Ag-SnO_2 电接触材料的研究进展及发展趋势

王金龙，付 翀*，宁 静，李 旭，李清馨，路 杨
(西安工程大学 材料工程学院，西安 710048)

摘 要： Ag-SnO_2 电接触材料因具有优良的物理性能、抗熔焊性和耐电弧烧蚀性等特性，已经成为最有可能代替传统有毒电接触材料 Ag-CdO 的一种新型环保电接触材料。基于 40 多篇文献的分析，归纳了包括合金内氧化法、粉末冶金法、喷涂法、模板法、磁控溅射法等制备工艺，增强相改性，增强相调控等方面对 Ag-SnO_2 电接触材料组织性能的影响。提出设计研发新型 Ag-SnO_2 电接触材料的新思路，为 Ag-SnO_2 电接触材料的进一步优化奠定了理论和实验基础。

关键词： 电接触材料；Ag-SnO_2；制备工艺；增强相改性；增强相调控
中图分类号： TM201.4；TG146.3 **文献标识码：** A **文章编号：** 1004-0676(2021)03-0085-08

Research progress and development trend of Ag-SnO_2 electrical contact materials

WANG Jin-long, FU Chong*, NING Jing, LI Xu, LI Qing-xin, LU Yang
(School of Materials Science & Engineering, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China)

Abstract: Ag-SnO_2 electrical contact material has become a new type of environmentally friendly electrical contact material that is most likely to replace the traditional toxic electrical contact material Ag-CdO due to its excellent physical properties, welding resistance and arc ablation resistance. Based on the analysis of more than 40 literatures, the effects of preparation processes including alloy internal oxidation, powder metallurgy, spraying, template method, magnetron sputtering, enhanced phase modification and enhanced phase regulation on the microstructures and properties of Ag-SnO_2 electrical contact materials were summarized. A new method of designing and developing new Ag-SnO_2 electrical contact materials was proposed, which lays a theoretical and experimental basis for the further optimization of Ag-SnO_2 electrical contact materials.

Key words: electrical contact material; Ag-SnO_2; preparation process; enhanced phase modification; enhanced phase regulation

电接触材料作为电器开关、仪表仪器等负载电器的核心组件，担负接通、分断电路的任务，其性能优劣直接决定电器开关的开断能力、接触可靠性、稳定性、通断容量以及使用寿命等[1-2]。Ag-CdO 电接触材料因具有良好的热稳定性、导电性、导热性、抗熔焊性以及耐电弧侵蚀性，被称为“万能触头材料”[1, 3]。然而从环保和安全角度考虑，Cd 元素具有一定毒性，在制备、使用和回收过程，都容易对环境和使用者造成一定危害。大量研究表明，Ag-SnO_2 是最有可能替代 Ag-CdO 的一种环保型电接触材料，其不仅综合性能优良，同时能够满足环保要求，因而被认为是最有前景的电接触材料之一[4]。

虽然 Ag-SnO_2 电接触材料具有良好的物理性能、抗熔焊性、耐电弧侵蚀性已经成为替代 Ag-CdO 的最佳材料，但目前仍存在一些缺陷有待改进：1) Ag 与 SnO_2 浸润性差，在长期电弧侵蚀下，SnO_2 富集

收稿日期：2021-04-25
基金项目：大学生创新创业训练项目(S202010709022)
第一作者：王金龙，男，硕士研究生，研究方向：电工合金、金属基复合材料。E-mail：1415592562@qq.com
*通信作者：付 翀，男，教授，研究方向：电工合金、金属基复合材料。E-mail：fuchong69@163.com

于材料表面，引起接触电阻增大，寿命缩短等问题；2) SnO_2 属硬脆相，Ag-SnO_2 电接触材料的制备及后续加工较困难；3) SnO_2 易团聚，难以均匀分散于 Ag 基体中，导致材料综合性能下降，服役寿命降低。上述问题极大限制了 Ag-SnO_2 电接触材料的进一步开发与应用。因此，国内外研究人员针对上述问题，尝试从制备工艺、表面改性、增强相调控等方面对其优化改进，以期达到改善 Ag-SnO_2 电接触材料综合性能和使用寿命的目的。

1 Ag-SnO_2 电接触材料的制备技术

材料制备技术直接决定 Ag-SnO_2 电接触材料的组织结构，从而影响其物理性能(导电率、硬度、抗熔焊性能、抗电弧侵蚀性能等)[5]。基于 Ag-SnO_2 电接触材料 SnO_2 分散困难，Ag 与 SnO_2 浸润性差等问题，促使国内外研究人员对 Ag-SnO_2 电接触材料制备技术进行了大量研究，从而提高 Ag-SnO_2 电接触材料的综合性能和使用寿命。此外，一些新型 Ag-SnO_2 电接触材料制备技术也不断被开发出来。

1.1 传统制备技术

Ag-SnO_2 电接触材料传统制造技术主要包含合金内氧化法(I/O)和粉末冶金法(P/M)两类[6-8]。I/O 工艺简单、成本低且制备的电接触材料性能优良，被广泛应用工业化生产中。印度 Amitabh 等[9]基于传统 I/O 和 P/M 提出粉末内氧化(P/O)技术。通过细粉快速凝固使晶粒细化、结构均匀不偏析，制备的电接触材料第二相呈弥散分布且具备电导率高、抗熔焊、寿命长等优良特性[10]，但硬度、致密度达不到传统 I/O 水平。P/M 易于调控组织结构且能避免出现“贫氧化物区”，但材料致密度低，SnO_2 团聚严重，限制了其使用范围。粉末冶金法通常包括制粉→压制→烧结→挤压，而根据粉末制备工艺不同，粉末冶金法又可细分机械合金化法、化学沉积法、反应合成法、反应雾化法等。目前 Ag-SnO_2 电接触材料传统制备方法的研究结果如表 1 所示。

表 1 Ag-SnO_2 电接触材料制备方法

Tab.1 Preparation methods of Ag-SnO_2 electric contact material

制备方法		优势	不足	工艺优化	应用
内氧化法 I/O	合金内氧化法	工艺简单、成本低；SnO_2 粒径细小；硬度、强度高；耐电弧烧蚀性能优良	存在“贫氧化区”，组织不均匀；加工性能较差	引入 In 元素[2]；单面内氧化[11]；交替氧化[12-13]；梯度内氧化[14]；高压氧化[10]	工艺较成熟，应用范围广
	粉末内氧化法	晶粒细小、内部组织均匀，第二相弥散分布，电导率高、抗熔焊性能好	致密度和物理性能低，成本高	水雾化+微波烘干[15]；喷射雾化[16-17]；等离子体气雾化[18]	工业化生产新技术
粉末冶金法 P/M	机械合金化法	工艺简单，工艺过程清洁，导电率高，第二相分散均匀	能耗高，制备过程容易引入杂质，接触电阻高	反应球磨法[19]	发展前景较好，不利于大规模生产
	化学沉积法	粉末粒度均匀、细小，SnO_2 弥散分布，硬度和电气性能良好	制粉工艺复杂，涉及化学反应粉末质量不稳定	水热合成共沉积；沉淀还原剂优化[20]	可批量生产
	反应合成法	原材料简单，工艺流程短，加工性能好，接触电阻小、寿命高	存在较为严重的团聚现象	引入 Bi 元素；累积叠轧[21]；大变形加工[22]	实验室研究阶段，发展前景好
	反应雾化法	成分均匀，电寿命长，加工性能和电接触性能良好	生产成本高	反应雾化一步制备 Ag-SnO_2 复合粉体+P/M[23]	应用范围小，有待进一步研究

1.2 制备新技术

Ag-SnO_2 电接触材料的传统制备技术不断改进发展，制备技术日益完善优化，但材料仍存在使用性能不足的问题，促使研究人员不断开发出新型制备技术，以期通过改进制备技术实现 Ag-SnO_2 电接触材料的性能优化。

1.2.1 模板法

模板法是以特定表面性质和形貌尺寸的材料为模板，利用模板空间限域作用实现对合成材料形貌、尺寸、结构等的控制，利用静电吸附、氢键、共价键等在模板表面复合聚合物层，再经过煅烧、溶解等工艺去除模板获得所需材料的方法[24]。因模板法具备分散良好、结构可控、成本低等特点，为制备高度弥散分布的 Ag-SnO_2 电接触材料提供新思路[25]。

Vladan 等[26]利用模板法制备出第二相纳米 SnO_2 颗粒高度弥散的 Ag-SnO_2 电接触材料，有效提

高电接触材料的抗熔焊性和使用寿命，材料密度高，孔隙率低，且显微硬度比传统混粉技术制得材料高20%。但模板法制备 Ag-SnO_2 电接触材料在过程中易引入杂质，且产量少、制备效率低[27]。

1.2.2　等离子喷涂法

等离子喷涂是指喷涂粉末在等离子焰流中快速加热形成熔滴后被高速气流冲击到基体表面并不断叠加、重叠而形成层状结构[28]。付翀等[29]基于 Ag-SnO_2 材料塑延性差，加工成型困难问题，在 Cu 基材表面等离子喷涂 Ag-SnO_2 涂层。涂层内部 SnO_2 呈弥散分布，涂层与基材结合强度高，且具有优良综合性能和使用寿命。但该方法仅适用于简单洁净的基体表面，且涂层厚度难以控制。

1.2.3　冷喷涂法

冷喷涂技术是近些年迅猛发展的新型制备方法，通过将低温(≤600℃)、高速(300~1200 m/s)粒子撞击在基材表面制备涂层材料。利用冷喷涂技术制备 Ag-SnO_2 涂层，由于过程中喷涂温度较低，相变驱动力较小，晶粒生长受限，可有效消除涂层不均匀结晶的情况[30]，改善材料的力学性能和耐电弧侵蚀性能，提高产品质量。Wang 等[31]在喷砂处理后 Cu 基材上喷涂获得 Ag-SnO_2 涂层，经真空退火处理获得组织均匀，基材与涂层结合紧密，气孔率低，抗电弧侵蚀性能优良的 Ag-SnO_2 涂层。但该方法制备的涂层致密度较低，且对基体表面要求较高。

1.2.4　磁控溅射法

磁控溅射技术成分均匀可控，是一种极有前途纳米 Ag-SnO_2 复合涂层的制备方法。但由于 Ag-SnO_2 电接触材料中 SnO_2 含量较高，且磁控溅射制备复合涂层过程中存在膜内应力太大导致成膜困难且膜基结合差等问题极大限制了磁控溅射制备 Ag-SnO_2 复合涂层的实现。

鉴于此，杜铁路[32]通过加温样品盘释放 Ag 和 SnO_2 溅射过程中热膨胀系数不同所造成的涂层内应力，促进沉积原子结晶，并在基底与涂层间引入铬镍过渡层分散界面应力，保证膜基结合力，获得尺寸均匀纳米级 SnO_2 弥散分布且基底与涂层牢固结合的 Ag-SnO_2 复合涂层。涂层表面粗糙度在 50 nm 以下，与传统技术相比，材料接触电阻、导电率、耐电弧烧蚀性能和使用寿命均显著提高。此方法工序少、效率高、绿色环保，设备操作简单，具有良好的工业化应用前景。

表 2　Ag-SnO_2 电接触材料制备新技术

Tab.2 New preparation methods of Ag-SnO_2 electrical contact materials

制备方法	制备工艺	优势	不足
模板法	模板与 SnO_2 悬浮液混合→加入 $AgNO_3$ →煅烧→冷压→烧结→退火	硬度高，密度高，孔隙率低，纳米 SnO_2 分布均匀，抗熔焊性能优良	易引入杂质，工艺复杂，制备效率低
超音速等离子喷涂法	纳米$(Sn_{0.8}La_{0.2})O_2$ 粉末+Ag 粉→高能球磨→等离子喷涂	纳米$(Sn_{0.8}La_{0.2})O_2$ 弥散分布，涂层与基体结合紧密，耐电弧侵蚀性能良好	涂层厚度较难控制，基体表面复杂喷涂困难
冷喷涂法	纳米 SnO_2 粉末+Ag 粉→高能球磨→退火→冷喷涂	涂层气孔率低，结晶化均匀，结构均匀致密，机械性能优良	涂层致密度及硬度较低，基体表面要求较高
磁控溅射法	基底抛光、超声、干燥→磁控溅射铬镍层→磁控溅射 Ag-SnO_2→退火	接触电阻良好，涂层与基底结合良好，纳米 SnO_2 均匀分布，使用寿命长	涂层较薄，效率低，成本高，靶材回收率低

2　增强相改性

增强相改性主要指通过向增强相中引入其他组元掺杂或采用表面镀层改性实现改善增强相表面结构与性能的目的。对于 Ag-SnO_2 电接触材料，陶瓷增强相 SnO_2 与基体 Ag 相热物理性能相差较大且两者之间润湿性差无法实现良好结合，进而难以保证 Ag-SnO_2 电接触材料的使用性能。因此，对 Ag-SnO_2 电接触材料增强相进行改性成为广大研究人员的重点关注方向。

2.1　表面镀层改性

对 SnO_2 表面包覆来改善 SnO_2 表面特性，从而改善 Ag 与 SnO_2 间的结合状态。通过在刚硬增强相 SnO_2 表面包覆合适柔性镀层，不仅不会减弱强化效果，而且可以增强材料本身韧性，表面镀层改性能很大程度上改善材料常见强韧化冲突矛盾的现状，为开发强韧化 Ag-SnO_2 电接触材料奠定了基础。

2.1.1　化学镀改性

化学镀是将 SnO_2 引入含有 Ag^+溶液中，经机

械、感力或超声波等方法使其分散，随后引入还原剂，利用非均相形核原理使 Ag^+还原并沉积于 SnO_2 表面合成 Ag-SnO_2 复合粉体。化学镀能使 Ag 与 SnO_2 混合均匀，而且由于 SnO_2 表面包覆纳米 Ag，压制时是 Ag-Ag 相互接触(Ag 塑性优良)，使粉末烧结变为 Ag-Ag 单相烧结，改善烧结活性，提高致密度。同时反应迅速，效率高，SnO_2 粒度和还原剂种类用量自由。

凌国平等[33]和郑冀等[34]通过化学镀制备具有核/壳包覆结构的纳米 Ag-SnO_2 复合粉末，改善了 Ag 与 SnO_2 界面润湿性，其烧结性能好，Ag 与 SnO_2 界面结合强度高，材料抗拉强度、延伸率和导电率明显提升。乔秀清等[35-36]通过利用湿化学法实现 SnO_2 微球包覆纳米 Ag，获得表面载银 Ag-SnO_2 复合微球，Ag 与 SnO_2 间强分子间作用力使 Ag 与 SnO_2 润湿性提高，界面结合强度增强，从而提高材料的物理机械性能。

目前，此种改性方法研究较多，但 SnO_2 在溶液中易团聚，尺寸均匀性差及粒子污染问题制约了此方法的发展。

2.1.2 电沉积改性

电沉积技术利用直流电作用在液相中实现传质沉积，沉积速率较其他沉积方法更快，工艺简单，是获得镀层的有效手段。电沉积技术通过 SnO_2 表面沉积 Ag 改变 SnO_2 晶格结构或表面电子分布，从而改善界面结合特性，实现 Ag 与 SnO_2 紧密结合。

乔正阳等[37-38]针对 SnO_2 在 Ag 基体中分散不佳、SnO_2 与 Ag 之间润湿性较差等问题，利用自主研发的可旋转电沉积设备，通过在 SnO_2 表面电沉积 Ag，获得微米 SnO_2 表面载 Ag 复合粉体，结合热挤压、旋锻与拉丝工艺获得 Ag-SnO_2 电接触材料，与传统 Ag-SnO_2 电接触材料相比，电沉积改性 Ag-SnO_2 电接触材料导电率更高，塑性加工性优良，使用寿命更长。

2.2 掺杂改性

掺杂改性是将第三组元通过化学原位掺杂经扩散引入增强相晶格中，诱发晶格畸变或缺陷，从而改变增强相基本物理特性实现改性。

Ag-SnO_2 电接触材料在长期服役过程中 Ag 容易熔化、气化，造成材料表面成分重新分布，形成富 Ag 区和 SnO_2 聚集区，导致这一情况的原因是 Ag 与 SnO_2 物理性质相差较大且两者润湿性差[39]。基于此，Bohm 等[40]首次引入添加剂改善液态 Ag 与 SnO_2 之间润湿性，降低接触电阻，使 SnO_2 悬浮于 Ag 熔池中，降低 SnO_2 重新偏聚的可能，从而降低温升、提升抗电弧侵蚀性能和使用寿命。

添加剂选择主要基于以下原则，1) 改善润湿性；2) 良好热稳定性；3) 优良化学稳定性。不同添加剂在材料服役性能中扮演怎样的角色是研究的重点，利用试验及理论模拟得到的成果如表 3 所示。

表 3 常用添加剂对 Ag-SnO_2 作用[6]

Tab.3 Summary of dopant-AgSnO_2 interactions

添加剂	显微结构	润湿性(润湿角 α)	电性能
Bi_2O_3	SnO_2 在基体中形成“细胞”状组织结构	不显著改善润湿性	抗熔焊性好，接触电阻小
Sb_2O_3	Ag 区和微孔	/	抗侵蚀性差，抗熔焊性较好，接触电阻小
WO_3	蜂窝状和纯银层	不显著改善润湿性	抗熔焊性好，接触电阻小，抗侵蚀性差
MoO_3	Ag 区和微孔	α<90°	抗侵蚀性差，抗熔焊性较好，接触电阻小
CuO	界面处扩散、渗透形成过渡层，	α 减小至 20°	抗熔焊性好，抗侵蚀较差，接触电阻低
TiO_2	纳米 SnO_2 颗粒较小且分布弥散、均匀	改善润湿性	抗熔焊性好，接触电阻低
稀土元素	细化晶粒，稀土及其氧化物均匀分布	改善润湿性	合金内氧化
TeO_2	网络和微孔结构	α<90°	抗熔焊性好，抗侵蚀

3 增强相调控

Ag-SnO_2 作为金属基复合材料，第二相 SnO_2 的形态、尺度以及在 Ag 基体中的分布状态会直接影响材料的性能，因此控制增强相形貌及分布对于获得高性能电接触材料有重要理论意义和实用价值。

3.1 增强相纳米化

研究人员在 CuW 触头研究中发现，在一定条件下将材料组分细化至纳米级可使电弧由收缩型转化为扩散型，改善材料电弧特性，降低电弧侵蚀率。与此同时，纳米技术的迅速崛起为 Ag-SnO_2 电接触

材料的研究提供新可能。

研究发现 SnO_2 纳米化可有效改善材料的抗电弧侵蚀性能。纳米化 SnO_2 比表面积较大，增大了与 Ag 熔池接触面积 A，粘附功 W 与接触面积 A 成正比，A 增大，W 会相应增大，如式(1)所示：

$$W=A\cdot\gamma_{Ag}\cdot(1+\cos\alpha) \quad (1)$$

式(1)中，γ_{Ag} 为液体 Ag 表面能，α 为 Ag 与 SnO_2 润湿角。SnO_2 颗粒越小，接触面积越大，最终使熔融体系粘度增大。SnO_2 凝固后容易形成稳定网络结构，降低电弧侵蚀速率，提高使用寿命。同时，SnO_2 晶粒越小，电弧侵蚀下分解越快，SnO_2 以更大面积暴露在电弧下，使 SnO_2 分解速率加快，在银熔池凝固过程生成 SnO 与 O_2(如式(2)所示)，导致材料表面出现气孔及空洞等，有利于提高电接触材料的抗熔焊性能。

$$SnO_2\rightarrow SnO+1/2O_2 \quad (2)$$

郑晓华等[41]以纳米 SnO_2(20~80 nm)为原料，结合高能球磨技术制备复合粉体并通过热挤压、轧制等工艺获得加工性能和抗电弧侵蚀性能优良的 Ag-SnO_2 电接触材料；Wang 等[42]利用优化的化学共沉淀法制备出 SnO_2 颗粒弥散分布的纳米 Ag-SnO_2(20 nm)复合粉末，获得的粉末具有良好加工性能且 Ag 与 SnO_2 界面结合强度高。

3.2 增强相结构形貌调控

针对 Ag-SnO_2 电接触材料在长期电弧侵蚀下，SnO_2 重新富集在材料表面，引起接触电阻增大、温升高这一问题，研究人员通过调控 SnO_2 形貌结构，利用其特殊形貌结构限制 SnO_2 在银熔池中上浮，降低熔池喷溅，长久保持材料优良特性，提高使用寿命。

乔秀清[36]采用湿化学方法制备出了不同形貌 SnO_2 增强相(纳米颗粒、实心微球、空心微球、亚微米棒)的 Ag-SnO_2 电接触材料，对比研究表明，增强相形貌直接影响电接触材料的性能，不同形貌增强相制备的材料综合性能依次排序为：亚微米棒＞纳米颗粒＞实心微球＞空心微球。亚微米棒制备的电接触材料接触电阻更稳定，熔焊力小，质损减少且抗电弧侵独性能好。

Jiang 等[43]以化学沉淀法成功制备的直径 1~4 mm、长度 5~50 mm 棒状 SnO_2 为增强相制备出 Ag-SnO_2 电接触材料。结果表明，与 Ag-球状 SnO_2 电接触材料相比，Ag-棒状 SnO_2 电接触材料微观结构均匀且性能更优良，其具有高硬度(117.55)、低电阻率(2.227 μΩ·cm)、材料转移低和电寿命长等优点。

4　结语与展望

Ag-SnO_2 电接触材料作为最有可能替代 Ag-CdO 的环保型电接触材料，受到国内外研究者的重点关注。但随着应用领域拓展及使用要求提高，对 Ag-SnO_2 电接触材料的性能及寿命要求也越来越高，因此，进一步提高材料的综合性能和使用寿命势在必行。

1) 优化改进传统 Ag-SnO_2 电接触材料制备技术，大力开发新型材料制备技术，同时不断简化制备技术，降低成本。

2) 通过物理化学方法实现增强相纳米化及增强相形貌结构调控，研发新型添加剂(如 $La_2Sn_2O_7$、$Bi_2Sn_2O_7$、$AgSbO_3$ 等反应生成物添加剂)及表面改性技术改善 Ag 和 SnO_2 之间的润湿性及结合强度问题，进一步提升 Ag-SnO_2 电接触材料的性能，改善材料加工困难和使用寿命短的问题。

3) Ag-SnO_2 电接触材料空间三维结构设计有望成为 Ag-SnO_2 电接触材料的重要发展方向。在 Ag-SnO_2 复合体系基础上，调控 SnO_2 形貌结构并设计搭建空间骨架模型，解决 SnO_2 在 Ag 基体中的分散问题，并结合增强相表面改性，实现 Ag 和 SnO_2 的紧密结合，利用空间骨架束缚作用限制长期电弧侵蚀下 SnO_2 上浮，避免 SnO_2 富集材料表面造成使用性能下降的问题。

4) 目前探究 Ag-SnO_2 电接触材料组织及电性能多通过实验手段进行，无法对材料服役过程进行动态监控，因此完善相关理论模型并结合逐步成熟的有限元模拟技术构建 Ag-SnO_2 电接触服役过程的可视化模型，是进一步改良 Ag-SnO_2 电接触材料组织性能的关键。

参考文献：

[1] 王塞北, 王松, 孙勇, 等. 新型银基电接触材料的研究进展[J]. 贵金属, 2019, 40(4): 72-77.
WANG S B, WANG S, SUN Y, et al. Research progress of new silver-based electrical contact materials [J]. Precious Metals, 2019, 40(4): 72-77.

[2] WANG S, ZHENG T T, XIE M, et al. Internal oxidation thermodynamics and isothermal oxidation behavior of $AgSnO_2$ electrical contact materials [J]. Rare Metals Materials and Engineering, 2014, 43(4): 796-798.

[3] 溥存继, 谢明, 杜文佳, 等. 贵金属基电接触材料的研究进展[J]. 材料导报, 2014, 28(07): 22-25.
FU C J, XIE M, DU W J, et al. Research development of precious metal-based electric contact materials [J]. Materials Reports, 2014, 28(07): 22-25.

[4] SWINGLER J, SUMPTION A. Arc erosion of $AgSnO_2$ electrical contacts at different stages of a break operation [J]. Rare Metals, 2010, 29(3): 248-254.

[5] HOSSEIN B F, MOGHADAM S, MASOUMI S. Forming ohmic Ag/SnO_2 contacts [J]. Materials Letters, 2015, 141: 141-144.

[6] 乔秀清, 申乾宏, 陈乐生, 等. $AgSnO_2$ 电接触材料的研究进展[J]. 材料导报, 2013, 27(1): 1-6.
QIAO X Q, SHEN Q H, CHEN L S, et al. Research progress in $AgSnO_2$ electrical contact materials [J]. Materials Reports, 2013, 27(1): 1-6.

[7] 于朝清, 刘雪梅, 任小梅, 等. $AgSnO_2$ 电接触材料制造技术的研究进展[J]. 贵金属, 2014, 35(S1): 93-99.
YU C Q, LIU X M, REN X M, et al. The research progress of $AgSnO_2$ electrical contact materials manufacturing technology [J]. Precious Metals, 2014, 35(S1): 93-99.

[8] IGARASHI T, SHIBATA M, KODAMA Y. The precipitation behavior of oxide during internal oxidation of Ag-In-Sn alloys [J]. Journal of the Japan Institute of Metals, 1980, 44(4): 378-386.

[9] AMITABH V, AMITAVA R, TANJORE R, et al. 银氧化锡氧化铟电触头材料的加工及其特性[J]. 电工合金, 1992(1): 43-47.
AMITABH V, AMITAVA R, TANJORE R, et al. Processing and characteristics of silver tin oxide indium oxide electrical contact materials [J]. Electrical Engineering Materials, 1992(1): 43-47.

[10] 王松, 张吉明, 刘满门, 等. 制备工艺对 $AgSnO_2$(8)In_2O_3(4)电接触材料组织与性能的影响[J]. 稀有金属与硬质合金, 2015, 43(2): 45-49.
WANG S, ZHANG J M, LIU M M, et al. The effects of preparation processes on the microstructure and properties of $AgSnO_2$(8)In_2O_3(4) electrical contact material [J]. Rare Metals and Cemented Carbides, 2015, 43(2): 45-49.

[11] 穆成法, 杨辉. 单面内氧化银氧化锡氧化铟电接触材料及其制备方法: CN201910786069.4 [P]. 2019-08-23.
MU C F, YANG H. One-sided silver oxide tin oxide indium oxide electrical contact material and its preparation method: CN201910786069.4 [P]. 2019-08-23.

[12] 李杰, 颜小芳, 翁桅, 等. 一种氧化－还原方法交替制备细小氧化物颗粒增强银基电接触材料的工艺: CN 201410530776.4 [P]. 2014-10-10.
LI J, YAN X F, WENG W, et al. A process for alternately preparing fine oxide particles reinforced silver-based electrical contact materials by oxidation-reduction method: CN 201410530776.4 [P]. 2014-10-10.

[13] 李杰, 翁桅, 颜小芳, 等. 交替氧化工艺参数对银氧化锡内氧化后组织的影响[J]. 材料导报, 2015, 29(S2): 84-86.
LI J, WENG W, YAN X F, et al. Effect of technics parameters of alternating oxidation on $AgSnO_2$ microstructure after internal oxidization [J]. Materials Reports, 2015, 29(S2): 84-86.

[14] 刘远廷, 刘承峰, 石建华, 等. 一种梯度内氧化法制备银氧化锡氧化铟电接触材料的工艺方法及其材料: CN 201110066746.9 [P]. 2011-05-25.
LIU Y T, LIU C F, SHI J H, et al. A process for preparing silver tin oxide indium oxide electrical contact material by gradient internal oxidation and its material: CN 201110066746.9 [P]. 2011-05-25.

[15] 李杰, 颜小芳, 张秀芳, 等. 一种微波加热制备银氧化锡电接触材料的方法: CN 201711289931.8 [P]. 2017-12-08.
LI J, YAN X F, ZHANG X F, et al. A method for preparing silver tin oxide electrical contact material by microwave heating: CN 201711289931.8 [P]. 2017-12-08.

[16] 刘远廷, 刘承峰, 石建化, 等. 银氧化锡材料的喷射雾化技术: CN 201010150198.3 [P]. 2010-04-15.
LIU Y T, LIU C F, SHI J H, et al. Spray atomization technology of silver tin oxide materials: CN 201010150198.3 [P]. 2010-04-15.

[17] 李进, 马光, 郑晶, 等. 喷射共沉积反应制备银氧化锡电接触材料的方法: CN 201010575038.3 [P]. 2010-12-06.
LI J, MA G, ZHENG J, et al. Preparation of silver tin oxide electrical contact materials by spray co-deposition: CN 201010575038.3 [P]. 2010-12-06.

[18] 谢斌, 张秀勤, 赵延飞, 等. 银氧化锡电接触材料用微米复合二氧化锡粉末的制备方法: CN 201911068517.3 [P]. 2019-11-05.
XIE B, ZHANG X Q, ZHAO Y F, et al. Preparation method of micron composite tin dioxide powder for silver tin oxide electrical contact materials: CN 201911068517.3 [P]. 2019-11-05.

[19] LORRAIN N, CHAFFRON L, CARRY C, et al. Kinetics and formation mechanisms of the nanocomposite powder

$AgSnO_2$ prepared by reactive milling [J]. Material Science Engineering A, 2004, 367: 1-8.

[20] WANG J B, QIU H H, SI F. Preparation of Ag/SnO_2 contact material by chemical deposition [J]. Defect and Diffusion Forum, 2019, 394(3): 22-25.

[21] 周晓龙, 陶麒鹦, 周允红. 累积叠轧工艺对 $AgSnO_2$ 复合材料组织与性能的影响(英文)[J]. 稀有金属材料与工程, 2017, 46(4): 942-945.
ZHOU X L, TAO Q Y, ZHOU Y H. Microstructure and properties of $AgSnO_2$ composites by accumulative roll-bonding process [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2017, 46(04): 942-945.

[22] 张志伟, 侯文龙, 王瑞云. 大塑性变形过程中 Ag/SnO_2 电接触材料显微组织演变[C]. 智能信息技术应用学会, 2010: 227-230.
ZHANG Z W, HOU W L, WANG R Y. Microstructure evolution of Ag/SnO_2 electrical contact materials during large plastic deformation [C]. Intelligent Information Technology Application Society, 2010: 227-230.

[23] BEHRENS V, HONIG T, KRAUS A, et al. Application of a new silver/tin oxide for capacitive loads [C]. Proc of the 40th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, 1994: 269-273.

[24] 鲍艳, 杨永强, 马建中. 模板法制备中空结构材料的研究进展[J]. 无机材料学报, 2013, 28(5): 459-468.
BAO Y, YANG Y Q, MA J Z. Research progress of hollow structural materials prepared via templating method [J]. Journal of Inorganic Materials, 2013, 28(5): 459-468.

[25] 王金龙, 付翀, 李清馨, 等. 淀粉模板法制备 Ag-SnO_2 电接触材料[J]. 西安工程大学学报, 2020, 34(3): 61-66.
WANG J L, FU C, LI Q X, et al. Preparation of Ag-SnO_2 electrical contact materials with starch template method [J]. Journal of Xi'an Polytechnic University, 2020, 34(3): 61-66.

[26] VLADAN Ć, ALEKSANDAR Ć, NADEŽDA T. Improving dispersion of SnO_2 nanoparticles in Ag-SnO_2 electrical contact materials using template method [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2013, 567: 33-39.

[27] WANG B, HAN N, MENG D, et al. Filterpaper-templated preparation of ZnO thin films and examination of their gas-sensing properties [J]. Particuology, 2011, 9(3): 253-259.

[28] 梁波, 丁传贤. 纳米 Al_2O_3 添加对 ZrO_2 涂层显微结构与性能的影响[J]. 航空材料学报, 2009, 29(2): 48-52.
LIANG B, DING C X. Effect of nano Al_2O_3 addition on the microstructure and properties of ZrO_2 coating [J]. Journal of Aeronautical Materials, 2009, 29(2): 48-52.

[29] 付翀, 王俊勃, 杨敏鸽, 等. 等离子喷涂 Ag/($Sn_{0.8}La_{0.2}$)O_2 涂层的组织及电性能[J]. 金属学报, 2013, 49(3): 325-329.
FU C, WANG J B, YANG M G, et al. Microstructure and electrical properties of Ag/($Sn_{0.8}La_{0.2}$)O_2 coating prepared by plasma spaying [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2013, 49(3): 325-329.

[30] 李文亚, 李长久, 王豫跃, 等. 冷喷涂 Cu 粒子参量对其碰撞变形行为的影响[J]. 金属学报, 2005, 41(3): 282-286.
LI W Y, LI C J, WANG Y Y, et al. Effect of parameters of cold sprayed Cu particles on its impacting behavior [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2005, 41(3): 282-286.

[31] WANG J, ZHOU X, LU L, et al. Microstructure and properties of Ag/SnO_2 coatings prepared by cold spraying [J]. Surf Coatings Technology, 2013, 236: 224-229.

[32] 杜铁路. 一种银氧化锡复合涂层及其制备方法: CN 201910147065.1 [P]. 2019-02-27.
DU T L. Silver tin oxide composite coating and preparation method thereof: CN 201910147065.1 [P]. 2019-02-27.

[33] 凌国平, 王尚军, 孟亮. 杂质对化学镀 Ag-SnO_2 粉末烧结组织及性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2005, 34(6): 886-890.
LING G P, WANG S J, MENG L. Effect of the impurity in electroless plated powders on morphology and properties of sintered $AgSnO_2$ materials [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2005, 34(6): 886-890.

[34] 郑冀, 张尧卿, 李松林, 等. 表面修饰对 $AgSnO_2$ 触头材料组织性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2006, 27(5): 118-121.
ZHENG J, ZHANG Y Q, LI S L, et al. Influence of surface modification on the structure and properties of $AgSnO_2$ electric contact materials [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2006, 27(5): 118-121.

[35] 乔秀清, 陈骋, 娄湘虹. 载银 SnO_2 复合微球的制备及表征[J]. 材料科学与工程学报, 2013, 31(5): 641-644.
QIAO X Q, CHEN C, LOU X H. Preparation and characterization of SnO_2 microsphere coated with Ag nanoparticles [J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2013, 31(5): 641-644.

[36] 乔秀清. SnO_2 形貌调控与改性及其在 Ag 基电接触材料中的应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
QIAO X Q. Morphology regulation and modifica-tion of SnO_2 and its application in silver-based electricial contact

materials [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.

[37] QIAO Z, ZHANG L, SHEN Q, et al. Morphologies and properties of Ag-SnO_2 composites prepared by an electroplating method [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2016, 45(1): 341-344.

[38] 乔正阳. 电沉积改性 Ag-SnO_2 电接触材料及电性能研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
QIAO Z Y. Study on electrodeposition modified Ag-SnO_2 electrical contact material and its electrical properties [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019.

[39] KIM J G, CHOI I, LEE D G. Contact angle and wettability of hybrid surface-treated metal adherends [J]. Journal of Adhesion Science and Technology, 2013, 27(7): 794-810.

[40] BOHM W, BEHRENS N, LINDMAYERET M. The switching performance of an improved silver-tin oxide contact material [C] //Proceedings of the 27th Holm Conference on Electrical Contacts, Chicago, 1981: 51.

[41] 郑晓华, 杨芳儿, 张玲洁, 等. Ag/纳米 SnO_2 电接触材料的制备及其电学性能[J]. 稀有金属材料与工程, 2016, 45(S1): 206-209.
ZHENG X H, YANG F E, ZHANG L J, et al. Preparation and electrical properties of Ag/Nano-SnO_2 electrical contact material [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2016, 45(S1): 206-209.

[42] WANG J B, ZHANG Y, YANG G, et al. Observation of arc discharging process of nanocomposite Ag-SnO_2 and La doped Ag-SnO_2 contact with a high-speed camera [J]. Materials Science & Engineering B, 2006, 131(1/3): 230-236.

[43] JIANG Y, LIU S H, CHEN J L, et al. Preparation of rod-like SnO_2 powder and its application in Ag-SnO_2 electrical contact materials [J]. Materials Research Innovations, 2016, 19(4): S152-S156.

＊＊

《贵金属》征稿启事

《贵金属》（*Precious Metals*）季刊创办于 1980 年，为昆明贵金属研究所和中国有色金属学会共同主办、国内外公开发行的学术期刊。主要报道 8 个贵金属元素（Au、Ag、Pt、Pd、Rh、Ir、Os、Ru）在冶金、材料、化学、分析测试等科技领域的研究论文、综合评述。

作者投稿请登录本刊网站，按模板格式灌文后将稿件发至本刊收稿 E-mail 邮箱。编辑部在检查和检测后回复收稿信息（3 天内），审稿完成后（一般 1 个月内）会尽快通知作者。投稿后如未收到反馈信息，请通过邮件或电话了解情况。

征稿简则

一、来稿一般在 5000~7000 字，篇幅 5~10 页。

二、应保证数据真实，论证合理，结果可靠。发表论文文责自负。

三、文章格式

1、中、英文题目：简洁切题。中文题目一般控制在 20 字以内；英文题目不宜过长，仅句首字母和专有名词大写。

2、中、英文摘要：简述研究目的、方法、结果及结论（150~250 字），中英文摘要内容对应一致。

3、中英文关键词：3~6 个。

4、作者简介：文稿首页页脚提供第一作者和通讯作者简要信息，包括姓名、性别、学历、职称、研究方向和 E-mail。若论文属基金项目，应提供项目来源及编号。

5、正文：结构布置合理，文字简练通顺，引用资料应注明参考文献序号。

6、图表：图表应清晰简介，紧随相应的文字说明，并提供中英文的图题和表头。图表内的符号和单位量值采用国际单位制。

7、英文稿件：英文稿件须附相应的中文题名、单位、摘要和图题、表头。国内作者投英文稿件时请随附**论文中译稿**。

四、参考文献著录格式

1、GB/T 7714-2015，采用顺序编码制。

2、为便于国际检索，非英文文献需提供原文英文题录（无英文题目的无需自译）。

3、参考文献中外作者的姓名均采用“姓前名后”的格式，最多保留前 3 名作者。英文姓名全部使用大写字母，名可采用首字母简写形式。

联系电话：0871-68328632

收稿 E-mail：**bjba@ipm.com.cn**

地址：昆明市高新技术开发区科技路 988 号

《贵金属》编辑部