

钒钛分离与提取

偏钛酸性质结构对颜料钛白的影响

田从学

(攀枝花学院, 四川 攀枝花 617000)

摘 要: 硫酸法钛白短流程工艺中, 水解偏钛酸的性质结构(晶体结构、粒度分布、杂质含量等)对金红石型钛白的结构与颜料性能有重要影响, 并存在内在影响规律。为制备结构良好、颜料性能优异的金红石 TiO_2 , 优化条件为: 控制偏钛酸的晶粒尺寸小于 8.9 nm 并接近 7.9 nm , 能有效促进金红石的晶型转变和晶粒生长, 获得良好晶体结构和晶型完整金红石; 偏钛酸适宜的粒度大小及分布对获得窄粒径分布的金红石钛白影响明显, 钛白的粒径大小影响其散射力, 宜控制在 $0.20 \mu\text{m}$ 附近; 可控制水解条件以减小偏钛酸的比表面积, 进而减少杂质铁吸附。

关键词: 钛白; 偏钛酸; 晶体结构; 粒度分布; 颜料性能

中图分类号: TF823, TQ621

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2019)01-0001-06

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2019.01.001

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



听语音
与作者互动
聊科研

Effects of Properties and Structure of Metatitanic Acid on Rutile White Pigment via Short Sulfate Process

Tian Congxue

(Panzhihua University, Panzhihua 617000, Sichuan, China)

Abstract: The properties and structure of metatitanic acid, such as crystal structure, particle size distribution and impurity iron's content, have great effects on the structure and pigment properties of rutile titanium dioxide, and there exists inherent relationship between them. The rutile TiO_2 white pigment was produced via short sulfate process by using unenriched low concentration industrial titanyl sulfate solution as titanium source. In order to produce rutile TiO_2 with good structure and excellent pigment properties, the optimal conditions are as following. Controlling the grain size of metatitanic acid less than 8.9 nm and about 7.9 nm can effectively promote the crystal transformation and grain growth of the rutile pigment, and obtain rutile pigment with good and integrated crystal structure. The appropriate particle size distribution of metatitanic acid has an obvious effect on rutile titanium dioxide with narrow particle size distribution, and rutile pigment of near $0.20 \mu\text{m}$ in the particle size can obtain higher relative scattering force. The hydrolysis conditions should be controlled to reduce the specific surface area of metatitanic acid, aiming at reduction of the iron impurity adsorption.

Key words: metatitanic acid, crystal structure, particle size distribution, titanium dioxide, pigment properties

0 引言

材料的组成结构取决于材料制备工艺及其控制

条件,而前者又决定了材料的性能及其应用领域,三者间存在内在联系。二氧化钛作为全球第三大无机化学品,因折射率高、光学性能好、化学惰性等优

收稿日期: 2018-12-03

基金项目: 国家自然科学基金(50804025), 四川省科技计划项目(2014JY0197), 攀枝花市科技计划项目(2017CY-G-20, 2018CY-G-16), 省、市级人才培养项目。

通讯作者: 田从学(1973—), 男, 四川广汉人, 博士(后), 教授, 长期从事钛白制备研究等工作。E-mail: 515884764@qq.com。

异特性,已成为使用最广泛的白色颜料,广泛用于涂料、塑料、油漆、造纸、化妆品、食品等领域,并向化学催化、电子材料、电池材料等应用领域拓展^[1-3]。二氧化钛颜料的工业生产方法主要有硫酸法和氯化法,2017 年全球钛白产能达 741 万 t,其中氯化法工艺占 60%;我国主要以硫酸法工艺为主,2017 年我国钛白产能 355 万 t,产量 287 万 t,硫酸法工艺占 94.7%,国内仅有 5 家企业采用氯化法工艺。水解是硫酸法钛白工艺的最核心关键步骤之一,水解过程经历复杂的物理化学过程,水解产物(水合二氧化钛,偏钛酸)的质量将最终决定钛白产物的结构与性能。钛液水解过程经历复杂的反应,水解离子通过羟桥、氧桥等聚合反应生成水解晶核,水解晶核进一步生长、聚集、凝聚形成最终的水解偏钛酸产物^[4]。目前普遍认为,偏钛酸是胶态的水合 TiO_2 粒子逐步生长、聚集,并最终形成尺寸在 $10 \sim 200 \mu\text{m}$ 的二次聚集沉淀粒子^[5-7]。硫酸氧钛液水解过程中,钛液的组成和水解工艺参数等对水解产物和钛白的影响已被广泛研究^[7-14],但对水解产物偏钛酸的组成结构等对钛白颜料性能方面的研究相对较少。文献^[5]通过采用不同波长的激光辐射测定水解产物,研究了球形单分散锐钛型构晶的二氧化钛水合物的均相成核和生长过程。Zhao 等用超声技术对偏钛酸浆料进行洗涤前预处理,表明超声波对偏钛酸中铁杂质的去除效果较好,洗涤节水效果明显,而 TiO_2 的晶格参数对金红石类型和产品质量没有影响^[14]。Ohenoja 等研究了搅拌介质球磨工艺参数和应力能对 TiO_2 颜料粒度分布的影响,确定出优化的湿式搅拌介质细磨条件参数,表明粒度对颜料性能有着重要影响^[17]。 TiO_2 粒度大小及分布对光谱反射率及颜色坐标有着重要影响,文献^[8]中建立模型来研究了粒度对多分散 TiO_2 颜料涂层美感和热的影响规律,对硫酸钛溶液中偏钛酸颗粒的析出和生长行为也进行了相关研究。水解温度是影响偏钛酸粒度的最主要因素,偏钛酸粒子在制备过程中容易聚集,可用经验表达式来描述^[19]。笔者提出的硫酸法钛白短流程工艺,以未浓缩的低浓度工业钛液为原料制备锐钛型钛白颜料,对传统硫酸法钛白工艺的技术革新起到极好推动与促进作用^[20]。

水解偏钛酸的组成、结构、粒子尺寸及分布等产物 TiO_2 的组成结构有着重要影响,进而影响其颜料性能。采用未浓缩的低浓度工业钛液为原料,制备偏钛酸和金红石型 TiO_2 ,考察偏钛酸的组成结构对

颜料钛白的影响有着重要意义。

1 试验部分

采用低浓度工业硫酸钛液(总钛浓度 $155 \sim 180 \text{ g/L}$,以 TiO_2 计)为原料,通过自生晶种热水解工艺制备金红石型颜料钛白,水解参照文献^[20]进行。水解所得产物(偏钛酸)经洗涤、漂白、过滤后,加去离子水打浆,搅拌均匀后进行盐处理(ZnO 0.26%, K_2O 0.50%, P_2O_5 0.11%),之后将盐处理样品置于马弗炉中进行煅烧,煅烧按三段式升温 and 保温制度进行,条件为:室温匀速升温 60 min 至 420°C 并保温 30 min, 420°C 匀速升温 60 min 至 780°C 并保温 60 min, 780°C 匀速升温 120 min 至 870°C 并保温 35 min。煅烧产物自然冷至室温后,用三头研磨机磨细,即得金红石 TiO_2 的颜料粗品。

采用 X 射线衍射仪(荷兰 PANalytical, X' Pert3 Powder)测定样品晶体结构,并计算晶粒尺寸(偏钛酸(101)晶面和金红石(110)晶面)与煅烧产物的金红石含量。采用粒度分布测试仪(英国 Marvern, Mastersizer 3000)进行粒度测试。偏钛酸的比表面积测定在比表面与孔径分布仪(中国贝士德, 3H-2000PS1)上进行,通过测定样品的 N_2 吸附-脱附曲线,按气体吸附 BET 多点法计算偏钛酸的 S_{BET} 。金红石样品的形貌采用扫描电镜(日本 JEOL 公司, JSM-6700F)观察。钛白粉的颜料性能测定参照相关标准,以日本 R930 作参照样,在超高精度分光测色仪(美国 Hunter, LabScan EX)上测定样品的消色力 TCS 、蓝相 SCX 、亮度 $Jasn$ 、相对散射力 Rs 等指标。

2 结果与讨论

2.1 晶体结构

水解产物偏钛酸(水合二氧化钛)的结构对颜料钛白的晶体结构存在较大影响,并将最终影响钛白的颜料性能。不同批次水解所得的偏钛酸分别依次记为 A、B、C、D、E,其 XRD 图谱如图 1 所示,经盐处理煅烧后所得的金红石型钛白样品依次记为 A1、B1、C1、D1、E1,其 XRD 图谱如图 2 所示。由 XRD 衍射图谱计算所得的偏钛酸(101)晶面和金红石 TiO_2 的(110)晶面的晶粒尺寸及煅烧粗品金红石含量 X_R ,测定煅烧金红石 TiO_2 粗品的颜料性能均列于表 1 中。

在硫酸法钛白工艺水解体系中,由于大量硫

酸根的存在,水解产生的水合二氧化钛将键合少量硫酸根,形成具有锐钛相 TiO_2 的构晶结构,但 TiO_2 的大部分是以无定形 $\text{H}_2\text{TiO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 的形式存在。由衍射图谱可见,偏钛酸的 XRD 谱图(图 1)与锐钛型 TiO_2 标准图谱(JCPDS 21-1272)一致,无其他杂相峰出现,表明样品中仅有锐钛相的 TiO_2 构晶粒子存在,无其他构晶相。所有偏钛酸的衍射峰强度均较低,峰形宽且平坦,表明锐钛相 TiO_2 的结晶度低,由谢乐公式计算得(101)晶面的晶粒尺寸在 7.10~8.42 nm 范围。偏钛酸经盐处理、煅烧处理后,转变为金红石结构 TiO_2 ,与金红石型 TiO_2 标准图谱(JCPDS 21-1276)一致,由衍射图谱计算金红石含量 X_R 在 98.5%~99.9%,金红石含量 X_R 随着偏钛酸的晶粒尺寸 $L_{(101)}$ 的减小而逐步增大(如表 1 所列),二者满足负线性相关关系,如式(1)所示。

$$X_R = 107.42 - 1.06 \times L_{(101)}, R = 0.9998 \quad (1)$$

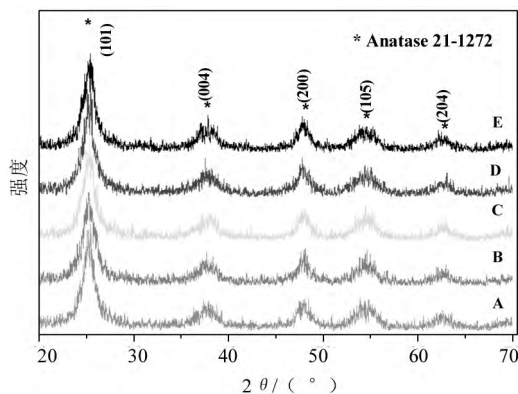


图 1 偏钛酸的 XRD 谱图

Fig.1 XRD patterns of metatitanic acid

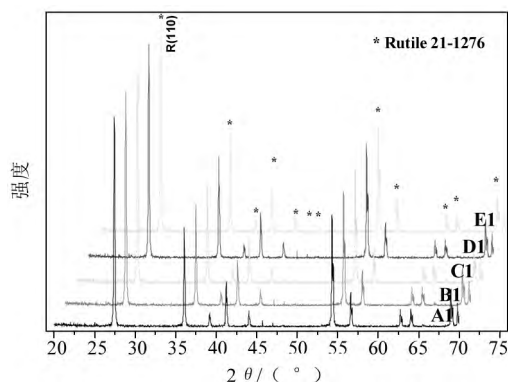


图 2 金红石钛白的 XRD 谱图

Fig.2 XRD patterns of rutile TiO_2 pigment

当偏钛酸的晶粒尺寸较小时,易于在煅烧过程中通过原子间的表面扩散转变为金红石构晶 TiO_2 ,相同条件下所需晶型转变的煅烧条件与强度要低一些。为满足一般金红石型钛白对金红石含量的要求($X_R \geq 98\%$),水解偏钛酸的晶粒尺寸宜控制在 8.89 nm 以下。而当偏钛酸晶粒尺寸过小、胶体特性较显著时,煅烧过程中易导致粒子烧结,进而恶化钛白的颜料性能。

煅烧产物的金红石晶粒尺寸 $L_{(110)}$ 与偏钛酸的晶粒尺寸 $L_{(101)}$ 的数学关系如下:

$$L_{(110)} = 338.79 - 25.28 \times L_{(101)}, R = 0.9943 \quad (2)$$

二者呈负相关线性关系。由式(2)可见,随着偏钛酸晶粒尺寸减小,因其具有较高的表面能,在煅烧过程中易于向金红石构晶转变并促进转晶过程的原子扩散,使金红石 TiO_2 的转晶及晶粒生长变得容易一些,易获得较大晶粒。而当偏钛酸晶粒尺寸过小时,则易造成样品烧结。

表 1 偏钛酸晶粒尺寸与颜料钛白性能关系

Table 1 Relationship between crystal grain size of metatitanic acid and pigment properties of rutile TiO_2 pigment

Metatitanic Acid	$L_{(101)}$ /nm	Rutile TiO_2	X_R /%	$L_{(110)}$ /nm	TCS	SCX	Jasn
A	8.42	A1	98.5	124.2	1 780	2.25	94.54
B	8.14	B1	98.8	134.1	1 820	2.56	94.86
C	7.83	C1	99.1	142.4	1 840	3.18	95.17
D	7.57	D1	99.4	147.6	1 810	2.64	94.93
E	7.10	E1	99.9	158.3	1 700	2.19	94.68
R930		R930			1910	3.12	94.52

金红石钛白的颜料性能主要取决于二氧化钛粉体的晶体结构、粒度大小及其分布等因素。金红石煅烧粗品的消色力(TCS)在 1 700~1 840 范围,由于未进行包膜后处理,TCS 均较参照样 R930(已包膜)偏低一些。

随着偏钛酸晶粒尺寸逐步减小,样品的消色力呈先增大后减小的变化趋势,TCS 与 $L_{(101)}$ 的数学关系为:

$$TCS = -11415.26 + 3354.25 \times L_{(101)} - 212.26 \times L_{(101)}^2, R^2 = 0.9959 \quad (3)$$

TCS 与 $L_{(101)}$ 呈二次线性关系,拟合度高。对方程(3)求导, TCS 极值时对应的偏钛酸晶粒尺寸为 7.90 nm,此时对应的 TCS 最大值为 1 836.2(约合 1 840)。偏钛酸结构决定了金红石钛白的颜料性能,通过调控水解时的晶种数量、质量与水解时间等可控制水解偏钛酸的晶粒尺寸在适宜范围,这能有效提升产物的颜料性能。在其他条件确定时,也可依据偏钛酸晶粒尺寸对煅烧产物的颜料性能进行大致预测。

煅烧产物金红石 TiO_2 的蓝相(SCX)也呈与 TCS 类似的变化趋势,逐步由 2.25 增大至 3.18,后又逐渐减小至 2.19。当偏钛酸的晶粒尺寸偏大或偏小时,对煅烧过程中金红石转晶及晶粒生长都不利,由于金红石晶粒的转晶和生长不一致,易造成颗粒生长不均匀,使其耐烧性降低,发生烧结,最终使 SCX 降低。煅烧产物的亮度($Jasn$)均高于参照样 R930(94.52),亮度指标好,其变化也呈现与 TCS 相同的变化趋势,先增大至 95.17 后又逐步减小。偏

钛酸适宜的晶粒尺寸有利于获得良好晶体结构的金红石 TiO_2 。

适宜的偏钛酸晶体结构及晶粒尺寸有助于促进煅烧过程中二氧化钛构晶离子向金红石 TiO_2 的晶型转变和晶粒生长,得到适宜尺寸的金红石 TiO_2 ,晶体结构的完整性保证了产物高的折射率,且不易发生烧结,这样可得到适宜粒度大小与分布的金红石 TiO_2 粒子,有助于提高产物的颜料性能。

2.2 粒度分布及杂质含量

钛白粉粒子的粒度大小及其分布对其颜料性能也有着重要影响。因钛白的消色力指标与产物的光散射系数 S 和光吸收系数 K 有关,当 S 值越大、 K 值越小时,钛白粉的消色力、遮盖力和白度就越好^[2]。一般在可见光范围内,为提高 S 值,颜料颗粒的粒径宜控制在 0.15~0.35 μm 范围,且尽量提高 0.2 μm 左右钛白粒子的数量与含量。煅烧产物二氧化钛的平均粒径(D_{AV})、颗粒多分散度(Pdi)及相对散射力(Relative Scattering force, R_s)的测定结果列于表 2 中。

表 2 偏钛酸粒度分布及杂质含量对钛白的影响

Table 2 Effect of particle size distribution and impurity content of metatitanic acid on rutile TiO_2 pigment

Metatitanic Acid	D_{AV} /nm	Pdi	S_{BET} /($m^2 \cdot g^{-1}$)	w_{Fe} / %	Rutile TiO_2	D_{AV} / nm	Pdi	w / % (0.15~0.30 μm)	R_s / %
A	1 130	0.433	275	0.004 2	A1	339	0.362	66.8	97.8
B	976	0.341	256	0.002 2	B1	307	0.265	71.4	98.4
C	782	0.132	243	0.001 2	C1	238	0.107	78.2	99.2
D	887	0.369	267	0.003 4	D1	321	0.303	69.7	97.9
E	1 029	0.475	282	0.005 2	E1	372	0.387	64.1	97.1
R930					R930				100

偏钛酸的平均粒径分布在 0.782~1.130 μm 范围内,而 Pdi 值是表征粉体粒径分布宽窄的指标,其值越小表明颗粒的粒度分布越窄,偏钛酸对应的 Pdi 值在 0.132~0.475,其中样品 C 具有最窄的粒径分布。煅烧粗品金红石二氧化钛的平均粒径分布在 0.238~0.372 μm ,其 Pdi 值在 0.107~0.387,其中样品 C1 具有最窄的粒径分布。由表 2 可见,较小 Pdi 值的偏钛酸所制得的钛白的 Pdi 值也小,表明窄的偏钛酸粒径分布有利于获得粒径分布窄的二氧化钛粉体。偏钛酸与二氧化钛的 Pdi 值满足如下数学关系:

$$Pdi_{TiO_2} = -0.005\ 54 + 0.829\ 55 \times Pdi_{MA}, R = 0.997\ 5 \quad (4)$$

由式(4)可见,二者的 Pdi 呈正线性相关关系。窄的偏钛酸粒径分布有利于维持在煅烧过程中金红石二氧化钛的晶型转变和晶粒生长在适宜均匀范

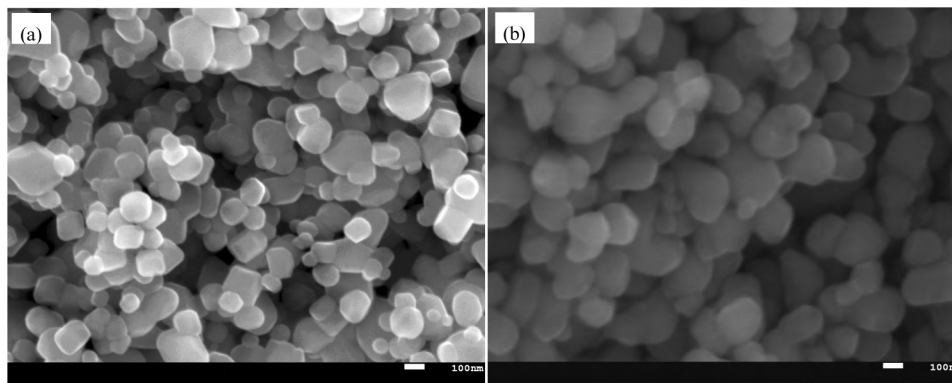
围。当偏钛酸粒径分布较窄时,在煅烧过程中因粒子大小较为均匀,无定形或锐钛相二氧化钛在晶型转变和晶粒生长时的活性位性质、组成等较接近,通过粒子表面的原子扩散及构晶生长等进行得较为均匀,所得煅烧粒子的粒度分布均匀,粒径分布窄,可有效提高产物的消色力等颜料性能指标。而当偏钛酸粒径分布变宽时,因煅烧时扩散过程及晶粒生长等不一致影响,使得煅烧产物的粒径分布变宽,最终恶化产品的颜料性能。在适宜粒径范围内,钛白粒子的粒度分布在 0.15~0.30 μm 范围各自所占的质量比如表 2 所列,这进一步证明:粒度分布范围窄时,落在该粒径范围的粒子所占质量比越高,对应的颜料性能也越好。相对散射力(R_s)与金红石 TiO_2 的平均粒径(D_{AV, TiO_2})关系如下:

$$R_s = 102.96 - 0.015\ 47 \times D_{AV, TiO_2}, R = 0.985\ 7 \quad (5)$$

R_s 与 D_{AV, TiO_2} 呈负线性相关关系。为提升产物的散射力, 由式(5) 计算得知, 须控制产物的粒径在 $0.20\ \mu\text{m}$ 附近, 并尽量维持产物在较窄的粒径分布范围, 这样所得金红石 TiO_2 的颜料性能也优良。

从煅烧产物 A1、C1 的 SEM 照片(图 3) 可见, 偏

钛酸的粒径越大, 粒径分布越宽, 所得二氧化钛产物的粒子分布也宽, 这将降低产物的颜料性能。适宜的偏钛酸粒径大小及窄的粒径分布有利于获得粒径分布窄且均一的钛白粒子, 有利于提升钛白的颜料性能。



(a) A1

(b) C1

图 3 金红石钛白的 SEM 照片

Fig.3 SEM of rutile TiO_2 pigment

因水解偏钛酸的晶粒尺寸与聚集颗粒小, 比表面积大, 且带胶体性质, 其表面易吸附杂质离子而随产品带出, 有色杂质离子的吸附量是影响钛白结构及颜料性能的关键因素之一, 控制杂质吸附量在适宜范围对提高颜料钛白性能有着重要意义。硫酸法钛白工艺中的主要有色杂质是铁, 当其含量超过限量时, 将导致样品偏黄、过烧, 并将严重影响钛白的颜料性能。比表面积大小是影响吸附杂质离子量的关键因素。从表 2 可见, 随着偏钛酸比表面积的增加, 铁离子含量逐步增大。杂质铁的吸附量($\%Fe$)与偏钛酸的比表面积(S_{BET}) 关系如下:

$$\%Fe = -0.023\ 71 + 1.018\ 39 \times 10^{-4} \times S_{BET}, R = 0.994\ 8 \quad (6)$$

杂质铁吸附量与偏钛酸比表面积呈正线性相关关系。为控制水解偏钛酸杂质铁的吸附量, 应尽量使所制偏钛酸的比表面积小一些。偏钛酸比表面积的大小与水解条件和控制参数有关, 当水解条件控制较好, 水解反应能较为均一进行, 析出的偏钛酸粒子较为均匀, 粒度分布较窄, 形成二次聚集体的比表面积则相对较小, 同时, 提供温度和延长水解时间也将减弱偏钛酸的胶体性质, 减小比表面积, 进而减少杂质吸附量, 提高所制钛白的颜料性能。此外, 粒度分布窄、比表面积小的偏钛

酸对减少后续洗涤水耗量、缩短洗涤时间、降低洗涤强度等也具有重要意义。

3 结论

以未浓缩低浓度的工业硫酸钛液为原料, 采用硫酸法钛白短流程的自生晶种热水解工艺制备金红石型颜料钛白时, 水解偏钛酸的晶体结构、粒度大小与分布、杂质含量等对金红石颜料钛白的晶体结构、颜料性能及粒径分布等有着重要影响, 并存在内在影响规律。适宜的水解偏钛酸晶粒尺寸与结构有助于促进金红石的晶型转变与晶粒生长, 它与金红石 TiO_2 的含量、晶粒尺寸及颜料性能存在相关关系, 宜控制偏钛酸的晶粒尺寸小于 $8.9\ \text{nm}$ 并接近 $7.9\ \text{nm}$, 可获得良好晶体结构和完整晶型的金红石 TiO_2 , 减少粒子的烧结, 提升产物的颜料性能。偏钛酸适宜的粒径大小及粒度分布对钛白粒子的粒度分布和颗粒多分散度影响明显, 并影响其相对散色力大小, 杂质铁吸附量受偏钛酸比表面积影响较大, 并存在相关影响关系。宜控制产物粒径尽量多分布在 $0.20\ \mu\text{m}$ 附近, 并使偏钛酸的粒度分布窄、杂质含量低, 可制备出结构良好、形貌规整、颜料性能优异的金红石 TiO_2 颜料。

参考文献

- [1] Buxbaum G, Pfaff G. Industrial inorganic pigments [M]. Wiley: Weinheim, 2005.
- [2] Jalava J P. The use of an exact light-scattering theory for spheroidal TiO_2 pigment particles [J]. Part Part Syst Char, 2006, 23: 159–164.
- [3] Wang Y, Li J, Wang L, et al. Preparation of rutile titanium dioxide white pigment via doping and calcination of metatitanate acid obtained by the NaOH molten salt method [J]. Ind Eng Chem Res, 2010, 49: 7693–7696.
- [4] Santacesaria E, Tonello M, Storti G, et al. Kinetics of titanium dioxide precipitation by thermal hydrolysis [J]. J Colloid Interf Sci, 1986, 111: 44–53.
- [5] Braun J. Titanium dioxide: A review [J]. J Coat Technol, 1997, 69: 59–72.
- [6] Przepiera A, Jablonski M, Wisniewski M. Study of kinetics of reaction of titanium raw materials with sulphuric acid [J]. J Therm Anal, 1993, 40: 1341–1345.
- [7] Tian C X. Internal influences of hydrolysis conditions on rutile TiO_2 pigment production via short sulfate process [J]. Mater Res Bull, 2018, 103: 83–88.
- [8] Grzmil B, Grela D, Kic B. Studies on the hydrolysis process of titanium sulfate compounds [J]. Pol J Chem Technol, 2006, 8: 19–21.
- [9] Sathyamoorthy S, Hounslob M J, Moggridge G D. Influence of stirrer speed on the precipitation of anatase particles from titanyl sulphate solution [J]. J Cryst Growth, 2001, 223: 225–234.
- [10] Grzmil B, Grela D, Kic B. Hydrolysis of titanium sulphate compounds [J]. Chem Pap, 2008, 63: 18–25.
- [11] Szilagyi I, Konigsberger E, May P M. Characterization of chemical speciation of titanyl sulfate solutions for production of titanium dioxide precipitates [J]. Inorg Chem, 2009, 48: 2200–2204.
- [12] Becker H, Klein E, Rechmann H. The growth of TiO_2 hydrate during hydrolysis of $\text{Ti}(\text{SO}_4)_2$ solutions [J]. Chem Eng J, 1964, 70: 779–787.
- [13] Grzmil B, Grela D, Kic B. Effects of processing parameters on hydrolysis of TiOSO_4 [J]. Pol J Chem Technol, 2009, 11: 15–21.
- [14] Grzmil B, Grela D, Kic B. Formation of hydrated titanium dioxide from seeded titanyl sulphate solution [J]. Chem Pap, 2009, 63: 217–225.
- [15] Urakaev F K, Bazarov L S, Meshcheryakov I N, et al. Kinetics of homogeneous nucleation of monodispersed spherical sulfur and anatase particles in water-acid systems [J]. Colloid J, 1999, 61: 647–654.
- [16] Zhao G, Liu W, Yang S Q, et al. Use of ultrasound in the washing process of titania pigment production: Water saving and process optimization [J]. Chem Eng Commun, 2016, 203: 1207–1215.
- [17] Ohenoja K, Illikainen M, Niinimäki J. Effect of operational parameters and stress energies on the particle size distribution of TiO_2 pigment in stirred media milling [J]. Powder Technol, 2013, 234: 91–96.
- [18] Baneshim M, Gonome H, Komiya A, et al. The effect of particles size distribution on aesthetic and thermal performances of polydisperse TiO_2 pigmented coatings: Comparison between numerical and experimental results [J]. J Quant Spectrosc RA, 2012, 113: 594–606.
- [19] Zhang W, Ou C R, Yuan Z G. Precipitation and growth behaviour of metatitanic acid particles from titanium sulfate solution [J]. Powder Technol, 2017, 315: 31–36.
- [20] Tian C X, Huang S H, Yang Y. Anatase TiO_2 white pigment production from unenriched industrial titanyl sulfate solution via short sulfate process [J]. Dyes Pigments, 2013, 96: 609–613.
- [21] Chen H L, Wang Y R, Shi J. Preparation of monodispersed superfine titanium dioxide particles and size control [J]. Acta Phys-Chim Sin, 2001, 17: 713–717.

编辑 杨冬梅

冶金工业类中文核心期刊(第八版)名录

1. 钢铁; 2. 钢铁研究学报; 3. 稀有金属; 4. 有色金属·冶炼部分; 5. 中国冶金; 6. 中国稀土学报; 7. 钢铁钒钛; 8. 炼钢; 9. 炼铁; 10. 湿法冶金; 11. 贵金属; 12. 烧结球团; 13. 粉末冶金工业; 14. 轻金属; 15. 有色金属工程; 16. 粉末冶金材料科学与工程; 17. 粉末冶金技术; 18. 稀土; 19. 材料与冶金学报; 20. 稀有金属与硬质合成; 21. 特殊钢; 22. 冶金分析。