

# 新能源硅产业碳化硅切割废料回收利用研究进展

铁生年<sup>1</sup>, 侯思懿<sup>1</sup>, 汪长安<sup>1,2</sup>, 王涛<sup>1</sup>

1. 青海大学非金属材料研究所, 西宁 810016
2. 清华大学材料科学与工程系, 北京 100081

**摘要** 随着硅片需求量迅速增加, 其在切割过程中使用切割液形成了大量的切割废液。对新能源硅产业生产切割技术概况、碳化硅切割废料在线回收工艺和离线回收工艺进行论述。重点介绍切割废液离线回收工艺中的物理法和化学法及研究展望。结果表明, 国内外对切割废液的回收利用从单一回收碳化硅到综合回收碳化硅、聚乙二醇和硅已成为发展的趋势。切割废液的离线回收工艺中物理法具有能耗小、工艺简单、设备造价低和易于工业化等优点。其中选择有效的捕收剂利用泡沫浮选技术分离方法, 操作简单, 分离效率高, 具有潜在应用价值, 是当前研究重点。化学法通过原料的转化, 在制得新产品同时回收碳化硅物料, 物料回收纯度高, 具有一定的潜力, 需要作进一步研究。

**关键词** 新能源硅产业; 碳化硅切割废液; 回收利用

**中图分类号** TQ174

**文献标志码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.04.011

## Research Progress of Silicon Carbide Cut Waste Recycling in New Energy Resource Silicon Industry

TIE Shengnian<sup>1</sup>, HOU Siyi<sup>1</sup>, WANG Chang'an<sup>1,2</sup>, WANG Tao<sup>1</sup>

1. Nonmetal Materials Institute, Qinghai University, Xining 810016, China
2. Department of Materials Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100081, China

**Abstract** With the rapidly increasing demand of the silicon wafer, due to the use of the cutting fluid in the cutting process, a large amount of cutting waste liquid will be produced. This paper reviews the researches of the production and cutting techniques, the online recycling process and the offline recycling process of the silicon carbide cutting waste in the new energy resource silicon industry, with focuses on the physical and chemical methods in the offline recycling process used to recycle the cutting waste liquid. It is shown that the comprehensive recovery of the silicon carbide, the polyethylene glycol and the silicon, instead of only recycling the silicon carbide, is the trend. The physical methods in the offline process have advantages of low energy consumption, simple process, low-cost equipment and easiness for industrialization. Among the physical methods, the separation method of the electing effective collector and using the forth floatation technology is simple to operate and enjoys a high separation efficiency, and it becomes the key of the current research. The chemical methods depend on the transformation of the raw materials to produce the new product and to recycle the silicon carbide at the same time. The recovered materials have a high purity. This method has potential applications and deserves further researches.

**Keywords** new energy resource silicon industry; silicon carbide cutting waste liquid; recycle

### 0 引言

随着石油和煤炭等传统能源日益减少, 能源危机迫在眉睫, 而太阳能因用之不竭、清洁环保和安全可靠等独特优势

成为人类解决能源危机、环境污染和全球变暖首选新能源<sup>[1]</sup>。全球太阳能产业进入了高速发展时期, 光电材料技术得到迅速发展。目前太阳能电池多以晶体硅为主要材料, 由于高纯

收稿日期: 2012-07-16; 修回日期: 2012-12-29

基金项目: 青海省西宁市科技重点新产品项目(2011-G-18)

作者简介: 铁生年, 教授, 研究方向为无机材料综合利用, 电子邮箱: tieshengnian@163.com

硅原料短缺,硅材料价格一路飙升,严重制约了太阳能电池的推广使用<sup>[2]</sup>。

半导体工业所用单晶硅和太阳能产业所用多晶硅都需要将高纯晶体硅切割成硅片。切割过程中需使用硬度高、粒度小的碳化硅微粉作为主要切削介质<sup>[3]</sup>。太阳能电池硅片普遍采用多线锯配合砂浆切割生产,线切割中使用砂浆通常是由聚乙二醇(PEG)等带有一定黏度的介质与碳化硅磨料粉混合而成;线锯丝径一般为 0.18mm,产生的锯缝宽度一般为 0.2~0.3mm,而当前太阳能电池硅片的厚度为 0.18~0.22mm,这意味着在硅片线切割过程中超过 50%的硅料成为锯屑进入砂浆<sup>[4,5]</sup>。切割过程中的磨损使碳化硅颗粒破碎及钝化,直至趋向于球形,失去切割功能,被切磨为高纯硅粉进入到切割料浆中。切割过程产生的切割热及破碎的碳化硅颗粒和金属屑的混入使切割液的性质发生变化,最终使切割体系不能满足切割要求而成为废料浆。为了保持切削能力,切割料浆在使用几次后必须更换,而一次切割后的料浆中 90%以上的碳化硅仍未充分利用,这导致原材料的大量浪费。在更换下来的废料浆中,主要包含 3 种成分:PEG 溶液、碳化硅颗粒、从硅棒上锯下的多晶或单晶硅粉。因此,如果将废料浆中的物质进行综合回收利用,将会减少环境污染,同时提高资源利用率。为了进一步降低太阳能电池成本,回收碳化硅微粉广泛应用于磨料磨具、冶金脱氧剂、耐高温材料,也可与碳化硅大颗粒配比做切割颗粒。回收的 PEG 被广泛应用于增塑剂、软化剂、增湿剂、润滑剂,以及用于制作油膏和药物、化妆品、制药、化纤、橡胶、造纸、油漆、电镀、农药、金属加工及食品加工等行业。回收硅广泛应用于可制作半导体器件和集成电路。本文将着重阐述国内外对新能源硅产业切割废料的回收利用研究进展。

## 1 国内外单晶硅和多晶硅生产切割技术概况

2005 年以来全球半导体级单晶硅产量、太阳能级多晶硅产量和单/多晶硅总产量见图 1<sup>[6]</sup>。由图 1 可知,全球对单/多晶

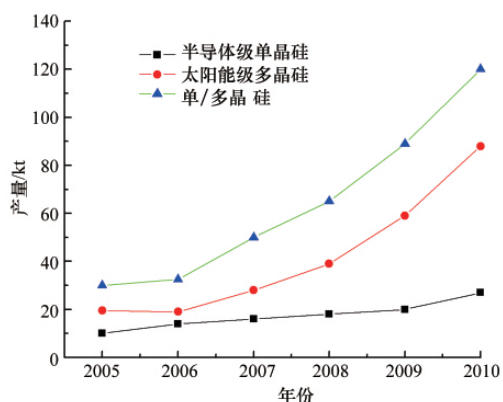


图 1 全球半导体级单晶硅、太阳能级多晶硅和单/多晶硅产量  
Fig. 1 World production of semiconductor grade monocrystalline silicon, solar grade polysilicon and monocrystalline /polycrystalline silicon

硅的需求从 2005 年的近 3 万 t 增到 2009 年的 9 万 t,2010 年达到 12 万 t。全球半导体级单晶硅每年的增长率为 5%~6%,而全球的太阳能级多晶硅每年是以 40%~50%的年增长率发展。这是因为 21 世纪最主要的可再生新能源是太阳能,世界发达国家纷纷制定鼓励政策大力发展太阳能产业。

近年来中国也采取积极的鼓励政策,太阳能产业得到了长足的发展,图 2 给出了中国 2003 年以来多晶硅的用量,包括国内自己生产的和从国外进口的量。从图 2 中看出<sup>[6]</sup>,2003,2004 年国内多晶硅用量不足千吨,2005 年突破了千吨,从 2006 年开始国内的多晶硅用量呈直线上升,以每年近 40%~50%的速度增长。预计 2013 年国内多晶硅产量约 8 万~10 万 t。随着半导体工业稳步向前和太阳能产业跳跃式发展,全球需要切割加工单晶硅和多晶硅的总量也将出现跳跃式增长,切割加工过程中产生的废料浆也将逐年的显著增长。

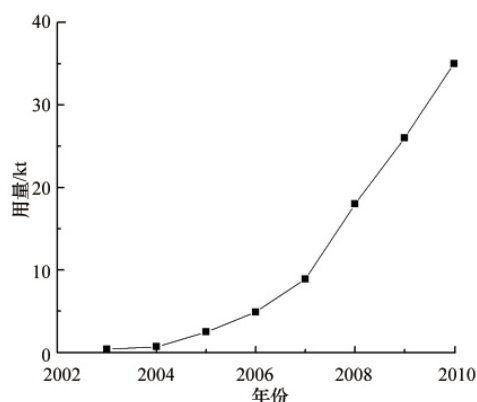


图 2 中国近年来多晶硅的用量

Fig. 2 Consumption of poly-silicon per year in China

单晶硅和多晶硅的切割主要有内、外圆切割技术和多丝线切割技术,如图 3 所示<sup>[6]</sup>,内外圆切割技术因硅损失严重、效率低等缺点已很少采用。目前世界各国主要采用多丝线切割技术,该方法具有精度高、成品率高、效率高等优点。多丝线切割的工作原理是:在以碳化硅作为磨料、PEG 作为分散剂、水作为溶剂组成水性切割液中,金属丝带动碳化硅磨料进行研磨加工来切割硅片,在多丝切割晶体硅过程中,随着大量硅粉和少量金属屑进入切割液而使切割液的性质逐渐发生

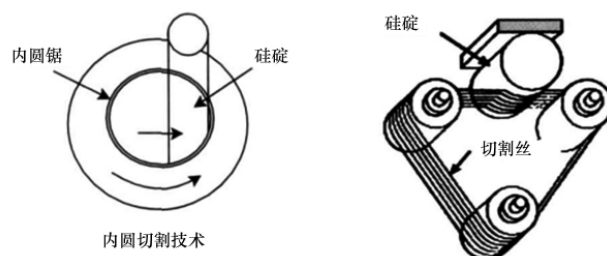


图 3 单晶硅和多晶硅的内圆切割技术和多丝切割技术  
Fig. 3 Internal cutting techniques and multi-wire cutting techniques of monocrystalline and polycrystalline silicon

变化,当这些固体杂质含量累积到一定程度时,将碳化硅磨料包覆,减小了磨料与硅棒的接触,导致切割效率降低,最终切割液不能满足切割要求而成为废料浆。废料浆主要成分有:30%左右高纯硅、30%左右的碳化硅、30%左右 PEC 和水、5%左右铁杂质。切割废料浆具有以下特点:(1)切割废料浆中的硅粉为高纯的晶体硅粉,杂质含量少,回收利用价值极高;(2)切割料浆中的碳化硅为高纯的微粉,可回收利用;(3)切割料浆中 PEG 分散剂也可回收循环利用。

## 2 国内外切割废砂浆回收技术现状

目前国内外砂浆回收工艺可分为两大类:废砂浆的在线回收工艺和废砂浆的离线回收工艺<sup>[7]</sup>。

### 2.1 废砂浆在线回收

该工艺在欧美及日本应用较为普遍,也相对成熟,其技术核心已集成到在线回收设备中,即在硅切片工序中在线进行废砂浆的收集。通过离心分离处理,将废砂浆中的小颗粒分离出体系,并按照一定的比例补充新的碳化硅粉末和 PEG 液体,经过混合并搅拌均匀后再打回线切割机中,可进行再次切片。该处理过程仅对废砂浆进行了初步分选,固液两相实质没有分离,返回的砂浆中仍含有一定比例的碳化硅细碎颗粒,且处理后的砂浆中有金属杂质和附着在碳化硅颗粒表面的硅微粉,因此,处理后的砂浆无法直接循环使用,必须添加新碳化硅微粉和新聚乙二醇才能再次用于切削。虽然回收的砂浆可以再次用于切削,但切削效力和悬浮液的带砂能力都有一定程度的下降,经过 2~3 次循环使用后,砂浆性能退化,最终不能满足切割的基本要求,必须全部更换新碳化硅微粉。瑞士的 HCT 公司开发出了一套切削砂浆的在线回收循环系统<sup>[8]</sup>,该系统可以与现有的专用线切割设备配套使用,将经过一次切削的碳化硅砂浆通过高速离心的方式将破碎的无效细颗粒和部分被切削下来的硅粉尽量分离出去,保留有效的碳化硅颗粒和聚乙二醇基悬浮液,配以部分新的碳化硅微粉和悬浮液重新用于再次切削。该系统的成功开发使硅晶切片工序中所用的碳化硅微粉和聚乙二醇基在一定程度上可以实现重复使用,节约了生产成本,减少了废砂浆的排放频率,且处理过程相对简单,因而在一些生产企业得以应用。

### 2.2 废砂浆离线回收

离线回收技术通过固液分离、固体表面清洗、固体颗粒尺寸分选等工序,得到回收产品为固液两相分离的 PEG 液体和碳化硅、Si 等固体粉末。该工艺一般采用多级过滤进行固液分离,流程繁杂、效率低,分离过程需添加助分离剂水等物质;固液分离后得到 PEG 液体需要除水,此过程能耗大,还有可能引起分子结构的变化;对固体碳化硅要水洗处理、分级,该技术效率低,占地面积大;一般情况下还要化学提纯。但是,该工艺只是返回合格的磨料和切割液,不能满足的磨料和切割液可以用于其他工业,可以有有效的回收废砂浆中的各种物质,该工艺处理可分为物理法和化学法<sup>[9]</sup>。

### 2.2.1 物理法

通过物理方法实现废砂浆中各种组分的分离,获得纯的组分,目前主要回收工艺如下。

(1) 浮选法。浮选即固体颗粒自身表面具有疏水特性或经浮选药剂作用产生或增强疏水性,可在液-气或水-油的界面发生聚集。目前应用最广泛的是泡沫浮选法。

黄美玲等<sup>[9]</sup>以脂肪酸作捕收剂,采用泡沫浮选法分离硅与碳化硅粉末。该方法最佳的工艺条件为 pH=4.5、起泡剂浓度为 0.18mol/L、捕收剂浓度为 0.315mol/L。通过该工艺可分别得到质量分数为 99.3%的碳化硅粉和 95.9%的硅粉。

Shibata 等<sup>[10]</sup>通过使用阳离子界面活性剂浮选分离碳化硅和二氧化硅。实验结果表明,通过添加界面活性剂,可增强碳化硅表面的疏水性,从而把碳化硅和二氧化硅浮选分离。

浮选法通过选择合适的捕收剂分离硅与碳化硅,但切割过程中,硅与碳化硅可能会因摩擦而发生机械粘接,导致分离的硅粉夹杂碳化硅。故切割废料可采用该方法进行初步分离,再通过其他方法进一步提纯研究。

(2) 离心分离法。离心分离是借助于离心力,使比重不同的物质进行分离的方法。由于离心机等设备可产生相当高的角速度,使离心力远大于重力,溶液中的悬浮物便易于沉淀析出;又由于比重不同的物质所受到的离心力不同,从而沉降速度不同,能使比重不同的物质达到分离。目前生产厂家采用的设备有卧螺离心机、平板离心机、三足式离心机,主要用于 PEG 和碳化硅固液分离,以及碳化硅微粉中微小颗粒的分离,大约能将 5 $\mu\text{m}$  以下的微粒分离。这 3 种分离设备各自的特点,可互相配合使用,也可单一使用。

Chang<sup>[11]</sup>提出在水溶液中用离心分离的方法分离切割废料,分离工序为:加热,一级离心,加热,二级离心。通过一级离心得到碳化硅微粉,经过二级离心得到硅微粉及切割液。切割液再通过多次加热和离心进一步回收硅粉,多次离心后实现硅粉、碳化硅粉和切割分散液的回收。但回收的硅与碳化硅粉互有掺杂,难以实现完全分离。Horio<sup>[12]</sup>也曾被报道通过离心分离器实现切割废料的连续分离。离心分离可实现切割废料大规模的初级分离提纯。

(3) 重液分离技术。重液分离即采用一定比重的液体作介质,在容器中按比重差异分离矿物。

杨建锋等<sup>[13]</sup>根据碳化硅和钢的比重较大,采用气流浮选后获得的硅单体与碳化硅和钢粉完全分开,会夹杂 2%~10% (质量分数)碳化硅。再进一步对该低纯硅粉采用密度介于硅和碳化硅的溶液进行液体浮选和重力分选,由于比重差异,密度较低的硅粉上浮和密度较高的碳化硅下沉,可以分选出高纯度硅粉。由于表面积大的硅单体表面容易被氧化,形成二氧化硅,再将获得的硅粉使用氢氟酸进行酸洗,最终可以获得高纯度的硅粉。将获得的碳化硅和金属混合物使用磁力分选,最终可以获得一定纯度碳化硅粉末。

Lin 等<sup>[14]</sup>提出采取重液法分离硅与碳化硅微粉。首先通过

丙酮和酸洗去除聚乙二醇和金属,再以三溴甲烷和乙醇配制密度介于硅与碳化硅的重液,搅拌混合均匀后离心。碳化硅微粉因密度大于重液而沉降于底部,硅因密度小于重液而悬浮于上部。将两部分富集物分离达到分别回收硅与碳化硅的目的。

唐康宁<sup>[15]</sup>对砂浆进行固液分离,在得到的沉淀物中加入丙酮去除油和残留的聚乙二醇,再通过离心得到硅粉、碳化硅微粉和金属微粒的混合粉料,经干燥和粉碎后,加入密度介于硅与碳化硅之间的重液进行重力分选,所得浮选物为硅粉,沉淀为碳化硅和金属混合粉;在对硅粉进行酸洗、水洗和干燥,即获得硅微粉。所用的重液是二溴甲烷酒精溶液、三溴甲烷酒精溶液、溴化钙水溶液、溴化锌水溶液及碘化钙水溶液的一种或几种。上述所用重液十分昂贵且具有毒性,适用性差。

(4) 电分离方法。王武生<sup>[16]</sup>将从硅切削液中回收的废砂浆进行过滤、清洗、烘干后,放置在电选机中,利用硅粉与其中的其他固体杂质如碳化硅的介电系数的区别进行电选分离,将分离所得到的硅进行熔炼。

Wu 等<sup>[17,18]</sup>提出利用外加电场、重力场分离硅与碳化硅。该方法利用硅与碳化硅的颗粒尺寸、密度、表面 Zeta 电位的差异实现分离。硅微粉的颗粒尺寸、密度、一定 pH 值范围内的 Zeta 电位比碳化硅的小,在电场力和重力的共同作用下,硅颗粒向阳极方向运动的距离较远因而落到靠近阳极的区域,而碳化硅则落于离阴极较近的区域。对于硅含量为 75.3% 的废料经过此方法分离后可将硅粉料的含量提高到 92.8%。此方法充分利用了两种微粉在物理性质方面的差异,达到了初步分离的目的,但分离效率较低、耗时长,要实现完全分离仍存在较大难度。

(5) 超磁场分离方法。Nishijima 等<sup>[19]</sup>利用超导磁场分离碳化硅与硅。切割过程中,部分碳化硅因摩擦作用表面附着具有磁性的金属铁屑,此部分碳化硅可通过超高磁场分离,余下的切割料用离心等方法进一步分离,回收所得碳化硅的切割效果明显提高。此方法并不能完全分离硅与碳化硅,而且对设备要求严格成本高。

(6) 高温热处理方法。Wang 等<sup>[20]</sup>提出利用硅和碳化硅的熔点差异来实现它们的分离。首先将经初分离后硅含量达到 90% 的切割废料压制成球。然后于 1470℃ 保温,硅粉熔融聚集长大并析出,而碳化硅由于其熔点较高而仍为固态,从而实现分离。分离得到的硅经清洗后,再经重熔及定向凝固得到不含碳化硅的硅,其制成的硅片的光学转化效率与纯硅相当。该工艺是目前报道的较成熟的工艺,但仅对经初步分离将硅含量达到 90% 以上的废料才有较好的分离效果,且该工艺总的回收硅的效率仅为 45% 左右。

(7) 气流分选法。Tsubata 等<sup>[21]</sup>提出了利用气流分选的工艺回收废砂浆中的硅。其工艺是将废砂浆脱水后,用有机溶剂除去分散剂和黏结剂,再进行酸洗除去金属和二氧化硅,

最后采用气流分离的办法分离硅和碳化硅获得硅粉。由于气流分选工艺无法实现按颗粒密度为主导的高效分离,因此该发明所回收的硅粉纯度只有 98% (质量分数),混有质量分数为 2% 的碳化硅;并且气流会把颗粒极细的硅粉带走造成硅粉的流失。

(8) 旋流分离法。浆液通过水压力从旋流器内壁外侧切向进入,在离心力的作用下,粗粒度的固体颗粒旋转向下,定量或不定量地从下部排渣口流出,而细粒度的固体颗粒(或清液)从溢流管内向上流出。目前厂家采用的多为小直径旋流分离器<sup>[22]</sup>。

陈锡元<sup>[23]</sup>将固液分离后的固体进行水洗,去除残留的聚乙二醇;将清洗好的碳化硅配上一定比例的水充分搅拌后进行分级处理,利用碳化硅、硅微粉及其他物质的不同比重旋流分离出碳化硅,去除杂质;然后将碳化硅清洗,离心脱水及加热烘干,即得可回用的碳化硅。

(9) 吸附法。陈锡元<sup>[24]</sup>将硅片切割废砂浆原料进行固液分离,将分离出的聚乙二醇经过滤把超细微粉过滤掉;用活性炭及活性白土脱色,进一步去除杂质及游离物质;用混床及电子纯化再蒸馏脱水,最后按照厂家切割工艺要求调配出符合要求的成品。

罗小军等<sup>[25]</sup>用压滤机、过滤罐进行过滤,然后按液体质量的 1%~10% 添加麦饭石、硅藻土、珍珠岩、活性白土、活性炭中的至少一种物质脱色,最后真空蒸馏脱水,得到可使用的聚乙二醇。目前回收厂家采用方法为活性炭或硅藻土吸附。

(10) 膜过滤法。膜过滤是一种与膜孔径大小相关的筛分过程,以膜两侧的压力差为驱动力,以膜为过滤介质,在一定的压力下,当原液流过膜表面时,膜表面密布的许多细小的微孔只允许水及小分子物质通过而成为透过液,而原液中体积大于膜表面微孔径的物质则被截留在膜的进液侧成为浓缩液,因而实现对原液的分离和浓缩的目的。在废砂浆回收利用中,主要用于去除聚乙二醇中的微量杂质及悬浮物。

奚雪峰等<sup>[26]</sup>在固液分离后的悬浮液部分添加助滤剂,先进行板框过滤,然后将悬浮液一次通过孔径为 0.18~0.26 μm 的微孔膜过滤、中空纤维膜过滤,而后通过强酸强碱型离子交换树脂去除离子,最后进入真空蒸馏装置,得到可循环使用的聚乙二醇。

(11) 蒸馏法。利用液体混合物中各组分挥发性的差别,使液体混合物部分汽化并随之使蒸汽部分冷凝,从而实现其所含组分的分离,是一种属于传质分离的单元操作。

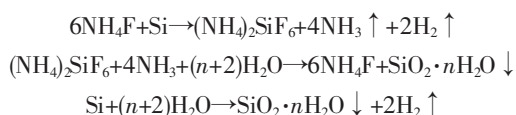
杨水清等<sup>[27]</sup>首先将废砂浆加热升温后,进行固液分离,得到的悬浮液经板式压滤机过滤后,通过真空蒸馏进行脱水,最后将脱水后的悬浮液通过真空精馏进行精制,即得可回用的聚乙二醇。

## 2.2.2 化学法

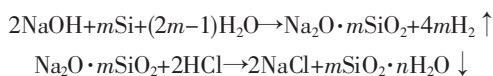
通过化学的方法实现废砂浆中的各种组分的分离,回收碳化硅的主要组分,同时制得其他相应的产品,目前主要回

收工艺如下。

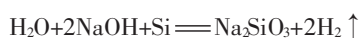
田维亮等<sup>[8]</sup>进行了从切割废砂浆中硅制取白炭黑的研究。将废砂浆预处理后(其成分为硅和碳化硅),向固体砂粉料中加入氯化铵,使其与硅反应生成氟硅酸铵和氨气,氨气用水吸收待用,固体料加水溶解氟硅酸铵,过滤得到固体碳化硅,干燥得碳化硅产品;其液体氟硅酸铵加氨水或氨气,反应生成氯化铵和白色胶状沉淀,过滤,固体经干燥得白炭黑产品。



徐冬梅等<sup>[28]</sup>进行了线切割废砂浆制白炭黑工艺研究。将固体砂浆中加入氯仿或四氯化碳溶解砂浆中的切削液分子,然后进行过滤分离得到固体砂浆物;再加入甲醇或乙醇或异丙醇溶解砂浆,然后加水清洗去除剩余的切削液分子,再通过过滤分离得到湿砂粉。将所得砂粉中加混酸(混酸为硫酸、盐酸、硝酸、磷酸、甲酸、乙酸和丙酸等酸的两种或两种以上)溶解铁,过滤后在砂粉中加水 and 适量的螯合剂(乙二胺四乙酸,乙二胺,2,2'-联吡啶,1,10-二氮菲,草酸根),过滤得固体砂粉。所得砂粉中加入高浓度氢氧化钠溶液,加热,其与硅反应生成硅酸钠,再加水稀释,过滤干燥得碳化硅产品;其在过滤液硅酸钠中,加入少量的高模数的水玻璃,阵化,再加入食盐和正丁醇,搅拌均匀后,滴加盐酸,析出絮凝状沉淀,过滤,洗涤,干燥,得白炭黑产品。其化学反应为



陈骏等<sup>[29]</sup>采用碱溶液处理切割废料,硅粉与碱反应生成可溶性的硅酸钠溶液,稀释后过滤分离得到碳化硅。反应方程式为



化学分离方法能够回收切割废料中的碳化硅,但抛弃了价值更高的硅而且此方法尚存在一定缺点:(1)消耗大量的酸或碱;(2)采用的酸或碱( $\text{HNO}_3$ 、 $\text{HF}$ )及产物( $\text{NO}_2$ 、 $\text{SiF}_4$ )有毒,对人体及环境有危害,不符合环境保护的要求;(3)采用的氢氧化钠、硝酸等原料成本高,是否符合经济利益的要求有待考虑。

### 3 结论与展望

(1)国内外已对废线锯砂浆回收利用对从单一的回收碳化硅到综合回收碳化硅、聚乙二醇和硅几乎所有的成分进行是大势所趋。

(2)切割废液的离线回收工艺中其物理法具有处理过程能量损耗小、操作简便、工艺简单、设备造价低和易于工业化等优点,在工业上获得广泛的应用,其中选择有效的捕收剂,利用泡沫浮选技术选择有效的碳化硅捕收剂的分离固体分离技术,操作简单,分离效率高,具有潜在的应用价值,是当

前研究的重点。

(3)化学法通过原料的转化,制得新产品同时回收碳化硅物料,物料回收纯度高,有一定潜力,但还需要作进一步的研究。

### 参考文献 (References)

- [1] 邢鹏飞, 赵培余, 郭菁, 等. 太阳能级多晶硅切割废料浆的综合回收[J]. 材料报道, 2011, 25(1): 75-79.  
Xing Pengfei, Zhao Peiyu, Guo Jing, et al. Materials Review, 2011, 25(1): 75-79.
- [2] 吴云才, 刘伟, 刘磊磊, 等. 一种废硅液的回收再生方法: 中国, CN 101683981A[P]. 2010-03-31.  
Zhang Yuncai, Liu Wei, Liu Leilei, et al. A method of recycling the waste silicon slurry: China, CN 101683981A[P]. 2010-03-31.
- [3] 张捷平. 碳化硅微粉回收的方法: 中国, CN 101033066A[P]. 2007-09-12.  
Zhang Jieping. Method of recycling silicon carbide powder: China, CN 101033066A[P]. 2007-09-12.
- [4] 张凤林, 袁慧, 周玉梅, 等. 硅片精密切割多线锯研究进展 [J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2006(6): 14-18.  
Zhang Fenglin, Yuan Hui, Zhou Yumei, et al. Diamond & Abrasives Engineering, 2006(6): 14-18.
- [5] 张波, 刘文涛, 胡晓冬, 等. 线锯切割技术的应用和发展 [J]. 超硬材料工程, 2008, 20(1): 45-48.  
Zhang Bo, Liu Wentao, Hu Xiaodong, et al. Superhard Material Engineering, 2008, 20(1): 45-48.
- [6] 邢鹏飞, 郭菁, 刘燕, 等. 单晶硅和多晶硅切割废料浆的回收 [J]. 材料与冶金学报, 2010, 9(2): 148-153.  
Xing Pengfei, Guo Jing, Liu Yan, et al. Journal of Material and Metallurgy, 2010, 9(2): 148-153.
- [7] 周寿增, 周正, 曹孜. 单晶与多晶硅线切割用砂浆回收技术: 中国, CN 101327622A[P]. 2008-12-24.  
Zhou Shouzheng, Zhou Zheng, Cao Zi. Recovery technology of slurry produced in cutting single crystal and polycrystalline silicon: China, CN 101327622A[P]. 2008-12-24.
- [8] 田维亮, 白红进, 张红喜, 等. 切割废砂浆综合回收利用研究进展[J]. 中国资源综合利用, 2011, 29(6): 24-27.  
Tian Weiliang, Bai Hongjin, Zhang Hongxi, et al. China Resources Comprehensive Utilization, 2011, 29(6): 24-27.
- [9] 黄美玲, 熊裕华, 魏秀琴, 等. 硅片线锯砂浆中硅粉与碳化硅粉的泡沫浮选分离回收[J]. 电子元件与材料, 2010, 29(4): 74-77.  
Huang Meiling, Xiong Yuhua, Wei Xiuqin, et al. Electronic Components and Materials, 2010, 29(4): 74-77.
- [10] Shibata J, Urayama N, Nagae K. Flotation separation of SiC from wastes in the silicon wafer slicing process [J]. Kagaku Kogaku Ronbunshu, 2006, 32(1): 93-98.
- [11] Chang Y C. Apparatus for recycling the disposed slurry produced in the manufacturing process of the silicon wafer: Korea, WO 2008 013327[P]. 2008-01-31.
- [12] Horio M. Recycling system of wire saw abrasive grain slurry and centrifugal separators: US, 6615817[P]. 2003-09-09.

- [13] 杨建锋, 高积强, 陈畅, 等. 一种从切割废砂浆中回收硅粉和碳化硅粉的方法: 中国, CN101130237A[P]. 2008-02-27.  
Yang Jianfeng, Gao Jiqiang, Chen Chang, et al. A method of recycling silicon powder and silicon carbide powder from waste slurry generated by cutting silicon: China, CN101130237A[P]. 2008-02-27.
- [14] Lin Y C, Wang T Y, Lan C W, et al. Recovery of silicon powder from kerf loss slurry by centrifugation[J]. Powder Technology, 2010, 200(3): 216.
- [15] 唐康宁. 从切割废砂浆中回收多晶硅锭、碳化硅粉和聚乙二醇的方法: 中国, CN 101792142A[P]. 2010-08-04.  
Tang Kangning. Recovery method of polysilicon ingot, silicon carbide powder and polyethyleneglycol from slurry generated by cutting silicon: China, CN 101792142A[P]. 2010-08-04.
- [16] 王武生. 一种利用电选从硅晶体切割液中回收多晶硅材料的方法: 中国, CN 101879481A[P]. 2010-11-10.  
Wang Wusheng. A method of recycling polysilicon materials from silicon crystal cutting fluid by electric separation: China, CN 101879481A[P]. 2010-11-10.
- [17] Wu Y F, Chen Y M. Separation of silicon and silicon carbide using an electrical field [J]. Separation and Purification Technology, 2009, 68(1): 70.
- [18] Tsai T. Modified sedimentation system for improving separation of silicon and silicon carbide in recycling of sawing waste[J]. Separation and Purification Technology, 2011, 78(1): 16.
- [19] Nishijima S, Izumi Y, Takeda S I, et al. Recycling of abrasives from wasted slurry by super-conducting magnetic separation[J]. IEEE Transaction on Applied Superconductivity, 2003, 13(2): 1596.
- [20] Wang T Y, Lin Y C, Tai C Y, et al. A novel approach for recycling of kerf loss silicon from cutting slurry waste for solar cell applications[J]. Journal of Crystal Growth, 2008, 310(15): 3403.
- [21] Tsubata T, Nishi T, Miyata T. Method of recovering silicon: Japan, 2001 278612[P]. 2001-10-10.
- [22] 季晴, 王建国. 物理分离法在硅片切割废液回用中的应用[J]. 应用技术, 2011(4): 165-166.
- Ji Qing, Wang Jianguo. Applied Technology, 2011(4): 165-166.
- [23] 陈锡元. 硅片切割废砂浆中固体的回收循环再生利用工艺: 中国, CN 101786623A[P]. 2010-07-28.  
Chen Xiyuan. A process of reclamation and cyclic utilization of solid from waste slurry generated by cutting silicon wafer: China, CN 101786623A[P]. 2010-07-28.
- [24] 陈锡元. 硅片切割废砂浆中液体的回收循环再生利用工艺: 中国, CN 101792691A[P]. 2010-08-04.  
Chen Xiyuan. A process of reclamation and cyclic utilization of liquid from waste slurry generated by cutting silicon wafer: China, CN 101792691A[P]. 2010-08-04.
- [25] 罗小军, 宋贺臣, 姜维海. 硅片切割废砂浆的回收处理方法: 中国, CN 101823712A[P]. 2010-09-08.  
Luo Xiaojun, Song Hechen, Jiang Weihai. Recovery processing method of waste slurry generated by cutting silicon wafer: China, CN 101823712A[P]. 2010-09-08.
- [26] 奚西峰, 宋涵. 一种硅晶圆线切割废砂浆中聚乙二醇和碳化硅的回收方法: 中国, CN 101474511A[P]. 2009-07-08.  
Xi Xifeng, Song Han. A method of recycling polyethyleneglycol and silicon carbide powder from waste slurry generated by cutting silicon crystal using a wire-saw: China, CN 101474511A[P]. 2009-07-08.
- [27] 杨水清, 罗伟, 邱鸿恩. 切割废砂浆中丙二醇的回收方法: 中国, CN 101580458A[P]. 2009-11-18.  
Yang Shuiqing, Luo Wei, Qiu Hongen. Recovery method of propylene glycol from cutting waste slurry: China, CN 101580458A[P]. 2009-11-18.
- [28] 徐冬梅, 田维亮, 李新宇, 等. 线切割废砂浆制白炭黑工艺研[J]. 无机盐工业, 2010, 42(6): 49-51.  
Xu Dongmei, Tian Weiliang, Li Xinyu, et al. Inorganic Chemicals Industry, 2010, 42(6): 49-51.
- [29] 陈俊, 王柳英. 一种线切割工艺中砂浆的化学回收方法: 中国, CN 101623898A[P]. 2010-01-13.  
Chen Jun, Wang Liuying. A chemical method of recycling slurry from wire cutting process: China, CN 101623898A[P]. 2010-01-13.

(责任编辑 岳臣)

· 学术动态 ·

## 第十五届中国科协年会将于 2013年5月25—27日在贵阳举行

由中国科协、贵州省人民政府联合主办, 主题为“创新驱动与转型发展”的第十五届中国科协年会将于2013年5月25—27日在贵阳举行。

拟报名参加学术交流的科技工作者请于2013年3月15日前将报名表提交到相应分会场组织单位, 并通过中国科协网第十五届中国科协年会网络平台注册个人信息、提交论文。

中国科协网(<http://www.cast.org.cn>)为第十五届中国科协年会官方网站, 即时发布年会有关信息。第十五届中国科协年会网络平台专用网址为 <http://2013.cast.org.cn>。