

# 晶体硅太阳能电池用微细银粉制备研究进展

李建生<sup>1</sup>, 刘炳光<sup>1</sup>, 董学通<sup>2</sup>, 阎树东<sup>2</sup>

(1.天津职业大学生物与环境工程学院, 天津 300410;

2.天津顺御科技有限公司, 天津 300410)

**摘要:** 分别介绍了晶体硅太阳能电池电极银浆用微细银粉的质量要求、制备方法和技术关键。综述了化学还原法制备微细银粉用还原剂、分散剂和形貌控制方法的研究进展, 并提出了存在的问题和改进方向。

**关键词:** 太阳能电池; 银粉; 还原剂; 分散剂; 形貌控制

**中图分类号:** O614.122, TG146.3+2 **文献标识码:** A

The research progress in preparing of ultra-fine silver powder utilized in silicon solar cells

Li Jiansheng<sup>1</sup>, Qi Guopeng<sup>1</sup>, Liu Bingguang<sup>1</sup>, Dong Xuotong<sup>2</sup>, Yan Shudong<sup>2</sup>

(1. Tianjin Vocational Institute, Tianjin 300410, China.

2. Tianjin ShunYu Technology Co. Ltd, Tianjin 300402, China)

**Abstract** The quality requirements, preparation methods and technique keys of ultra-fine silver powder utilized in silicon solar cells electrode paste were introduced separately. The research progress of reducer, dispersant and morphology controlling methods in preparing of ultra-fine silver powder by chemical reduction was reviewed, the problems and improving directions were presented also.

**Key words** solar cell; silver powder; reducer; dispersant; morphology controlling

太阳能光伏发电是世界各国大力发展的战略新兴产业, 2013 年中国太阳电池组件产量约 26GW, 同比增长 13%, 连续 7 年位居世界首位。2013 年中国新增太阳能发电装机量超 12GW, 累计装机量超 20GW, 但原材料和市场两头在外局面仍然未能改变, 许多高附加值的太阳能电池材料长期依赖进口<sup>[1]</sup>。太阳能电池导电银浆是生产太阳能电池的关键材料之一, 其成本占太阳能电池组件的 17%左右, 其性能好坏直接影响光电转换效率和市场应用, 中国太阳能电池导电银浆市场主要被美国杜邦 (DuPont)、美国福禄 (Ferro)和德国贺利氏 (Heraeus)三家企业所垄断。由于太阳能电池导电银浆开发涉及的行业多, 工业化生产技术难度大, 国内技术开发进展缓慢, 在关键的电性能指标上开发多年仍未达到使用要求。目前只能生产少量低端品种, 难以进入主流客户市场, 降低了国内企业生产太阳能电池的效益, 制约了我国光伏产业的发展和壮大。为打破太阳能电池导电银浆长期依赖进口局面, 已将其列入国家太阳能发电科技发展“十二五”专项规划重点发展方向<sup>[2]</sup>。国内关于太阳能电池导电银浆和银粉的研究报道很多<sup>[3,4]</sup>, 发明专利申请数量庞大, 但均未涉及产业化开发情况。笔者结合晶体硅太阳能电池材料产业化开发, 以产业化应用为目标, 对国内外太阳能电池用微细银粉制备研究进展进行综述, 以拓宽太阳能电池导电银浆技术开发人员的研究思路。

## 1. 微细银粉的应用领域和质量要求

### 1.1 微细银粉的主要应用领域

银粉是电子产业中应用广泛和用量最大的一种贵金属粉末, 是生产电子触摸屏、电子接

插件和各种电子元器件产品的关键功能材料之一。电子信息产业的迅速发展,带动了微细银粉及导电浆料市场的发展,中国市场电子元器件导电银浆年需求量约 1000 吨。

微细银粉也是太阳能电池导电银浆的重要组成部分,分为正面电极银浆和背面电极银浆,正面电极银浆消耗量一般是背面电极银浆的二倍,技术性能要求也更高。太阳能电池正面电极分为栅电极线和主电极线,栅线主要汇集光电转换产生的载流子,主电极主要使电池片与外部线路连接。太阳能电池产业的快速发展进一步促进了微细银粉的市场需求,目前中国市场太阳能电池导电银浆年需求量约 1600 吨,贸易额 150 亿元,但市场增长迅速。

## 1.2 微细银粉的质量要求

导电银浆成膜后的导电率和致密性等关键技术指标主要由微细银粉的性能决定,而微细银粉性能主要取决于其形貌结构特征、粒度及粒度分布。电子元器件导电银浆用微细银粉已有国家标准,主要包括外观质量、化学成分、比表面积、粒径、粒径分布、松装密度和振实密度等 7 项技术指标<sup>[5]</sup>,性能指标要求并不高。

太阳能电池导电银浆是由微细银粉、玻璃粉、有机载体以及添加剂组成的混合物浆料。微细银粉在太阳能电池导电银浆中占其质量的 70%~90%,是决定银浆和形成银电极性能的关键因素。若微细银粉粒度过大,银浆印刷时就不能完全通过丝网,短时间内也无法烧结致密,烧结膜容易出现孔洞,从而影响导电性。若微细银粉粒度过小,浆料不易被有机载体完全润湿,导致印刷效果不好,烧结后银膜收缩率大、孔洞多和连接不致密。颗粒均匀性较好的银粒子会降低电池的反向漏电流,从而提高开路电压与短路电流,并有效提升并联电阻与转换效率等电性能参数。

银粉的电阻随着颗粒的减小而增大,当其粒度降到纳米级时电阻显著增大,从而使导电性变差。目前,关于纳米银粉的研究报道很多,纳米银粉在导电浆料中的应用还处于探索阶段,其实纳米银粉并不适合单独用于生产太阳能电池导电银浆<sup>[6]</sup>。只有符合粒径 1~3 $\mu\text{m}$ 、粒度均匀、结晶度高,振实密度高、比表面积小、分散性好和类球形等特定条件的微细银粉,用其配制的导电浆料才具备良好的丝网印刷性能,烧结后才能形成细栅线的正面银电极。

微细银粉包括高纯微细银粉和复合微细银粉二类,微细银粉与少量铂、金、钯、铱或钨等贵金属复合可改善其抗氧化性能;将银镀覆在铜、镍或锡等贱金属表面制成核壳结构的微细银包铜粉、银包镍粉或银包合金粉,其导电性能与高纯银粉相当,但可大大降低其成本。由于微细高纯银粉成本高,未来微细银包合金粉将是市场主流。从应用角度看,微细银粉纯度并不是关键技术指标。所以,太阳能电池用微细银粉还没有形成统一的质量标准,研究单位和应用企业主要参照电子元器件导电银浆用微细银粉国家标准和根据企业实际应用评价结果制定微细银粉企业标准。

## 1.3 微细银粉的制备方法、原理和技术关键

微细银粉的制备方法有喷雾热分解法、电解法、微波等离子体法、直流电弧热等离子法、机械化学合成法、电子束照射法和液相化学还原法等,但这些方法都存在不足之处,比如有有的需要特殊气氛环境,有的需要专业的设备,有的耗能大。液相化学还原法因其实验设备简单、操作方便、成本低、节能等优点成为目前制备银粉的主要方法<sup>[7,8]</sup>。

液相化学还原法原理是将银离子用还原剂从银盐或银配位体的溶液中以银晶粒的形式沉积出来。采用的银盐通常是硝酸银 $[\text{AgNO}_3]$ 和氰化银钾 $[\text{KAg}(\text{CN})_2]$ ,或者将硝酸银转化为氧化银 $[\text{Ag}_2\text{O}]$ 、碳酸银 $[\text{Ag}_2\text{CO}_3]$ 及银氨络离子 $[\text{Ag}(\text{NH}_3)_2^+]$ ,以降低水溶液中银离子浓度,进一步控制银原子析出速度,调节银粉形貌和粒径。

微细银粉制备的传统工艺已由美国 CHEMET 公司专利公开<sup>[9]</sup>,将硝酸银水溶液通过高压喷头雾化喷入高速搅拌下的含有铜离子、表面活性剂、水合肼的氢氧化铵水溶液中,在常

温下反应 15-40 分钟, 过滤分离沉淀, 水洗, 干燥, 得到 0.6 - 2.5 $\mu$  m, 比表面积 0.6-2.0m<sup>2</sup>/g 的高纯银粉。针对传统方法是间歇式工艺和产品质量不够稳定的问题, 台湾科学院专利公开一种可控制比表面积的银粉连续式制备工艺<sup>[10]</sup>, 先将含表面活性剂和水合肼还原剂的水溶液与硝酸银的氨溶液连续加入低温反应槽, 在 5-20℃ 下反应 7-60 分钟, 然后转入高温反应槽, 在 40-60℃ 下继续完成反应, 过滤分离沉淀, 得到微细银粉。

微细银粉制备的技术关键是选择银盐、还原剂和反应条件的适当组合, 严格控制银晶核的产生速度与银晶体的生长速度, 以得到粒径适中、均匀、易分散和形貌可控的微细银粉, 抑制银晶核随机增长和发生银镜反应。

## 2. 微细银粉制备还原剂研究进展

### 2.1 微细银粉制备还原剂专利进展

由于银盐氧化性比较强, 具有还原性的许多无机化合物和有机化合物均可作为银粉制备还原剂。专利公开的银粉制备无机还原剂主要有水合肼、羟胺、双氧水、次亚磷酸钠、连二亚硫酸钠、硼氢化钠、硫酸亚铁、亚硫酸钾、二氧化硫脲等, 其中水合肼还原剂受到广泛重视和深入研究; 专利公开的银粉制备有机还原剂主要有甲醛、抗坏血酸、甲酸、酒石酸钾钠、乙醇、甘油、葡萄糖、还原糖、三乙醇胺、氢醌、乙二醛、丙酮醛、乙醛酸和对氨基苯酚等, 其中甲醛和抗坏血酸还原剂受到广泛重视和深入研究。在微细银粉制备的还原反应过程中, 还原剂的选择非常重要<sup>[11]</sup>。

微细银粉制备还原剂一般首先出现在发明专利中, 日本三井矿业公司专利公开一种高分散球形银粉生产方法, 采用氢醌为还原剂<sup>[12]</sup>; 美国柯达公司专利公开一种超纯银制备方法, 采用甲酸钠、水合肼或硼氢化钠等为还原剂<sup>[13]</sup>。昆明理工大学专利公开一种太阳能电池电极导电银浆用银粉及其制备方法, 采用葡萄糖、水合肼、对苯二酚或抗坏血酸及其混合物为还原剂<sup>[14]</sup>; 彩虹集团公司专利公开一种太阳能电池电极浆料用银粉及其制备方法, 采用水合肼、甲醛、硫代硫酸钠或硼氢化钠为还原剂<sup>[15]</sup>; 天津顺御科技有限公司专利公开一种硅太阳能电池正面电极银浆及其制备方法<sup>[16]</sup>, 采用乙二醛或乙醛酸化学还原制备了纳米银为核的球形微细银粉, 用其制备的银浆烧结后银膜致密无孔洞, 提高了电极膜的致密性和光滑度, 提高了电池片的光电转换效率; 天津市职业大学专利还公开一种超细银粉和丙酮酸钙的联合生产方法<sup>[17]</sup>, 采用向反应器中并流加入硝酸银溶液、丙酮醛溶液和氢氧化钠溶液, 氧化还原反应生成超细银粉和丙酮酸钠溶液, 维持反应液温度 20-30℃ 和 pH9-11 下反应 0.5-1 小时, 然后升温至 40-50℃ 使反应进行完全。过滤分离超细银粉, 滤液真空浓缩后再加入乙酸钙溶液, 过滤分离生成的丙酮酸钙沉淀, 洗涤, 干燥得到符合药用质量标准的丙酮酸钙结晶。该发明制备的超细银粉可作为太阳能电池或电子触摸屏导电银浆的原料, 丙酮酸钙产品可作为减肥营养剂应用。该发明同时制备二种实用精细化工产品, 原料得到充分利用, 减少了废弃物, 生产成本降低, 工艺过程安全环保。

### 2.2 微细银粉制备中还原剂存在的问题和改进方向

微细银粉制备还原剂存在的不足包括: (1) 常用还原剂水合肼、甲醛和氢醌有毒, 刺激性很强, 环保和安全方面问题突出; (2) 还原剂硼氢化钠、氢醌成本过高, 影响银粉生产效益; (3) 还原剂抗坏血酸对还原体系酸度、浓度和温度等条件变化敏感, 生产条件不易控制; (4) 许多还原剂需要与大量分散剂配合使用, 导致后续的银粉分离困难; (5) 常用还原剂的投料比过大, 缺少安全稳定的新型还原剂。

微细银粉制备通常在稀溶液中进行, 产生的废水量较大, 目前由于微细银粉生产规模不大和产品的高附加值, 生产过程的环保问题还没有引起足够重视, 随着产量扩大和生产成本不断降低, 开发微细银粉清洁生产工艺势在必行。许多精细化工产品生产需要消耗大量氧化

剂,采用银盐作氧化剂显然没有经济性,若将其与微细银粉联合生产,可实现二种精细化工产品的清洁生产和降低成本,是下一步技术改进方向。

### 3. 微细银粉制备分散剂研究进展

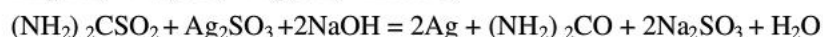
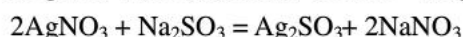
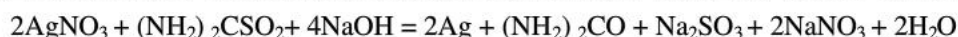
#### 3.1 微细银粉制备中分散剂的作用

银粉制备过程由银晶核的产生与银晶体的生长二个过程组成,银粉制备时如果还原剂的还原性太强或还原速度过快,则生成的银粒子来不及转移,银晶粒在溶液中无序生长,形貌无法控制,得不到均匀和单分散的银颗粒。分散剂对生成银粉颗粒的数量、大小及形态有重要的影响,通过分散剂的用量可控制银粉的粒径。分散剂的作用归纳为:(1)与溶液中的银离子形成配位体改变银离子活性,便于反应平稳进行;(2)为形成银晶核提供晶胚,促使银晶核形成;(3)包裹生成的银颗粒阻碍其继续长大;(4)发挥空间位阻效应,减小银颗粒相互碰撞团聚的几率。

#### 3.2 微细银粉制备分散剂研究进展

分散剂有高分子化合物、表面活性剂和配位体三种类型,文献报道的高分子分散剂主要有聚乙烯吡咯烷酮(PVP)、聚乙烯醇(PVA)、明胶、羧甲基纤维素、聚丙烯酸钠,阿拉伯树胶,其中以 PVP 的应用最为广泛;表面活性剂分散剂主要有长链烷醇胺、十二烷基硫酸钠(DBS)、十六烷基三甲基溴化铵、聚乙二醇、吐温、长链脂肪酸等;配位体分散剂主要有乙二胺四乙酸、柠檬酸钠、二元羧酸、羟基羧酸和硫酸等<sup>[18, 19]</sup>。

甘卫平等研究发现二元分散体系能够有效控制银粉成核与生长速率,制备出分散性良好,形貌和粒径均匀的银粉<sup>[20]</sup>。李建生等利用二氧化硫脲还原剂可反应生成亚硫酸的特点,将配位体亚硫酸作为分散剂组分,大大减少了外加表面活性剂分散剂用量<sup>[21]</sup>,在反应的开始阶段,加入的原料硝酸银溶液直接与二氧化硫脲氧化反应形成黑色银晶核、亚硫酸钠和尿素;在后续反应阶段,原料硝酸银溶液与反应液中含有的亚硫酸钠反应生成亚硫酸银白色沉淀,亚硫酸银进一步和二氧化硫脲反应生成银原子、尿素和亚硫酸钠,银原子在先前形成的银晶核上生长成银晶粒,亚硫酸银沉淀的形成和还原为银原子的反应循环进行,反应式如下:



二氧化硫脲氧化生成的亚硫酸钠、尿素作为分散剂组分在银晶粒表面的吸附,有效地抑制银晶核的过快长大,每一个银晶核表面的分散剂吸附层发挥空间位阻效应,使已经形成的银晶粒无法聚结,银晶粒处于充分分散的状态,粒径得以控制。

#### 3.3 微细银粉制备中分散剂存在的问题和改进方向

分散剂有效发挥作用的添加量一般为原料硝酸银质量的 0.5%-5%,用量偏低时分散效果就不够理想。目前对配位体分散剂研究不多,可供选择的配位体不多。若反应液中存在大量高分子分散剂将使溶液粘度增大,微细银粉难分离和银粉纯度降低;若反应液中存在大量表面活性剂分散剂将使反应液发泡严重,银粉表面难以清洗干净,产品洗涤用水量和消耗乙醇量很大。

抗坏血酸、乙二醛、丙酮醛、乙醛酸或二氧化硫脲还原剂的氧化反应产物自身具有分散剂作用,可减少外加分散剂用量或不用外加分散剂也能阻滞团聚,开发和应用同时具备分散剂功能的还原剂是微细银粉制备分散剂的改进方向。

### 4. 微细银粉形貌控制方法研究进展

#### 4.1 微细银粉形貌控制的作用和影响因素



银粉性能主要取决于银粉结构形貌特征、银粉的粒度及其分布。银粉形貌特征包括银粉的形状、比表面积、体积和表面缺陷等，它们一起决定银粉的综合性能。银粉形状越规则，分散性越好，振实密度和导电性就越高。因此，银粉制备过程中，应根据其实际应用需要进行银粉形貌控制。

在液相化学还原法制备微细银粉的过程中，由于银粉颗粒较小、比表面积大，颗粒之间极易团聚改变结构形貌，银粉颗粒团聚可发生在反应过程中，也可发生在分离干燥的过程中。微细银粉在溶液中通常以单分散颗粒、点接触的软团聚颗粒和面接触的硬团聚颗粒三种形式存在，其中，硬团聚颗粒在外力作用下也很难分散开。单分散的银粉在水溶液体系中，易吸附带电粒子产生双电层结构，悬浮于溶液中不易沉降，影响银粉的洗涤效果，因而在制备银粉时要求银粉以软团聚的状态存在，以便于银粉的洗涤，洗涤完后再采用其它方法使其在干燥过程中呈单分散状态。

微细银粉结构形貌可以是球形、类球形、棒状、片状、树枝状等，片状银粉微粒之间是面接触，理论上导电性更好一些。太阳能电池电极要求高宽比尽量大，以减少银电极线对硅片的光遮挡，所以太阳能电池导电银浆一般采用球形或类球形微细银粉，也有将几种形貌银粉按特定比例混合应用或将不同尺寸球形银粉按特定比例混合应用的研究报道。研究发现液相化学还原法制备银粉时还原剂种类、分散剂、银盐、加料方式、反应液酸度和反应温度等因素对微细银粉结构形貌都有一定影响。

#### 4.2 微细银粉形貌控制方法研究进展

微细银粉形貌控制可以在制备反应过程中化学控制，也可以在制备反应完成后物理控制。由于化学控制方法比较简便和成本低，对其研究开发和应用比较多。

田晓霞等分别以还原糖溶液、聚乙二醇和三乙醇胺为还原剂，制备了薄片状、棒状和类球形纳米银粉，认为银粉形貌的不同与反应液的酸度有关；将不同浓度的硝酸银溶液与三乙醇胺反应，可得到六边形和纳米线型银粉，说明反应溶液的浓度对银粉的形貌有一定的影响<sup>[22]</sup>。郭学益等研究硝酸银浓度、溶液初始 pH 值，以及表面活性剂对超细银粉形貌影响，发现硝酸银浓度和溶液初始 pH 值影响银粉形貌，而表面活性剂对银粉形貌影响不大<sup>[23]</sup>。敖毅伟等研究以抗坏血酸为还原剂、明胶或油酸为保护剂制备银粉的反应体系，发现当 pH 值为 2 时得到的银粉为片状，当 pH 值为 4 时是树枝状，当 pH 值为 7 时是近球形，从而可利用 pH 值控制银粉形貌<sup>[24]</sup>。吴超等以抗坏血酸为还原剂，PVP 为分散剂，分步还原硝酸银制备出微米级银粉，实现以晶种形貌控制银粉形貌<sup>[25]</sup>。陈迎龙等以硝酸银为原料，抗坏血酸为还原剂，羧甲基纤维素为分散剂制备超细银粉，发现反应温度对银粉性能的影响很大，在 30-50℃ 不同温度下，随着温度升高银粉形貌依次为球形、类球形和树枝状，其分散性和振实密度逐渐降低<sup>[26]</sup>。

物理控制方式主要是通过提高颗粒球形度或光洁度，从而提高粉体振实密度和降低比表面积。具体措施主要是将反应完成液高速搅拌使银粉颗粒相互碰撞，提高银粉表面光洁度和降低比表面积<sup>[27]</sup>；将微细银粉用分散剂浸渍后沸腾床干燥，依靠银粉碰撞提高银粉颗粒球形度，筛选粒度适中的球形银粉；将微细银粉高温处理或高压处理、粉碎、整型和筛选表面光洁的银粉。

#### 4.3 微细银粉形貌控制存在的问题和技术改进方向

微细银粉制备时银盐与还原剂的混合方式包括将银盐加入还原剂、将还原剂加入银盐和将银盐和还原剂同时加入反应液三种。为控制微细银粉为球形或类球形形貌，实验室研究中通常采用将银盐快速加入还原剂的方式，其缺点是中试扩大和工业生产时工艺条件控制困难和银粉形貌不稳定。采用分步反应方式，先控制反应条件制备出少量球形银晶种或外加球形晶种，然后将银盐和还原剂同时加入反应液，使后期还原析出的银原子在球形晶种上长大为

球形微细银粉，是银粉形貌控制技术的改进方向。

## 5 结论和展望

太阳能电池的研究开发日新月异，中国在太阳能电池开发和应用领域处在国际前列，特别是太阳能电池组件产品的低成本优势在世界上无可替代。太阳能电池导电银浆和银粉相关技术创新，将进一步提高太阳能电池光电转换效率和降低太阳能电池成本。

太阳能电池导电银浆的生产技术难度比较大，涉及原料供应、产品配方和应用测试多方面问题，需要相关行业的专业人员协同创新才能完成。太阳能电池用微细银粉的开发和产业化是太阳能电池导电银浆国产化的基础，开发人员不能停留在模仿国外早期专利技术阶段，应积极努力通过产学研合作协同创新取得技术突破。

### 参考文献:

- [1]李建生, 刘炳光, 董学通. 用于提高太阳能电池效率的无机纳米材料的研究进展[J]. 无机盐工业, 2014, 46 (9):
- [2] 中华人民共和国科学技术部. 太阳能发电科技发展“十二五”专项规划[J]. 上海建材, 2012, (4):1-7.
- [3]彭 娟, 邓建国, 黄奕刚. 太阳能电池导电银浆的研究进展与市场现状[J]. 材料导报, 2012, 26 (10): 141-150.
- [4]柳 青, 任明淑, 刘子英, 等. 晶体硅太阳能电池正面银导电浆料的研究进展[J]. 信息记录材料, 2012, 13 (2): 39-46.
- [5]中华人民共和国国家标准. 超细银粉[S]. GB/T 1774-2009. 2009-01-05.
- [6]刘 瑜. 化学沉积法生产超细银粉的工艺研究[J]. 无机盐工业, 2003, 35 (6): 27-29.
- [7]赖耀斌, 郭忠诚, 黄 惠, 等. 单分散微米球形银粉的制备工艺[J]. 材料科学与工程学报, 2014, 32 (2): 219-222.
- [8]黄富春, 赵 玲, 张红斌, 等. 太阳能电池浆料用银粉的制备[J]. 贵金属, 2011, 32 (4): 40-45.
- [9]Jost Ernest M .Method of making fine silver powder: US, 4456474[P].1984-06-26.
- [10]Lee Sheng-Long, Wu Jyuhn-Yih, Lin Jing-Chie .Process for the preparation of silver powder with a controlled surface area by reduction reaction :US,5413617[P]. 1995-05-09.
- [11]蔡奕康,陈 才,庞峰飞. 基于不同还原剂体系银粉的可控制备[J]. 无机化学学报,2014, 30 (6): 1339-1344.
- [12] Sasaki Takuya, Hayashi Hisao. High dispersibility spherical silver powder and its producing method : JP, 2001107101[P]. 2001-04-17.
- [13] Cleary Brian P , Kiehl Gary G ,White Weimar W.Preparation of ultra-pure silver: GB, 2358408 [P]. 2001-07-25.
- [14]黄惠. 太阳能电池电极用印刷浆料的银粉及其制备工艺:中国, 102921944[P]. 2013-02-13.
- [15]李宝军. 一种太阳能电池电极浆料用银粉及其制备方法:中国, 101941078[P]. 2011-01-12.
- [16]董学通, 李建生, 刘炳光, 等. 一种硅太阳能电池正面电极银浆及其制备方法

:中国, 2014104210225 [P]. 2014-08-26.

[17]李建生, 李无为, 刘炳光. 一种超细银粉和丙酮酸钙的联合生产方法:中国, 201410396870. 2[P]. 2014-08-14.

[18] Matsushima Hiroshi, Ogi Kozo. Silver powder and manufacturing method therefor: JP, 2005-220380[P]. 2005-08-18.

[19]魏丽丽, 徐盛明, 徐刚. 表面活性剂对超细银粉分散性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2009, 19(3): 595-600.

[20]甘卫平, 林涛, 刘晓刚, 等. 二元分散体系制备高分散性微细银粉[J]. 兵器材料科学与工程, 2014, 37(2): 50-54.

[21]李建生, 刘炳光, 王少杰, 等. 一种导电银浆用超细球形银粉的生产方法:中国, 201410376070. 7 [P]. 2014-08-02.

[22]田晓霞, 张武森, 赵云飞, 等. 化学还原法制备不同形貌的纳米银粉[J]. 信息记录材料 2010, 11(4): 21-24.

[23]郭学益, 焦翠燕, 邓多. 硝酸银溶液性质对超细银粉形貌与粒径的影响[J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2013, 18(6): 912-919.

[24]敖毅伟, 杨云霞, 袁双龙. 化学还原法中制备条件对超细银粉形貌的影响[J]. 粉末冶金技术, 2007, 25(5): 355-359.

[25]吴超, 叶红齐, 董虹, 等. 电子浆料用微米级银粉的分步还原制备及其晶体生长特征[J]. 稀有金属与硬质合金, 2011, 39(3): 31-31.

[26]陈迎龙 甘卫平 刘晓刚, 等. 太阳能电池正面银浆用高分散超细银粉的制备[J]. 稀有金属与硬质合金, 2013, 41(1): 35-40.

[27] Ogi Kozo, Hasegawa Yoshio. Silver powder and method for producing same: US, 2005188788[P]. 2005-09-01.

**作者简介:** 李建生(1964—), 硕士, 教授级高工, 研究方向为化工新材料新技术开发与应用, 已发表研究论文 50 多篇, 获得发明专利授权 15 项。

**联系方式:** [lijiansheng2001@tom.com](mailto:lijiansheng2001@tom.com)