

文章编号:1007-9629(2024)07-0604-07

## 化学改性对矿物吸附剂高温特性的影响

朱绘美, 孙晓, 马雨晴, 李辉\*

(西安建筑科技大学材料科学与工程学院, 陕西西安 710055)

**摘要:** 改变高岭土中氧化硅、氧化铝和氧化钙的含量, 制备了改性矿物吸附剂, 分析其在 900~1450 °C 质量、形态及物相的转化规律。结果表明: 900 °C 时矿物吸附剂以无定形硅铝酸盐为主; 1200 °C 时无定形硅铝酸盐向莫来石和方石英转变, 增加氧化硅含量会抑制其转变, 增加氧化铝含量会使其分解出刚玉相, 氧化钙则与活性硅铝反应生成钙长石; 超过 1200 °C 时, 适当增加氧化硅含量可减轻矿物吸附剂的熔融烧结, 降低其重金属 Pb 的挥发率, 而增加氧化铝、氧化钙含量分别可消除、加剧矿物吸附剂的熔融烧结, 对重金属 Pb 的挥发率影响不大。

**关键词:** 矿物吸附剂; 化学改性; 重金属; 高温稳定性

中图分类号: TU525

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1007-9629.2024.07.005

## Effect of Chemical Modification on High-Temperature Properties of Mineral Adsorbents

ZHU Huimei, SUN Xiao, MA Yuqing, LI Hui\*

(College of Materials Science and Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

**Abstract:** Modified mineral adsorbents were prepared by changing the content of silicon oxide, alumina oxide, and calcium oxide in kaolin. The mass, morphology and phase transformation of the modified mineral adsorbents were analyzed at 900–1450 °C. The results show that amorphous aluminosilicates are the main component of mineral adsorbents at 900 °C. At 1200 °C, amorphous aluminosilicates transform into mullite and cristobalite. Increasing silicon oxide content inhibits this transformation, while increasing alumina content decomposes into corundum phase and improves the chemical stability of the adsorbent. Calcium oxide reacts with active silicon aluminum to form calcium feldspar. When the temperature exceeds 1200 °C, an appropriate increase in silicon oxide content can reduce the melting sintering of mineral adsorbents and reduce the release of Pb. However, increasing alumina oxide and calcium oxide contents eliminate and intensify the melting sintering of mineral adsorbents, and has little effect on the release of Pb. The research can provide guidance for improving the solidification of heavy metals in the collaborative disposal of cement kilns.

**Key words:** mineral adsorbent; chemical modification; heavy metal; high-temperature stability

利用水泥窑协同处置污泥、污染土壤和危险废物等可真正实现废弃物的减量化、资源化和无害化处置, 且具有显著的经济效益<sup>[1]</sup>。在水泥窑高温

(1450 °C) 煅烧下, 大多数不挥发性重金属如 Cu、Ni 等可通过固相反应、液相烧结等稳定固化于水泥熟料中<sup>[2-4]</sup>。然而, Pb、Cd、Zn 等半挥发性重金属在高温

收稿日期: 2023-09-15; 修订日期: 2023-10-30

基金项目: “十四五”国家重点研发计划项目(2021YFB3802003); 陕西省重点研发计划项目(2023-YBGY-498); 陕西省教育厅重点研发计划项目(20JS079)

第一作者: 朱绘美(1986—), 女, 山东泰安人, 西安建筑科技大学副教授, 硕士生导师, 博士。E-mail: zhuhuimeitj@163.com

通讯作者: 李辉(1971—), 女, 河南三门峡人, 西安建筑科技大学教授, 博士生导师, 博士。E-mail: sunshine\_lihui@126.com

向低温过渡时存在蒸发-成核-凝结过程,使得超半数重金属通过均相成核和异相冷凝富集于飞灰表面,甚至穿透除尘设备,排放至大气中<sup>[5]</sup>.通过在窑炉内添加吸附剂来捕获重金属是废物焚烧处置领域常采用的固化技术.采用的吸附剂通常具有层状、多孔结构和较高的反应活性,可在重金属蒸汽还未结核前,通过表面物理吸附和化学反应将重金属固化于材料内部<sup>[6-7]</sup>.目前,广泛使用的吸附剂有氧化物<sup>[8]</sup>、钙基材料<sup>[9]</sup>和矿物吸附剂<sup>[7]</sup>.其中,矿物吸附剂价格低廉、资源丰富,其典型代表为高岭土,已在焚烧炉固化重金属中取得较为理想的效果.但超过1100℃时,高岭土的层状结构坍塌,同时无定形硅铝相转化为莫来石晶体,产生高温失活现象<sup>[7]</sup>.

基于此,本文以高岭土为基准吸附剂,通过改变其氧化硅、氧化铝和氧化钙的含量来制备改性矿物吸附剂,分析其在900~1450℃质量、形态及物相转化规律.

## 1 试验

### 1.1 原材料

高岭土由山麟石语矿产品有限公司提供,白色粉末状,平均粒径为44.5 μm(325目),其化学组成(质量分数,本文涉及的组成、含量、比值等均为质量分数或质量比)见表1,矿物组成见图1.硅灰(SF)由四川朗天资源综合利用有限责任公司提供,比表面积为21 m<sup>2</sup>/g. Al(OH)<sub>3</sub>和CaCO<sub>3</sub>由国药集团化学试剂有限公司提供,分析纯.

表1 高岭土的化学组成

Table 1 Chemical composition (by mass) of kaolin

											Unit: %
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Na <sub>2</sub> O	MgO	PbO	IL
39.830	55.570	1.250	0.250	0.770	0.400	0.460	0.490	0.540	0.200	0.012	13.800

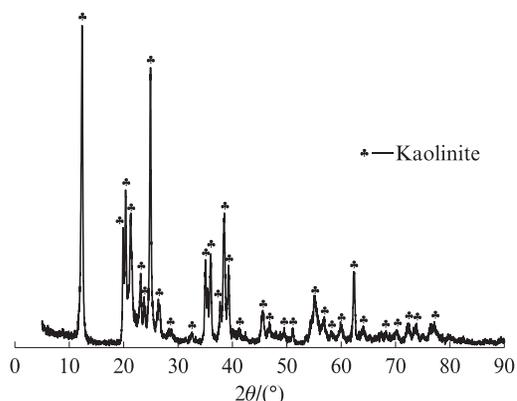


图1 高岭土的矿物组成

Fig. 1 Mineral composition of kaolin

### 1.2 配合比设计

以高岭土为基准矿物吸附剂(K),分别采用SF、Al(OH)<sub>3</sub>和CaCO<sub>3</sub>等质量替代20%、40%、60%的高岭土,制备高硅(K2S、K4S、K6S)、高铝(K2A、K4A、K6A)和高钙(K2C、K4C、K6C)矿物吸附剂.

### 1.3 试验方法

高温煅烧试验采用高温管式炉,以10℃/min的速率分别升温至900、1200、1450℃后保温30 min,取出样品,急冷至室温.烧失量(IL)测试参照GB/T 14563—2020《高岭土及其试验方法》,样品质量为1.0000 g,煅烧条件为1100℃灼烧2 h.采用热重分析(TGA)/差示扫描量热(DSC)1/1600型同步热分析系统进行热分析,空气气氛,温度范围为50~1450℃,升温速率为10℃/min.采用日本理学

Rikagu型X射线衍射仪(XRD)测试样品的物相,测试参数为Cu靶K $\alpha$ 线,扫描范围为10°~80°,扫描速率为5(°)/min.采用德国ZEISS Sigma 300型扫描电子显微镜(SEM)观测样品的微观形貌.重金属Pb的挥发率测试过程为:在矿物吸附剂中掺入0.5%的PbO,经高温煅烧后,采用m(HCl):m(HNO<sub>3</sub>):m(HF)=3:1:1的HCl-HNO<sub>3</sub>-HF溶液对样品进行消解,用Agilent 7800型电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)测定重金属Pb的含量,并计算重金属Pb的挥发率.

## 2 结果与讨论

### 2.1 烧失量

经计算,高岭土、Al(OH)<sub>3</sub>和CaCO<sub>3</sub>的理论分解质量损失率(烧失量)分别为14.0%、46.0%和34.6%.矿物吸附剂的烧失量见图2.由图2可见:样品K的测试烧失量和理论烧失量基本一致,约为14.5%;对于高硅矿物吸附剂,随着氧化硅含量的增加,矿物吸附剂的测试烧失量低于理论烧失量,样品K2S和K4S的降低率分别为7.6%、8.0%,而继续提高氧化硅含量,样品K6S的测试烧失量比理论烧失量高11.2%;对高铝矿物吸附剂,其测试烧失量均明显低于理论烧失量,且氧化铝含量越高,偏差越大,样品K2A、K4A和K6A的测试烧失量比理论烧失量分别降低10.8%、28.1%和36.4%;对与高钙矿物吸附剂,其测试烧失量和理论烧失量偏差在6.0%以

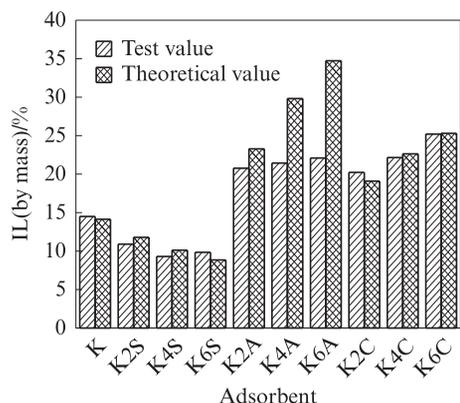


图2 矿物吸附剂的烧失量  
Fig. 2 IL of mineral adsorbents

内. 综上, 提高氧化铝含量或在适当范围内提高氧化硅含量, 可以提高矿物吸附剂高温下的质量稳定性; 氧化钙含量增加对矿物吸附剂的质量稳定性影响

较小.

## 2.2 外观形态

不同温度煅烧后矿物吸附剂的外观形态见图3. 由图3可见: (1) 经900 °C煅烧后, 4种矿物吸附剂均保持原始状态, 为松散白色粉末. (2) 经1 200 °C煅烧后, 样品K4A仍保持其原始状态; 样品K、K2S和K2C均出现小尺寸颗粒团聚现象, 即发生轻微的烧结. (3) 经1 450 °C煅烧后, 样品K4A仍保持其原始状态; 样品K和K2S中团聚烧结颗粒的尺寸增大, 但样品K2S的团聚烧结颗粒尺寸较K小; 样品K2C的烧结程度急剧加重, 转变为淡黄色粉料夹杂黄绿色玻璃熔融体的烧结产物. 由此可见, 增加氧化硅和氧化铝含量可以提高矿物吸附剂在高温下的形态稳定性, 其中氧化铝的作用更为显著; 而增加氧化钙含量会加速矿物吸附剂的熔融烧结.

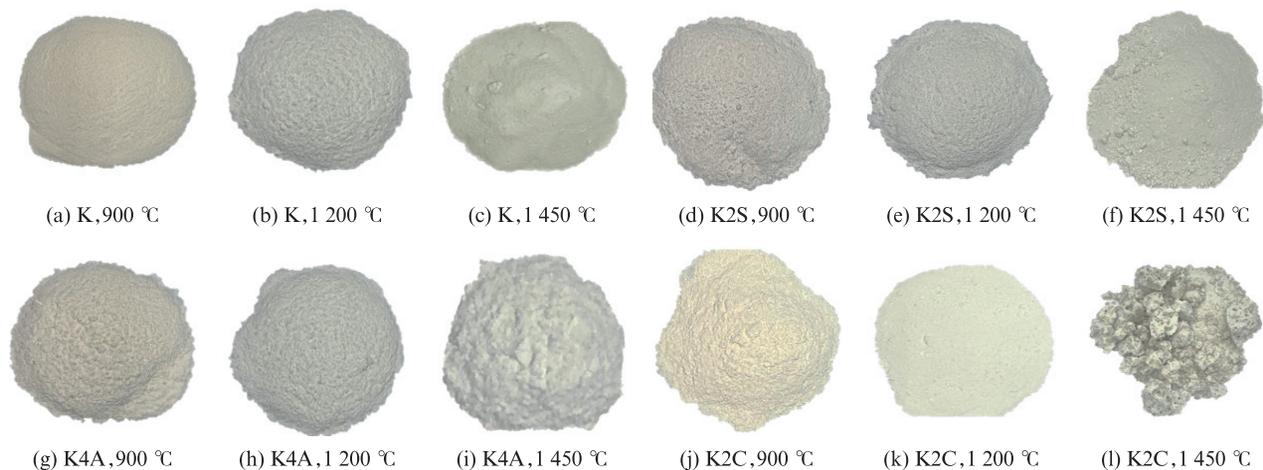


图3 不同温度煅烧后矿物吸附剂的外观形态

Fig. 3 Appearance morphologies of mineral adsorbents after calcination at different temperatures

## 2.3 质量变化

矿物吸附剂的TG-DTA曲线见图4. 由图4可见: 4种矿物吸附剂在530 °C附近均出现1个明显的吸热峰, 这可归结于高岭石脱去羟基, 失去结构水形成偏高岭土的过程; 样品K4A的DTG曲线在300 °C包含由 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 脱水分解产生的吸热峰; 样品K2C的DTG曲线在757 °C的吸热峰为 $\text{CaCO}_3$ 的分解.

根据热重分析结果, 计算了3个吸热峰对应的失重率, 结果见表2. 由表2可见: 4种矿物吸附剂中由于高岭土分解(Peak 2)导致的失重率和理论失重率均十分接近; 样品K2C中 $\text{CaCO}_3$ 分解(Peak 3)导致的失重率与理论失重率亦基本吻合; 样品K4A中由于 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 分解(Peak 1)导致的失重率(10.48%)明显低于其理论失重率(19.71%). 该结果与烧失量结果

一致, 造成该现象的原因需结合热分析过程中吸附剂的物相转化进行分析.

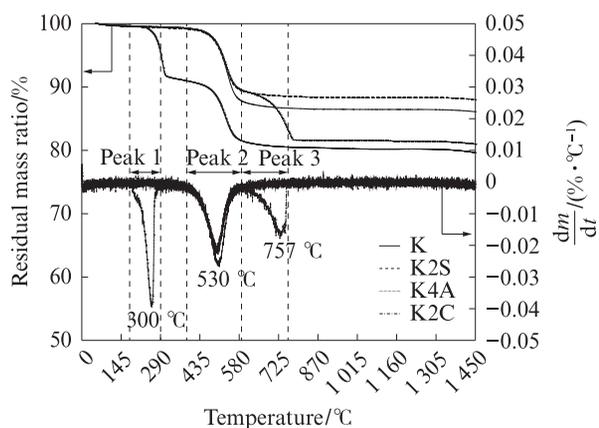


图4 矿物吸附剂的TG-DTA曲线

Fig. 4 TG-DTA curves of mineral adsorbents

表2 矿物吸附剂的失重率  
Table 2 Weight loss (by mass) of mineral adsorbents

Adsorbent	Unit: %					
	Test			Theoretical		
	Peak 1	Peak 2	Peak 3	Peak 1	Peak 2	Peak 3
K	—	13.87	—	—	13.88	—
K2S	—	12	—	—	11.58	—
K4A	10.48	9.52	—	19.71	9.93	—
K2C	—	11.52	7.51	—	11.58	7.3

2.4 物相转化

矿物吸附剂的DSC曲线见图5.由图5可见:DSC曲线中303、530和757℃附近出现的吸热峰分别对应Al(OH)<sub>3</sub>、高岭石和CaCO<sub>3</sub>的分解,这在2.3中已分析过;4种矿物吸附剂样品在993℃附近均出现1个尖锐的放热峰,而此时在其TG-DTG曲线中并未观察到该失重现象,说明此时仅发生了物相转变而没有质量损失.

不同温度煅烧后矿物吸附剂的XRD图谱见图6.由图6可见:(1)对样品K,经900℃煅烧后,其在18°~30°之间出现较明显的“馒头峰”,这与高岭土在

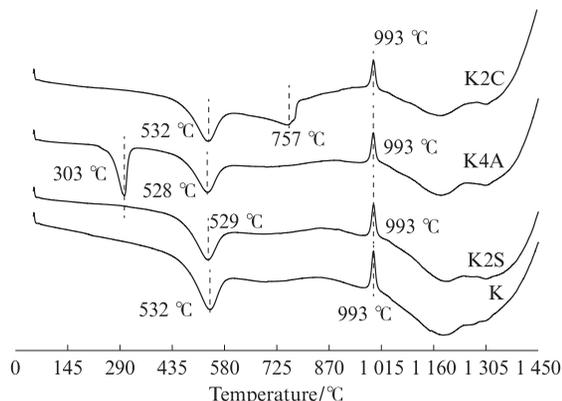
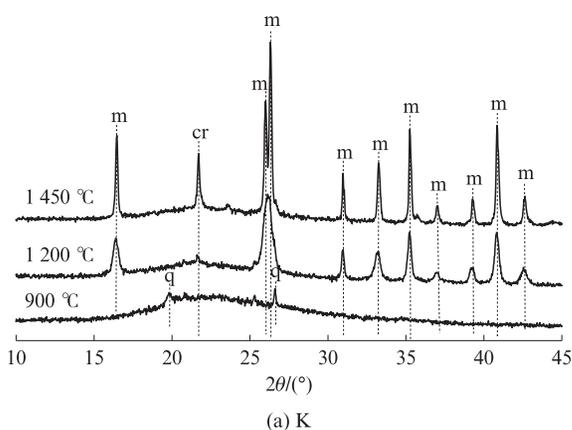
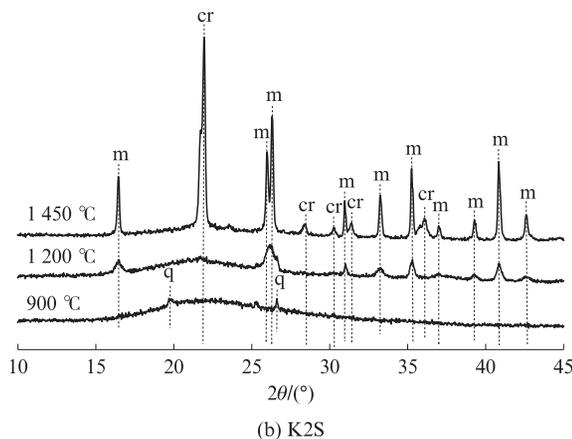


图5 矿物吸附剂的DSC曲线  
Fig. 5 DSC curves of mineral adsorbents

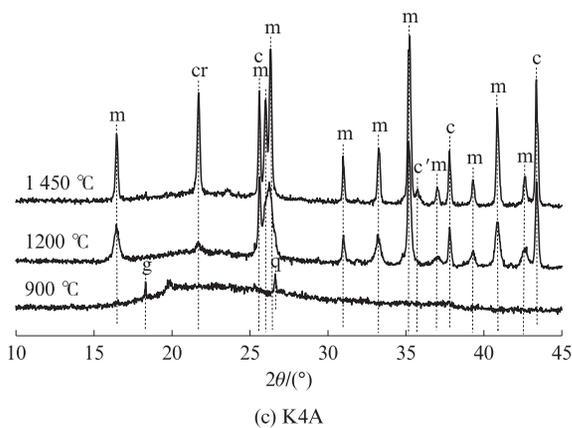
高温下转化为以非晶相结构为主的偏高岭土有关,此外还存在较弱的石英衍射峰.经1200℃煅烧后,样品K的“馒头峰”变窄,开始有较强的莫来石衍射峰出现,同时可以观察到在22°附近有较弱的方石英衍射峰.结合DSC曲线可知,993℃时偏高岭土转变为莫来石和方石英两相共存的双晶相莫来石产物(见式(5)),该过程为放热反应.此外,石英晶体的衍射峰消失,说明石英亦会参与无定形相的反应生成



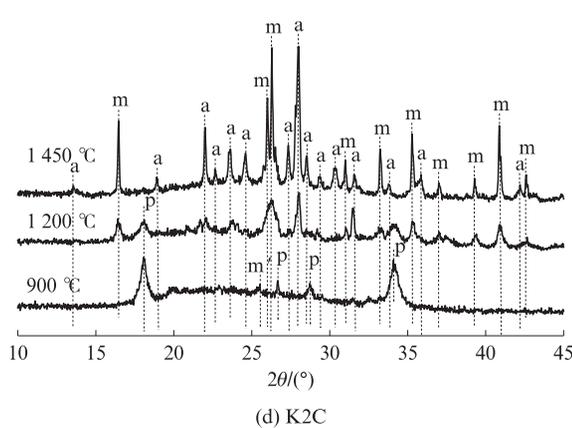
(a) K



(b) K2S



(c) K4A



(d) K2C

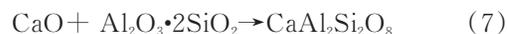
m—Mullite; cr—Cristobalite; q—Quartz; c—Corundum; c'—Ca<sub>5</sub>Al<sub>10</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>4</sub>; g—Gibbsite; a—Anorthite; m'—Muscovite; p—Portlandite

图6 不同温度煅烧后矿物吸附剂的XRD图谱

Fig. 6 XRD patterns of mineral adsorbents calcinated under different temperatures

莫来石和方石英.经1450℃煅烧后,样品K中莫来石和方石英的衍射峰峰强显著提高,且26°附近的莫来石衍射峰分解为2个尖锐峰,表明形成了2种莫来石,其中在1200℃以下形成的莫来石可能是伪正交晶型,表现为晶格常数 $a$ 和 $b$ 不相等,而高于1200℃时形成的莫来石是纯正交晶型<sup>[10-11]</sup>.(2)对样品K2S,经900℃煅烧后,其物相组成与样品K基本一致;1200℃煅烧后莫来石的衍射峰强度明显降低,这可能是由于氧化硅的引入提高了无定形硅铝酸盐中硅的含量,进而抑制了偏高岭土向莫来石的转变<sup>[12]</sup>;经1450℃煅烧后,22°附近方石英的衍射峰强度超过莫来石,这亦与其较高的氧化硅含量有关.(3)对于样品K4A,Al(OH)<sub>3</sub>在300℃左右即分解为Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>和H<sub>2</sub>O,但经900℃煅烧后并未观察到Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>的衍射峰,说明Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>与高岭土反应生成了较高铝含量的硅铝酸盐非晶相,且该反应过程会吸收水分<sup>[12]</sup>,使得由于Al(OH)<sub>3</sub>分解产生的质量损失率的测试值小于其理论值;经过1200℃煅烧后,样品K4A的主要物相为莫来石和少量方石英,并出现刚玉(corundum)的衍射峰,说明高铝硅铝酸盐此时分解出刚玉相;经过1450℃煅烧后,刚玉相的衍射峰强度持续增强.刚玉属于耐高温惰性物质,可以充当样品K4A孔隙结构的支撑体,有效避免了矿物吸附剂在高温下的熔融现象<sup>[13]</sup>.(4)对样品K2C,经900℃煅烧后,其主要物相为无定形硅铝酸盐和Ca(OH)<sub>2</sub>,Ca(OH)<sub>2</sub>产生的

原因可能是矿物吸附剂中CaCO<sub>3</sub>经煅烧分解出的CaO在样品冷却过程与空气中的水接触而生成.经1200℃煅烧后,Ca(OH)<sub>2</sub>的衍射峰明显减弱,出现钙长石(anorthite)的衍射峰,钙长石是CaO与活性硅铝反应的产物,其中铝和硅均来自于偏高岭土,生成过程见式(6)、(7);除钙长石外,还能观察到莫来石的衍射峰,只是其峰强显著低于样品K.经1450℃煅烧后,样品中观察不到CaCO<sub>3</sub>、CaO或Ca(OH)<sub>2</sub>的衍射峰,且莫来石和钙长石的衍射峰增强,这说明CaO已与硅铝酸盐发生充分反应生成钙长石这一最终产物,同时富余的无定形硅铝酸盐(偏高岭土)分解生成莫来石.由于钙长石会促进矿物共融,加速灰分熔化<sup>[14]</sup>,因此经1450℃煅烧后样品K2C呈现严重烧结现象.



## 2.5 微观形貌

不同温度煅烧后矿物吸附剂的SEM照片见图7.由图7可见:(1)对样品K,经900℃煅烧后以球形颗粒为主,且表面疏松,这些颗粒是由层片状堆叠的假六边形偏高岭石和孔隙组成;继续加热至1450℃后,试样K仍以球形颗粒为主,但表面结构变得致密,这是由于生成了多边形方石英晶体和细长的针棒状莫来石晶体,这也是其产生熔融的重要原因.(2)

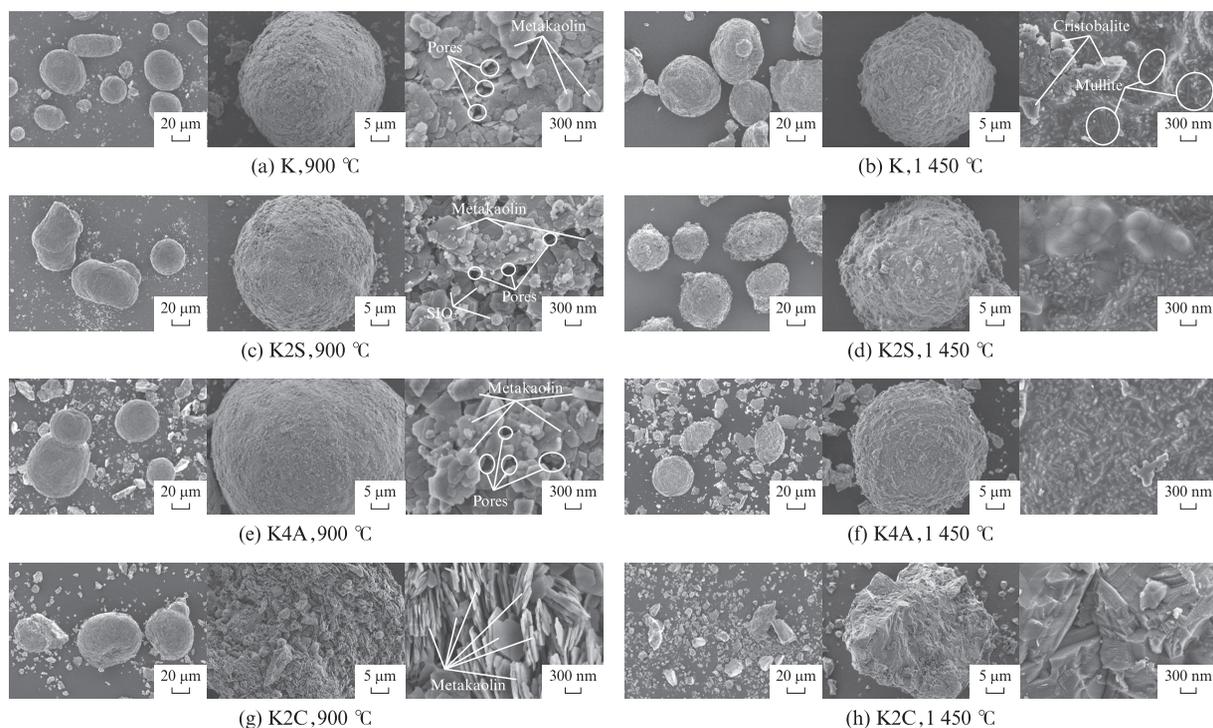


图7 不同温度煅烧后矿物吸附剂的SEM照片

Fig. 7 SEM images of mineral adsorbents calcinated under different temperatures

对样品 K2S, 经 900 °C 煅烧后亦为表面疏松的球形颗粒, 但除了假六边形偏高岭石和孔隙外, 还能观察到尺寸不一的球形 SiO<sub>2</sub>, 这与 XRD 结果一致; 继续加热至 1 450 °C 后, 样品 K2S 表面出现球状微晶方石英团聚现象, 还观察到大量细长且呈放射簇状的针棒状莫来石晶体, 因此样品 K2S 的球形颗粒表面发生熔融并析出微晶方石英和莫来石晶体, 这使得球形颗粒表面更粗糙。(3) 对样品 K4A, 经 900 °C 煅烧后其形貌与样品 K 类似; 继续加热至 1 450 °C 后, 样品 K4A 以细长针棒状莫来石晶体为主, 但颗粒表面几乎与 900 °C 煅烧后的状态一致, 再次说明高铝矿物吸附剂具有很好的高温稳定性。(4) 对样品 K2C, 经 900 °C 煅烧后亦为球形颗粒, 且其假六边形偏高岭石的层片状结构更为突出; 经 1 450 °C 煅烧后, 球形颗粒转变为棱角分明的板片状颗粒, 反应产物主要为板片状的钙长石晶体。这是由于煅烧温度升高时, 片状结构的钙长石边缘产生熔融现象, 且片层之间堆叠更紧密<sup>[14]</sup>, 因此样品 K2C 此时出现严重的熔融烧结。

## 2.6 重金属 Pb 的挥发率

为分析矿物吸附剂的高温稳定性对其吸附半挥发性重金属的影响, 测试了重金属 Pb 在不同矿物吸附剂中的挥发率, 结果见图 8。由图 8 可见: 随着煅烧温度的升高, 矿物吸附剂中重金属 Pb 的挥发率均逐渐增大; 相比于样品 K, 经 900 °C 煅烧后, 3 组改性矿物吸附剂中重金属 Pb 的挥发率均有所降低; 经 1 200、1 450 °C 煅烧后, 高硅矿物吸附剂中重金属 Pb 的挥发率降低, 但高铝和高钙矿物吸附剂对重金属 Pb 的挥发没有明显的抑制作用, 高钙矿物吸附剂甚至会使 1 450 °C 下重金属 Pb 的挥发率增大。有文献<sup>[15]</sup>指出, 吸附剂的适当熔融有助于释放颗粒内部的活

性点位, 促进其对重金属的吸附和固化。结合矿物吸附剂在高温下的物相和结构转变可知, 温度高于 1 200 °C 时, 高硅矿物吸附剂中无定形硅铝酸盐向莫来石晶体相的转变受限, 这会使矿物吸附剂呈微弱的熔融状态, 对降低重金属挥发率具有积极作用; 而高铝和高钙矿物吸附剂分别对应无熔融和严重熔融 2 种状态, 均对降低重金属挥发率作用不大。

## 3 结论

(1) 900 °C 时矿物吸附剂以无定形硅铝酸盐为主, 无定形硅铝酸盐在 1 200 °C 时向莫来石和方石英转变, 使高岭土在高温条件下结构失稳, 1 450 °C 下出现轻微烧结。

(2) 适当增加矿物吸附剂中氧化硅的含量, 可在温度高于 1 200 °C 时阻碍无定形硅铝酸盐向莫来石晶体相的转变, 减轻吸附剂的高温烧结现象, 这对降低其重金属挥发率具有积极作用。

(3) 增加矿物吸附剂中氧化铝的含量, 可在较高温度下生成富铝硅酸盐相, 并在更高温度下分解出刚玉相, 提高矿物吸附剂在 1 450 °C 时的稳定性, 避免出现高温烧结, 且对其重金属的挥发率影响不大。

(4) 含钙矿物在 1 200 °C 左右时与无定形硅铝酸盐反应生成钙长石, 促进矿物共融, 使其经 1 450 °C 煅烧后高钙矿物吸附剂出现严重烧结, 重金属挥发率增大。

## 参考文献:

- [1] 钱觉时, 谢从波, 谢小莉, 等. 城市生活污水污泥建材利用现状与研究进展[J]. 建筑材料学报, 2014, 17(5): 829-836, 891. QIAN Jueshi, XIE Congbo, XIE Xiaoli, et al. Utilization of municipal sewage sludge as building materials: A state-of-the-art review[J]. Journal of Building Materials, 2014, 17(5): 829-836, 891. (in Chinese)
- [2] 袁玲, 施惠生. 焚烧灰中重金属溶出行为及水泥固化机理[J]. 建筑材料学报, 2004, 7(1): 76-80. YUAN Ling, SHI Huisheng. Leaching behaviors of heavy metals in MSWI fly ash and the immobilization mechanism of cement[J]. Journal of Building Materials, 2004, 7(1): 76-80. (in Chinese)
- [3] 崔素萍, 兰明章, 张江, 等. 废弃物中重金属元素在水泥熟料形成过程中的作用及其固化机理[J]. 硅酸盐学报, 2004, 32(10): 1264-1270. CUI Suping, LAN Mingzhang, ZHANG Jiang, et al. Effect and incorporation mechanism of heavy metal elements in hazardous industrial wastes during clinker formation [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2004, 32(10): 1264-1270. (in Chinese)
- [4] 汪澜, 颜碧兰, 王昕, 等. 不同重金属离子对 C-S-H 凝胶影响及其固化稳定性[J]. 建筑材料学报, 2014, 17(5): 790-796. WANG Lan, YAN Bilan, WANG Xin, et al. Research on effect

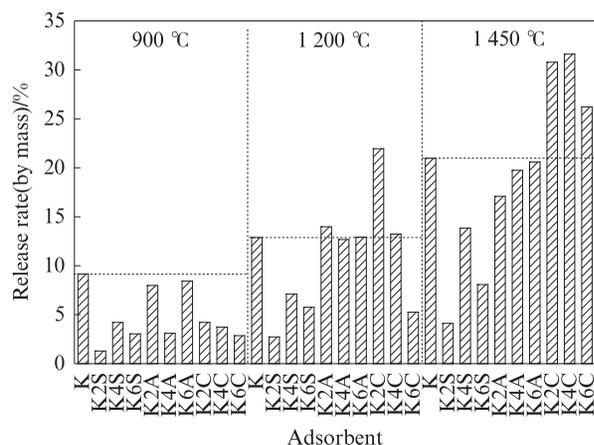


图 8 高温下不同矿物吸附剂中重金属铅的挥发率  
Fig. 8 Release rate of Pb in different mineral adsorbents at high temperatures

- of different heavy metal ions on C-S-H gel and its stability[J]. Journal of Building Materials, 2014, 17(5):790-796. (in Chinese)
- [5] 赵磊. 市政污泥热化学处置过程中典型半挥发性重金属的稳定化控制及机理研究[D]. 南京:东南大学, 2022.  
ZHAO Lei. Study on the stabilization control and mechanism of typical semi-volatile heavy metals in the thermochemical disposal process of municipal sludge[D]. Nanjing: Southeast University, 2022. (in Chinese)
- [6] 杨刚, 李辉, 陈华. 钢渣微粉对重金属污染土壤的修复及机理研究[J]. 建筑材料学报, 2021, 24(2):318-322.  
YANG Gang, LI Hui, CHEN Hua. Remediation of heavy metals contaminated soil by steel slag powder and its mechanism[J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(2):318-322. (in Chinese)
- [7] 施惠生, 刘艳红. 膨润土对重金属离子  $Pb^{2+}$ ,  $Zn^{2+}$ ,  $Cr(VI)$ ,  $Cd^{2+}$  的吸附性能[J]. 建筑材料学报, 2006, 9(7):507-510.  
SHI Huisheng, LIU Yanhong. Adsorption characteristics of bentonite to  $Pb^{2+}$ ,  $Zn^{2+}$ ,  $Cr(VI)$ ,  $Cd^{2+}$ [J]. Journal of Building Materials, 2006, 9(7):507-510. (in Chinese)
- [8] 郭磊. 改性飞灰脱除烟气中砷、硒等重金属特性[D]. 北京:华北电力大学, 2020.  
GUO Lei. The characteristics of heavy metals such as arsenic and selenium from flue gas removed by modified fly ash[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2020. (in Chinese)
- [9] LIN P Y, WU H M, HSIEH S L, et al. Preparation of vaterite calcium carbonate granules from discarded oyster shells as an adsorbent for heavy metal ions removal[J]. Chemosphere, 2020, 254:126903.
- [10] 彭军芝, 桂苗苗, 傅翠梨, 等. 煅烧制度对高岭土的结构特征及胶凝活性的影响[J]. 建筑材料学报, 2011, 14(4):482-485.  
PENG Junzhi, GUI Miaomiao, FU Cuili, et al. Effect of calcination regime on microstructure and cementitious activity of kaolin[J]. Journal of Building Materials, 2011, 14(4):482-485. (in Chinese)
- [11] CHAKRABORTY A, DAS S, GPTA S. Evidence for two stage mullite formation during thermal decomposition of kaolinite[J]. British Ceramic Transactions, 2003, 102(4):153-157.
- [12] 蔡艳芝, 杨彬, 尹洪峰, 等. 硅源对莫来石结合刚玉耐火材料性能的影响[J]. 材料科学与工艺, 2011, 19(5):35-39.  
CAI Yanzhi, YANG Bin, YIN Hongfeng, et al. Effect of different  $SiO_2$  resources on properties of mullite bonded corundum refractory[J]. Materials Science and Technology, 2011, 19(5):35-39. (in Chinese)
- [13] LENKA R, VLASTIMIL N, PETRA V, et al. High-temperature interaction of molten Fe-C-O-Cr alloys with corundum [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2021, 854:157128.
- [14] 徐慧铭, 黄朝晖, 刘艳改, 等. 用石英、石灰石和  $\gamma$ -氧化铝合成钙长石的研究[J]. 中国非金属矿工业导刊, 2012(3):7-8, 20.  
XU Huiming, HUANG Zhaohui, LIU Yangai, et al. Study of anorthite synthesized by quartz limestone and  $\gamma$ -alumina[J]. China Non-metallic Mining Industry Herald, 2012(3):7-8, 20. (in Chinese)
- [15] XUE Z Y, DONG L, ZHONG Z P, et al. Capture effect of Pb, Zn, Cd and Cr by intercalation-exfoliation modified montmorillonite during coal combustion[J]. Fuel, 2021, 290:119980.

~~~~~

(上接第588页)

- XIAO Jianzhuang, ZHANG Peng, ZHANG Qingtian, et al. Basic mechanical properties of seawater sea-sand recycled concrete [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2018, 35(2):16-22. (in Chinese).
- [24] CEB-FIP. Fib model code for concrete structures 2010[S].
- [25] XIAO J Z, LI W G, CORR D J, et al. Effects of interfacial transition zones on the stress-strain behavior of modeled recycled aggregate concrete[J]. Cement and Concrete Research, 2013, 52:82-99.
- [26] PAN D, YASEEN S A, CHEN K Y, et al. Study of the influence of seawater and sea sand on the mechanical and microstructural properties of concrete[J]. Journal of Building Engineering, 2021, 42:103006.
- [27] 刘伟, 蒲正霖, 孙红芳, 等. 海砂中氯离子含量的影响因素研究[J]. 建筑材料学报, 2016, 19(5):921-925.  
LIU Wei, PU Zhenglin, SUN Hongfang, et al. Influence factors of chloride content in dredged marine sand[J]. Journal of Building Materials, 2016, 19(5):921-925. (in Chinese).
- [28] 李龙, 肖建庄, 黄凯文. 再生混凝土力学性能的应变率敏感性数值模拟[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2017, 47(4):776-784.  
LI Long, XIAO Jianzhuang, HUANG Kaiwen. Numerical simulation on strain-rate sensitivity of mechanical properties of recycled aggregate concrete[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2017, 47(4):776-784. (in Chinese).