

# 油页岩残渣制备建筑陶粒的关键技术

徐长伟,张宇,谢锐

(沈阳建筑大学材料科学与工程学院,辽宁 沈阳 110168)

**摘要** 目的 利用油页岩残渣制备建筑陶粒,确定油页岩残渣基建筑陶粒的最佳制备工艺。方法 研究油页岩残渣的各方面性能;利用油页岩残渣制备建筑陶粒。结果 通过实验得到,原始油页岩残渣中的硫元素含量比较高,油页岩残渣的熔点接近 1 200 ℃,其平均粒径为 25.66 μm;保温过程对于油页岩残渣的外观形貌、化学元素分布没有明显的影响;在添加发泡物质的陶粒表面形成浅绿色的玻璃体外壳,且烧结温度越高、烧结时间越长玻璃体的量越多;随着烧结温度的升高,样品陶粒的密度先升高,后又小幅下降,烧结 15 min 时样品陶粒的密度最高。结论 确定 1 025 ℃/15 min 为利用油页岩残渣烧制混凝土陶粒的最佳工艺参数。

**关键词** 油页岩残渣;脱硫工艺;建筑陶粒;外观形貌;吸水率;密度

中图分类号 TU521

文献标志码 A

## The Key Technology Process of Manufacturing Architectural Ceramsite by Using Oil Shale Residue

XU Changwei, ZHANG Yu, XIE Rui

(School of Materials Science and Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

**Abstract:** In order to use Oil shale residue manufacturing architectural ceramsite, the optimal manufacturing technology was studied. The properties of oil shale residue were studied by many ways. Architectural ceramsite was prepared by oil shale residue. The experimental results show that the content of sulfur in the original oil shale residue is relatively high, and its melting point close to 1 200 ℃, its average particle size is 25.66 μm. Heat preservation process has no obvious effect on the appearance, and chemical element distribution of oil shale residue. A light green glass shell is formed on the surface of the ceramsite after adding foaming substance, and the higher sintering temperature or the longer sintering time, the more amount of glass. With the increase of sintering temperature, the density of ceramsite samples first increased and then decreased slightly. The density of ceramsite samples is the highest when sintered for 15 min. It is determined that the best technology for manufacturing architectural ceramsite by oil shale residue is 1 025 ℃ for 15 min.

收稿日期:2022-05-17

基金项目:“十三五”国家重点研发计划项目(2018YFD1101001);辽宁省教育厅基本科研项目(青年项目)(LJKQZ2021061);辽宁省“兴辽英才计划基金项目”(XLYC1902103)

作者简介:徐长伟(1972—),男,教授,主要从事固体废弃物资源化、生态建筑材料等方面研究。

**Key words:** oil shale residue; desulfurization technology; architectural ceramicsite; surface morphology; water absorption; density

我国拥有丰富的油页岩资源。油页岩的含油量极高,不但可以改善我国石油严重依赖进口的局面<sup>[1-2]</sup>,还可以促进经济的发展,在我国能源结构中扮演重要的角色。目前,油页岩的主要利用方式为提取石油、土壤改良、制备吸附剂和填充剂、化学药品制备等<sup>[3-5]</sup>,还有研究利用油页岩制取白炭黑<sup>[6-7]</sup>。但是,油页岩提取石油后会形成大量的油页岩残渣,这些残渣中硫元素和重金属的含量比较高,对环境污染极其严重<sup>[8-9]</sup>。我国城市建设不断发展和进行,资源消耗十分巨大,将油页岩残渣制备成混凝土材料用再生骨料陶粒具有极其重要的现实意义。目前,制备陶粒的主要原料有黏土、普通页岩、粉煤灰、煤矸石、污泥、赤泥、淤泥等<sup>[10-12]</sup>,另添加少量助熔物质、发泡物质等。

综上所述,笔者利用X射线荧光光谱仪、X射线衍射仪、扫描电镜、热分析仪及激光粒度分析仪等设备检测油页岩残渣的矿物组成、化学组成及粒度等特征;利用处理后的油页岩残渣制备建筑陶粒,在此过程中观察所制备的陶粒的表面形貌;探讨制备工艺条件对于油页岩残渣基建筑陶粒性能的影响,以期确定油页岩残渣基建筑陶粒的最佳工艺参数。

## 1 实验

实验所使用的油页岩残渣取自辽宁省北票市,为深灰褐色(接近黑色)块状固体,质地较软。将破碎后的油页岩残渣加热并保温。加热温度分别为350℃、450℃、550℃和650℃,于350℃、450℃、550℃保温2 h,650℃保温1 h、2 h、3 h、4 h、6 h、8 h。保温结束后切断电源,使样品随炉冷却。冷却后取出样品,利用LA-920型激光散射粒度分

析仪测量油页岩残渣的粒度分布。

利用JSM—7100F型扫描电子显微镜(SEM)观察油页岩残渣原料及高温保温后油页岩残渣的表面形貌。SEM工作电压20 kV,工作距离10 mm。XRD的X射线特征波长为1.54 Å、步长0.02°、电压40 kV。X射线荧光(XRF)实验的检测温度为0℃,电压40 kV,电流400 μA,保护气体为高纯度He气。油页岩残渣的热分析(DSC)使用高纯度Ar气作为保护气体,测量温度为50~1 450℃,升温速率20℃/min,真空条件下进行测量。

将经过高温保温的油页岩残渣与质量浓度为20%氢氧化钠溶液混合并搅拌,然后倒入浓度为6%的盐酸溶液,中和剩余的氢氧化钠溶液。使用碳酸钠作为发泡物质添加到烘干后的油页岩残渣中。手工将充分混合的原料制备成球状,并在马弗炉中烧制成建筑陶粒。其中,碳酸钠的添加质量比为12%,烧制温度为1 000℃、1 025℃、1 050℃、1 075℃,烧制15 min,在1 025℃下烧制5 min、10 min、15 min、20 min。

陶粒样品的密度用阿基米德排水法测得。首先,测量其在空气中的质量(干重) $m_1$ ;其次,使水充分填满样品的孔隙,测量此时的质量(湿重) $m_2$ ;最后,利用课题组自制设备测得样品在水中的质量(浮重) $m_3$ 。由式(1)计算样品的实际密度。

$$\rho = \frac{m_1}{m_2 - m_3} \rho_s \quad (1)$$

式中: $\rho$ 为样品密度,g/cm<sup>3</sup>; $\rho_s$ 为水的密度,取1 g/cm<sup>3</sup>。

样品吸水率的测量。首先,测量陶粒在空气中的质量 $m_1$ ;然后,将陶粒充分浸泡后从水中取出,测量陶粒的质量 $m_2$ 。按照式(2)计算出陶粒样品的吸水率。

$$W = (m_2 - m_1) / m_1.$$
 (2)

2 实验结果与分析

2.1 原始油页岩残渣的性质

表1 为油页岩残渣的化学组成,其中,含量较高的硫元素限制了油页岩残渣陶粒在混凝土中的应用。表1 还列出了制备陶粒的主要原材料之一的黏土主要化学成分,作为参照比较<sup>[13]</sup>,油页岩残渣的主要化学成分与黏土极为相似,只是硫元素的质量分数有较大差别。

表1 XRF 分析结果

Table 1 XRF analysis results										%
样品	w(SiO <sub>2</sub> )	w(Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	w(Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	w(SO <sub>3</sub> )	w(CaO)	w(K <sub>2</sub> O)	w(MgO)	w(P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	w(Na <sub>2</sub> O)	w(TiO <sub>2</sub> )
油页岩残渣	65.17	15.17	5.48	3.65	3.12	3.11	1.60	1.04	0.80	0.56
黏土	75.83	11.32	3.20	<0.01	0.95	2.02	0.75	—	1.26	—

图1(a)为原始油页岩残渣的XRD结果。在XRD曲线中存在多个衍射峰分别对应SiO<sub>2</sub>相和SO<sub>2</sub>相。说明原始油页岩残渣中的S元素以SO<sub>2</sub>相为主,揭示了油页岩残渣中S元素的存在形式。图1(b)为油页岩残渣的激光粒度分布结果。从中可以观察到油页岩残渣的粒径主要小于90 μm,其尺寸平均值为25.66 μm。油页岩残渣的尺寸越细小,比表面积越大,油页岩残渣的受热面积越大,越有利于油质物质和含硫化合物的逸出。结果表明,油页岩残渣的比表面积达到9 368.3 cm<sup>2</sup>/cm<sup>3</sup>。图1(c)为油页岩残渣的DSC实验曲线。从图中可以观察到曲线先上升后又降低,在接近1 450 K的位置上出现一个波谷,其最低点对应油页岩残渣的熔点。该温度决定油页岩残渣陶粒制备过程控制,陶粒的制备温度不应超过此温度。

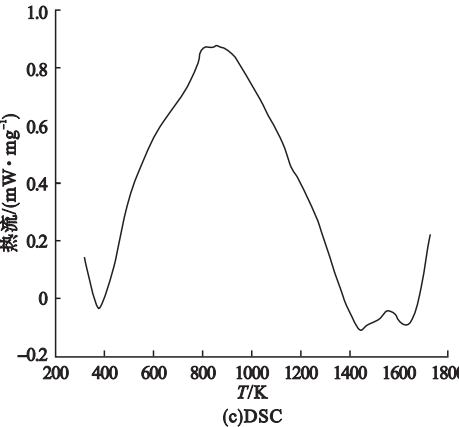
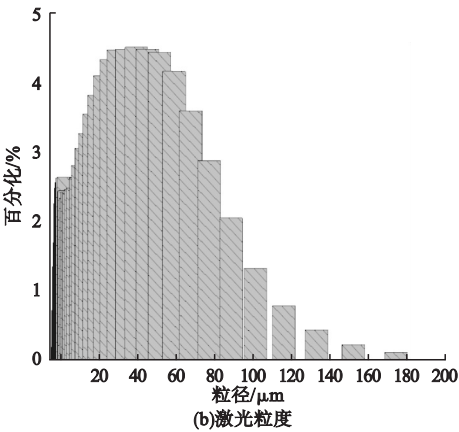


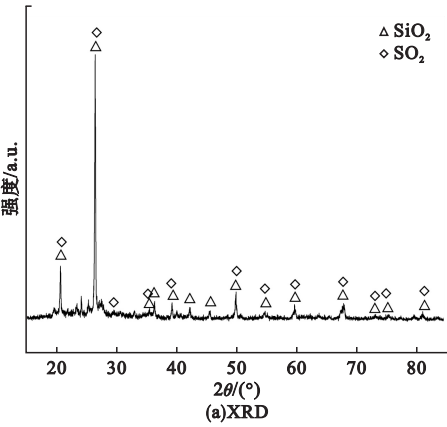
图1 油页岩残渣的性质

Fig.1 Properties of oil shale residue

2.2 质量变化及宏观形貌

2.2.1 质量变化

图2 为不同保温温度、保温时间条件下油页岩残渣的质量降低百分率。由文献[14-16]可知,油页岩通过蒸馏方式提取石油的作业温度范围为300~600℃。从图2(a)中看出,油页岩残渣在不同温度条件



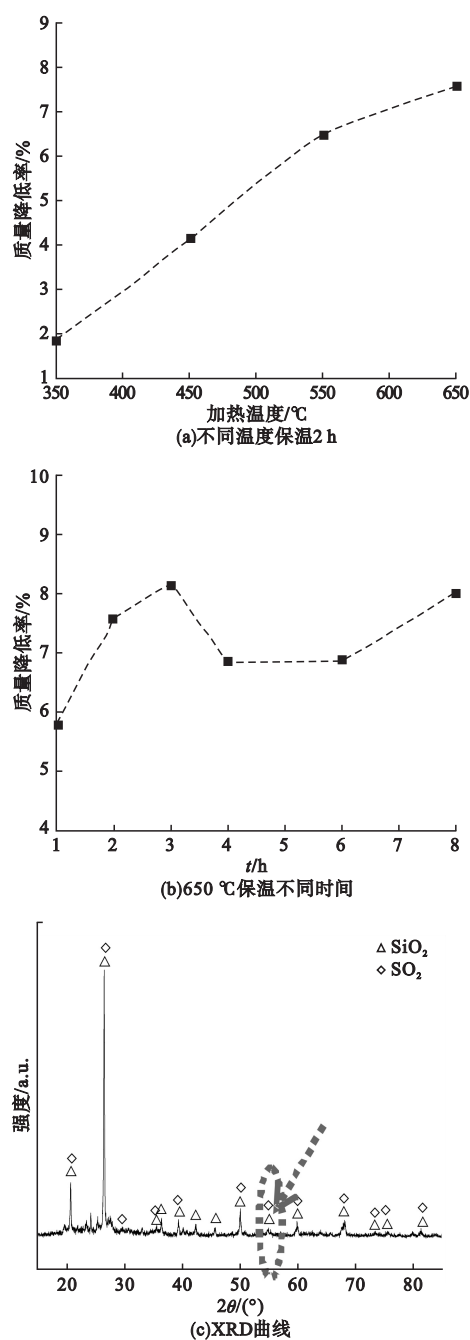


图2 热处理后样品

Fig. 2 Samples after thermal insulation

下保温 2 h,随着保温温度的升高,样品质量减少的百分率逐渐增加。但是,当温度由 550 ℃ 提高到 650 ℃ 后,样品质量降低曲线斜率较前一阶段变小,说明进一步提高保温温度油页岩残渣的质量降低率已接近极限。当保温温度为 650 ℃ 时,样品的质量降低率为 7.56%。如图 2(b) 所示,在 650 ℃ 保温时,随着保温时间的延长,油页岩残渣的质量降低百分率首先在不断增加,当保温时间达到 3 h 后,油页岩残渣的质量降低百分率达到最大值。说明 650 ℃ 下 3 h 保温已经能够最大限度地使残留在油页岩残渣中的油质物质挥发逸出。图 2(c) 为 650 ℃ 保温 2 h 后样品的 XRD 图。经过与图 1(a) 比较可知,油页岩残渣的物相种类没有改变,但在接近 55° 位置衍射峰强度明显增加。通过标定可知该衍射峰为 SO<sub>2</sub> 相,衍射峰强度增加,说明该物质在样品中的含量增加。

表 2 为原始油页岩残渣、550 ℃ 和 650 ℃ 下保温 2 h 后的 XRF 结果。由表中可见,高温保温后油页岩残渣的主要组成和化学元素含量变化并不明显,但硫含量下降约 1%,说明高温保温过程只会影响油页岩残渣中硫元素的含量,并不会显著影响油页岩残渣的其他化学成分。比较 550 ℃ 和 650 ℃ 保温 2 h 后的 XRF 结果可知,提高保温温度硫元素的含量会继续下降,但下降趋于稳定。

2.2.2 外观形貌变化

图 3 为不同温度保温 2 h 后油页岩残渣的形貌。油页岩残渣样品原本是深灰褐色的,随着保温温度的升高,样品的颜色逐渐变浅,最终转变为土黄色。说明随着保温温度

表 2 XRF 分析结果

Table 2 XRF analysis results

	%									
样品	w(SiO <sub>2</sub> )	w(Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	w(Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	w(SO <sub>3</sub> )	w(CaO)	w(K <sub>2</sub> O)	w(MgO)	w(P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	w(Na <sub>2</sub> O)	w(TiO <sub>2</sub> )
原始油页岩残渣	65.17	15.17	5.48	3.65	3.12	3.11	1.60	1.04	0.80	0.56
550 ℃/2 h 残渣	65.78	15.48	5.57	2.85	2.99	3.06	1.70	0.99	0.80	0.54
650 ℃/2 h 残渣	65.50	15.67	5.79	2.71	2.92	3.11	1.70	0.83	0.90	0.56

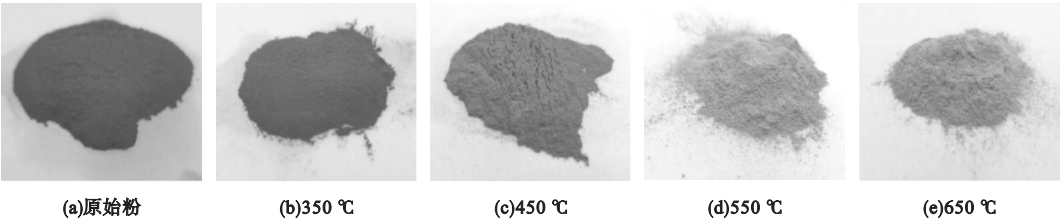


图 3 不同温度保温后样品的表面形貌

Fig. 3 Surface morphology of samples after high temperature insulation at different temperatures

的提高,油页岩残渣中残留的油质物质和含硫化合物在不断减少。从图 3 还可以观察到,油页岩残渣的颗粒度不会被保温过程所影响,并没有出现结块现象。根据参考文献 [17-18],不同产地油页岩残渣的变形温度和熔点均高于 1 100 ℃,DSC 实验结果也证明实验使用的油页岩残渣的熔点接近 1 200 ℃。实验中的加热温度均低于

1 100 ℃,并没有达到油页岩残渣的变形温度和熔化温度,所以油页岩残渣均保持原有的外观形貌。

图 4 为油页岩残渣 650 ℃不同时间保温后的形貌。图 2(b)说明经 650 ℃3 h 保温后油页岩残渣质量的降低百分率最大,图 4 也说明当保温时间超过 3 h 后油页岩残渣的颜色基本不再变化,与 EDS 结果一致。

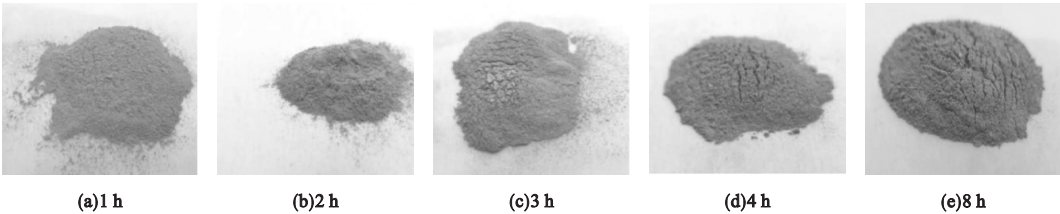


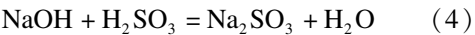
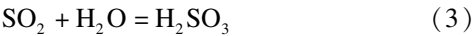
图 4 油页岩残渣 650 ℃不同时间保温后的表面形貌

Fig. 4 Surface morphology of oil shale residue after insulation different time at 650 ℃

2.3 油页岩残渣的化学脱硫

将经过 650 ℃ 3 h 保温的油页岩残渣浸泡于氢氧化钠溶液中。图 5 为氢氧化钠溶液浸泡油页岩残渣前后的 XRD 结果。由图可

知,浸泡油页岩残渣前溶液为氢氧化钠单质,但是浸泡过油页岩残渣后出现了亚硫酸钠和碳酸钠的衍射峰。结合 XRD 与 XRF 结果可知,油页岩残渣中的 SO<sub>2</sub> 与水形成亚硫酸,随后亚硫酸与氢氧化钠发生酸碱反应生成亚硫酸钠和水,如式(3)、式(4)所示。经过此过程,油页岩残渣中的硫含量低于 0.3%。



2.4 油页岩残渣制备建筑陶粒

图 6 比较了不同温度烧结 15 min 后陶粒的外观形貌。在未掺加碳酸钠的样品中,表面呈深褐色,可能与油页岩残渣中部分成分被氧化有关。而且,在表面不见玻璃体外层,也不见明显孔洞。在添加了碳酸钠的样品中,陶粒外表面呈现偏浅绿色,有明显的玻璃

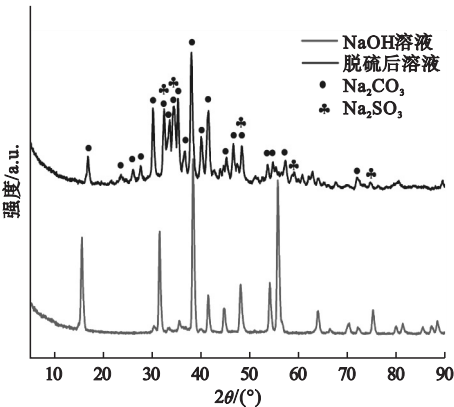


图 5 浸泡前后溶液的 XRD 结果

Fig. 5 XRD results of solution before and after soaking



体外层存在,且玻璃体的形成量与烧结温度有关。碳酸钠的熔点为 851 ℃,会有一部分碳酸钠熔化并渗出至陶粒表面,冷却过程中重新凝固加入玻璃体外层。在 1 075 ℃ 烧结的样品中,表面玻璃体完整包裹样品表面,未见任何孔洞,陶粒呈完整的玻璃体状态。烧结温度降低至 1 050 ℃,样品表面的玻璃体数量减少,虽仍然完整包裹陶粒表面,但厚度变薄,表面可见个别孔洞。继续降低烧结温度至 1 025 ℃,陶粒的玻璃体数量继续减少,某些区域可见少量孔洞。在 1 000 ℃ 烧结的样品中,有大量粗大的孔洞分布在陶粒表面,同时样品表面的玻璃体较少。经分析得知,碳酸钠在烧结过程中分解为氧化钠和二氧化碳,二氧化碳在陶粒内部产生孔洞。

经过比较各个烧结温度陶粒样品的表面形貌,确定最佳烧结温度为 1 025 ℃。在相对较低温度下,仍可以烧结成陶粒,这是因为油页岩残渣中含有  $K_2O$ ,而  $K_2O$  的熔点为 770 ℃,在烧结过程中可以起到润湿其他物相的作用,促进陶粒的烧成。烧结过程中碳酸钠分解产生  $Na_2O$ ,而  $Na_2O$  有降低油页岩残渣熔点的作用,同时促进陶粒的烧成。有研究指出在 300 ~ 400 ℃ 内,  $Na_2O$  会与空气中的氧元素反应生成  $Na_2O_2$ ,  $Na_2O_2$  会促进油页岩残渣中其他物质熔化,降低熔点<sup>[19]</sup>。另一方面,油页岩残渣中的  $K^+$ 、 $Mg^{2+}$ 、 $Na^+$ 、 $Ca^{2+}$  等离子会使硅氧四面体和铝氧四面体分离成片,形成熔点更低的低温共熔体,起到降低体系熔点的效果<sup>[20]</sup>。



图 6 不同温度烧结陶粒的形貌

Fig. 6 Morphologies of ceramsite sintering at different temperatures

图 7 为 1 025 ℃ 下不同烧结时间下样品的表面形貌。可以看出,随着烧结时间的延长,样品表面的玻璃体增多,同时样品表面

的孔洞在逐渐减少。这是因为烧结时间越长,样品表面的玻璃体含量增加,当样品表面被包裹后,阻止了二氧化碳气体逸出。

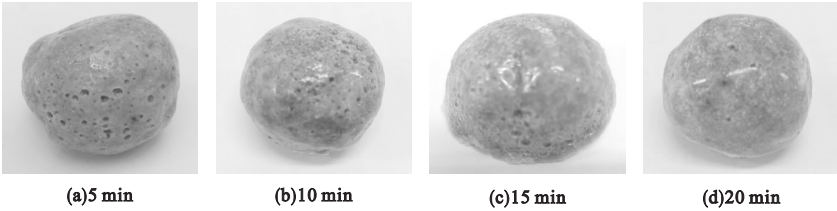


图 7 不同烧结时间陶粒的形貌

Fig. 7 Morphologies of ceramsite sintering at different time

图 8(a、b)为油页岩残渣基建筑陶粒 1 h 及 24 h 的吸水率曲线。1 h、24 h 添加碳酸钠的样品吸水率分别达到 0.22 和 0.25,均低于不添加碳酸钠的陶粒。因不添加碳酸钠的陶粒表面没有玻璃体形成(如图 6 所示)。虽在样品表面不见任何明显的孔洞,但在样品内部可能存在大量孔洞,透过玻璃体外层

微隙,水可以自由进入陶粒内部,因此吸水率较高。随着烧结温度的升高,陶粒样品的吸水率逐渐降低,最后趋于平缓。在 1 000 ℃ 烧结时,表面可见大量粗大的孔洞,且玻璃体很少,未能完整包裹陶粒表面(见图 6),不能有效阻止水进入。因此,无论 1 h 还是 24 h 的吸水率,1 000 ℃ 烧结的陶粒样

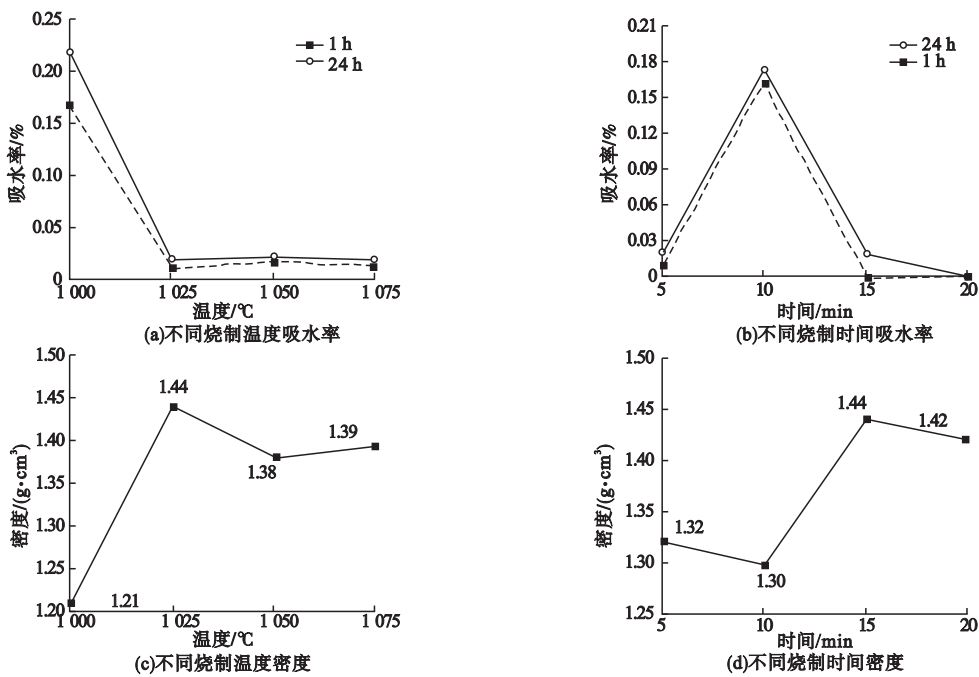


图 8 陶粒的性质

Fig. 8 Properties of ceramsite

品均在添加碳酸钠样品中最高。在烧结温度为1 025 ℃时,陶粒样品的吸水率下降趋势达到极限,再继续提高烧结温度,陶粒样品的吸水率只会有微小幅度波动。在1 025 ℃,随着烧结时间的延长,陶粒样品的吸水率先快速升高,在 10 min 时达到最高值,然后快速下降。在烧结 15 min 后陶粒样品的吸水率接近下降极限。随后,陶粒样品表面的玻璃体数量会随着烧结时间的延长而逐渐增加,并包裹陶粒样品的表面,阻止水的进入,达到降低陶粒吸水率的效果。在混凝土中陶粒作为骨料其吸水率越低会有更多的水与水泥发生水化反应,减少拌合用水,从而增加混凝土的强度。根据国家标准,建筑用人造轻集料的 1h 吸水率为 10% ~ 30%,高于实验中油页岩残渣烧制成的陶粒。图 8(c) 为不同烧制温度下陶粒样品的密度,原始油页岩残渣烧制的陶粒的密度为 1.34 g/cm<sup>3</sup>。1 000 ℃烧制的陶粒的密度为 1.21 g/cm<sup>3</sup>。在 1 025 ℃烧制时,产生的玻璃体的量既能够完整包裹陶粒样品表面,同时熔体物质还可以填充陶粒内部孔洞,所以该样品的密度值提高到 1.44 g/cm<sup>3</sup>。继续提高烧结

温度至 1 050 ℃,陶粒样品的密度又略微降低。进一步提高烧制温度至 1 075 ℃,样品的密度与 1 050 ℃烧制的样品已无明显变化。图 8(d) 为 1 025 ℃不同烧制时间陶粒样品的密度值。可见,随着烧制时间的延长陶粒样品的密度先小幅下降,后显著上升,在 15 min 时样品的密度达到最大,随着烧制时间延长样品的密度又小幅下降。虽然添加了发泡物质之后陶粒的密度有小幅升高,但是其吸水率却显著下降,有利于在混凝土中使用。结合陶粒样品的表面形貌和吸水率数据,确定 1 025 ℃/15 min 为最佳的油页岩残渣烧制陶粒的工艺。在混凝土中常用的骨料为玄武岩或花岗岩,其密度均大于 2.7 g/cm<sup>3</sup>,而实验中通过最佳工艺烧制的建筑陶粒的密度仅约为玄武岩或花岗岩的一半,可以显著降低混凝土的自重,还可以大量消耗油页岩残渣。

### 3 结 论

- (1) 通过物理与化学相结合的脱硫方式,使油页岩残渣中的硫含量显著降低。
- (2) 随着烧制温度的提高或烧制时间的

延长,陶粒表面的玻璃体数量增加,吸水率降低。

(3)确定1 025 ℃/15 min 为利用油页岩残渣烧制混凝土陶粒的最优工艺参数。

## 参考文献

- [1] 任嘉敏. 东北老工业基地绿色发展评价及优化提升对策研究[D]. 长春:中国科学院大学,2020.  
(REN Jiamin. Research on the green development evaluation and optimization in old industrial base of northeast China [D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences,2020. )
- [2] 崔树辉. 内蒙古奈曼旗油页岩特征及开发利用[D]. 长春:吉林大学,2020.  
(CUI Shuhui. Characteristics and utilization of oil shale in Neiman Banner, Inner Mongolia [D]. Changchun: Jilin University,2020. )
- [3] ALALLOU W S, SALAHEEN M A, MALKAWI A B, et al. Utilizing of oil shale ash as a construction material: a systematic review [J]. Construction and building materials,2021,299:1-20.
- [4] 肖彦春. 油页岩及废渣农业利用研究进展[J]. 辽宁农业职业技术学院学报,2014,16(4):12-14.  
(XIAO Yanchun. Research progress of agricultural utilization of oil shale and waste residues [J]. Journal of Liaoning agricultural college,2014,16(4):12-14. )
- [5] 范恒瑞,李永菊,刘卉昇,等. 油页岩渣综合利用研究进展[J]. 北方建筑,2019,4(3):62-64.  
(FAN Hengrui, LI Yongju, LIU Huisheng, et al. Research progress on comprehensive utilization of oil shale slag [J]. Northern architecture,2019,4(3):62-64. )
- [6] NIE L, WANG T. Study on the preparation of Silica using residue of oil shale residue [J]. Chemistry in industry,2015,64(7/8):347-352.
- [7] ZHANG H, SONG Y H, SHENG Y, et al. Preparation and photoluminescence properties of tri-color phosphor using alumina and white carbon black extracted from oil shale ash [C]. BIT's 4th Annual World Congress of Advanced Materials,2015,47:143-148.
- [8] BAI Shuxia, CHU Mo, ZHOU Lingmei, et al. Removal of heavy metals from aqueous solutions by X-type zeolite prepared from combination of oil shale ash and coal fly ash [J]. Energy sources, part A: recovery, utilization, and environmental effects,2019:1-11.
- [9] KONIST A, NESHUMSYEV D, BAIRD Z S, et al. Mineral and heavy metal composition of oil shale ash from oxyfuel combustion [J]. ACS omega,2020,5(50):32498-32506.
- [10] 马明亮,孙晓南,权宗刚,等. 我国工业固废制备陶粒资源化利用的研究进展[J]. 硅酸盐通报,2020,39(8):2492-2500.  
(MA Mingliang, SUN Xiaonan, QUAN Zonggang, et al. Research progress on resource utilization of ceramsite prepared from industrial solid waste in China [J]. Bulletin of the Chinese ceramic society,2020,39(8):2492-2500. )
- [11] JIE L, GUANGWEI Y, LANJIA P, et al. Ceramsite preparation from sea sludge with sewage sludge biochar and its environmental risk assessment [J]. IOP conference series: earth and environmental science,2018,121(3):032035.
- [12] 吴小媛,廖述聪,何仕均,等. 水处理用陶粒滤料的研究现状[J]. 粉煤灰综合利用,2015(3):49-52.  
(WU Xiaohuan, LIAO Shucong, HE Shijun, et al. Research status of ceramsite used for water treatment [J]. Fly ash comprehensive utilization,2015(3):49-52. )
- [13] 刘刚,封孝信,胡晨光,等. 利用铁尾矿制备陶粒研究[J]. 华北理工大学学报(自然科学版),2021,43(3):49-54.  
(LIU Gang, FENG Xiaoxin, HU Chenguang, et al. Research on preparation of ceramsite with iron tailings [J]. Journal of north China university of science and technology (natural science edition),2021,43(3):49-54. )
- [14] 陈星. 油页岩废渣用于透水沥青路面路用性能及透水功能评价研究[D]. 长春:吉林大学,2019.  
(CHEN Xing. Study on pavement performance and permeability evaluation of oil shale waste for pervious asphalt pavement [D]. Changchun: Jilin University,2019. )
- [15] LIU G Y, SUN, P L, JI Y X, et al. Current status and energy analysis of oil Shale's retorting process in the world [J]. Petroleum chemistry,2021,61:123-138.
- [16] JEONG G N, CHEOL H I, SOO H C, et al. Effect of oil shale retorting temperature on shale oil yield and properties [J]. Fuel,2012,95:131-135.
- [17] 冯晨辰,曹祖宾,韩冬云,等. 新疆塔城油页岩的综合评价及干馏工艺的选择[J]. 辽宁石油化工大学学报,2014,34(2):12-16.  
(FENG Chenchen, CAO Zubin, HAN Dongyun, et al. Comprehensive evaluation and retorting technology selection of tacheng oil shales in Xinjiang [J]. Journal of Liaoning shihua university,2014,34(2):12-16. )
- [18] MENG Y, JIANG P, YAN Y, et al. An advanced ash fusion study on the melting behaviour of coal, oil shale and blends under gasification conditions using picture analysis and graphing method [J]. Chinese journal of chemical engineering,2020,32:393-407.
- [19] YANG L, YING W, YING X, et al. Investigation of ash fusion characteristics and migration of sodium during co-combustion of Zhundong coal and oil shale [J]. Applied thermal engineering,2017,121:224-233.
- [20] LIANG W, WANG G W, NING X J, et al. Effect of CaO mineral change on coal ash melting characteristics [J]. Journal of the energy institute,2020,93(2):642-648.  
(责任编辑:王国业 英文审校:唐玉兰)