

# 稀有金属超细粉末过滤、洗涤、回收技术及设备

陈崇炯<sup>1</sup>, 宋志骥<sup>2</sup>, 胡良分<sup>2</sup>, 宋显洪<sup>2</sup>

(1. 温州职业技术学院 机械工程系, 浙江 温州 325035; 2. 温州市东瓯微孔过滤有限公司, 浙江 温州 325003)

**摘要:** 为了实现稀有金属超细粉末制备中过滤与洗涤 2 个重要工艺过程的连续操作和高效回收, 开发基于高分子滤材的微孔超精密过滤回收技术及具有微孔过滤、搅拌洗涤、压缩气体反吹、排卸滤饼及微孔再生等多功能的设备。结果表明, 该技术及设备的过滤精度可达 0.3 μm, 回收效率高达 99.99%, 5 个工作过程在一个密闭容器内一次性完成, 减少了资源流失, 提高了生产效率, 减少了环境污染。

**关键词:** 微孔过滤; 固液分离; 粉末回收; 节能减排

中图分类号: TQ028.5 文献标志码: A

文章编号: 1008-5548(2014)02-0025-06

## Filtration, Washing, Recycling Technology and Equipment of Rare Metal Superfine Powders

CHEN Chongji<sup>1</sup>, SONG Zhiji<sup>2</sup>, HU Liangfen<sup>2</sup>,  
SONG Xianhong<sup>2</sup>

(1. Department of Mechanical Engineering, Wenzhou Vocational and Technical College, Wenzhou 325035; 2. Wenzhou Dong'ou Micropore Filtration Co. Ltd., Wenzhou 325003, China)

**Abstract:** To realize the continuous operation and efficient recovery in the two important processes of filtration and washing in rare metal ultrafine powders preparation, the microporous ultra-precision filtration-recovery technology based on the polymer materials and equipment having many functions including microporous filter, stirring and washing, compressed gas blowback, discharging cake and micropore regeneration etc. were developed. The results show that the filtering precision of the technology and equipment can reach up to 0.3 μm and the recovery efficiency up to 99.99%. Five working processes can be completed once in a closed container, which reduces the loss of resources, improves the production efficiency and reduces the environment pollution.

**Key words:** polymer microporous filter; solid and liquid separate; powders recycling; energy-saving and emission-reduction

稀有金属是航空、航天、军工、化工、电子等领域的重要工程材料。稀土是世界公认的改造传统产业,

收稿日期: 2013-08-22, 修回日期: 2013-09-14。

基金项目: 科技部科技型中小企业技术创新基金项目, 编号: 11C26213301668。

第一作者简介: 陈崇炯(1957—), 男, 高级实验师, 研究方向为机械设计。E-mail: 81383542@qq.com。

发展高新技术、国防尖端技术不可缺少的战略资源。我国稀土矿产资源随着稀土工业的快速发展而消耗加快, 稀土提取过程中资源利用率低, 环境污染日益严重<sup>[1]</sup>。稀有金属超细粉末的制备一般采用化学或电化生产方法, 其中过滤与洗涤是 2 个重要的工艺过程。过滤、洗涤与回收技术及设备的先进性, 直接影响产品质量、资源流失、能耗、成本及环境等问题。本文中设计一种新的稀有金属超细粉末超精密过滤、洗涤设备及先进回收技术, 以实现稀有金属超细粉末制备中过滤与洗涤 2 个重要工艺过程的连续操作和高效回收。

### 1 国内外现状

国内稀有金属生产中的过滤、洗涤与回收技术一直相当落后, 粗放型加工导致资源流失严重, 造成环境恶化。以前的过滤与洗涤设备为真空抽滤筒、抽滤槽等, 以滤布为滤材, 微细粉末穿滤很严重, 导致稀有金属大量流失, 且产品洗涤有死角, 效果差。唯一的优点是过滤和洗涤 2 个工艺过程在同一台设备中完成, 可以减轻劳动强度, 减少资源的损失。这类设备只适用于过滤洗涤量较小的场合。当过滤洗涤量较大时, 这 2 个工艺过程通常分别在 2 个不同设备中完成。例如: 过滤设备选取板框压滤机或离心机, 洗涤设备采用搅拌罐。虽然前者的洗涤设备具有搅拌均匀、洗涤效率高、洗涤次数减少, 洗涤液用量节省等优点, 但是后者的过滤设备也以滤布为滤材, 微细粉末严重穿滤, 同时从过滤至洗涤的过程中需来回运输, 增加了人力和电力的损耗, 也增加了物料的流失<sup>[2]</sup>。

目前, 国内外使用较多的是水平真空连续带式过滤机和无机膜无滤层管式过滤器。前者可以过滤和洗涤连续操作, 由于操作时间不能过长, 因此只适用于颗粒较粗或滤饼层不产生裂缝的粉末。后者的优点是高效, 具体表现如下: 1) 利用极微细孔径的无机膜作为滤材, 过滤精度高; 2) 采用无滤饼层过滤方式, 过滤快; 3) 依靠大量的洗涤液连续稀释粉末料浆, 洗涤效率较高。缺点也很明显, 具体表现为动力能耗很高, 洗涤液用量很大, 结果却只获得粉末浓浆, 还需经过加

热、蒸发,才可取得所需的粉末<sup>[3]</sup>。

## 2 技术开发

### 2.1 稀有金属超细粉末的特征

要设计过滤、洗涤连续操作且高效回收的稀有金属微细粉末过滤、洗涤、回收技术及设备,首先必须掌握稀有金属粉末颗粒的如下特征<sup>[4]</sup>:1)亲水性,即粉末颗粒是憎水或亲水;2)内孔隙,即粉末中颗粒与颗粒之间的间隙;3)形状,如片形、球形、针形或不定形等;4)粒度分布,由于稀有金属超细粉末的粒度分布均为多分散体系,因此,无论经过多少次分级,其分布体系仍为多分散体系。

粒度分布是粉末颗粒中最主要的参数。粒度测量方法有多种,最常用的是激光光散射法,可以用体积、表面积和个数 3 种不同基准快速测出。同种材质的粉末以不同的基准进行测量,粒度分布参数不同,用途也不同。1)以体积为基准:颗粒体积不同,质量也不同;能了解不同颗粒体积的质量分布比例。2)以表面积为基准:粉末越细,表面积越大;比以体积为基准更清晰地反映该粉末的质量,即可知其基本价值。3)以个数为基准:个数越多,粉末越细,表面积越大。在过滤与洗涤过程中,若只考虑以体积为基准,可从体积和质量上得到高回收率,但是按颗粒数计算,穿滤的比例会很大。如果要把最微细的粉末滤住,不但技术难度很大,而且会大大增加设备成本和操纵费用的投入;因此,如果既减少资源的流失,又节约成本和费

用,必须综合考虑 3 种不同基准的粒度分布参数。

### 2.2 过滤精度的确定

过滤精度是指粉末中不穿滤的最小颗粒的尺寸,以微米为单位。稀有金属超细粉末的过滤精度应以资源的最高回收率为选择原则。能保证过滤精度的过滤方法有以下 2 种<sup>[4]</sup>。1)过滤介质中暗流毛细通道的孔径达不到过滤精度,利用多次循环过滤,使暗流毛细通道的孔径越来越小,最终达到过滤精度。达到过滤精度后才能开始生产,会导致能耗和成本的提高。适用范围如下:①因无其他技术可以解决的特别微细粉末;②循环量小于总过滤洗涤量的 5%。2)过滤介质中暗流毛细通道的孔径达到过滤精度。

刚开始过滤时,达到过滤精度的超细粉末不穿滤,是一种理想的方法,但是技术难度非常大,是本技术要解决的一个核心问题。过滤精度由过滤介质暗流毛细通道的孔径大小来保证。稀有金属超细粉末按个数分布的粒度非常小,只要选择好各种参数,均可一次性将滤液滤清且不穿滤。表 1 所示为几种稀有金属与金属化合物超细粉末在过滤与洗涤中,不穿滤的滤饼厚度、不同压力差时的平均比阻及滤饼平均含水率的实验数据<sup>[2]</sup>。

### 2.3 有关参数的计算

#### 2.3.1 滤饼层的平均比阻与过滤压差的关系

过滤精度确定后,根据实验数据,可归纳出滤饼层的平均比阻  $\alpha$  与过滤压力差  $\Delta p$  间的计算模型:

$$\alpha = \alpha_0 + \lambda \Delta p^s, \quad (1)$$

表 1 几种稀有金属与金属化合物超细粉末的不穿滤滤饼厚度、平均比阻与平均含水率

Tab. 1 Thickness, average specific resistance and moisture content of non-filtrating pies in several kinds of rare metal and metal compound superfine powders

超细粉末名称	滤饼层厚度/mm	过滤压差/MPa	滤饼平均比阻 $\times 10^{-11}/m^{-2}$	滤饼平均含水体积分数/%
碳酸镍	235	0.05	410.0	22.0
		0.10	1 160.0	
		0.20	2 100.0	
碳酸钴	210	0.05	295.0	10.0
		0.10	420.0	
		0.20	550.0	
钴酸锂	105	0.03	110.0	6.4
		0.06	210.0	
		0.12	450.0	
氢氧化钴	61	0.02	144.0	12.0
		0.04	211.0	
		0.08	1 500.0	
钛酸钾	24	0.02	1 760.0	25.0
		0.04	2 700.0	
		0.08	4 300.0	
超细铜粉	95	0.02	18.0	14.0
		0.04	31.0	
		0.08	38.6	

式中:  $\Delta p$  为过滤压力差, Pa;  $\alpha$  为滤饼平均体积比阻 (单位面积上单位体积滤饼比阻),  $m^{-2}$ ;  $\alpha_0$  为未压缩滤饼平均体积比阻,  $m^{-2}$ ;  $\lambda$  为单位压差下滤饼平均体积比阻,  $m^{-2}$ ;  $s$  为滤饼压缩性指数,  $0 < s < 1$ , 滤饼的可压缩性越大,  $s$  越大, 对于不可压缩滤饼,  $s=0$ 。

表 2 几种稀有金属及金属化合物超细粉末滤饼平均比阻与过滤压差的关系式

Tab. 2 Formula on average specific resistance and filtration pressure difference of filtrating pies in several kinds of rare metal and metal compound superfine powders

滤饼组成	过滤压差的变化范围/MPa	滤饼的平均比阻 $\alpha$ 与过滤压差 $\Delta p$ 之间的关系 ( $\alpha=\alpha_0+\lambda\Delta p^s$ )	滤饼的平均比阻 $\alpha$ 计算值与 实测值的最大误差/%
碳酸镍与水	0.05~0.20	$\alpha=-2.551\times 10^{14}+1.842\ 751\ 033\times 10^{13}\times\Delta p^{0.326}$	0
碳酸钴与水	0.05~0.20	$\alpha=-5.66\times 10^{13}+1.751\ 416\ 576\ 7\times 10^{13}\times\Delta p^{0.187\ 2}$	1
钴酸锂与水	0.03~0.12	$\alpha=0.386\times 10^{13}+289\ 865\ 520\times\Delta p^{1.263}$	0
氢氧化钴与水	0.02~0.08	$\alpha=1.403\times 10^{13}+0.003\ 176\ 553\times\Delta p^{4.261}$	0
钛酸钾与水	0.02~0.08	$\alpha=0.421\times 10^{14}+3.935\ 077\ 667\times 10^{11}\times\Delta p^{0.767}$	0
超细铜粉与水	0.02~0.08	$\alpha=4.93\times 10^{12}-1.123\ 210\ 3\times 10^{15}\times\Delta p^{-0.774}$	0

注:  $\Delta p$  为过滤压差, Pa;  $\alpha$  为滤饼平均体积比阻,  $m^{-2}$ ;  $\alpha_0$  为未压缩滤饼平均体积比阻,  $m^{-2}$ ;  $\lambda$  为单位压差下滤饼平均体积比阻,  $m^{-2}$ ;  $s$  为滤饼压缩性指数,  $0 < s < 1$ 。

压缩性, 存在最佳过滤压差。利用式(1)和实验数据可归纳出滤饼层上下最佳过滤压力差  $\Delta p_i$  的计算公式:

$$\Delta p_i = \left[ \frac{\alpha_0 + \frac{R_m}{\Delta S}}{\lambda(s-1)} \right]^{1/s}, \quad (2)$$

式中:  $\Delta p_i$  为最佳过滤压力差, Pa;  $\Delta S$  为滤饼层的厚度, mm;  $R_m$  为过滤介质的阻力 (滤饼层的厚度达到  $\Delta S$  时的阻力, 不是原滤材的阻力),  $m^{-1}$ 。若  $\frac{R_m}{\Delta S} \leq \alpha$ ,

$\frac{R_m}{\Delta S}$  可忽略不计, 式(2)简化为

$$\Delta p_i = \left[ \frac{\alpha_0}{\lambda(s-1)} \right]^{1/s}。 \quad (3)$$

在微孔过滤中, 随着滤液的流动, 超细颗粒迁移, 其中部分超细颗粒停留并堵塞过滤介质的暗流通道, 使过滤介质的阻力  $R_m$  逐渐增大, 滤饼层的厚度  $\Delta S$  也随着增大。超细粉末的材质不同,  $R_m$  与  $\Delta S$  随着过滤时间  $t$  的增大速率也不同, 所以  $\frac{R_m}{\Delta S}$  是变量。  $\Delta S$  与  $t$  的关系计算公式在 2.3.4 节中给出;  $R_m$  与  $t$  的关系式如下:

$$R_m = 2g\Delta p \frac{A}{\mu} \xi^{\frac{1}{2}} \frac{(t+t_m)^{\frac{1}{2}}}{1 + (\frac{t}{3t_m})^{\frac{1}{2}}}, \quad (4)$$

其中

$$\xi = \frac{\mu\alpha c}{2g\Delta p A^2},$$

$$t_m = \frac{\mu R_{m0}^2}{2g\Delta p \alpha c},$$

式中:  $t$  为累计过滤时间, s;  $A$  为过滤面积,  $m^2$ ;  $\mu$  为滤液黏度, Pa·s;  $\alpha$  为滤饼的平均体积比阻,  $m^{-2}$ ;  $c$  为滤饼(渣)浓度(滤液与滤饼的体积比);  $g$  为重力

加速度,  $m/s^2$ ;  $R_{m0}$  为原过滤介质(滤材)的阻力,  $m^{-1}$ 。  $t$  根据生产要求确定,  $R_{m0}$  由微孔过滤管(板)制造商提供。

### 2.3.2 滤饼层的最佳过滤压力差

滤饼分为可压缩和不可压缩 2 种。不可压缩的滤饼, 无过滤压力差。大多数超细粉末有不同程度的可

过滤面积  $A$  可按以下公式计算:

$$A = \frac{V\alpha c}{\sqrt{R_{m0}^2 + \frac{1.962\Delta p\alpha c t}{\mu}} - R_{m0}}, \quad (5)$$

式中  $V$  为每批过滤的滤液体积,  $m^3$ , 数值根据生产要求确定。

### 2.3.4 平均滤速、过滤时间和滤饼层厚度

滤饼层上下最佳过滤压差  $\Delta p_i$  确定后, 平均滤速  $\bar{\omega}$ 、过滤时间  $t$  和滤饼层厚度  $\Delta S$  分别按以下公式计算:

$$\bar{\omega} = 3\ 600 \left( \sqrt{R_{m0}^2 + \frac{2g\Delta p\alpha c t}{\mu}} - R_{m0} \right), \quad (6)$$

$$t = \frac{\mu\alpha}{2g\Delta p c} \Delta S^2 + \frac{\mu R_{m0}}{g\Delta p c} \Delta S, \quad (7)$$

$$\Delta S = \frac{1}{\alpha} \left( \sqrt{R_{m0}^2 + \frac{2g\Delta p\alpha c t}{\mu}} - R_{m0} \right), \quad (8)$$

式中  $\bar{\omega}$  为平均滤速,  $m^2/(m^2 \cdot h)$ 。

## 2.4 高分子超精密微孔过滤技术

非均相固液过滤分为粗级过滤、亚精密过滤、精密过滤和超精密过滤。表 3 所示为非均相固液过滤的等级和精度<sup>[5]</sup>。过滤精度小于 0.1  $\mu m$ , 归属于均相分离的纳滤、超滤和反渗透。

表 3 非均相固液过滤的等级和精度

过滤等级	粗级	亚精密	精密	超精密
过滤精度/ $\mu m$	>100.0	>10.0~100.0	>1.0~10.0	0.1~1.0

本技术为一种新型的超精密过滤技术及高分子微孔过滤技术,核心技术是超精密微孔滤材(过滤介质)的制造,现已在浙江省温州市东瓯微孔过滤有限公司研发成功,在稀有金属生产中得到广泛应用。滤材是以高分子聚乙烯为主要原料的微孔聚乙烯(PE)与聚酰胺(PA),它们具有以下特点<sup>[6]</sup>: 1)微孔孔径,暗流毛细通道的平均孔径为 2~140  $\mu\text{m}$ ; 2)过滤精度,可达 0.3  $\mu\text{m}$ ,通常为 0.5~5  $\mu\text{m}$ ; 3)回收率,不小于 99.99%; 4)过滤元件形状为板状和管状; 5)过滤元件尺寸,板状直径可达 1 600 mm 以上,厚度可达 50 mm; 管状直径为 13~120 mm,长度可达 2 000 mm; 6)压耐指标,过滤元件尺寸不同,耐压程度也不同,一般耐外压 0.2~0.5 MPa,耐内压 0.4~1 MPa; 7)耐温指标,微孔 PE 耐温低于 80  $^{\circ}\text{C}$ ,微孔 PA 耐温低于 120  $^{\circ}\text{C}$ 。

### 2.5 粉末滤饼的洗涤

粉末滤饼洗涤通常有 2 种方法。1)静止洗涤。静止洗涤的设备结构简单,但是洗涤不均匀,效率低,洗涤液用量大。2)搅拌洗涤。搅拌洗涤的设备结构复杂,但是洗涤均匀,效率高,洗涤液用量小。滤饼洗涤方法需根据具体粉末的特性进行选择。

## 3 设备设计

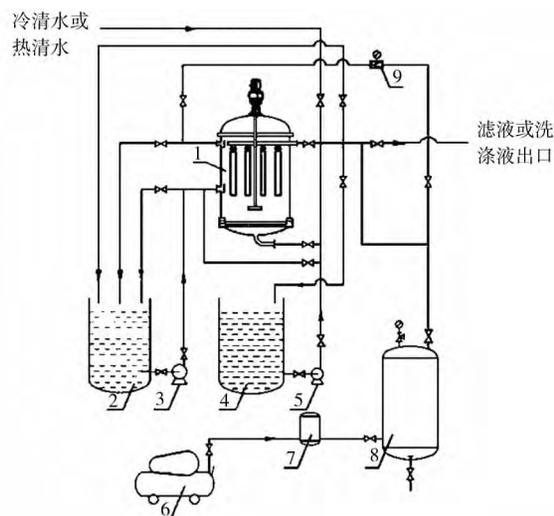
设计的设备为稀有金属超细粉末的超精过滤、搅拌洗涤、滤饼压干、排卸滤饼及微孔再生的一体机(简称一体机)。

首先根据表 2 中不同稀有金属微细粉末滤饼平均比阻和过滤压差的关系,利用最佳压差计算公式(2)或(3),求出滤饼层上下最佳过滤压差值;然后将料浆中的粉末浓度(料浆与粉末的体积比)及滤液黏度等参数代入过滤面积计算公式(5),求出过滤面积  $A$ ;再根据滤饼层厚度计算公式(8),求出过滤介质上面的滤饼层厚度。滤饼洗涤效果与滤饼层厚度、搅拌混合条件、洗涤次数及每次洗涤水用量等因数有关。根据不同滤饼层厚度与不同搅拌混合的条件,经过一定次数的洗涤实验,才能确定洗涤次数和每次洗涤水用量。滤饼压干所需的时间与压力、滤饼层厚度、微细粉末材质有关,由实验测得。

综合上述理论和实验数据,确定一体机的外型总体尺寸、内部结构和排卸滤饼口直径,同时分配过滤、洗涤和压干工艺过程所需的时间。图 1 所示为稀有金属超细粉末过滤、洗涤、回收工作流程与一体机结构。

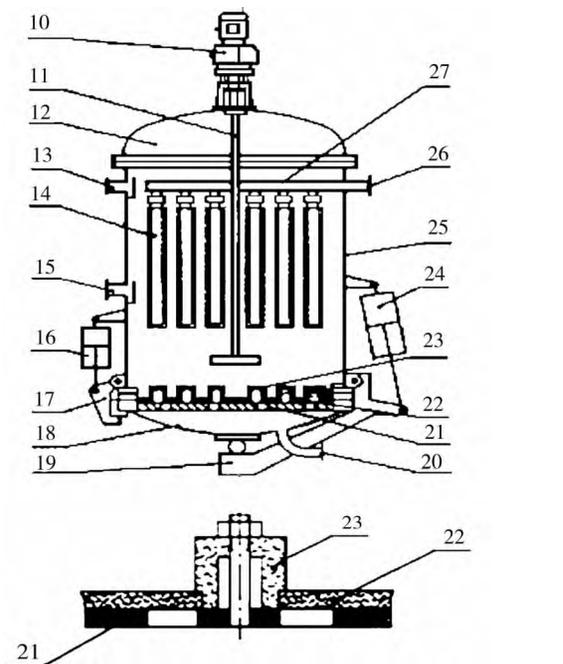
### 3.1 工作流程设计

稀有金属超细粉末过滤洗涤回收的技术方案如下:由微孔过滤、搅拌洗涤、压缩气体正吹、压缩气体反吹及清洗装置等一次性在一个密闭容器内分别完成微孔过滤、搅拌洗涤、滤饼压干、排卸滤饼、清洗与



1—一体机;2—粉末料浆罐;3—料浆输送泵;  
4—洗涤液贮罐;5—洗涤液输送泵;6—空气压缩机;  
7—空气净化器;8—压缩空气贮罐;9—减压阀。

(a) 工作流程



10—调速电机;11—搅拌桨;12—顶盖;13—放空口;  
14—上层刚性微孔过滤立管;15—料浆进口;16—锁紧与脱钩气缸;  
17—锁紧钩;18—底盖;19—底盖关闭支臂;20—下层过滤区滤液出口;  
21—花板;22—下层刚性微孔过滤板;23—下层刚性微孔过滤立管;  
24—底盖启闭气缸;25—筒体;26—上层过滤区滤液出口;27—横排管。

(b) 一体机结构

图 1 稀有金属超细粉末过滤、洗涤、回收工作流程与一体机结构  
Fig. 1 Workflow and structure of all-in-one unit for filtration, washing and recycling of rare metal superfine powders

微孔再生等 5 个工作过程<sup>[7]</sup>。

#### 3.1.1 微孔过滤

启动料浆输送泵 3,将粉末料浆罐 2 中的稀有金属超细粉末料浆压入一体机 1 中。首先通过一体机 1 的上层过滤区刚性微孔过滤立管 14 进行过滤,上层

过滤完成后,来自空气压缩机6的压缩空气经过净化器7、压缩空气储罐8和减压阀9,减压为0.1~0.3 MPa的净化压缩空气从放空口13进入,料浆在压缩空气的压力作用下,强制过滤上层过滤区。当料浆液面下降到上层过滤区无法过滤时,关闭上层过滤区。然后启用下层过滤区,由下层刚性微孔过滤板22和下层刚性微孔过滤立管23组成的复合过滤介质进行过滤,直至过滤结束。

### 3.1.2 搅拌洗涤

一体机采用搅拌洗涤,步骤如下:1)首先启动洗涤液输送泵5,洗涤液从洗涤液储罐4经泵5从下层刚性微孔过滤板22和下层刚性微孔过滤立管23反向暗流通道泵入,使下层刚性微孔过滤板22上面和下层刚性微孔过滤立管23的外圆柱表面的滤饼松开;其次从上层刚性微孔过滤立管14暗流通道反向泵入洗涤液,使滤饼从上层过滤介质表面脱落到下层刚性微孔过滤板22上面,关闭洗涤液输送泵5;再用压缩空气储罐8中的0.3~0.6 MPa的压缩空气进入上层刚性微孔过滤立管14反向暗流通道进行反吹。经过多次反吹,使滤饼完全脱落并松开。2)打开放空口13,将一体机内气体排出,启动搅拌桨11,对下层刚性微孔过滤板23上的滤饼进行搅拌洗涤,以致形成均匀的非均相分散料浆后,停止搅拌。3)0.1~0.3 MPa的压缩空气从放空口13进入一体机内,在压缩空气的作用下,料浆进行分层(上、下)过滤,直至过滤结束。反复循环上述步骤,最后通过滤饼分析,达到符合洗涤质量标准后,才能完成洗涤。

### 3.1.3 滤饼压干

从一体机放空口13压入压缩空气,在压缩空气的压力作用下,将底部的滤饼压干。

### 3.1.4 排卸滤饼

首先通过锁紧与脱钩气缸16使锁紧钩17脱钩,通过底盖启闭气缸24打开底盖18,然后来自压缩空气储罐8的压缩空气反吹上、下层过滤介质中的暗流毛细通道,使滤饼脱落到一体机外的盛放容器里。排卸滤饼结束后,关闭底盖18并使之压紧和锁紧。

### 3.1.5 清洗与微孔再生

微孔再生方法有物理清洗再生和化学清洗再生<sup>[8]</sup>。物理清洗将热或冷水反压入上、下过滤区的过滤介质中暗流毛细通道进行清洗,再将压缩空气反吹入各层过滤介质中暗流毛细通道,使堵塞在其中的超细颗粒被洗、吹出去,微孔获得再生,如图1(a)所示。重复上述步骤若干次,使过滤介质内部的微孔再生完毕。经过物理清洗后,若过滤介质内部的微孔无法完全获得再生时,可采用化学清洗。化学清洗液储罐(图中未标示)与过滤机进行密闭循环,清洗时间视不同材

质粉末性质来确定。化学清洗再生结束后,再用清水冲洗,备用。

## 3.2 结构设计

设计的一体机结构分筒体内、外2部分,如图1(b)所示<sup>[7]</sup>。筒体外部结构包括调速电机、底盖开闭装置、接口、支座和吊耳等。筒体内部结构主要由微孔过滤装置、搅拌洗涤装置、压缩气体反吹通道及清洗反压通道等组成。

### 3.2.1 微孔过滤装置

为了满足不同高度液位的过滤要求,同时充分利用筒体内的有效空间及过滤面积的最大化,微孔过滤装置分上、下2层,如图1(b)所示。上层过滤区包括若干条上层刚性微孔过滤立管14、横排管27和上层过滤区滤液出口26;下层过滤区由下层刚性微孔过滤立管23、下层刚性微孔过滤板22、花板21和下层过滤区滤液出口20等组成。

### 3.2.2 搅拌洗涤装置

根据稀有金属超细粉末的特性,滤饼洗涤方法选择搅拌洗涤。搅拌洗涤装置由搅拌装置和洗涤装置2部分组成。搅拌装置包括调速电机10和搅拌桨11,如图1(b)所示。调速电机10安装在顶盖12上,搅拌桨14置于筒体25内。搅拌速度根据洗涤要求来决定,并由调速电机10进行调节。洗涤装置包括图1(a)中的洗涤液储罐4、洗涤液输送泵5和图1(b)中的上、下层过滤区的过滤介质中反向暗流毛细通道。

### 3.2.3 压缩气体反吹装置

压缩气体反吹装置包括图1(a)中空气压缩机6、空气净化器7、压缩空气储罐8、减压阀9和图1(b)中的上、下层过滤区的过滤介质中反向暗流毛细通道。

### 3.2.4 排卸滤饼装置

滤饼积淀到一定厚度时,要定期排卸。根据立式一体机的结构特点,打开底盖排卸较方便。排卸滤饼装置由底盖开闭装置和压缩气体反吹装置2部分组成。底盖开闭装置包括锁紧与脱钩气缸16、锁紧钩17、底盖18、底盖开闭支臂19、底盖启闭气缸24<sup>[9]</sup>,如图1(b)所示。压缩气体反吹装置前文已介绍。

### 3.2.5 清洗与微孔再生装置

过滤介质的阻力随着过滤时间的延长而增大。经过相当长时间的过滤,过滤介质内部的蜂窝状暗流微孔通道会被堵塞,过滤介质的阻力增大,过滤速度变小。当过滤速度达不到要求时,要进行清洗,使过滤介质内部的蜂窝状暗流微孔通道再生<sup>[10]</sup>。清洗与微孔再生装置由物理清洗、化学清洗和压缩气体反吹装置3部分组成。物理清洗装置由热或冷清水管道和上、中、下层过滤区的过滤介质中反压暗流毛细通道组成;化学清洗装置主要是与过滤机进行密闭循环的化学清

洗液缸(图中未标示);压缩气体反吹装置在前文中已介绍。

#### 4 结论

稀有金属超细粉末过滤、洗涤、回收技术提高了回收率,减少了资源流失;设备为集超精过滤、搅拌洗涤、滤饼压干、排卸滤饼及微孔再生的一体机,自动化程度高,工艺与操作简单,减轻了劳动强度,提高了生产效率。目前,该技术已获多项国家专利,同时获科技部科技型中小企业技术创新基金项目立项,资助科研经费 60 万元。该技术与设备将在市场中得到广泛应用,以改变我国稀有金属粗放型加工、任意流失、资源匮乏、环境恶化的局面。

#### 参考文献 (References):

[1] 中国稀土网. 香山科学会议召开第 377 次学术讨论会: 共商中国稀

土资源的高效提取与循环利用[J]. 稀土信息, 2010 (7): 5.

- [2] 宋显洪, 宋志黎, 陈金富. 稀有金属超细粉体的精密微孔过滤[J]. 稀有金属与硬质合金, 2009, 37 (3): 48-51.
- [3] 张有新, 赵中伟, 陈爱良, 等. 精密微孔过滤器在超细粉末过滤与洗涤应用[J]. 有色金属: 冶炼部分, 2008 (5): 47-49.
- [4] 宋显洪, 宋志黎. 金属与金属化合物超细粉体的微孔过滤[J]. 化工装备技术, 2012, 33 (2): 18-22.
- [5] 宋显洪, 宋志黎. 高分子精密微孔过滤技术[C]// 中美国际过滤与分离技术研讨会, 2009.
- [6] 温州市东瓯微孔过滤有限公司. 一种微孔板: 中国, ZL200810184815.4[P]. 2009-05-20.
- [7] 温州市东瓯微孔过滤有限公司. 制备金属或非金属细颗粒粉末的过滤与洗涤工艺: 中国, 200510056166.6 [P]. 2007-02-08.
- [8] 胡世杰, 高斌, 宋显洪. 卧式超细粉体过滤洗涤压干机[J]. 轻工机械, 2010, 28 (3): 78-81, 85.
- [9] 陈崇炯. 压力容器快开门安全锁紧装置的设计[J]. 工程设计学报, 2012, 19 (1): 67-70, 80.
- [10] 陈崇炯, 陈金富, 宋志骥. 草甘膦反应过滤一体机的设计[J]. 化工进展, 2011, 30 (12): 2793-2798.

(上接第 24 页)

#### 3 结论

1) 自行研发的上升层流水力分级装置通过调整多孔陶瓷模块结构和水流速度, 能实现稳定、均匀的层流力场。

2) 在层流状态下, 流体速度为 2.5、2.0 m/h 时, 在不同高度的取料口处获得平均粒径分别为 0.86、0.75、0.50、0.40  $\mu\text{m}$  的分级产物, 实现  $\beta\text{-SiC}$  超微粉体的精细分级。

3) 该分级方法可用于其他超微粉体的精细分级, 也有望通过进一步研究, 实现纳米粉体的分级。

#### 参考文献 (References):

[1] 郑水林. 超微粉体加工技术与应用[M]. 北京: 化学工业出版社,

2005.

- [2] ARAVINTH S, SANKAR B, KAMARAJ M, et al. Synthesis and characterization of hexagonal nano tungsten carbide powder using multi walled carbon nanotubes[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2012, 33: 53-57.
- [3] DASTJERDI R, MONTAZER M. A review on the application of inorganic nano-structured materials in the modification of textiles: focus on anti-microbial properties[J]. Colloids and Surfaces: B: Biointerfaces, 2010, 79 (1): 5-18.
- [4] LI Pingjun, WANG Qizhi, SHI Shaofang. Differential scheme for the effective elastic properties of nano-particle composites with interface effect[J]. Computational Materials Science, 2011, 50: 3230-3237.
- [5] 孙成林. 我国超细粉碎与超细分级技术的现状及问题[J]. 硫磷设计与粉体工程, 2002 (6): 4-10.
- [6] 张景松. 流体力学[M]. 北京: 中国矿业大学出版社, 2001.