第44卷 第10期
2012年10月
哈尔滨工业大学学报
JOURNAL OF HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY
Vol. 44 No. 10
Oct. 2012

Fe_2O_3 对污泥与底泥制备轻质陶粒性能的影响

刘明伟，许国仁，李圭白

（哈尔滨工业大学 城市水资源与水环境国家重点实验室，150090 哈尔滨）

摘　要：为研究在以污水污泥和河道底泥为主要原料制取轻质陶粒过程中，Fe_2O_3 质量分数对陶粒性能的影响，对陶粒的物理性能、表面形态、抗压强度和晶体构成进行研究，结果表明，Fe_2O_3 质量分数在3.5% ~7%时，可取得松散容重和表观密度较高、吸水率比较小、抗压强度较高的陶粒. 扫描电子显微镜（SEM）分析表明，随着 Fe_2O_3 质量分数的增加，陶粒表面玻璃化效果明显. 在 Fe_2O_3 质量分数为5%时，可得到致密性较好、表面微孔分布均匀的陶粒. Fe_2O_3 质量分数在3.5% ~7%时，陶粒的抗压性能良好（14 MPa 以上）. X 射线衍射分析（XRD）表明，陶粒中主要晶体为石英、钠钙长石、蓝晶石和赤铁矿，内部以稳定的硅酸盐晶体为主. 随着 Fe_2O_3 质量分数的增加，更多的 Fe_2O_3 可以在高温条件下转换为晶体结构的赤铁矿. 在利用污水污泥与河道底泥制取轻质陶粒的过程中，控制 Fe_2O_3 质量分数在3.5% ~7%较合适.

关键词：污水污泥；河道底泥；轻质陶粒；三氧化二铁；物相组成

中图分类号：TH133；TP183　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**0367 -6234(2012)10 -0018 -04

Effect of Fe_2O_3 on the characteristics of lightweight aggregate made from sewage sludge and river sediment

LIU Ming-wei, XU Guo-ren, LI Gui-bai

(State Key Laboratory of Urban Water Resource and Environment, Harbin Institute of Technology, 150090 Harbin, China)

Abstract: The aim of this article is to investigate the effect of Fe_2O_3 contents on the characteristics of lightweight aggregate that is made from sewage sludge and river sediment. The physical characteristics, compressive strength, morphological structures and crystalline phases of lightweight aggregate were studied, and the results showed that the lightweight aggregate with higher bulk density, higher apparent density, and lower water absorption could be obtained at Fe_2O_3 contents between 3.5% -7%. The SEM analysis points out that the surface of lightweight aggregate exhibits more vitrification phenomenon as the Fe_2O_3 contents increase, the dense surface of lightweight aggregate with evenly distributed micro porous can be found at Fe_2O_3 contents = 5%. The lightweight aggregate with stronger compressive strength (more than 14 MPa) can be obtained when Fe_2O_3 contents are between 3.5% -7%. The XRD analysis implies that the main crystal phase in the lightweight aggregate are quartz, albite-anorthite, kyanite and hematite, and the silicate crystals with stable structure are the main crystal in the internal of lightweight aggregate. As the Fe_2O_3 contents increase, more Fe_2O_3 will transform to hematite with crystal structure. The results indicate that the Fe_2O_3 contents between 3.5% -7% are appropriate in the process of making lightweight aggregate from sewage sludge and river sediment.

Key words: sewage sludge; river sediment; lightweight aggregate; Fe_2O_3; crystalline phases

目前，我国的城市污水处理量迅速增长，而污水处理厂所产生的污泥有80%没有得到妥善处理. 传统的污泥处理方法包括填埋、焚烧、土地利用等，由于这些方法容易破坏生态环境、污染空气、经济成本高，都有可能产生二次污染等问题，

收稿日期：2012 -03 -12.
基金项目：国家高技术研究发展计划（863计划）项目（2009AA064704）；城市水资源与水环境国家重点实验室导向类课题（2010DX13）；新世纪优秀人才项目（NCET-08-161）.
作者简介：刘明伟（1982—），男，博士研究生；
许国仁（1968—），男，教授，博士生导师；
李圭白（1931—），男，博士生导师，中国工程院院士.
通信作者：许国仁，xgr@ hit. edu. cn.

在实际应用中受到一定限制[1-3]. 将污泥和其他原料掺杂在一起制作材料，如建筑材料、制砖、制作陶粒等在国内外受到越来越多的关注[4-10]. 污泥制取陶粒是目前研究的一个热点，然而利用污泥制作陶粒仍要掺杂大量黏土，污泥本身掺入比例不是很高. 由于黏土是不可再生资源，找寻其他可以替代黏土的原料生产陶粒具有重要的意义.

随着大量的工业废水和市政污水排入到河道中，目前，我国大多数河流均已受到不同程度的污染. 经过长时间的累积，受污染河流中的有毒有害物质，特别是重金属有可能大量沉积在底泥中，受污染底泥会恶化水质，破坏河流的生态环境，而河道底泥的处理和处置也成了普遍关注的问题[11-12]. 河道底泥中泥沙质量分数高，含有大量构成陶粒主要成份的 SiO_2、Al_2O_3、Fe_2O_3、CaO 和 MgO 等. 利用河道底泥替代黏土，掺杂一定的污水污泥制取轻质陶粒应是可行的. 可以有效地防止污水污泥和河道底泥的二次污染，实现污泥的资源化.

本文考察了利用上述两种污泥制作陶粒的过程中，不同质量分数的 Fe_2O_3 对陶粒物理性能、表面形态、抗压强度和晶体构成的影响，确定最佳的 Fe_2O_3 质量分数范围，为制作陶粒提供可靠的依据.

1　实　验

1.1　实验原料

污水污泥采用哈尔滨文昌污水处理厂的脱水污泥，河道底泥取自哈尔滨何家沟上游. 污泥与底泥的成分分析见表 1 所示.

表 1　污水污泥和河道底泥化学成分分析　　%

种类	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	其他无机物	含碳物质
污水污泥	55.20	14.10	3.92	2.70	1.31	0.18	2.33	<4.86	<15.4
河道底泥	9.97	10.67	4.05	2.55	0.90	0.30	1.45	<11.10	<59.0

1.2　试验方法

两种污泥经晾干后，研磨成粉末状，污水污泥和河道底泥按 1∶1 的比例混合，添加一定比例（原料质量的 10%）的水玻璃，制成球状；通过添加或减小 Fe_2O_3 固体粉末调节原料中 Fe_2O_3 的质量分数；然后将样品在马弗炉中1 100 ℃下烧制，制得所需陶粒样品.

1.3　分析方法

采用 Philips PW 4400 XRX 射线荧光光谱仪（XRF）、INSTRON 5569 自动材料测试仪、HITCHAIS 4800 HSD 扫描电子显微镜、D/max－γβ 旋转阳极 X 射线衍射仪（XRD）对污泥及陶粒的特性进行分析.

$$松散容重 = G \times 1\,000/V.$$

式中：G 为陶粒质量（g）；V 为陶粒在量筒中所占体积（mL）.

$$颗粒表现密度 = M \times 1\,000/(V - 500).$$

式中：M 为烘干试样质量（g）；V 为倒入试样后的量筒水位（mL）.

$$吸水率 = (M_1 - M)/M \times 100\%.$$

式中：M 为烘干试样质量（g）；M_1 为浸水试样质量（g）.

2　结果与讨论

2.1　Fe_2O_3 质量分数对陶粒物理性质的影响

从图 1 可以看出，随着原料中 Fe_2O_3 质量分数逐渐增加，陶粒的松散容重和表观密度呈现先增大后减小的趋势，吸水率呈现先减小后增大的趋势. Fe_2O_3 质量分数在 1% ~5% 时，松散容重和表观密度增加的趋势比较明显. Fe_2O_3 的质量分数在 5% ~12%，松散容重和表观密度下降趋势较为平缓. 当 Fe_2O_3 质量分数为 5% 时，松散容重、表观密度、吸水率分别为 962.9 kg/m^3、1 960.2 kg/m^3 和 6.1%.

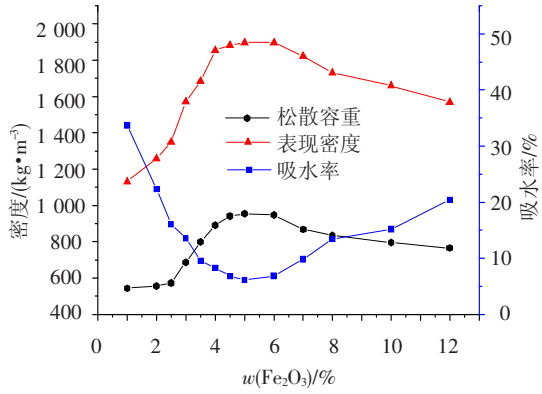


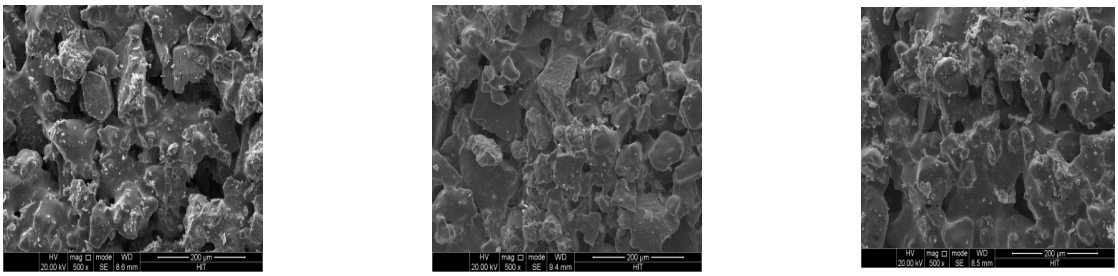
图 1　原料中 Fe_2O_3 质量分数对陶粒物理性质的影响

由于 Fe_2O_3 质量分数的逐渐增加，陶粒内部的液相组分增加，同时，液相的黏度也在增大，促进了晶体颗粒的形成和重排. 这时，陶粒的开气孔比较少，颗粒之间粘结牢固，提高了陶粒体的致密度. 在 Fe_2O_3 质量分数为 5% 时，该陶粒的吸水率比较低，松散容重和颗粒表观密度较大. 原料的 Fe_2O_3 质量分数超过 8% 时，大量 Fe_2O_3 高温条件下在陶粒内部产生的大量膨胀气体冲破液相的束缚而溢出，致使陶粒内部的空隙加大、强度降低、

表面致密性下降. 综上,混合物中 Fe_2O_3 质量分数在 3.5% ~7% 较为合适.

2.2　Fe_2O_3 质量分数变化对陶粒表面性质的影响

为了解 Fe_2O_3 质量分数变化对陶粒样品表面形态的影响,取原料中 Fe_2O_3 质量分数为 3.5%、5% 和 7% 的陶粒样品作为测试目标进行 SEM 测试,结果如图 2 所示,采用的放大倍数为 500 倍.



(a)3.5%　　(b)5%　　(c)7%

图 2　不同 Fe_2O_3 质量分数的陶粒表面形貌分析

从图 2 可以看出,当原料中 Fe_2O_3 为 3.5% 时,陶粒的表面致密性较好,出现一些微小的圆孔,孔径大概为 5 μm,但是也可以看出表面上出现大小不一的裂缝,同时表面有一些粗糙的较大颗粒状物. Fe_2O_3 质量分数为 5% 时,陶粒表面致密性良好,出现玻璃化效果,分布一些孔径 10 ~ 20 μm 圆孔. 随着 Fe_2O_3 质量分数的增加,当 Fe_2O_3 质量分数为 7% 时,陶粒的微孔孔径开始缩小,而且数量变少. 玻璃化效果非常明显,出现釉质,说明在高温时,陶粒表面晶体大量地连接在一起.

因为 Fe_2O_3 在高温条件下能生成 Fe_3O_4 和 FeO 并产生 O_2,随着原料中 Fe_2O_3 的增加,不断地产生气体,由于这时陶粒体内含有一定量的液相,内部产生的气体会冲破液相溢出并形成具有一定孔径的微孔. 随着 Fe_2O_3 质量分数不断增大(7%),陶粒表面的微孔不断较少,孔径也逐渐减小. 原因可能是原料中 Fe_2O_3 质量分数过高时,形成的液相也越多,而液相黏度大,产生的 O_2 溢出受到限制,使制品气孔率降低,表面出现玻璃化的效果.

2.3　Fe_2O_3 质量分数变化对陶粒强度的影响

为检验不同 Fe_2O_3 质量分数时轻质陶粒抗压强度的变化,对原料中 Fe_2O_3 质量分数为 3.5%、5% 和 7% 的陶粒进行抗压强度分析,结果如图 3 所示. 可以看出,当原料中 Fe_2O_3 质量分数为 3.5%、5% 和 7% 时,对应的陶粒强度分别为 14.2、16.9 和 15.7 MPa.

以上结果说明,当陶粒中 Fe_2O_3 质量分数较低时,陶粒的强度较小;陶粒中 Fe_2O_3 质量分数过高时,陶粒的强度略有下降. 陶粒在烧结过程中,Fe_2O_3 质量分数的增加促进了液相的形成,内部形成更为稳定的硅酸盐晶体. 参考图 2 中 SEM 分析,Fe_2O_3 质量分数从 3.5% 变为 5% 时,陶粒表面的致密性增强,微孔分布均匀,不规则的裂缝减少,所以,陶粒的抗压强度得到加强. 随着 Fe_2O_3 质量分数的继续增加,内部产生了大量的膨胀气体,由于液相的增多,黏度加大,陶粒内部形成更多封闭或半封闭的微孔,过多的相互连接微孔致使陶粒的抗压强度下降.

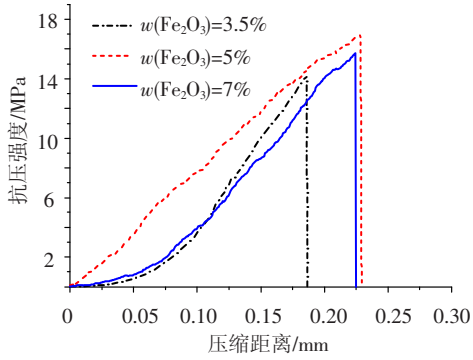


图 3　不同 Fe_2O_3 质量分数的陶粒抗压强度分析

2.4　Fe_2O_3 质量分数对陶粒物相组成的影响

对原料中 Fe_2O_3 质量分数为 3.5%、5%、7% 时制成的陶粒进行了 X 射线衍射(XRD)分析,结果如图 4 所示. 可以看出,随着原料中 Fe_2O_3 质量分数的增加,陶粒的主晶相没有太大变化,主要为石英、蓝晶石、钠、钙长石和赤铁矿;但赤铁矿的峰值强度明显增强,说明更多的 Fe_2O_3 在高温条件下转换为晶体结构的赤铁矿;在 Fe_2O_3 质量分数为 7% 时出现了少量镁铁辉石晶体. 以上结果说明,原料中 Fe_2O_3 在 CaO、MgO 等成份的参与下,高温时可更多地熔入液相中,使液相量增加,形成赤铁矿、钙长石、和镁铁辉石等硅酸盐晶体.

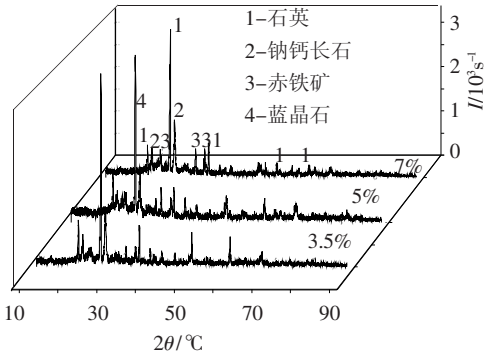


图 4　不同 Fe_2O_3 质量分数的陶粒物相组成分析

3　结　论

1）Fe_2O_3 质量分数是影响陶粒物理性能的一个重要参数. 在 Fe_2O_3 质量分数为 3.5% ~7% 时，以污水污泥和河道底泥为原料可制得密度较高、吸水率低的轻质陶粒.

2）在 Fe_2O_3 质量分数为 5% 时，陶粒表面致密性良好，分布一些 10 ~ 20 μm 微孔，并可得到最佳的抗压强度.

3）陶粒的主晶相为石英、蓝晶石、钠、钙长石和赤铁矿，随着 Fe_2O_3 质量分数的增加，更多的 Fe_2O_3 可以在高温条件下转换为晶体结构的赤铁矿.

参考文献：

[1] SMITH K M, FOWLER G D, PULLKET S, *et al.* Sewage sludge—based adsorbents: a review of their production, properties and use in water treatment applications [J]. Water Res, 2009, 43(10): 2569 – 2594.

[2] FULIANA A, CONSEA J A, FONT R, *et al.* Formation and restruction of chlorinated pollutants during sewage sludge incineration[J]. Environ Sci Technology, 2004, 38(10):2953 – 2958.

[3] 付融冰，杨海真，甘明强. 中国城市污水厂污泥处理现状及其进展[J]. 环境科学与技术，2004,27(5): 108 – 111.

[4] 熊帆，黄君涛，钟理. 城市污泥的处理处置与资源化利用[J]. 广东化工，2005(1): 87 – 90.

[5] 杨健，吴敏. 城市污水厂混合污泥的生态稳定处理[J]. 环境污染与防治，2003,25(6): 345 – 347.

[6] 唐小辉，赵力. 污泥处置国内外进展[J]. 环境科学与管理，2005,30(3): 68 – 71.

[7] TSAI C C, WANG K S, CHIOU I J. Effect of SiO_2 – Al_2O_3 – flux ratio change on the bloating characteristics of lightweight aggregate material produced from recycled sewage sludge [J]. J Hazard Mater, 2006, 134 (1/2/3): 87 – 93.

[8] QI Y F, YUE Q Y, HAN S X, *et al.* Preparation and mechanism of ultra – lightweight ceramics produced from sewage sludge [J]. J Hazard Mater, 2010, 176(1/2/3): 76 – 84.

[9] XU G R, ZOU J L, LI G B. Stabilization of heavy metals in sludge ceramsite[J]. Water Res, 2010,44(9): 2930 – 2938.

[10] WU S, YUE Q. Preparation of ultra-lightweight sludge ceramics (ULSC) and application for pharmaceutical advanced wastewater treatment in a biological aerobic filter (BAF) [J]. Bioresource Technol, 2011,102(3): 2296 – 2300.

[11] YI Y, WANG Z,ZHANG K, *et al.* Sediment pollution and its effect on fish through food chain in the Yangtze River [J]. Int J Sediment Res, 2008, 23(4): 338 – 347.

[12] TANG C W, CHEN H J, WANG S Y, *et al.* Production of synthetic lightweight aggregate using reservoir sediments for concrete and masonry [J]. Cement Concrete Comp, 2011,33(2): 292 – 300.

（编辑　刘　彤）