

高硅铁尾矿制备陶粒工艺试验研究

吴俊权¹, 马晶¹, 汪应玲^{1,2}, 乔福龙^{1,2}, 李晶¹, 胡文斌¹, 赵颖洁¹, 段孟涵¹, 王江伟¹

1. 东北大学秦皇岛分校 资源与材料学院, 河北 秦皇岛 066004;
2. 秦皇岛市资源清洁转化与高效利用重点实验室, 河北 秦皇岛 066004

中图分类号: TD926.4+2 文献标识码: A 文章编号: 1001-0076(2020)06-0126-07
DOI: 10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2020.06.018

摘要 以铁尾矿为原料, 粉煤灰为成分校正剂制备高强轻质陶粒。利用热分析仪(TG-DSC)和X射线衍射仪(XRD)分析了原料的热反应过程, 确定陶粒烧制温度范围。设计正交试验研究了成分配比、烧制温度、高温区升温速率和保温时间对陶粒堆积密度、表观密度、吸水率和筒压强度的影响, 优化陶粒制备工艺。结果显示, 陶粒的原料对比对堆积密度和表观密度影响较大, 而烧制温度对吸水率和筒压强度影响较大。料球中 Al_2O_3 含量为17%, 以 $10\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ 的速度升温至 $1\ 000\text{ }^\circ\text{C}$, 再以 $25\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ 的速度升温至 $1\ 210\text{ }^\circ\text{C}$, 保温30 min, 所制备陶粒堆积密度 $888.20\text{ kg}/\text{m}^3$, 表观密度为 $1\ 907.14\text{ kg}/\text{m}^3$, 筒压强度为 8.34 MPa , 1 h吸水率为5.04%, 满足国标GB/T 17431.1—2010中规定的900级轻质高强陶粒性能要求, 为高硅铁尾矿的综合利用提供了一条新途径。

关键词 铁尾矿; 粉煤灰; 高强陶粒; 正交试验; 堆积密度; 筒压强度

陶粒是一种表层坚硬、内部蜂窝多孔的特殊材料, 它具有强度高、密度小、比表面积大、耐腐蚀、抗冻性和热稳定性好等优点, 可代替混凝土、建筑砖及工程构件中碎石骨料, 用于建筑领域^[1,2], 也可作为工业填料用于污水处理生物挂膜载体或岩层裂隙的石油支撑剂^[3,4]。铁尾矿是铁矿石选取精矿后剩余的固体废弃物, 其主要成分为 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 CaO 、 MgO 等, 与陶粒成分相近, 采用铁尾矿制备陶粒, 既为陶粒的生产找到了一种廉价原料, 节约传统陶粒原料所需黏土和页岩, 又可大量消耗铁尾矿, 减少尾矿占地, 改善环境, 产生良好的经济、社会和环境效益。

目前国内外利用铁尾矿制备陶粒的研究较少, 且大多是考察单一因素(成分配比或烧制工艺)对陶粒性能的影响。杜芳等^[5]以鞍山式铁尾矿为原料, 以粉煤灰和污泥为添加剂烧制建筑陶粒。固定烧制工艺, 当 $m(\text{铁尾矿}) : m(\text{粉煤灰}) : m(\text{城市污泥}) = 40.3\% : 44.7\% : 15\%$ 时, 所得陶粒的吸水率较小; 固定物料配比, 最佳工艺条件下, 可烧制出了满足国家标准的700级陶粒制品。朱晓丽等^[3]以铁尾矿为主要原料, 研究了不同物料配比、陶粒粒径和烧制温度对陶粒去除污

水COD效果。结果显示, 铁尾矿的添加量为86%时, 粒径大小为 $3\sim 5\text{ mm}$, $1\ 100\text{ }^\circ\text{C}$ 焙烧20 min条件下制备的多孔陶粒对污水处理效果显著。李晓光等^[6]以某低硅铁尾矿为主要原料, 当 $m(\text{铁尾矿}) : m(\text{膨润土}) : m(\text{铝矾土}) = 70\% : 20\% : 10\%$ 时, 正交设计最优工艺条件下, 低硅铁尾矿陶粒的堆积密度为 $705\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, 表观密度 $1\ 612\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, 吸水率9.67%, 筒压强度 6.81 MPa , 满足国家标准的要求。以上研究表明, 不同类型铁尾矿制备不同用途的陶粒时, 对外加剂和烧制工艺的要求不同。事实上不同陶粒原料成分, 所含助熔剂的不同, 熔融态液相所需的环境也不同。因此, 本文采用铁尾矿为主要原料, 添加粉煤灰成分校正剂, 通过正交试验系统研究成分配比和烧制工艺对陶粒性能的影响, 为以后工业化生产提供参考。

1 试验

1.1 试验原料

试验采用的铁尾矿取自秦皇岛庙沟铁矿, 呈青灰色, 少量结块, 密度为 $1.48\text{ g}/\text{cm}^3$; 粉煤灰取自秦皇岛

收稿日期: 2020-11-19

基金项目: 河北省高校百名优秀创新人才支持计划(BR2-127); 校科技创新项目(2020 CX20626)

作者简介: 吴俊权(1998-), 男, 主要从事大宗固废综合利用方向研究, E-mail: junquanwu21@163.com。

通信作者: 汪应玲(1982-), 女, 讲师, 主要从事尾矿资源化综合利用研究, E-mail: yinglingwang09@163.com。

同和热电厂,为深灰色细腻粉末,密度为 0.998 g/cm²,其主要成分见表 1。由表 1 可知,铁尾矿属于高硅型尾矿,其 Al₂O₃ 的含量仅 4.8%,在陶粒烧制过程中既不易形成适宜的黏度,也不能提供充足的 Al³⁺ 和 Si⁴⁺ 形成稳定的内部骨架结构^[7],影响陶粒化学稳定性和机械强度^[8],因此添加含 Al 量较高的粉煤灰作为成分校正剂。此外,粉煤灰中还有少量的残炭和有机物,有利于陶粒烧制过程中形成多孔结构,同时降低烧制温度,节能减排^[9]。

表 1 铁尾矿、粉煤灰的主要化学成分 /%

Table 1 Chemical composition of iron tailing and fly ash

Raw material	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	Others
Iron tailings	75.30	4.80	9.34	3.31	4.79	0.74	0.93	0.79
Fly ash	47.72	40.91	3.25	3.99	0.54	0.72	0.18	2.69

1.2 陶粒正交试验

在 Riley 成分三角形基础上进一步研究发现^[9],高强陶粒的原料成分范围更小,烧制温度更高,要求 SiO₂ 的含量为 55%~65%,Al₂O₃ 的含量为 16%~25%,熔剂总含量为 12%~21%。考虑 Al₂O₃ 的熔点高,离子键强,含量越高所需共熔温度越高,成本增加^[10,11],因此试验中 Al₂O₃ 的含量选择 14%~26%。由于高强陶粒的原料中无外加的其它成分,其产气主要是 Fe₂O₃ 的反应,从表 1 可知该成分主要存在于铁尾矿中,根据图 2 中铁尾矿的 TG-DSC 图可知,陶粒的主要产气膨胀和表层液化温度一般在 1 000~1 300 °C 之间,此时需快速升温,可促使陶粒表面及时产生足够的液相包裹内部反应逸出的气体,以获得轻质高强陶粒^[11,12]。本试验以各种原料干重占总量的百分数确定,采用 L25(5⁴) 正交试验(空 2 列)系统考察陶粒原料中 Al₂O₃ 含量(A)、烧制温度(B)、1 000 °C 后升温速率(C)、保温时间(D)对陶粒性能的影响。各组试验工艺方案如表 2 所示,不同配比的原料成分见表 3。

表 2 正交试验因素水平表

Table 2 Level and factors of orthogonal experimental

Level	Factors			
	A/%	B/°C	C/(°C·min ⁻¹)	D/min
1	14	1 150	10	10
2	17	1 180	15	15
3	20	1 210	20	20
4	23	1 240	25	25
5	26	1 270	30	30

表 3 不同配比的原料成分 /%

Table 3 Ingredients of different proportions

Level	Raw material		Ingredients of raw materials			
	Iron tailings	Fly ash	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Total flux
A1	74.51	25.49	14.00	68.27	7.79	17.04
A2	66.21	33.79	17.00	65.98	7.28	16.29
A3	57.90	42.10	20.00	63.69	6.78	15.53
A4	49.59	50.41	23.00	61.40	6.27	14.78
A5	41.29	58.71	26.00	59.11	5.76	14.03

1.3 陶粒的制备与性能测试

陶粒的制备工艺分三步进行:(1)破碎过筛:将铁尾矿破碎研磨后过 150 目标准筛(100 μm),取筛下部分,和粉煤灰细粉在 105 °C 左右烘干 2 h 备用。(2)配料成型:将原料按照试验设计的配比进行配料并混合均匀,每 100 g 混合干料加入 25~30 mL 的去离子水,再次搅拌混合均匀,倒入球形模具中压制 10 mm 左右的生料球,置于干燥箱中 105 °C 干燥 8~10 h。(3)烧制:干燥好的生料球放入电阻炉中以 10 °C/min 速度升温到 1 000 °C,然后按试验设计工艺烧制后,随炉冷却即得成品陶粒试验。

制取的陶粒样品按照国标《轻集料及其试验方法》(GBT 17431.2—2010)测试其堆积密度、筒压强度、吸水率等。采用德国布鲁克 S8 TIGER 型 X 射线荧光光谱仪对原料成分进行了半定量成分分析,丹东百特 BT-2003 激光粒度分析仪测试原料粒度分布,日本理学 SmartLab-9 型 X 射线衍射仪测试样品的物相。德国蔡司 SUPPA55 型场发射扫描电子显微镜(FE-SEM)观察样品表面的微观形貌。

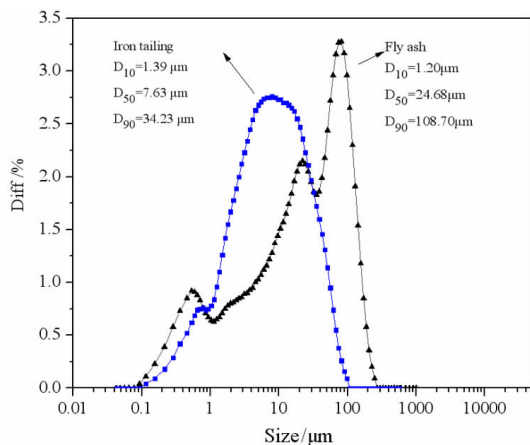


图 1 铁尾矿和粉煤灰的粒度

Fig. 1 particles size distribution of iron tailing and fly ash

2 结果与讨论

2.1 铁尾矿和粉煤灰的特性

原料粒度与陶粒可塑性有着密切的关系,一般原料中细颗粒越细,越有利于陶粒的成型和降低烧制温度。图 1 为固体配料粒度分布,由图可知,筛后铁尾矿的粒径集中分布在 2 ~ 50 μm 之间,小于 50 μm 的颗粒约占总量 96.05%。粉煤灰粒径呈多峰分布,最中位径为 24.68 μm,最高粒径为 82.21 μm,粗颗粒相对较多一些。粉煤灰是热电厂煤粉燃烧后的产物,热稳定性好,细小的微珠或碎屑在陶粒结构中起支架作用,有助于提高陶粒强度^[13]。

图 2 和图 3 分别为铁尾矿和粉煤灰的 TG - DSC 图和 XRD 图。陶粒烧制过程中,400 °C 以上才开始发生产气反应^[14],因此 TG - DSC 图只考虑 400 °C 以上。图 2(a) 中 574 °C 附近有较小吸热峰,但样品质量几乎不变,可能是金属组分的氧化增重弥补了矿物组分的受热分解失重量^[15]。1 126 °C 以后明显的吸热峰,为

氧化物熔融吸热所致,样品失重主要由方解石的分解造成的。对比图 3(a) 中不同温度煅烧后铁矿石物相结构发现:600 °C 煅烧后,除了方解石相几乎不变,其它矿相的衍射峰均有所降低,这表明矿物组分部分分解;1 300 °C 煅烧后,铁尾矿中大量的石英相转变为尖晶石和方石英,黑云母、角闪石、绿泥石 - 蛇纹石和方解石相均消失,说明此温度下过烧,因此铁尾矿陶粒烧制温度应处于 1 126 ~ 1 300 °C 之间。

图 2(b) 显示粉煤灰在 400 ~ 651 °C 之间加热增重约为 5% 左右,这可能跟粉煤灰中金属组分的氧化有关。459 °C 附近弱吸热肩带是由粉煤灰的毛细管水的挥发造成的^[16],651 °C 处的小吸热峰对应于粉煤灰中少量残碳的燃烧和无机物的分解反应^[17]。图 3(b) 为粉煤灰在不同温度下煅烧后的 XRD 图谱。由图可知,粉煤灰主要由莫来石、石英和无定型物质组成。700 °C 煅烧后,粉煤灰中莫来石衍射峰降低,石英衍射峰增强,同时出现长石相衍射峰,1 300 °C 煅烧后两者均消失,仅剩少量莫来石相。因此,认为图 2(b) 中 DSC 曲线上 1 098 ~ 1 275 °C 之间宽缓的放热峰,与粉煤灰中

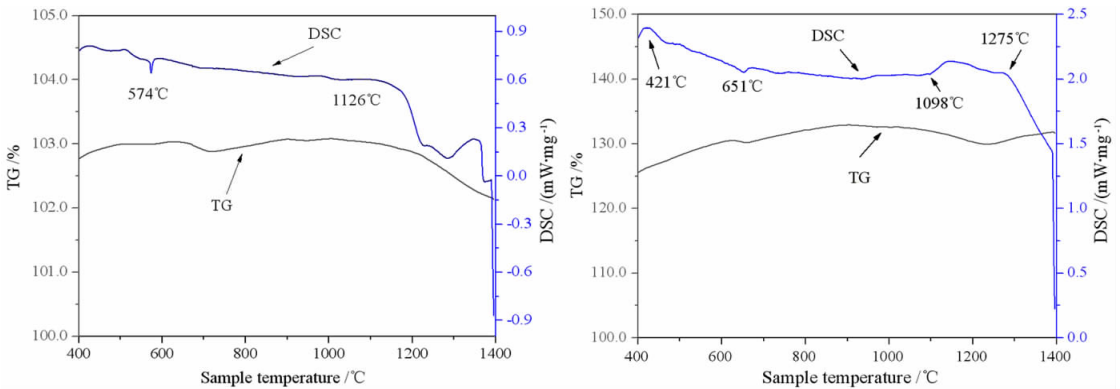


图 2 铁尾矿和粉煤灰的 TG - DSC 图
Fig. 2 TG - DSC diagram of iron tailing and fly ash

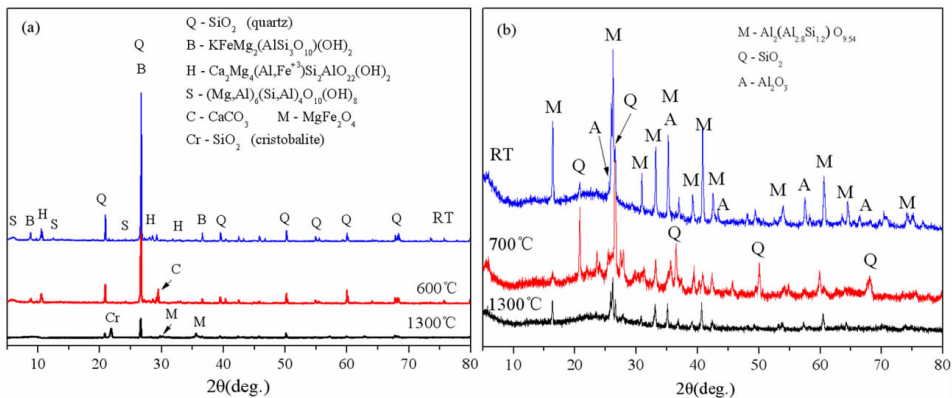


图 3 铁尾矿(a)和粉煤灰(b)的 XRD 图
Fig. 3 XRD diagram of iron tailing and fly ash

相反形成莫来石的有关^[18],这种高温莫来石更为稳定,活性低,因此陶粒烧制温度应低于1 275 ℃。

2.2 陶粒的正交试验

以陶粒的堆积密度、1 h 的吸水率和筒压强度为性能指标,正交试验的结果如表4所示,表中各组数据为三次试验测量的平均值,5号和15号试验由于温度过高,保温时间过长,试样熔塌,不成型。按照国标 GB/T 17431.1—2010《轻集料及其试验方法》的要求,表4中所有陶粒试样堆积密度均小于1 200 kg/m³,符合轻集料

要求,8和19号试样满足900级高强陶粒性能要求。

正交试验的极差分析如图4~图7所示。从图4可知影响陶粒试样的堆积密度的主次因素依次为:原料配比、烧制温度、保温时间、高温区升温速率,优选方案为A4B1C5D2,与表4中的16号试验方案相似,且C5与C4水平的堆积密度相差不大,可参考16号试验制备陶粒的性能,堆积密度为798.90 kg·m⁻³、表观密度为1 718.67 kg·m⁻³、1 h的吸水率为18.64%、筒压强度为0.61 MPa。该工艺制备陶粒的吸水率较高,筒压强度低,不合格。

表4 正交试验结果

Table 4 The results of orthogonal test

Experiment	A/%	B/℃	C/(℃·min ⁻¹)	D/min	Blank	Blank	Bulk density /(kg·m ⁻³)	Apparent density /(kg·m ⁻³)	1 h Water absorption /%	Cylinder pressure strength/MPa ⁻¹
1	14	1 150	10	10			728.90	1 516.44	21.28	0.57
2	14	1 180	15	15			810.20	1 747.50	15.51	1.68
3	14	1 210	20	20			937.60	2 109.14	4.20	6.19
4	14	1 240	25	25			959.60	2 037.10	0.63	8.61
5	14	1 270	30	30			—	—	—	—
6	17	1 150	15	20			1 021.20	2 053.82	7.20	4.17
7	17	1 180	20	25			973.40	2 077.11	5.04	5.45
8	17	1 210	25	30			888.20	1 907.14	5.04	8.34
9	17	1 240	30	10			1 024.00	2 100.00	2.49	11.62
10	17	1 270	10	15			918.60	1 917.33	1.24	5.61
11	20	1 150	20	30			874.60	1 891.86	11.08	3.34
12	20	1 180	25	10			950.60	1 942.50	8.32	2.36
13	20	1 210	30	15			862.00	1 778.00	6.67	5.99
14	20	1 240	10	20			865.80	1 708.84	23.70	9.07
15	20	1 270	15	25			—	—	—	—
16	23	1 150	25	15			744.80	1 718.67	18.64	0.54
17	23	1 180	30	20			780.00	1 665.76	16.14	1.58
18	23	1 210	10	25			971.30	1 996.79	19.23	10.35
19	23	1 240	15	30			876.80	1 760.00	1.12	7.63
20	23	1 270	20	10			833.80	1 593.43	1.02	5.96
21	26	1 150	30	25			786.00	1 750.00	17.78	0.79
22	26	1 180	10	30			948.60	1 911.82	6.12	9.90
23	26	1 210	15	10			865.80	1 822.50	9.98	3.72
24	26	1 240	20	15			906.40	1 934.00	2.83	12.60
25	26	1 270	25	20			776.20	1 627.17	0.69	6.01

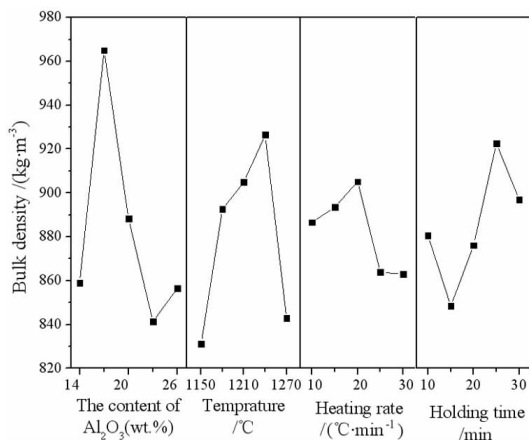


图4 各因素对陶粒堆积密度的影响
Fig. 4 Effect of factors on bulk density

图5为各因素对陶粒试样表观密度的影响,对比图4发现,除了保温时间外,各因素对陶粒表观密度的影响规律与堆积密度基本相同。高温条件下,一方面料球内部发生产气反应,体积膨胀,另一方面矿相共熔产生液相填充料球内部孔道和颗粒间隙,陶粒致密化,因此当保温时间在10~20℃时,随保温时间的延长,陶粒表观密度缓慢增加。当保温时间超过20 min时,陶粒内部反应较充分,产气反应基本完成,而液相含量继续增加,此时密度快速增加。保温时间过长,即当保温时间为25~30℃时,会使原本处于不联通状态的毛细微孔互相连接,形成大的气孔,从而降低陶粒密度。影响陶粒试样表观密度的主次因素同堆积密度一致,优选方案为A4B5C1D1。

图 6 为各因素对陶粒试样吸水率的影响。由图可知,配料中铝含量的变化对吸水率的影响没有规律。但是烧制工艺对吸水率的影响较大。试样吸水率随烧制温度的升高逐渐下降,随高温区升温速率的增加呈先减小后增加的趋势,随保温时间的变化与升温速率相反。影响因素大小为:烧制温度 > 高温区升温速率 > 原料配比 > 保温时间,优选方案为 A2B5C3D5。与表 4 中的 15 号试验条件比较,此方案中 Al_2O_3 含量较低,但保温时间长,陶粒易熔塌。

温结晶相—莫来石,为陶粒提供稳定的骨架结构,强度增加。但是温度超过 1 240 °C 后,陶粒内部产生大量的高温液相,黏度很低,孔壁不能保持固定的结构,从而使孔结构遭受破坏出现塌空现象^[18]。此时,若不能提供足够保温时间以形成新的骨架,则强度反而下降。但是高温液相进一步填补烧结过程中产生的缺陷孔,使气孔间壁更加致密,陶粒吸水率持续降低^[20]。保温时间越长,原料矿相之间反应越充分,形成陶粒结构越完整,筒压强度越高。影响陶粒的筒压强度最主要的影响因素为烧制温度,其它因素相当,优选方案为 A2B4C1D5,此方案为长时间高温慢烧工艺,不符合节能原则。C3 与 C1 水平相差不大,考虑生产效率,选择 C3 代替 C1;保温时间大于 D2 水平时,陶粒的筒压强度高于 5 MPa,满足 900 级轻骨料要求,因此可根据实际情况选择保温时间,普通轻骨料筒压强度的方案可选 A2B4C3D2。

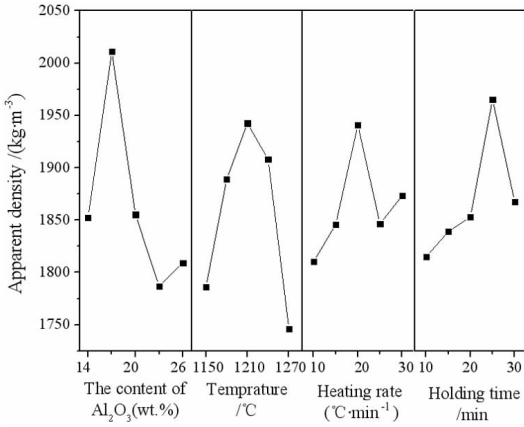


图 5 各因素对抗压陶粒表观密度的影响
Fig. 5 Effect of factors on apparent density

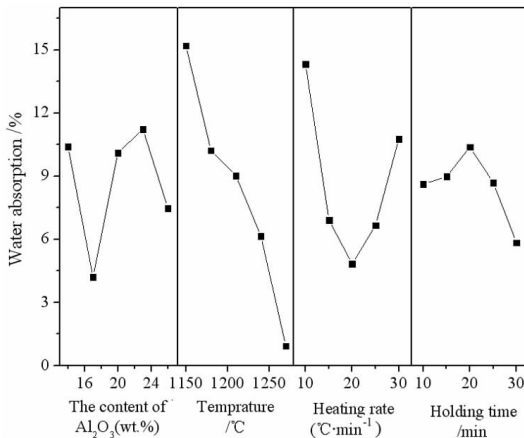


图 6 各因素对陶粒吸水率的影响
Fig. 6 Effect of factors on water absorption

图 7 为各因素对陶粒筒压强度的影响,与吸水率类似,对筒压强度影响最大的是烧制温度,其次是原料配比和保温时间,影响最小的为高温区加热速度。随温度升高,料球产生液相量增加。液相填充陶粒内部孔道间隙,致密度增加,同时料球内部固体颗粒在液相表面张力的作用下,相互靠近,易于彼此固结,有助于提高陶粒强度。此外,流动的液相为颗粒晶核质点的扩散提供了媒介,加快反应的进行,从而析出更多的高

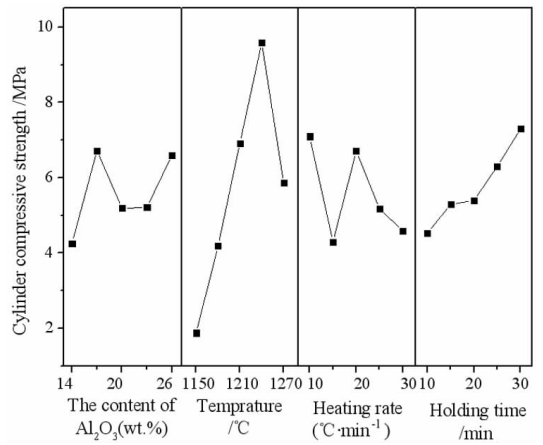


图 7 各因素对抗压陶粒筒压强度的影响
Fig. 7 Effect of factors on cylinder compressive strength

2.3 优选方案的确定

综合分析发现,陶粒的原料比对堆积密度和表观密度影响较大,而烧制温度对吸水率和筒压强度影响较大。陶粒的密度跟膨胀和气孔有关,因原料中未外加产气成分,陶粒的产气主要依赖于 Fe_2O_3 的高温氧化还原反应,随 Al_2O_3 含量的增加,配方中 Fe_2O_3 含量降低(表 3),产气减少,气体压力小,不利于膨胀,密度增大。同时, Fe_2O_3 是助熔剂的主要成分,当 Al_2O_3 含量超过 23% 时,料球中粉煤灰残碳含量增多,促使少量 Fe_2O_3 快速产气完全,此时高温产生液相填充料球内部的孔道和间隙使陶粒致密化对陶粒密度的影响占主导地位,因此陶粒的成分应选择 A2 到 A4 水平。

陶粒的强度主要取决于其内部的 Si - O - Si 和 Si - O - Al 形成的骨架结构,尤其高温稳定的莫来石相 ($Al_2O_3 \cdot SiO_2$) 是陶粒强度重要来源。陶粒烧制过程

中,尽管在 950 °C 时已经开始形成 $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$ 相,但是其数量较少,直到 1 200 °C 时才生成足够 $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$ 晶体,形成网状结构孔壁,保证了陶粒强度^[20]。因此陶粒的烧制温度应选择 B3 及以上水平。此外,气孔的形状对强度和吸水率均也有较大的影响。圆形闭孔有利于提高陶粒强度,降低吸水率,而不规则形状开气孔或连通形状的气孔会使强度下降。温度过高或高温区过快的升温速率可能导致料球表层和内部的膨胀差异,内应力释放不均而引起裂纹,形成贯穿性开气孔,对陶粒强度不利。

陶粒性能应由多方面指标合理权衡确定,用于建筑骨料首先考虑强度和吸水率的要求。正交试验中以堆积密度为指标的优选方案 A4B1C4D2 因陶粒吸水率过高舍去;以吸水率为指标的优选方案 A2B5C3D5 因陶粒可能熔塌舍去;以表观密度指标的优选方案 A4B5C1D1 和以筒压强度为指标的优选方案 A2B4C3D2 均不在正交表中,其验证试验结果如表 5 所示,微观形貌见图 8。对照国标《轻集料及其试验方法》(GB T 17431.1—2010)发现,A4B5C1D1 方案制备的陶粒满足普通轻集料的性能要求,而 A2B4C3D2 方案制备的陶粒强度较高,但是其堆积密度高于标准值。对比表 4 中 8 和 19 号试验发现,满足其它性能条件下,8 号试验试样的筒压强度最高。

表 5 优选方案对比

Table 5 Comparison of optimal processes

Experiment	Bulk density /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	Apparent density /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	1h Water absorption /%	Cylinder pressure strength/MPa
A4B5C1D1	807.46	1 720.07	1.17	5.13
A2B4C3D2	987.11	1 953.21	4.13	8.41
8	888.20	1 907.14	5.04	8.34
19	876.80	1 760.00	1.12	7.63

为进一步验证试验结果,A2B4C3D2 方案、8 号和 19 号所制备的陶粒微观形貌如图 8 所示。A2B4C3D2 方案和 8 号陶粒微观形貌相似,均为少量大孔周围分布众多微孔,而 9 号陶粒因焙烧温度高,表层很快产生足够的液相包裹陶粒,内部产生气体无法逸出;因保温时间长,陶粒坯体内部气体集聚膨胀产生大气孔,从而孔壁减少导致其强度和密度均有所降低。综合考虑,选择 8 号试验为制备铁尾矿陶粒的最佳工艺,即 Al_2O_3 含量为 17%,烧制温度为 1 210 °C,高温区升温速率为 25 °C/min,保温时间为 30 min,制备陶粒堆积密度 888.20 kg/m^3 ,表观密度为 1 907.14 kg/m^3 ,筒压强度为 8.34 MPa,1 h 吸水率为 5.04%。

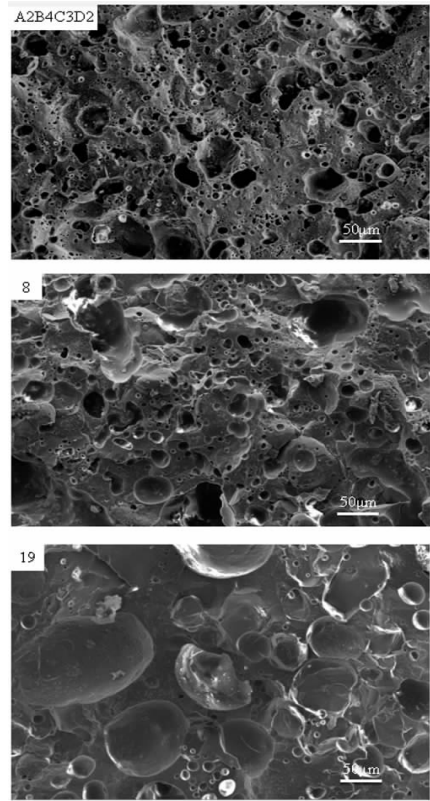


图 8 A2B4C3D2 方案、8 号和 19 号陶粒的显微形貌
Fig. 8 Micro morphology of A2B4C3D2, No. 8 and No. 19 ceramics

3 结论

(1) 通过 TG - DSC 分析和 XRD 分析显示,铁尾矿在 1 126 ~ 1 300 °C 之间有宽大的吸热峰,伴随质量损失,发生矿相溶解反应。粉煤灰在加热过程中失重极小,1 098 ~ 1 275 °C 之间仅有较小的放热峰,性质稳定。陶粒的烧制温度为 1 150 ~ 1 270 °C。

(2) 通过正交试验考察了原料配比、烧制温度、高温区的加升温度和保温时间对陶粒堆积密度、表观密度、吸水率和筒压强度的影响,结果显示陶粒的原料对比对堆积密度和表观密度影响较大,而烧制温度对吸水率和筒压强度影响较大。

(3) 以铁尾矿为原料,以粉煤灰为 Al 校正剂,制备陶粒的最优工艺为:料球中 Al_2O_3 含量为 17%,以 10 °C/min 的速度升温至 1 000 °C,然后以 25 °C/min 的速度升温至 1 210 °C,保温 30 min。所制备陶粒堆积密度 888.20 kg/m^3 ,表观密度为 1 907.14 kg/m^3 ,筒压强度为 8.34 MPa,1 h 吸水率为 5.04%,满足 900 级高强轻质陶粒性能要求。

参考文献:

- [1] 王德民,胡百昌,储腾跃,等.低硅铁尾矿制备建筑陶粒及其性能研究[J].新型建筑材料,2016(2):36-38.
- [2] CHUAN WANG, XIN - XIN CHEN, CHAO DANG, et al. Preparation

- of ceramsite from C&D waste and baiyunebo tailings[J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2016, 31: 211–217.
- [3] 朱晓丽,陈瑞军,么琳,等. 铁尾矿陶粒的制备及对生活污水的处理[J]. *金属矿山*, 2015(8): 178–180.
- [4] 烟台智本知识产权运营管理有限公司. 一种硫铁尾矿陶粒支撑剂的制备方法: CN201610158294. X[P]. 2016–07–27.
- [5] 杜芳,刘阳生. 铁尾矿烧制陶粒及其性能的研究[J]. *环境工程*, 2010(S1): 369–372.
- [6] 李晓光,尤碧施,高蕊桐,等. 低硅铁尾矿陶粒烧结工艺优化试验[J]. *硅酸盐通报*, 2019, 38(1): 294–298.
- [7] TSAI C, WANG K S, CHIOU I J. Effect of $\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{flux}$ ratio change on the bloating characteristics of lightweight aggregate material produced from recycled sewage sludge[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2006, 134(1/3): 87–93.
- [8] 刘明伟,许国仁,李圭白. Al_2O_3 对污泥和河道底泥制取陶粒的性能影响[J]. *中国给水排水*, 2013(21): 132–134.
- [9] 王征,郭玉顺. 粉煤灰高强陶粒烧胀规律的试验研究[J]. *新型建筑材料*, 2002(2): 10–14.
- [10] 徐杰. 污泥烧制陶粒机理及工艺研究[D]. 沈阳: 沈阳航空工业学院, 2010.
- [11] XU GUOREN, ZOU JINLONG, LI GUIBAI. Ceramsite made with water and wastewater sludge and its characteristics affected by SiO_2 and Al_2O_3 [J]. *Environmental science & technology*, 2008, 42(19): 7417–7423.
- [12] 张其勇,徐郡,赵蔚琳. 影响烧制陶粒性能的因素分析[J]. *山东化工*, 2019(18): 26–29.
- [13] 陈珏. 粉煤灰陶粒的制备及处理含油废水的研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2004.
- [14] 杨传猛. 铁尾矿制备烧制陶粒的研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2015.
- [15] 习嘉晨,向晓东,秦显,等. 工业固废制备陶粒的机理探讨[J]. *中国废钢铁*, 2015(5): 18–22.
- [16] 郝斐,赵大传. 轻质/超轻粉煤灰陶粒的研制及陶粒膨胀机理的探讨和应用[J]. *功能材料*, 2010(S3): 518–523.
- [17] GUO Y, LI Y, CHENG F, et al. Role of additives in improved thermal activation of coal fly ash for alumina extraction [J]. *Fuel Processing Technology*, 2013, 110: 114–121.
- [18] SAHNOUNE F, BELHOUEH H, SAHEB N, et al. Phase transformation and sintering behavior of mullite and mullite–zirconia composite materials[J]. *Advances in Applied Ceramics*, 2011, 110(3): 175–180.
- [19] 罗晖. 污水污泥页岩建筑材料制备与性能研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2010.
- [20] XU G R, ZOU J L, LI G B. Effect of sintering temperature on the characteristics of sludge ceramsite [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, 150(2): 394–400.

Experimental Study on Preparation of Ceramsite with High Silicon Iron Tailings

WU Junquan¹, MA Jing¹, WANG Yingling^{1,2}, QIAO Fulong^{1,2}, LI Jing¹, HU Wenbin¹, ZHAO Yingjie¹, DUAN Mengzhan¹, WANG Jiangwei¹

1. School of Resources and Materials, Northeastern University at Qinhuangdao Branch, Qinhuangdao 066004, China;
2. Qinhuangdao Laboratory of Resources Cleaner Conversion and Efficient Utilization, Qinhuangdao 066004, China

Abstract: The high strength lightweight ceramsite was prepared by taking iron tailings as aggregate, and fly ash as corrector. In order to determine the sintering temperature range of the ceramsite, the thermal reaction process of the raw material was tested by TG–DSC and XRD. A group of orthogonal test is arranged and carried out to study the effect of composition ratio, sintering temperature, heating rate in high temperature zone and holding time on the bulk density, apparent density, water absorption and cylinder compression strength of ceramsite. The formulation and manufacturing process of permeable brick were optimized. The results showed that the density of ceramsite was greatly affected by composition of raw materials, while the sintering temperature had a greater impact on the water absorption and cylinder compressive strength. The high strength lightweight ceramsite with the bulk density of 888.20 kg/m³, the apparent density of 1 907.14 kg/m³, the cylinder compressive strength of 8.34 MPa, and 1h water absorption rate of 5.04% could satisfy the GB/T 17431.1—2010 standard, when the content of Al_2O_3 in the pellets was 17%, and the temperature was raised to 1 000 °C at 10 °C/min, and then to 1 210 °C at 25 °C/min, and the temperature was kept for 30 minutes. It has provided a new route for the comprehensive utilization of iron tailings.

Key words: iron tailings; fly ash; high strength lightweight ceramsite; orthogonal test; bulk density; cylinder compression strength

引用格式: 吴俊权, 马晶, 汪应玲, 乔福龙, 李晶, 胡文斌, 赵颖洁, 段孟涵, 王江伟. 高硅铁尾矿制备陶粒工艺试验研究[J]. *矿产保护与利用*, 2020, 40(6): 126–132.

Wu JQ, Ma J, Wang YL, Qiao FL, Li J, Hu WB, Zhao YJ, Duan MZ, and Wang JW. Experimental study on preparation of ceramsite with high silicon iron tailings[J]. *Conservation and utilization of mineral resources*, 2020, 40(6): 126–132.