文章编号: 1004-0609(2014)04-1070-06

锌冶炼含镉烟尘制备高纯镉粉的新工艺

刘 远,郑雅杰,孙召明

(中南大学 冶金与环境学院, 长沙 410083)

摘 要:采用硫酸浸出锌冶炼含镉烟尘,得到含镉硫酸浸出液,在硫酸镉浸出液中加入双氧水和 FeCl₃溶液,用 NaOH 溶液调节 pH 值后过滤,将滤液加入 NaOH 溶液中得到 Cd(OH)₂ 粉体,采用氢气还原得到镉粉。结果表明:当硫酸浓度为 110 g/L、反应温度为 65 ℃时,镉浸出率达 99.63%。双氧水用量为理论量 10 倍、*n*(Fe)/*n*(As)为 3:1、 pH=5.5 时,砷的去除率达 99.5%,得到净化的硫酸镉溶液。将硫酸镉溶液以缓慢加料方式加入浓度为 2 mol/L 的 NaOH 溶液中,反应温度为 25 ℃,控制终点 pH=10,过滤洗涤得到粒径为 10~20 µm 的 Cd(OH)₂ 粉体,采用氢气还原 Cd(OH)₂ 粉体,在反应温度为 310 ℃、反应时间 120 min、氢气流量 40 L/h 时,得到平均粒径为 49.61 µm 的 球形镉粉。

关键词: 焙烧烟尘; 除杂; 化学沉淀法; 氢气还原; 镉粉; 锌冶炼中图分类号: TF114.1文献标志码: A

New technology of high purity Cd powder prepared from roasting dust of zinc smelting

LIU Yuan, ZHENG Ya-jie, SUN Zhao-ming

(School of Metallurgy and Environment, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: The CdSO₄ solution was prepared by leaching roasting dust of zinc smelting with sulfuric acid, then, the CdSO₄ solution was purified by adding hydrogen peroxide and ferric chloride and adjusting pH with sodium hydroxide. Cd(OH)₂ powder was prepared after the purified CdSO₄ solution mixed with NaOH solution, then, reduced with hydrogen. The results show that the leaching rate of Cd reaches 99.63% under the condition of H₂SO₄ concentration of 110 g/L, reaction temperature of 65 °C. Under the condition that n(Fe)/n(As) is 3:1 and pH is 5.5, the removal rate of As can be higher than 99.5%. The obtained Cd(OH)₂ particle size is 10–20 µm when the reaction temperature is 25 °C, pH value of the solution is 10. High purified Cd powders were prepared from Cd(OH)₂ particles reduced by hydrogen. The optimum process conditions are as follows: reaction temperature is 310 °C, reaction time is 120 min and hydrogen flow is 40 L/h. The average particles size of spherical Cd powder is about 49.61 µm.

Key words: roasting dust; impurity; chemical precipitation; hydrogen reduction; Cd powder; zinc smelting

镉因其独特的物理和化学性质,使镍镉电池以高 功率系数、长循环寿命、快速充电能力在军用无人机、 通信电台和夜视仪等电子产品中得到广泛应用^[1-2],近 年来,镉在光电半导体材料^[3-5]方面的应用前景使高纯 镉粉的制备研究受到广泛重视。镉资源在自然界中存 在于锌矿、铅锌矿和铜铅锌矿中,在浮选时大部分进 入锌精矿,在焙烧过程中富集于烟尘和高镉锌中^[6-7]。 我国火法炼锌厂和铜铅冶炼厂含镉物料经焙烧脱除 砷、锑等杂质,得到浸出性能良好的焙砂,再用硫酸 浸出^[8-11],浸出液经氧化水解脱除铁、砷等杂质,净 化后含镉溶液用锌粉置换得到海绵镉^[12],在铸铁锅内 于熔融烧碱保护下,铸成粗镉锭。此法存在工艺流程

基金项目: 广东省科技厅资助项目(2011B0508000033)

收稿日期: 2013-07-09; 修订日期: 2013-09-12

通信作者:郑雅杰,教授,博士;电话: 0731-88836285; E-mail: ZYJ@csu.edu.cn

1071

繁琐、生产周期长、能耗高且锌粉消耗量大,而回收 的镉纯度低,限制了镉的生产和应用^[13]。精镉是由粗 镉经电解精炼法[14]或蒸馏法[15-16]进一步提纯得到。电 解精炼法生产精镉其电流效率低、电耗大、周期长、 成本高、电解沉积物不稳定,仍需进一步火法精炼[17]。 蒸馏法采用精馏塔分离高沸点杂质制备粗镉,再进行 碱性精炼得到精镉,其设备简单,生产控制方便,在 我国锌冶炼厂普遍采用,但其精镉产出率低,镉与残 渣分离不彻底,存在二次污染和镉中毒隐患[18]。精镉 制备镉粉的方法有等离子还原法[19]、电化学法[20-21]、 蒸发法[22]等。这些方法生产镉粉制备工艺周期长、温 度高, 镉粒在此过程中易长大, 通常得不到超细镉粉。 本文作者以锌冶炼含镉烟尘为原料,采用硫酸浸出, 氧化中和除杂,氢氧化钠沉淀,氢气还原氢氧化镉制 备球形高纯镉粉,与其他制备高纯金属镉方法相比, 该工艺流程简单、环境友好、产品纯度高,且直接得 到微米级球形镉粉,其市场应用广泛。

1 实验

1.1 实验原料

以河南某公司锌焙烧烟尘为原料,其主要元素含 量如表1所列。硫酸(AR)、H₂O₂(AR)、FeCl₃(AR)、氢 氧化钠(AR)、氢气(高纯, w(H₂)>99.99%)。

表1 锌焙烧烟尘主要元素含量

Table 1Main chemical components of roasting dust (massfraction, %)

Pb	Cd	Zn	Cu	Fe	As	Κ	Na
42.45	18.32	0.20	0.09	0.02	0.05	0.99	0.08

1.2 实验步骤

浸出:将去离子水与硫酸按比例配好置于三口烧 瓶中,启动加热套加热至所需温度,在搅拌下将锌焙 烧烟尘缓慢加入,反应一定时间后过滤,得到硫酸浸 出液。

除杂: 在浸出液中加入 H₂O₂ 使 As(III)氧化为 As(V),按照一定的 n(Fe)/n(As)加入 FeCl₃ 溶液,在搅 拌下将 NaOH 加入到浸出液中,调节溶液 pH,使 As、Fe、Cu 和 Pb 沉淀除去,得到硫酸浸出净化液,即硫酸镉溶液。

氢氧化镉粉体的制备: 以净化液为原料配制 0.5mol/L 的硫酸镉溶液, 在连续搅拌下向硫酸镉溶液

中加入 NaOH 溶液,发生如下反应:

$$CdSO_4 + NaOH = Cd(OH)_2 \downarrow + Na_2SO_4$$
(1)

在室温下反应一段时间后,将沉淀物过滤,多次 洗涤,在75℃下干燥10h,得到氢氧化镉微粉。

镉粉的制备:将氢氧化镉粉体置于程控管式炉中, 通入 N₂ 保护,控制一定温度,在氢气中还原得到镉粉。 锌冶炼含镉烟尘制备高纯镉粉流程如图 1 所示。



图1 锌冶炼烟尘制备高纯球形镉粉工艺流程图

Fig. 1 Flow chart for preparation of spherical Cd powder from roasting dust of zinc smelting

1.3 分析与检测

采用电感耦合等离子光谱仪(Intrepid II XPS)分析物料中杂质含量;采用日本 Rint-2000 型 X 射线衍射仪分析样品的物相组成;采用扫描电镜(SEM、JEOL、JSM-5600LV)对样品的形貌进行分析表征;采用激光粒度分析仪(Mastersizer 2000)对产物的粒度进行分析表征。

2 结果与讨论

2.1 锌焙烧烟尘硫酸浸出除杂

实验采用硫酸浸出含镉烟尘,反应温度为65℃, 液固比为6:1,硫酸浓度为110g/L,反应时间为30 min。在此条件下硫酸浸出滤液中各元素含量如表2 所列,镉的浸出率达到99.63%。

表2 锌焙烧烟尘硫酸浸出液中元素的含量

Table 2	Elements content in sulfuric acid leaching solution of
zinc roast	ing dust (mg/L)

As(III)	As(V)	Cu	Fe	Pb	Zn	Cd	-
470	750	82	8.9	5.9	330	39 500	

氧化镉溶于硫酸的反应方程式为

$$CdO+2H^{+} = Cd^{2+} + H_2O$$
⁽²⁾

当氧化镉溶解反应达到平衡时,其平衡常数如下:

$$K = a_{Zn^{2+}} / a_{H^+}^2$$
(3)

在标准状态下,反应的标准吉布斯自由能变化为

$$\Delta G_{\rm r}^{\Theta} = -RT \lg K \tag{4}$$

根据热力学数据表可知, $\Delta G_{\rm r}^{\Theta} = -86.10 \, \text{kJ/mol}$,则标准状态下反应的平衡常数为

$$\lg K = \frac{-86.10 \times 1000}{RT} = 34.8$$

K = 10^{34.8} (5)

热力学计算表明,氧化镉在酸性溶液中反应趋势 很大,反应在达到平衡状态时,在较小的H⁺浓度下, 可以存在很高浓度的Cd²⁺。铅主要以硫酸铅存在,在 硫酸介质中不溶解,大部分进入渣中,As、Zn、Fe、 Cu 主要以氧化物存在,在酸性条件下易溶解进入溶 液,为得到纯净的硫酸镉溶液,需深度除杂。

2.2 锌焙烧烟尘硫酸浸出液除杂

在室温下加入理论量 10 倍的 30%双氧水,反应 5 min 后加入 FeCl₃ 溶液,溶液中 n(Fe)/n(As)=3,加入 NaOH 调节溶液 pH 为 5.5,反应时间 30 min,过滤得 硫酸镉滤液,砷的脱除率达 99.5%。滤液中杂质含量 如表 3 所列。

表3 硫酸浸出净化液中杂质含量

 Table 3
 Impurities of purification sulfuric acid leaching solution (mg/L)

Zn	Pb	Cu	Ag	As	Fe
0.6	0.2	0.1	0.3	0.2	0.3

将浸出液中和到一定的 pH,则发生以下水解反应:

$$Me^{n^{+}}+nOH^{-} = Me(OH)_{n} \downarrow$$
(6)

水解平衡时:

$$a_{\mathrm{Me}^{n_{+}}} \cdot a_{\mathrm{OH}^{-}}^{n} = K_{\mathrm{ap}} \tag{7}$$

 $a_{\rm OH^-} \cdot a_{\rm H} = K_{\rm w} \tag{8}$

$$a_{\text{Me}^{n+}} \cdot (K_{\text{w}} / a_{\text{H}^{+}}) = K_{\text{ap}}$$
 (9)

$$\lg a_{\mathrm{Me}^{n+}} = \lg K_{\mathrm{ap}} - n \lg K_{\mathrm{w}} - n \mathrm{pH}$$
(10)

式中:
$$K_{ap}$$
为水溶液中 Meⁿ⁺与 OH 的活度积; K_{w} 为水

的离子积,常温下近似等于 1×10⁻¹⁴。氢氧化物沉淀时,杂质离子的平衡 pH 值如表 4 所列^[23]。

表4 25 ℃时杂质离子的平衡 pH 值^[23]

Table 4	Equilibrium	pH value	e of impurit	v ions a	at 25 °C ^[23]
I abit I	Lyumonum	pri vuiu	s or mipunt	y 10115 (

Me ^{<i>n</i>+}	Cu ²⁺	Fe ³⁺	Zn^{2+}	Pb^{2+}
pН	4.37	1.53	5.65	6.22

在 pH=5.5 时,大部分杂质元素水解沉淀而除去, 在砷酸盐沉淀过程中,发生如下反应:

$$AsO_2^{2-} + H_2O_2 + H^+ = H_3AsO_4$$
 (11)

$$H_{3}AsO_{4}+Fe^{3+} = FeAsO_{4}\downarrow + 3H^{+}$$
(12)

对水解沉淀而言,同一变价金属的高价离子比低 价离子容易水解,改变其价态可以改变其在水解过程 的行为,因此加 H₂O₂使 As(III)氧化为 As(V),促使 溶液中砷离子完全沉淀,FeAsO₄的溶度积为 5.7×10^{-21} ,Fe(OH)₃的溶度积为 4×10^{-38} ,调节溶液 pH 可实现砷和铁同时去除,而 Fe³⁺水解生成的 Fe(OH)₃胶体沉淀,也能吸附部分杂质元素。

2.3 氢氧化镉粉体的制备

慢速加料法是在反应开始前,将 0.5 mol/L 的硫酸 镉溶液以 5 mL/min 的流量通过蠕动泵加入 2 mol/L 的 NaOH 溶液中,搅拌速度为 400 r/min,控制反应终点 pH=10,反应结束后,过滤、洗涤得到氢氧化镉粉体。 快速加料法是将 0.5 mol/L 硫酸镉溶液和 2 mol/L 氢氧 化钠溶液快速混合加入反应器中,之后操作与慢速加 料法相同。图 2(a)所示为快速混料方式得到的氢氧化 镉粉体形貌。图 2(b)所示为缓慢加料方式得到的氢氧

由图 2(a)可以看出,氢氧化镉呈絮状,分散性差, 团聚严重,使一部分颗粒粒径很大,另一部分颗粒粒 径又很小。从图 2(b)可以看出,缓慢加料法得到的氢 氧化镉分散性好,粒径分布集中,团聚不严重。表明 通过缓慢加料法得到的氢氧化镉具有更好的形貌,因 为在缓慢加料过程中,反应物的加入速度很慢,反应 产物过饱和度较低,不利于晶粒的生长和晶核的形成, 整个反应过程中形成的晶核数量较少^[23]。

慢速加料法得到 Cd(OH)₂ 的 XRD 谱如图 3 所示。 由图 3 可看出,通过化学沉淀法制备的 Cd(OH)₂ 为六 方晶系,并且从谱图上观察不到杂相峰存在,产物为 Cd(OH)₂ 晶体。



图 2 不同加料方法得到的氢氧化镉 SEM 像

Fig. 2 SEM images of Cd(OH)₂ prepared by different feeding rates: (a) Rapid feeding method; (b) Slow feeding method





Fig. 3 XRD patterns of $Cd(OH)_2$ prepared by sodium hydroxide precipitation

2.4 氢气还原氢氧化镉制备高纯镉粉

2.4.1 还原温度对还原产物及其形貌的影响

称取烘干的 Cd(OH)₂ 粉末置于程控管式炉中,通入 N₂ 赶走空气后通入 H₂,在一定温度下反应时间为 120 min。不同反应温度时,产物 XRD 实验结果如图 4 所示。



图 4 不同温度还原产物的 XRD 谱

Fig. 4 XRD patterns of products at different reduction temperatures: (a) 250 $^{\circ}$ C; (b) 280 $^{\circ}$ C; (c) 310 $^{\circ}$ C; (d) 340 $^{\circ}$ C

由图 4 可知,产物的衍射峰尖锐,随着温度的升高,Cd 粉衍射峰逐渐变窄,且峰强逐渐增强,Cd 晶粒沿某一晶面高度生长,结晶从无序趋向有序,温度的升高使晶粒长大。在温度低于 310 ℃时,除含有主物相 Cd(密排六方结构)外,产物中混有粒径不同的呈现黄灰色的 CdO,CdO 的产生是由于还原温度未达到Cd 粉的还原温度,因此,一部分 CdO 尚未完全反应还含有 CdO 相,说明在还原温度比较低的时候Cd(OH)₂前驱体粉一部分转换为 CdO,且并未完全还原。在 310 ℃以上还原得到的 Cd 粉纯度高,在温度为 310 ℃和 340 ℃时,CdO 相消失,Cd(OH)₂ 粉末完全还原,产物为纯净的 Cd 粉。当还原温度超过镉的熔点后,镉粉熔化长大成镉粒,粒径显著增加,为了得到粒径均匀的镉粉,采用还原温度应控制在 300~310 ℃。

图 5 所示为不同还原温度得到产物的 SEM 像。 由图 5 可知,氢气还原 Cd(OH)₂ 得到的产物呈球形, 表面光滑,温度 310 ℃比 340 ℃时得到的颗粒细小, 无团聚现象。

对还原温度为 310 和 340 ℃的样品进行粒度分 析,当还原温度为 310 和 340 ℃时,镉粉平均粒径分 别为 49.61 和 76.09 µm,随着还原温度的升高,分布 在粗粒区的颗粒增多,说明温度升高促进还原产物 Cd 晶粒的长大,与 SEM 像结果一致。

氢气还原 Cd(OH)₂粉末的过程就是 Cd 晶粒形核、 长大、生长的过程。在还原过程中,先形成 Cd 晶核, 随着还原的进行,新核不断生成,旧核不断长大,尺 寸小的晶粒具有的应变能比尺寸大的晶粒的应变能大





得多,为了尽可能地减小体系的总自由能而使结构趋于稳定,尺寸小的晶粒就自发合并成尺寸大的晶粒, 在外界提供热量的情况下,界面附近的晶核发生扩散 生长而使晶粒长大,当反应温度过低时,提供晶核扩 散生长的能量不足,不能将其完全还原,产物中存在 CdO物相,因此,需要升高还原温度使反应完全,但 是随着反应温度的升高,晶粒的生长和镉的融化使其 形成较大的颗粒,为了减小产物粒径,应严格控制还 原温度。

2.4.2 还原时间对产物及粒度的影响

在其他条件不变,当还原温度为310 ℃时,还原 时间对产物物相的影响如图6所示。从图6可知,当 还原时间小于120 min 时,还原产物中除了含有 Cd 外,还含有 CdO 相,说明 CdO 未还原完全;当还原 时间大于120 min 时,各还原产物的 XRD 谱均显示出 单一的密排六方型 Cd 的衍射峰,且峰形尖锐。还原 时间对制备纯净的 Cd 粉有较大的影响,随着还原时 间的增加,烧结的作用越来越明显,其衍射峰高增加, 峰宽变窄,镉粉的结晶度更好。

激光粒度仪分析表明,还原时间为 60、120 和 180 min 时产物平均粒径分别为 38.76、49.61 和 73.25 μm。 在一定的还原温度下,晶粒的尺寸符合 D_i=ct^{1/2},即晶 粒的平均直径与时间的平方根成正比,产物的平均尺 寸随着反应时间的增加而增加,由晶粒聚集的颗粒也 增大,随着还原时间的延长,细颗粒发生团聚,粗粒 区的颗粒逐渐增加,镉粉的粒径明显变大,在保证镉 粉质量的同时应尽量减少反应时间控制镉粉粒径。



图 6 不同还原时间产物的 XRD 谱



3 结论

1) 以锌冶炼含镉烟尘为原料,采用硫酸浸出得到 含镉浸出液,加入理论量 10 倍双氧水,n(Fe)/n(As)=3, 调节 pH=5.5,过滤得到净化的硫酸镉溶液。将 0.5 mol/L 的硫酸镉溶液以 5 mL/min 的缓慢加料速度加入 2 mol/L 的 NaOH 溶液,终点 pH=10,过滤洗涤烘干, 得到平均粒径为 10.56 μm 的氢氧化镉粉体。

2) 采用 H₂还原 Cd(OH)₂ 前驱体制备高纯镉粉, 还原温度和还原时间对产物结构和粒径影响较大,在 还原条件为还原温度 310 ℃,还原时间 120 min,氢 气流量 40 L/h 时,成功制备平均粒径为 49.61 μm 的球 形镉粉。

REFERENCES

- ZHU Jian-xin, LI Jin-hui, NIE Yong-feng, YU Bo. Recovery of cadmium by high temperature vacuum evaporation from Ni-Cd batteries[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2003, 13(2): 254–257.
- [2] 张 金, 王伯雄, 叶丽娜. 便携式军用镍镉电池智能检测与 充电装置设计与实现[J]. 电子测量与仪器学报, 2010, 24(4): 359-364.

ZHANG Jin, WANG Bo-xiong, YE Li-na. Design and

development of portable intelligent testing and charging equipment for nickel-cadmium battery[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2010, 24(4): 359–364.

- [3] HU Bao-yun, JING Zhen-zi, HUANG Jian-feng, YUN Jun. Synthesis of hierarchical hollow spherical CdS nanostructures by microwave hydrothermal process[J]. Transaction of Nonferrous Metals Society of China, 2012, 22(S1): s89–s94.
- [4] 曹维良,张凯华,张敬畅. 纳米硫化镉制备条件对光催化活性的影响[J]. 北京化工大学学报,2004,31(1):66-70.
 CAO Wei-liang, ZHANG Kai-hua, ZHANG Jing-chang. Effects of conditions for preparation of nano-CdS on photocatalysis activity[J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology, 2004, 31(1): 66-70.
- [5] WANG Tao, JIE Wan-qi, XU Ya-dong, ZHA Gang-qiang, FU Li. Characterization of CdZnTe crystal grown by bottom-seeded Bridgman and Bridgman accelerated crucible rotation techniques[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2009, 19(S3): s622–s625.
- [6] SADEGH S M, BAFGHI M S, MORADKHANI D, OJAGHI I M. A review on hydrometallurgical extraction and recovery of cadmium from various resources[J]. Minerals Engineering, 2007, 20: 211–220.
- [7] 何 静, 唐谟堂, 刘 维. 氨法浸出提镉新工艺[J]. 化工学报, 2006, 57(7): 1727-1731.
 HE Jing, TANG Mo-tang, LIU Wei. New process for extracting cadmium by ammonium-ammonia method[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2006, 57(7): 1727-1731.
- [8] 成应向,刘喜珍,漆 燕,王强强,许友泽,钟振宇.有色冶 炼铜镉渣中镉的提取工艺研究[J].环境工程,2012,30: 331-334.

CHENG Ying-xiang, LIU Xi-zhen, QI Yan, WANG Qiang-qiang, XU You-ze, ZHONG Zhen-yu. Process research of extracting cadmium from non-ferrous copper and cadmium slag[J]. Environmental Engineering, 2012, 30: 331–334.

- [9] 齐美富, 乐红燕, 方小刚. 次氧化锌烟尘中镉的硫酸浸出动 力学研究[J]. 能源与环境, 2009(5): 14-15.
 QI Mei-fu, LE Hong-yan, FANG Xiao-gang. Study of cadmium sulfuric acid leaching kinetics from zinc oxide dust[J]. Energy and Environment, 2009(5): 14-15.
- [10] WANG De-quan, JIANG Lan, LIN Mao-shen. Treatment of cadmium dust with two-stage leaching process[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2000, 20(2): 267–269.
- [11] JHA M K, KUMAR V, SINGH R J. Review of the hydrometallurgical recovery of zinc from industrial wastes[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2001, 33: 1–22.
- [12] 范兴祥,杨 卜. 某含锌镍镉烟尘元素分离及其产品制备工 艺研究[J]. 矿产综合利用, 2009(4): 14-15.
 FAN Xing-xiang, YANG Bo. Research on the technologies for separating valuable elements from the fly ash bearing Zn, Ni and Cd and preparing relative products[J]. Multipurpose Utilization

of Mineral Resources, 2009(4): 14-15.

 [13] 彭容秋. 有色金属提取冶金手册(锌镉铅铋)[M]. 北京: 冶金 工业出版社, 1992.
 PENG Rong-qiu. Hand-book on extractive metallurgy of

No-ferrous metals (Zn, Cd, Pb, Bi)[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1992.

- [14] 邹小平, 汪胜东, 蒋训雄, 蒋应平, 王海北, 刘三平. 铜镉渣 提取镉绵工艺研究[J]. 有色金属: 冶炼部分, 2010(6): 2-5. ZOU Xiao-ping, WANG Sheng-dong, JIANG Xun-xiong, JIANG Ying-ping, WANG Hai-bei, LIU San-ping. Process optimization research of extracting cadmium sponge from copper and cadmium residue[J]. Nonferrous Metals: Extractive Metallurgy, 2010(6): 2-5.
- [15] 杜新玲,张 欣,马科友. 精镉的工业化生产[J]. 中国有色冶 金,2010(1):25-29.
 DU Xin-ling, ZHANG Xin, MA Ke-you. Industrialized production of pure cadmium[J]. China Nonferrous Metallurgy, 2010(1):25-29.
- [16] 號振强.真空蒸馏工艺生产镉的实践及改造[J]. 矿业工程, 2006, 26(3): 50-52.
 GUO Zhen-qiang. Practices and transformation of production of cadmium by vacuum distillation process[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2006, 26(3): 50-52.
- [17] HIRSCH H E, LIANG S C, WHITE A G. Chapter 2 preparation of high-purity cadmium, mercury, and tellurium[J]. Semiconductors and Semimetals, 1981, 18: 21–45.
- [18] 邹学付,陈卫华. 火法生产精镉工艺[J]. 技术与设备, 2007(9):
 22-23.
 ZOU Xue-fu, CHEN Wei-hua. Preparation of refined cadmium

by pyrometallurgical process[J]. Technology and Equipment, 2007(9): 22-23.

- [19] FUTAKI S, SHIRAISHI K, UEMURA M. Ultrafine refractory metal particles produced by hybrid plasma process[J]. Journal of the Japan Institute of Metals, 1992, 56(4): 4–64.
- [20] VISWANATH S G, SAJIMOL G. Electrowinning of cadmium powder from glycerol and sulphuric acid—Study of morphology and nano-nature of the powder[J]. Metallurgija, 2010, 16(1): 25–38.
- [21] JAVIER M G, JOSE M B. Removal of cadmium and production of cadmium powder using a continuous undivided electrochemical reactor with a rotating cylinder electrode[J]. Journal of Chemical Technology and Biotechnology, 2002, 77(4): 465–472.
- [22] HATA Y, ONOUE M, SASAKI M, SENZAKI H, SUMIDA M, TANAKA J. Process for preparing metallic cadmium powder: US 5505761 A[P]. 1996–04–09.
- [23] 李洪桂. 冶金原理[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 329.
 LI Hong-gui. Metallurgical theory[M]. Beijing: Science Press, 2007: 329.

(编辑 李艳红)