

硫酸法钛白粉酸解预混系统技术改造

刘宇

四川绿色方舟检测技术有限公司

DOI:10.12238/jpm.v6i9.8429

[摘要] 硫酸法作为钛白粉生产的主流工艺之一，在全球钛白粉产业中占据重要地位，其产品广泛应用于涂料、塑料、造纸、油墨等众多领域，对国民经济发展具有重要支撑作用。酸解预混系统作为硫酸法钛白粉生产流程中的关键前置环节，主要承担着钛铁矿与硫酸的均匀混合、预处理等重要任务，该环节的运行效果直接影响后续酸解反应的效率、反应的稳定性以及最终钛白粉产品的质量和产量，同时也与整个生产过程的能耗、物耗及环保指标密切相关。随着近年来钛白粉市场需求的持续增长，以及国家对化工行业绿色低碳发展、节能减排要求的不断提高，传统的硫酸法钛白粉酸解预混系统逐渐显现出难以适应新形势的问题。基于此，本研究针对硫酸法钛白粉酸解预混系统展开研究，就系统的不足之处进行分析，提出几点系统改造的建议，旨在进一步对酸解预混技术进行技术改造，优化硫酸法钛白粉酸解预混流程。

[关键词] 钛白粉；硫酸法；预混改造

Technical transformation of sulfuric acid titanium dioxide acid hydrolysis premix system

Liu Yu

Sichuan Green Ark Testing Technology Co., Ltd.

[Abstract] As one of the mainstream processes for the production of titanium dioxide, sulfuric acid method occupies an important position in the global titanium dioxide industry. Its products are widely used in many fields such as coatings, plastics, papermaking, ink, etc., and play an important supporting role in the development of the national economy. The acid hydrolysis pre mixing system, as a key prerequisite in the production process of sulfuric acid titanium dioxide, mainly undertakes important tasks such as uniform mixing and pretreatment of ilmenite and sulfuric acid. The operation effect of this link directly affects the efficiency and stability of subsequent acid hydrolysis reactions, as well as the quality and output of the final titanium dioxide product. It is also closely related to the energy consumption, material consumption, and environmental protection indicators of the entire production process. With the continuous growth of demand in the titanium dioxide market in recent years, as well as the increasing requirements of the country for green and low-carbon development, energy conservation and emission reduction in the chemical industry, the traditional sulfuric acid method titanium dioxide acid hydrolysis premix system has gradually shown difficulties in adapting to the new situation. Based on this, this study focuses on the research of the sulfuric acid method titanium dioxide acid hydrolysis premix system, analyzes the shortcomings of the system, and proposes several suggestions for system transformation, aiming to further improve the acid hydrolysis premix technology and optimize the sulfuric acid method titanium dioxide acid hydrolysis premix process.

[Key words] titanium dioxide; Sulfuric acid method; Pre mixed transformation

前言

传统系统在物料混合均匀性方面存在不足，常常导致后续酸解反应不充分、反应速率不稳定，不仅影响钛白粉的生产效

率，还可能造成原料浪费，增加生产成本；另一方面，在当前严格的环保政策和节能降耗要求下，传统系统在能源利用效率、污染物排放控制等方面的短板日益突出，例如部分老旧系统存在能耗较高、硫酸利用率低，进而可能产生更多废水、废

渣等环保问题，不利于企业实现绿色生产和可持续发展^[1]。此外，随着钛白粉行业竞争的日益激烈，企业对生产过程的自动化、智能化水平要求也不断提升，传统酸解预混系统在自动化控制、生产数据监测与调控等方面的滞后，使得企业难以精准控制生产过程，影响产品质量的稳定性和一致性，难以满足市场对高品质钛白粉产品的需求。在此背景下，对硫酸法钛白粉酸解预混系统进行技术改造，成为推动硫酸法钛白粉生产工艺升级、提升企业核心竞争力、实现行业绿色可持续发展的重要举措，具有重要的现实意义和行业价值。

一、硫酸法钛白粉酸解工艺流程

硫酸法钛白粉酸解工艺是将钛铁矿转化为可后续处理钛盐的核心环节，主要围绕物料预处理、酸解反应、浸取净化三大阶段展开。硫酸法钛白粉酸解工艺流程见图1：

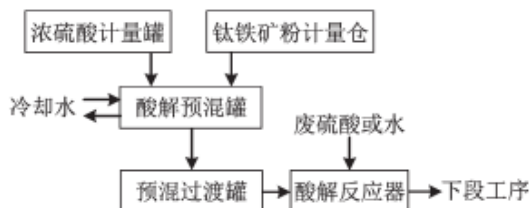


图1 硫酸法钛白粉酸解工艺流程

预处理环节，经过破碎研磨的钛铁矿粉，粒度控制在200~352目与浓度93%~98%的浓硫酸按1:1.5~1.8的质量比，在带搅拌装置的预混槽内充分混合，形成粘稠的矿酸混合物，此过程需控制温度在50~80℃以提升混合均匀性，为后续反应奠定基础^[2]。随后进入酸解反应阶段，混合物料被输送至衬有耐酸瓷砖的酸解罐中，通过加入少量引发剂（如亚硝酸钠）触发放热反应，反应初期温度快速升至180~220℃，钛铁矿中的主要成分FeTiO₃与H₂SO₄发生反应生成Ti(SO₄)₂、Fe₂(SO₄)₃等可溶性盐类，同时产生SO₂、SO₃等气体，经尾气处理系统净化后达标排放，反应持续2~4小时后形成多孔状的“酸解饼”。在浸取净化阶段，向酸解罐中加入稀硫酸，浓度25%~30%和工艺水进行浸取，控制温度在60~80℃并搅拌，使酸解饼中的可溶性钛盐、铁盐充分溶解，形成含钛浓度120~150g/L的钛液，随后通过板框过滤去除未反应的残渣，得到澄清的钛液，该钛液将进入后续的水解、煅烧等工序制备钛白粉。

二、硫酸法钛白粉酸解预混系统不足之处

（一）预混罐内壁粘结固体物多

预混罐内壁易粘结大量固体物质，这是由于在预混阶段，钛铁矿粉，主要成分FeTiO₃与93%~98%的浓硫酸按1:1.5~1.8质量比混合，体系温度需控制在50~80℃以保障混合均匀性，但此温度区间下，浓硫酸的强氧化性和高质子化能力会引发系列反应。

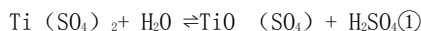
一方面，钛铁矿粉中含有的少量FeO、SiO₂等杂质，会与H₂SO₄发生反应生成Fe₂(SO₄)₃、H₂SiO₃等产物，其中Fe₂(SO₄)₃在50~80℃时溶解度虽较高，但当局部硫酸浓度因混合不均出现波动，如局部水分微量聚集导致浓度下降，或罐壁温度略低于体系平均温度时，Fe₂(SO₄)₃易形成过饱和溶液并以晶体形式析出；另一方面，H₂SiO₃作为弱酸，在高浓度H₂SO₄体系中溶解度极低，会以凝胶状物质析出。同时，钛铁矿粉颗粒因搅拌流场不均，部分颗粒会附着于罐壁，其表面的FeTiO₃会与罐壁残留的H₂SO₄缓慢反应，生成Ti(SO₄)₂，Ti(SO₄)₂在罐壁表

面易发生轻微水解生成TiO(SO₄)·2H₂O，该物质具有较强的吸附性，会进一步吸附Fe₂(SO₄)₃晶体、H₂SiO₃凝胶及未反应的钛铁矿粉颗粒，逐渐在罐壁形成致密且坚硬的粘结层^[3]。这些粘结物不仅会减小罐内有效容积，导致实际混合空间不足，还会影响罐壁的传热效率，使局部混合温度偏离50~80℃的最佳区间，加剧混合不均，形成粘连。

（二）预混罐搅拌轴结垢

在预混过程中，钛铁矿粉与浓硫酸反应生成Ti(SO₄)₂、Fe₂(SO₄)₃等可溶性盐，这些盐类溶解于浓硫酸体系中形成高浓度电解质溶液。搅拌轴在高速旋转时，其表面会形成一定的流体边界层，边界层内的流体流速远低于体系主流速，导致局部传质效率下降。

当体系温度因搅拌摩擦或反应放热出现微小波动，局部温度短暂升高后又回落，边界层内的Ti(SO₄)₂、Fe₂(SO₄)₃浓度易达到过饱和状态，其中Fe₂(SO₄)₃的溶解度随温度变化较为敏感，温度每降低5℃，其溶解度约下降8%~10%，而搅拌轴若采用金属材质，其表面存在的微小氧化层或粗糙凸起，会成为盐类结晶的异相成核中心，促使Fe₂(SO₄)₃晶体优先在轴表面析出^[4]。同时，Ti(SO₄)₂在搅拌轴表面与微量水分发生水解反应见下①式：



生成的Ti(SO₄)₂具有较强的极性，会通过化学键与搅拌轴表面的金属氧化物结合，形成稳定的吸附层，该吸附层又会进一步吸附Fe₂(SO₄)₃晶体及未反应的细小钛铁矿粉颗粒，逐渐形成厚度不均的结垢层。结垢层会增加搅拌轴的转动惯性，导致电机负荷升高，能耗增加，同时破坏搅拌流场的均匀性，使钛铁矿粉与浓硫酸无法充分接触，混合效果恶化，进而影响后续酸解反应中FeTiO₃与H₂SO₄反应的充分性，可能导致酸解饼中未反应矿粉含量升高，降低钛元素回收率。

（三）钛铁矿粉计量仓下料不均匀

钛铁矿粉计量仓下料不均匀，主要由钛铁矿粉的物理特性、计量仓结构缺陷及环境因素共同导致，直接破坏预混阶段钛铁矿粉与浓硫酸1:1.5~1.8的最佳质量配比。钛铁矿粉经破碎研磨后粒度控制在200~352目，该粒度区间的粉体比表面积大，颗粒间存在较强的范德华力与静电引力，极易形成团聚体。

在计量仓存储过程中，即使是化工生产环境中的微量水分，也会被粉体颗粒表面吸附，尤其钛铁矿粉中含有的Fe₂O₃、Al₂O₃等亲水性杂质，会优先吸附水分形成液桥力，进一步增强颗粒团聚性，导致粉体流动性显著下降，在计量仓底部易形成“架桥”结构。颗粒相互支撑阻碍物料下落，或形成“鼠洞”现象，物料仅从局部通道下落，其他区域物料停滞。

此外，若计量仓锥角设计过大、下料口直径偏小，未匹配该粒度钛铁矿粉的流动性参数，会使物料下落速度不均，团聚体进入下料管道时易因直径适配问题发生堵塞或卡滞，造成下料量波动。下料不均匀会导致局部体系矿粉浓度过高或过低，矿粉过量时浓硫酸无法充分包裹颗粒，硫酸过量则增加原料消耗，还会加剧预混罐内壁粘结与搅拌轴结垢，最终影响酸解反应效率与钛液质量。

（四）预混罐放料口堵塞

预混阶段形成的矿酸混合物含有未完全溶解的钛铁矿粉颗粒及反应生成的Fe₂(SO₄)₃、Ti(SO₄)₂等物质，混合物料粘度高达500~1000mPa·s，流动性差。放料口通常为小直径圆

形管道，物料通过时流速骤增、剪切力变大，且放料口与外界接触易出现温度损失，偏离罐内 50–80℃ 的最佳混合温度。温度下降会使混合物中 $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 、 $\text{Ti}(\text{SO}_4)_2$ 溶解度降低，易在放料口内壁析出晶体，这些晶体作为核心快速吸附周围矿粉颗粒与粘稠混合物，逐渐形成堵塞层；同时，未完全反应的钛铁矿粉颗粒在流速变化下易碰撞聚集形成大颗粒团，若颗粒团直径接近或超过放料口直径，会发生物理卡滞^[5]。

另外，放料口内壁若有锈蚀或粗糙面，会增加物料附着概率，使堵塞层不断增厚。堵塞会导致放料速度减慢甚至中断，罐内物料停留时间延长，进一步加剧结晶与团聚，形成难清理硬块，还可能产生不溶性杂质，进入酸解反应器后降低反应效率与钛液纯度，增加后续净化工序负担。

三、硫酸法钛白粉酸解预混系统改造

(一) 设备技术改造

设备技术改造需针对预混罐内壁粘结、搅拌轴结垢、计量仓下料不均及放料口堵塞等核心问题，结合物料特性与生产需求优化设备结构与材质。对于预混罐，将内壁材质升级为耐强酸腐蚀且表面光滑的 316L 不锈钢，并在罐壁内侧加装可拆卸式聚四氟乙烯衬里，利用聚四氟乙烯极低的表面能减少固体物料粘结，同时在罐壁设置蒸汽伴热装置，通过精准控温，保持 50–80℃ 稳定区间，避免局部温度波动导致的盐类结晶；针对搅拌轴结垢，将搅拌轴表面进行抛光处理，降低结晶附着概率，同时优化搅拌桨结构，采用双层斜叶桨与锚式桨组合形式，上层斜叶桨增强物料径向混合，下层锚式桨贴近罐壁旋转，可实时刮除罐壁附着的少量粘结物，减少结垢基础。

对于钛铁矿粉计量仓，将传统锥底结构改为双曲线型溜槽底，减小物料流动阻力，避免“架桥”，在仓壁加装高频振动器，振动频率控制在 30–50Hz，通过轻微振动松散团聚的粉体，同时在计量仓下料口设置变频螺旋给料机，精准控制下料量，确保矿粉按 1: 1.5–1.8 的质量比稳定输送至预混罐；针对预混罐放料口堵塞，将放料口直径扩大 20%–30%，并采用喇叭口式进料结构，降低物料流动阻力，在放料管道外侧加装电伴热装置，维持管道内温度与罐内一致，避免温度下降导致的结晶析出，同时在放料口内部设置旋转刮刀，实时清理管道内壁附着的物料，从根本上解决堵塞问题。

(二) DCS 控制系统完善

DCS 控制系统完善需围绕生产参数实时监控、精准调控与异常预警展开，实现预混过程全流程自动化与智能化管理，保障物料混合均匀性与生产稳定性。

在关键设备处增设高精度传感器：在钛铁矿粉计量仓安装称重传感器与料位传感器，实时监控仓内粉体重量与料位高度，结合变频螺旋给料机的转速反馈，通过 DCS 系统自动调节给料速度，确保矿粉下料量稳定，避免与浓硫酸配比偏离；在预混罐内安装温度传感器，分布于罐内不同区域、压力传感器及粘度传感器，实时采集混合体系的温度、压力及粘度数据，当温度超出设定区间时，系统自动调节蒸汽伴热装置的加热功率，当粘度异常时，自动调整搅拌轴转速，范围 100–300r/min，优化混合效果。

构建数据联动控制逻辑，将计量仓、预混罐、放料口等设备的运行参数接入同一 DCS 平台，实现参数互锁，例如当预混罐内矿粉浓度过高时，系统自动降低计量仓下料速度并适当提高浓硫酸进料量，确保配比精准；同时，设置异常预警模块，

当放料口压力异常升高、搅拌轴电流骤增时，系统立即触发声光报警，并自动启动对应应急措施，如开启放料口旋转刮刀、提高搅拌轴振动频率等。此外，增加数据存储与分析功能，实时记录生产过程中的温度、配比、转速等参数，生成历史曲线与生产报表，为后续工艺优化提供数据支撑，大幅提升预混过程的可控性与稳定性。

(三) 工艺改进

工艺改进需基于预混阶段物料反应特性与现有流程短板，从原料预处理、混合工艺参数优化及清洁维护流程完善三方面入手，提升混合效率与原料利用率，降低设备故障风险。在原料预处理环节，优化钛铁矿粉研磨工艺，将粉体粒度控制在 250–300 目，此粒度区间既能保证粉体与浓硫酸的接触面积，又可减少因颗粒过细导致的团聚现象，同时在矿粉存储前增设热风干燥工序，将矿粉含水率控制在 0.5% 以下，削弱颗粒间液桥力，提升流动性；对于浓硫酸，在进入预混罐前增设过滤装置，去除硫酸中可能含有的杂质颗粒，避免杂质引发的局部反应不均与设备粘结。

在混合工艺参数优化方面，调整预混罐搅拌转速与混合时间，根据物料粘度变化动态调节转速，初始混合阶段 150–200r/min，后期 200–250r/min，确保混合均匀，同时将混合时间控制在 20–30min，原 15–25min，保证矿粉与浓硫酸充分接触，避免局部未混合区域；优化温度控制曲线，采用“阶梯升温”方式，初始温度 50℃，逐步升至 70–80℃，避免温度骤升导致的局部反应剧烈与盐类结晶。

在清洁维护流程方面，制定周期性清洁制度，每批次生产结束后，利用稀硫酸对预混罐、搅拌轴及放料管道进行冲洗，去除残留的固体附着物，每月对计量仓进行一次彻底清理，清除仓壁附着的顽固团聚体，同时定期校验 DCS 系统传感器与控制模块，确保参数监测与调控精准，通过工艺全流程优化，实现预混系统稳定运行，为后续酸解反应提供优质的矿酸混合物。

四、总结

酸解预混工序对酸解效果有重要影响，在设计时预混罐应尽量缩短与间歇酸解反应器或连续预混过渡罐的间距，缩短放料管线，以保证放料管线畅通，减少发生管道堵塞现象。在操作过程中要严格控制工艺参数，使硫酸和钛铁矿粉混合均匀，提高酸解率。

[参考文献]

- [1]王蓓琳，高利坤，饶兵，等.硫酸法钛白粉酸解渣综合利用试验研究[J].化工矿物与加工，2025（6）.
- [2]李萍，乔虹.硫酸法钛白粉酸解主反应对固相物溶解度影响研究[J].山西化工，2024，44（12）：20–21，24.
- [3]李平.钛精矿酸解尾气中升华硫的特性与沉积研究[D].重庆理工大学，2024.
- [4]潘邻屹，邵石君，张旭杰，等.钛白废酸制备聚合硫酸铁的资源化利用[J].工业水处理，2025，45（2）：104–108.DOI: 10.19965/j.cnki.iwt.2024-0072.

[5]刘文静.硫酸法钛白粉生产中酸解影响因素的优化试验研究[J].山西化工，2024，44（12）：18–19，37.

作者简介：刘宇，1988–11–18，男，汉族，大学本科，工程师。