

文章编号:1673-2049(2014)03-0118-06

磁性指数对铁尾矿水泥基材料特性的影响

李晓光,景帅帅,马玉平

(长安大学 建筑工程学院,陕西 西安 710061)

摘要:为实现铁尾矿代替天然河砂制备水泥基材料的目标,以 8 种磁性指数的铁尾矿和天然河砂为骨料分别制备了水泥砂浆和混凝土试件。通过测试砂浆的力学性能、试件断面的显微硬度、孔结构参数以及混凝土的抗氯离子渗透性能,分析了磁性指数对铁尾矿水泥基材料特性的影响。试验结果表明:在相同配合比下,铁尾矿砂浆力学性能优于天然河砂砂浆;提高铁尾矿的磁性指数,砂浆力学性能呈现下降趋势,但是磁性指数为 40% 的铁尾矿砂浆强度仍然较高;当磁性指数为 0% 时,铁尾矿砂浆界面区显微硬度最高,磁性指数为 40% 的铁尾矿砂浆次之;磁性指数为 0% 和 40% 的铁尾矿砂浆孔隙率较低且无害孔含量更多;通过磁选分离降低铁尾矿的磁性指数,有利于增强铁尾矿混凝土的抗氯离子渗透性能,提高其耐久性。

关键词:铁尾矿;磁性指数;力学性能;显微硬度;抗氯离子渗透性能;水泥砂浆;耐久性

中图分类号:TU528.56

文献标志码:A

Effect of Magnetic Index on Properties of Cement-based Materials with Iron Ore Tailings

LI Xiao-guang, JING Shuai-shuai, MA Yu-ping

(School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, Shaanxi, China)

Abstract: A series of specimens of cement mortar and concrete were fabricated with iron ore tailings (IOT) containing eight different magnetic indexes and river sand respectively for purpose of application of IOT in cement-based materials. Mechanical properties, micro-hardness values of section cross, parameters of pore structure of mortars and anti-chloride permeability of concrete for specimens were measured to clarify effect of magnetic index on properties of cement-based materials with IOT. The test results show that mechanical property of IOT mortar is superior to that of river sand mortar and decreases with increasing of magnetic index of IOT, except mortar with 40% magnetic index still acquiring higher strength. Maximum micro-hardness can be measured on interface region of IOT mortar as 0% magnetic index, IOT mortar of 40% magnetic index secondly. Lower porosity and more harmless pore can be discovered in the IOT mortars with 0%, 40% magnetic indexes. Magnetic separation to IOT can generate a high anti-chloride permeability of concrete resulting in better long term durability.

Key words: iron ore tailing; magnetic index; mechanical property; micro-hardness; anti-chloride permeability; cement mortar; durability

收稿日期:2014-03-19

基金项目:陕西省科技统筹创新工程计划项目(2013KTCG02-02)

作者简介:李晓光(1969-),男,辽宁沈阳人,副教授,工学博士,E-mail:1372914397@qq.com。

0 引 言

铁尾矿是一种排放量巨大、综合利用率较低的工业固体废弃物,环境危害作用明显^[1-2]。目前虽然有多种利用方案,如制备路面混凝土及基层等^[3],配制建筑用水泥混凝土、水泥砂浆、免烧砖、轻质保温材料等^[4-7],但是循环利用效率仍然较低。利用铁尾矿代替天然河砂制备水泥砂浆或混凝土用细骨料,可实现铁尾矿的大宗量利用,既解决了天然河砂资源短缺问题,又提高了利用率,降低了环境污染。目前铁尾矿应用较少,其材料特性与天然河砂又存在很多差异,以它为骨料制备的水泥基胶凝材料的物理力学性能值得研究与关注。

在铁尾矿中仍含有大量可磁选颗粒,如果进行回收和利用,不但能充分提高有价值金属元素的回收利用率,而且进一步降低了铁尾矿的综合利用成本。本文中笔者通过对铁尾矿进行不同程度的磁选后,研究铁尾矿中可磁选颗粒含量对铁尾矿代替天然河砂力学等性能影响,并结合微观分析手段提出其影响机理,以上研究结果将为综合利用铁尾矿制备水泥砂浆提供技术支持。

1 原材料与试验方案

1.1 原材料

主要原材料包括:铁尾矿取自陕西商洛柞水县某铁尾矿库;天然河砂产自西安沔河,其细度模数为 2.64;水泥为陕西冀东水泥股份有限公司产 P·C 32.5 水泥;石子选用粒径为 5~30 mm 的沔河碎石。参照《建筑材料放射性核素限量》(GB 6566—2001)^[8],对铁尾矿进行放射性检测,证明铁尾矿满足放射性指标要求。按照《建设用砂》(GB/T 14684—2011)^[9]中的规定方法进行了针对铁尾矿的碱骨料反应测试。结果表明:无潜在碱-硅酸反应危害。

准确称取粒径分别为 0.3~0.6 mm、0.6~1.18 mm 两个粒级的铁尾矿各 22.5 kg。采用磁铁磁吸铁尾矿,直至磁性颗粒被完全磁吸。称量铁尾矿磁性颗粒的质量,并根据式(1)计算磁性指数^[10]

$$I=(1-\frac{m_1}{m_0})\times 100\%$$

(1)

式中: I 为磁性指数; m_1 为铁尾矿磁选后剩余质量; m_0 为铁尾矿磁选前总质量。

表 1 为铁尾矿磁选后的磁性指数,表 2 为采用德国 BRUKER AXS 公司产 S4 PIONEER 型 X-荧

表 1 铁尾矿磁选后的磁性指数
Tab. 1 Magnetic Index of IOT After Magnetic Separations

粒级范围/mm	总质量/kg	可磁选颗粒质量/kg	磁性指数/%
0.30~0.60	22.5	8.505	37.8
0.60~1.18	22.5	9.404	41.8

表 2 磁选后铁尾矿颗粒的含铁率

Tab. 2 Ferrous Element Content in IOT After Magnetic Separations

粒级范围/mm	试验对象	含铁率/%	压碎指标/%
0.30~0.60	可磁选颗粒	18.71	5.23
	剩余颗粒	18.02	5.17
	铁尾矿原样	18.44	5.19
0.60~1.18	可磁选颗粒	16.43	6.14
	剩余颗粒	15.72	6.16
	铁尾矿原样	16.15	6.15

注:含铁率为质量分数。

光元素分析仪,对 2 个粒级铁尾矿原样磁选前后的含铁率进行测定得到的结果。

在表 2 中,可磁选颗粒的磁性指数为 100%,剩余颗粒的磁性指数为 0%。2 个粒级的铁尾矿中,可磁选颗粒、剩余颗粒及铁尾矿原样的含铁率近似。其中粒级范围为 0.3~0.6 mm 的铁尾矿颗粒中,铁尾矿原样、可磁选颗粒及剩余颗粒的含铁率均略高于 0.6~1.18 mm 粒级范围的颗粒。在铁尾矿原样中,0.3~0.6 mm 与 0.6~1.18 mm 两个粒级范围的铁尾矿,其质量比大致为 1:1,故铁尾矿原样的磁性指数为 40%。按照《建设用砂》(GB/T 14684—2011)^[9]中的规定,分别测量 2 个粒级的铁尾矿中可磁选颗粒、剩余颗粒以及铁尾矿原样的压碎指标。结果表明:0.6~1.18 mm 粒级的压碎指标值高于 0.3~0.6 mm 粒级,可见,小粒级的铁尾矿强度总体略高于大粒级。各粒级铁尾矿中可磁选颗粒、剩余颗粒以及铁尾矿原样的压碎指标值较接近,当采用压碎指标反映不同磁性指数的铁尾矿自身强度时无显著差异。

1.2 试验方案

通过调整铁尾矿中可磁选颗粒的比例,得到含不同可磁选颗粒的细骨料,其设计方案如表 3 所示。按照水泥 450 g、细骨料 1 350 g、水灰比 0.50 配制不同磁性指数的细骨料并制备水泥砂浆,将以上 9 种细骨料制成水泥砂浆且分别成型试件,在(20±1)℃的水中养护至 3,7,28 d 龄期,分别测试其抗折强度和抗压强度。

采用 HXD-1000TMSC/LCD 带图像分析自动转塔显微硬度计,对铁尾矿试件断面进行显微硬度

表 3 细骨料的设计方案

Tab. 3 Design Scheme of Fine Aggregate

试件 编号	0.30~0.60 mm 粒级		0.60~1.18mm 粒级		磁性指 数/%
	颗粒质量/g		颗粒质量/g		
	可磁选颗粒	剩余颗粒	可磁选颗粒	剩余颗粒	
S1	0	675	0	675	0
S2	64	611	71	604	10
S3	128	547	141	534	20
S4	192	483	212	463	30
S5	255	420	282	393	40
S6	321	354	354	321	50
S7	481	194	532	143	75
S8	675	0	675	0	100
S9	675		675		

注:S9试件的骨料为0.3~0.6 mm与0.6~1.18 mm两个粒级纯天然河砂,按质量比为1:1复配而成。

测试,从亚微观角度分析铁尾矿砂浆骨料与水泥石本体相之间的力学性能关系,测试中采用维氏压头测试试件表面的显微硬度。

采用AutoPore IV 9500型压汞仪,测试孔结构及孔隙,分析不同铁尾矿砂浆试件内部的孔结构和孔隙特征及其对砂浆力学性能的影响。

为反映不同磁性指数的铁尾矿代替天然河砂制备水泥基材料的耐久性,采用铁尾矿制备了C30水泥混凝土,开展了铁尾矿代替天然河砂混凝土的抗氯离子渗透试验。参照《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》(GB/T 50082—2009)^[11],采用快速氯离子迁移系数法(RCM法)和电通量法进行抗氯离子渗透性能测试。测试设备采用SW-RCM扩散系数测定仪和SW-6D型抗氯离子电通量测定仪。C30混凝土的配合比见表4。

表 4 混凝土配合比

Tab. 4 Mix Proportions of Concrete

混凝土强度等级	各材料用量/(kg·m ⁻³)			
	水泥	铁尾矿	石子	水
C30	461	512	1 252	175

2 试验结果与分析

2.1 磁性指数对水泥砂浆力学性能的影响

随磁选颗粒含量,即磁性指数的变化,铁尾矿代替天然河砂作为细骨料制备的水泥胶砂试件的力学性能变化如图1,2所示。

由图1,2可知:随磁性指数的增加,水泥砂浆的抗折强度和抗压强度呈现类似的变化规律。在相同的胶砂配合比条件下,在3,7,28 d三个龄期,不同

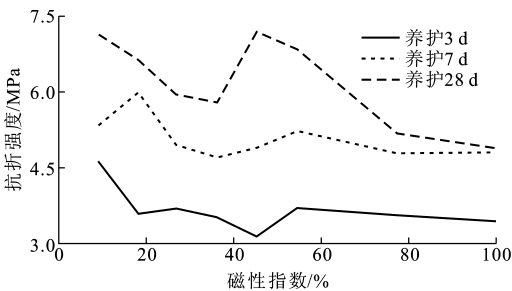


图 1 磁性指数与砂浆抗折强度的关系
Fig. 1 Relations of Magnetic Index and Flexural Strength of Mortar

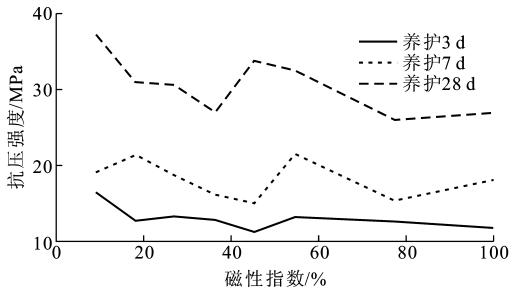


图 2 磁性指数与砂浆抗压强度的关系
Fig. 2 Relations of Magnetic Index and Compressive Strength of Mortar

磁性指数的铁尾矿砂浆抗折强度均高于天然河砂砂浆试件。随磁性指数的增加,3个龄期的抗折强度大致呈现下降的趋势。但是在养护28 d后,当磁性指数约为39.8%时(接近为铁尾矿原样)其抗折强度有所提高,接近磁性指数为0%的铁尾矿。

铁尾矿砂浆试件的抗压强度总体高于天然河砂砂浆试件。随磁性指数的提高,胶砂试件的抗压强度总体呈波动下降的趋势。当铁尾矿的磁性指数为0%时,抗压强度最大;当磁性指数为100%时,抗压强度最小。

磁性指数在40%左右(铁尾矿原样)时,铁尾矿砂浆早期(3,7 d龄期)抗压强度偏低,接近天然河砂的砂浆试件。在28 d时,铁尾矿砂浆抗压强度又明显增大,比天然河砂的砂浆试件高出近7.3 MPa。

由此可知,对铁尾矿砂浆进行完全磁选后,各龄期磁性指数为0%的铁尾矿砂浆力学性能将得到最大程度的提高。不仅实现了铁尾矿原样中有价金属元素的进一步回收和利用,而且利用磁选后的剩余颗粒制备成的水泥砂浆,其力学性能得到了进一步提升。

铁尾矿砂浆的磁性指数对砂浆力学性能的影响机理较为复杂,将可能受到不同磁性指数的铁尾矿的颗粒强度、形貌、级配以及集料颗粒与水泥浆体界

面区等综合因素的影响。以下将通过阐明集料与水泥石本体相的界面特征,探索磁性指数对水泥砂浆力学性能的影响机理。

2.2 磁性指数对水泥砂浆显微硬度的影响

养护 28 d 后不同磁性指数的铁尾矿砂浆试件断面的显微硬度见图 3。图 3(a)~(c)为磁性指数分别为 0%,40%,100%时的铁尾矿砂浆试件断面中骨料本体相与水泥石本体相的显微硬度变化;图 3(d)为天然河砂水泥砂浆断面的显微硬度。图 3 中垂直实线表示砂浆中骨料本体相与水泥石本体相的界面。试验力为 2.50 N,压痕的对角线长度约为 25 μm 。这里定义骨料与水泥石界线左右各 25 μm (即 $-25\sim 25\ \mu\text{m}$)处,为骨料本体相与水泥石本体相之间的界面区相(图 3 中 2 条虚线之间部分)。

由图 3(a)~(d)可以看出:砂浆的骨料本体相与水泥石本体相界面两侧的显微硬度存在较大差异,总体而言,骨料本体相的硬度值高于水泥石本体相的。在本文研究所确定的界面区中,由水泥石本体相至骨料本体相普遍存在显微硬度快速上升的现象。

骨料本体相、界面区相以及水泥石本体相的相关测试参数见表 5。由表 5 可知:磁性指数为 0%和 100%的铁尾矿砂浆,其骨料本体相与水泥石本体相的显微硬度平均值相当,但是界面区相前者显著高于后者。由标准偏差可知,铁尾矿砂浆界面区附近显微硬度提升更为显著。当磁性指数为 40%时,骨料本体相显微硬度高于磁性指数为 0%和 100%的铁尾矿,但是由于同时存在磁性与非磁性成分,导致骨料不均匀性提高,显微硬度呈显著波动,且水泥石本体相硬度平均值偏低。界面区显微硬度平均值低于磁性指数为 0%的铁尾矿而高于磁性指数为 100%的铁尾矿。

水泥石本体相与集料结合紧密,使得界面区密实均匀,具有较高的硬度值,这可能是磁性指数为 40%的铁尾矿砂浆力学性能高于磁性指数为 100%的铁尾矿砂浆的主要原因之一。对比用天然河砂的砂浆试件,天然河砂骨料本体相的显微硬度平均值

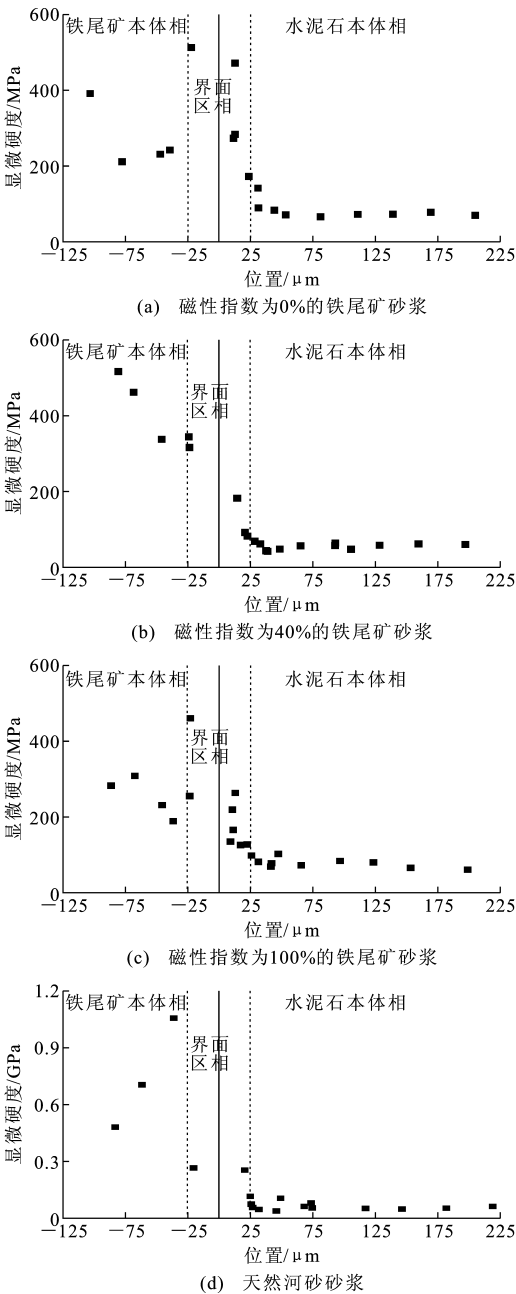


图 3 不同磁性指数的铁尾矿及天然河砂砂浆试件的显微硬度

Fig.3 Micro-hardness of IOT and River Sand Mortar Specimens with Different Magnetic Indexes

最高,但是它的界面区相和水泥石本体相的硬度值均偏低,导致其力学性能受到影响。

表 5 不同磁性指数的铁尾矿砂浆断面的显微硬度

参数	磁性指数为 0%的铁尾矿砂浆		磁性指数为 40%的铁尾矿砂浆		磁性指数为 100%的铁尾矿砂浆		天然河砂砂浆	
	\bar{H}/MPa	S/MPa	\bar{H}/MPa	S/MPa	\bar{H}/MPa	S/MPa	\bar{H}/MPa	S/MPa
骨料本体相	269.5	82.5	571.0	214.6	253.3	46.0	726.2	281.7
界面区相	278.3	162.3	179.4	109.5	143.1	63.8	172.8	94.0
水泥石本体相	73.5	5.5	63.9	9.1	78.1	13.5	60.0	17.5

注: \bar{H} 为显微硬度的平均值; S 为显微硬度标准差。

2.3 磁性指数对水泥砂浆孔结构的影响

采用美国麦克公司产 Auto Pore IV 型压汞仪对 28 d 龄期时,磁性指数分别为 0%,40%,100%的铁尾矿砂浆及天然河砂砂浆试件进行孔结构测试,孔隙特征分布见图 4、5。

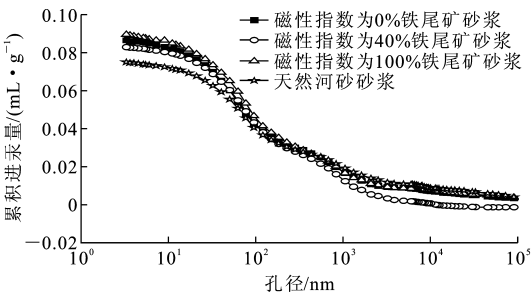


图 4 孔径分布的积分曲线

Fig. 4 Integral Curves of Pore Size Distribution

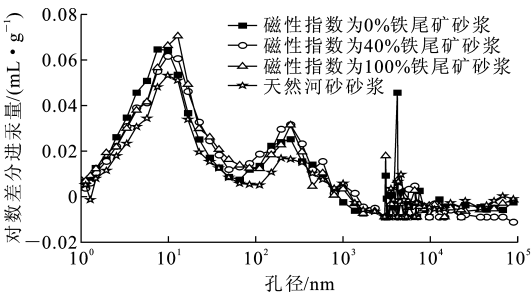


图 5 孔径分布的微分曲线

Fig. 5 Differential Curves of Pore Size Distribution

由图 4 可知:磁性指数为 0%,40%,100%的铁尾矿砂浆,在孔径小于 150 nm 时,孔体积的累积分布高于天然河砂砂浆;在孔径大于 150 nm 时,则低于天然河砂砂浆。可见,与铁尾矿砂浆相比,天然河砂砂浆试件中含有较少的小孔,富含更多的大孔,这也是该试件力学性能偏低的主要原因。由图 5 可知:磁性指数为 0%,40%,100%的铁尾矿砂浆和天然河砂砂浆的最可几孔径分别为 50,62,77,64 nm。最可几孔径越小,表明砂浆硬化体中孔隙分布的总体尺寸越小,磁性指数为 0%的铁尾矿砂浆最可几孔径最小。表 6 为砂浆孔结构的参数。

表 6 砂浆孔结构的参数

磁性指数/%	孔隙率/%	平均孔径/mm	不同孔径(nm)下的砂浆分布概率/%			
			<10	10~100	100~1 000	>1 000
0	18.68	44.6	6.3	52.2	25.2	16.3
40	18.08	49.7	4.0	49.8	31.1	15.1
100	19.33	45.2	5.2	48.6	27.6	18.6
天然河砂	19.41	49.9	4.5	46.7	23.2	25.6

Tab. 6 Pore Structure Parameters of Mortar

水泥石的孔按孔径大小可分为 4 级:孔径小于 10 nm 为无害孔;孔径在 10~100 nm 之间为过渡孔;孔径在 100~1 000 nm 之间为毛细孔;孔径大于 1 000 nm 为多害孔^[12]。由表 6 可知:磁性指数为 0%和 40%的铁尾矿砂浆的孔隙率相当,均低于磁性指数为 100%的铁尾矿砂浆及天然河砂砂浆。

磁性指数为 0%的铁尾矿砂浆中孔径在 10 nm 以下的无害孔以及孔径为 10~100 nm 的过渡孔含量最高,其次为磁性指数为 40%的铁尾矿砂浆,磁性指数为 100%的铁尾矿砂浆中孔径大于 1 000 nm 的多害孔含量较高,对力学性能的影响较大。天然河砂砂浆试件多害孔含量最高,导致其力学性能变差。

孔隙分布充分说明,由于不含可磁选颗粒的铁尾矿砂浆中无害孔含量更高,而过渡孔和毛细孔含量相对较低,所以试件具有更高的抵抗外部荷载的能力^[13],不同磁性指数的铁尾矿砂浆总体孔隙分布的差异性同样将影响水泥砂浆的力学性能。

2.4 磁性指数对混凝土抗氯离子渗透性能影响

按照表 4 中的混凝土配合比,分别采用磁性指数为 0%,40%,100%的铁尾矿以及天然河砂作为细集料,制备了混凝土。养护 28 d 后,试件的氯离子扩散系数以及电通量测试结果见表 7。

表 7 混凝土抗氯离子渗透性能

Tab. 7 Anti-chloride Permeability of Concrete		
磁性指数/%	电通量/C	氯离子扩散系数/(10 ⁻¹² m ² ·s ⁻¹)
0	1 995	8.2
40	2 164	9.0
100	2 239	9.4
天然河砂	2 153	10.4

由表 7 可知:当提高铁尾矿磁性指数时,混凝土的电通量及氯离子扩散系数均呈增加趋势,表明混凝土抗氯离子渗透能力逐渐下降。采用经磁选后的剩余颗粒代替天然河砂配制混凝土,更有利于混凝土耐久性的提高,这与水泥砂浆力学性能、显微硬度以及孔结构变化规律所反映的结果具有良好的一致性。采用经磁选降低磁性指数后的铁尾矿制备的水泥基材料具有更为密实均匀的内部结构和力学性能,其耐久性得到了提高。

3 结 语

(1)铁尾矿砂浆抗折强度、抗压强度均高于天然河砂砂浆试件。随铁尾矿磁性指数的增加,砂浆试件的抗压强度总体呈波动下降趋势。磁性指数为

0%的铁尾矿砂浆强度最高,磁性指数为40%的铁尾矿砂浆次之。当磁性指数为100%时,砂浆抗压抗折强度最小。对铁尾矿砂浆进行完全磁选后,各龄期不含可磁选颗粒的铁尾矿砂浆力学性能将得到最大程度的提高。

(2)铁尾矿砂浆骨料本体相硬度值高于水泥石本体相。磁性指数为0%的铁尾矿砂浆界面区相中显微硬度高于磁性指数为40%和100%的铁尾矿砂浆。磁性指数为40%的铁尾矿骨料本体相显微硬度存在较大波动,但是界面区显微硬度高于磁性指数为100%的铁尾矿砂浆。

(3)铁尾矿砂浆与天然河砂砂浆相比,富含更多的小尺寸孔。当磁性指数为0%时,铁尾矿砂浆最可几孔径最小。磁性指数为0%和40%的铁尾矿砂浆孔隙率均低于磁性指数为100%的铁尾矿及天然河砂砂浆,且含有更多的无害孔。

(4)采用铁尾矿配制的C30混凝土,具有较好的抗氯离子渗透性能,其中磁性指数为0%的铁尾矿配制的混凝土具有更高的耐久性。

(5)通过对铁尾矿进行磁选,不但可回收高附加值的有价金属,而且利用磁选后的剩余颗粒制备水泥基材料,可进一步提高其力学性能和耐久性。

参考文献:

References:

- [1] KUMAR S, KUMAR R, BANDOPADHYAY A. Innovative Methodologies for the Utilisation of Wastes from Metallurgical and Allied Industries[J]. Resource, Conservation and Recycling, 2006, 48(4): 301-314.
- [2] 欧洲共同体联合研究中心. 尾矿和废石——综合污染预防与控制最佳可行技术[M]. 胡华龙, 邱琦, 温雪峰, 等, 译. 北京: 化学工业出版社, 2011.
Joint Research Center, European Communities. Reference Document on Best Available Techniques for Management of Tailings and Waste-rock in Mining Activities[M]. Translated by HU Hua-long, QIU Qi, WEN Xue-feng, et al. Beijing: Chemical Industry Press, 2011.
- [3] 李荣海, 汪建, 周志华, 等. 铁尾矿在公路工程中的应用[J]. 矿业工程, 2007, 5(5): 52-54.
LI Rong-hai, WANG Jian, ZHOU Zhi-hua, et al. Research of Iron Tailings Application in the Highway Engineering[J]. Mining Engineering, 2007, 5(5): 52-54.
- [4] 黄世伟, 李妍妍, 程麟, 等. 用梅山铁尾矿制备免烧

免蒸砖[J]. 金属矿山, 2007(4): 81-84.

HUANG Shi-wei, LI Yan-yan, CHENG Lin, et al. Preparation of Burning-and Steam Curing-free Bricks from Meishan Iron Ore Tailings[J]. Metal Mine, 2007(4): 81-84.

- [5] 宋少民. 尾矿人工砂高性能混凝土研究[J]. 施工技术, 2005, 34(增2): 92-95.
SONG Shao-min. Study on High Performance Concrete with Tail Mineral Sand[J]. Construction Technology, 2005, 34(S2): 92-95.
- [6] LI C, SUN H H, YI Z L, et al. Innovative Methodology for Comprehensive Utilization of Iron Ore Tailings Part A: The Residues After Iron Recovery from Iron Ore Tailings to Prepare Cementitious Material[J]. Journal of Hazardous Material, 2010, 174(1/2/3): 78-83.
- [7] YU C, LI X, ZHAO R, et al. Utilizing Meishan Iron-mine Tailings Instead of Iron Powder to Produce High-quality Cement[J]. Cement Engineering, 2008(5): 19-23.
- [8] GB 6566—2001, 建筑材料放射性核素限量[S].
GB 6566—2001, Limits of Radionuclides in Building Materials[S].
- [9] GB/T 14684—2011, 建设用砂[S].
GB/T 14684—2011, Sand for Construction[S].
- [10] 刘文永. 铁尾矿制备建筑材料技术[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2012.
LIU Wen-yong. Technology of Manufactory of Building Materials with Iron Ore Tailings[M]. Beijing: China Building Materials Press, 2012.
- [11] GB/T 50082—2009, 普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准[S].
GB/T 50082—2009, Standard for Test Methods of Long-term Performance and Durability of Ordinary Concrete[S].
- [12] 契尔金斯基 Ю С. 聚合物水泥混凝土[M]. 张留城, 夏巨敏, 译. 北京: 中国建筑工业出版社, 1987.
Черкинский Ю С. Cement and Concrete with Polymer[M]. Translated by ZHANG Liu-cheng, XIA Jumin. Beijing: China Architecture & Building Press, 1987.
- [13] 刘数华, 阎培渝. 石灰石粉对水泥浆体填充效应和砂浆孔结构的影响[J]. 硅酸盐学报, 2008, 36(1): 69-77.
LIU Shu-hua, YAN Pei-yu. Influence of Limestone Powder on Filling Effect of Cement Paste and Pore Structure of Sand Grout[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2008, 36(1): 69-77.