

# 钛白粉生产过程的生命周期评价\*

王春华<sup>1</sup>, 王洪涛<sup>1,2</sup>, 肖定全<sup>1</sup>, 蒋文举<sup>3</sup>, 翁端<sup>2</sup>

(1. 四川大学材料科学与工程学院, 四川成都 610064; 2. 清华大学材料科学与工程系; 3. 四川大学建筑与环境学院)

**摘要:**按照生命周期评价(LCA)方法,对攀枝花地区钒钛磁铁矿的开采、选矿、运输以及硫酸法生产阶段进行了研究,定量地分析了整个生产过程中的资源、能源投入、环境排放及其环境影响,针对分析中发现的资源投入、能源消耗等关键环节和主要环境问题,联系工艺与设备进行了讨论,旨在为钛白粉行业的技术改进、清洁生产以及区域规划提供基本的数据支持。

**关键词:**生命周期评价;钛白粉;硫酸法

**中图分类号:** TQ134.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-4990(2006)11-0006-04

## Life cycle assessment study on production of titanium white

Wang Chunhua<sup>1</sup>, Wang Hongtao<sup>1,2</sup>, Xiao Dingquan<sup>1</sup>, Jiang Wenju<sup>3</sup>, Weng Duan<sup>2</sup>

(1. College of Material Science and Engineering, Sichuan University, Chengdu 610064, China; 2. Department of Material Science and Engineering, Tsinghua University; 3. College of Architecture and Environment, Sichuan University)

**Abstract:** Life cycle assessment (LCA) was applied to investigate the entire process of production of titanium white in Panzhihua, including exploitation and beneficiation of V-Ti magnetite, transportation, and sulfuric acid process. The consumption of resources and energy, environmental emissions as well as environmental impact in the entire process were analyzed. The relationships between environmental problems and technology at the key processes were discussed. It is aimed at supporting technological improvement, cleaner production and regional planning with the fundamental data.

**Key words:** LCA; titanium white; sulfuric acid process

中国钛白粉生产主要采用硫酸法,其资源、能源消耗大,环境污染严重,一直是钛白粉生产研究的重点。笔者根据 LCA 方法,研究了攀枝花地区钛白粉生产的整个过程,包括钒钛磁铁矿的采选、运输和硫酸法生产阶段,定量地综合分析了资源、能源、环境等多个方面,旨在为钛白粉行业的技术改进、清洁生产以及区域规划提供基本的数据支持。

LCA 是一种定量描述和分析产品与环境相互关系的方法,它通过量化分析产品在整个生命周期中的资源、能源投入和环境排放,可以全面反映此产品对环境造成的影响。LCA 方法被国际上广泛接受,它包括 4 个部分:目标与范围定义、清单分析、影响评价和结果解释。

## 1 目标和范围定义

以攀枝花地区生产的锐钛矿型钛白粉( $\text{TiO}_2$  质

量分数为 99.0%)为研究对象,以生产出 1 kg 钛白粉为 LCA 的功能单元,定量收集相应的资源、能源投入和环境排放数据,初步分析钛白粉生产过程的主要资源、环境问题及其发生的关键环节。

钛白粉生产的全过程可以划分为电力生产、采矿选矿、钛精矿公路运输、硫酸法生产钛白粉 4 个阶段,如图 1 所示。

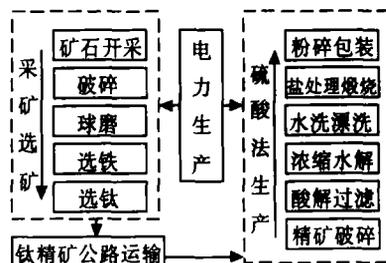


图 1 钛白粉生产全过程

\*基金项目:国家自然科学基金重大国际合作资助项目(项目编号:50410179)。

## 2 清单分析

在采选阶段,每生产 1 kg 的钛精矿,同时得到副产品铁精矿 10 kg。由于采矿、选矿阶段主要是挖掘、破碎、球磨等物理过程,因此假设其环境影响与产出质量成正比,即按照质量比 1:10 的比例对钛精矿和铁精矿进行分配,所得清单数据如表 1 所示,其中,消耗的新水主要以蒸发、渗透的形式损失了。

硫酸法阶段清单表如表 2 所示。其中,钛精矿主要来自于攀枝花地区,公路运输平均距离为

表 1 生产 1 kg 钛精矿的清单表

输入成分	钒钛磁铁矿	电 / (kW · h)	钢球	新水
输入量 / kg	2.12	0.029 8	0.000 59	1.44
输出成分	钛精矿 / kg	粉尘 / kg	废渣 / kg	
输出量 / kg	1.00	0.10	1.02	

80 km;水的输入指新水,不包括循环用水;废水不包括以蒸发、渗透等形式损失的水量;根据文献报道的煤和柴油的主要成分,假设其完全燃烧,通过计算得到了 CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> 的排放量<sup>[1-2]</sup>。

表 2 硫酸法阶段生产 1 kg 钛白粉的清单表

输入成分	钛精矿	氢氧化钠	电 / (kW · h)	铁粉	煤	新水	工业硫酸	柴油	公路运输 / (t · km)		
输入量 / kg	2.63	0.106	1.50	0.09	2.00	98	4.05	0.099	0.21		
输出成分	钛白粉	CO <sub>2</sub>	SS	粉尘	FeSO <sub>4</sub> · 7H <sub>2</sub> O	SO <sub>2</sub>	COD	废水	废硫酸	NO <sub>x</sub>	渣
输出量 / kg	1.00	5.56	0.007	0.010 5	3.50	0.037 3	0.012 9	70	6.40	0.031 3	7.87

综合表 1、表 2、电力生产<sup>[3]</sup>和公路运输<sup>[3]</sup>的清单表,得到生产 1 kg 钛白粉总的清单表,见表 3。

表 3 生产 1 kg 钛白粉总的清单表

输入成分	钒钛磁铁矿	氢氧化钠	柴油	天然气 / m <sup>3</sup>	铁粉	煤	汽油	钢球	工业硫酸	石油	水		
输入量 / kg	5.58	0.106	0.115	0.002 16	0.090	2.87	0.018 7	0.001 55	4.05	0.003 98	104		
输出成分	钛白粉	CO <sub>2</sub>	CO	粉尘	废水	FeSO <sub>4</sub> · 7H <sub>2</sub> O	SO <sub>2</sub>	COD	灰	废硫酸	NO <sub>x</sub>	SS	渣
输出量 / kg	1.00	7.87	0.004 86	0.263	70	3.50	0.052	0.012 9	0.045 3	6.40	0.045	0.007 29	10.5

## 3 数据分析及影响评价

### 3.1 资源和原材料消耗分析

生产 1 kg 钛白粉过程中,各阶段的主要资源和原材料消耗如表 4 所示。

表 4 生产 1 kg 钛白粉主要资源和原材料消耗

输入	电力生产	采矿	运输	钛白粉生产	总计
新水	2.2 (2.1%)	3.8 (3.7%)	—	98 (94.2%)	104 (100%)
钒钛矿	—	5.58 (100%)	—	—	5.58 (100%)
工业硫酸	—	—	—	4.05 (100%)	4.05 (100%)
煤	0.87 (30.3%)	—	—	2.00 (69.7%)	2.87 (100%)
柴油	0.003 98 (3.4%)	—	0.012 3 (10.7%)	0.099 (85.9%)	0.115 (100%)

由表 4 可知,每生产 1 kg 钛白粉消耗 104 kg 新水,总的耗水量很大。具体来看,电力生产和采选阶

段耗水量较少,其中采选阶段的用水采取了循环利用措施,循环用水率达到 89.7%。新水绝大部分是在硫酸法阶段消耗的,此过程中每生产 1 kg 钛白粉消耗新水 98 kg,另外循环用水 213 kg,循环用水率为 68.5%。

硫酸法阶段主要有几个消耗新水的环节:在酸解、过滤环节,使用新水洗涤回收硫酸亚铁表面的钛液;在水洗、漂洗环节,使用新水去除吸附在水合二氧化钛表面上的游离酸、未水解的钛液以及以铁盐为主的可溶性杂质离子,以上 2 个环节每生产 1 kg 钛白粉新水用量约为 27 kg;盐处理环节新水用量为 50 kg;此外,浓缩水解阶段的水蒸气损失约为 14 kg。在硫酸法阶段中已经采取了一些循环用水的措施。例如,在酸解的配酸过程中,利用废酸代替新水稀释浓硫酸;利用漂后洗水供漂前水洗使用;利用水洗后的酸性废水进行煅烧尾气处理等,既节约了新水,也减少了废酸、废水的排放。各企业之间由于工艺、管理等原因,钛白粉生产的水耗相差很大,借鉴文献中

报道的各种节水措施,钛白粉生产企业的节水潜力很大<sup>[4]</sup>。

钒钛磁铁矿中二氧化钛总收率只有 15%,提高资源利用效率十分重要。在采选阶段,选钛工艺只包含强磁选、一段摇床、二段摇床、螺旋选矿机分选,二氧化钛最终在钛精矿、铁精矿、尾矿中总质量分数分别为 19%、44%、37%。据文献报道,如果将粗选改为螺旋、溜槽和强磁选,精选以电选为主就可以大大提高二氧化钛的收率<sup>[5]</sup>。在硫酸法生产过程中,钛精矿中二氧化钛总收率约为 80%。如果采用增加助滤层来回收水洗过程中损失的水合二氧化钛,可以提高其收率<sup>[6]</sup>。

工业硫酸都是在硫酸法过程中消耗的。此过程产生的质量分数 22%左右的废硫酸中有 20%可用于酸解阶段的浓硫酸稀释。为提高利用率,其余 80%的废硫酸可以通过浸没燃烧浓缩和减压蒸发浓缩的方法进行回收利用<sup>[7]</sup>,同时也可以减少废酸和酸性废水的排放。

### 3.2 能源消耗分析

生产 1 kg 钛白粉过程中,各阶段的能源消耗如表 5 所示。其中负号表示输入,正号表示输出;煤、石油、天然气、汽油、柴油、电的能值转化因子见文献<sup>[2]</sup>。

表 5 生产 1 kg 钛白粉能量的输入  $\times 10^6$  J

输入	电力生产	采矿	运输	硫酸法生产	总计
煤	- 17.540	—	—	- 40.400	- 57.940 (90.7%)
石油	- 0.170	—	—	—	- 0.170 (0.3%)
汽油	- 0.014	—	- 0.846	—	- 0.860 (1.3%)
柴油	- 0.170	—	- 0.525	- 4.200	- 4.900 (7.7%)
电力	+ 5.680	- 0.280	—	- 5.400	
总计	- 12.210 (19.1%)	- 0.280 (0.4%)	- 1.370 (2.1%)	- 50.000 (78.3%)	- 63.860 (100%)

由表 5 可知,生产 1 kg 钛白粉总能耗为  $63.860 \times 10^6$  J,能耗非常高。从能耗构成来看,消耗最多的是煤,占总能耗的 90.7%,其次是柴油,占 7.7%。另外,以电力的形式消耗的能量为  $5.680 \times 10^6$  J。从生产阶段来看,采选阶段耗能最少,仅占总能耗的 0.4%。运输阶段主要使用了汽油和柴油,能耗的比例为 2.1%。电力生产阶段使用了大量煤、石油、柴油等能源,发电效率约为 31%,能耗比例达到了 19.1%。

耗能最多的是硫酸法阶段,占到了总能耗的

78.3%,主要发生在 3 个工艺环节:1)浓缩水解环节使用煤加热蒸汽锅炉,煤的消耗占此阶段总能耗的 80.8%;2)使用了很多功率比较大的设备,比如雷蒙磨、锅炉引风机、真空过滤机等,消耗的电力占此阶段总能耗的 10.8%;3)煅烧环节中回转窑使用的柴油,占此阶段总能耗的 8.4%。调研中发现,在浓缩水解阶段,蒸汽的热利用率很低,既造成了煤的浪费,也造成了水的更多消耗,采取直接蒸汽加热或双效串联操作等方式可以使之得到改善;在煅烧阶段,喷水冷却煅烧后的二氧化钛(800~900 °C),也造成了水和能源的浪费,使用风冷结构可以综合利用这部分热能<sup>[4]</sup>。

### 3.3 环境排放分析

钛白粉生产过程中,大量的环境排放,各阶段的主要环境输出如表 6 所示。

表 6 生产 1 kg 钛白粉主要的环境输出

输出	电力生产 / kg	采矿 / kg	运输 / mg	硫酸法生产 / kg	总计 / kg
废硫酸	—	—	—	6.400 0 (100%)	6.400 0 (100%)
废水	—	—	—	70.000 0 (100%)	70.000 0 (100%)
FeSO <sub>4</sub> · 7H <sub>2</sub> O	—	—	—	3.500 0 (100%)	3.500 0 (100%)
CO <sub>2</sub>	2.300 0 (29.2%)	—	5.130.0 (0.2%)	5.560 0 (70.6%)	7.870 0 (100%)
SO <sub>2</sub>	0.014 7 (28.2%)	—	39.3 (0.1%)	0.037 3 (71.7%)	0.052 1 (100%)
NO <sub>x</sub>	0.013 6 (30.2%)	—	168.0 (0.2%)	0.031 3 (69.6%)	0.045 0 (100%)
粉尘	0.015 1 (5.2%)	0.271 (91.2%)	—	0.010 5 (3.6%)	0.297 0 (100%)
废渣	0.026 8 (0.3%)	2.650 (25.2%)	—	7.870 0 (74.5%)	10.500 0 (100%)

在所有的输出中,数量和危害比较大的废硫酸和酸性废水是在硫酸法阶段的酸解和水洗环节排放的,每生产 1 kg 的钛白粉产生废酸 6.40 kg(不包括循环利用的 1.60 kg),酸性废水 7.7 kg。关于硫酸法产生的废酸和酸性废水的治理利用,已有大量文献报道<sup>[8-9]</sup>。

CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> 的排放主要是在电力生产和硫酸法阶段因燃煤而产生的,除在硫酸法阶段使用浓硫酸带来额外 SO<sub>2</sub> 排放外,基本与用煤量直接相关,所以,减少煤的用量是关键。

在硫酸法阶段,SO<sub>2</sub> 主要来源于 3 个环节,酸解过程中每生产 1 kg 钛白粉排放的尾气中含 SO<sub>2</sub> 0.000 067 kg;煅烧过程中排放的烟气中含 SO<sub>2</sub> 0.002 1 kg;浓缩水解过程中排放的锅炉烟气中含

$\text{SO}_2$  0.035 2 kg,由于有针对性地对酸解尾气和煅烧烟气中  $\text{SO}_2$  进行过治理,前 2 个环节  $\text{SO}_2$  的排放量已远小于浓缩水解环节,因此对锅炉烟气中  $\text{SO}_2$  的治理更加重要。

固体废弃物主要来自于采选和硫酸法阶段,其中采选阶段的尾渣按钛精矿和铁精矿质量比 1:10 进行过分配。硫酸法阶段废渣来源于 4 个方面:酸解渣,过滤泥渣,污水处理站的中和渣,锅炉灰渣。其中,中和渣、锅炉灰渣所占的比例分别达到了 83.8%, 11.1%。近几年来,关于钛白粉生产废渣综合利用的文献报道也很多<sup>[9]</sup>。

工业烟尘方面的影响几乎全部来自采选阶段,在破碎、筛分、转运阶段,虽然都利用袋式除尘设备进行了除尘,但仍有大量的粉尘通过排气筒排放到了空气中。

### 3.4 影响评价<sup>[3]</sup>

整个钛白粉生产过程在全球变暖、酸化、富营养化、工业烟尘和固体废弃物几个方面对环境造成影响。酸化影响只包括排向空气中  $\text{SO}_2$  和  $\text{NO}_x$  造成的影响,而不包括废酸和酸性废水的酸化影响。在区域环境影响方面,钛白粉生产对固体废弃物的贡献最大,对富营养化的贡献最小。

## 4 结论

通过笔者对钛白粉生产过程的 LCA 分析,综合来看,在资源投入方面,降低钛白粉生产的耗水量,提高二氧化钛在整个钛白粉生产过程中的总收率,采用先进技术进行废硫酸回收利用是重点,并且很有潜力,同时能够对环境排放进行源头削减。

能源消耗方面,钛白粉生产是高耗能产业,除了少部分以电能的形式消耗外,其他绝大多数都是以

燃煤的形式消耗的,这也是  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$  排放的主要来源。降低煤的消耗不但能降低能耗,还能减少废气的排放。

环境输出方面,除了废气外,还排放了大量的酸性废水、废渣,这主要是由于使用了大量的浓硫酸,如果通过选矿工艺水平的提高,降低钛精矿中铁的氧化物尤其是  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  的含量,就能降低浓硫酸、水、铁粉等资源的消耗,同时减少废酸、废水、中和渣和  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  的生成。

### 参考文献

- [1] Zelkowsky J. 煤的燃烧理论与技术 [M]. 上海:华东化工学院出版社, 1990: 20.
- [2] 中国石油化工总公司生产部. 石油化工产品大全 [M]. 北京:中国石化出版社, 1992: 15.
- [3] 杨建新. 产品生命周期评价方法及应用 [M]. 北京:气象出版社, 2002: 79 - 95, 108, 113.
- [4] 唐振宁. 钛白粉的生产与环境治理 [M]. 北京:化学工业出版社, 2000: 259 - 260.
- [5] 孙波. 攀枝花选钛厂提高钛精矿回收率的探索 [J]. 湿法冶金, 2003, 22(3): 148 - 151.
- [6] 陈跃. 提高钛白粉生产率途径探讨 [J]. 涂料工业, 1997(3): 22 - 24.
- [7] 刘华. 钛白粉的生产和应用 [M]. 北京:科学技术文献出版社, 1992: 88.
- [8] 何章亮. 钛白废酸的综合利用 [J]. 无机盐工业, 2002, 34(6): 31 - 33.
- [9] 胡木刚. 钛白废酸废水处理及副产品石膏的应用探讨 [J]. 中国资源综合利用, 2003(9): 2 - 7.

收稿日期: 2006 - 06 - 05

作者简介:王春华(1982—),男,硕士研究生,从事环境材料方面研究。

通讯作者:王洪涛

联系方式:028 - 85412415

## 2007年全国氯酸盐行业技术与信息交流会征文通知

由中国石油和化学工业协会所属的全国无机盐信息总站氯酸盐信息站主办的全国氯酸盐行业技术与信息交流会定于 2007 年第二季度召开。会议交流的内容包括氯酸钠、氯酸钾、高氯酸钾、高氯酸铵等产品的应用现状及发展前景;下游产品(二氧化氯、亚氯酸盐、次氯酸盐等)的研究开发现状及应用;三废治理、综合利用以及新型化工设备在行业中的应用等。

现向广大从事氯酸盐生产和科研以及相关化工设备的科技人员征集论文;同时欢迎广大原料(包括氯化钠、氯化钾等)生产单位和产品应用厂家的科技人员踊跃投稿;欢迎科研院所、大专院校将多年来开发的可供工业化的科技成果,撰写成论文。具体内容如下:

1)氯酸盐行业的新产品、新工艺、新设备、新用途的研究与开发;2)氯酸盐及相关产品的综合评述或专论;3)氯酸盐的国内外供需状况、市场预测及相关行业的发展动态;4)与之相关的三废处理及综合利用;5)氯酸盐生产、科研、管理、经营过程中的经验交流等。

要求论文观点明确,内容详实,提供电子版。截稿日期:2006年 12月 28日。

地址:300131天津(红)丁字沽三号路 85号天津化工研究设计院信息中心,全国氯酸盐信息站。E-mail: aais - gyl@tom.com 或 gyl78@eyou.com

联系人:葛艳丽;电话:022 - 26689065, 26517604;

传真:022 - 26517604