



# 钛精矿酸解尾气升华硫中物质 赋存状态的研究

李平<sup>1</sup>, 全学军<sup>1\*</sup>, 李礼<sup>1</sup>, 王海波<sup>2</sup>, 陈新红<sup>3</sup>, 齐学强<sup>1</sup>, 李纲<sup>1</sup>, 向泉锦<sup>1</sup>

(1. 重庆理工大学化学化工学院, 重庆 400054; 2. 钒钛资源综合利用国家重点实验室, 四川 攀枝花 617000; 3. 攀钢集团重庆钛业有限公司, 重庆 400054)

**摘要:** 目前使用硫酸法钛白工艺生产二氧化钛的厂家面临酸解尾气中升华硫堵塞管道问题, 从而影响该工艺生产连续性, 而目前对酸解尾气中升华硫的组成、结构、物质赋存状态以及升华硫冷凝行为缺乏认识。采用 XRD、SEM 和 EDS 对工厂升华硫粉及其中所含物质的结构、组成、主要元素分布及杂质元素的赋存状态进行了研究。结果表明, 升华硫粉主要成分为  $S_8$ , 其中主要杂质元素有 O、Fe、Ti、Si、Ca、Mg、Al、Mn 和 V 等, 且绝大部分钛和铁分布在钛铁矿和  $Fe_2TiO_5$  相中, 少部分铁分布在硅酸盐相中, 以  $Fe_2SiO_4$  形式存在; 钙分布在硫酸钙和硅酸盐相中, 并以  $CaSiO_3$  形式存在; 硅主要以  $SiO_2$  和硅酸盐形式存在; 镁分布在  $MgTiO_3$  和  $MgFeAlO_4$  相中; 铝以  $MgFeAlO_4$  形式存在; 锰以金属氧化物的形式分布在钛铁矿中。对硫酸法钛白酸解尾气中升华硫的赋存状态进行研究, 可为后续酸解尾气中升华硫的冷凝行为研究提供基础。

**关键词:** 钛精矿; 酸解尾气; 升华硫; 赋存状态

中图分类号: TF823

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2024)01-0084-07

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2024.01.013

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



听语音  
与作者互动  
聊科研

## Study on the occurrence state of substances in sublimation sulfur from the tail gas of acid hydrolysis of titanium concentrate

Li Ping<sup>1</sup>, Quan Xuejun<sup>1\*</sup>, Li Li<sup>1</sup>, Wang Haibo<sup>2</sup>, Chen Xinhong<sup>3</sup>,  
Qi Xueqiang<sup>1</sup>, Li Gang<sup>1</sup>, Xiang Quanjin<sup>1</sup>

(1. School of Chemistry and Chemical Engineering, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China; 2. State Key Laboratory of Vanadium and Titanium Resources Comprehensive Utilization, Panzhihua 617000, Sichuan, China; 3. Pangang Group Chongqing Titanium Industry Co., Ltd., Chongqing 400054, China)

**Abstract:** At present, the manufacturers of titanium dioxide produced by sulfuric acid process titanium dioxide face the problem that sublimed sulfur in the acid hydrolysis tail gas clogs the pipeline, which affects the continuity of the production of titanium dioxide by this process. In this paper, XRD, SEM and EDS characterizations were used to study the structure, composition, distribution of main elements and occurrence of impurity elements in factory sublimed sulfur powder. The results show that the main component of sublimed sulfur powder is  $S_8$ , in which the main impurity elements are O, Fe, Ti, Si, Ca, Mg, Al, Mn and V, and most of the titanium and iron are distributed in the ilmenite and  $Fe_2TiO_5$  phase, and a small part of the iron is distributed in the silicate phase, in the form of  $Fe_2SiO_4$ . Calcium is distributed in

收稿日期: 2023-10-25

基金项目: 钒钛资源综合利用国家重点实验室开放基金课题(2022P4FZG10A)。

作者简介: 李平, 1997 年出生, 男, 重庆开州人, 硕士研究生, 研究方向为资源环境化工, E-mail: 2674617001@qq.com;

\* 通讯作者: 全学军, 教授, 博士生导师, 研究方向为资源环境化工, E-mail: hengjunq@cqut.edu.cn。

calcium sulfate and silicate phases, and exists in the form of  $\text{CaSiO}_3$ . Silicon mainly exists in the form of  $\text{SiO}_2$  and silicate. Magnesium is distributed in  $\text{MgTiO}_3$  and  $\text{MgFeAlO}_4$  phases. Aluminum exists in the form of  $\text{MgFeAlO}_4$ . Manganese is distributed in ilmenite in the form of metal oxidation. The study of the occurrence state of sublimed sulfur in the exhaust gas of titanium dioxide acid-hydrolysis by sulfuric acid process can provide a basis for the study of condensation behavior of sublimed sulfur in the exhaust gas of post-sequence acid-hydrolysis.

**Key words:** titanium concentrate, acid hydrolysis exhaust gas, sublimation sulfur, occurrence state

## 0 引言

二氧化钛是一种重要的无机材料,具有稳定性强、折射率高、遮盖力强、光催化活性强、低毒性、抗菌活性及生物相容性好等优点,广泛应用于建筑、电子、化工、污染物降解、食品、化妆品和医药等各个行业<sup>[1-4]</sup>。

目前,二氧化钛的工业生产方法主要有硫酸法和氯化法。氯化法同硫酸法相比优点突出,尤其在产品质量高以及对环境污染较小方面。虽然氯化法有许多优势,但其对钛矿原料以及  $\text{TiCl}_4$  的氧化工艺核心技术要求高<sup>[5-6]</sup>,导致氯化法在中国钛白粉生产中应用较少。硫酸法技术成熟,工艺相对简单,同时对钛矿原料品位要求相对较低。由于我国钛矿资源的特点,使得硫酸法在我国钛白粉生产中占据主导,但硫酸法工艺生产过程中“三废”问题比较严重<sup>[7-9]</sup>。钛精矿酸解作为硫酸法钛白粉工艺生产中至关重要的环节,直接影响钛白粉收率和产品质量。但该工序在实际生产中会产生大量酸解尾气,其中包含升华硫、粉尘、水蒸气、硫酸雾以及多种含硫气体<sup>[10]</sup>。

王海波<sup>[11]</sup>等人对酸解尾气中含硫气体进行了研究,结果表明其主要组成为  $\text{SO}_2$ 、 $\text{SO}_3$ 、 $\text{H}_2\text{S}$  及升华硫气体。含硫气体中的  $\text{SO}_2$ 、 $\text{SO}_3$ 、 $\text{H}_2\text{S}$  和升华硫对生态环境存在较大影响,故需要对酸解尾气进行处理,实现达标排放。在现实生产中,尾气中的升华硫等物质会冷凝附着在管道中,造成尾气处理系统的堵塞,从而影响硫酸法钛白酸解工序的正常生产。

目前,对硫酸法钛白酸解尾气的研究主要集中在尾气组分的确认分析以及尾气处理方法等方面,而对酸解尾气中升华硫的组成、结构、物质赋存状态及升华硫冷凝行为缺乏认识。对硫酸法钛白酸解尾气中升华硫的赋存状态进行研究,可以深化对钛精矿酸解反应行为的认识,并为后序酸解尾气中升华硫的冷凝行为研究提供基础。

## 1 试验原料及方法

### 1.1 原料、设备和仪器

原料: 升华硫冷凝粉(攀钢集团重庆钛业有限公司提供)、浓硫酸(AR,成都市科隆化学品有限公司)、液体石蜡(AR,上海麦克林科技有限公司)。

设备和仪器: 集热式磁力搅拌器(DF-101S)、X射线衍射仪 XRD(XRD-7000,日本岛津公司)、循环水式多用真空循环泵(SHZ-D,上海立振邦西仪器科技有限公司)、电子天平(AL104,梅特勒-托利多仪器有限公司)、数显鼓风干燥烘箱(SK-101,上海圣科仪器有限公司)、扫描电镜 SEM(JEM2010F)。

### 1.2 试验方法

#### 1.2.1 升华硫粉纯度测定

将工厂升华硫粉在  $60\text{ }^\circ\text{C}$  烘箱中干燥 48 h 后备用。向 150 mL 锥形瓶中加入 100 g 液体石蜡,开启集热式磁力搅拌器,将温度设置为  $140\text{ }^\circ\text{C}$ ,并将搅拌开关打开,待锥形瓶中液体石蜡温达到设定值时,加入一定质量的升华硫粉  $m_1$ (加入量应小于硫在  $140\text{ }^\circ\text{C}$  下 100 g 液体石蜡中最大溶解质量  $11.412\text{ g}$ <sup>[12]</sup>)。在该温度下恒温搅拌溶解 40 min,然后趁热抽滤,将收集的杂质放在  $70\text{ }^\circ\text{C}$  的烘箱中干燥 72 h 后,称重计量,记为  $m_2$ 。升华硫粉中单质硫的纯度( $P_s$ )计算如式(1)所示。

$$P_s = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100\% \quad (1)$$

式中,  $P_s$  为纯度,%;  $m_1$  为加入的升华硫粉质量, g;  $m_2$  为杂质干燥 72 h 后的质量, g。

#### 1.2.2 升华硫粉中杂质的酸浸

称取一定量上述所得升华硫中的杂质,分别加入到装有 50 mL 不同浓度(0.65、5.35、14.15 mol/L)硫酸溶液的 150 mL 锥形瓶中,并在  $160\text{ }^\circ\text{C}$  下搅拌酸浸 1.5 h。将上述升华硫中杂质经不同浓度硫酸搅拌酸浸后的溶液进行抽滤,并使用去离子水润洗酸浸残渣,再将其烘干后用于结构、组成表征。

### 1.2.3 升华硫粉、杂质及杂质酸浸残渣的结构、组成表征

对烘干后的升华硫粉、升华硫中杂质以及杂质的酸浸残渣采用扫描电镜检测样品形貌;采用能谱扫描对其元素组成进行分析;采用XRD检测工厂升华硫粉、升华硫中杂质以及杂质的酸解残渣的物相。

## 2 结果与讨论

### 2.1 升华硫粉的结构、组成表征

#### 2.1.1 升华硫粉纯度

对升华硫粉样多次测定,其中所含硫在97%~99%,平均值为98%左右。其它非硫杂质含量约2%。

#### 2.1.2 升华硫粉的物相组成

升华硫粉的SEM形貌结构表征如图1所示。由图1可以看出,升华硫粉主要由5 μm以上的一些小颗粒物及其团聚体构成,呈现出不规则的块状,且分散不均。在高放大倍数下观察,发现升华硫颗粒表面比较光滑,也呈现出不规则的块状,且周围存在一定的空隙。

为确定升华硫粉的主要元素组成,采用能谱扫描对其分析,其结果如图2~4所示。由此可看出,升华硫粉主要由硫元素组成,其质量分数高达89.95%,进一步证实了工厂升华硫粉主要由S<sub>8</sub>组成。其它元素包括O、Fe、Ti、V、Mn、Mg和Ca等七种,质量分数依次为9.25%、0.29%、0.16%、0.16%、0.13%、0.04%和0.04%。表1为钛精矿的主要组成,对比认为上述七种元素的物质都应该来自于钛精矿中。从图2还可以看出,各有关杂质元素在样品中分布都比较均匀。进一步说明这些杂质伴随着尾气中升华硫一起离开酸解物料而进入气相中。

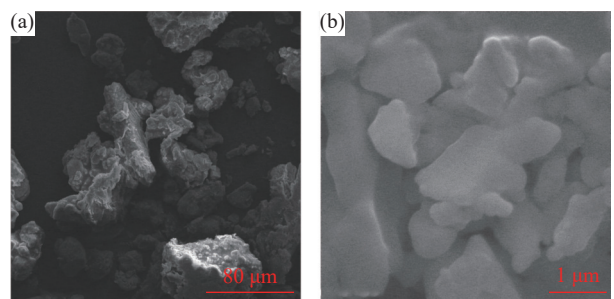


图1 升华硫粉的SEM形貌(a)及其放大(b)  
Fig. 1 SEM images of sublimated sulfur powder

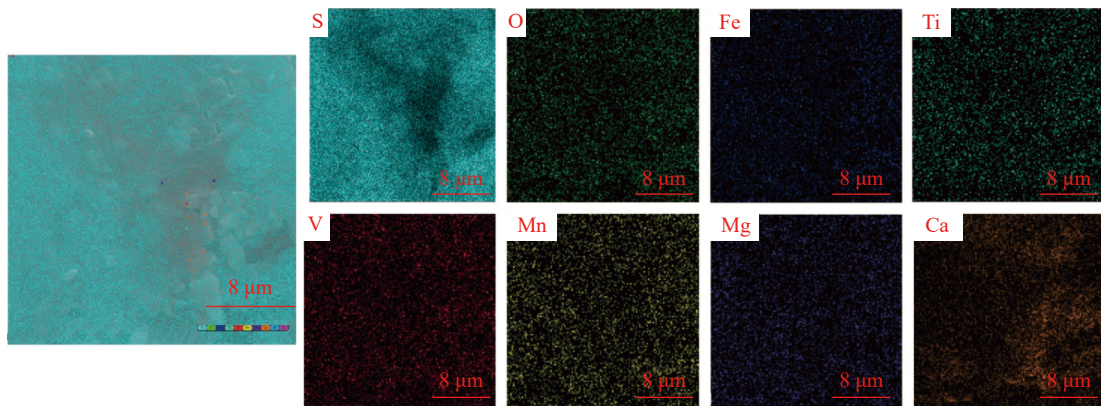


图2 升华硫粉的能谱扫描  
Fig. 2 EDS mapping of sublimation sulfur powder

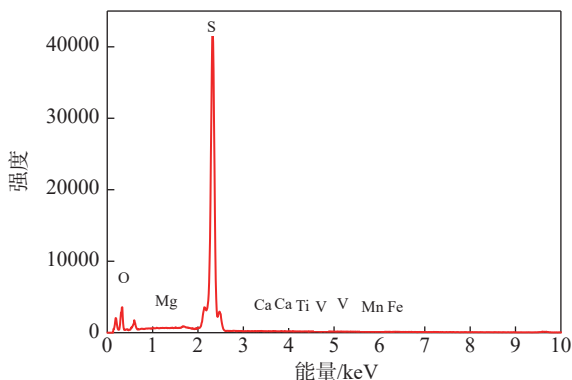


图3 升华硫粉的EDS谱  
Fig. 3 EDS spectrum of sublimed sulfur powder

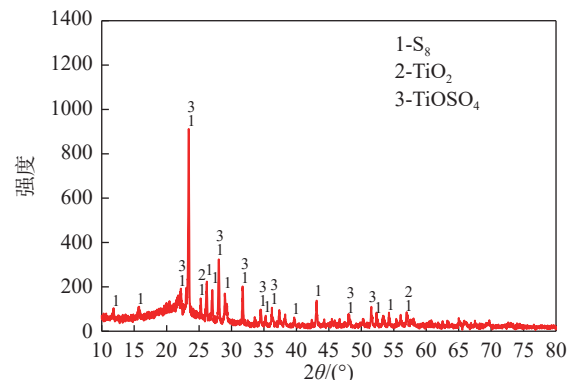


图4 升华硫粉的XRD谱  
Fig. 4 XRD spectra of sublimed sulfur powder

表 1 钛精矿的主要化学成分<sup>[13]</sup>

Table 1 Main chemical components of titanium concentrate

TiO <sub>2</sub>	TFe	SiO <sub>2</sub>	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	S	MnO
46.14	19.65	0.79	1.277	0.06	0.84	0.08	0.14	0.26

能谱分析发现升华硫粉主要含 S<sub>8</sub>、TiO<sub>2</sub> 和 TiOSO<sub>4</sub> 等物相。由此可以看出, 钛精矿酸解尾气的组成比较复杂, 除含硫物质之外, 尾气中还携带了钛精矿酸解产生的一些无机物。此外, 还发现了硫不是以单个原子存在, 而是以 8 个 S 原子组成的原子团形式存在。升华硫粉中含的 TiOSO<sub>4</sub>、TiO<sub>2</sub> 应该是钛精矿酸解产物及其在高温条件下的水解产物。

### 2.2 升华硫粉中杂质的表征分析

为了深入探讨钛精矿酸解反应过程的行为, 对升华硫粉中提取的杂质的微观形貌结构、元素组成及其分布进行了 SEM-EDS 表征、分析, 结果如图 5~6 所示。可以看出, 升华硫粉中的杂质由大小不一的块状、片状的小颗粒组成; 放大观察发现, 杂质颗粒由一层层表面光滑的片状物质堆积形成的板状结构, 同时块状结构上零散分布着一些尺寸不一的层状纳米结构, 这与其他文献对钛铁矿的形状描述相符<sup>[14-15]</sup>。由图 7 可以看出, O、Fe 和 Ti 三元素分布重叠较多及 O 元素和 Ca 元素分布较为吻合。经过进一步的 XRD 分析, 证实了杂质中的主要元素主要以 FeTiO<sub>3</sub>、Fe<sub>2</sub>TiO<sub>5</sub>、TiO<sub>2</sub> 和 CaSO<sub>4</sub> 形式存在, 如图 8 所示。升华硫粉中杂质主要检测出的元素有 O、Fe、Ti、Ca、Si、Mg、Al、Mn 和 V 等, 如

表 2 所示。表明该杂质主要由 O、Fe、Ti 和 Ca 等元素组成。

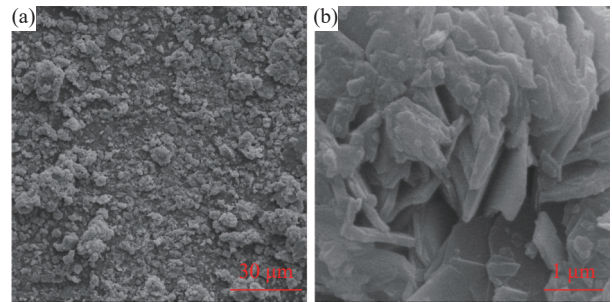


图 5 升华硫粉中杂质的 SEM 形貌 (a) 及其放大 (b)  
Fig. 5 SEM image (a) and magnified impurities (b) in sublimated sulfur powder

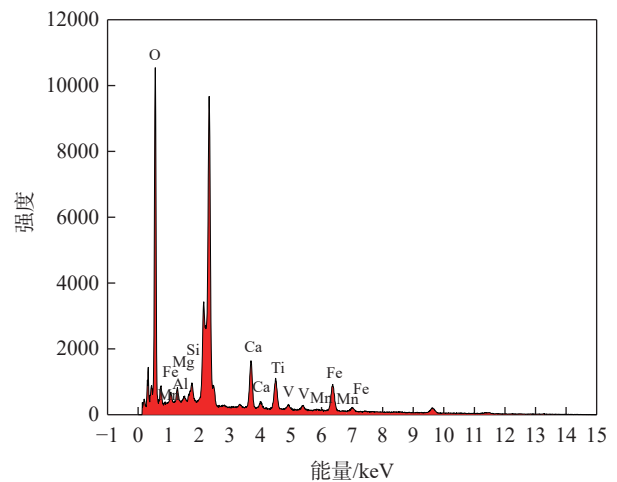


图 6 升华硫粉中杂质的 EDS 谱  
Fig. 6 EDS spectrum of impurities in sublimated sulfur powder

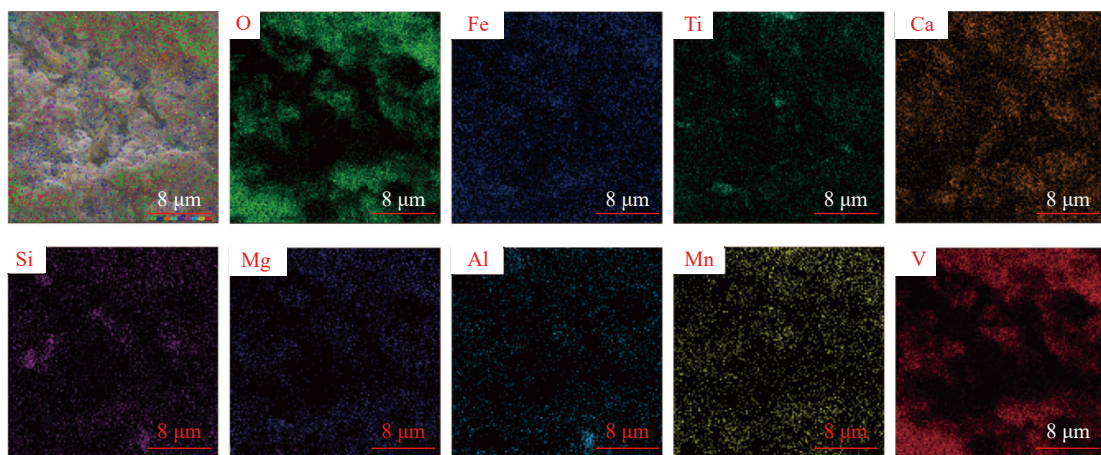


图 7 升华硫粉中杂质的能谱扫描  
Fig. 7 EDS mapping of impurities in sublimation sulfur powder

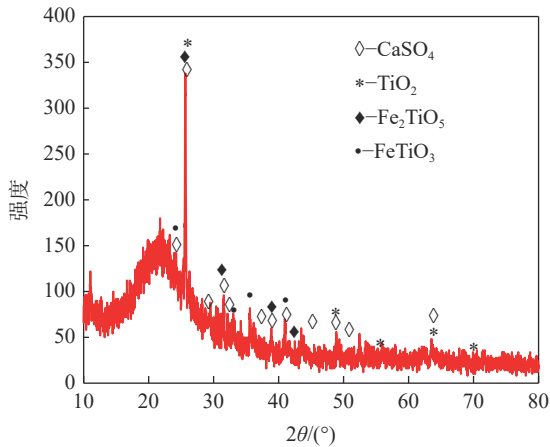


图 8 升华硫粉中杂质的 XRD 谱

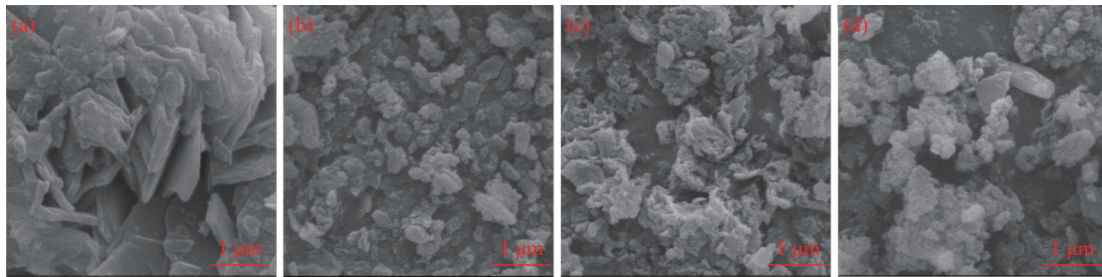
Fig. 8 XRD spectrum of impurities in sublimated sulfur powder

表 2 升华硫粉中杂质的元素组成  
Table 2 Elemental composition of impurities in plant sublimation sulfur powder %

O	Fe	Ti	Ca	Si	Mg	Al	Mn	V
61.16	17.48	8.56	8.04	1.84	1.70	0.63	0.47	0.11

2.3 升华硫粉中杂质的酸浸特性

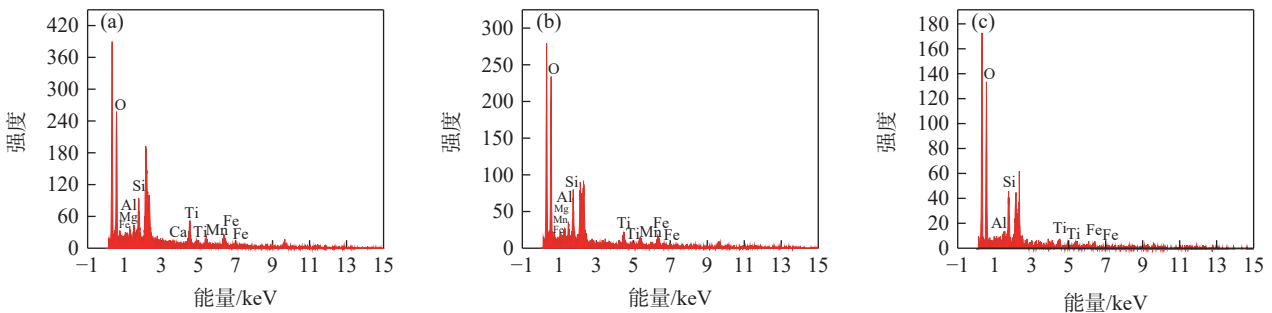
利用 SEM 对用不同浓度硫酸溶液浸出后的残渣形貌进行表征,结果如图 9 所示。从图 9 可见,在相同条件下随着硫酸浓度的增加,酸浸后的残渣块状间的空隙逐渐变大,表明杂质表面被腐蚀溶解程度逐渐加深。为进一步确定经过不同浓度硫酸溶液酸浸后得到渣相的主要元素组成,采用能谱扫描对其分析,其结果如图 10 和表 3 所示。



(a) 未处理; (b) 0.65 mol/L 硫酸酸浸 1.5 h; (c) 5.35 mol/L 硫酸酸浸 1.5 h; (d) 14.15 mol/L 硫酸酸浸 1.5 h

图 9 工厂升华硫中杂质经过不同浓度硫酸浸出的 SEM 形貌

Fig. 9 SEM images of impurities in plant sublimated sulfur after leaching with different concentrations of sulfuric acid



(a) 经 0.65 mol/L 硫酸酸浸后的残渣; (b) 经 5.35 mol/L 硫酸酸浸后的残渣; (c) 经 14.15 mol/L 硫酸酸浸后的残渣

图 10 升华硫粉中杂质经不同浓度硫酸酸浸后残渣的 EDS 谱

Fig. 10 EDS spectra of the impurity residue leached with different concentrations of sulfuric acid

表 3 杂质经不同浓度硫酸酸浸后残渣的元素组成  
Table 3 The elemental composition of the residue leached with sulfuric acid

杂质酸浸条件	硫酸浓度/(mol·L <sup>-1</sup> )	残渣元素含量占比/%							
		O	Fe	Ti	Si	Al	Mn	Mg	Ca
硫酸酸浸	0.65	57.76	15.78	13.64	7.47	1.75	1.47	1.72	0.41
硫酸酸浸	5.35	58.65	15.80	8.70	8.93	4.02	2.80	1.10	0
硫酸酸浸	14.15	66.28	1.99	5.37	24.11	2.25	0	0	0

由图 10 和表 3 可以得到, 从工厂升华硫粉中提取的杂质经 0.65 mol/L 的硫酸酸浸出后的残渣中主要检测出 O、Fe、Ti、Si、Al、Mn、Mg 和 Ca 等元素; 经 5.35 mol/L 硫酸酸浸后的残渣中主要检测出 O、Fe、Ti、Si、Al、Mn 和 Mg 等元素; 经 14.15 mol/L 硫酸酸浸后的残渣中主要检测出 O、Fe、Ti、Si 和 Al 等元素。由图 11 看出, 经 0.65 mol/L 的硫酸酸浸后残渣中 Fe、O 和 Ti 三元素分布吻合度较高, 经过进一步的 XRD 分析, 证实该酸浸残渣最主要是钛精矿结构, 如图 12 所示。由图 12 可以看出, 经

过 5.35 mol/L 的硫酸酸浸后, 酸浸残渣最主要的衍射峰依旧是钛精矿结构产生, 同时硅酸钙和硫酸钙衍射峰基本消失, 这与表 3 中经 5.35 mol/L 的硫酸酸浸后残渣中未检测出钙元素相吻合。经过 14.15 mol/L 的硫酸酸浸后, 酸浸残渣最主要的衍射峰有 SiO<sub>2</sub> 和钛铝石产生。综上表明, 升华硫粉中杂质经稀硫酸酸浸主要溶出的物质包括 Fe<sub>2</sub>TiO<sub>5</sub> 和硅酸钙; 经浓硫酸酸浸主要溶出的物质包括 Fe<sub>2</sub>TiO<sub>5</sub>、FeTiO<sub>3</sub>、MgTiO<sub>3</sub>、TiO<sub>2</sub>、硅酸盐、硫酸钙、镁铝尖晶石和锰的金属氧化物。

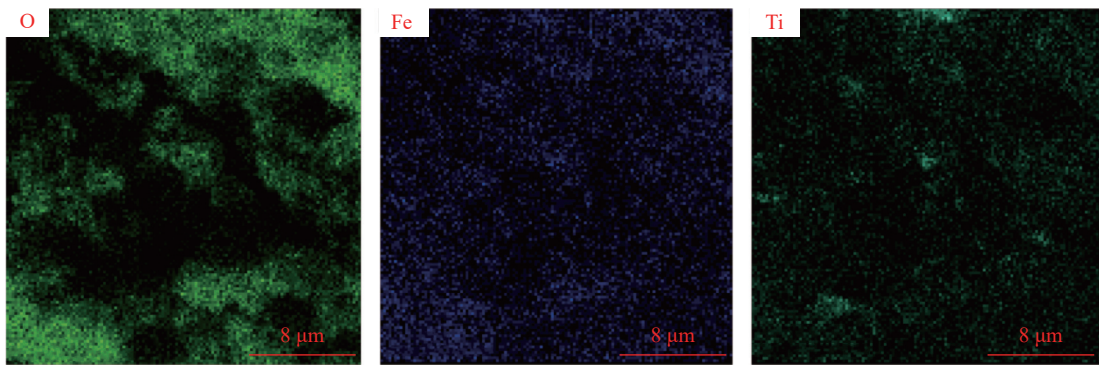


图 11 工厂升华硫粉中杂质经 0.65 mol/L 的硫酸酸浸后的残渣能谱扫描

Fig. 11 EDS mapping of residual impurities in sublimation sulfur powder after leaching with 0.65 mol/L sulfuric acid

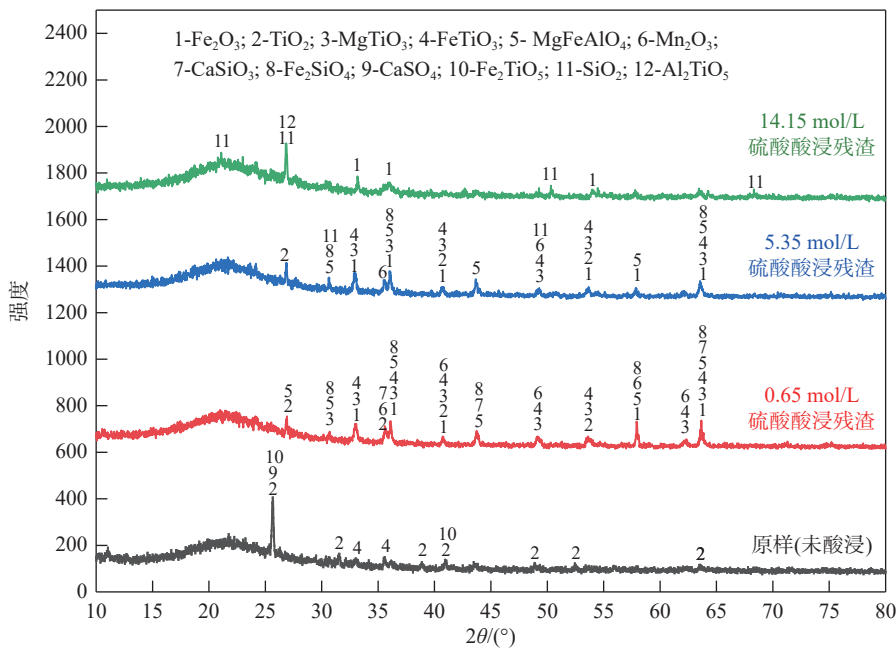


图 12 升华硫粉中杂质原样和硫酸酸浸残渣的 XRD 谱

Fig. 12 XRD spectra of impurities and sulfuric acid leaching residue from sublimation sulfur powder

### 3 结论

本文主要研究了酸解尾气中升华硫的物质赋存状态, 为后续对酸解尾气的冷凝行为研究和工厂尾

气处理管道中升华硫的流场分布模拟研究提供基础参数数据, 主要结论如下:

钛精矿酸解尾气中升华硫纯度约 98% 左右, 主要存在形式为 S<sub>8</sub>, 杂质主要是随尾气携带出来的

钛精矿及其酸解—水解产物,约占2%。主要杂质元素有Fe、Ti、Si、Ca、Mg、Al、Mn和V等。其中绝大部分钛和铁分布在钛铁矿和 $\text{Fe}_2\text{TiO}_5$ 中,少部分铁分布在钛精矿的硅酸盐相中,以 $\text{Fe}_2\text{SiO}_4$ 形式存在;钙分布在硫酸钙和钛精矿的硅酸盐相中,以

$\text{CaSiO}_3$ 形式存在;硅主要以 $\text{SiO}_2$ 和硅酸盐形式分布在钛精矿中;镁分布在钛精矿中的钛铁矿相中,以 $\text{MgTiO}_3$ 和 $\text{MgFeAlO}_4$ 形式存在;铝以 $\text{MgFeAlO}_4$ 形式分布在钛精矿中。锰以金属氧化物的形式分布在钛铁矿中。

## 参考文献

- [1] Xu Xueli, Song Wei. Progress in the structural design of a titanium dioxide membrane and its photocatalytic degradation properties[J]. International Journal of Electrochemical Science, 2022, 17(9): 220952.
- [2] Harrum W M W, Akhir R M, Afaah A N, *et al.* Comparative study of surface, elemental, structural and optical morphologies of titanium dioxide-zinc oxide ( $\text{TiO}_2\text{-ZnO}$ ) and titanium dioxide-zinc oxide/graphene ( $\text{TiO}_2\text{-ZnO/Gn}$ )[J]. Materials Today:Proceedings, 2023, 75(1): 147-150.
- [3] Virginia M V, Virginia A, Aida M, *et al.* Titanium dioxide nanoparticles in sunscreens and skin photo-damage development, synthesis and characterization of a novel biocompatible alternative based on their in vitro and in vivo study[J]. Journal of Photochemistry and Photobiology, 2023, 15: 100173.
- [4] Prabhjot J S, Dapinder K, Ram P, *et al.* Green synthesis of titanium dioxide nanoparticles: Development and applications[J]. Journal of Agriculture and Food Research, 2022, 10: 100361.
- [5] Liu Juan. Development of study on preparation of Ti-rich raw materials for boiling chlorinated from Panzhihua titanium resources[J]. China Nonferrous Metallurgy, 2018, 47(6): 49-53.  
(刘娟. 攀枝花钛资源制备沸腾氯化用富钛原料研究进展 [J]. 中国有色冶金, 2018, 47(6): 49-53.)
- [6] Wu You. Summary on characteristics of oxidation reactor for titanium dioxide production by chloride process[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2016, 37(2): 92-96.  
(吴优. 国外氯化法钛白氧化反应器特点及分析 [J]. 钢铁钒钛, 2016, 37(2): 92-96.)
- [7] Wang Liping, Wang Hao, Gao Qi, *et al.* Distribution and production status of titanium resources in China[J]. Rare Metals, 2004(1): 265-267.  
(王立平, 王镐, 高颀, 等. 我国钛资源分布和生产现状 [J]. 稀有金属, 2004(1): 265-267.)
- [8] Chen Hua, Tian Congxue. Current situation and existing problems in the production of titanium dioxide by sulfuric acid method in China[J]. Journal of Panzhihua University, 2014, 31(1): 99-102.  
(陈华, 田从学. 国内硫酸法钛白生产现状及存在问题 [J]. 攀枝花学院学报, 2014, 31(1): 99-102.)
- [9] Sun Liang. Treatment of waste acid and wastewater in the production of titanium dioxide by sulfuric acid method[J]. Chemical Management, 2022, 635(20): 34-36.  
(孙亮. 硫酸法钛白粉生产中废酸、废水的治理 [J]. 化工管理, 2022, 635(20): 34-36.)
- [10] Tang Wenqian, Liu Li. Comparison and review of continuous and intermittent acid hydrolysis in titanium dioxide production[J]. Chemical Design, 2015, 25(5): 8-10.  
(唐文骞, 刘丽. 钛白生产中连续与间歇酸解比较及评述 [J]. 化工设计, 2015, 25(5): 8-10.)
- [11] Wang Haibo, Luo Zhiqiang, Wu Xiaoping, *et al.* Study on the S content of titanium slag acid hydrolysis tail gas[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2020, 41(4): 92-96.  
(王海波, 罗志强, 吴小平, 等. 钛渣酸解尾气 S 含量研究 [J]. 钢铁钒钛, 2020, 41(4): 92-96.)
- [12] Fan Y, Liu Y, Niu L, *et al.* Separation and purification of elemental sulfur from sphalerite concentrate direct leaching residue by liquid paraffin[J]. Hydrometallurgy, 2019, 186: 162-169.
- [13] Xiang Quanjin, Quan Yuanxia, Quan Xuejun, *et al.* Mechanism analysis of sublimation sulfur production in acid hydrolysis tail gas of titanium concentrate[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2023, 44(3): 100-104.  
(向泉锦, 全远霞, 全学军, 等. 钛精矿酸解尾气中升华硫产生的机理分析 [J]. 钢铁钒钛, 2023, 44(3): 100-104.)
- [14] Ye Endong, Wu Xuan. Study on occurrence state of main impurity elements in Panxi titanium concentrate[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2017, 38(4): 63-68.  
(叶恩东, 吴轩. 攀西钛精矿主要杂质元素赋存状态研究 [J]. 钢铁钒钛, 2017, 38(4): 63-68.)
- [15] Wang Haibo, Wu Xiaoping, Ma Xin, *et al.* Study on the leaching behavior and kinetics of titanium in the solid phase of acid hydrolysis of titanium concentrate[J]. Chinese Journal of Non ferrous Metals, 2021, 31(12): 3655-3663.  
(王海波, 吴小平, 马鑫, 等. 钛精矿酸解固相物中钛的浸出行为及动力学研究 [J]. 中国有色金属报, 2021, 31(12): 3655-3663.)