

# AgSnO<sub>2</sub>NiO 电触头材料电接触性能的研究

周晓龙<sup>1</sup>, 熊爱虎<sup>1</sup>, 刘满门<sup>2</sup>, 郑忠<sup>3</sup>, 于杰<sup>1</sup>, 王立惠<sup>4</sup>

(1. 昆明理工大学 云南省新材料制备与加工重点实验室, 云南 昆明 650093)

(2. 稀贵金属综合利用新技术国家重点实验室, 云南 昆明 650106)

(3. 哈尔滨工业大学, 黑龙江 哈尔滨 150001)

(4. 中国有色桂林矿产地质研究院有限公司 桂林市微电子元件电极材料与生物纳米材料重点实验室, 广西 桂林 541004)

**摘要:** 采用合金内氧化法制备了不同 NiO 含量的 AgSnO<sub>2</sub>NiO 电触头材料, 在 JF04C 触点材料测试机上对材料进行电接触试验, 研究了该材料的接触电阻、抗熔焊性、材料转移特性, 并通过扫描电镜对试样阴/阳极表面电侵蚀下的微观形貌进行了分析。结果表明, AgSnO<sub>2</sub>NiO 触头材料接触电阻小, 当电压不高于 18 V 时, 接触电阻随开闭次数的增加呈现出缓慢下降最后趋于稳定的趋势, 而当测试电压增大到 25 V 时, 各试样的接触电阻随之增大, 且各试样接触电阻的增幅不同; 对 NiO 含量不变的试样, 其熔焊性小并随测试电压的增大, 呈现出先减小后增大的趋势; 材料的燃弧能量随测试电压的增大而升高, NiO 含量的增加对减小燃弧能量的作用不明显。电接触过程材料为阳极转移, 材料的损耗量随 NiO 加入量的增多而降低, 阴/阳极触头表面呈凹凸状, 且明显附有一层凝固后的熔融金属液浆糊状峰, 材料转移主要以熔桥方式进行。

**关键词:** AgSnO<sub>2</sub>NiO; 合金内氧化; 接触电阻; 抗熔焊性; 材料转移

**中图分类号:** TG146.3<sup>+</sup>2

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-185X(2019)09-2885-08

电触头材料是继电器、开关柜、家用电器、接触器的重要组成部分, 其优良性能是保障开关电器的可靠性、开断容量和使用寿命的关键<sup>[1]</sup>。银基金属氧化物因具有耐腐蚀性好, 抗熔焊性强, 接触电阻低而稳定等综合电性能, 成为广泛应用于高低压电器中的电接触材料<sup>[2]</sup>。作为最早开发应用的电触头材料, AgCdO 触头材料中含有对人类健康和环境有害的元素 Cd, 在日益强调环保的今天而面临巨大挑战<sup>[3,4]</sup>。因此, 研究人员迫切需要开发新型无毒材料来取代传统的 AgCdO。

AgSnO<sub>2</sub> 环保无毒且具有突出的抗熔焊、耐电弧侵蚀性而成为研究的热点, 被认为是最有可能替代 AgCdO 的触头材料之一。但是, 其在应用中温升较高、难加工、接触电阻大等一系列问题严重阻碍了其大规模的应用<sup>[5-7]</sup>。为了进一步改善 AgSnO<sub>2</sub> 材料的性能, 国内外研究人员作了大量的工作。

熊经先等<sup>[8]</sup>通过化学共沉积法制备了含不同添加剂 (CuO、Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 及不含添加剂的 AgSnO<sub>2</sub> 合金粉, 并制成铆钉型触头研究其电性能。检测 4 组拉拔后 AgSnO<sub>2</sub> 线材的电阻率, 得到电阻率分别为 2.23, 2.27, 2.29, 2.26 μΩ·cm, 可知仅 CuO 的加入可改善 AgSnO<sub>2</sub> 材料的电阻, 但减弱作用不强。朱艳彩等<sup>[9]</sup>

采用溶胶-凝胶法制得添加了 Bi 元素的 Ag(SnBi)O<sub>2</sub> 电触头材料, 并与无添加物的纳米复合 AgSnO<sub>2</sub> 材料进行了对比, 发现 Bi 元素的添加能够改善 Ag 对 SnO<sub>2</sub> 的润湿性, 避免了因 SnO<sub>2</sub> 富集而使接触电阻升高, 从而提高触头材料耐电弧烧损、抗熔焊性能及使用寿命。王海涛等<sup>[10]</sup>探究了稀土元素添加剂 La、Ce 对 AgSnO<sub>2</sub> 材料润湿性的影响, 结果表明 La 的加入可显著提高 Ag 对 SnO<sub>2</sub> 的浸润性, AgSnO<sub>2</sub>La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 材料的电性能较 AgSnO<sub>2</sub> 材料得到了较显著的提高。

目前, AgSnO<sub>2</sub> 电触头材料的改善工作仍然没有得到很好的解决, 对 AgSnO<sub>2</sub> 触头材料的进一步研究仍需不断探索。维也纳工业大学 Rieder 教授等<sup>[11]</sup>认为, 触头材料的制备工艺及添加剂的选择是决定材料电接触性能的关键因素。作为低压电触头材料, AgNi 具有较优的可加工塑性、接触电阻小、耐磨损性好等特性, 但其还存在抗熔焊性能差、机械强度低等缺点<sup>[12-14]</sup>。考虑到 AgSnO<sub>2</sub> 和 AgNi 高度互补性的电性能及加工特性, 本实验通过合金内氧化结合高温烧结法制备了不同 NiO 含量的 AgSnO<sub>2</sub>NiO 复合材料, 并在 JF04C 触点材料测试机上对材料进行电接触试验, 探究其电接触性能和 NiO 加入量对接触性能的影响。

收稿日期: 2018-09-10

基金项目: 云南省科技计划重点项目 (2017FA027); 国家自然科学基金 (51361016)

作者简介: 周晓龙, 男, 1969 年生, 博士, 教授, 昆明理工大学材料科学与工程学院, 云南 昆明 650093, E-mail: kmzxlong@163.com

1 实 验

原料: Ag 粉(粒度 40~50 μm, 纯度 99.99%)、AgSn<sub>14.76</sub> 合金粉(粒度 40~50 μm, 纯度 99.99%)、Ni 粉(粒度 75 μm, 纯度 99.5%)。配制 200 g 不同成分的 AgSnO<sub>2</sub>NiO 锭坯所需原料的量见表 1。

采用合金内氧化+高温烧结法来制备 AgSnO<sub>2</sub>NiO 电触头材料。将 AgSn<sub>14.76</sub> 合金粉平铺于刚玉中, 经过 100 ℃ (保温 1 h)→200 ℃ (保温 1 h)→400 ℃ (保温 2 h)→800 ℃ (保温 4 h)的烧结工艺, 使 AgSn<sub>14.76</sub> 合金粉完全内氧化为 AgSnO<sub>2</sub>。在行星式球磨机(型号: QM-ISP2)中对 Ag 粉、AgSnO<sub>2</sub> 合金粉、Ni 粉按配比进行球磨混料, 接着将混合均匀后的 Ag(SnO<sub>2</sub>)<sub>5</sub>Ni 粉末装入 Φ27 mm 的钢模中, 在成形压强 20 MPa, 保压时间 2 min 条件下, 压制成直径为 Φ27 mm 的素坯。再在箱式炉中对合金素坯进行低升温、长保温的烧结, 其烧结工艺: 100 ℃ (保温 1 h)→300 ℃ (保温 3 h)→500 ℃ (保温 3 h)→700 ℃ (保温 3 h)→800 ℃ (保温 36 h)。为确保制备的合金坯足够致密, 经烧结后的素坯需再经过复压复烧, 处理工艺为: 加热锭坯到 820 ℃, 保温 1 h, 加热模具到 350 ℃, 复压压强 50 MPa, 保压时间 5 min, 进而提高锭坯的致密性。最后将 AgSnO<sub>2</sub>NiO 锭坯经过挤压、拉拔成线材, 用自动铆钉机制备得到直径 Φ1.4 mm 的铆钉触头。

采用 X 射线衍射分析仪(XRD)对材料进行物相分析; 采用金相显微镜(型号: Axio Imager A2m, 德国)对材料进行显微组织分析, 采用扫描电镜(SEM, 型号: PHILIPSL30ESEM-TMP)对电侵蚀后触头材料的形貌进行观察与分析。通过 JF04C 触点材料测试机对触头材料进行打点测试, 参数设置见表 2。

2 结果与讨论

2.1 AgSnO<sub>2</sub>NiO 复合材料的物相组成分析

对烧结态的 AgSnO<sub>2</sub>NiO 复合材料进行 XRD 物相分析, 以含 NiO 为 2%的 AgSnO<sub>2</sub>NiO 复合材料为例, 结果如图 1 所示。由图 1 可知, 实验采用合金内氧化+高温烧结法制备的 AgSnO<sub>2</sub>NiO 复合材料, 仅有 Ag、SnO<sub>2</sub> 及 NiO 3 种物相存在, 说明本实验制备出了 AgSnO<sub>2</sub>NiO 复合材料。

2.2 电弧侵蚀过程接触电阻的变化

图 2 为不同成分电触头材料不同电压下接触电阻随开闭次数的变化曲线。由图 2a、2b、2c 可知, 对 NiO 含量不变的试样, 当测试电压不高于 18 V 时, 接触电阻随开闭次数的增加呈现出缓慢下降最后趋于稳定的趋势; 而当测试电压增大到 25 V 时, 各试样的接

表 1 配制 200 g AgSnO<sub>2</sub>NiO 锭坯所需原料的量

Table 1 Amount of raw materials to prepare 200 g AgSnO<sub>2</sub>NiO ingot

Ingot	Composition	Ag powder/g	AgSn <sub>14.76</sub> powder/g	Ni powder/g
1#	Ag(SnO <sub>2</sub> ) <sub>5</sub> (NiO) <sub>0.5</sub>	143.51	53.367	0.786
2#	Ag(SnO <sub>2</sub> ) <sub>5</sub> (NiO) <sub>1.0</sub>	142.51	53.367	1.572
3#	Ag(SnO <sub>2</sub> ) <sub>5</sub> (NiO) <sub>1.5</sub>	141.51	53.367	2.358
4#	Ag(SnO <sub>2</sub> ) <sub>5</sub> (NiO) <sub>2.0</sub>	140.51	53.367	3.144

表 2 AgSnO<sub>2</sub>NiO 电触头电接触试验参数

Table 2 Parameters of electrical contact test for AgSnO<sub>2</sub>NiO electrical contact materials

Test condition	Test parameter
Voltage/V	12, 18, 25
Current/A	10
Test times	10000
Test interval	500
Contact pressure/cN	80
Time interval/ms	450
Test method	Open and close test
Contact distance/mm	1

触电阻随之增大, 且各试样接触电阻的增幅不同, 其中 4#试样增幅最大, 接触电阻受开闭次数的波动性明显, 接触电阻变得不稳定。以 1#试样为例(见图 2d), Ag(SnO<sub>2</sub>)<sub>5</sub>(NiO)<sub>0.5</sub> 触头材料的接触电阻较小, 测试电压不高于 18 V 时, 接触电阻几乎不发生变化, 维持在 0.6 mΩ 左右; 而当测试电压增大到 25 V 时, 接触电阻基本维持在 3 mΩ 左右。

蒙建洲等<sup>[15]</sup>采用粉末冶金法分别制备了含不同添加剂(CuO、Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+CuO)及无添加元素的 AgSnO<sub>2</sub> 触头材料, 并在不同等级电流(10, 15, 20 A; 测试电压 24 V)条件下研究其电性能特性, 发现所有 AgSnO<sub>2</sub> 触头材料接触电阻都随电流的增大而上升, 无掺杂 AgSnO<sub>2</sub> 触头材料的接触电阻在不同等级电流下均大

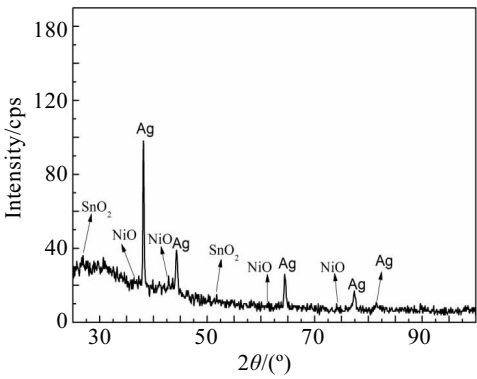


图 1 AgSnO<sub>2</sub>NiO 复合材料(含 NiO 为 2%)的 XRD 图谱  
Fig.1 XRD pattern of AgSnO<sub>2</sub>NiO with NiO content of 2%

于  $30\text{ m}\Omega$ 。这说明, 掺杂了  $\text{NiO}$  的  $\text{AgSnO}_2$  触头材料的接触电阻较小, 从而提高了材料的电接触特性。从图 2 中还可发现, 测试电压为 12、18 V 时, 随着开闭次数的变化, 接触电阻基本保持 1#样品<4#样品<3#样品<2#样品的变化趋势。当测试电压增加到 25 V 时, 随着开闭次数的增加, 接触电阻变为 1#样品<3#样品<2#样品<4#样品的变化趋势。

研究表明<sup>[10, 16, 17]</sup>, 添加剂对材料润湿性的影响主要是通过以下两个方面产生: 一是影响  $\text{SnO}_2$  颗粒的性质; 另一方面对  $\text{Ag}$  基体产生影响。本试验在 25 V, 10 A 条件下, 所测的  $\text{Ag}(\text{SnO}_2)_5(\text{NiO})_{0.5}$  接触电阻  $2\sim6\text{ m}\Omega$  远小于蒙建洲等<sup>[15]</sup>在 24 V/10 A 下测得  $\text{AgSnO}_2$  的  $30\text{ m}\Omega$ 。分析原因, 认为可能是  $\text{NiO}$  对  $\text{AgSnO}_2$  润湿性改善和  $\text{Ag}$  基体中金属氧化物分布状况共同作用的结果。不同  $\text{NiO}$  含量的  $\text{AgSnO}_2\text{NiO}$  触头材料, 由于  $\text{NiO}$  的加入大大改善了  $\text{Ag}$  基体对  $\text{SnO}_2$  的润湿性, 可有效阻止电弧侵蚀过程中  $\text{SnO}_2$  从  $\text{Ag}$  基体中分离而富集在材料表面, 进而导致接触电阻显著降低。图 3 为  $\text{AgSnO}_2\text{NiO}$  经过复压复烧及拉拔处理后的金相显微组织, 图 3a、3b 中的 A 区域为  $\text{SnO}_2$  与  $\text{NiO}$  颗粒混合构成的黑色组织, B 区域为  $\text{SnO}_2$  颗粒环包围  $\text{Ag}$  基体的组织, 由图 3 可知, 经过拉拔处理后的  $\text{AgSnO}_2\text{NiO}$  组织中  $\text{SnO}_2$ 、 $\text{NiO}$  的分布更加均匀, 组织致密度增加, 弥散强化作用增强。 $\text{AgSnO}_2\text{NiO}$  组织中弥散作用越大,

分布于  $\text{Ag}$  基体中的第二相界面对电子的散射作用越大, 接触电阻随之增大。随着  $\text{NiO}$  含量的增加, 试样的接触电阻并不是随之降低, 这是因为  $\text{Ag}$  对  $\text{SnO}_2$  的润湿性并不是随  $\text{NiO}$  含量的增加而增强<sup>[18, 19]</sup>。根据各试样的接触电阻的变化, 可以推测出  $\text{NiO}$  对  $\text{AgSnO}_2$  润湿性的改善作用为: 1#>4#>3#>2#; 1#试样  $\text{NiO}$  含量最低, 组织中第二相对电子的散射作用最弱, 且  $\text{SnO}_2$  对  $\text{Ag}$  基体的润湿性最好, 因此接触电阻最低。

接触电阻由膜电阻及收缩电阻两部分构成, 膜电阻和收缩电阻共同决定接触电阻的大小<sup>[20]</sup>。需要注意的是, 触头材料内部的  $\text{NiO}$ 、 $\text{SnO}_2$  成分较稳定, 在测试过程中不易分解。故随着测试次数的增加, 膜电阻不会由于  $\text{NiO}$ 、 $\text{SnO}_2$  产生氧化膜而急剧增加。对于收缩电阻, 由于第二相弥散强化作用,  $\text{AgSnO}_2\text{NiO}$  触头材料的硬度增强, 在开闭过程中触点表面不易发生形变, 导致收缩电阻变化不明显。接触电阻呈波动性, 是因为实际接触面并非理想的那么平整、规则, 而是凹凸不平粗糙的表面, 接触的过程中实质是各个凸起的峰相互接触, 在电弧作用下, 电触头表面相互接触的凸峰将会不断发生熔化和凝固现象, 这将导致每一次通断接触后接触位置和接触面积不断发生变化, 从而使得接触电阻产生波动。

### 2.3 $\text{AgSnO}_2\text{NiO}$ 电触头材料的抗熔焊性能分析

不同成分电触头材料的熔焊力随开闭次数的变化

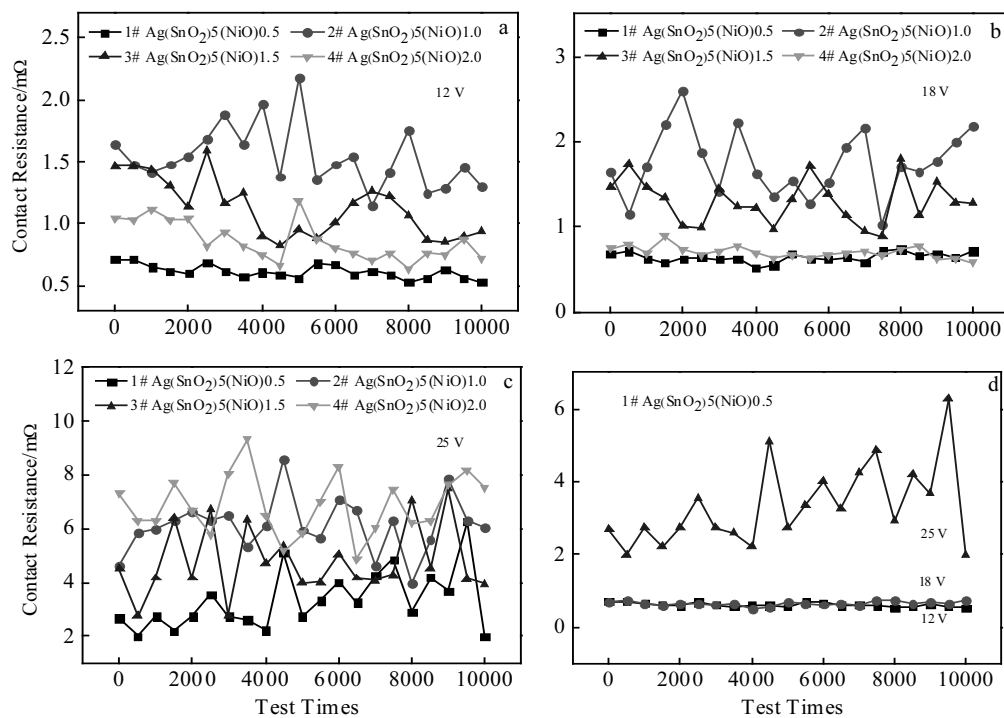


图 2 不同电压下电触头材料接触电阻与开闭次数的关系

Fig.2 Relationship between contact resistance and test times of 1#~4# electrical contact materials at different voltages: (a) 12 V, (b) 18 V, (c) 25 V, and (d) 12~25 V

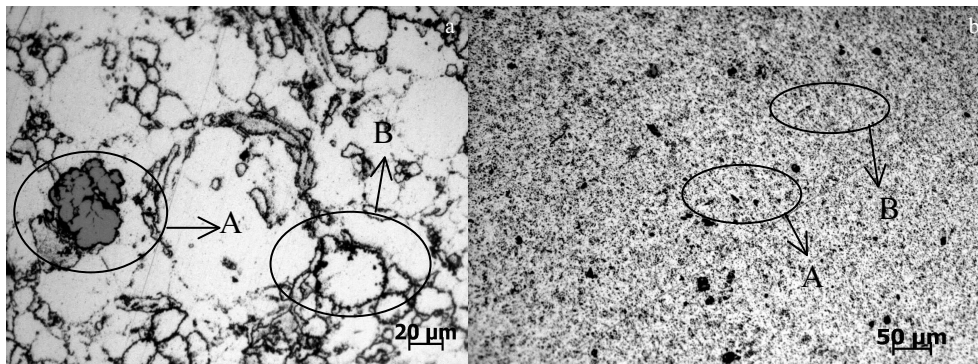


图 3  $\text{AgSnO}_2\text{NiO}$  复压复烧、拉拔丝材横向金相显微组织

Fig.3 Optic microstructures of  $\text{AgSnO}_2\text{NiO}$ : (a) ingot after repressing and resintering and (b) wire after drawing with diameter of 1.5 mm

曲线见图 4。由图 4 可知，对  $\text{NiO}$  含量不变的试样，其熔焊力随测试电压的增大，呈现出先减小后增大的趋势，以 1# 试样为例，测试电压从 12 V 增大到 25 V 时，其熔焊力由 9 cN 左右减小到 3 cN 左右后又增大到 6 cN 左右。对  $\text{NiO}$  含量不同的试样，其熔焊力随开闭次数的稳定性情况不同：当开闭次数逐渐增加，测试电压不断增大时，1# 试样的稳定性变差，即 1# 试样在 12 V 测试电压下稳定性受开闭次数的影响最大；2#、3#、4# 试样则相反，测试电压不断增大时，其反而逐渐变得更稳定，即在 25 V 测试电压下稳定性受开闭次数的影响最小。

比较  $\text{NiO}$  含量不同试样在同一测试电压下的情况可知， $\text{NiO}$  的含量会对试样的熔焊力产生影响。随着  $\text{NiO}$  加入量的增多，试样熔焊力的变化情况为：当测试电压为 12 V 时，试样熔焊力的增大不明显，基本维持在 9 cN 左右；测试电压增大到 18 V 时，试样的熔焊力出现较显著的增加，即从 1# 试样 3 cN 左右增大到 4# 试样 8 cN 左右；测试电压继续增大到 25 V 时，试样熔焊力变化更为明显，最小的 1# 试样仅为 6 cN 左右，而 4# 试样为 13 cN 左右。

判别材料抗熔焊性能的标准之一为熔焊力的大小，熔焊力小的触头材料能有效保障材料的使用性能，故材

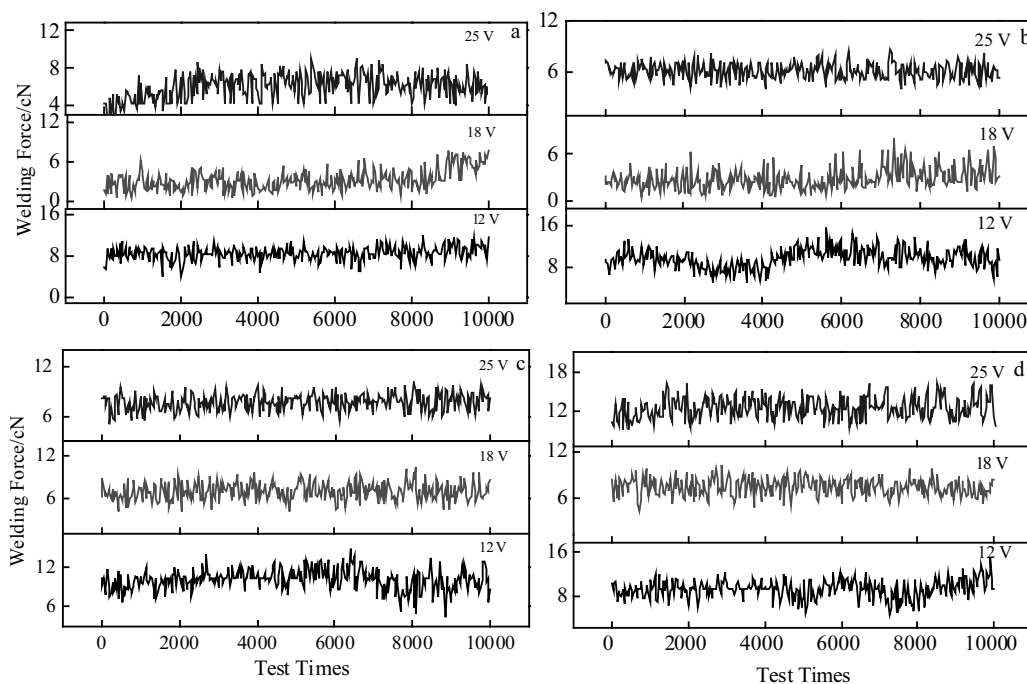
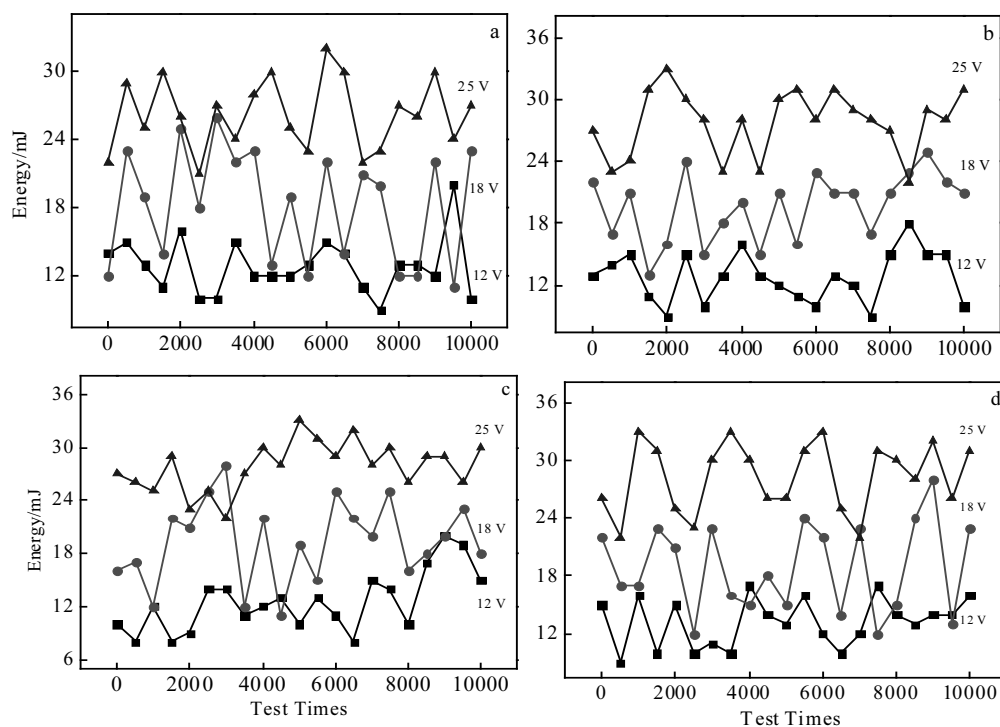


图 4  $\text{AgSnO}_2\text{NiO}$  电触头的熔焊力与开闭次数的关系

Fig.4 Relationship between the welding force and the test times of  $\text{AgSnO}_2\text{NiO}$  electrical contact materials: (a) 1#, (b) 2#, (c) 3#, and (d) (4#)

图5  $\text{AgSnO}_2\text{NiO}$  电触头的燃弧能量与开闭次数的关系Fig.5 Relationship between arc energy and test times of  $\text{AgSnO}_2\text{NiO}$  electrical contact materials:

(a) 1#, (b) 2#, (c) 3#, and (d) 4#

料的熔焊力要小。电接触理论中<sup>[21]</sup>, 熔焊力的大小取决于实际焊接面积和材料的抗拉强度。1#试样接触电阻最小, 在相同测试条件下温升缓慢, 熔池面积小, 导致材料的实际焊接面积小; 此外, 1#试样的润湿性最好, 当 Ag 基体熔化时, 围绕在其周围的  $\text{SnO}_2$  会将其包裹, 使得接触面粘性降低;  $\text{NiO}$  加入导致的弥散强化, 增加了材料的脆性。因此, 1#试样的熔焊力最小。熔焊现象复杂, 很多因素诸如: 电流、材料性质、接触压力、工作环境、接触状况等都会对熔焊产生影响, 所以对材料熔焊力的确切理论还有待研究<sup>[22,23]</sup>。

## 2.4 电弧侵蚀后材料转移和燃弧能量

燃弧能量是造成金属熔池大小、电触头表面气化的主要影响因素。图 5 所示为实验过程中  $\text{AgSnO}_2\text{NiO}$  触头材料的燃弧能量与开闭次数的关系。由图 5 可知, 燃弧能量随开闭次数的增多呈现出较大幅度的波动, 在测试电压相同情况下,  $\text{NiO}$  的加入对燃弧能量的增加起到的减缓作用十分有限, 如测试电压 12 V 时 1#、2#、3#、4#样品的燃弧能量大小上基本相同且变化趋势一致, 都随开闭次数的增多而增大, 说明  $\text{NiO}$  的加入对材料的燃弧能量影响不大。王海涛等<sup>[17]</sup>研究了  $\text{TiO}_2$  的加入对材料润湿性的改变, 并进一步探讨了润湿性的改变对材料燃弧能量的影响, 发现  $\text{TiO}_2$  有利于改善材料的润湿性, 但

润湿性造成燃弧能量的变化并不明显。随着测试电压的增加, 4 种  $\text{AgSnO}_2\text{NiO}$  触头材料的燃弧能量都随之增大。正是由于燃弧能量的增大导致触头材料表面形成的熔融金属熔池不断增大, 易在接触的过程中导致触头材料的飞溅和气化, 最终造成材料损耗的现象。

图 6 所示为不同成分  $\text{AgSnO}_2\text{NiO}$  触头材料电接触过程中阴/阳极和总的质量损耗变化曲线。由图 6 可知, 当电压不高于 25 V 时, 材料为阳极(动触头)转移, 即阳极质量减小, 阴极(静触头)质量增大, 触头的侵蚀量随着测试电压的增大而增加, 而触头材料总损耗量增加缓慢。测试电压为 25 V 时, 4#样品的材料总质量损失仅为 0.06 mg。当测试条件不变时, 随着  $\text{NiO}$  含量的增加  $\text{AgSnO}_2\text{NiO}$  触头材料的侵蚀总损耗减小, 表明  $\text{NiO}$  的加入有利于改善  $\text{AgSnO}_2\text{NiO}$  触头材料的转移特性, 延长材料的使用寿命。

弥散强化银基复合材料通过内氧化在银基体内形成大量细小的氧化物粒子, 由于氧化物粒子的弥散强化作用, 大大提高了基体的强度、硬度和高温稳定性<sup>[23-25]</sup>。添加剂的加入有利于改善材料的润湿性, 电弧侵蚀过程中熔融态的 Ag 基体被高熔点、热稳定性的  $\text{SnO}_2$  及  $\text{NiO}$  所覆盖, 减少了熔池中 Ag 液的飞溅<sup>[10, 17]</sup>。作为低压电触头材料,  $\text{AgNi}$  具有较优的磨损性的特性, 在重复的开

合过程中,对材料的磨损损耗起到一定的减小作用<sup>[13,14]</sup>。

## 2.5 AgSnO<sub>2</sub>NiO 电触头电弧侵蚀形貌分析

AgSnO<sub>2</sub>NiO 触头材料电侵蚀后阴/阳极形貌的 SEM 照片,见图 7 所示。熔桥转移及电弧侵蚀是造成材料发生转移的主要因素<sup>[26,27]</sup>。在分断过程中接触力较小,造成触头上接通电流的接触斑点数目减少,使得欧姆热因电流的收缩而迅速增加,引起处于收缩点附近的触头材料发生熔化,从而产生一个个液态的熔桥,熔桥的长度随着分离过程的进行而增大,但直径不断减小,最终会引起熔桥的断裂。对于两端完全对称受热的熔桥,其断裂处就在几何中心,而实际上熔桥两端很难受热均匀,一般情况下断裂处都会偏离其中心,当其断裂位置向某

一电极偏离时,就会引起材料转移<sup>[28]</sup>。从图 7 可以看出,阳极电触头(图 7a)表面形成侵蚀凹坑,阴极电触头(图 7b)表面形成凸峰,说明侵蚀过程中材料发生阳极转移,即阳极质量减小,阴极质量增加。

图 7c 为测试电压 25 V 条件下的 1# 试样的阴极触头局部侵蚀形貌,可以看出,阴极触头表面附有一层熔融金属凝固后的浆糊状峰。原因在于,随着测试电压的逐渐增大,在电弧多次作用下,电弧产生的热量作用在触头表面,使触头表面温度快速升高造成表面形成金属熔池,熔融金属发生流动致使金属液分布不均。在触头断开时,触头表面冷却速度较快,熔池中的金属液来不及铺展就已发生凝固,形成凹凸不平的形貌特征。

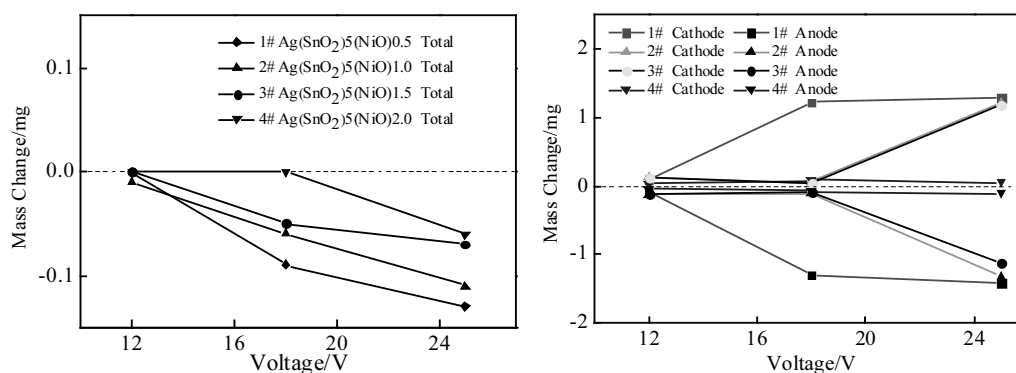


图 6 测试电压 12、18、25, 测试电流 10 A 条件下电触头质量损耗

Fig.6 Mass loss of electrical contacts under the current of 10 A and voltages of 12, 18, and 25 V

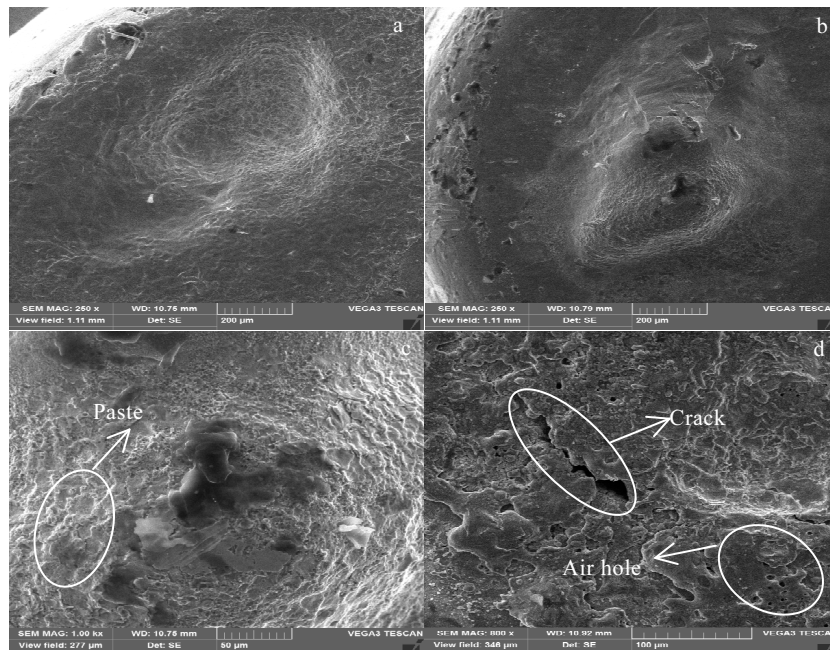


图 7 AgSnO<sub>2</sub>NiO 触头材料电侵蚀后阴/阳极 SEM 形貌

Fig.7 SEM morphologies of cathode and anode of AgSnO<sub>2</sub>NiO under 25 V: (a) anode contact of 1#, (b) cathode contact of 1#, (c) melting zone of 1#, and (d) crack area of 4#



液态金属对空气的溶解度比固态时大得多, 闭合过程中空气中的 O<sub>2</sub> 会迅速溶入金属液中。当断开触头时, 由于 Ag 液的冷却速度大, 熔池内的气泡会在电弧消失后由于过饱和从熔池中逸出, 在触头表面留下缩孔, 如图 7d 所示。图 7d 中裂纹的产生则是因为 Ag 与 SnO<sub>2</sub>、NiO 具有不同的热膨胀系数, 在电弧热量作用下材料温度升高, 各相随温度变化产生不同程度的形变, 导致各相之间发生相对滑动, 而且弧根处具有较高能量, 导电斑点易受热膨胀, 电弧熄灭后, 导电斑点遇冷收缩, 此外材料重复受到压、拉应力的作用也会导致裂纹的产生<sup>[29]</sup>。图 7a、7b 中触头表面形貌较为平整, 裂纹及孔洞较少, 说明本实验制备的 AgSnO<sub>2</sub>NiO 电接触材料有良好的抗侵蚀及耐磨损性能。分析原因认为, 一方面是 NiO 的加入对材料润湿性改善, 使得液态 Ag 对 SnO<sub>2</sub> 的润湿作用增强, 此外 SnO<sub>2</sub>、NiO 热稳定性好、熔点高, 覆盖在熔池表面阻止了 O<sub>2</sub> 等气体溶于熔池中, 同时也减少了熔液的飞溅; 另一方面, AgSnO<sub>2</sub>NiO 电触头材料具有很好的导热性, 在电弧高温下材料表面降温较快, 熔融部分可以较快凝固, 同时弥散的第二相颗粒发挥增强相作用, 减少了材料的飞溅。网络导电基体的存在也使得材料具有良好的导电性, 避免产生较多的焦耳热, 同样降低了材料因喷溅和蒸发而造成的损耗。

### 3 结 论

1) AgSnO<sub>2</sub>NiO 电触头材料接触电阻较小, 其中 Ag(SnO<sub>2</sub>)<sub>5</sub>(NiO)<sub>0.5</sub> 的接触电阻最小且最为稳定, 表现出较好的电接触特性。当 NiO 含量不变, 测试电压不高于 18 V 时, 试样的接触电阻随开闭次数的增加呈现出缓慢下降最后趋于稳定的趋势; 而当测试电压增大到 25 V 时, 各试样的接触电阻随之增大, 且各试样接触电阻的增幅不同。

2) AgSnO<sub>2</sub>NiO 电触头材料熔焊力小, 对 NiO 含量不变的试样, 其熔焊力随测试电压的增大, 呈现出先减小后增大的趋势, 且 AgSnO<sub>2</sub>NiO 电触头材料的熔焊力受开闭次数的增加波动性较小。材料燃弧能量随电压的增大而增加, NiO 加入量的增多对减小燃弧能量的作用不明显。

3) 材料转移方向为阳极转移, 即阳极质量减少, 阴极质量增加。阴/阳极触头的侵蚀量和触头材料的总损耗量都随着测试电压的增大而增加。测试条件 25 V/10 A 时, 样品的总质量损失可小至 0.06 mg, NiO 的添加有利于改善 AgSnO<sub>2</sub>NiO 触头材料的转移特性, 降低材料损耗。

4) 阳极电触头表面形成侵蚀凹坑, 同时阴极电触头表面形成凸峰, 且表面附有一层熔融金属液凝固后的

浆糊状峰。材料转移主要以熔桥方式进行, 触头表面形貌较为平整, 裂纹及孔洞较少。当测试电压增大时, 阳/阴极触头表面的形貌特征变得更加显著。

### 参考文献 References

- [1] Wan Cheng(王 成), Li Jiwen(李继文), Wang Zhan(王 展) *et al.* *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2017, 27(3): 504
- [2] Jiang Yibin(蒋义斌), Feng Pengfei(冯鹏飞), Huang Xinglong(黄兴隆) *et al.* *Electrical Engineering Materials*(电工材料)[J], 2017(2): 30
- [3] Zhou Yunhong(周允红), Zhou Xiaolong(周晓龙), Tao Qiying(陶麒麟) *et al.* *Precious Metals*(贵金属)[J], 2014, 35(S1): 100
- [4] Wang Song(王 松), Fu Zuoxin(付作鑫), Wang Saibei(王塞北) *et al.* *Precious Metals*(贵金属)[J], 2013, 34(1): 79
- [5] Li Guijing, Cui Huijie, Chen Jun *et al.* *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2017, 696: 1228
- [6] Cao Feng(曹 风), Wang Junbo(王俊勃), Liu Songtao(刘松涛) *et al.* *Electrical Engineering Materials*(电工材料)[J], 2016(3): 34
- [7] Li Guijing, Fang Xueqian, Feng Wenjie *et al.* *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2017, 716: 106
- [8] Xiong Jingxian(熊经先), Zhang Tianjin(张天锦), Xiao Jianxu(肖建旭) *et al.* *Electrical Engineering Materials*(电工材料)[J], 2015(3): 3
- [9] Zhu Yancai(朱艳彩), Wang Jingqin(王景芹), Wang Haitao(王海涛). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2013, 42(1): 149
- [10] Wang Haitao(王海涛), Wang Jingqin(王景芹), Du Jiang(杜江) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2014, 43(8): 1846
- [11] Rieder W F, Strof T W. *IEEE Trans on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology*[J], 1991, 14(1): 109
- [12] Nachiketa Ray, Bernd Kempf, Timo Mützel *et al.* *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2016, 670: 188
- [13] Wang Saibei(王塞北), Xie Ming(谢 明), Liu Manmen(刘满门) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2013, 42(4): 875
- [14] Jiang Dezhi(蒋德志), Zhang Jie(章 杰), Bai Yaling(白娅玲) *et al.* *Electrical Engineering Materials*(电工材料)[J], 2014(3): 19
- [15] Meng Jianzhou(蒙建洲), Wang Lizhong(王立忠), Wang Yixu(王逸虚) *et al.* *Electrical Engineering Materials*(电工材料)[J], 2012(4): 7
- [16] Jin Gyu Kim, Ilbeom Choi, Dai Gil Lee. *Journal of Adhesion*

- Science & Technology*[J], 2013, 27(7): 794
- [17] Wang Haitao(王海涛), Wen Panlong(文攀龙), Liang Lei(梁磊) *et al. Electronic Components and Materials*(电子元件与材料)[J], 2016, 35(7): 80
- [18] Wang Haitao(王海涛), Liang Lei(梁磊), Wen Panlong(文攀龙) *et al. Precious Metals*(贵金属)[J], 2016, 37(4): 21
- [19] Iulian Ștefan, Claudiu Nicolicescu, Marin Gavrilă. *Materials Science Forum*[J], 2011, 672: 276
- [20] Wang Heng(王珩), Liu Lanlan(刘兰兰), Yan Xiaofang(颜小芳) *et al. Electrical & Energy Management Technology*(电器与能效管理技术)[J], 2017(17): 21
- [21] Ren Wanbin(任万滨), Yu Qiong(余琼), Zhai Guofu(翟国富). *Electrical Engineering Materials*(电工材料)[J], 2011(1): 14
- [22] Liu Zixun(柳子逊), Li Zhenbiao(李震彪), Zhu Qingcheng(朱青成) *et al. Electrical & Energy Management Technology*(电器与能效管理技术)[J], 2017(12): 8
- [23] Wang Huanran(王煥然), Wang Zhenyu(王振宇), Luo Jiayue(罗加悦). *Electrical & Energy Management Technology*(电器与能效管理技术)[J], 2017(3): 7
- [24] Wang Q, Liu C, Wu X *et al. The 27th International Conference on Electrical Contacts*[C]. Dresden: Proceedings of VDE, 2014: 1
- [25] Zhang Guoquan(张国全), Wu Xiaofei(巫小飞), Wang Jianping(王剑平) *et al. Precious Metals*(贵金属)[J], 2017, 38(2): 30
- [26] López-Realpozo J C, Rodríguez-Ramos R, Guinovart-Díaz R *et al. Mechanics Research Communications*[J], 2018, 93: 96
- [27] Ma Xiaolong(马小龙), Yu Jianjun(余建军), Li Yongdi(李永娣) *et al. Precious Metals*(贵金属)[J], 2017, 38(1): 27
- [28] Chen Jinghong(陈静洪), Chen Song(陈松), Li Muyang(李慕阳) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2017, 46(12): 3613
- [29] Tao Qiying(陶麒麟), Zhou Xiaolong(周晓龙), Zhou Yunhong(周允红) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2015, 44(5): 1219

## Electrical Contact Properties of AgSnO<sub>2</sub>NiO Electrical Contact Material

Zhou Xiaolong<sup>1</sup>, Xiong Aihu<sup>1</sup>, Liu Manmen<sup>2</sup>, Zheng Zhong<sup>3</sup>, Yu Jie<sup>1</sup>, Wang Lihui<sup>4</sup>

(1. Key Laboratory of Advanced Materials of Yunnan Province, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

(2. State Key Laboratory of Rare Precious Metals Comprehensive Utilization of New Technologies, Kunming 650106, China)

(3. Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

(4. Guilin Key Laboratory of Microelectronic Electrode Materials and Biological Nanomaterials, China Nonferrous Metal (Guilin) Geology and Mining Co., Ltd, Guilin 541004, China)

**Abstract:** AgSnO<sub>2</sub>NiO electrical contact material with different NiO contents was prepared by an internal oxidation method. Electrical contact experiments were conducted on the JF04C contact material testing machine. The contact resistance, anti-weldability and material transfer properties of materials were studied. The sample surface morphology changes were analyzed by scanning electron microscopy (SEM). The results show that contact resistance of AgSnO<sub>2</sub>NiO contact material is small. When the voltage is not higher than 18 V, the contact resistance gradually decreases with the increase of test times and finally tends to be stable. When the voltage reaches 25 V, the contact resistance of different AgSnO<sub>2</sub>NiO material increases, and the increasing degree of the contact resistance is different. For the sample with the same NiO content, its welding force decreases firstly and then increases with the increase of the test voltage. The arcing energy of the materials will increase with the voltage increasing. The increase of the NiO content does not significantly reduce the melting. The electrical contact process is anodic transfer. The total mass loss of materials decreases with the increase of NiO content. The surface of the anode/anode contact has a convex-concave shape and the surface exhibits a paste-like peak topography. The material transfer occurs mainly in a fused-bridge mode with a convex peak.

**Key words:** AgSnO<sub>2</sub>NiO; internal oxidation; contact resistance; welding force; material transfer

Corresponding author: Zhou Xiaolong, Ph. D., Professor, Key Laboratory of Advanced Materials of Yunnan Province, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, P. R. China, E-mail: kmzxlong@163.com