

# 阿克塞石棉尾矿矿物学特征及开发利用研究

宋鹏程<sup>1</sup>, 彭同江<sup>1,2</sup>, 鲜海洋<sup>1</sup>, 孙红娟<sup>1,2</sup>

(1. 西南科技大学 固体废物处理与资源化教育部重点实验室, 四川 绵阳 621010; 2. 西南科技大学 矿物材料及应用研究所, 四川 绵阳 621010)

**摘要:** 采用 XRF、XRD 和 SEM 对阿克塞红柳沟矿区的石棉尾矿进行了矿物学特征分析, 并进行了制备含硅、镁系列化合物的开发研究。结果表明: 3 个矿山石棉尾矿样品的主要化学组成为  $\text{SiO}_2$  37.01% ~ 39.35%,  $\text{MgO}$  37.00% ~ 38.92%, 其次是  $\text{TFe}_2\text{O}_3$  6.02% ~ 8.37%, 烧失量为 12.29% ~ 13.56%; 主要矿物组成为蛇纹石, 且含少量滑石、磁铁矿、水镁石、菱镁矿。石棉尾矿经酸浸获得硫酸镁, 制备了“卡房状”氢氧化镁、片状碱式碳酸镁及“卡房状”氧化镁粉体, 石棉尾矿的酸浸渣经碱浸获得偏硅酸钠, 制备了球状纳米级白炭黑。研究结果对阿克塞红柳沟矿区的石棉尾矿的资源化利用和环境保护具有一定的理论和实际意义。

**关键词:** 阿克塞; 石棉尾矿; 矿物学; 开发利用

中图分类号: P579; P619.27<sup>+1</sup>

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2013)06-0905-06

## Mineralogical characteristics, development and utilization of chrysotile asbestos tailing from the Aksay ore district

SONG Peng-cheng<sup>1</sup>, PENG Tong-jiang<sup>1,2</sup>, XIAN Hai-yang<sup>1</sup> and SUN Hong-juan<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Solid Waste Treatment and Resource Recycle, Ministry of Education, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China; 2. Institute of Mineral Materials & Application, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China)

**Abstract:** Using X-ray fluorescence spectrometer (XRF), X-ray powder diffraction (XRD) and scanning electron microscopy (SEM), the authors studied mineralogical characteristics of chrysotile asbestos tailings from the Aksay ore district and the preparation of high purity silicon as well as magnesium compounds. The results show that the chemical compositions of the asbestos from three mines are  $\text{SiO}_2$  37.01% ~ 39.35%,  $\text{MgO}$  37.00% ~ 38.92% and  $\text{TFe}_2\text{O}_3$  6.02% ~ 8.37%, the ignition loss is 12.29% ~ 13.56%, and the main mineral composition of chrysotile asbestos tailings is serpentine, together with small amounts of talc, magnetite, brucite and magnesite. Magnesium sulfate was obtained by acid leaching of chrysotile asbestos tailings, and magnesium hydroxide powders in “house of cards” form, “flake” basic magnesium carbonate sample powders and magnesium oxide powders in “house of cards” form were prepared. The acid slag alkali leaching reaction produced sodium metasilicate, and then salt leaching reaction synthesized white carbon black sample. These results have an important theoretical significance and practical significance for resource utilization and environmental protection of chrysotile asbestos tailings from the Aksay ore district.

**Key words:** Aksay; chrysotile asbestos tailing; mineralogical characteristics; development and utilization

收稿日期: 2013-09-12; 修订日期: 2013-10-28

基金项目: 四川省科技厅项目(11zs2003) 固体废物处理与资源化教育部重点实验开放基金(12zxgk04) 西南科技大学研究生创新基金(13ycj25)

作者简介: 宋鹏程(1989-), 男, 在读硕士, 主要从事石棉尾矿资源化研究, E-mail: andspc@qq.com; 通讯作者: 彭同江(1958-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事固体废物处理与资源化研究, E-mail: tjpeng@swust.edu.cn.

石棉尾矿是石棉开采和选矿过程中产生的尾渣, 含有较多的短纤维石棉。它的大量堆放, 不仅占用土地、污染环境, 而且还导致资源的浪费。阿克塞红柳沟石棉矿区属于大型矿区, 工艺落后, 石棉尾矿堆积量达 2 亿多吨。由于地处高原, 气候干燥, 极易随风扬尘, 使短纤维石棉形成气溶胶, 对下风向地区的空气产生严重污染。对阿克塞石棉尾矿的矿物学和开发利用进行研究, 具有重要的环境与资源意义。

由于石棉粉尘可引起呼吸道疾病(Gardner *et al.*, 1986), 而石棉尾矿中的化学成分主要是  $\text{SiO}_2$  和  $\text{MgO}$ (Zhu *et al.*, 2013), 因此许多学者对石棉尾矿的综合利用进行了研究。石棉尾矿资源化利用主要集中在在价组分提取和材料制备方面。有价组分提取的研究主要包括硅系产品和镁系产品制备, 硅系产品有提镁残渣通过碱浸等步骤制备的白炭黑等(姜延鹏等, 2011; 曾丽等, 2013a)。镁系产品的种类较多, 主要有直接酸浸或硫酸铵混合焙烧, 对滤取滤液除杂后分步沉淀提镁制备氢氧化镁粉体(胡章文等, 2005; 曾丽等, 2013b); 石棉尾矿直接通  $\text{CO}_2$  碳化或对浸取滤液制备的  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  进行碳化制备的碱式碳酸镁(Falcal *et al.*, 2010; Jiang *et al.*, 2011; Martin *et al.*, 2013; Experience *et al.*, 2013)。在材料制备方面, 包括制备免烧砖、微晶玻璃、陶瓷等(Rawlings *et al.*, 2006; 丁文金等, 2012)。

国内外对石棉尾矿的矿物学属性研究文献不多, 而矿物学属性是资源化利用尾矿的基础和关键。阿克塞石棉尾矿堆量大, 但环境矿物学和开发利用研究尚属空白。本文在查明阿克塞石棉尾矿矿物学特征的基础上, 针对其主要化学组成, 对其中有价组分的提取和制备含硅、镁的系列化合物进行了研究, 对石棉尾矿的资源化利用、环境保护及边远山区经济发展具有重要意义。

## 1 实验

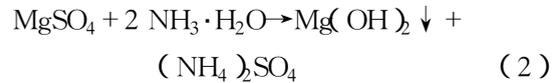
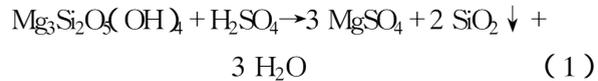
### 1.1 原料及前处理

石棉尾矿原料采自甘肃阿克塞红柳沟矿区 3 个矿山, 分别为 4<sup>#</sup>、5<sup>#</sup> 和 7<sup>#</sup> 矿山, 其样品编号对应为 CAT4-1、CAT5-1、CAT7-1。

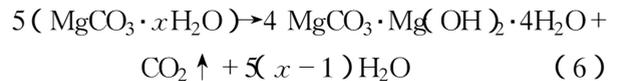
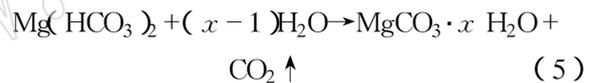
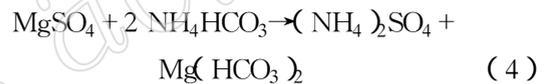
样品采用 SP-60×100 颚式破碎机初破碎, 再用 PSJ-006 陶瓷对辊机二次破碎, 然后采用 XMB-型球棒磨机研磨至约 0.3 mm, 分析测试用样品采用玛瑙乳钵研磨至不大于 0.074 mm。

### 1.2 实验原理

蛇纹石是 1:1 型三八面体结构层状硅酸盐, 在硫酸浸取过程中蛇纹石结构遭到破坏,  $\text{Mg}^{2+}$  离子溶出后形成  $\text{MgSO}_4$ , 只残留  $\text{SiO}_2$  骨架, 见反应式(1)。精制  $\text{MgSO}_4$  在碱性条件下(如加入氨水)可制备氢氧化镁, 见反应式(2)。氢氧化镁直接煅烧可获得氧化镁粉体, 见反应(3)。



精制  $\text{MgSO}_4$  溶液和  $\text{NH}_4\text{HCO}_3$  溶液在一定温度下进行反应, 陈化一定时间即可得到碱式碳酸镁, 所制备样品的化学式为  $4\text{MgCO}_3 \cdot \text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ , 见反应式(4)~(6)。



残留  $\text{SiO}_2$  骨架进行碱浸可生成偏硅酸钠溶液( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ), 见反应式(7), 偏硅酸钠和硫酸反应可制备白炭黑, 见反应式(8)。



### 1.3 含硅、镁系列化合物的制备步骤

(1) 石棉尾矿的酸浸处理: 称取石棉尾矿样品 3 g 置于 250 mL 锥形瓶中, 再加入 30 mL 质量浓度为 30% 的硫酸, 在 90℃ 水浴锅中酸浸 2 h, 真空抽滤、洗涤获得粗制硫酸镁滤液和  $\text{SiO}_2$  质滤渣。

(2) 精制硫酸镁的制备: 将步骤(1)获得的粗制硫酸镁滤液加入少量  $\text{H}_2\text{O}_2$ , 搅拌均匀进行氧化, 滴加氨水沉淀除去氧化铁等杂质, 继续滴加氨水调整 pH 值至 8 左右, 得到精制硫酸镁溶液。

(3) 氢氧化镁的制备: 配置体积比为 1:1 的水/乙醇溶液置入烧杯中作为底液, 在磁力搅拌的状态下向烧杯中同时滴入精制硫酸镁溶液和质量浓度为 13% 的氨水, 保持反应体系 pH=10.93 左右, 使  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  沉淀, 反应完毕, 经抽滤、洗涤, 产物置于 105℃ 烘箱中烘干, 粉磨备用, 样品编号 MH-1。

(4) 碱式碳酸镁的制备:取步骤(1)制备的 1 mol/L 精致硫酸镁溶液 20 mL 于 100 mL 三口烧瓶中,再加入 1 mol/L、pH=8.0 的  $\text{NH}_4\text{HCO}_3$  溶液 40 mL,置于水浴锅,在 30℃ 下反应 30 min,继续陈化 6 h。得白色沉淀,抽滤,洗涤,105℃ 干燥,样品编号 MC-1。

(5) 氧化镁的制备:称取 0.5 g 步骤(3)制备的氢氧化镁粉体,在 600℃ 温度下煅烧 60 min 得到白色粉末,样品编号 MO-1。

(6) 白炭黑的制备:称取 7.50 g 步骤(1)获得的酸浸滤渣和 40 mL 质量分数为 20% 的 NaOH 溶液于 250 mL 锥形瓶中,置于 60℃ 水浴锅中反应 1 h,过滤后得到偏硅酸钠溶液。配置体积比为 1:1 的水/乙醇溶液置入烧杯中作为底液,在磁力搅拌的状态下向烧杯中同时滴入偏硅酸钠溶液和质量分数 20% 的  $\text{H}_2\text{SO}_4$  溶液,保持反应体系 pH=7.5 左右,陈化 1 h,抽滤,洗涤,105℃ 干燥,样品编号 WCB-1。

#### 1.4 样品分析

石棉尾矿原料的化学成分分析采用德国帕纳科公司 Axios 型 X-射线荧光光谱仪,工作条件:钨靶,管压 60 kV,管流 100 mA。物相分析采用荷兰 PANalytical 公司 X'pert PRO 型 X 射线衍射仪,测试条件:Cu 靶,管压 40 kV,管流 40 mA,狭缝系统:DS 1/2°,SS 0.04 rad,AAS 5.5 mm,扫描范围:2 $\theta$  为 3°~80°,连续扫描。形貌分析采用 S440 型扫描电子显微镜,测试条件:电压 20 kV,放大倍数 3 万。样品分析在西南科技大学分析测试中心完成。

## 2 结果与讨论

### 2.1 石棉尾矿矿物学特征

#### 2.1.1 化学成分

表 1 是阿克塞红柳沟 3 个矿山尾矿的化学成分分析结果。由表可知,尾矿样品的主要化学成分有  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{MgO}$ ,其次为  $\text{TFe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  和  $\text{CaO}$ ,五者的含量在 84% 以上,烧失量 12.29%~13.56%。3 个矿山的化学成分稍有差异,总体变化不大,其中: $\text{SiO}_2$  在 37.01%~39.35% 之间,4# 矿山的样品略高; $\text{MgO}$  在 37.00%~38.92% 之间,7# 矿山的样品略低; $\text{TFe}_2\text{O}_3$  在 6.02%~8.37% 之间,其中 7# 矿山的样品略高; $\text{Al}_2\text{O}_3$  在 1.29%~1.56% 之间,其中 5# 矿山略低; $\text{Cr}_2\text{O}_3$  在 0.60%~1.24% 之间,其中 7# 矿

山的样品较高; $\text{NiO}$  在 0.22%~0.24% 之间,其中 4# 矿山和 5# 矿山结果一致;烧失量在 12.29%~13.56% 之间,7# 矿山的烧失量略低。

表 1 三个矿山石棉尾矿样品的化学组成  $w_B/\%$   
Table 1 The compositions of the chrysotile asbestos tailing samples from three mines of Akesai

成分	CAT4-1	CAT5-1	CAT7-1
$\text{SiO}_2$	39.35	37.48	37.01
$\text{Al}_2\text{O}_3$	1.56	1.29	1.55
$\text{TFe}_2\text{O}_3$	6.02	6.06	8.37
$\text{MgO}$	38.92	38.86	37.00
$\text{CaO}$	0.77	0.53	0.53
$\text{Na}_2\text{O}$	0.07	-	-
$\text{K}_2\text{O}$	0.13	0.04	0.06
$\text{Cr}_2\text{O}_3$	0.60	0.60	1.24
$\text{MnO}_2$	0.09	0.09	0.11
$\text{NiO}$	0.22	0.22	0.24
$\text{P}_2\text{O}_5$	0.04	0.04	0.05
$\text{TiO}_2$	0.10	0.10	0.14
烧失量	13.05	13.56	12.29
合计	100.93	98.87	98.59

#### 2.1.2 矿物组成

图 1 为阿克塞红柳沟矿区尾矿 XRD 图谱。由图 1,4#、5# 和 7# 矿山的尾矿样品中主要矿物有蛇纹石,特征衍射峰有  $d_{001}=7.27 \text{ \AA}$ 、 $d_{020}=4.61 \text{ \AA}$ 、 $d_{002}=3.63 \text{ \AA}$ ,磁铁矿,特征衍射峰有  $d_{220}=2.96 \text{ \AA}$ 、 $d_{311}=2.52 \text{ \AA}$ 、 $d_{400}=2.09 \text{ \AA}$ 、 $d_{422}=1.71 \text{ \AA}$ 。4# 矿山和 5# 矿山尾矿样品中还含有少量的水镁石,特征衍射峰有  $d_{001}=4.76 \text{ \AA}$ 、 $d_{101}=2.35 \text{ \AA}$ 、 $d_{102}=1.82 \text{ \AA}$ ;滑石,特征衍射峰有  $d_{002}=9.35 \text{ \AA}$ 、 $d_{020}=4.61 \text{ \AA}$ 、 $d_{006}=3.11 \text{ \AA}$ 、 $d_{131}=2.75 \text{ \AA}$ ,菱镁矿,特征衍射峰有  $d_{104}=2.74 \text{ \AA}$ 、 $d_{113}=2.09 \text{ \AA}$ 、 $d_{024}=1.77 \text{ \AA}$ ,富铬斜绿泥石,其中主要矿物组成为  $d_{001}=14.11 \text{ \AA}$ 、 $d_{002}=7.07 \text{ \AA}$ 、 $d_{003}=4.77 \text{ \AA}$ 、 $d_{004}=3.53 \text{ \AA}$ 。相对来说,7# 矿山尾矿样品中矿物组成较简单。

阿克塞红柳沟 3 个矿山的石棉尾矿中,主要矿物为蛇纹石,还包括少量的水镁石、菱镁矿和磁铁矿等,在酸性溶液中较易分解,而仅含有少量的滑石在酸性溶液中难以分解。因此,在实验方案设计中采用硫酸浸取其中的金属氧化物(如氧化镁)是合理和有效的。

### 2.2 含镁化合物粉体表征及应用

#### 2.2.1 氢氧化镁粉体

图 2a 为氢氧化镁粉体样品的 XRD 图谱。可以看出,主要衍射峰有  $d_{001}=4.82 \text{ \AA}$ 、 $d_{101}=2.37 \text{ \AA}$ 、

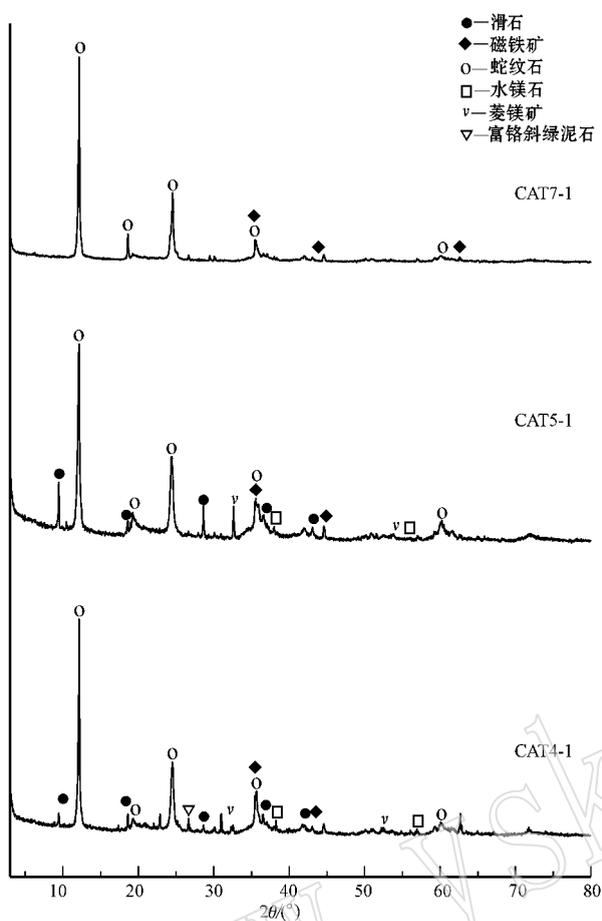


图 1 阿克塞不同矿山尾矿样品的 XRD 图谱

Fig. 1 XRD pattern of the chrysotile asbestos tailing samples from three mines

$d_{100} = 2.73 \text{ \AA}$ ,  $d_{102} = 1.80 \text{ \AA}$ ,  $d_{110} = 1.57 \text{ \AA}$ ,  $d_{111} = 1.49 \text{ \AA}$ ,  $d_{013} = 1.38 \text{ \AA}$ ,  $d_{021} = 1.31 \text{ \AA}$ 。峰形尖锐, 无其他杂质衍射峰, 表明所制备的氢氧化镁结晶程度高, 纯度高, 反应完善。

图 2b 为氢氧化镁粉体样品的 SEM 图。可以看出, 氢氧化镁晶体呈片状, 片厚度在  $20 \sim 30 \text{ nm}$ , 晶片相互交织在一起, 形成“卡房状”结构的集合体, 具有多孔、比表面积大等特征。

氢氧化镁粉体白度高, 活性和吸附能力强及良好的阻燃和补强性能, 是塑料、橡胶制品优良的阻燃剂。还可用于电子行业、医药、砂糖的精制, 以及制造镁盐产品。

### 2.2.2 碱式碳酸镁粉体

图 2c 为碱式碳酸镁样品的 XRD 图谱。可以看出, 主要衍射峰有  $d_{011} = 5.80 \text{ \AA}$ ,  $d_{100} = 9.32 \text{ \AA}$ ,  $d_{110} = 6.40 \text{ \AA}$ ,  $d = 4.19 \text{ \AA}$ ,  $d = 3.30 \text{ \AA}$ ,  $d_{200} = 2.91 \text{ \AA}$ 、

$d_{400} = 2.31 \text{ \AA}$ ,  $d_{113} = 2.16 \text{ \AA}$ 。峰形较尖锐, 无其他杂质衍射峰, 表明所制备的样品结晶程度较高, 纯度高, 反应完全。

图 2d 为碱式碳酸镁样品的 SEM 图。由图可见, 所生成的碱式碳酸镁主要为片状、板状, 表面部分为棒状, 片的大小在  $1 \sim 10 \text{ \mu m}$  之间, 片与片相互无序堆积, 分散程度不高。反应 pH 值、反应温度和陈化时间对碱式碳酸镁的形态都有影响 (Jiang *et al.*, 2011; 鲜海洋等, 2011), 常见的有片状、棒状或针状等。

碱式碳酸镁密度小, 且疏松多孔, 具有很好的流动性、分散性、填充性、绝热性和吸附性, 可作为橡胶制品的优良填充剂和增强剂, 也可作绝热材料及颜料、油漆和日用化学品的填料等。

### 2.2.3 氧化镁粉体

图 2e 为氧化镁样品的 XRD 图谱。图中主要衍射峰有  $d_{200} = 2.11 \text{ \AA}$ ,  $d_{220} = 1.49 \text{ \AA}$ ,  $d_{420} = 0.94 \text{ \AA}$ ,  $d_{422} = 0.86 \text{ \AA}$ 。峰型较尖锐, 没有其他的衍射峰, 表明氧化镁的结晶程度较高, 纯度较高。

图 2f 为氧化镁样品的 SEM 结果。由图可以看出, 氧化镁“晶片”相互交织在一起, 形成“卡房状”结构的集合体, 具有多孔、比表面积大等特征。显然, 氧化镁的形态延续了氢氧化镁的形态 (图 2b)。这表明, 前驱体在煅烧过程中仅发生了原位脱水反应, 见反应式 (3), 未发生组分的再迁移, 从而保持了氢氧化镁的微观形貌。

氧化镁粉体粒度小、白度高, 且具有极大的比表面积和很高的活性, 因而在工业中具有重要的用途, 可广泛用于塑料、橡胶、电线、电缆燃料、油漆、玻璃、陶瓷和医药等领域。

### 2.3 白炭黑的表征与应用

图 3a 为白炭黑样品的 X-射线衍射图谱。图谱中没有出现尖锐的衍射峰, 只在  $2\theta = 23.5^\circ$  左右出现一个弥散峰。由准布拉格公式  $2d \sin\theta = 1.23\lambda$  计算的平均原子距离为  $4.672 \text{ \AA}$ , 用 scherer 公式  $r = 0.94\lambda / B \cos\theta$  计算得出其有序畴尺寸为  $1.83 \text{ nm}$ , 可计算出有序畴尺寸的近程有序的范围大约为  $3 \sim 4$  个原子距离, 显示出非晶态的主要特点 (王杰等 2011)。

图 3b 为白炭黑样品的 SEM 图。可以看出, 白炭黑为球形, 大小均匀, 粒度在  $30 \sim 50 \text{ nm}$  之间, 颗粒大小较均匀。这与通过碳化法制备的纳米氧化硅的粒度在  $50 \text{ nm}$  左右 (姜延鹏等 2011) 相吻合。

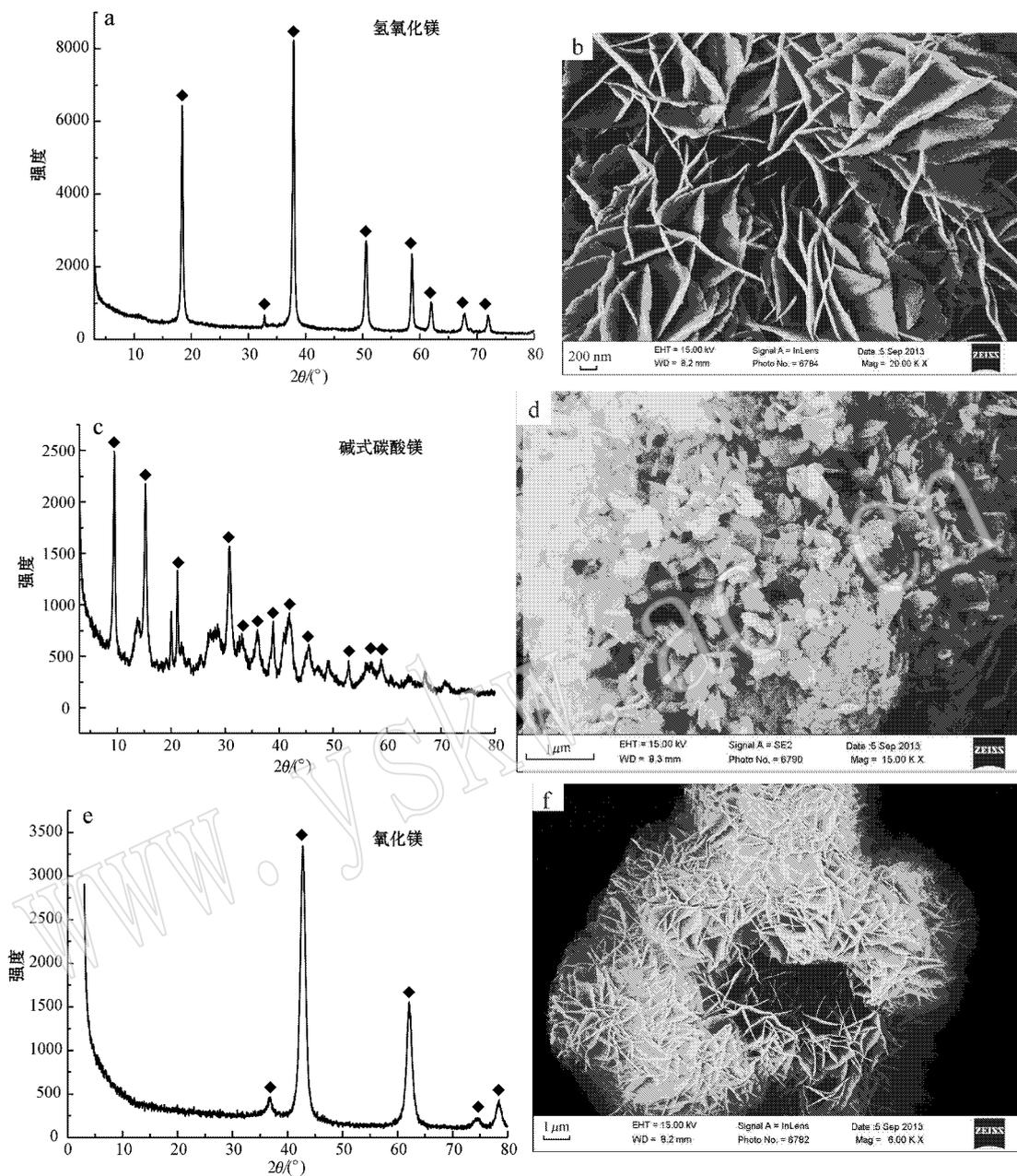


图2 氢氧化镁(a、b)、碱式碳酸镁(c、d)和氧化镁(e、f)样品的XRD图和SEM图

Fig.2 XRD pattern and SEM image of magnesium hydroxide(a、b), basic magnesium carbonate(c、d) and magnesium oxide(e、f) sample

白炭黑具有轻质、白度高、纯度高、分散性好、化学性质稳定、耐高温及电绝缘性能好等特点。可广泛应用于橡胶、塑料、造纸、油漆、涂料等行业,起到补强、增稠、抗结块、控制体系流变和触变等作用。

### 3 结论

(1) 阿克塞石棉尾矿的主要化学成分为  $\text{SiO}_2$  37.01% ~ 39.35%,  $\text{MgO}$  37.00% ~ 38.92%, 其次

是  $\text{TFe}_2\text{O}_3$  6.02% ~ 8.37% 和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  1.29% ~ 1.56%。主要矿物组成为蛇纹石,含少量滑石、水镁石、菱镁矿、斜绿泥石和磁铁矿等。除滑石难溶于酸外,石棉尾矿中其余矿物的金属氧化物均易溶于酸而被浸取出来。

(2) 石棉尾矿酸浸取液可制备含镁系列化合物粉体,所制备的碱式碳酸镁为片状、氢氧化镁和氧化镁为“卡房状”,酸浸后的滤渣可用于制备白炭黑,所制备的白炭黑为粒径在 30~50 nm 之间的球形粉体。

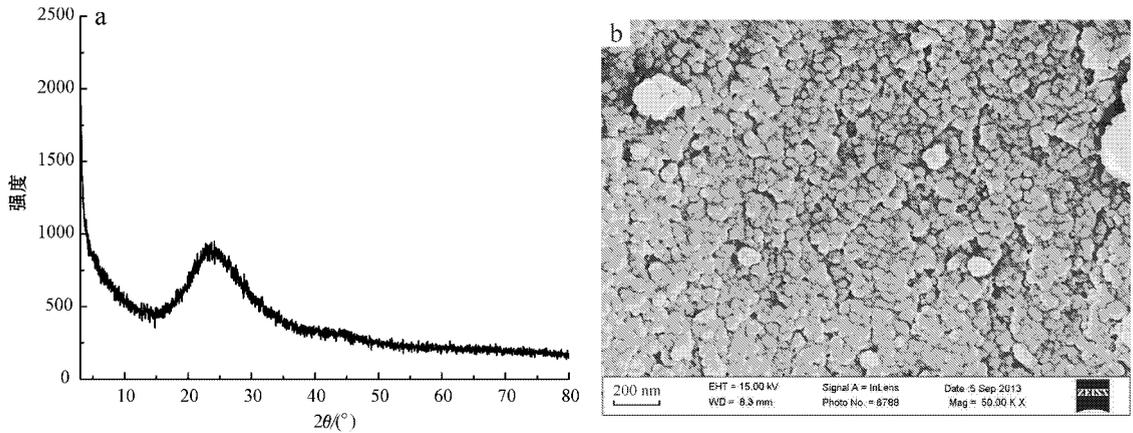


图 3 白炭黑样品的 XRD 图谱(a)和 SEM 图(b)

Fig. 3 XRD pattern(a) and SEM image(b) of the white carbon black sample

(3) 石棉尾矿经酸浸、碱浸及其他合成工艺处理,可将具有环境有害属性的纤蛇纹石纤维转化为工业用途广泛的含硅和镁的系列化合物粉体。

## References

- Ding Wenjin, Peng Tongjiang and Chen Jiming. 2012. Effects of nucleation and crystallization temperature on preparation of glass-ceramics with chrysotile asbestos tailing[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 33(05):28~33(in Chinese with English abstract).
- Experience Nduagu, Inês Romão, Johan Fagerlund, et al. 2013. Performance assessment of producing  $Mg(OH)_2$  for  $CO_2$  mineral sequestration[J]. Applied Energy, 106:116~126.
- Faïçal Larachi, Issaf Daldoul and Georges Beaudoin. 2010. Fixation of  $CO_2$  by chrysotile in low-pressure dry and moist carbonation: Ex-situ and in-situ characterizations[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 74:3051~3075.
- Hu Zhangwen, Wang Lixiang, Yang Baojun, et al. 2005. Purification of magnesium by sulfuric acid leaching filtrate of serpentine for preparation of acicular nanometer magnesium hydroxide[J]. Non-Metallic Mines, 28(01):35~39(in Chinese with English abstract).
- Jiang Yanpeng, Peng Tongjiang and Sun Hongjuan. 2011. Research on preparation of  $SiO_2$  nano-particles by activation products of chrysotile asbestos tailings[J]. China Powder Science and Technology, 17(02):61~65(in Chinese with English abstract).
- Jiang Yanpeng, Peng Tongjiang and Sun Hongjuan. 2011. Preparation of Acicular Basic magnesium carbonate by the activation product of chrysotile asbestos tailing[J]. Advanced Materials Research, 178:230~235.
- Gardner M J, Winter P D, Pannett B, et al. 1986. Follow up study of workers manufacturing chrysotile asbestos cement products[J]. British Journal of Industrial Medicine, 43:726~732.
- Martin Radvanec, L'ubomir Tuček, Ján Derco, et al. 2013. Change of carcinogenic chrysotile fibers in the asbestos cement(termit) to harmless waste by artificial carbonatization: Petrological and technological results[J]. Journal of Hazardous Materials, 252~253:390~400.
- Rawlings R D, Wu J P and Boccacini A R. 2006. Glass-ceramics: their production from wastes-a review[J]. J. Mater Sci., 41(3):733~761.
- Wang Jie, Song Lixian, Lu Zhongyuan, et al. 2011. Preparation and characterization of nano-silica by assisted hydrothermal method[J]. Nano-Science & Nanotechnology, 8(02):63~66(in Chinese with English abstract).
- Xian Haiyang, Jiang Yanpeng, Peng Tongjiang, et al. 2011. Preparation of basic magnesium carbonate from chrysotile asbestos tailing[J]. Non-Metallic Mines, 34(05):1~4(in Chinese with English abstract).
- Zeng Li, Sun Hongjuan and Peng Tongjiang. 2013a. Preparation and influencing factor research of ultrafine silica powder prepared from salt leaching residue of asbestos tailings[J]. Non-Metallic Mines, 36(01):38~41(in Chinese with English abstract).
- Zeng Li, Sun Hongjuan and Peng Tongjiang. 2013b. Preparation of "House of Cards" magnesium hydroxide from the ammonium sulfate leaching liquid of asbestos tailing[J]. Acta Mineralogica Sinica, 33(02):135~139(in Chinese with English abstract).
- Zhu P, Wang L Y, Hong D, et al. 2013. Investigative studies for inert transformation of toxic chrysotile tailing[J]. J. Mater Cycles Waste Manag, 15:90~97.

## 附中文参考文献

- 丁文金, 彭同江, 陈吉明. 2012. 核化和晶化温度对温石棉尾矿制备微晶玻璃的影响[J]. 材料热处理学报, 33(05):28~33.
- 胡章文, 王理想, 杨保俊, 等. 2005. 蛇纹石酸浸滤液提镁制备针状纳米氢氧化镁[J]. 非金属矿, 28(01):35~39.
- 姜延鹏, 彭同江, 孙红娟. 2011. 温石棉尾矿活化产物制备纳米  $SiO_2$  实验研究[J]. 中国粉体技术, 17(02):61~65.
- 王杰, 宋丽贤, 卢忠远, 等. 2011. 水热辅助法制备纳米白炭黑及其表征[J]. 纳米科技, 8(02):63~66.
- 鲜海洋, 姜延鹏, 彭同江, 等. 2011. 以温石棉尾矿为镁源制备碱式碳酸镁晶须[J]. 非金属矿, 34(05):1~4.
- 曾丽, 孙红娟, 彭同江. 2013a. 石棉尾矿盐浸渣制备超细白炭黑的工艺条件研究[J]. 非金属矿, 36(01):38~41.
- 曾丽, 孙红娟, 彭同江. 2013b. 石棉尾矿硫酸铵浸出液制备“卡房”状氢氧化镁的实验研究[J]. 矿物学报, 33(02):135~139.