下3、7、28d的强度,从中可以看出以10号胶凝材料配方为基础设计的混凝土配合比,制作的混凝土试块强度28d可以达到65MPa以上,且早期强度较高,3、7d强度分别达到28d强度的64%和96%。

### 4.2 冶金渣人工鱼礁混凝土的生态友好性分析

#### 1) 重金属离子分析

冶金渣人工鱼礁混凝土的原材料中含有一定量的重金属元素,当礁体投入海中,其中的重金属元素可能会浸出,导致重金属污染,危害海洋生物生长。表8为混凝土试块中镉、铅、汞、锌、铬、砷、镍、铜8种重金属离子浓度的测试结果。

表8 重金属离子测试结果

离子	国家土壤环境 二级质量标准/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	人工鱼礁混凝土/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$
镉	0.6	0.054
铅	350	15.76
汞	1.0	0.053
锌	300	3.466
总铬	350	274.3
砷	20	7.979
镍	60	15.39
铜	100	11.29

从表8可以看出,混凝土材料中重金属含量均低于国家土壤环境二级质量标准(保障农业生产,维护人体健康的土壤限制值)<sup>[14]</sup>,由此可知冶金渣用作人工鱼礁混凝土的生产不会造成重金属离子污染。

#### 2) 减排CO<sub>2</sub>分析

一般情况下,每生产1t水泥熟料,会排放1t CO<sub>2</sub><sup>[15]</sup>。以0.85t水泥熟料可生产1t普通硅酸盐水泥计算,在混凝土配合比一致的情况下,普通硅酸盐水泥混凝土单方熟料用量477kg,冶金渣人工鱼礁混凝土单方熟料用量56kg,单方即可减排CO<sub>2</sub>0.421t,如大量推广使用,节能减排的效果将更为显著。

#### 3) 消纳大量钢渣

2010年中国的钢渣总产量达0.945亿t,目前的堆积总量已达数亿t<sup>[16]</sup>,这部分钢渣占用大量土地堆存,污染环境<sup>[17]</sup>。采用冶金渣制备人工鱼礁混凝土,其中钢渣总量可达到77%,固体废弃物总量可达到98%,能够有效消纳以钢渣为主的固体废弃物。

#### 4) 铁元素对海洋生态的作用

采用钢渣作为骨料和部分胶凝材料组分的冶金渣人工鱼礁混凝土中含有较多的铁,这些铁中的少部分渗出礁体,可以提高海水中铁的含量,对藻类的附着生长、叶绿素合成以及对氮、磷的吸收具有促进作用<sup>[18]</sup>,提高藻类的附着量更能提高海洋对CO<sub>2</sub>的吸收量,对减缓温室效应具有显著作用。

#### 5) 平衡生态链

人工鱼礁的使用可以促进海洋生态链的平衡发展。藻类及大型海洋植物在礁体上附着生长,可以过滤海水,吸引各种鱼类前来觅食、栖息,鱼礁区大量生物的摄食作用能够明显抑制赤潮,礁体能够阻碍海底有机物释放,降低水体富营养化程度,起到净化水质与减少赤潮发生的效用,平衡海洋生态链,提高海洋生物的多样性<sup>[19]</sup>。

## 5 结论

1) 正交试验结果表明:对于矿渣-钢渣-熟料-石



膏胶凝材料体系,固定水泥熟料和脱硫石膏的掺量分别为10%,影响抗压强度的主要因素是矿渣与钢渣的比例和减水剂掺量,次要因素是钢渣的粉磨时间(即比表面积)和水胶比。

2)通过正交试验优化出的胶凝材料配方是矿渣70%(比表面积为 $480\text{ m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$ ),钢渣10%(比表面积为 $550\text{ m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$ ),水泥熟料10%,脱硫石膏10%,水胶比0.20,减水剂(PC)掺量0.2%。

3)在标准养护条件下,由于脱硫石膏、水泥熟料和钢渣的协同作用,矿渣发生火山灰活性反应生成大量C-S-H凝胶,同时矿渣中的活性 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 与水化产物 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 和石膏生成了AFt,这两种产物的生成过程吸收 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ,使胶凝材料试块在中后期强度持续增长,并达到较高水平。

4)采用矿渣、钢渣制备的人工鱼礁混凝土具有良好的生态友好性,胶凝材料中矿渣-钢渣复合粉掺量可达到80%,混凝土中固体废弃物总量达到98%,并且混凝土强度可以满足高强混凝土的要求。既使大量固体废弃物资源化,又能节能减排、降低生产成本。

#### 参考文献:

- [1] 陈恩义. 搭建我国矿渣粉行业交流平台——全球主要冶金渣及矿渣粉协会综述[J]. 混凝土世界, 2010(11): 16-20.  
Chen E Y. To build the slag powder industry platform—the review of world's leading association of metallurgical slag and slag powder [J]. China Concrete, 2010(11): 16-20.
- [2] 王向锋, 于淑娟, 侯洪宇, 等. 鞍钢钢渣综合利用现状及其发展方向[J]. 鞍钢技术, 2009(3): 4-10.  
Wang X F, Yu S J, Hou H Y, et al. Current state of multipurpose use of slags in angang and R & D trend [J]. Angang Technology, 2009(3): 4-10.
- [3] Zhang S H, Xue X X, Liu X, et al. Current situation and comprehensive utilization of iron ore tailing resources [J]. Journal of Mining Science, 2006, 42(4): 403-407.
- [4] 朱桂林, 孙树杉, 夏春. 实现钢渣“零排放”对发展循环经济, 推进钢铁行业节能减排具有重要作用[C]//冶金循环经济发展论坛论文集, 北京: 2008: 308-311.
- [5] Hisham Q, Faisal S, Ibrahim A. Use of low CaO unprocessed steel slag in concrete as fine aggregate [J]. Construction and Building Materials, 2009, 23(2): 1118-1125.
- [6] Ahmedzadea P, Sengozb B. Evaluation of steel slag coarse aggregate in hot mix asphalt concrete [J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 165: 300-305.
- [7] 胡曙光. 先进水泥基复合材料[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 216.
- [8] Peng Y Z, Hu S G, Ding Q J. Dense packing properties of mineral admixtures in cementitious [J]. Particuology, 2009, 7(5): 399-402.
- [9] 陈心, 冯全英, 邓中日. 人工鱼礁建设现状及发展对策研究[J]. 海南大学学报: 自然科学版, 2006, 24(3): 83-88.  
Chen X, Feng Q Y, Deng Z R. A stusyng on present situation of man-made reef constructions and its development countermeasures [J]. Journal of Hainan University: Natural Science, 2006, 24(3): 83-88.
- [10] 刘惠飞. 日本人工鱼礁研究开发的最新动向[J]. 渔业现代化, 2002(1): 25-30.  
Liu H F. The latest trends of research and development of Japan man-made reefs [J]. Fishery Modernization, 2002(1): 25-30.
- [11] 刘金霞, 王琦, 谷德贤. 不同材料类型人工鱼礁建设的经济效益浅析[J]. 河北渔业, 2008(6): 3-7.  
Liu J X, Wang Q, Gu D X. The analysis of economic effect in the construction of different material of artificial reefs [J]. Hebei Fisheries, 2008(6): 3-7.
- [12] Zhang T S, Liu F T, Liu S Q, et al. Factors influencing the properties of a steel slag composite cement [J]. Advances in Cement Research, 2008, 20(4): 145-151.
- [13] 伏程红, 倪文, 张旭芳, 等. 矿渣-粉煤灰基高性能混凝土专用胶凝材料[J]. 北京科技大学学报, 2011, 33(5): 606-612.  
Fu C G, Ni W, Zhang X F, et al. Slag-fly ash based cementitious materials special for high performance concrete [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2011, 33(5): 606-612.
- [14] 中华人民共和国标准 GB 15618—1995. 土壤环境质量标[S]. 北京: 中国标准出版社, 1995.
- [15] 崔源声. 中国水泥工业节能减排的潜力及主要对策[C]//2006年水泥技术交流会暨第八届全国水泥技术交流会论文集, 昆明, 2006: 28-33.
- [16] 张凯峰, 尚建丽. 钢渣建材综合利用的生态化及绿色度评价的研究[J]. 中国陶瓷, 2011(10): 40-42.  
Zhang K F, Shang J L. Study on the ecological and green degree evaluation of comprehensive utilization of steel slag as building materials [J]. China Ceramics, 2011(10): 40-42.
- [17] 中国资源综合利用协会. 大宗工业固体废物综合利用发展报告[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2009.
- [18] 陈慈美, 蔡阿根, 陈雷. 铁对海洋硅藻的生物活性形式及其对藻类生长的影响[J]. 海洋通报, 1993(3): 49-54.  
Chen C M, Cai A G, Chen L. Bioavailability species of Fe for marine diatom and effect on diatom growth [J]. Marine Science Bulle, 1993(3): 49-54.
- [19] 陈力群, 张朝晖, 王宗灵. 海洋渔业资源可持续利用的一种模式——海洋牧场[J]. 海岸工程, 2006, 25(4): 71-76.  
Chen L Q, Zhang Z H, Wang Z L. A Model for marine fishery resources sustainable utilization——arine ranching [J]. Coastal Engineering, 2006, 25(4): 71-76.