

氯化法生产二氧化钛工艺现状及研究进展

徐倩¹, 田林², 杨青宏¹, 陆平³, 李冬勤³, 苗庆东³, 杨妮⁴,
谢刚⁴, 侯彦青¹

- (1. 昆明理工大学 复杂有色资源清洁利用国家重点实验室, 云南 昆明 650093;
2. 云南师范大学 能源与环境科学学院, 云南 昆明 650500;
3. 攀钢集团研究院有限公司 钒钛资源综合利用国家重点实验室, 四川 攀枝花 617000;
4. 昆明冶金研究院, 云南 昆明 650031)

[摘要] 钛白具有优异的理化性能,被广泛应用于工业生产中,例如颜料、医疗、化妆品、半导体和航天技术等领域。目前生产钛白的技术主要为硫酸法和氯化法,其中氯化法生产更为符合经济和环保的双重要求,本文主要介绍了氯化法制备钛白粉的工艺流程,综述了近年来氯化法制备钛白粉的研究进展。在氯化法生产钛白粉的工艺过程中, $TiCl_4$ 和 O_2 的反应属于毫秒级别,由于反应速度较快,难以从实验层面去研究其反应过程,因此应该选用量子化学计算方法研究其微观、高速的反应过程,采用第一性原理计算的方法研究二氧化钛成核过程的微观机理即基于密度泛函理论(DFT)去研究。目前国内氯化法生产钛白的比例较低,对反应气体的快速混合还难以控制,对结疤的预防技术还没有掌握,生产的钛白产品与国际上其他国家生产的钛白还具有一定差距。未来,国内在钛白粉生产领域还需加大研究力度,增强国际市场竞争能力。

[关键词] 钛白粉;氯化法;硫酸法; TiO_2 ;成核技术;反应器结疤;快速混合技术

[中图分类号] TF823 [文献标志码] A [文章编号] 1672-6103(2023)02-0021-10

DOI:10.19612/j.cnki.cn11-5066/tf.2023.02.003

二氧化钛(TiO_2)作为一种重要的化工原料,具有白度高、折射率较强、覆盖能力强等优点^[1-2],在颜料、医疗、陶瓷、橡胶和化妆品等^[3]生产制造行业中被广泛使用。同时,钛白粉具有良好的光催化性能,因此在新能源、废物降解以及医疗行业中具有十分重要的意义^[4-5]。随着经济社会的发展,钛白粉的需求量在逐年增加,尤其是对于高品质钛白粉的需求量不断增大。而我国对纳米二氧化钛的基础理

论研究相对较晚,很多关键技术还有待提升,从而导致我国对于高品质钛白粉的来源大量依赖进口^[6]。随着国内对纳米钛白粉的需求日益增加,我国钛白粉的制造技术也得以快速发展,目前工业上主流生产钛白的技术有硫酸法和氯化法^[7-8]。

硫酸法生产二氧化钛虽然对原料品位要求较低,设备操作相对简单,但是其工艺过程生产周期较长,能耗高、环境污染严重;氯化法生产二氧化钛工艺流程相对较短,产品品质好、纯度较高,而且环境破坏相对较小,已成为国际主流生产工艺。文献研究表明,目前对二氧化钛生产过程中成核机理的认识还具有一定的局限性,这会阻碍反应器的放大设计^[9-10],同时产品粒径大小和品质的控制还具有一定的技术提升空间。本文对硫酸法和氯化法生产二氧化钛进行了简单介绍,着重对氯化法生产二氧化钛的现状 & 反应机理进行阐述,以期进行更先进的二氧化钛制备系统研究提供参考。

[收稿日期] 2022-12-26

[第一作者] 徐倩(1998—),女,四川安岳人,硕士研究生,主要研究方向为冶金过程多尺度仿真模拟。

[通信作者] 侯彦青(1982—),博士,教授,主要研究方向为冶金过程多尺度仿真模拟。

[基金项目] 钒钛资源综合利用国家重点实验室资助项目(2020P4FZG04A);国家自然科学基金(22168019)。

[引用格式] 徐倩,田林,杨青宏,等.氯化法生产二氧化钛工艺现状及研究进展[J].中国有色冶金,2023,52(2):21-30.

1 二氧化钛生产的主要工艺及现状

在早期,生产钛白的工艺技术使用最多的还是硫酸法,随着该工艺的逐渐发展,其生产技术变得更加先进成熟。利用该方法生产钛白粉时,对原料品位要求较低,原料来源相对丰富,设备操作相对简单。但是该方法存在一些缺点:整个生产工艺流程较长,工序复杂,最重要的是生产对环境污染严重。随着人们对环境保护的重视,大多数利用硫酸法生产二氧化钛的工厂面临停产。目前较先进的方法是氯化法,与硫酸法相比,该方法在生产技术和工艺方面有所提升^[11],操作过程主要依赖于机械,生产工艺和流程等相对较短,且可以进行自动化高效的连续生产^[12]。利用氯化法生产的金红石型二氧化钛在品质上更好、纯度较高、粒径分布范围和大小较合理。此工艺在生产过程中排出的废气废渣易于处理,对环境破坏相对较小,目前已经成为了国际主流生产二氧化钛的工艺^[13]。全球前5强钛白粉生产企业,欧美企业就有4家,且产能达400万t以上,氯化法占75%。表1介绍了全球前5强钛白粉企业产能、市场份额及生产方法^[14]。

表1 国际钛白粉生产商钛白产能和份额

Table 1 Titanium dioxide production capacity and share of international titanium dioxide manufacturers

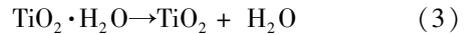
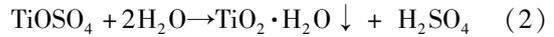
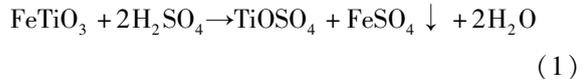
生产商	产能/ 万t	市场 份额/%	氯化法 比例/%	硫酸法 比例/%
科慕	125	19.0	100	0
特诺(科斯特)	132	20.0	84	16
龙鳞-佰利联	101	12.5	13	87
亨斯曼	90.5	11.0	20	80
康诺斯	52	7.4	74	26

1.1 硫酸法生产 TiO₂

硫酸法制备钛白已有70多年的历史,该方法既可以产生金红石型二氧化钛又可以生产锐钛型二氧化钛^[15],因此该生产工艺得到广泛的推广。目前国内有80%以上的纳米二氧化钛用此法制备^[16]。

硫酸法制备二氧化钛生产工艺流程:添加浓硫酸将钛铁矿等含钛矿物原料进行酸解氧化处理,溶出硫酸氧钛,将所得到的酸腐蚀氧化后的溶液进行水解并沉淀,沉淀物即为水合二氧化钛,然后用物理煅烧的方法处理沉淀物质就可以得到需

要的二氧化钛初级产品,再进行后续的加工处理即得到钛白粉^[17-18]。涉及的主要化学反应见式(1)~(3)^[19]。



硫酸法工艺原材料来源广、生产设备简单、操作简便,但生产周期较长、环节多、能耗高、环境污染严重,且在除杂过程中需耗费大量的水。焦婷婷^[20]对硫酸法制备钛白产品的危害以及对环境造成的风险进行了研究分析;蒲灵^[21]等对利用硫酸法制造金红石型钛白粉的过程中产生的重金属污染进行了探究分析。这些研究结果显示此种工艺生产过程中会产生大量环境污染物,而且原料的综合利用率低,对于污染物进行无害化处理难度大。据统计采用此方法生产1t钛白粉,需1.9t的钛精矿(按TiO₂含量59%计算),4t浓硫酸和100t水;副产物包括2.5~4t的硫酸亚铁,7~11t浓度20%的废硫酸,1.5~2万m³含尘酸性废气,100~250t含硫酸废水,0.2~0.3t废渣^[22]。硫酸法制备钛白工艺流程见图1^[23]。

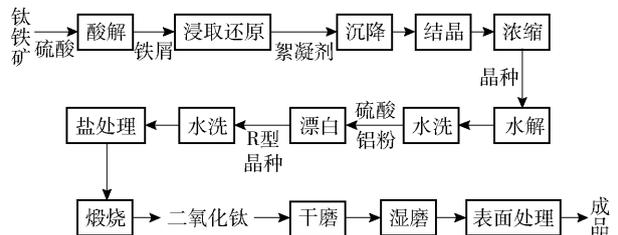


图1 硫酸法制备钛白工艺流程

Fig. 1 The production of titanium dioxide by sulfuric acid process

1.2 氯化法制备 TiO₂

氯化法制造钛白流程:第一步是将富钛矿和焦炭一起吹入流化床反应器内^[24-25];第二步经过高温氯气进行氯化处理;第三步将处理后的四氯化钛气体和氧气一起送入氧化反应室内进行反应,通过一定的手段分离得到TiO₂^[26-27]。最重要的一部分是四氯化钛的氧化反应,即四氯化钛和氧气进行反应,通过快速的氧化反应生产TiO₂的前驱体。当反应进行时,前驱体的数量逐渐趋于饱和状态时,二氧化钛开始形核,四氯化钛和氧气在表面吸附解离,这种

行为有助于晶核生长^[28]。二氧化钛的晶体通过一定的团簇方式长大,通过后续处理后可以得到工业上需要的晶体结构,并达到满足要求的粒径。

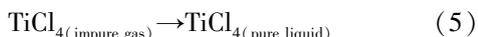
自然金红石钛矿、人造金红石、白钛矿以及粗钛铁矿等均可作为氯化法生产钛白的工业原料^[29]。以金红石和人造金红石为原料制造钛白的工艺流程主要包括:富钛矿的氯化处理;四氯化钛的提纯处理;四氯化钛和氧气的氧化反应;二氧化钛初始产品的后续处理。

氯化法的流程短、能耗低、自动化程度高、“三废”少、产品质量高,而且方便生产能力扩大,因此得到了迅速发展。主要的反应机理见式(4)~(6)^[30]。

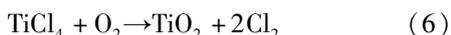
钛矿氯化:



粗物质提纯:



氧气反应:



式(4)表示的是富钛矿氯化处理工序,在温度为925~1 010℃下,将富钛与焦炭在高温下混合后,在流化床反应器中加入高温氯气进行氯化反应,基于沸点差异,使得四氯化钛和其他氯化产物得以分离。同时,由于物质存在分压和溶解度的差异,氯化操作后的气体通过分离提纯得到粗TiCl₄^[31]。式(5)表示粗四氯化钛提纯工序,将氯化反应得到的氯化产物用有机物去除杂质,去除高沸点、低沸点等氯化物杂质,最后通过蒸馏方式得到纯度较高的TiCl₄^[32]。式(6)表示氧化工序,纯度较高的TiCl₄在高温状态下通过装有AlCl₃添加剂的容器,将这些混合物同高温氧气快速混合,生成二氧化钛的初级产品^[33]。经过一系列操作后,将气体和固体进行分离,得到TiO₂,然后再回收利用多余的Cl₂。由于少量的氯原子被吸附在表面,因此需要进行脱氯操作,最终可以得到合格的金红石型TiO₂^[34]。

氧化反应阶段是氯化法的核心工序,该反应在高温高压、湍流的情况下进行,同时伴有热量、动量、质量的非均相反应,氧化过程直接决定了产品质量^[35]。氧化前需将TiCl₄液体在150~200℃下气化处理,一步或分步预热到900~1 000℃,氧气也需预热到此温度。然后气体按照一定比例喷入氧化反应器内^[36]。由于氧化反应温度窄,对温度的控制

要求非常严格。温度过高会影响产品质量,使二氧化钛晶粒相互黏结失去颜料性能,同时会在氧化反应器壁上结疤,影响反应的进行;温度过低则会影响氧化反应速率。氧化反应的反应温度在1 400~1 800℃之间,在高温条件下生成TiO₂粒子是在几毫秒内完成的。反应器壁上结疤的原因是当TiO₂过饱和后,粒子间相互碰撞的概率变大,与反应器壁面接触概率变大,在器壁上烧结并长大堵塞反应器,形成结疤^[37]。

氧化反应在氧化反应器内进行,因此氧化反应器是氯化法制备TiO₂的关键设备。氧化反应器主要是由以下几部分组成:高温氧入口、二次氧入口、四氯化钛气体入口、除疤装置、反应室、气体分布装置、冷却装置和氧气预热装置等^[38]。该装置主要问题有两方面:一是粒度难以控制,影响产品最终质量;二是氧化反应器的结疤,一旦结疤就会影响正常生产。气体在反应器内流动,尤其在氧化反应区域的流动,对结疤以及产品质量有很大的影响,因此优化气体在反应器内的流动状态尤为重要。

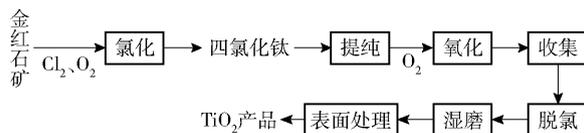


图2 氯化法制备钛白工艺流程

Fig. 2 The production of titanium dioxide by chlorination process

2 氯化法生产TiO₂研究现状

氯化钛白的生产工艺技术最早起源于德国,经过美国的2家公司不断改良与完善,形成了现有的氯化法生产钛白技术。由于该方法的工艺技术及设备具有较高难度,成为一项难以实现的生产工艺,进而导致国际钛白行业形成了一家或几家独大的现状。

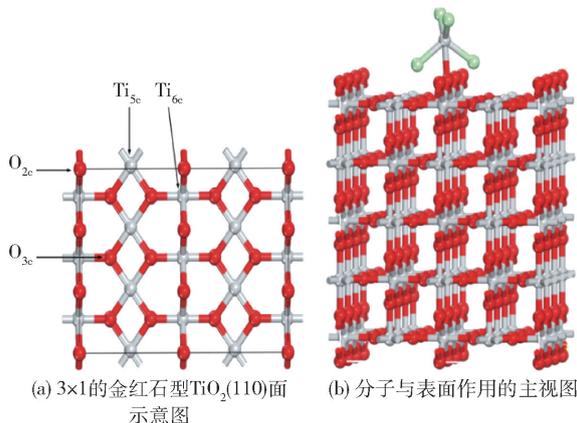
与国外的氯化法钛白技术发展历程相比较,国内对这项技术掌握差距甚远。经过五六十年年的发展,我国钛行业许多公司都进行氯化法制造生产钛白试验与生产,但由于生产制造钛白的工业机器设备的制造维护理论不够完善,未能完全解决反应发生器放大与预防反应器结疤的问题。随着市场经济的发展,全球化贸易往来,国内很多企业都进行了和外国企业的技术合作,以及兼并别国公司进行技术

革新,在生产制造方面取得了长足进展。

2.1 TiO₂ 表面沉积反应机理研究现状

近年来很多科研工作者通过量子化学计算的手段研究了二氧化钛表面沉积。Oliver R 等^[39]研究了 Cl 在 TiO₂(110) 表面的沉积吸附与解离,确定了氯原子在表面最稳定的吸附沉积结构和吸附位置,通过测定表面转变过程和过渡态,对氯在不同表面不同位置的扩散进行相应研究。石正光等^[40]通过密度泛函理论研究 CO 分子在负载贵金属的锐钛矿型 TiO₂(001) 表面进行沉积吸附机理研究,通过对负载贵金属原子(Ir, Pd, Pt) 等研究,结果表明 Ir 和 Pt 原子更容易沉积在 O_{2c} 位上,而 Pd 原子更容易沉积在 Ti_{5c} 位上。其吸附能大小顺序为: CO/TiO₂ (1.065 eV) > CO/Pd/TiO₂ (2.535 eV) > CO/Pt/TiO₂ (3.326 eV) > CO/Ir/TiO₂ (3.593 eV)。揭示了 CO 分子负载不同金属其吸附能量大小和位置各不相同。王东等^[41]利用从头算分子动力学和密度泛函理论计算揭示了 Pt/TiO₂ 光催化剂上光催化析氢反应的大小依赖活性,结果表明,准两层铂颗粒,对应于 1 nm 的尺寸,是最好的光催化析氢反应催化剂,与热驱动和电催化相比,光催化更倾向于更小的金属颗粒来促进光电子转移。崔文颖等^[42]通过密度泛函理论的 Material Studio 程序中的 Castep 模块计算了三氟乙酸在 TiO₂ 表面的沉积,研究结果表明,三氟乙酸被垂直吸附在板钛矿型 TiO₂(210) 表面,其羧基端 H 被 Ti 原子吸附的吸附方式吸附能量最大,沉积结构最为稳定。翁景峥等^[43]通过第一性原理研究了锐钛矿 TiO₂(110) 表面沉积苯酚相互作用能,研究发现,苯酚分子平行放置在 TiO₂(110) 表面时的相互作用能最大。Hisayoshi 等^[44]通过第一性原理的方式计算了含羟基锐钛矿型二氧化钛表面 O₂ 催化甲醇氧化制苯甲醛反应机理,研究结果表明,二氧化钛表面的羟基对醇盐的形成起着重要的作用,发现醇盐物种的轨道与 TiO₂ 价带中的 O_{2p} 轨道杂化,光催化体系中可见光响应可以归因于醇盐物种产生的施主能级到导带的电子跃迁。杨帆等^[45]通过密度泛函理论研究了金红石型 TiO₂(100) 面对 C 和 Cl₂ 的吸附沉积,结果表明,Cl₂ 单独在 TiO₂(100) 表面沉积的过程为物理吸附,C 和 Cl₂ 同时在 TiO₂(100) 表面沉积时属于化学吸附,加入 C 原子会促进 Cl₂ 的解离以及 C—Cl 键或 Ti_{5c}—Cl 键的形成,含有 C—O_{2c} 键的体系稳定性高于 C—O_{3c}

的体系,C 的加入会促进 TiO₂ 氯化反应的进行。Shirley 等^[46]首次运用密度泛函理论的赝势平面波方法研究了四氯化钛与 TiO₂(110) 表面的物理化学运动规律,通过模拟计算得到 TiCl₄ 在表面吸附时吸附能量最低的位置,结果表明 TiCl₄ 首先在 TiO₂(110) 面上的氧空位上进行吸附,解离后和氧气分子反应形成二氧化钛,从而使得 TiO₂ 晶核逐渐长大。通过数学物理方程建立微观动力学模型,TiO₂ 晶核表面生长同样以 Rideal-Eley 原理进行研究。这些试验验证了 Ghoshtagore 等^[47]的研究结果:由于 TiO₂(110) 面表面能低,外部悬挂键少,表面比较稳定,所以(110) 面是最佳的研究表面。3 × 1 的金红石型 TiO₂(110) 面示意图及分子与表面作用主视图见图 3^[46]。刘翠松等^[48]通过研究发现 3 种催化剂光活性次序为片状锐钛矿(AT) > 棒状金红石(RT) > 菱形板钛矿(BT),与其对阴离子活性染料吸附能力一致。



Ti 原子为灰色;O 原子为红色;蓝色为 Cl 原子

图 3 3 × 1 的金红石型 TiO₂(110) 面示意图及分子与表面作用主视图

Fig. 3 Top view of the 3 × 1 rutile TiO₂(110) surface structure and master view of molecular interactions with surfaces

2.2 仿真模拟研究现状

目前对氧化反应发生器内的研究也较多,无论是试验室操作还是工业数据分析都有人做了大量工作,但是由于内部复杂的生产环境无法用仪器测得相应的数据,数值模拟的方法可以用来补充试验难以操作的领域。李亚东等^[49-50]通过流体力学反应机器设备中反应物在炉内的速度场、

温度场、浓度场的流体力学性质研究分析,并建立了反应物在空间中反应的三维数理模型。通过计算模拟,发现合开孔射流环的物料混合效果优于均匀开空射流环。刘强^[23]通过 SolidWorks 建立氧化反应模型,模拟不同角度、动量比、环缝比氧化反应的流场,分析得出,氧化反应器的结构为角度 75°、动量比 0.29、环缝宽 10 mm 时,对钛白粉的产量有最大限度的提高。程易^[51]等利用仿真模拟考察了射流狭缝宽度、射流角度以及气流动量比对混合区流场的影响,结果表明较大的气流动量比、窄射流狭缝宽度以及接近 90°的射流可以获得的混合区流场分布。Talpallikar 等^[52]用多相流的方法进行模拟,确定了较优的工业参数,并指导工业

生产,提高氧化反应速率。Jethro 等^[53]详细研究在反应过程中反应器内流场、温度场以及压力场的变化,与反应过程中的浓度、温度、压力和入射的流量角度进行关联,同时进行分析研究,结果表明,流量及入射方向对氧化反应有着很大的影响。

2.3 氧化反应动力学研究现状

众多研究者对氯化法钛白氧化反应中的动力学过程进行了相应研究,通过分析表 2 中的数据可以得知,钛白形态稳定性的总体控制程度取决于 TiCl₄ 氧化聚合过程中的反应温度、反应停留时间、反应物浓度和反应物的混合速度等多个因素。以下将分反应温度、反应浓度、停留时间、混合效果几个方面了解现有的研究现状。

表 2 关于 TiCl₄ 氧化反应动力学方程研究

Table 2 Study on kinetic equation of TiCl₄ oxidation reaction

研究者	反应动力学方程式
S E Pratsinis et al ^[54]	$\ln[-\ln C_{\text{TiCl}_4}/t] = -E/RT + \ln A$
R N Ghoshtagore et al ^[47]	$dN_{\text{TiO}_2}/dt = S \times C_{\text{TiCl}_4} \times 4.9 \times 10^3 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1} \times \exp(-74.8 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}/k_B T)$
R H West et al ^[55]	$dM/dt = S \times C_{\text{TiCl}_4} \times (4.9 \times 10^3 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}) \times \exp(-74.8 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}/k_B T)$ $dS/dt = -1/\tau [S - \pi^{1/3} (6M/\rho)^{2/3}]; \tau = 7.4 \times 10^8 \text{ K}^{-1} T d_p^4 \times \exp(3.1 \times 10^4 K/T)$
R Shirley et al ^[46]	$dC_{\text{TiO}_2}/dt = k_{fi} [s^*] C_{\text{TiCl}_4} C_{\text{O}_2}^m; k_{fi} = -\ln(C_{\text{TiCl}_2})/t$
周峨等 ^[10]	$dC_{\text{TiCl}_4}/dt = 2.09 \times 10^2 e^{-80060/8.3147} \times P_{\text{TiCl}_4}^{1.05} \times P_{\text{O}_2}^{0.11}$ $dC_{\text{TiCl}_4}/dt = 1.0487 \times 10^4 \times e^{-97390/8.3147} \times C_{\text{TiCl}_4}$
姚光辉等 ^[56]	$P_{\text{O}_2} < 0.6 \text{ atm}, R = 1.55 \times 10^6 \times \exp(-62400/RT) \times P_{\text{TiCl}_4}^{0.03} \times P_{\text{O}_2}^{0.44} \text{ mg} \cdot \text{min}^{-1}$ $P_{\text{O}_2} > 0.6 \text{ atm}, R = 1.55 \times 10^6 \times \exp(-62400/RT) \times P_{\text{TiCl}_4}^{1.03} \text{ mg} \cdot \text{min}^{-1}$

注:其中 C_{TiCl_4} 为四氯化钛浓度; C_{TiO_2} 为反应中 TiO₂ 分子浓度; C_{O_2} 为氧气浓度; T 为体系中反应温度; K 为开氏反应温度常数; t 为反应结束时间常数; A 为 Arrhenius 指前因子常数; R 为气体常数; E 为气体 Arrhenius 热活化反应能值; S 为气体 TiO₂ 颗粒表面积; S^* 为生长过程中使用的常数; k_B 为一般常数; N_{TiO_2} 为 TiO₂ 沉积量; M 为 TiO₂ 的晶体数量; ρ 为密度常数; d_p 为粒子平均直径; P 为气体分压。

在 TiCl₄ 氧化反应中温度场的控制对反应影响至关重要,影响着 TiO₂ 的晶型转变效率。Pratsinis 等^[54]运用平流的方法进行研究,通过分析温度、浓度与产品直径之间的关系,发现将反应过程中反应物质的浓度固定,温度与产品颗粒直径之间存在反比例关系,即高温造就了较小的平均直径。

在成核试验研究中发现,氯化法反应物的氧化反应速率和反应物浓度之间存在一定关系^[57]。Ghoshtagore 等^[47]采用传统的水平石英管“硅外延”反应器研究 TiO₂ 的气相沉积, TiCl₄ 浓度与化学反应速率出现一次方关系,与 O₂ 浓度呈现出半阶关系。Pratsinis 等^[58]在 1000 °C 的气溶胶反应炉内,采用建立氧化反应的动力学模型和方程去求解反应物

与浓度之间的关系,通过方程可以看出二者之间在反应过程中存在一阶幂指数关系。周峨等^[10]建立了动力学方程来表述氯化反应,表明化学反应速率和初始浓度之间存在一定的指数关系,反应末期 O₂ 物质的量浓度对反应速率有影响。姚光辉等^[56]通过研究得到了一级反应即氧化反应速率和浓度的关系;当反应体系中温度和反应物浓度同时增加时,当含氧量较低时,反应速率受氧气含量的影响;当含氧量高时,反应速率则与氧气含量无关。

氯化法氧化反应在反应设备中反应物之间发生是非常迅速的, TiCl₄ 和 O₂ 混合的停留时间会直接对反应中 TiO₂ 粒径分布、平均粒径大小以及晶型转化等产生影响^[57]。Pratsinis 等^[54]采用平流反应器,

通过模拟反应成核与生长的模型,推算出反应物在机器设备中混合发生反应的时间长短对产品质量的影响。结果表明,停留时间的长短会影响颗粒平均粒径的大小,反应持续时间越长,产物半径越大,颗粒所含有的浓度也必然较高,反之亦然;因此,二氧化钛的晶体形态很大程度是由反应物在氧化反应器中停留的时间所决定的,反应逗留时间的长短决定最终产品的质量。

在氧化反应发生器中, TiCl_4 和 O_2 在氧化反应器中的混合至关重要。林发承等^[59]提出通过冷、热模拟试验的方法调控化学反应过程中的混合效果,模拟氯化反应的化学反应速率,结果表明,提高混合效果对化学反应有一定的促进作用。张曙明等^[60]则认为反应气体物质进入流场的角度和速度是非常重要的,采用较好的进气角度可以提高混合气体的混合程度。

3 总结及展望

3.1 总结

本文主要介绍了氯化法制备钛白工艺技术以及氯化法过程中一些现有研究。随着高质量钛白粉的需求增大,对生产技术革新势在必行。

1)目前对氧化反应所需要的机器设备结构的研究已经较为详细,如模拟反应器内流场,确定最优的开孔角度及结构、动量比、狭缝宽度等;对于 TiCl_4 在生产过程中整个氧化反应过程的沉积也做了大量研究,发现了最稳定的吸附结构、位置以及最佳的研究表面等,但并不全面,因此对 TiCl_4 氧化反应机理进行研究是非常有必要的。

2)通过研究氧化反应动力学过程,了解到钛白形态稳定性的总体控制程度取决于 TiCl_4 氧化聚合过程中的反应温度、反应停留时间、反应物浓度和反应物的混合速度等。

3)氯化法目前存在较多的技术难点,比如反应设备的制造与优化、反应的控制和结疤的预防等,这些技术与参数和操作方法会对产品的最终质量造成影响。

4)目前国内氯化法生产钛白的比例较低,且生产的钛白与国际上其他国家生产的钛白还具有一定的差距,在国际市场环境竞争力还有待提升。

3.2 展望

为加快氯化法工艺工业应用,还需从以下几方

面研究和解决核心技术问题。

1)生产工艺中的氧化反应发生器的结构设计复杂、操作难度高,反应气体快速混合难控制,反应器的结疤与预防结疤都成为生产工艺的技术难题。通过研究 TiCl_4 在氧化反应过程中的动力学数据,分析各个过程的控制因素以及操作条件、气体混合速度等因素对氧化反应的影响,设计改良氧化反应发生器,寻找最适宜的操作条件以及优化设计反应器,通过各种探究改良以得到更好品质的 TiO_2 产品。

2)目前有很多学者对 TiO_2 (110) 的生产过程进行研究,大多数认为都是 n 层到 $n+1$ 层的生长体系。当二氧化钛晶体成核后, TiCl_4 存在于 TiO_2 (110) 表面,伴随着一定的物理化学吸附与解离, TiCl_4 中的 Ti 原子吸附在晶核表面, Cl 离子解离形成氯气分子;吸附停留在晶核表面的 Ti 原子被体系中存在的 O 氧化形成 TiO_2 分子,体系中存在的分子在 TiO_2 (110) 面具体的物理化学吸附机理需要进一步被研究。

3)第一性原理的计算方法被广泛运用到各行各业,通过量子化学去解释氧化反应的微观机理,同时研究更多的抑制剂在工业生产过程中对 TiO_2 晶体成核的影响,研究 TiO_2 的团簇基础理论;增加对工艺生产的数据采集,建立庞大的生产数据库收集试验数据,结合计算机的微观化学计算,将理论与实际相结合,通过数据采集与分析,设计出更加优异的反应设备,为解决氧化反应发生器炉壁结疤问题提供理论指导和依据。

[参考文献]

- [1] 何明川, 黄建文. 钛白粉有机改性与工艺优化分析[J]. 化工管理, 2021(19): 178-179.
HE Mingchuan, HUANG Jianwen. Organic modification and process optimization of titanium dioxide[J]. Chemical Enterprise Management, 2021(19): 178-179.
- [2] 季兴宏. 钛白粉在涂料中的应用及可持续发展途径[J]. 现代涂料与涂装, 2019, 22(2): 13-17.
JI Xinghong. Application of titanium dioxide in paints and its sustainable development approaches[J]. Modern Paint and Finishing, 2019, 22(2): 13-17.
- [3] R Ragadhita, A B D Nandiyanto, A C Maulana, et al. Techno-economic analysis for the production of titanium dioxide nanoparticle produced by liquid-phase synthesis method[J]. Journal of Engineering Science and Technology, 2019, 14(3): 1639-1652.
- [4] A K Keshari, P Choudhary, V K Shukla. Precursor induced evo-

- lution in single anatase phase synthesis of TiO₂ nanoparticles for water treatment and dye-sensitized solar cell[J]. *Physica B: Condensed Matter*, 2022, 631: 413716.
- [5] C Rui, A Ns, B Sja, et al. Solar energy for liquid wastewater treatment with novel TiO₂ supported catalysts[J]. *Energy Reports*, 2022, 8: 489–494.
- [6] 陈亚杰, 邵亚云, 程浩艳. 合成条件对纳米 TiO₂ 材料光催化性能的影响[J]. *兵器材料科学与工程*, 2022, 45(2): 43–48.
- CHEN Yajie, SHAO Yayun, CHENG Haoyan. Effect of synthesis conditions on photocatalytic properties of nano-TiO₂[J]. *Ordnance Material Science and Engineering*, 2022, 45(2): 43–48.
- [7] 高毅安. 氯化法钛白初品质量影响因素分析[J]. *涂料工业*, 2020, 50(9): 28–32, 37.
- GAO Anyi. Analysis of affecting factors of chlorinated titanium dioxide semi-finished product's quality[J]. *Paint & Coatings Industry*, 2020, 50(9): 28–32, 37.
- [8] Xiaobo Chen, Samuel S Mao. Titanium dioxide nanomaterials: synthesis, properties, modifications, and applications[J]. *Chemical Reviews*, 2007, 107(7): 2891–2959.
- [9] 李茂勇. 提升二氧化碳综合利用率实现节能减排[J]. *云南化工*, 2018, 45(5): 222.
- LI Maoyong. Increase the comprehensive utilization rate of carbon dioxide to achieve energy conservation and emission reduction[J]. *Yunnan Chemical Technology*, 2018, 45(5): 222.
- [10] 周峨, 王志, 温建康, 等. TiCl₄ 高温气相氧化过程的动力学研究[J]. *稀有金属*, 2007, 31(5): 656–660.
- ZHOU E, WANG Zhi, WEN Jiankang, et al. Oxidation kinetics of titanium tetrachloride in vapor phase[J]. *Chinese Journal of Rare Metals*, 2007, 31(5): 656–660.
- [11] 闫慧云, 刘旭东, 王磊, 等. 二氧化钛微粉液相法制备研究进展[J]. *化工管理*, 2020(36): 110–111, 137.
- YAN Huiyun, LIU Xudong, WANG Lei, et al. Progress of the method of preparation of titanium dioxide powder liquid phase[J]. *Chemical Enterprise Management*, 2020(36): 110–111, 137.
- [12] 宋国威, 金志行, 金大胜. 纳米 TiO₂ 粉末的制备方法[J]. *冶金管理*, 2020(5): 33, 54.
- SONG Guowei, JIN Zhixing, JIN Dasheng. Preparation method of nanometer TiO₂ powder[J]. *Metallurgical Industry Management*, 2020(5): 33, 54.
- [13] 张旭昀, 王勇, 齐波, 等. 纳米 TiO₂ 的分散工艺及其改性水性涂料的性能[J]. *材料保护*, 2007(8): 43–45, 87.
- ZHANG Xuyun, WANG Yong, QI Bo, et al. Process for dispersion of nano-TiO₂ and modification of waterborne paint[J]. *Materials Protection*, 2007(8): 43–45, 87.
- [14] 李列. 氯化法钛白综述[J]. *广州化工*, 2022, 50(4): 9–11.
- LI Lie. Overview of chlorination titanium dioxide[J]. *Guangzhou Chemical Industry*, 2022, 50(4): 9–11.
- [15] 王晓真, 周永基. 硫酸法制备高白度蓝相钛白粉[J]. *化工管理*, 2022(30): 145–147.
- WANG Xiaozhen, ZHOU Yongji. Preparation of high whiteness blue phase titanium dioxide by sulfuric acid method[J]. *Chemical Management*, 2022(30): 145–147.
- [16] 李靖华, 白同春, 席国喜, 等. 硫酸法钛白粉生产中 TiO₂ 水合物脱水过程动力学的研究(金红石型颜料钛白粉研制报告之三)[J]. *河南师范大学学报(自然科学版)*, 1986(3): 44–55.
- LI Jinghua, BAI Tongchun, XI Guoxi, et al. Study on the kinetics of TiO₂ hydrate dehydration in the production of titanium dioxide by sulfuric acid method (The Third Report on the Development of rutile pigment Titanium Dioxide)[J]. *Journal of Henan Normal University*, 1986(3): 44–45.
- [17] N T Duong, L D Vuong, N M Son, et al. The synthesis of TiO₂ nanoparticles using sulfuric acid method with the aid of ultrasound[J]. *Nanomaterials and Energy*, 2017, 6(2): 82–88.
- [18] 吴彭森. 硫酸法钛白的清洁生产与环保治理研究[J]. *皮革制作与环保科技*, 2021, 2(16): 9–10, 12.
- WU Pengsen. Study on cleaner production and environmental protection treatment of titanium dioxide by sulfuric acid process[J]. *Leather Manufacture and Environmental Technology*, 2021, 2(16): 9–10, 12.
- [19] 丁浩, 刘玉芹, 周红. 中国钛白粉生产环境效应及可持续发展[J]. *地学前缘*, 2014, 21(5): 294–301.
- DING Hao, LIU Yuqing, ZHOU Hong. The effect of resources and environment on titanium dioxide production and countermeasures for sustainable development in China. *Earth Science Frontiers*, 2014, 21(5): 294–301.
- [20] 焦婷婷. 硫酸法钛白生产企业废副产品污染解析与环境风险评估[D]. 济南: 山东大学, 2017.
- JIAO Tingting. Pollution analysis and environmental risk assessment of waste by-products of titanium dioxide production enterprises by sulfuric acid process[D]. Jinan: Shandong University, 2017.
- [21] 蒲灵, 田犀, 陈钢. 硫酸法金红石型钛白粉生产中重金属分布研究[J]. *无机盐工业*, 2011, 43(9): 52–54.
- PU Ling, TIAN Xi, CHEN Gang. Research on heavy metal distribution during production of rutile-type titanium white by sulfuric acid process[J]. *Inorganic Chemicals Industry*, 2011, 43(9): 52–54.
- [22] 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.
- TANG Zhenning. Production and environmental control of titanium dioxide[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2000.
- [23] 刘强. 氯化法钛白技术氧化反应器内流场的数值研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2017.
- LIU Qiang. Numerical study on flow field in oxidation reactor with chlorination titanium dioxide[D]. Shenyang: Northeastern University, 2017.

- [24] Fan Yang, Liangying Wen, Dong Yue, et al. Study on reaction behaviors and mechanisms of rutile TiO_2 with different carbon addition in fluidized chlorination[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2022, 18: 1205 - 1217.
- [25] 毕珊, 秦好丽. 负载型氮掺杂二氧化钛在流化床反应器中降解有机物的研究[J]. 广东化工, 2014, 41(11): 95 - 97.
BI Shan, QIN Haoli. Study on Degradation of organic pollutant with supported nitrogen-doped titania in the fluid bed reactor[J]. Guangdong Chemical Industry, 2014, 41(11): 95 - 97.
- [26] Liping Niu, Tingan Zhang, Peiyuan Ni, et al. Fluidized-bed chlorination thermodynamics and kinetics of Kenya natural rutile ore[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2013, 23(11): 3448 - 3455.
- [27] 杨平, 陈德明. 攀枝花钛渣组合式流化床氯化制备 TiCl_4 的研究[J]. 钢铁钒钛, 2007, 28(2): 48 - 52, 73.
YANG Ping, CHEN Deming. Preparing titanium tetrachloride by carbochlorinating panzhihua titanium slag with combined fluidized bed[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2007, 28(2): 48 - 52, 73.
- [28] A I Cardona, R Candal, SáNchez B, et al. TiO_2 on magnesium silicate monolith; effects of different preparation techniques on the photocatalytic oxidation of chlorinated hydrocarbons[J]. Energy, 2004, 29(5 - 6): 845 - 852.
- [29] H Bordbar, Yousefi A A, Abedini H. Production of titanium tetrachloride (TiCl_4) from titanium ores: a review[J]. Polyolefins Journal, 2017, 4(2): 149 - 173.
- [30] Guangchao Du, Zhuochen Li, Jianbo Zhang, et al. Chlorination behaviors for green and efficient vanadium recovery from tailing of refining crude titanium tetrachloride[J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, 420: 126501.
- [31] Pan Deng, Dachun Liu, Xiumin Chen, et al. Carbochlorination mechanism of low-grade titanium slag: Ab initio molecular dynamic simulation[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2022, 17: 459 - 466.
- [32] G F El Fawal, H S Hassan, M R El-Aassar et al. Electrospun polyvinyl alcohol nanofibers containing titanium dioxide for gas sensor applications[J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2019, 44(1): 251 - 257.
- [33] H Esteban Benito, T Del Ngel Sánchez, R García Alamilla, et al. Synthesis and physicochemical characterization of titanium oxide and sulfated titanium oxide obtained by thermal hydrolysis of titanium tetrachloride[J]. Brazilian Journal of Chemical Engineering, 2014, 31(3): 737 - 745.
- [34] H Yin, Y Wada, T Kitamura, et al. Hydrothermal synthesis of nanosized anatase and rutile TiO_2 using amorphous phase TiO_2 [J]. Journal of Materials Chemistry, 2001, 11(6): 1694 - 1703.
- [35] 黄俊, 李荣兴, 田林, 等. 氯化法钛白生产工艺中四氯化钛氧化微观反应机理研究进展[J]. 化工进展, 2018, 37(3): 8.
HUANG Jun, LI Rongxing, TIAN Lin, et al. Reserch progress of oxidation mechanism in the chloride process for titanium dioxide production[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2018, 37(3): 8.
- [36] 赵鑫. 基于 DCS 的钛白粉氯化生产控制系统设计[D]. 大连:大连理工大学, 2019.
ZHAO Xin. Design of DCS-based titanium chloride production control system[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019.
- [37] 王亚锋, 李俊峰, 张兵兵等. 氯化钛白氧化反应器防结疤技术现状及评价[J]. 河南科技, 2015(16): 124 - 126.
WANG Yafeng, LI Junfeng, ZHANG Bingbing, et al. Anti-scarring technical status and evaluation of titanium white oxidation reactor[J]. Journal of Henan Science and Technology, 2015(16): 124 - 126.
- [38] 杨绪壮, 袁章福, 王志, 等. 氯化法钛白氧化反应器的设计技术[J]. 化工设计, 2004, 14(1): 5 - 10.
YANG Xuzhuang, YUAN Zhangfu, WANG Zhi, et al. Design and enlargement of oxidation reactor for the production of titania with chlorination method[J]. Chemical Engineering Design, 2004, 14(1): 5 - 10.
- [39] O R Inderwildi, M Kraft. Adsorption, diffusion and desorption of chlorine on and from rutile $\text{TiO}_2(110)$: a theoretical investigation[J]. Chem Phys Chem, 2007, 8(3): 444 - 451.
- [40] Zhenguang Shi, Long Lin, Ruixin Chen, et al. Adsorption of CO molecules on anatase $\text{TiO}_2(001)$ loaded with noble metals M(M = Ir/Pd/Pt): A study from DFT calculations[J]. Materials Today Communications, 2021, 28: 102699.
- [41] Dong Wang, Zhipan Liu, Weimin Yang. Revealing the size effect of platinum cocatalyst for photocatalytic hydrogen evolution on TiO_2 support: a DFT study[J]. ACS Catalysis, 2018, 8(8): 7270 - 7278.
- [42] 崔文颖, 刘子忠, 蒋亚军, 等. TiO_2 表面吸附三氟乙酸的密度泛函理论研究[J]. 化学学报, 2012, 70(19): 2049 - 2058.
CUI Wenyong, LIU Zizhong, JIANG Yajun, et al. Study on trifluoroacetic acid adsorbed on TiO_2 surface with density functional theory[J]. Acta Chimica Sinica, 2012, 70(19): 2049 - 2058.
- [43] 翁景峥, 陈礼辉, 邱仁辉. 锐钛矿 $\text{TiO}_2(110)$ 表面吸附苯酚相互作用能的研究[J]. 材料导报: 纳米与新材料专辑, 2014, 28(2): 182 - 184.
WENG Jingzheng, CHEN Lihui, QIU Renhui. Study on the interaction energy of phenol adsorption on anatase $\text{TiO}_2(110)$ surface[J]. Materials Review, 2014, 28(2): 182 - 184.
- [44] H Kobayashi, S Higashimoto. DFT study on the reaction mechanisms behind the catalytic oxidation of benzyl alcohol into benzaldehyde by O_2 over anatase TiO_2 surfaces with hydroxyl groups: role of visible-light irradiation[J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2015, 170: 135 - 143.
- [45] 杨帆, 温良英, 赵岩, 等. $\text{TiO}_2(100)$ 表面 C 和 Cl_2 吸附反应的第一性原理计算[J]. 过程工程学报, 2020, 20(5): 569 -

575.
YANG Fan, WEN Liangying, ZHAO Yan, et al. Adsorption and reaction of both C and Cl₂ on TiO₂ (100) surface based on the first principles calculation [J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2020, 20(5): 569–575.
- [46] R Shirley, J Akroyd, L A Miller, et al. Theoretical insights into the surface growth of rutile TiO₂ [J]. Combustion & Flame, 2011, 158(10): 1868–1876.
- [47] R N Ghoshtagore. Mechanism of heterogeneous deposition of thin film rutile [J]. Journal of the Electrochemical Society, 1970, 117(4): 529–534.
- [48] 刘松翠, 吕康乐, 邓克俭, 等. 三种不同晶型二氧化钛的制备及光催化性能研究 [J]. 影像科学与光化学, 2008, 26(2): 138–147.
LIU Songcui, LV Kangle, DENG Keqing, et al. Preparation of three types of titanium dioxides with different crystallite and the photoreactivity [J]. Imaging Science and Photochemistry, 2008, 26(2): 138–147.
- [49] 李亚东. 氯化法生产钛白中氧化反应器内流体动力学的研究及建模 [D]. 昆明: 昆明理工大学, 2016.
LI Yadong. Study and modeling of fluid dynamics in oxidation reactor for titanium dioxide production by chloride process [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2016.
- [50] Yadong Li, Gang Xie, Ting Lei, et al. A CFD model for gas uniform distribution in turbulent flow for the production of titanium pigment in chloride process [J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2016, 24(6): 749–756.
- [51] 程易, 刘喆, 骆培成等. 氯化法钛白氧化反应器气体错流混合 [J]. 化工学报, 2006(12): 2840–2846.
CHENG Yi, LIU Zhe, LUO Peicheng, et al. Gas cross-flow mixing in TiO₂ oxidation reactor of chloride process [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering (China), 2006(12): 2840–2846.
- [52] M V Talpallikar, H Nelson. Modeling supersonic missile fin-body interference for preliminary design [J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 1990, 27(6): 571–576.
- [53] J Akroyd, A J Smith, R Shirley, et al. A coupled CFD-population balance approach for nanoparticle synthesis in turbulent reacting flows [J]. Chemical Engineering Science, 2011, 66(17): 3792–3805.
- [54] S E Pratsinis, P T Spicer. Competition between gas phase and surface oxidation of TiCl₄ during synthesis of TiO₂ particles [J]. Chemical Engineering Science, 1998, 53(10): 1861–1868.
- [55] R H West, M S Celnik, O R Inderwildi, et al. Toward a comprehensive model of the synthesis of TiO₂ particles from TiCl₄ [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2007, 46(19): 6147–6156.
- [56] 姚光辉, 胡黎明. 化学气相沉积 TiO₂ 超细颗粒过程的动力学研究 [J]. 过程工程学报, 1993(2): 130–135.
YAO Guanghui, HU Liming. Kinetic study on chemical vapor deposition of TiO₂ ultrafine particles [J]. Journal of Process Engineering, 1993(2): 130–135.
- [57] 李倩茹, 郝雄文, 张耀军, 等. 柠檬酸还原法制备金溶胶中反应物配比和加料顺序的影响 [J]. 中国科技论文, 2015, 10(12): 1455–1458, 1468.
LI Qianru, HAO Xiongwen, ZHANG Yaojun, et al. Influence of substrate molar ratio and feeding sequence on gold colloids by citrate-reduction method [J]. China Sciencepaper, 2015, 10(12): 1455–1458, 1468.
- [58] S E Pratsinis, H Bai, B Pratim, et al. Kinetics of Titanium (IV) Chloride Oxidation [J]. Journal of the American Ceramic Society, 2010, 73(7): 2158–2162.
- [59] 林发承. 四氯化钛氧化法钛白的粒度控制和氧化反应器参数选择 [J]. 过程工程学报, 1984(1): 46–55.
LIN Facheng. Particle size control and oxidation reactor parameter selection of titanium dioxide in titanium tetrachloride oxidation process [J]. Journal of Process Engineering, 1984(1): 46–55.
- [60] 张曙明. 氯化法钛白冷模实验研究 [J]. 涂料工业, 2000, 30(5): 20–21.
ZHANG Shuming. Cold analog experiment for chloride process TiO₂ production [J]. Paint & Coatings Industry, 2000, 30(5): 20–21.

Current situation and research progress of titanium dioxide by chlorination

XU Qian¹, TIAN Lin², YANG Qinghong¹, LU Ping³, LI Dongqin³, MIAO Qingdong³, YANG Ni⁴,
XIE Gang⁴, HOU Yanqing¹

(1. State Key Laboratory of Complex Nonferrous Metal Resources Clean Utilization, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China;

2. School of Energy and Environment Science, Yunnan Normal University, Kunming 650500, China;

3. State Key Laboratory of Vanadium and Titanium Resources Comprehensive Utilization, Pangang Group Research Institute Co. Ltd., Panzhihua 617000, China;

4. Kunming Metallurgical Research Institute, Kunming 650031, China)

Abstract: With the development of social industrialization, titanium dioxide is widely used in industrial production due to its excellent physical and chemical properties. For example, in the fields of pigments, medical, cosmetics,

semiconductors and aerospace technology. At present, the production technology of titanium dioxide mainly includes two methods; sulfuric acid method and chlorination method. Among them, the chlorination method is more in line with the double standard of economy and environmental protection. In the process of producing titanium dioxide by chlorination, the reaction between TiCl_4 and O_2 belongs to the millisecond extreme. Due to the fast reaction speed, it is difficult to study the reaction process from the experimental level. Therefore, the quantum chemical calculation method should be used to study its microscopic and high-speed reaction process, and the first-principles calculation method should be used to study the microscopic mechanism of the nucleation process of titanium dioxide, namely based on density functional theory (DFT). At present, the proportion of domestic production of titanium dioxide is low, the rapid mixing of reaction gas is difficult to control, the prevention technology of scarring has not been mastered, the production of titanium dioxide products and other countries in the world production of titanium dioxide also has a certain gap. In the future, domestic titanium dioxide production field needs to increase the research efforts, enhance the competitiveness of the international market.

Key words: titanium dioxide; chloride process titanium dioxide; sulfate process titanium dioxide; TiO_2 ; nucleation technique; the scarring of the reactor; rapid mixing technique

中国恩菲牵头承担的国家重点研发计划项目通过课题绩效评价

3月19日,由中国恩菲工程技术有限公司牵头承担的“十三五”国家重点研发计划“固废资源化”重点专项“复杂铅基多金属固废协同冶炼技术与大型化装备”项目(2019YFC1907300)召开课题绩效评价会,会议通过了该项目5个课题的绩效评价。中国恩菲党委书记、董事长刘诚出席会议。

评审专家组听取了“原生矿协同多形态铅基固废冶炼技术与大型化装备”“典型及大宗铅基固废协同熔炼技术与大型化装备”“含锌铅基固废还原熔炼-连续烟化技术及装备”“稀贵金属选择性分离提取及残余灰渣资源化技术”“协同熔炼过程自适应在线智能优化控制系统”等5个课题组的研究汇报,审阅了课题提交的绩效评价资料,对各课题研究内容、研究成果、课题之间的协作等进行了广泛深入的质询,并一致认为,各个课题完成了任务书规定的研究内容和考核指标,同意通过课题绩效评价。

“复杂铅基多金属固废协同冶炼技术与大型化装备”项目由中国恩菲联合中国科学院过程工程研究所、中南大学、东北大学、兰州大学、浙江大学、河南豫光金铅股份有限公司、河南金利金铅集团有限公司、白银有色集团股份有限公司等单位产学研联合研发,以铅基固废对生态环境的重大影响作为立项背景,针对不同分布特征的铅基固废处理难题,以富氧强化熔池熔炼为核心,解决铅基固废规模化 and 效率问题。该项目5个课题形成了3套理论体系,攻克了6项关键技术,研发了3套核心装备,完成了3个示范工程建设,对产业发展具有重要意义。该项目研究成果将全面引领提升我国固废资源化科技支撑与保障能力,促进壮大资源循环利用产业规模,大幅度提高资源利用效率,对支撑生态文明建设具有重要意义。

中国恩菲有关部门负责人及相关人员,该项目参加单位代表和骨干等共计40余人参加会议。

(资料来源:中国恩菲)