

## 旋流反应器的结构设计及其分离性能

上海理工大学能源与动力工程学院 徐波

上海理工大学材料科学与工程学院 王树林 李生娟 李来强

**摘要:** 设计一个全新的旋流反应器应用于锌粉水解实验系统, 反应器内化学反应和气固分离同时完成, 不仅节省分离设备所需投资, 而且提高化学反应速率; 通过分析反应器工作原理, 研究反应器结构对分离性能的影响, 确定反应器结构型式和尺寸; 研究表明颗粒尺寸、进口速度和压力损失也是改善反应器分离效率的主要途径。综合考虑各种因素, 在锌水解实验中取进口处的流速为10m/s。

**关键词:** 旋流反应器; 分离效率; 进口流速; 压力损失

中图分类号: TQ016.5

## Structure and Separation Performance of Cyclone Reactor Hydrolyzing Zn particles

College of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, XU Bo  
College of Material Science and Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, WANG Shulin,  
LI Shengjuan, LI-Laiqiang

**Abstract** A new cyclone reactor was designed for the experiment hydrolyzing Zn particles, in which the chemical reaction and gas-solid separation were accomplished synchronously, both saved the cost of separation equipment and enhanced chemical reaction rate. The work principle of cyclone reactor was analyzed and the effect reactor structure on separation efficiency was studied for ascertaining the structure and size of the reactor. The research indicated that particles size, inlet velocity and pressure loss were also to improve gas-solid separation efficiency. Considering various factors, we confirmed that inlet velocity of 10m/s is available in the experiment hydrolyzing Zn particles.

**Key words** cyclone reactor; separation efficiency; inlet velocity; pressure loss

## 1 引言

任何从原料到产品的生产过程，都可概括为原料的预处理、化学反应和产品分离三个组成部分，化学反应起主导作用，化学反应器则是生产的核心设备。80 年代末期 LEDE 等<sup>[1-5]</sup>首次提出旋流反应器的概念，它是由旋风分离器和水利旋流器改进而成。反应器内化学反应和气固分离同时进行，不仅节省分离设备所需投资，而且气固两相形成三维湍流旋转流场，固体颗粒随气流作高速旋转运动，颗粒分散在气流中增加了传递面积，提高传热、传质速率，加快化学反应速度。90 年代初期华南理工大学张民权等<sup>[6]</sup>将旋流反应器引入我国，对旋流反应器的性能作了进一步的研究。在此基础上，中南工业大学余加耕、汤义武等<sup>[7]</sup>改进了旋流反应器的结构并将其应用于有色金属工业。近年来，随着反应器性能的深入研究和结构的不断改进，高效旋流反应器越来越广泛应用于高温下的气固反应，如矿物的煅烧、生物质的热解及固体废物处理等行业<sup>[8,9]</sup>。

本文设计一个全新的旋流反应器应用于锌粉水解实验系统，分析反应器的工作原理，研究反应器的结构尺寸、过程参数和压力损失对分离性能的影响，为确定反应器结构和过程参数提供依据。

## 2 基本结构及工作原理

图 1 为水解反应器的结构简图，将预热锌粉在氩气携带下，以一定的速度切向进入反应器，同时另一进口切向通入水蒸汽，反应器内锌颗粒与水蒸汽相遇并发生化学反应，生成氧化锌固体颗粒和氢气。在反应器环形空间内，气固两相形成三维湍流旋转流场，主流是双层旋流，外侧向下旋转，中心向上旋转。气流的切向速度占主导地位，它带动固体颗粒作高速旋转运动，颗粒除受有流体曳力与重力外，还受到各种扩散作用及颗粒与器壁、颗粒与颗粒之间碰撞弹跳的影响，颗粒的随机运动提高传热、传质速率，促进受传递过程影响的化学反应进行。

在分离空间内，由于离心力的作用，固体颗粒向外沉降到内壁面，沿内壁滑入粉末捕集器。气流沿轴向向下逐渐变小，小部分进入粉末捕集器，其余的气体通过向心径向气流逐渐转变成向上的内旋风，气流的轴向速度分布构成了外层下行、内层上行的气体双层的旋转流动结构，从而完成气固两

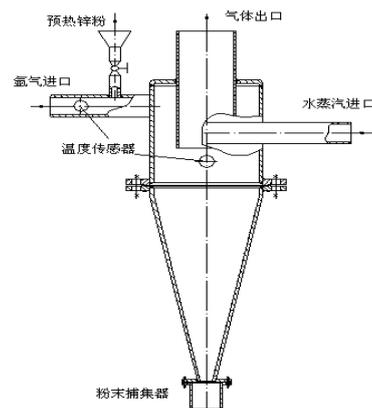


图 1 水解反应器结构简图

相分离过程。

旋流反应器的结构直接影响固体颗粒的转化率和气固分离效率。结构设计时，作者采用双进口切向进料，一方面因为化学反应过程的需要，另一方面是因为双切向进口结构型的分离性能优于单向进料结构，与后者相比容器内流场的旋进涡核变形减小。但轴对称双向进口结构，当两股流体相接触的瞬间，内部流场受到局部强扰动，两股流体相互冲击，破坏流体的稳定性，影响旋转流场的生成。若轴向速度远小于切向速度和径向速度，则容易造成容器内颗粒和温度分布不均，影响化学反应正常进行。图 2 为轴对称双进口横截面流体运动示意图。

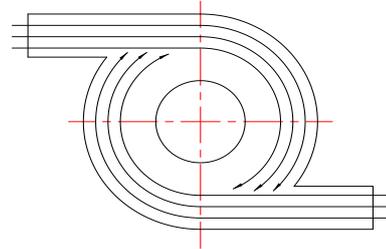


图 2 轴对称双向进口中心截面流体运动

鉴于此，设计时调整两个进口之间的水平位置，采用错位进料的方式，避免流场之间相互干扰。水蒸气进口中心线位置低于锌和载气进口中心线 15mm，轴线方向上锌颗粒受重力作用贯穿进入气相流场，与水蒸气充分接触混合，开始化学反应和分离过程。大量的实验研究表明，双切向进口错位进料结构，不仅改善气流的偏心分布，减少气流受到局部干扰，而且避免锌颗粒与水蒸气在进口处发生化学反应，使部分生成物粘滞在进口位置，阻碍反应的顺利进行。

### 3 气固分离效率

#### 3.1 结构尺寸的影响

旋流反应器的结构设计，一方面是要考虑化学反应能够在有效的时间和空间内顺利完成，另一方面则是获得良好的气固分离效率。研究表明<sup>[10]</sup>锌水解反应时间仅为 0.85 秒，因而本文着重分析反应器结构对分离性能的影响。

筒体直径  $D_0$  是对分离效率的影响很大，固体颗粒所受到的离心惯性效应与其运动轨迹的曲率半径成一定的反比关系，随着筒体直径的缩小，分离效率提高。但过小的分离直径，可能造成大直径颗粒反弹至中心气流而被带走，降低分离效率。高度  $h$  是确定筒体结构的另一主要参数，较大的长度比例使进入筒体的颗粒停留时间增长，颗粒有更多的机会从旋流中心分离出来，减少二次夹带，提高分离效率。但是随着  $h$  的增加，效果变化不显著，而分离空间增大，制造成本提高，经济效率下降。通常取圆筒段的高度  $h=(1.5\sim 2.0) D_0$ 。

筒体的下部为圆锥体，它在短时间内使外旋流转变为内旋流，随着旋转半径变小，切向速度逐渐提高，离心力增大，分离效率提高。圆锥高度与半锥角  $\alpha$  和锥体下端排灰口直径  $d$  有关， $\alpha$  过大易造成核心气流与器壁撞击，颗粒被内旋流带走，影响分离效率。设计时常取  $\alpha=10^\circ\sim 20^\circ$ ，圆锥高度  $h_1=(2\sim 2.5)D_0$ 。

气流中颗粒的运动轨迹受入口结构的影响也很大，选择不同的入口结构主要是为了减小顶板下环形空间的纵向环流所产

生的上灰环以及进气与内部旋流的相互干扰，使颗粒尽快贴壁回旋而下。为便于导入锌粉，减小摩擦阻力，作者选择圆形入口切向进料方式。若进口管直径太大，部分颗粒进入筒体后靠近排气管，易被短路流带入排气管内。进口管直径越小，临界粒径越小，分离效率越高，但过小的直径限制了处理量，反而影响经济效率。

排气管的结构和尺寸决定了内外旋流的分界点位置及最大切向速度。在一定的范围内，排气管直径越小，外旋流区越大，离心力场越强，分离效率增高，但压降也随之增大。从压降和分离效率两方面考虑，一般取  $d_e=(0.3\sim 0.5)D_0$ 。排气管直径对分离效率和阻力系数的影响如图 3 所示。

旋流反应器的锥底处，气流接近高湍流，下行气流将已浓集在器壁处的颗粒排入灰斗。如果排灰口直径过大，二次夹带现象严重增加，排灰口直径过小，内旋流将浓集在器壁上的颗粒重新卷入上行的内旋流中，当浓度很高时，颗粒会黏附团聚，甚至堵塞排尘口，影响分离效率。排灰口直径一般为  $d=(0.2\sim 0.4)D_0$ 。

综合考虑以上因素，作者在反应器结构设计时，取筒体直边高筒体直径  $D_0=100\text{mm}$ ， $h=170\text{mm}$ ，锥体高度  $h_1=200\text{mm}$ ，半锥角  $\alpha=13^\circ$ ，水蒸汽进口直径  $d_1=20\text{mm}$ ，氩气进口直径  $d_2=20\text{mm}$ ，排气管直径  $d_e=50\text{mm}$ ，排气管插入深度  $L=60\text{mm}$ ，排灰口直径  $d=25\text{mm}$ 。

### 3.2 过程参数的影响

在气固组成的两相体系中，切向气流占主导地位，固体颗粒为稀疏相，忽略化学反应对流动过程的影响，近似地采用旋风分离器的分离效率进行计算。常用的分离效率  $\eta$  与粒径  $d$  的经验关联式为 Leith-Licht 分离效率计算式，此式虽计算复杂，但与实际比较接近，其表

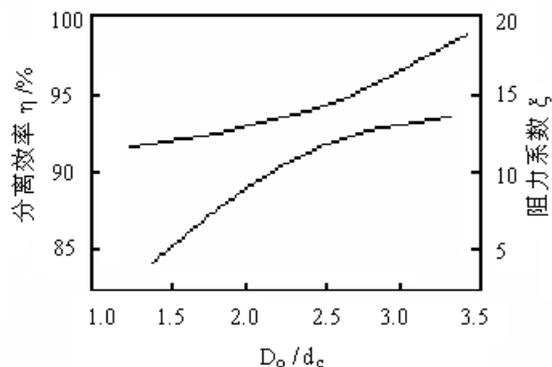


图 3 排气管直径对分离效率的影响

达式为<sup>[11]</sup>

$$\eta = 1 - \exp[-2(c\psi)/(2n+2)]$$

$$c = \frac{\pi D_0^2}{A} \left\{ 2 \left[ 1 - \left( \frac{d_e}{D_0} \right)^2 \right] \times \left( \frac{h_c}{D_0} - \frac{a}{2D_0} \right) + \frac{1}{3} \left( \frac{h_c + l - h}{D_0} \right) \times \left[ 1 + \frac{d_c}{D_0} + \left( \frac{d_c}{D_0} \right)^2 \right] + \frac{h}{D_0} - \left( \frac{d_e}{D_0} \right)^2 \frac{l}{D_0} - \frac{h_c}{D_0} \right\} \quad (1)$$

$$\psi = (n+1)(\rho_c - \rho)d^2 v_i / 18\mu D_0$$

$$n = 1 - \left( 1 - 0.668 D_0^{0.14} \right) (T/283)^{0.3}$$

将反应器的结构尺寸、工艺参数和物性数据代入式 (1) 得到简化后的方程式

$$c = \frac{4 \times 0.1^2}{0.025^2} \left\{ 2 \left[ 1 - \left( \frac{0.050}{0.1} \right)^2 \right] \times \left( \frac{0.08}{0.1} - \frac{0.025}{2 \times 0.1} \right) + \frac{1}{3} \left( \frac{0.08 + 0.3 - 0.15}{0.1} \right) \times \left[ 1 + \frac{0.03}{0.1} + \left( \frac{0.03}{0.1} \right)^2 \right] + \frac{0.15}{0.1} - \left( \frac{0.050}{0.1} \right)^2 \times \frac{0.3}{0.1} - \frac{0.08}{0.1} \right\}$$

$$= 112.1$$

$$n = 1 - \left( 1 - 0.668 \times 0.1^{0.14} \right) (433/283)^{0.3} = 0.586$$

$$\psi = (0.586 + 1)(7100 - 2.543)d^2 v_i / 18 \times 0.173 \times 10^{-3} \times 0.1$$

$$= 3.64 \times 10^7 d^2 v_i$$

$$\eta = 1 - \exp(-2.57 \times 10^9 d^2 v_i) \quad (2)$$

图 4 和图 5 显示了不同粒径和不同入口速度时气固两相的分离效率。可见在进口速度相同的情况下，颗粒直径增大，分离效率提高；在颗粒尺寸一定时，进口速度增加，分离效率提高，但是随着气速的加大，分离效率提高的幅度减小。

### 3.3 压力损失的影响

旋流反应器的压力损失也是衡量反应器分离性能的重要参数，一方面流体进入反应器之后因摩擦、膨胀、压缩等因素造成能量损失，另一方面旋转运动比直线运动需要消耗更多的能量以及排气管内气体旋转时动能转化为静压能的能量损失。反应器的压力损失一般为 1000~2000 Pa，压力损失过小不能提供离心力场所需能量，不利于化学反应和分离过程，压力损失过大则会引起返混现象发生，降低分离效率。忽略化学反应的耦合过程，采用旋风分离器的压力损失计算式

$$\Delta p = \zeta \rho v_i^2 / 2 \quad (3)$$

气体的旋流速度主要取决于入口和排气管尺寸，而气流的阻力系数  $\zeta$  也是结构参数的函

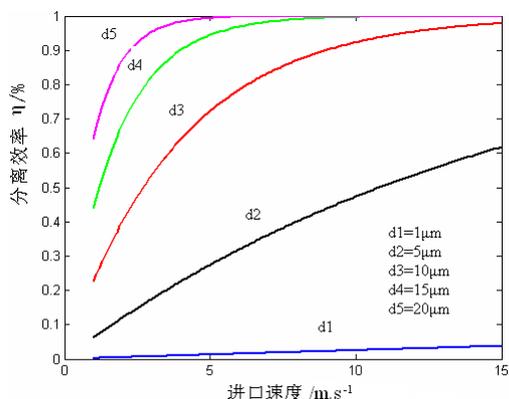


图 4 不同颗粒直径的分离效率

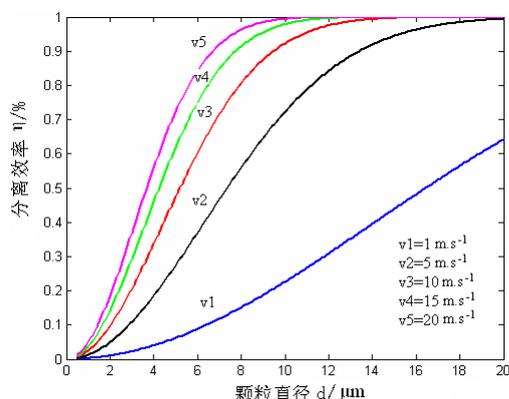


图 5 不同进口速度的分离效率

数，选用 Shepherd-Lapple 阻力系数计算公式

$$\xi = K ab/d_e^2 \quad (4)$$

标准切向进口  $K=16$

将水解反应器已知条件代入式 (3)、(4) 得

$$\xi = 16 \times 0.785 \times 0.05^2 / 0.05^2 = 12.56$$

$$\Delta p = 12.56 \times 2.543 \times v_i^2 / 2 = 15.97 v_i^2$$

图 6 显示了进口流速和压降的关系，可见当

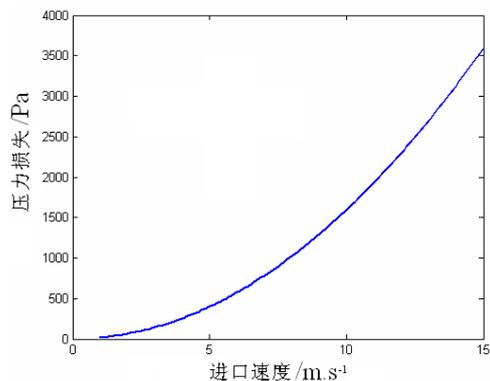


图 6 进口流速与压降

容器结构一定时，颗粒尺寸和流体进口处的雷诺数是影响分离效率的主要因素，入口处的流速增大，分离效率明显提高，但过大的流速会导致压力损失急剧上升以及返混现象发生。在颗粒尺寸分布一定的情况下，选择合理的进口速度是改善旋流反应器分离性能的主要途径。实验时综合考虑各种因素的影响，取进口处的流速为 10m/s。

#### 4 结论

(1) 旋流反应器内，固体颗粒在气流的强旋转力作用下，形成三维两相湍流旋转流场，颗粒的随机运动提高了传热、传质速率，加快化学反应进程。

(2) 选择双切向进口错位进料结构，避免流场之间相互干扰。分析旋流反应器结构尺寸对分离效率的影响，设计合理的反应器结构；研究颗粒尺寸、进口速度和压力损失对分离效率的影响，确定锌反应器的进口流速为 10m/s 是可行的。

(3) 高效旋流反应器成功应用于锌粉水解反应实验系统, 反应器内化学反应和气固分离同时完成, 不仅减少分离设备所需投资, 降低生产成本, 而且有利于工业化生产。

### 参考文献

- [1] Lede J, Verzaro F, Antoine B. Flash pyrolysis of wood in a cyclone reactor[J]. *Chemical engineering and processing*, 1986, 20(6): 309-317.
- [2] Lede J, Li H Z, Villermaux J. Le cyclone réacteur Partie I: Mesure directe de la distribution des temps de séjour de la phase gazeuse — lois d'extrapolation[J]. *The chemical engineering journal*, 1989, 42(1): 37-55.
- [3] Lede J, Li H Z, Soullignac F, et al. Le cyclone réacteur Partie II: Mesure directe de la distribution des temps de séjour de la phase solide — lois d'extrapolation[J]. *The chemical engineering journal*, 1989, 42(2): 103-117.
- [4] Lede J, Li H Z, Soullignac F, et al. Le cyclone réacteur III: Mesure de l'efficacité des transferts de chaleur et matière entre les parois et un gaz circulant seul[J]. *The chemical engineering journal*, 1990, 45(1): 9-24.
- [5] Lede J, Li H Z, Soullignac F, et al. Le cyclone réacteur IV: Mesure de l'efficacité des transferts de chaleur entre les parois et les phases gazeuse et solide[J]. *The chemical engineering journal*, 1992, 48(2): 83-99.
- [6] 张民权, 莫炳禄. 一种新型高效的化工反应设备——旋风反应器[J]. *化学工业与工程*, 1994, 10(3): 58-62.
- [7] 余加耕, 赵继华. 新型旋流反应器的现状及进展[J]. *湖南有色金属*, 1995, 11(5): 28-30.
- [8] Lede J, Broust F, Fatou T, et al. Properties of bio-oils produced by biomass fast pyrolysis in a cyclone reactor[J]. *Fuel*, 2007, 86: 1800-1810.
- [9] Chibante V, Fonseca A, Salcedo R. Dry scrubbing of acid gases in recirculating cyclones[J]. *Journal of hazardous materials*, 2007, 144: 682-686.
- [10] Karsten W, Hao C L, Weiss R J., et al. In situ formation and hydrolysis of Zn nanoparticles for H<sub>2</sub> production by the 2-step ZnO/Zn water-splitting thermochemical cycle. *J. Hydrogen Energy*, 2006, 31: 55-61.
- [11] 余国森. 除尘设备[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002.