

## 高抗电弧银基电接触材料增强相研究进展

孙旭东<sup>1</sup>, 刘彬<sup>2</sup>, 林智杰<sup>1,2</sup>

(1. 东北大学 材料科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 福建理工大学 材料科学与工程学院, 福建 福州 350118)

**摘要:** 银基电接触材料的抗电弧性能直接关系到电气可靠性。本文从被动和主动抗电弧两个角度, 综述了银基电接触材料的抗电弧性能研究进展。在被动抗电弧方面, 详细探讨了增强相的熔池润湿性改善、几何形状调控以及高导热导电陶瓷的应用。通过添加改善熔池润湿性的组元, 以及采用纳米多孔结构、夹心结构等特殊几何形状的增强相可有效提升银基电接触材料的抗电弧性能。此外, 高导热导电陶瓷的加入也为材料的抗电弧能力提供了新的思路。在主动抗电弧方面, 分析了高耐压增强相、熔解断弧增强相、气化灭弧增强相以及固态相变灭弧增强相的作用机制。在智能化、电气化和大功率化发展的背景下, 唯有协同提高主动与被动抗电弧作用, 才能满足日益复杂的工况要求, 这也将是未来电接触材料发展的重要方向。

**关键词:** 银基电接触材料; 抗电弧性能; 主动抗电弧; 被动抗电弧

中图分类号: TB 331 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2025)08-0032-09

## Research Progress on Reinforcing Phases of High Arc Resistance Silver-Based Electrical Contact Materials

SUN Xu-dong<sup>1</sup>, LIU Bin<sup>2</sup>, LIN Zhi-jie<sup>1,2</sup>

(1. School of Materials Science & Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China. Corresponding author: LIN Zhi-jie, E-mail: zjlin@fjut.edu.cn)

**Abstract:** The arc resistance of silver-based electrical contact materials is directly related to electrical reliability. This paper reviews the research progress of the arc resistance of silver-based electrical contact materials from two perspectives: passive and active arc resistance. In terms of passive arc resistance, the improvement of the melt pool wettability of the reinforcements, the regulation of geometric shapes, and the application of high thermal conductivity and electrical conductivity ceramics are discussed in detail. The addition of components that improve the melt pool wettability and the use of reinforcements with special geometric shapes, such as nanoporous structures and sandwich structures, have effectively enhanced the arc resistance of silver-based electrical contact materials. Moreover, the incorporation of high thermal conductivity and electrical conductivity ceramics has provided new insights into the arc resistance of these materials. Regarding active arc resistance, the mechanisms of high voltage-resistant reinforcements, dissolving arc interruption reinforcements, vaporizing arc quenching reinforcements, and solid-state phase transformation arc quenching reinforcements are analyzed. Under the development trends of intelligence, electrification, and high power, only by synergistically improving both active and passive arc resistance can the increasingly complex working conditions be met, which is an important direction for the future development of electrical contact materials.

**Key words:** silver-based electrical contact materials; arc resistance performance; active arc resistance; passive arc resistance

银基电接触材料在现代电气工业中具有极其重要的地位<sup>[1-2]</sup>.无论是在日常生活中广泛使用的家用电器,还是在工业领域中的大型电机、变压器、高压开关设备,抑或是航空航天、新能源汽车等高端技术领域,银基电接触材料都发挥着不可替代的作用<sup>[3]</sup>.在这些设备中,电接触材料负责电路的通断控制,其性能直接决定了整个电器设备的运行可靠性、安全性和使用寿命.在电接触闭合与开断过程中,会产生高温等离子体放电,这种电弧不仅会导致电接触材料局部高温熔化、蒸发和溅射<sup>[4]</sup>,还会引起材料的侵蚀和磨损.因此,触点熔焊和温升已成为开关设备失效的关键原因之一.

随着智能化和电气化的快速发展,电器设备的运行环境日益复杂,对电接触材料的性能提出了更高要求.特别是在高压、大电流、高频开关等条件下,电接触材料的抗电弧性能显得尤为重要.通过添加增强相,以主动和被动方式抵抗电弧侵蚀,已成为提高银基电接触材料性能的高效策略.

## 1 增强相的被动抗电弧研究

银基电接触材料的被动抗电弧性能是指其在电接触过程中,通过增强相的作用来抵御电弧侵蚀的能力.增强相能够改善材料的微观结构,例如细化晶粒、均匀化组织分布等,使材料的内部结构更加致密和稳定.同时,增强相还能提升材料的热力学性能,包括提高材料的熔点、热导率等参数,从而增强材料的抗热冲击能力,减少电弧产生的高温对材料的破坏.此外,增强相可以改善材料的抗熔焊性能,防止在电接触过程中触点因电弧作用而发生粘连,确保电接触的可靠性和稳定性,进而有效提高银基电接触材料在各种电气设备中的使用寿命和工作性能.

### 1.1 抗弧增强相的熔池润湿性改善

传统Ag-CdO<sup>[5-7]</sup>触点正逐渐被Ag-SnO<sub>2</sub><sup>[8-9]</sup>和Ag-ZnO<sup>[10-12]</sup>取代.其中很重要的原因就是后两者的高温稳定性,它们更能承受高负载电路中的电弧侵蚀.但是SnO<sub>2</sub>对Ag熔池的润湿性不足<sup>[13-15]</sup>,在电弧的反复作用下会上浮偏聚,导致触头接触电阻剧增、快速温升及熔焊失效.因此仅添加SnO<sub>2</sub>作为添加剂的抗电弧能力有限<sup>[16]</sup>,后续众多研究都在Ag-SnO<sub>2</sub>基础上加入1种或多种增强相.

王海涛等<sup>[17]</sup>在粉末冶金法制备的Ag-SnO<sub>2</sub>触头中发现,添加质量分数为1%的TiO<sub>2</sub>可以将Ag与SnO<sub>2</sub>之间的润湿角从97.75°减小到61.85°.

Wang等<sup>[18]</sup>在Ag-SnO<sub>2</sub>中加入少量CuO,发现用激光模拟侵蚀形成的熔池内未形成富SnO<sub>2</sub>区域,表明CuO可提高SnO<sub>2</sub>与Ag的润湿性.Wang等<sup>[19]</sup>采用化学共沉淀法制备出CuO掺杂的纳米SnO<sub>2</sub>颗粒,发现质量分数为7%的CuO掺杂不仅可以使SnO<sub>2</sub>与Ag的润湿角降低至29°,还能显著降低复合材料的硬度,使Ag-SnO<sub>2</sub>的加工性能显著提高.此外,Zhang等<sup>[20]</sup>发现,将La<sub>2</sub>Sn<sub>2</sub>O<sub>7</sub>作为新相加入Ag-SnO<sub>2</sub>中可以提高熔池黏度,进而改善Ag与SnO<sub>2</sub>的润湿性.

一些合金元素可在电弧高温中溶入并改善Ag基体的熔体性质,因此成为研究人员关注的方向之一.例如,低压电气中常用的Ag-Ni电接触材料,就利用了Ag与Ni在高温液态中仅有微量互溶的特殊性质<sup>[21]</sup>.在电弧作用的高温下,Ni可以微量溶入Ag熔体,改变其冶金性质、流变性质和导电性,从而切断电弧.在电弧熄灭后,Ni重新脱溶,避免Ag电导率的下降.而且这种材料很容易在铜簧片上焊接,可以降低安装成本<sup>[22]</sup>.但这种材料在浪涌电流下容易出现喷溅和熔焊,限制了其应用范围.

有研究表明MAX相与Ag之间存在较为强烈的界面反应<sup>[23-24]</sup>.因此MAX相相对Ag熔体具有很好的润湿性.Ag-MAX相电接触材料<sup>[25]</sup>成为近十年来的一个热门研究方向.过度强烈的界面反应会影响该类材料的导电性.Wang等<sup>[26]</sup>通过粉末冶金法制备的Ag-Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub>和Ag-Ti<sub>3</sub>AlC<sub>2</sub>两种复合材料,在800℃下用流动氩气烧结2h后对比两种材料发现,Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub>与Ag的界面反应显著低于Ti<sub>3</sub>AlC<sub>2</sub>.未来,调控A位点组元构成或将成为该体系材料突破的重要方向之一.

### 1.2 抗弧增强相的几何形状调控

通过调控被动增强相的几何形状,可以改善其与银基体的作用界面,优化熔池的流变特性,这也是近20年来重要研究方向<sup>[27]</sup>.

本课题组系统研究对比了增强相形貌对银基电接触材料的作用.文献<sup>[28]</sup>设计了一种由三维连续Ni网络增强的新型Ag-Ni电接触材料.采用包埋法制备了核壳结构的Ag-Ni粉末,随后将粉末进行热压制成具有三维Ni网络结构的Ag-Ni试样,在塑性变形后制备出带状Ni增强相的银基电接触材料.这种独特的带状Ni结构使得材料具有低电阻率(1.88 μΩ·cm)和高横截面硬度(315 MPa),在24 V/10 A条件下接触10万次后观察该电接触材料的质量损失仅为1.8 mg.文献

[29]还通过热压烧结法制备了多孔  $Y_2O_3$  纤维增强银基电接触材料.这种独特的结构使  $Ag-Y_2O_3$  具有优异的机械性能,其中  $Y_2O_3$  体积分数为 15% 的银基复合材料具有高密度 ( $9.67 \text{ g/cm}^3$ )、高硬度 ( $12.13 \times 10^2 \text{ N/mm}^2$ )、高电导率 (71.42% IACS (国际退火铜标准))、高击穿强度 ( $3.04 \times 10^6 \text{ V/m}$ ),并且经过了 200 次电弧侵蚀后其材料表面未出现  $Ag$  溅射现象.文献 [30] 以球形  $Y_2O_3$  为起始材料,通过低能球磨处理制备具有准连续网状结构的  $Ag-Y_2O_3$  电接触材料.通过对比  $Y_2O_3$  不同粒径下的电接触材料性能,发现当  $Y_2O_3$  的粒径为 243 nm 时,所制得的准连续网状结构的  $Ag-Y_2O_3$  电接触材料具有最佳的抗电弧腐蚀性能,能够在 100 000 次循环中不失效.

采用高比表面积的形状可以提高界面作用强度,从而优化电接触性能. Pei 等<sup>[31]</sup>通过水热法合成了能够负载  $Ag$  纳米颗粒的花球状  $ZnO$ ,并在研究中发现均匀分布的  $Ag$  纳米颗粒可以提高  $ZnO$  和  $Ag$  之间的界面结合强度.随后通过对比 3 种负载不同质量分数  $Ag$  (分别为 0, 25%, 50%) 的花球状  $ZnO$  的  $Ag-ZnO$  材料的机械性能和电接触性能,发现负载 50%  $Ag$  的  $Ag-ZnO$  电接触材料具有 12.1% 的伸长率,且在 20 000 次的通断实验中表现出最小的接触电阻 ( $6.86 \text{ m}\Omega$ ) 和最小的温升 ( $6.33 \text{ K}$ ),这说明在花球状  $ZnO$  中  $Ag$  的负载量达到 50% 时,所制备的  $Ag-ZnO$  材料具有最优的机械性能和电接触性能.

在增强相中形成的纳米孔隙可以释放应力,阻止带电摩擦磨损中的裂纹扩展. Li 等<sup>[32]</sup>通过化学腐蚀和粉末冶金相结合的方法制备出纳米多孔  $SnO_2$  增强相银基电接触材料,并在化学腐蚀过程中将  $Cu$  颗粒加入到纳米多孔  $SnO_2$  中,制备  $Cu$  的质量分数分别为 1%, 2% 和 3% 的  $Ag-CuO$  材料;然后将其中一部分样品在  $500 \text{ }^\circ\text{C}$  的空气中煅烧使内部  $Cu$  颗粒转变为  $CuO$ ,测得样品中  $CuO$  的质量分数分别为 1.25%, 2.5% 和 3.8%. 随后经过测试发现,相比于传统添加  $SnO_2$  纳米颗粒作为增强相的银基电接触材料,掺杂质量分数为 2%  $Cu$  的纳米多孔  $SnO_2$  作为增强相的银基电接触材料的导电性提升了 59.6%,掺杂质量分数为 1.25%  $CuO$  的纳米多孔  $SnO_2$  作为增强相的银基电接触材料的导电性提升了 62%. 随后经过压缩试验发现,掺杂质量分数为 2%  $Cu$  的  $Ag-SnO_2$  材料没有形成边缘开裂,掺杂质量分数为 2.5%  $CuO$  的  $Ag-SnO_2$  材料也只形成了一些短的微裂纹,说明多孔

$SnO_2$  纳米材料作为增强相可以有效提升  $Ag-SnO_2$  材料的断裂韧性.

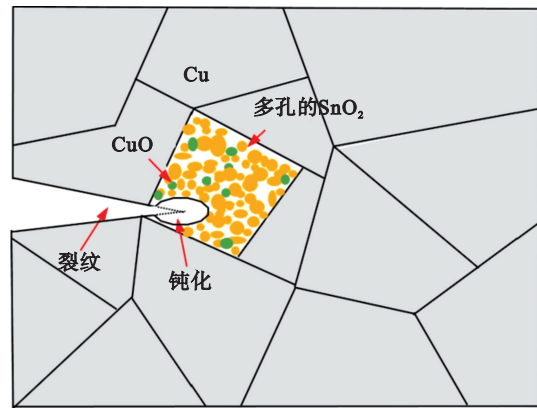


图 1 使用  $CuO$  制备的  $Ag-SnO_2$  材料中裂纹尖端钝化机理示意图<sup>[32]</sup>

Fig. 1 Schematic illustration of crack tip blunting mechanism in the prepared  $Ag-SnO_2$  materials with  $CuO$ <sup>[32]</sup>

采用定向排列的一维增强相可以实现复合材料抗电弧性能和导电性的同时优化. Wang 等<sup>[33]</sup>通过静电纺丝法制备出  $SnO_2$  纳米纤维,将其与银粉混合后,使用火花等离子体烧结 (SPS) 制备出纤维与颗粒状  $SnO_2$  增强相混杂强化的银基电接触材料.与传统  $SnO_2$  颗粒作为增强相的银基电接触材料相比,以  $SnO_2$  纤维与颗粒状混杂作为增强相的银基电接触材料,其电导率与硬度仅分别降低 2.03% 和 0.24%,说明  $SnO_2$  纳米纤维的加入对  $Ag-SnO_2$  材料的物理性能影响很小.在 50 000 次通断试验后,发现  $SnO_2$  纤维与颗粒状混杂作为增强相的  $Ag-SnO_2$  材料没有出现明显的侵蚀,表明其具有较好的抗电弧侵蚀性能.文献 [34] 具体对比了棒状、针状和管状 3 种一维增强相与传统颗粒状增强相的强化作用,发现管状增强相的强化效果最好,在  $24 \text{ V}/10 \text{ A}$  直流阻性负载中的阴极质量损失最小.这可能是由于它兼具一维和多孔的特性,可以持续高效稳定银熔池.

将高银润湿增强相设计成骨架结构可以显著提高对银熔池的毛细吸附.这种结构在熔渗法制备的  $Cu-W$ <sup>[35]</sup>,  $Ag-W$ <sup>[36]</sup> 电接触材料中已广泛应用,近年来也被借鉴用于其他体系的银基电接触材料. Wen 等<sup>[37]</sup>受螳螂虾附肢的启发,通过静电纺丝和放电等离子体烧结制备了一种具有梯度分层散射岛/链骨架结构的链状  $CuO$  纳米纤维增强  $Ag-CuO$  电接触材料.这种新型复合触点材料由于其特殊的梯度分层结构,其物理性能较传统  $Ag-CuO$  电接触材料均有提升,其硬度可达

264.93 MPa, 电导率可达 39.44 MS/m 等. 在进行了 10 000 次的通断实验后, 触点的接触面并未出现明显裂痕和空隙, 表明该新型结构设计有助于提升电接触材料的抗电弧侵蚀性能. Xue 等<sup>[38]</sup>将岛状和骨架状 AlCoCrFeNi 高熵合金 (HEA) 分别

引入银基体中, 制成具有岛状和骨架限制微结构的新型银基电接触材料. 随后的 10 000 次电弧侵蚀实验证明, 高熵合金骨架不仅能够将熔桥的总能量降低, 还能促使其断裂和解体, 从而提升银基电接触材料的抗电弧侵蚀性能.

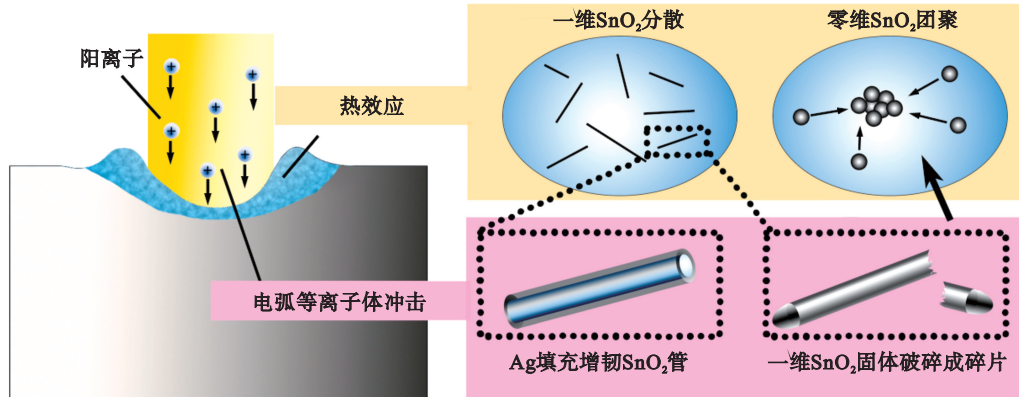


图2 阴极电弧侵蚀作用下热与力对 Ag-SnO<sub>2</sub> 电接触材料的联合作用<sup>[34]</sup>

Fig. 2 Combined action of heat and force on the Ag-SnO<sub>2</sub> electrical contact materials under cathode arc erosion<sup>[34]</sup>

## 2 基于主动抗电弧的增强相研究

银基电接触材料的主动抗电弧是指在电接触过程中, 通过材料本身性质主动切断或减少电弧作用, 从而降低侵蚀的方式. 常见的主动抗电弧方式包括选用高耐压增强相、选用高导热增强相和利用相变吸收燃弧能量等.

### 2.1 提高起弧阈值

两个触头之间电场强度大到足以驱使电子高速跨越空气路径时, 就会形成可导电的等离子体通道, 也就是电弧. 电接触材料的逸出功、电离能和冶金学特性等都会显著影响电弧的发生、运动和熄灭. 在相同负载条件下, 提高材料的逸出功可以减少福勒-诺德海姆 (Fowler-Nordheim) 隧穿发射<sup>[39]</sup>, 从而降低电弧强度. Akbi 等<sup>[40]</sup>发现添加高逸出功的金属可提高 Ag 的逸出功, 该现象有望被利用以降低触头间汤森雪崩的发生概率, 从而提高燃弧难度. 通过添加耐电压强度高的增强相可以提高起弧阈值, 降低电弧侵蚀程度.

氮化物、硼化物具有较高的耐压性, 是银基电接触材料中常用的增强相. 其中, TiN 是银基电接触材料中最常见的氮化物增强相. Wang 等<sup>[41]</sup>采用粉末冶金法制备了 Ag-TiN 电接触材料. 通过对比传统 Ag-SnO<sub>2</sub> 电接触材料和 Ag-

TiN 电接触材料发现, TiN 与熔融 Ag 的润湿性优于 SnO<sub>2</sub> 与熔融 Ag; 同时 Ag-TiN 电接触材料的硬度为 488.6 MPa, 远高于传统 Ag-SnO<sub>2</sub> 电接触材料的 307.7 MPa, 在 50 000 次电弧侵蚀后, Ag-TiN 电接触材料的质量仅损失 0.021 3 g, 占总质量的 0.63%, 该值小于传统的 Ag-SnO<sub>2</sub> 电接触材料; 且触头表面的烧蚀坑深度较浅, 样品表现出较小的熔体飞溅, 这说明 Ag-TiN 电接触材料比传统 Ag-SnO<sub>2</sub> 电接触材料的抗电弧侵蚀性能有很大提升. TiB<sub>2</sub> 是一种较好的耐高压材料<sup>[42]</sup>. 韩金峰等<sup>[43]</sup>采用化学还原法和液相机械搅拌法制备了 Ag-Ni-TiB<sub>2</sub> 电接触材料. 经研究发现含质量分数 1% TiB<sub>2</sub> 的 Ag-Ni-TiB<sub>2</sub> 电接触材料相比于 Ag-Ni 电接触材料硬度提升了 23%, 抗拉强度提升了 12.9%. 后续在 600 V 和 800 V 电压下进行的电弧腐蚀实验表明, 含质量分数 0.5% 和 1% TiB<sub>2</sub> 的 Ag-Ni-TiB<sub>2</sub> 电接触材料的抗电弧侵蚀性能均比未添加 TiB<sub>2</sub> 的 Ag-Ni 电接触材料有所提升, 说明 TiB<sub>2</sub> 的加入能够有效提升材料的抗电弧腐蚀性能.

### 2.2 高导热导电增强相

在电弧放电循环情况下, 具备良好导热导电性的电接触材料表面电弧可以快速运动, 迅速导出热量, 避免局部热量积累导致的内部热应力以及随后引发的变形和裂纹扩展行为<sup>[44]</sup>. 因此, 以 MAX 相<sup>[45]</sup> 和 La<sub>1-x</sub>Sr<sub>x</sub>CoO<sub>3</sub><sup>[46-47]</sup> 等为代表的导电陶

瓷近年来受到广泛关注.

Ding 等<sup>[48]</sup>发现含质量分数 10%Ti<sub>3</sub>AlC<sub>2</sub>的 Ag-Ti<sub>3</sub>AlC<sub>2</sub>复合材料具有良好的导电导热性能,是潜在的 Ag-CdO 替代材料.文献[49]研究发现 Ti<sub>2</sub>SnC 作为增强相加入银基电接触材料是很好的选择.通过粉末冶金法制备 Ag-Ti<sub>2</sub>SnC 材料,经电弧腐蚀实验后发现,含质量分数 10% Ti<sub>2</sub>SnC 的 Ag-Ti<sub>2</sub>SnC 材料腐蚀后的表面形貌优于传统的 Ag-CdO 电接触材料.文献[50]表明 Ag-Ti<sub>2</sub>AlC 电接触材料同样具有令人满意的导电性和良好的抗电弧侵蚀性能.通过放电等离子体烧结 (SPS) 和球磨法制备 Ag-Ti<sub>2</sub>AlC 材料,研究发现当温度升至 1 130 °C 时熔融 Ag 与 Ti<sub>2</sub>AlC 之间的润湿角很小,仅有 14°;且当复合材料中 Ti<sub>2</sub>AlC 达到质量分数 10% 时,其电阻率仅为 79.5 nΩ/m.在经过 5 610 次放电循环后,含质量分数 10% Ti<sub>2</sub>SnC 的 Ag-Ti<sub>2</sub>AlC 材料质量损失仅有 4.4%,这说明 Ti<sub>2</sub>AlC 作为增强相加入银基电接触材料中能够有效提升材料的抗电弧性能.

Wang 等<sup>[51]</sup>对比 Ag-Ti<sub>2</sub>AlC 和 Ag-Ti<sub>2</sub>AlN 两种材料发现,Ag-Ti<sub>2</sub>AlN 在烧结后其电阻率为 (45.3±0.6)nΩ·m,远低于 Ag-Ti<sub>2</sub>AlC 材料的电阻率.经过相同条件的电弧腐蚀实验后,Ag-Ti<sub>2</sub>AlN 和 Ag-Ti<sub>2</sub>AlC 两种材料的阴极质量损失相差不大,分别为 (5.8±0.8)% 和 (7.7±0.9)%,且两者接触面被腐蚀程度相差无异.但由于 Ag-Ti<sub>2</sub>AlN 更优异的导电性能使其成为电接触材料增强相的更优选.贾海龙等<sup>[52]</sup>采用高能球磨和粉末冶金法制备 Ag-Ti<sub>2</sub>AlN 新型电接触材料,在 24 V/10 A 条件下进行了 70 000 次通断循环实验,发现 Ag-Ti<sub>2</sub>AlN 触点材料几乎不发生熔焊,且触点表面不会形成较大熔池区域,这也再次证明 Ti<sub>2</sub>AlN 增强相能够有效改善银基电接触材料的抗电弧侵蚀性能.

### 2.3 溶解断弧增强相

众所周知,在电弧侵蚀过程中,电接触材料的温度会不断上升.当温度达到触点材料的熔点时,材料会变为熔融态.若增强相能在此时及时切断电弧,则可以有效提高材料的抗电弧性能.Ni 便符合这一特性.Wang 等<sup>[53]</sup>通过粉末冶金挤压和拉拔工艺制备了具有不同 Ni 含量的 Ag-Ni 电接触材料,并发现当 Ag-Ni 电接触材料中 Ni 质量分数为 30% 时,经过 20 000 次通断实验后,该材料的接触电阻约为 0.9 mΩ;当通断次数达到 50 000 次后,接触电阻升至 8 mΩ,这说明 Ag-Ni

在凝固时,Ni 的氧化物会聚集在触点材料表面,从而增大接触面的电阻,进而切断电弧.除此之外,Cu 也是如此.Mousavi 等<sup>[54]</sup>通过冷压烧结制备的 Ag-Cu 复合触点材料,其烧结温度在 25~700 °C 时,材料的电阻不会随着烧结温度的变化而变化,并始终保持极低的阻值;当烧结温度升至 750 °C 后,Ag-Cu 触点的电阻从 0.2 Ω 增至 15 kΩ;当温度达到 800 °C 时,阻值升至 850 kΩ.这主要是由于 Cu 在该温度下被氧化成绝缘材料 CuO,有效地阻塞了电流,从而提高材料的抗电弧能力.

### 2.4 气化灭弧增强相

一些增强相在电弧作用的高温下可以分解气化,或者氧化产生气体.这将显著分散电弧能量,降低燃弧时间和燃弧能量,从而减轻局部侵蚀并减少材料损耗.同时,气化灭弧增强相可改善材料的抗熔焊性,优化微观结构,提高材料的致密性和均匀性,进而增强其导电性、硬度和加工性能,显著提升电接触材料的综合性能和使用寿命,使其在复杂电气环境中表现出更好的可靠性和稳定性.

传统的“万能触头”Ag-CdO<sup>[55]</sup>正是通过这种机制达到抗弧效果的.它利用 CdO 在 900 °C 分解吸热,可以主动灭弧,但因不环保而被禁用.目前最常用的 Ag-SnO<sub>2</sub> 电接触材料是以 SnO<sub>2</sub> 为增强相主元,添加 CuO<sup>[56]</sup>, Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub><sup>[57]</sup> 等多种组元来适当提高材料的主动灭弧能力.然而这些组元添加有限,在分解灭弧<sup>[58]</sup>后将使 SnO<sub>2</sub> 润湿性明显下降,导致电退化加速.因此,Ag-CdO 仍在继续使用,特别是在体外医疗监测、工业监测系统和电动汽车等对稳定性要求较高的领域中应用,仍被欧盟 RoHS 2.0 指令豁免 Pack 23 列入.但随着技术的发展和环保意识的提高,开发环保型高性能电触头材料势在必行.

Wang 等<sup>[41]</sup>采用粉末冶金法制备了 Ag-TiN 电接触材料,并发现 TiN 在电弧侵蚀的过程中会与 O<sub>2</sub> 发生反应生成 N<sub>2</sub>.在此过程中不仅会产生吹扫气体,且其中的 Ti≡N 会断裂、吸收能量.以此制备的新型 Ag-TiN 电接触材料在电弧侵蚀过程中能够吸收外部能量,从而提升材料的抗电弧性能,与传统的 Ag-SnO<sub>2</sub> 电接触材料相比具有更好的抗电弧性能(如图 3 所示).然而,气化灭弧型增强相在电接触过程中会不断损耗,在一些高负载和长服役期的场合中难以适用.

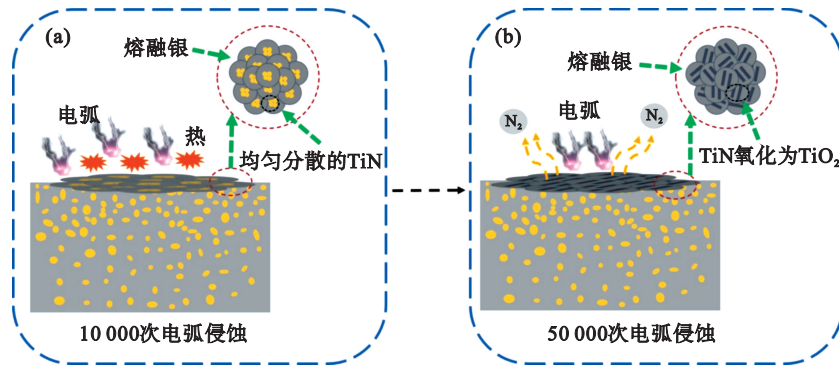


图3 新型Ag-TiN电接触材料的抗电弧机制<sup>[40]</sup>

Fig. 3 Anti-arc mechanism of new Ag-TiN electrical contact material<sup>[40]</sup>

(a)—经 10 000 次电弧腐蚀后材料表面示意图; (b)—经 50 000 次电弧腐蚀后材料表面示意图.

### 2.5 固态相变灭弧增强相

固态相变灭弧增强相是利用增强相在燃弧高温或电接触应力作用下发生的正焓晶体结构转变来吸收热量,使得触点表面的温度得到降低,从而保护触点.如李向阳<sup>[59]</sup>提出将在高温下能够发生吸热相变的铁磁形状记忆合金(Co-Ni-Ga)作为增强相加入银基电接触材料中,发现当Co-Ni-Ga的质量分数为10%时,Ag-CoNiGa材料具有较好的抗电弧侵蚀性能,但是该形状记忆合金相变所需温度在365~460℃,因此Co-Ni-Ga对银基电接触材料抗电弧侵蚀性能的提升较为有限.

Rost等<sup>[60]</sup>报道称(MgCoNiCuZn)O在850~900℃完全转化为单相岩盐结构.进一步研究表明<sup>[61]</sup>,(MgCoNiCuZn)O由多相转变为单相的过程是吸热的.文献[62]采用非均匀沉淀法和放电等离子烧结法分别制备出单相(MgCoNiCuZn)O(SHEO)和多相(MgCoNiCuZn)O(MHEO)增强

的银基电接触材料,发现当多相(MgCoNiCuZn)O的质量分数为12%时的Ag-MHEO材料经过10 000次通断实验后质量损失比传统Ag-SnO<sub>2</sub>材料小约60%,且含质量分数12%MHEO的Ag-MHEO材料经腐蚀后的表面形貌也优于传统Ag-SnO<sub>2</sub>材料.这是因为材料中的多相(MgCoNiCuZn)O增强相可以吸收电弧能量,并原位转变为单相(MgCoNiCuZn)O(见图4,图中MHEO为非等原子高熵氧化物),从而提高了抗电弧侵蚀能力.

事实上,银基电接触材料的抗电弧方式往往不是由单一的主动或者被动抗电弧机制来完成的.例如,将Ni作为增强相加入银基电接触材料中,既能改善材料的润湿性,又能起到溶解断弧的作用;多相(MgCoNiCuZn)O增强的银基电接触材料可以通过固态相变吸收燃弧能量,而相变产物单相(MgCoNiCuZn)O又具有很好的热稳定性,可以通过被动抗电弧的方式持续作用.

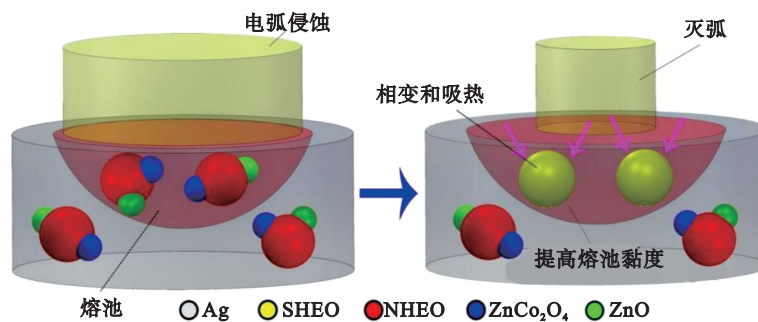


图4 Ag-多相(MgCoNiCuZn)O高熵氧化物的作用机制示意图<sup>[61]</sup>

Fig. 4 Schematic diagram of the mechanism of action of Ag multiphase(MgCoNiCuZn)O high entropy oxide<sup>[61]</sup>

## 3 结语与展望

当前对于银基电接触材料的灭弧问题,国内外众多研究人员已经进行了大量探索,并提出了

改善增强相的熔池润湿性(如:向Ag-SnO<sub>2</sub>材料中添加TiO<sub>2</sub>,CuO或La<sub>2</sub>Sn<sub>2</sub>O<sub>7</sub>等)、调控增强相的几何形貌(如:将传统的ZnO增强相重新设计为花球形ZnO,将传统颗粒状SnO<sub>2</sub>重新设计为纤维状或者网状等)、向银基体中添加一些高耐压增

强相(如:TiN, TiB<sub>2</sub>等)等一系列解决办法.这些方法的应用在缓解电弧侵蚀、提升材料短期使用的稳定性方面已取得了一定成效,为银基电接触材料的现实应用提供了基础支撑.然而现阶段仍存在一些亟待攻克的问题,例如MAX相与银基体间界面反应导致的电阻升高,Ag-Ni电接触材料在大电流下抗熔焊性能差,纤维状与颗粒状SnO<sub>2</sub>混合强化电接触材料的硬度低,TiB<sub>2</sub>与Ag之间的润湿性差以及纤维强化电接触材料加工性能等问题都在限制这些新型电接触材料的应用.新近出现的熵驱动固态相变灭弧电接触材料显示的初步实验数据确实令人振奋,但其加工性、长期稳定性和器件匹配性等仍缺乏进一步的验证.

在“双碳”“数字中国”和“制造强国”三大战略牵引下,新能源汽车、风光储能、数据中心产业蓬勃发展,银基电接触材料市场需求不断增长,技术要求不断提高.未来,在战略牵引和市场需求下,银基电接触材料灭弧领域的研究必然更加深入,节银、环保和高压化也必将成为银基电接触材料的发展趋势.尽管传统的Ag-SnO<sub>2</sub>, Ag-Ni, Ag-W, Ag-C等电接触材料仍占据主流市场,但也逐渐难以满足一些极端严苛的应用场景.以导电陶瓷、纤维增强相、熵驱动固态相变灭弧增强相为代表的新型银基电接触材料强化方式的研究正逐渐展示其实用价值,并正不断深入.

#### 参考文献:

- [ 1 ] 刘满门, 谢明, 杨有才, 等. 银基电接触材料新体系研究进展[J]. 电工材料, 2023 (2): 77-83.  
(Liu Man-men, Xie Ming, Yang You-cai, et al. Research progress on new systems of silver-based electrical contact materials[J]. *Electrical Engineering Materials*, 2023 (2): 77-83.)
- [ 2 ] 崔得锋, 黄岚霞, 王景芹, 等. 2019—2023年电接触材料行业发展概况综述及趋势[J]. 电工材料, 2024(6): 1-5.  
(Cui De-feng, Huang Lan-xia, Wang Jing-qin, et al. Overview and trend outlook of the development of electrical contact materials industry from 2019 to 2023 [J]. *Electrical Engineering Materials*, 2024 (6): 1-5.)
- [ 3 ] Akbi M. Effects of arcing in air on the microstructure and morphology of silver-based contact materials in correlation with their electron emission properties [J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2016, 44(9): 1847-1857.
- [ 4 ] 杨瑞, 刘绍宏, 朱海澄, 等. 电接触材料电弧侵蚀研究进展[J]. 材料导报, 2022, 36(17): 134-140.  
(Yang Rui, Liu Shao-hong, Zhu Hai-cheng, et al. Research progress on the arc erosion of electrical contact materials[J]. *Materials Reports*, 2022, 36(17): 134-140.)
- [ 5 ] 陈杨方, 颜小芳, 柏小平, 等. 不同氧化物颗粒尺寸对AgCdO电接触材料性能影响的研究[J]. 电工材料, 2023 (2): 14-18.  
(Chen Yang-fang, Yan Xiao-fang, Bai Xiao-ping, et al. Study on the effect of different oxide particle size on properties of AgCdO electrical contact materials [J]. *Electrical Engineering Materials*, 2023(2): 14-18.)
- [ 6 ] Huang W B, Yu H J, Wang L, et al. State of the art and prospects in silver-and copper-matrix composite electrical contact materials [J]. *Materials Today Communications*, 2023, 37: 107256.)
- [ 7 ] 王应, 王军, 王俊, 等. 新型组元触点材料及其电弧侵蚀研究进展[J]. 功能材料, 2024, 55(3): 3083-3093.  
(Wang Ying, Wang Jun, Wang Jun, et al. Research progress of new component contact materials and their arc erosion[J]. *Journal of Functional Materials*, 2024, 55(3): 3083-3093.)
- [ 8 ] 马光磊, 张玲洁, 吴新合, 等. Ag/SnO<sub>2</sub>电接触材料的制备及其燃弧特性研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2020, 49 (4), 1312-1324.  
(Ma Guang-lei, Zhang Ling-jie, Wu Xin-he, et al. Preparation and arcing characteristics of Ag/SnO<sub>2</sub> electrical contacts [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2020, 49(4): 1312-1324.)
- [ 9 ] 师浩军, 侯海云. 掺杂 SnO<sub>2</sub> 形貌调控对 Ag-SnO<sub>2</sub> 电接触材料性能的影响[D]. 西安: 西安工程大学, 2021.  
(Shi Hao-jun, Hou Hai-yun. The influence of doping SnO<sub>2</sub> morphology control on the properties of Ag-SnO<sub>2</sub> electrical contact material [D]. Xi'an: Xi'an Polytechnic University, 2021.)
- [ 10 ] 潘杰, 张秀芳, 王美琪, 等. 低压电器用AgZnO触头材料的应用研究[J]. 电工材料, 2025(1): 1-4.  
(Pan Jie, Zhang Xiu-mei, Wang Mei-qi, et al. Application of AgZnO contact material for low voltage electrical apparatus [J]. *Electrical Engineering Materials*, 2025(1): 1-4.)
- [ 11 ] Xu S H, Chen Z Y, Shao W Z, et al. Effects of low-electronegativity doping on the temperature rise of Ag/ZnO electrical contact materials [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2024, 1003(25): 175592.
- [ 12 ] Wei Z J, Zhang L J, Shen T, et al. Effects of oxide-modified spherical ZnO on electrical properties of Ag/ZnO electrical contact material [J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2016, 25(9): 3662-3671.
- [ 13 ] Zhang Y J, Song B, Zhao X, et al. Microstructure and properties of Ag/SnO<sub>2</sub> functional material manufactured by selective laser melting [J]. *Nano Materials Science*, 2019, 1(3): 208-214.
- [ 14 ] 王金龙, 付翀, 宁静, 等. Ag-SnO<sub>2</sub>电接触材料的研究进展及发展趋势[J]. 贵金属, 2021, 42(3): 85-92.  
(Wang Jin-long, Fu Chong, Ning Jing, et al. Research progress and development trend of Ag-SnO<sub>2</sub> electrical contact materials [J]. *Precious Metals*, 2021, 42(3): 85-92.)
- [ 15 ] Wang S, Zheng T T, Xie M, et al. Internal oxidation thermodynamics and isothermal oxidation behavior of AgSnO<sub>2</sub> electrical contact materials [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2014, 43(4): 796-798.
- [ 16 ] Shang S, Wang Z B, Li W Y, et al. The performance degradation comparison test and failure mechanism of silver metal oxide contact materials [C]// 2019 IEEE Holm Conference on Electrical Contacts. Milwaukee: IEEE, 2019: 335-343.
- [ 17 ] 王海涛, 文攀龙, 梁磊, 等. 润湿性对AgSnO<sub>2</sub>TiO<sub>2</sub>触头材料性能的影响[J]. 电子元件与材料, 2016, 35(7): 80-83.  
(Wang Hai-tao, Wen Pan-long, Liang Lei, et al. Effect of wettability on properties of AgSnO<sub>2</sub> TiO<sub>2</sub> contact material [J]. *Electronic Components and Materials*, 2016, 35(7):

- 80–83.)
- [18] Wang J, Zhao H D, Wang J B, et al. Effect of CuO additives on the formation of SnO<sub>2</sub>-rich layers in Ag–SnO<sub>2</sub> materials [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, 770: 920–925.
- [19] Wang Y P, Li H Y. Improved workability of the nanocomposited AgSnO<sub>2</sub> contact material and its microstructure control during the arcing process [J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2017, 48(2): 609–616.
- [20] Zhang L J, Shen T, Shen Q H, et al. Anti-arc erosion properties of Ag–La<sub>2</sub>Sn<sub>2</sub>O<sub>7</sub>/SnO<sub>2</sub> contacts [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2016, 45(7): 1664–1668.
- [21] 高健峰,何胜,夏勇,等. 低压电器用银基触点材料研究与应用进展[J]. 功能材料, 2024, 55(6): 6053–6061. (Gao Jian-feng, He Sheng, Xia Yong, et al. Research and application progress of silver-based contact materials in low voltage apparatus [J]. *Journal of Functional Materials*, 2024, 55(6): 6053–6061.)
- [22] Son J H, Song Y H, Yu H K, et al. Effects of Ni cladding layers on suppression of Ag agglomeration in Ag-based ohmic contacts on p–GaN [J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 95(6): 062108.
- [23] 刘乔丹,田无边. 银与Ti<sub>3</sub>AC<sub>2</sub>(A=Al, Si, Ge)相的高温润湿性及界面反应机理[D]. 南京:东南大学, 2021. (Liu Qiao-dan, Tian Wu-bian. High-temperature wettability and interfacial reaction mechanism between silver and Ti<sub>3</sub>AC<sub>2</sub> [D]. Nanjing: Southeast University, 2021.)
- [24] 张凯歌,丁健翔. 高性能Ag/MAX复合电触头材料制备与应用研究[D]. 马鞍山:安徽工业大学, 2023. (Zhang Kai-ge, Ding Jian-xiang. Research on preparation and application of high performance Ag/MAX composite electrical contact materials [D]. Ma'anshan: Anhui University of Technology, 2023.)
- [25] 彭韬,谭志龙,张晓波,等. Ag–MAX电触头材料的研究现状及发展趋势[J]. 贵金属, 2024, 45(1): 70–77. (Peng Tao, Tan Zhi-long, Zhang Xiao-bo, et al. Research status and development trend of Ag–MAX electrical contact materials [J]. *Precious Metals*, 2024, 45(1): 70–77.)
- [26] Wang D D, Tian W B, Lu C J, et al. Comparison of the interfacial reactions and properties between Ag/Ti<sub>3</sub>AlC<sub>2</sub> and Ag/Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub> electrical contact materials [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, 857(15): 157588.
- [27] 杨瑞,孙旭东. Ag/MeO电接触材料的微结构设计及抗电弧侵蚀研究[D]. 沈阳:东北大学, 2022. (Yang Rui, Sun Xu-dong. Microstructure design and anti-arc erosion properties of Ag/MeO electric contact materials [D]. Shenyang: Northeastern University, 2022.)
- [28] Lin Z J, Fan S Y, Liu M M, et al. Excellent anti-arc erosion performance and corresponding mechanisms of a nickel-belt-reinforced silver-based electrical contact material [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, 788(5): 163–171.
- [29] Yang R, Liu S H, Chen J L, et al. Porous Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> fiber-reinforced silver composite exhibiting enhanced mechanical and electrical properties [J]. *Ceramics International*, 2019, 45(2): 1881–1886.
- [30] Yang R, Liu S H, Cui H, et al. Quasi-continuous network structure greatly improved the anti-arc-erosion capability of Ag/Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> electrical contacts [J]. *Materials*, 2022, 15(7): 2450.
- [31] Pei Y L, Zhou Y H, Wu X H, et al. Improving mechanical and electrical contact performance of silver based electrical contact material reinforced by flower spherical zinc oxide loaded with silver nanoparticles [J]. *Materials Today Communications*, 2024, 41: 110562.
- [32] Li G J, Ma Y Y, Zhang X L, et al. Interface strengthening and fracture characteristics of the Ag-based contact materials reinforced with nanoporous SnO<sub>2</sub> (Cu, CuO) phases [J]. *Applied Surface Science*, 2021, 543: 148812.
- [33] Wang J, Duan C G, Chen S Y, et al. Arc erosion behaviors and surface characteristics of SnO<sub>2</sub> nanofiber/particle reinforced Ag-based composite [J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2024, 33(10): 4754–4764.
- [34] Lin Z J, Liang Y C, Zeng Y M, et al. Morphology-tunable synthesis and formation mechanism of SnO<sub>2</sub> particles and their application in Ag–SnO<sub>2</sub> electrical contact materials [J]. *Ceramics International*, 2022, 48(5): 6052–6061.
- [35] Liu T, Han Y, Jia D C, et al. Graphene-enhanced CuW composites for high-voltage circuit breaker electrical contacts [J]. *Applied Sciences*, 2024, 14(7): 2731.
- [36] Yu H B, Sun Y, Kesim M T, et al. Surface degradation of Ag/W circuit breaker contacts during standardized UL testing [J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2015, 24(9): 3251–3262.
- [37] Wen K, Xu C H, Wang Z, et al. Mantis shrimp appendages-inspired Ag–CuO contact: synergistically enhancing the erosion and impact resistance via gradient-layered scatter-island/chain-skeleton structure [J]. *Materials Characterization*, 2024, 214: 114121.
- [38] Xue X Y, Wang Z, Nie H L, et al. Simultaneously enhancing erosion and compression resistance: designing AlCoCrFeNi high-entropy alloy strengthened Ag-based contacts [J]. *Rare Metals*, 2024, 43(9): 4476–4492.
- [39] 张国强,严荣良,余学锋,等. 含F栅介质的Fowler–Nordheim效应[J]. 半导体学报, 1998, 19(8): 56–60. (Zhang Guo-qiang, Yan Rong-liang, Yu Xue-feng, et al. Fowler–Nordheim effect of F–gate media [J]. *Chinese Journal of Semiconductors*, 1998, 19(8): 56–60.)
- [40] Akbi M, Bouchou A, Zouache N. Effects of vacuum heat treatment on the photoelectric work function and surface morphology of multilayered silver-metal electrical contacts [J]. *Applied Surface Science*, 2014, 303: 131–139.
- [41] Wang J, Li Z G, Zhang H M, et al. Preparation and arc erosion behavior of novel Ag–TiN electrical contact materials [J]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2025, 56(2): 1139–1149.
- [42] 张航,王献辉. Ag–TiB<sub>2</sub>–Ni电接触材料制备及性能研究[D]. 西安:西安理工大学, 2023. (Zhang Hang, Wang Xian-hui. Investigation on preparation and properties of Ag–TiO<sub>2</sub>–Ni electrical contact materials [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2023.)
- [43] 韩金峰,秦国义. Ag–Ni–TiB<sub>2</sub>电接触材料的制备、组织与性能研究[D]. 昆明:云南大学, 2018. (Han Jin-feng, Qin Guo-yi. Preparation, microstructure and properties of Ag–Ni–TiB<sub>2</sub> electrical contact materials [D]. Kunming: Yunnan University, 2018.)
- [44] 丁宽宽,丁健翔,张凯歌,等. 多场耦合侵蚀下环保Ag/Ti<sub>2</sub>SnC复合电接触材料的微/纳米力学行为及微结构演变[J]. 金属学报, 2024, 60(12): 1731–1745. (Ding Kuan-kuan, Ding Jian-xiang, Zhang Kai-ge, et al. Micro/nano-mechanical behavior and microstructure evolution of eco-friendly Ag/Ti<sub>2</sub>SnC composite electrical contacts under multi-field coupled erosion [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2024, 60(12): 1731–1745.)
- [45] 魏鑫鹏,吴雪莲,吴宸哲,等. 电弧侵蚀过程Ag/Ti<sub>2</sub>SnC复合电触头材料纳米力学退化行为及其机理[J]. 机械工程学报, 2024, 60(24): 163–176.

- (Wei Xin-peng, Wu Lian-xue, Wu Cheng-zhe, et al. Nano-mechanical degradation behavior and mechanism of Ag/Ti<sub>2</sub>SnC composite electrical contact materials during arc erosion [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2024, 60(24): 163-176.)
- [46] Shen T, Zhang J, Zhang L J, et al. Preparation of perovskite La<sub>1-x</sub>Sr<sub>x</sub>CoO<sub>3-δ</sub> powders and its application in silver based electrical contact materials [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2018, 47(sup2): 48-52.
- [47] Zheng X H, Wang D S, Shen T, et al. Improving interfacial wettability, physical, and mechanical properties of Ag/La<sub>1-x</sub>Sr<sub>x</sub>CoO<sub>3</sub> electrical contact materials by In situ Cu-doping [J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2024, 33(15): 7892-7903.
- [48] Ding J X, Tian W B, Zhang P G, et al. Arc erosion behavior of Ag/Ti<sub>3</sub>AlC<sub>2</sub> electrical contact materials [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, 740: 669-676.
- [49] Ding J X, Tian W B, Zhang P G, et al. Preparation and arc erosion properties of Ag/Ti<sub>2</sub>SnC composites under electric arc discharging [J]. *Journal of Advanced Ceramics*, 2019, 8(1): 90-101.
- [50] Ding J X, Huang P Y, Zha Y H, et al. High-purity Ti<sub>2</sub>AlC powder: preparation and application in Ag-based electrical contact materials [J]. *Journal of Inorganic Materials*, 2020, 35(6): 729.
- [51] Wang D D, Zhu H Y, Zheng M Y, et al. Comparative study of the microstructure and arc erosion resistance of Ag/Ti<sub>2</sub>AlX (X=C, N) electrical contact materials [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2023, 961: 170870.
- [52] 贾海龙,朱刚,谢明,等. 新型Ag-Ti<sub>2</sub>AlN电接触材料的电弧侵蚀行为研究[J]. *稀有金属与硬质合金*, 2019, 47(1): 26-30, 69.  
(Jia Hai-long, Zhu Gang, Xie Ming, et al. Study on arc erosion behavior of a new type of Ag-Ti<sub>2</sub>AlN electrical contact material [J]. *Rare metals and cemented carbides*, 2019, 47(1): 26-30, 69.)
- [53] Wang H, Yuan H. Investigation on the electrical properties of AgNi contact materials with various Ni content [C]// 2017 IEEE Holm Conference on Electrical Contacts. Denver: IEEE, 2017: 221-224.
- [54] Mousavi Z, Pourabdoli M. Physical and chemical properties of Ag-Cu composite electrical contacts prepared by cold-press and sintering of silver-coated copper powder [J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2022, 290: 126608.
- [55] Pons F, Cherkaoui M, Ilali I, et al. Evolution of the AgCdO contact material surface microstructure with the number of arcs [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2010, 39(4): 456-463.
- [56] Han X L, Wang Z, Li G J, et al. Interfacial thermal stress relief in Ag-SnO<sub>2</sub> composites by in situ formation of CuO nanoparticles additive on SnO<sub>2</sub> [J]. *Ceramics International*, 2022, 48(12): 16638-16648.
- [57] 郑晓华,王纯,沈涛,等. Bi<sub>2</sub>Sn<sub>2</sub>O<sub>7</sub>掺杂对Ag/SnO<sub>2</sub>材料界面润湿性及物理性能的影响[J]. *稀有金属材料与工程*, 2022, 51(2): 552-558.  
(Zheng Xiao-hua, Wang Chun, Shen Tao, et al. Effect of Bi<sub>2</sub>Sn<sub>2</sub>O<sub>7</sub> doping on interfacial wettability and physical properties of Ag/SnO<sub>2</sub> materials [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2022, 51(2): 552-558.)
- [58] Rong M Z, Wang Q P. Effects of additives on the AgSnO<sub>2</sub> contacts erosion behavior [C]// Proceedings of IEEE Holm Conference on Electrical Contacts. Pittsburgh: IEEE, 2002: 33-36.
- [59] 李向阳. 铁磁形状记忆合金增强银触点材料的研究[D]. 天津:河北工业大学,2014.  
(Li Xiang-yang. Study on ferromagnetic shape memory alloy reinforced silver contact materials [D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2014.)
- [60] Rost C M, Sachet E, Borman T, et al. Entropy-stabilized oxides [J]. *Nature Communications*, 2015, 6(1): 8485.
- [61] Saghir A V, Beidokhti S M, Khaki J V, et al. One-step synthesis of single-phase (Co, Mg, Ni, Cu, Zn) O high entropy oxide nanoparticles through SCS procedure: thermodynamics and experimental evaluation [J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2021, 41(1): 563-579.
- [62] Lin Z J, Gao W H, Li S Y, et al. Effect of in-situ phase transition of (MgCoNiCuZn) O high-entropy oxides on microstructure and performance of Ag-based electrical contact materials [J]. *Applied Surface Science*, 2023, 630: 157479.