

理化检验

激光诱导荧光技术在氯化法钛白氧化炉混合效果分析中的应用

孙洪涛¹,倪小敏²,王 玥¹,解为清¹,杨国强¹

(1. 东华工程科技股份有限公司, 安徽 合肥 230024; 2. 中国科学技术大学, 火灾科学国家重点实验室, 安徽 合肥 230027)

摘 要:氯化法生产钛白是现今国际上钛白工业的主流生产技术,而氧化反应器的结构设计是氯化法生产钛白的一项关键技术。 TiCl_4 和 O_2 的混合情况对于钛白粉的颗粒粒径及分布、颗粒晶型等产品性能有决定性作用,进而影响到产品的质量。因此,掌握不同工况条件下两种物料气流混合效果,对于氧化反应器的设计以及实际操作参数的优化具有重要意义。然而,现有的研究工作表明,传统的测量技术难以适应复杂流场的高速、非稳定等特性,迫切需要高精度的现代诊断技术。该研究从试验方法上进行了创新,采用无扰动非接触的激光诱导荧光技术(LIF)测量了不同工况下模拟反应器内不同位置处的气体浓度分布,研究了两股气体在不同结构氧化炉及不同物料比下的混合效果及其变化规律,找出了影响混合效果的关键因素。该研究为氧化炉的结构设计和操作工艺条件的控制提供必要的参考,为相关理论模型和数值仿真提供重要的试验参数,对于促进我国钛白生产工艺的发展具有重要的科学意义和实际意义。

关键词:钛白粉;氯化法;氧化反应器;气流混合;激光诱导荧光技术

中图分类号:TF823 文献标志码:A 文章编号:1004-7638(2021)05-0084-08

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2021.05.014

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



听语音
与作者
聊科研

Application of laser induced fluorescence technology in mixing effect analysis of oxidation furnace at titanium dioxide via chloride process

Sun Hongtao¹, Ni Xiaomin², Wang Yue¹, Xie Weiqing¹, Yang Guoqiang¹

(1. East China Engineering Science and Technology Co., Ltd., Hefei 230024, Anhui, China; 2. State Key Laboratory of Fire Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, Anhui, China)

Abstract: Titanium dioxide (TiO_2) through chloride process is the mainstream production technology of titanium dioxide industry in the world nowadays, and the structure design of oxidation reactor is a key technology for the production of titanium dioxide by chlorination. The mixture of TiCl_4 and O_2 plays a decisive role in the properties of TiO_2 , such as particle size, distribution and crystal shape, and then affects the quality of the product. Therefore, it is of great significance to monitor the mixing effect of two kinds of material airflow under different working conditions for the design of oxidation reactor and the optimization of practical operation parameters. However, the existing research shows that the traditional measurement technology is difficult to adapt to the characteristics of high speed and instability of complex flow field, so the modern diagnosis technology with high precision is urgently needed. Herein, using the undisturbed non-contact laser induced fluorescence (LIF) the gas concentration distribution in

收稿日期:2021-06-06

作者简介:孙洪涛(1980—),男,安徽亳州人,本科,注册化工工程师,主要从事化工方向研究。E-mail: sunhongtao@chinaecc.com。

different location of the reactor was measured by simulation under different working condition. The mixing effect and its variation law of the two gases in different oxidation furnace structure and different materials were studied, and the key factors influencing the mixing effect were found out. This study provides necessary reference for the structure design of the oxidation furnace and the control of the operation process conditions, as well as important experimental parameters for the relevant theoretical model and numerical simulation. It shows important scientific and practical significance to promote the development of TiO_2 production process in China.

Key words: titanium dioxide, chlorination method, oxidation reactor, air mixing, laser induced fluorescence (LIF)

0 引言

钛白粉(二氧化钛)是一种重要的化工产品,广泛应用于涂料、塑料、橡胶、油墨、冶金、日化、医药、化妆品等多个行业。目前工业上生产钛白粉的方法主要有硫酸法和氯化法。硫酸法生产设备简单,对钛矿品位要求不高,原料低廉,但操作复杂,流程长,环境污染严重,资源综合利用低。氯化法技术先进,工艺连续,流程短,工序少,过程简单,产品质量好,综合能耗低,污染小,是现今国际上钛白工业的主流生产技术。

氧化反应器是氯化法制取钛白粉的核心设备。 TiCl_4 和 O_2 的气相氧化反应是在氧化反应器中湍流情况下进行的,其混合情况关系到原料和能量的利用程度,对于钛白粉的颗粒粒径及分布、颗粒晶型等产品性能有决定性作用,并最终影响产品的质量。而氧化反应器的结构参数会对反应器内的物料混合状态造成显著影响,气体分布装置的结构决定各气体的入口位置和角度,进而影响到气流的初始混合状态。因此,氧化反应器的结构设计是氯化法生产钛白的一项关键技术。

在工业实际生产中,对氧化反应器中物料 TiCl_4 和 O_2 混合过程的控制主要体现在两个方面,一方面是对氧化反应器结构的设计和改进,如分布器整流环结构的设计,另一方面是加料环内径、环缝尺寸或者射流孔直径、孔数及射流孔间距等的改进,进而优化调整操作参数,找到合理的动量通量比和射流穿透深度等影响流场的关键参数。因此,掌握在不同工况条件下两种物料气流混合效果,对于氧化反应器的设计以及实际操作参数的优化具有重要意义。

然而,现有的研究工作^[1-10]表明,传统的测量技术难以适应复杂流场的高速、非稳定等特性,迫切需要高精度的现代诊断技术。笔者所在的项目团队

从试验方法上进行了创新,采用无扰动非接触的激光诱导荧光技术(Laser induced fluorescence, LIF),配合高速摄像机测量了不同工况下模拟反应器内不同位置处的气体浓度分布,对两股气体在不同结构氧化炉及不同物料比下的混合效果及其变化规律进行了研究,探寻了影响混合效果的关键因素。

目前,国际上尚未见有相关报道。该研究结果可以为氧化炉的结构设计和操作工艺条件的控制提供必要的参考,为相关理论模型和数值仿真提供重要的试验参数,对于促进我国钛白生产工艺的发展,具有重要的科学意义和实际意义。

1 基于示踪激光诱导荧光的浓度分布测量技术简介

1.1 LIF 技术原理

激光诱导荧光(LIF: Laser Induce Fluorescence)是原子或分子受激光激发后所发生的自发辐射现象。利用流场中某些物质在激光激发下所产生荧光的特性来显示并测量流场参数的技术即为LIF技术,而这些被激发的物质就称为荧光粒子。如果使激发光源由点光源变为片状激光,就可以对流场中的相关特性进行二维成像,此时该技术就称为平面激光诱导荧光(PLIF, Planar Laser Induce Fluorescence)技术。

PLIF 技术流场诊断如图1所示。该系统主要包括激光器系统、片光形成系统、探测系统、控制系统等四个部分。激光器系统用于产生实验所需的特定波长激发光源,片光形成系统用固定高度的片状光源,控制系统用于控制各个试验组成部分的时间延迟,探测系统用于对流场产生的荧光信号进行探测。

由荧光强度的表达式可知,荧光强度与激光能量、荧光粒子荧光效率、吸收截面及荧光粒子浓度

等因素相关。在其他因素不变的条件下,对同一种荧光粒子,其荧光强度与其浓度成正比。

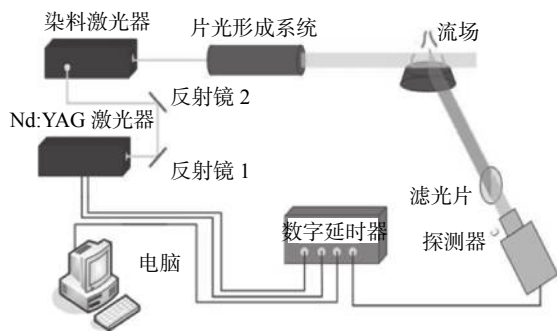


图1 激光诱导荧光测量系统示意

Fig. 1 Schematic diagram of laser-induced fluorescence (LIF) measurement system

1.2 基于 LIF 技术的浓度分布测量

在流动试验中,将特定有机分子作为示踪剂加入待测气体中,通过检测受激分子的荧光强度,可以得到区域内指定组分的浓度、空间分布等信息。

示踪剂在气态条件下与射流气体均匀混合,此时射流气体浓度正比于示踪剂的浓度。设流体中某单元内示踪分子浓度为 M ,射流气体浓度为 G ,则有: $G \propto M$; 设荧光光强分别为 S ,激光的光强为 L ,则有: $S \propto LM$; 当激发光强一定,示踪剂与射流气体均匀混合,射流气体浓度为 G ,则有: $G \propto S$ 。

试验中,相机拍摄下的荧光图像的灰度给出了荧光光强的数值,即可表征射流气体的浓度分布。荧光图像中荧光光强的变化趋势和特性即反映了射流掺混场的特性。

1.3 示踪剂的选择

由于冷态流场本身不具有荧光特性,因此在利用示踪 LIF 技术对冷态流场进行诊断测量时,需要在流场中加入荧光粒子作为示踪剂,即示踪 LIF 技术是以流场中示踪剂的激发与荧光为基础而进行的。因此,对于示踪剂的选择应满足以下几点要求:

- 1) 示踪剂的某些化学特性使其具有特定的吸收波长;
- 2) 示踪剂具有较宽的荧光光谱,且吸收光谱与荧光光谱重合率低;
- 3) 示踪粒子在流场中具有较高的粒子数密度,以便于荧光信号采集。

目前,用于冷态流场的常见示踪剂有甲醛、甲苯、NO 以及丙酮。根据以上对示踪粒子选择的要求,本试验选择丙酮作为示踪剂,适用于常温常压下气流混合分布特性研究。

2 氧化炉混合效果高速冷模试验

2.1 试验装置

图2是试验模型的结构示意。模拟高温氧气体1和模拟 $TiCl_4$ 气体2均为常温空气。试验模型的蜗壳为有机玻璃,混合腔体采用石英玻璃管,以便光学测量。两者通过法兰连接以便拆装。轴向玻璃管内径 d 为 100 mm,长度 1 500 mm,壁厚 5 mm。

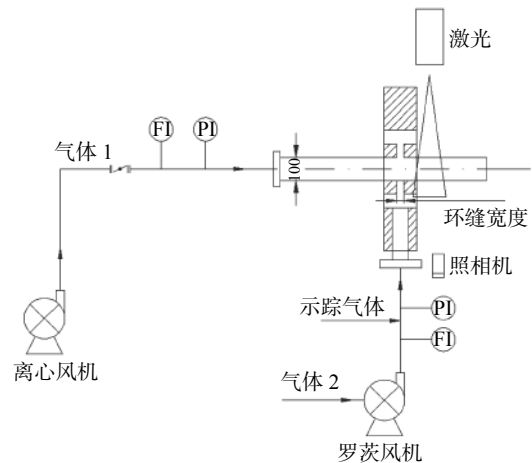


图2 试验模型结构示意图

Fig. 2 Structure diagram of the test model

气体1从圆管一端进入,形成主体(轴向)流体;气体2从径向蜗壳缓冲室进入,通过环缝或射流孔形成轴向射流;LIF 测量区即为气体1和气体2错流混合的初始段,尽可能保证流动不受出、入口影响。

示踪 LIF 系统采用 Quantel 850 YAG 激光器,示踪剂为丙酮,相机为 Imager ProX 4M CCD。激光偏光与相机垂直放置,激光垂直通过石英玻璃管,以片光可最接近的石英管道的垂直截面为起始测量位置(0.0 d),然后依次往后移动 5 cm(0.5 d)和 10 cm(1.0 d),共计三个测量位置。示踪剂所用驱动气体的流量只占气体2流量的 1%~3%,对整体流量的影响可忽略。气体2中丙酮示踪剂的含量约为 1%(摩尔分数)。

2.2 试验条件

试验对比分析了不同结构氧化反应器对混合程度的影响,涉及到不同的环缝宽度及射流孔结构型式,分别为 A-连续环缝;B-不连续环缝;C-均匀孔;D-不均匀孔,后文均以 A、B、C、D 指代。

此外,试验也测试了动量通量比和射流穿透深度对混合程度的影响。利用罗茨风机鼓风(最大流量: 800 m^3/h ; 出口压力: 30~40 kPa)将气流分成两股,

分别模拟 $TiCl_4$ 和 O_2 , 可以使主流气体、射流气体均达到较高的速度, 更加精确地还原实际应用时的效果。每种氧化炉共进行 7 组不同流量条件下的试验, 具体的流量控制参数如表 1 所示。

表 1 气体流量控制条件
Table 1 Gas flow control conditions

气流工况	气体1流量/ ($m^3 \cdot h^{-1}$)	气体2流量/ ($m^3 \cdot h^{-1}$)	气流比 (气体2/气体1)
1	266	380	1.43
2	298	380	1.28
3	330	380	1.15
4	365	380	1.04
5	280	400	1.43
6	312	400	1.28
7	380	400	1.05

2.3 数据处理

2.3.1 图像选取

每种压力下所采集的图片选取 150 帧, 每帧间隔 0.1 s, 总记录时长为 15 s。

2.3.2 浓度分布比较

试验中所采集的原始图片经过去除背景、选区(消减管壁杂光), 坐标转换等处理后获得浓度分布图像, 图像中亮区为含有示踪剂的气流分布, 暗区则为示踪剂未到达处(空洞区), 通过图像可以直观了解某一时刻反应器中的气体浓度分布情况。

2.3.3 穿透深度

文献 [1-3] 中定义射流穿透深度为反应管中横截面上温度最低点距离反应管壁的距离与反应管半径的比值。考虑到本试验为冷模试验, 两股气流皆为常温空气, 因此, 不考虑温度的影响, 直接将穿透深度定义为射流气体进入主流气体的深度 (h) 与圆管半径 (R) 的比值, 如图 3 所示。

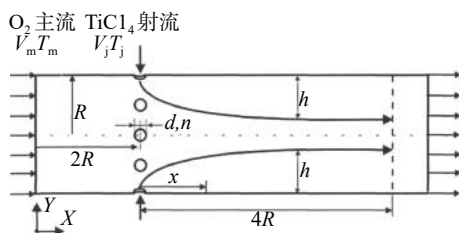


图 3 射流混合中穿透深度 (h/R) 示意

Fig. 3 Schematic diagram of penetration depth (h/R) in jet mixing

在试验中, 由于示踪剂是加在射流气体 2 当中的, 示踪剂的荧光图像可以直观反映其进入主流气

体 1 的深度, 如图 4 所示。该图的横纵坐标反映了其横向、纵向上的不同位置, (0, 0) 点即为中心点。颜色深浅则反映了示踪粒子的密集程度, 颜色越浅, 示踪粒子越密集, 浓度越高。通过分析处理浓度分布图像可以直接获得相应的穿透深度值。

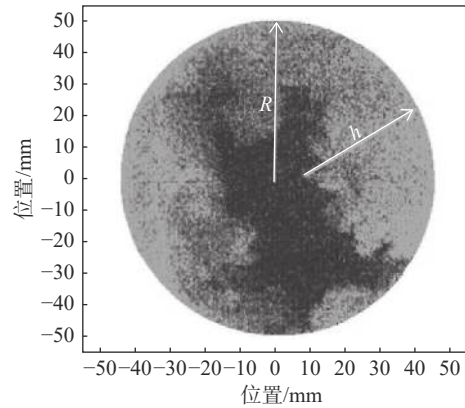


图 4 在 LIF 图像中穿透深度 (h/R) 确定方法示意

Fig. 4 Schematic diagram of the determination method of penetration depth (h/R) in LIF image

2.3.4 混合不均匀度的量化指标

定义混合不均匀度为所获取的 LIF 图像中所测量区域(圆形截面内)内所有测量点浓度值的标准偏差 (Standard Deviation, STDV, 标记为 δ)。混合不均匀度越小, 表明混合均匀性越好。具体的 STDV 值对比分析包括:

1) 同一测量位置, 同一流量下, 对连续 150 帧图片的 STDV 值按时间进行统计分析, 得到 δ (STDV) 值在测量时长内随时间的变化;

2) 同一测量位置, 不同流量下的 δ (STDV) 值变化;

3) 同一流量, 不同测量位置的 δ (STDV) 值变化;

4) 不同氧化炉, 同一位置的 δ (STDV) 值变化。

由于试验时管内气体处于湍流状态, 气体流速的波动、激光能量的波动以及示踪浓度的波动等, 皆会导致一定的系统测量误差。试验中对所测量的区域(圆形截面)进行一定时长的连续采集, 截面的 STDV 值在所测量时长内随时间不断发生变化, 故对某一气流比下 150 张图片的 STDV 值再次进行离散程度分析, 给出某一具体测量位置下的 SSTD 值, 作为该气流比下测量位置混合均匀度的指标 (E)。对 E 值的分析具体包括:

1) 同一氧化炉, 同一测量位置, 不同气流比下的 SSTD 值变化;

2) 同一氧化炉, 同一气流比, 三个测量位置处的 SSTD 值变化;

3) 不同氧化炉, 各组流量比条件下 SSTD 值整体变化趋势。

将 δ (STDV) 和 E (SSTDV) 值的变化规律与相应的图像的比较结果进行比较, 以验证其合理性。

3 混合效果与讨论

3.1 基于 LIF 图像的混合均匀性直观比较

3.1.1 同一位置不同气流比下的浓度分布

图 5 是射流气体 2 流量固定为 $380 \text{ m}^3/\text{h}$, 主流气体 1 流量自 $266 \text{ m}^3/\text{h}$ 增加至 $330 \text{ m}^3/\text{h}$ 时各氧化炉在 $0.0 d$ 位置处的浓度分布情况。图中每个圆形即为试验中所采集的原始图片经去除背景、选区(消减管壁杂光)、坐标转换等处理后获得的浓度分布图像, 图像中亮区为含有示踪剂的气流分布, 暗区则为示踪剂未到达处(空洞区)。

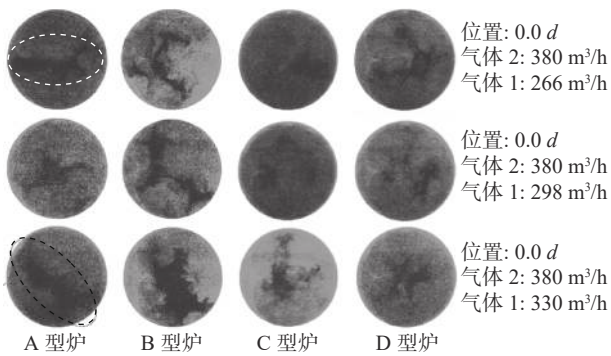


图 5 $0.0 d$ 处, 气体 2 流量固定、气体 1 流量增加时的浓度分布

Fig. 5 Concentration distribution of gas 2 with fixed flow rate and gas 1 with increased flow rate at $0.0 d$

由图 5 可以看出, 对于 A、B 型氧化炉, 在射流气体 2 流量固定时, 随主流气体 1 流量增大, 空洞区面积明显增大, 说明随动量比增大, 两股气体的混合均匀性随之降低。对于 C、D 型氧化炉, 该效应相对不明显, 说明动量比的改变对 C、D 型氧化炉的混合均匀性影响较小。

3.1.2 同一气流比, 不同位置处的浓度分布

图 6 是气体流量比固定时, 各种氧化炉在不同位置(0.0 、 0.5 、 $1.0 d$)处的浓度分布情况。

在气流比固定的条件下, 对于 A、B 型氧化炉而言, $0.0 d$ 处的空洞区面积较大, $0.5 d$ 和 $1.0 d$ 处空洞面积明显减小, 说明随混合距离的增加, 混合均匀性有了显著提升。且 $0.5 d$ 处的混合均匀程度与 $1.0 d$ 处相差不大, 证明气流在 $0.5 d$ 距离范围内即已完成了充分混合。

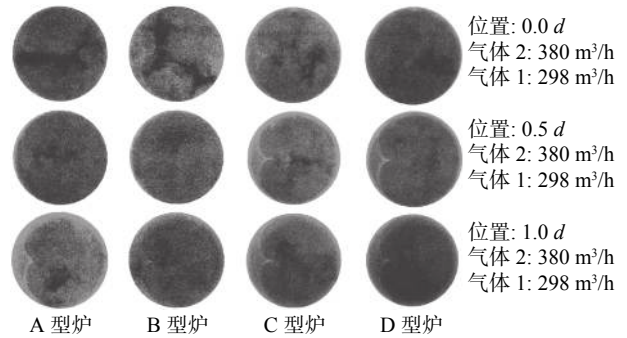


图 6 气流比固定时不同位置处的浓度分布

Fig. 6 Concentration distribution at different positions with fixed airflow ratio

而对于 C、D 型氧化炉, $0.0 d$ 处的空洞区面积显著小于 A、B 型氧化炉相同位置的空洞面积, 且与 $0.5 d$ 和 $1.0 d$ 处的混合程度相差较小, 表明 C、D 型氧化炉在初始位置处即有了较好的混合性能。

3.1.3 同一位置, 同一气流比, 不同气流量下的浓度分布对比

由图 5、6 可知, A、B 氧化炉特点类似, C、D 氧化炉特点类似, 故以下均以 A、D 两种氧化炉为例说明。图 7 是两种气体的气流比为 1.28 时两种氧化炉在 $0.0 d$ 位置处的浓度分布情况。

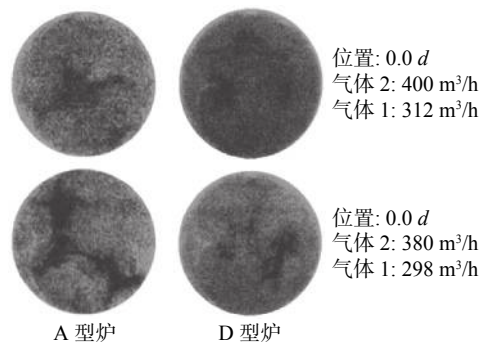


图 7 $0.0 d$ 处, 气流比 1.28 时不同气流量下的浓度分布

Fig. 7 Concentration distribution under different flux at $0.0d$ with airflow ratio of 1.28

就 A 型氧化炉而言, $0.0 d/380 \sim 298$ 的空洞区面积大于 $0.0 d/400 \sim 312$, 说明 $0.0 d/400 \sim 312$ 混合效果略优于 $0.0 d/380 \sim 298$, 也即气流比相同的情况下, 气流量越大, 混合效果越好。而对于 D 型氧化炉而言, 由于初始混合情况已经较为优秀, 所以气流量增大后混合效果提升得不太明显。

3.2 基于混合不均匀度的混合均匀性对比

3.2.1 同一位置, 不同气流比

图 8 是气体 2 流量固定为 $380 \text{ m}^3/\text{h}$ 时, A、D

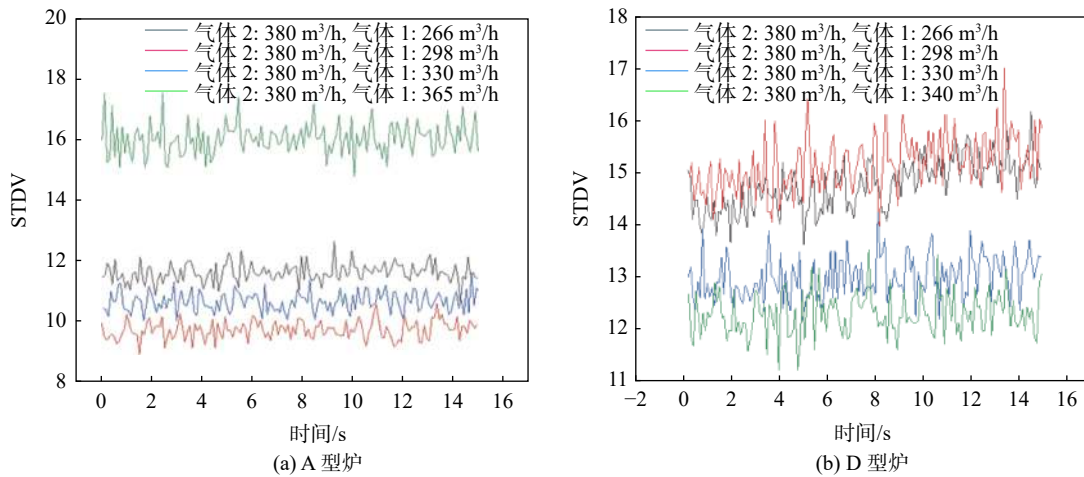


图 8 0.5 d 处, 不同气流比下混合不均匀度变化情况
 Fig. 8 Changes of mixing unevenness at 0.5 d under different airflow ratios

对比显示, 在 0.5 d 处, A 型氧化炉的混合均匀度随气流比增大呈先降低后增高的趋势, 气流比为 1.28 时, 混合不均匀度最低, 混合均匀性达到最佳水平; D 型氧化炉则刚好相反, 混合均匀度随气流比增大呈先增高后降低的趋势, 气流比为 1.12 时, 混合

不均匀度最低, 混合均匀性达到最佳水平, 与直观图像观察结果变化趋势总体一致。

3.2.2 同一气流比, 不同位置

图 9 是气流比固定时两种氧化炉不同位置处的混合不均匀度变化情况。

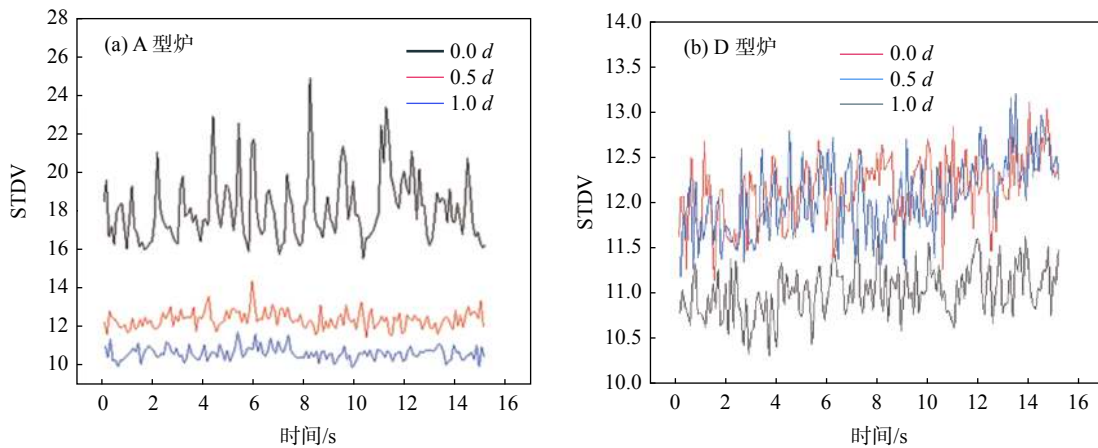


图 9 气流比固定时不同位置混合不均匀度变化情况
 Fig. 9 Variation of mixing unevenness at different positions with fixed airflow ratio

由 9a 可知, 在气体流量比固定的条件下, 从 0.0 d → 0.5 d → 1.0 d, A 型氧化炉的混合不均匀度逐渐减小, 混合均匀性逐渐提升。0.5 d 和 1.0 d 处的 δ 值相差不大, 说明其混合均匀性相近。0.0 d 处的混合不均匀度明显高于 0.5 d 和 1.0 d 处, 表明射流气体 2 刚进入主流气流 1 时, 分布不均匀, 随后两者逐渐交混, 混合均匀度提高。

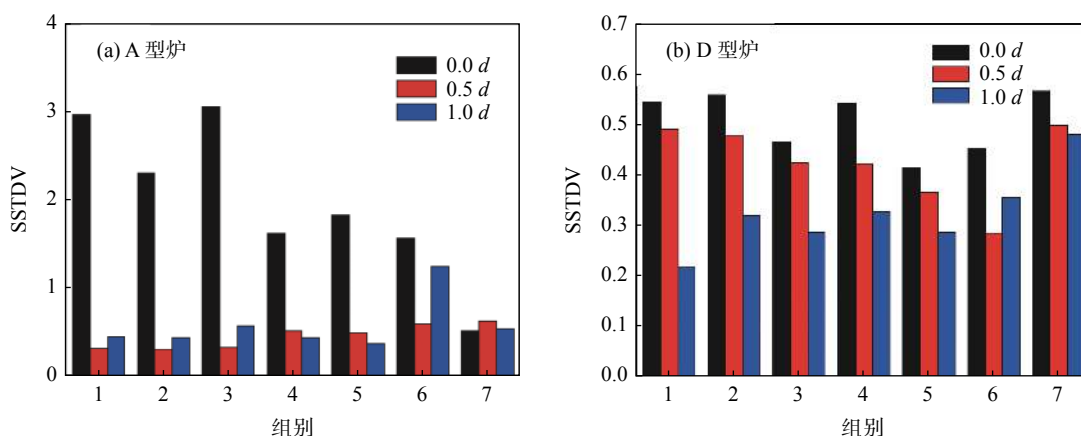
气流 1 时混合程度已较高, 上述结论均与之前直观图像的结果总体一致。

3.3 基于混合不均匀度量化的混合均匀性分析

对氧化炉在不同动量比条件下所采集的 150 张图片的混合不均匀度值 (δ) 再进行标准偏差分析, 得到其在联系 1.5 s 时长内的标准方差值 (SSTDV, 标记为 E) 作为该动量比条件下的混合均匀度指标。

而图 9b 显示 D 型氧化炉的混合不均匀度在 0.0 d 和 0.5 d 处没有明显差别, 而 1.0 d 处的 δ 值略低。这表明 D 型氧化炉中射流气体 2 刚进入主流

图 10 是两种氧化炉在 7 种流量比条件下的混合不均匀度 (E) 值比较。横坐标标注的 1 ~ 7 分别对应 7 种流量比, 具体数值见表 1。

图 10 氧化炉在 7 种动量比条件下的混合不均匀度 (E) 值变化情况Fig. 10 Variation of mixing unevenness (E) values in the oxidation furnace under 7 momentum ratios

从图 10 可以看出,不同结构的氧化炉在 $0.0 d$ 位置的混合不均匀度值 (E) 明显高于同一气流条件下 $0.5 d$ 和 $1.0 d$ 处的值,表明两股气流在初始条件混合不够均匀,但其混合均匀性随时间逐渐提升。随着动量比增大,氧化炉的混合不均匀度值减小,说明其混合均匀性提升。 E 值在 $0.0 d$ 处较高,但在 $0.5 d$ 处迅速减小,说明其混合均匀性随时间迅速改善;而 $1.0 d$ 和 $0.5 d$ 处值则相差不大,说明其在 $0.5 d$ 处已经有较好的混合均匀性。

综合比较不同结构氧化炉的混合不均匀度值,整体次序为 $E_A > E_D$,且 A 型氧化炉的 E 值显著高于 D 型氧化炉,说明环缝结构的混合均匀性显著低于射流孔结构氧化炉的混合均匀性,这与之前 LIF 图像直观比较结果一致。

A 型氧化炉的 E 值在 $0.0 d$ 处较高,但在 $0.5 d$ 处迅速减小,说明其混合均匀性随时间迅速改善;而 $1.0 d$ 和 $0.5 d$ 处值则相差不大,说明其在 $0.5 d$ 处已经有较好的混合均匀性。D 型氧化炉在 $0.0 d$ 处的 E 值高于 $0.5 d$ 和 $1.0 d$ 处的 E 值,但总体相差不大,说明 D 型氧化炉起始混合效果即优于 A 型氧化炉,随后混合均匀性进一步提高,但改变程度不大,即在起始位置已经有较好的混合均匀性。

氧化炉的 E 值整体分布也反映了氧化炉的结构对混合均匀性的影响大于气体流量比,说明反应器结构对气流混合效果占主导作用,而气体流量比对混合均匀性影响相对较小。

4 结论与展望

在交叉射流漏合中,对流扩散、湍流扩散和分子扩散是同时作用于流体的。射流环上的孔/狭缝

将 $TiCl_4$ 流体分割为多股射流,以对流扩散方式进入主流 O_2 中与之汇合。由于湍流扩散的作用,流体分裂为更小尺度的微团,最后通过分子扩散的作用,使流体达到混合均匀的效果。射流扩散主要受流体流动状态的影响,雷诺数越大,湍流的脉动越剧烈;而分子扩散是因为分子间的相对运动,扩散速率不受反应器结构和流体流动状态的影响。射流在主流中的分布状态直接影响着对流扩散,这与射流和主流的动量比、反应管管径、射流孔结构等几何参数有重要联系。

在本项目研究中,反应管管径不变,主要的变量有:①射流孔结构:分别测试了周向狭缝、不连续环缝、均匀孔和大小孔四种结构的射流环;②射流和主流的动量比:通过改变两者的气流量大小来调节,共测试了 7 组不同流量比下的混合情况;③混合时间:在氧化炉直管内不同位置进行测量,比较同一气流比下,不同位置的混合情况。结论如下:

1)射流环结构对混合效果的影响最为显著。A 型氧化炉的空区主要为贯穿截面的长线型,集中在圆形截面的中间区域;D 型氧化炉的空区主要呈现三瓣状,并分布在周边区域。直径大小不同的射流孔相互搭配,可以控制射流在管截面上的分布,避免均匀开孔时射流分布不均匀的不足。从 A→D 空洞区面积显著减小,也表明其初始混合效果显著提升。这也说明,射流孔结构的氧化炉比周向环缝结构的氧化炉混合效果更优,更利于提升产品品质。

2)气体动量比是影响混合效果的另一重要因素。如前所述,增大气体动量比有利于混合均匀性的提升。两种结构的氧化炉混合不均匀度变化都呈现类似的规律:动量比增大,射流穿透能力增大,使更多

的射流气体富集到管壁中心, 气体混合不均匀度下降, 混合均匀性提高。当 TiCl_4 射流进入主流时, 两者之间发生强烈的掺混。一部分主流被射流挤压到管中心, 射流气体未能完成渗透; 一部分主流在射流周围被流速较高的射流卷吸并和射流发生混合, 余下的主流则会从射流间隙沿着管壁向下游流动。两股气体的流量比决定着两者间相互影响的程度, 进而影响混合的均匀性。

3) 混合时间对混合效果的影响也较为显著。从起始达到均匀混合所需要的时间长短反映其混合效果的差别。如前述的 LIF 图像中空洞区面积的变化趋势及混合不均匀度量指标均可以看出, 从 $0.0d \rightarrow 0.5d \rightarrow 1.0d$ 混合均匀性逐渐提升。初始阶段的混合不均匀度最大, 随着轴向距离增大, 混合不均匀

度逐渐减小。随着时间延长, 混合均匀性渐佳, 但初始混合状态是决定整体混合效果的关键。

4) 本研究以先进的激光诱导荧光技术为手段, 测量了不同结构、不同动量比及不同混合时间下氧化炉中两种气体的浓度分布情况。目前国内外还没有以该技术为测试手段的相关报道, 本研究为该领域填充了一块空白。测试结果也表明, 影响氧化炉混合均匀性的关键因素是射流环的开孔结构和两股气流的动量比, 这也是在试验中可以调控的两个变量。在实际的工业操作中, 也是通过设计改进射流环结构和调整物料比例这两个参数以达到最佳混合效果。期待未来通过科研人员的进一步努力可以研发出结构更优的氧化炉、找到更加适合的物料比例, 以提升我国氯化法制钛白的生产技术。

参考文献

- [1] Zhao Weian, Liu Zhoulin, Bai Chunpei, *et al.* Simulation experiment on gas current mixing in a titanium white reactor[J]. *Chemical Metallurgy*, 1987, 8(1): 66-75.
(赵维安, 刘洲林, 白春沛, 等. 钛白反应器气流混合模化实验[J]. *化工冶金*, 1987, 8(1): 66-75.)
- [2] Yang Bo. Cold simulation test of oxidation reactor for chlorination titanium dioxide[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 1998.
(杨波. 氯化法钛白氧化反应器的冷态模拟试验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 1998.)
- [3] Zhang Shuming. Study on cold model experiment of titanium dioxide by chlorination[J]. *Coating Industry*, 2000, (5): 20-21.
(张曙明. 氯化法钛白冷模实验研究[J]. *涂料工业*, 2000, (5): 20-21.)
- [4] Lv Zhimin, Li Chunzhong, Cong Dezi, *et al.* Study on jet mixing characters in the oxidation reactors for titanium dioxide powder production by chlorination process[J]. *Chemical Engineering*, 2001, 29(3): 25-29.
(吕志敏, 李春忠, 丛德滋, 等. 氯化法制备钛白氧化反应器内射流混合特性研究[J]. *化学工程*, 2001, 29(3): 25-29.)
- [5] Cheng Yi, Liu Zhe, Luo Peicheng, *et al.* Gas cross-flow mixing in TiO_2 oxidation reactors of chlorination process[J]. *Journal of Chemical Industry and Engineering*, 2006, 57(12): 2840-2846.
(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, 57(12): 2840-2846.)
- [6] Li Chunzhong, Cong Dezi, Lv Zhiming, *et al.* Oxidation reactors for chlorination titanium dioxide, China: CN00116465.1[P]. 2000-12-27.
(李春忠, 丛德滋, 吕志敏, 等. 氯化钛白氧化反应器, 中国专利: CN00116465.1[P]. 2000-12-27.)
- [7] Liu Feisheng. Numerical simulation of gas mixing in the oxidation of titanium dioxide by chlorination[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2015.
(刘飞生. 氯化法钛白氧化过程中气体混合数值模拟[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2015.)
- [8] Li Yadong. Study and modeling of hydrodynamics in oxidation reactor for titanium dioxide production by chlorination[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2016.
(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.)
- [9] Zhou E, Zheng Shaohua, Yuan Zhangfu, *et al.* Structure analysis and modeling on the oxidation reactor in the titanium white synthesis with chloride process[J]. *Titanium Industry Progress*, 2004, 21(6): 35-39.
(周峨, 郑少华, 袁章福, 等. 氯化法钛白氧化反应器结构分析与模拟[J]. *钛工业进展*, 2004, 21(6): 35-39.)
- [10] 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.)