

文章编号:1000-582X(2010)05-139-06

## 城市垃圾制备陶粒配方及焙烧条件优化分析

黄川<sup>a,b</sup>,姚雪燕<sup>b</sup>,王里奥<sup>a,b</sup>,黄晶<sup>b</sup>

(重庆大学 a. 西南资源开发及环境灾害控制工程教育部重点实验室;

b. 重庆大学资源及环境科学学院,重庆 400044)

**摘要:**以城市有机生活垃圾为原料,采用三叶回转窑烧制成陶粒,是一种有效的垃圾资源化处置方式。试验研究了以垃圾、黏土和粉煤灰为原料烧制陶粒的最佳原材料配比和最优焙烧条件,结果表明,1)烧制陶粒的最佳原材料配比(干混合比):垃圾 15.38%,黏土 14.85%,粉煤灰 69.77%;2)最优焙烧条件:窑预热温度 500 °C,烧成温度 1190 °C,烧成温度保持时间 4 min。以最优试验方案制得的陶粒堆积密度为 605 kg/m<sup>3</sup>,筒压强度为 3.0 Mpa,吸水率为 11.0%,软化系数为 0.93,满足 GB/T17431.1—1998 规定的普通轻集料 700 级的技术要求;陶粒浸出毒性实验表明浸出液中各项重金属含量均远低于 GB/T 5085.3—2007 规定的浓度限值,具有环境安全性。

**关键词:**城市生活垃圾;陶粒;配比;焙烧条件

中图分类号: X705

文献标志码: A

## Analysis of batch formula and optimizing calcination conditions of light-weight aggregates prepared by municipal solid waste

HUANG Chuan<sup>a,b</sup>, YAO Xue-yan<sup>b</sup>, WANG Li-ao<sup>a,b</sup>, HUANG Jing<sup>b</sup>

(a. Key Laboratory of China Southwest Resource Exploitation and Environmental Disaster Control

Engineering Ministry of Education; b. College of Resources and Environmental Science of

Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

**Abstract:** It is an effective technology of recycling organic fractions of municipal solid waste as light-weight aggregates (LWA) fired in trefoil rotary kiln. This paper studies the optimum batch formula and optimal calcination conditions of LWA made from municipal solid waste, clay and coal fly ash. The results indicate that: 1) optimum batch formula (dry mixture ration) is 15.38% of BMW, 14.85% of clay, 69.77% of coal fly ash; 2) optimal calcination conditions are preheating temperature of kiln: 500 °C, sintering temperature: 1190 °C, holding time of sintering temperature: 4 min. The performance testing indicators of aggregate fired under best experimental parameters shows: bulk density is 605 kg/m<sup>3</sup>, cylinder compressive strength is 3.0 MPa, 1hr water absorption is 11.0%, apparent density is 0.93, all of the targets meet 700 grade light aggregate of GB/17431.2—1998 standards; the results of leaching test are lower than hazardous constituents concentration limits of GB/T 5085.3—2007 standards, LWA is not hazardous to environment.

**Key words:** municipal solid waste; light-weight aggregates; batch formula; calcination conditions

收稿日期: 2010-01-07

基金项目: 重庆市自然科学基金资助项目(CSTC, 2008BB7048)

作者简介: 黄川(1965-), 女, 重庆大学副教授, 博士, 主要从事环境工程和生态环境保护方向的研究, (Tel) 13212358701; (E-mail) hclsjb@yahoo.com.cn.

目前,中国城市生活垃圾的年产量已超过 2 亿吨<sup>[1]</sup>,并且在以每年 8%~10%的速度递增,而中国垃圾处理由于起步较晚,无害化处理率不到 70%,大量产生的城市生活垃圾已对生态环境和人类的生活造成了明显的威胁和危害<sup>[2]</sup>。据统计,大城市生活垃圾中有机物接近 50%,中等城市生活垃圾中有机物为 30%~40%<sup>[3]</sup>,由于其具有易腐烂、含水率高和有机质含量丰富等特点,使用常规处理方式难以同时做到“无害化、资源化、减量化”。因此,积极寻求新的有效的有机垃圾资源化利用技术具有重要的意义。

陶粒作为一种人造轻集料,因其可以取代普通砂石配制轻集料混凝土,具有密度小、强度高、保温、抗震性能好的特点,近年来在世界各国得到了迅速发展<sup>[4]</sup>。当前对于陶粒的研制,大都是以脱水污泥、粉煤灰、电镀污泥、淤泥、玻璃、飞灰、工业废渣、采石

场废渣等为原料<sup>[5-9]</sup>,利用垃圾制陶粒还未见相关报道。研究以城市有机生活垃圾、粉煤灰和黏土为原料,采用三叶回转窑烧制成陶粒,运用有约束配方均匀混料法设计原料的配方,利用二次多项回归分析原料对陶粒性能指标的影响,寻求最佳原材料配比;通过正交试验设计,研究焙烧条件对陶粒性能的影响,获取最优烧制条件,为城市生活垃圾的资源化处置探索一条新的途径。

## 1 实验材料及方法

### 1.1 实验材料

有机生活垃圾分选自重庆市城市生活垃圾,含水率约 65%,干垃圾热值 15 324 J/g;粉煤灰取自重庆市某电厂;黏土取自重庆市郊区,原材料的化学组成见表 1。

表 1 原材料的化学组成

原料	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	烧失量
有机垃圾	12.89	1.24	2.55	2.75	0.54	0.9	1.19	0.97	71.73
黏土	62.24	4.93	14.30	1.56	1.54	1.60	2.35	0.83	6.55
粉煤灰	43.91	16.10	23.26	3.82	0.67	0.65	1.46	—	5.71

### 1.2 实验设备

主要实验设备:三叶回转窑、SH10A 型水分测定仪、IKA C5000 量热仪、DHG-9070 电热恒温鼓风干燥箱、YHKC-2A 型颗粒强度测定仪、DAQFactory 温度在线监测系统。

试验采用来自英国利兹大学的三叶回转窑烧制陶粒,此窑采用航天合金钢做内筒,陶瓷纤维做隔热材料,其设计原理是模拟岩石自然火山爆发形成过程,内筒设计为波纹状,最高耐受温度为 1 200 °C,热传递效率高,可急速加温急速冷却,能有效固熔有毒物质、使有害气体产生量降低<sup>[10]</sup>。国外运用三叶回转窑烧制陶粒技术上已经成熟,投入工业化生产已有几十年历史,国内运用还较少。

目前,大多实验室制备陶粒试验都是采用箱式电阻炉焙烧陶粒,预先将电阻炉升温至烧成温度后再将陶粒放入其中进行焙烧,陶粒加热时间固定,且难以了解陶粒自身升温过程。实验采用与工业三叶回转窑结构相同的小三叶回转窑烧制陶粒,与传统的箱式电阻炉工艺相比,焙烧前无需对陶粒进行预热处理,且陶粒可快速升温至 1 100 °C 以上,缩短了整个工艺时间,焙烧时 DAQFactory 温度在线监测系统每隔 10 s 记录一次陶粒的温度,自动生成陶粒

升温曲线图,可以更清楚地了解陶粒焙烧时的升温趋势和在各个温度阶段的停留时间。

### 1.3 实验方法及工艺路线

将有机生活垃圾烘干磨粉,按照设计配比称取 3 kg 原料,加水搅拌混合制成生料球,生料球于 105 °C 下烘干 4 h,放入预热至 500 °C 的三叶回转窑中进行快速焙烧,当温度升至大约 1 180 °C 时,在此温度停留 4 min 左右后停止加热,总烧制时间约为 24 min,待窑温降至 1 000 °C 时将陶粒取出冷却至室温,测定其各项性能指标。

试验工艺路线见图 1,陶粒的性能指标的测定,按照国家标准《轻集料及其试验方法》(GB/T 17431.1—1998)。

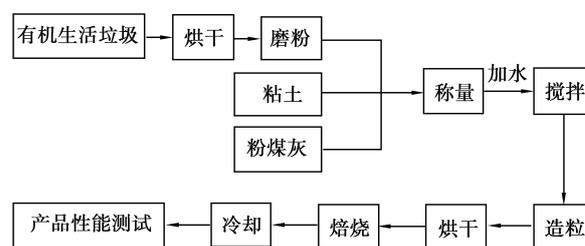


图 1 试验工艺路线

## 2 试验结果与分析

### 2.1 配比试验研究

#### 2.1.1 陶粒配比及试验结果

试验运用有约束配方均匀混料法设计原材料的配比<sup>[11]</sup>。考虑到对垃圾的资源化利用和生态环境的保护,应尽可能地多利用城市有机生活垃圾和尽量少用黏土,同时保证陶粒性能指标满足标准要求。

在一系列的研究试验基础上,为 3 种原料(干基)选取了以下的变化范围进行试验研究:黏土  $X_1:0.1 \leq X_1 \leq 0.2$ ,有机生活垃圾  $X_2:0.1 \leq X_2 \leq 0.2$ ,粉煤灰  $X_3:0.6 \leq X_3 \leq 0.8$ 。根据试验条件和精度的要求,选择均匀设计表  $U_{15}^*(15^2)$ ,采用计算机软件辅助求解,得垃圾陶粒原料配比。陶粒配比方案及试验结果见表 2。

表 2 陶粒配比及试验结果

编号	$X_1$	$X_2$	$X_3$	堆积密度 /( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	颗粒强度/N	1 h 吸水率 /%	比表面积 /( $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ )
1	0.196 5	0.152 5	0.651 0	601	522	15.31	2.146 2
2	0.189 4	0.101 3	0.709 2	618	657	16.67	1.605 7
3	0.182 5	0.170 3	0.647 2	576	449	15.61	1.822 6
4	0.175 6	0.118 3	0.706 1	607	641	15.2	0.965 8
5	0.168 7	0.188 6	0.642 7	570	425	18.99	1.959 7
6	0.162 0	0.135 8	0.702 3	610	516	15.96	1.616 4
7	0.148 5	0.153 7	0.697 7	590	817	12.27	2.108 9
8	0.135 3	0.172 1	0.692 5	560	400	18.05	1.091 3
9	0.128 8	0.117 0	0.754 2	583	592	13.32	1.258 2
10	0.122 3	0.191 0	0.686 7	543	281	21.52	1.244 3
11	0.115 9	0.135 1	0.749 1	567	528	13.37	1.789 4
12	0.103 2	0.153 6	0.743 2	552	492	16.19	1.015 5

#### 2.1.2 材料对陶粒的性能影响

对表 2 中的试验结果数据进行二次多项逐步回归分析<sup>[12]</sup>,得陶粒性能指标与原料配比的回归方程。图 2、3、4 是以表 2 中各原材料配比含量为横坐标,相应陶粒性能指标为纵坐标所绘制的原材料含量对陶粒性能指标的影响趋势图。

##### 1) 堆积密度

堆积密度回归方程

$$Y = 514.63 - 1266.35X_2^2 + 907.13X_1X_3 \quad (1)$$

从图 2 可以看出,垃圾和黏土的用量对堆积密度影响趋势较为明显,粉煤灰的影响趋势并不明显。陶粒的堆积密度随着垃圾添加量的增加而减小,这是由于垃圾中有机质含量高,烧失量大,高温焙烧之后,形成众多大小不一孔隙结构,降低了陶粒的堆积密度。由回归方程式 1(相关系数  $R=0.9588$ )知,黏土、粉煤灰具有交互作用,对堆积密度影响起正效应。这主要是因为黏土和粉煤灰烧失量较小,焙烧后质量变化不大,所以当垃圾含量不变时,堆积密度

随着黏土、粉煤灰的加入量增加而增大。

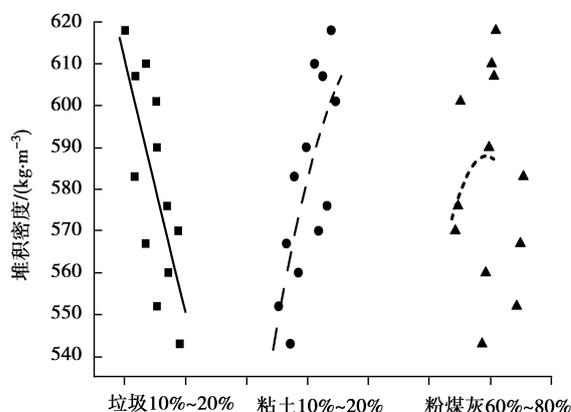


图 2 原料配比含量对堆积密度影响趋势

##### 2) 颗粒强度

颗粒强度回归方程

$$Y = -278.53 + 11\,963.02X_2 - 49\,987.01X_2^2 + 1\,615.11X_1X_3 \quad (2)$$

由式(2)知,垃圾用量对颗粒强度影响起负效应,黏土与粉煤灰则具有交互作用,对堆积密度影响起正效应。图 3 显示,当垃圾含量大于 0.119 5 时,强度随着垃圾含量的增加而减小。垃圾含量较大时,陶粒烧制过程中会产生较多的表面裂纹与较大的内部孔隙,导致强度降低。颗粒强度随着黏土和粉煤灰加入量的增多而增大,黏土中的  $MgO$ 、 $K_2O$ 、 $Na_2O$  等助熔成分降低了陶粒表面液相的生成温度,达到熔点时,陶粒表面形成大量的熔融体,减小气孔率,使烧制的陶粒更加密实<sup>[13]</sup>。另一方面,黏土和粉煤灰成陶成分  $SiO_2$ 、 $Al_2O_3$  含量较高,其中  $Al_2O_3$  与陶粒的强度有较大关系, $Al_2O_3$  含量越高则陶粒的强度也就越大<sup>[14]</sup>。

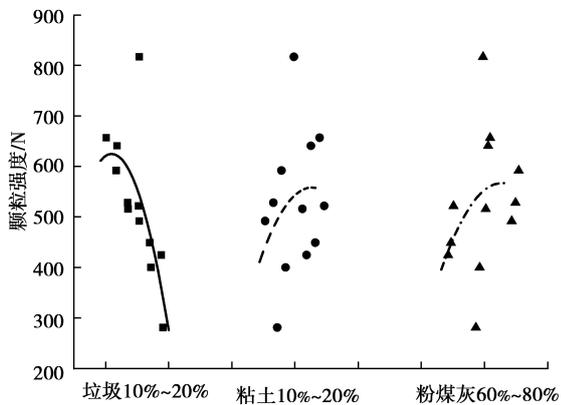


图 3 原料配比含量对颗粒强度的影响趋势

### 3) 1 h 吸水率

1 h 吸水率回归方程

$$Y = 51.71 - 557.89X_2 + 2\,067.3X_2^2 \quad (3)$$

式 3 表明,垃圾用量对吸水率的影响最为显著,当  $X_2 = 0.191$  时,吸水率达到最大。图 4 显示,当  $X_2 > 0.139$  时,吸水率随着垃圾加入量的增多而明显升高,这是由于垃圾有机质含量高,而试验又采用快速烧胀机制,在低温阶段有机质并未全部燃烧分解掉,剩余碳在高温阶段氧化分解产生  $CO_2$ 、 $CO$  等膨胀气体<sup>[15]</sup>,不断透过表面液相向外逸出,造成陶粒表面裂纹增多,使陶粒的吸水率升高。

### 4) 比表面积

试验结果显示,各配方陶粒比表面积数值总体较低,且与原材料配比无明显关系。试验所制得的陶粒为烧胀陶粒,其内部可见由大孔构成的呈蜂窝状孔隙结构,样品总体比表面积很小,表明不具有微孔结构。

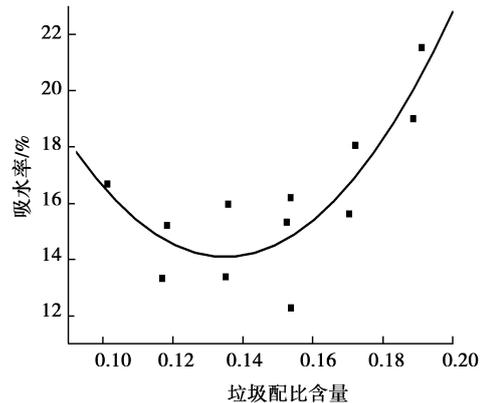


图 4 垃圾含量对 1 h 吸水率的影响趋势

由表 2 可知,以第 7 组配比所制得的陶粒颗粒强度值最大,且各项性能指标均满足标准要求,同时还满足垃圾最多、黏土用量较少的准则,所以确定烧制垃圾陶粒的最佳原料配比为:垃圾 15.38%,黏土 14.85%,粉煤灰 69.77%。

## 2.2 焙烧条件的优化

### 2.2.1 正交试验水平及结果

根据前期试验得知,陶粒的烧成温度及达到烧成温度后的停留时间(烧成温度保持时间)影响着陶粒内部结构的形成和性能指标。本实验选择窑预热温度、烧成温度、烧成温度保持时间 3 因素,运用正交试验设计法,进行最佳配比陶粒焙烧条件的优化试验,因素水平安排见表 3,试验结果见表 4。

表 3 因素水平表

水平	A	B	C
	窑预热 温度/ $^{\circ}C$	烧成 温度/ $^{\circ}C$	烧成温度 保持时间/min
1	450	1 150	2
2	500	1 170	4
3	550	1 190	6

表 4 正交试验结果

编号	A	B	C	堆积密度 / $(kg \cdot m^{-3})$	颗粒强 度/N	1 h 吸 水率/%
1	1	1	1	708	532	16.77
2	1	2	2	670	695	12.39
3	1	3	3	613	782	13.64
4	2	1	2	683	551	14.11

续表 4

编号	A	B	C	堆积密度 /(kg·m <sup>-3</sup> )	颗粒强 度/N	1 h 吸 水率/%
5	2	2	3	646	628	12.23
6	2	3	1	631	826	11.89
7	3	1	3	684	463	20.35
8	3	2	2	658	659	15.77
9	3	3	1	620	924	10.73

2.2.2 焙烧条件对陶粒性能的影响

由表 5 可知,窑的预热温度对陶粒性能影响不大,烧成温度和烧成温度保持时间对陶粒的颗粒强

度影响显著,颗粒强度随着温度的升高而增大,这是因为温度越高,陶粒表面玻化越充分,产生的液相物质慢慢渗入孔隙结构中,内部结构致密化,使得陶粒颗粒强度增大,但是当烧成温度保持时间超过一定范围时,内部形成的致密小孔结构相互连通形成大孔结构,将会降低陶粒的颗粒强度。陶粒的堆积密度和吸水率均随着温度的升高而降低,因为合适的高温使陶粒表面产生适量的液相,达到烧成温度时陶粒表面粘度适宜,内部剩余碳在高温条件燃烧产生的气体向外逸出,陶粒膨胀形成内部的多孔中空结构<sup>[16]</sup>,同时液相包裹表面,形成一层隔水釉层包裹表面,表面裂纹减少,使陶粒的堆积密度和吸水率减小。

表 5 正交试验结果分析

	堆积密度/(kg·m <sup>-3</sup> )			颗粒强度/N			1 h 吸水率/%		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
K <sub>j1</sub>	1 991	2 075	1 997	2 009	1 546	2 017	42.80	51.23	44.43
K <sub>j2</sub>	1 960	1 974	1 973	2 005	1 982	2 170	38.23	40.38	37.23
K <sub>j3</sub>	1 962	1 864	1 943	2 046	2 532	1 873	46.85	36.26	46.21
K <sub>1</sub>	663.67	691.67	665.67	669.67	515.33	672.33	14.27	17.08	14.81
K <sub>2</sub>	653.33	658.00	657.67	668.33	660.67	723.33	12.74	13.46	12.41
K <sub>3</sub>	654.00	621.33	647.67	682.00	844.00	624.33	15.62	12.09	15.40
F 值	1.22	45.09	2.96	0.17	79.06	7.14	2.82	9.07	3.43
显著性	—	显著	—	—	显著	较显著	—	显著	—
优选方案	A <sub>2</sub>	B <sub>3</sub>	C <sub>3</sub>	A <sub>2</sub>	B <sub>3</sub>	C <sub>2</sub>	A <sub>2</sub>	B <sub>3</sub>	C <sub>2</sub>

确定最优烧成条件时,窑的预热温度及烧成温度均可选择最优水平 A<sub>2</sub>、B<sub>3</sub>,烧成温度保持时间对颗粒强度影响最显著,因此选择水平 C<sub>2</sub>,最终确定实验室制陶粒最优焙烧条件为 A<sub>2</sub>-B<sub>3</sub>-C<sub>2</sub>。以最优试验方案(最佳配比、最优焙烧条件)烧制的陶粒经检测,堆积密度为 605 kg/m<sup>3</sup>,表观密度为 930 kg/m<sup>3</sup>,筒压强度为 3.0 Mpa,1 h 吸水率为 11.0%,软化系数为 0.93,满足 GB/T 17431.1—1998 所规

定的普通轻集料 700 级的技术要求。

2.3 陶粒浸出毒性分析

按照标准 HJ/T 299—2007 制备陶粒浸出液,依 GB/T 5085.3—2007 所规定的方法对浸出液进行检测。从检测结果(见表 6)可知,陶粒浸出液中各项重金属含量也均远低于国家标准(GB/T 5085.3—2007)危险特征指标限值,试验所制得的陶粒具有很好的环境安全性。

表 6 陶粒产品浸出毒性检测结果

检测项目	Cu	Pb	Cd	Zn	Cr	As	Hg	Cr(VI)
检出值	0.5	< 0.01	0.1	0.1	1.3	< 0.001	< 0.01	< 0.01
标准值	100	5	1	100	15	5	0.1	5

### 3 结 论

1)以城市有机生活垃圾、黏土和粉煤灰为原料烧制陶粒的最佳配比(干基)为:垃圾 15.38%,黏土 14.85%,粉煤灰 69.77%;最佳烧制条件为:窑预热温度 500 ℃,焙烧温度 1 190 ℃,焙烧时间 4 min。

2)以最优试验方案制得的陶粒,堆积密度为 605 kg/m<sup>3</sup>,表观密度为 930 kg/m<sup>3</sup>,筒压强度为 3.0 MPa,1 h 吸水率为 11.0%,软化系数为 0.93,满足 GB/T 17431.1—1998 所规定的普通轻集料 700 级的技术要求。

3)浸出毒性实验表明,垃圾陶粒的各项重金属含量均低于国家标准(GB/T 5085.3—2007)危险特征指标限值,具有很好的环境安全性。

#### 参考文献:

- [1] 任曼,卢徐节,王晓泳.我国城市垃圾现状与可持续发展研究[J].中国资源综合利用,2008,26(2):19-21.  
REN MAN, LU XU-JIE, WANG XIAO-YONG. Research on status of municipal solid waste and sustainable development [J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2008, 26(2):19-21.
- [2] JIN Q Q, YAN J H, CEN K F. Study on the comprehensive combustion kinetics of MSW [J]. Zhejiang University Science, 2004, 5(3):283-289.
- [3] 赵欣,田宇,汤建华,等.我国生活垃圾处理现状分析与技术发展方向研究[J].广西轻工业,2008,116(7):85-87.  
ZHAO XIN, TIAN YU, TANG JIAN-HUA, et al. Research on treating status and technology developments of Municipal solid waste in China [J]. Guangxi Journal of Light Industry, 2008, 116(7):85-87.
- [4] 金宜英,杜欣,王志玉,等.采用污水厂污泥制陶粒的烧结工艺及配方研究[J].中国环境科学,2009,29(1):17-21.  
JIN YI-YING, DU XIN, WANG ZHI-YU, et al. Research on technology and bath formula of sintering municipal sewage sludge for manufacturing haydite [J]. China Environmental Science, 2009, 29(1):17-21.
- [5] SLABAUGH S, SWAN C, MALLOY R. Development and Properties of Foamed Synthetic Lightweight Aggregates[J]. World of Coal Ash,2007(5):7-10.
- [6] MUELLER A, SOKOLOVA S N, VERESHAGIN V I. Characteristics of lightweight aggregates from primary and recycled raw materials[J]. Construction and Building Materials, 2008, 22(4):703-712.
- [7] 王小刚,赵铁军.轻集料混凝土的新进展[J].建筑技术开发,2003,30(10):39-41.  
WANG XIAO-GANG, ZHAO TIE-JUN. New development of light weight concrete [J]. Building Technique development, 2003,30(10):39-41.
- [8] DUCMAN V, MIRTIC B. The applicability of different waste materials for the production of lightweight aggregates[J]. Waste Management, 2009, 29(8):2361-2368.
- [9] WAINWRIGHT P J, CRESSWELL D J F, VAN DER SLOOT H A. The production of synthetic aggregate from a quarry waste using an innovative style rotary kiln[J]. Waste Management & Research, 2002,20(3):279-289.
- [10] LAURSEN K, WHITE T J, WAINWRIGHT P J, et al. Recycling of an industrial sludge and marine clay as light-weight aggregates[J]. Journal of Environmental Management, 2006, 80(3):208-213.
- [11] 方开泰.均匀设计与均匀设计表[M].北京:科学出版社,1994:55-61.
- [12] 冯李文.均匀设计法及其在新产品开发中的应用[J].川化,2005(2):18-23.  
FENG LI-WEN. Uniform design and application in new products development [J]. Sichuan Chemical Industry, 2005(2):18-23.
- [13] HUANG S C, CHANG F C, LO S L, et al. Production of lightweight aggregates from mining residues, heavy metal sludge and incinerator fly ash [J]. Journal of Hazardous Materials, 2007, 144(1):52-58.
- [14] 王炳功,王煜.论烧胀型粉煤灰陶粒[J].粉煤灰综合利用,2002,(3):40.  
WANG BING-GONG, WANG YU. On the sintering-expanded lightweight aggregates with coal fly ash [J]. Fly Ash Comprehensive Utilization, 2002(3):40.
- [15] CHIOU I J, WANG K S, CHEN C H, et al. Lightweight aggregate made from sewage sludge and incinerated ash [J]. Waste Management, 2006, 26(12):1453-1461.
- [16] 张静文,徐淑红,陈玲,等.正交试验设计在电镀污泥烧制陶粒中的应用[J].环保科技,2009,15(1):29-32.  
ZHANG JING-WEN, XU SHU-HONG, CHEN LING, et al. Application of orthogonal design in preparing light weight aggregates with electroplating sludge [J]. Environmental Protection and Technology, 2009, 15(1):29-32.

(编辑 赵 静)