

新型银基电接触材料的研究进展

王塞北^{1,2}, 王松², 孙勇¹, 谢明^{2*}, 陈永泰², 李爱坤², 侯攀², 刘满门²

(1. 昆明理工大学 材料科学与工程学院, 昆明 650093;

2. 昆明贵金属研究所 稀贵金属综合利用新技术国家重点实验室, 昆明 650106)

摘要: 综述了3种新型银基电接触材料的性能特点。以NiO、Bi₂O₃或CuO改性的Ag/SnO₂MeO可以改善传统Ag/SnO₂电接触材料的接触电阻稳定性、温升控制及室温加工性;以Ag/Ti₃SiC₂和Ag/Ti₃AlC₂为代表的三元层状化合物陶瓷相增强银基材料(Ag/MAX)可以改善AgNi材料大电流条件下的抗熔焊性能,降低直流负载条件下材料转移量;用石墨烯替代传统石墨研制的Ag/GNPs可以解决表面膜增厚、接触电阻增大、耐磨性不足等缺点。提出新型银基电接触材料的主要研发方向。

关键词: 银基电接触材料; Ag/SnO₂MeO; Ag/MAX; Ag/GNPs; 性能

中图分类号: TG146.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-0676(2019)04-0072-06

Research Progress of New Silver-based Electrical Contact Materials

WANG Saibei^{1,2}, WANG Song², SUN Yong¹, XIE Ming^{2*}, CHEN Yongtai², LI Aikun², HOU Pan², LIU Manmen²

(1. Faculty of Material Science and Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China;

2. State Key Laboratory of Advance Technologies for Comprehensive Utilization of Precious Metals, Kunming Institute of Precious Metals, Kunming 650106, China)

Abstract: The performance characteristics of three types of new silver-based electrical contact materials were reviewed. The stability of contact resistance, temperature control and machinability at room temperature of traditional Ag/SnO₂ contact materials were enhanced by the introduction of NiO, Bi₂O₃ or CuO component. The anti-welding behavior of the Ag/MAX electrical contact materials such as Ag/Ti₃SiC₂ and Ag/Ti₃AlC₂ under heavy current was improved, and the materials transfer under DC load was reduced. Ag/GNPs with graphene solves the drawbacks of thickened surface film, increased contact resistance and insufficient wear resistance, compared to Ag/GNPs with graphite. The directions of future development were also presented in this paper.

Key words: silver-based electrical contact material; Ag/SnO₂MeO; Ag/MAX; Ag/GNPs; performance

银基电接触材料通常被制作成电触点、电刷、换向片和接插件等元件用于接触器、电位器、继电器等电转换装置中,承担着电流的导通、截断、分流和隔离作用,其性能优劣是影响整个电器设备和电子仪器系统可靠、稳定、安全工作的关键因素。具有良好的导电导热性、低而且稳定的接触电阻、不与服役环境发生显著化学反应、有一定的强度和

易于机械加工,是对银基电接触材料性能的基本要求^[1]。虽然现阶段工业化使用的Ag/SnO₂、Ag/Ni电接触材料能够满足上述基本性能要求,但其在耐电弧烧损、抗熔焊和耐电磨损等性能方面仍存在的固有缺点,表现为长时间服役条件下接触电阻增大、温升增加、强度下降,大电流大功率负载条件下电弧侵蚀严重、易发生熔焊,高速载流运转条件下耐

收稿日期: 2019-11-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(51707087, 51967008, 51767011, U1602271)、云南省应用基础研究项目(2018FB094, 2018FD124)

第一作者: 王塞北, 女, 博士研究生, 高级工程师, 研究方向: 稀贵金属电接触材料。E-mail: wsb@ipm.com.cn

*通讯作者: 谢明, 男, 博士, 教授, 研究方向: 稀贵金属材料。E-mail: powder@ipm.com.cn

磨性不足、材料磨耗严重等。

为了进一步提高传统 Ag/SnO₂、Ag/Ni 等电接触材料的性能以适应电器产品发展需要, 电工材料研究工作者近年来开展了相关工作。如选择合适的 SnO₂ 粒度来改善 Ag/SnO₂ 电接触材料的接触电阻和燃弧能量等性能, 一定程度上提高其导电率和耐磨性^[2-4]。采用高能球磨湿混和热挤压相结合的制备方法以提高 Ag/SnO₂ 电接触材料的致密度和显微硬度, 并使 SnO₂ 颗粒均匀弥散分布在 Ag 基体内改善其加工性^[5]。使用适量碳纳米管部分替代金属镍颗粒加入到 Ag/Ni 电接触材料中, 改善 Ag/Ni 电接触材料力学性能和耐电弧侵蚀性能^[6]。采用烧结挤压制备工艺, 使金属镍在银基体中呈纤维状弥散分布, 提高材料的耐电弧烧损性和电寿命^[7]。尽管这些新措施使 Ag/SnO₂、Ag/Ni 电接触材料的性能得到了一定优化, 但由于银基体中第二相颗粒本身固有的颗粒粗大、导电性低、塑性不佳等缺陷, 导致材料总体综合性能的提高还很有限。若不从材料组成体系上进行创新, 很难解决 Ag/SnO₂、Ag/Ni 电接触材料自身固有的性能缺点^[8-10]。

鉴于此, 研制高性能新组元银基电接触材料, 即在银基体中使用新型第二相添加剂并采用适合制备工艺使之弥散分布, 已成为现阶段电接触材料研究的热点方向之一。已陆续开展了 Ag/SnO₂NiO、Ag/SnO₂Bi₂O₃、Ag/SnO₂CuO 等 Ag/SnO₂MeO 电接触材料, Ag/Ti₃SiC₂、Ag/Ti₃AlC₂ 等 Ag/MAX 电接触材料, 以及 Ag/石墨烯(Ag/GNPs)电接触材料的制备工艺研发和性能评价工作, 尤其是 Ag/SnO₂NiO 新型电接触材料用于中等负荷交流接触器的主触头获得了较好的效果。本文对新型电接触材料近年来的研究进展进行综述分析。

1 银基电接触材料基本性能要求

由于银基电接触材料服役过程中将受到热、力、电、磁等物理耦合作用, 为保证其长时间稳定、可靠服役, 对材料的性能要求非常苛刻, 并根据其接触条件又有所侧重。载流滑动接触条件下, 侧重要求材料的抗电摩擦磨损能力; 大电流分断接触条件下, 侧重要求材料的耐电弧烧蚀能力; 直流阻性负载条件下, 重点要求材料的抗材料转移能力; 腐蚀环境条件下, 侧重要求材料的耐腐蚀性能。综合考虑, 高可靠高性能银基电接触材料需要符合以下 3 个方面性能要求^[11-12]。

1) 优异的电接触性能: 材料配对使用时接触电阻低且稳定, 熔焊及材料转移倾向小, 大热容量和高电子逸出功以及保证最低起弧电压和起弧电流, 表面电弧运动特性良好使液桥容易分断。

2) 良好的加工性能: 材料强度和塑性适中, 易于锻制成铆钉或轧制成片材, 焊接性能优异, 可采用钎焊或用其他方法固定到簧片、触座上。

3) 稳定的化学性能: 材料不与服役环境介质发生显著化学反应, 在大气环境下不被氧化、硫化 and 碳化, 在盐雾环境下, 表面不形成低导电的化合物或表面膜。

2 Ag/SnO₂MeO 电接触材料

针对传统 Ag/SnO₂ 电接触材料接触电阻不稳定、温升难控制及室温加工性不佳等问题, 近年来发展了复合相银基电接触材料新体系以改善 Ag/SnO₂ 材料的电气使用性能和加工性能, 协同发挥不同金属氧化物的理化功能, 满足对银基电接触材料承载电流强、分断容量大、耐压强度高、电寿命长等多样性要求, 并主要研制了 Ag/SnO₂NiO、Ag/SnO₂Bi₂O₃、Ag/SnO₂CuO 等 Ag/SnO₂MeO 电接触材料。表 1 列举了几类 Ag/SnO₂MeO 电接触材料的主要物理性能。

表 1 Ag/SnO₂MeO 电接触材料的物理性能

Tab.1 Physical properties of Ag/SnO₂MeO electrical contact materials

材料	密度 /(g/cm ³)	硬度 (HV0.1)	导电率 /(μΩ·cm)
Ag/10%SnO ₂ 2%NiO	9.25±0.04	98±3	2.85±0.05
Ag/10%SnO ₂ 2%Bi ₂ O ₃	9.23±0.04	101±3	2.91±0.05
Ag/10%SnO ₂ 2%CuO	9.24±0.04	96±3	2.76±0.05

2.1 Ag/SnO₂NiO 电接触材料

考虑到 Ag/SnO₂ 与 AgNi 电气性能及加工特点的高度互补性, 周晓龙等^[13]利用合金内氧化和高温烧结法制备了具有良好的抗侵蚀及耐磨损性能新型 Ag/SnO₂NiO 电接触材料。该材料接触电阻低且稳定, 表现出较好的电接触行为。内氧化生成的 NiO 使得液态 Ag 对 SnO₂ 的润湿作用增强, 有利于降低该材料的转移量和材料净损耗。郑忠^[14]采用大塑性变形量使团聚态的 NiO 与 SnO₂ 颗粒分散, 制得组织均匀的 Ag/SnO₂NiO 电接触材料, 电接触试验结

果表明添加适量 NiO 能够显著抑制该材料的转移和损耗,且 NiO 含量对其耐电弧侵蚀能力有重要影响。

2.2 Ag/SnO₂Bi₂O₃ 电接触材料

赵彩甜等^[15]采用第一性原理的计算方法,综合分析 SnO₂/Bi₂O₃ 复合氧化物的电子结构、态密度、电荷密度以及能带,揭示出 Bi 掺杂后材料带隙降低、电子易跃迁、费米面附近载流子浓度增大等规律,从理论上阐明了 Ag/SnO₂Bi₂O₃ 电接触材料导电性增强的机理。为避免长时间电弧作用下,Ag 基体与增强相 SnO₂ 颗粒发生分离并聚集在触头的表面上形成绝缘层。王海涛等^[16]以 Bi₂O₃ 为添加剂,采用粉末冶金法制备了 Ag/SnO₂Bi₂O₃ 电接触材料;Bi₂O₃ 的添加有利于提高材料的致密度和改善 AgSnO₂ 材料的润湿性;研制的新型 Ag/SnO₂Bi₂O₃ 电接触材料具有优异的电接触性能,其接触电阻为 0.23 mΩ,燃弧能量为 187 mJ。吴新合^[17]为推进 Ag/SnO₂Bi₂O₃ 电接触材料的稳定批量产业化进程,系统研究了关键工艺参数对该材料的微观组织、电气性能及电寿命的影响规律,构建了其热加工工艺图,并通过材料配方设计、工艺优化及电寿命测试等技术实现了长电寿命服役性能的 Ag/SnO₂Bi₂O₃ 电接触材料的批量化制备。

2.3 Ag/SnO₂CuO 电接触材料

为提升传统 AgSnO₂ 电接触材料的室温加工性能和耐电弧侵蚀能力,王松等^[18]采用化学包覆-冷等静压-热挤压集成新工艺制备了新型 Ag/SnO₂CuO 电接触材料。指出添加微量 CuO 可增加 SnO₂ 颗粒与 Ag 基体之间的浸润性,提高材料的力学性能,同时降低材料的燃弧能量、燃弧时间和断开熔焊力。Li 等^[19]通过自组装沉淀结合粉末冶金法制备了原位形成的 CuO 纳米粒子改性的 Ag/SnO₂CuO 电接触材料,分析结果表明,随着 CuO 的引入,材料的导电率显著提高,加工性进一步改善。超细 CuO 纳米颗粒的形成提升了材料的电弧分散性和耐电弧腐蚀性能,有效抑制了侵蚀区域中 SnO₂ 颗粒的聚集。

3 Ag/MAX 电接触材料

针对传统 AgNi 电接触材料大电流条件下抗熔焊性能差、直流负载条件下材料转移量偏大等问题,一种新型的三元层状化合物陶瓷相(MAX 相)作为强化相被用于银基电接触材料中。MAX 相具有高熔点、高导电、高强度、抗氧化及自润滑等特性,不仅能在不明显影响材料导电性的同时增强银基

体,提高复合材料的力学性能,还能表现出优异的抗材料转移能力和耐磨损性能^[20-22]。表 2 列举了几种 Ag/MAX 电接触材料的主要物理性能。

表 2 Ag/MAX 电接触材料的物理性能

Tab.2 Physical properties of Ag/MAX electrical contact materials

材料	密度/(g/cm ³)	硬度(HV _{0.1})	导电率/(μΩ·cm)
Ag/10% Ti ₃ SiC ₂	9.39±0.02	107±5	2.91±0.05
Ag/10% Ti ₃ AlC ₂	9.36±0.02	102±5	2.83±0.05

3.1 Ag/Ti₃SiC₂ 电接触材料

Zhang 等^[23]将 Ag 粉和 Ti₃SiC₂ 粉末混合均匀后通过无压烧结制备了 Ag/Ti₃SiC₂ 复合材料,发现将 Ti₃SiC₂ 掺入 Ag 可以提高其硬度,而不会实质性地损害其导电性。此行为归因于 Ti₃SiC₂ 增强材料的陶瓷和金属性能的组合,表明其在电触点中具有较强应用前景。Huang 等^[24]报道了 Ag/Ti₃SiC₂ 电接触材料在多种负载电压下的电弧腐蚀行为。由于电弧的热特性,材料电接触过程中发生熔化、飞溅、重新凝固,分解和氧化等现象,腐蚀区域分为圆形或树枝状形态,材料具有较强的耐电弧击穿强度。Alanzi 等^[25]研究了 Ag/Ti₃SiC₂ 电接触材料的力学性能和耐磨损行为,结果指出,Ag/Ti₃SiC₂ 电接触材料的屈服强度比 Ag 基体提高了约 3.5 倍,磨损率与 Ag 基体相比降低了约 12 倍。该材料的摩擦学行为取决于表面摩擦膜形成。

3.2 Ag/Ti₃AlC₂ 电接触材料

刘满门等^[26]研究了塑性变形+退火处理新工艺对热压烧结 Ag/Ti₃AlC₂ 电接触材料力学及电学性能的影响规律,结果表明,新工艺显著降低材料的电阻率和改善材料的塑性,Ag/20%Ti₃AlC₂(体积分数)材料的电阻率降幅达到 15.02%,而延伸率提高了 435.11%。丁健翔等^[27]通过动态电弧放电实验指出,不均匀的电弧侵蚀将导致 Ag/Ti₃AlC₂ 电接触材料触头表面产生未受侵蚀、过渡和侵蚀 3 个特征区域。电弧侵蚀过程中添加相 Ti₃AlC₂ 的快速“分解-氧化”过程会使其微结构演变和氧化,进而导致了 Ag/Ti₃AlC₂ 复合材料电接触性能的退化。与市售的 Ag/石墨复合材料相比,采用热压技术制备的 Ag/Ti₃AlC₂ 电接触材料具有更优异的力学和电学性能。Ti₃AlC₂ 的部分分解并在界面区域形成了 Ag(Al) 固溶体,显著提高了材料的力学性能。

4 Ag/GNPs 电接触材料

传统的 Ag/石墨电接触材料存在的长时间运转情况下表面膜增厚、接触电阻增大、耐磨性不足等缺点。为了进一步提高 Ag/石墨电接触材料的性能以适应微电机发展需要, 研究工作者从材料组成体系上进行创新, 开发新型 Ag/GNPs 电接触材料。将石墨烯(GNPs)独特的结构和优异的特性引入到银基电接触材料中, 对该类材料的性能提升带来了巨大的影响^[28-29]。表 3 列举了 Ag/GNPs 电接触材料的主要物理性能。

表 3 Ag/GNPs 电接触材料的物理性能

Tab.3 Partial physical properties of Ag/GNPs electrical contact materials

材料	密度/(g/cm ³)	硬度(HV _{0.1})	导电率/(μΩ·cm)
Ag/0.5%GNPs	10.46±0.05	51±3	1.74±0.05
Ag/1.0%GNPs	10.38±0.05	45±3	1.82±0.06
Ag/1.5%GNPs	10.31±0.05	38±3	1.93±0.08

Wang 等^[30]为阐明低压压制成形和真空烧结制备的银-石墨烯复合材料的致密化行为, 通过 24 h 机械球磨制得石墨烯含量(质量分数, 下同)0.5%至 2.0%的银-石墨烯复合粉末, 随后进行低压双向压制和真空烧结。银-石墨烯粉末的压制数据符合川北公夫方程。致密化系数(K)值随石墨烯含量的增加而增大, 表明复合粉末抗塑性变形能力增大。银-0.5%石墨烯复合材料具有最佳的烧结性能。石墨烯含量 1.5%的复合材料具有较好增强效果的力学性能, 其抗拉强度达到 252 MPa。同时, 对比研究了 Ag/石墨、Ag/碳纳米管和 Ag/GNPs 等不同碳质相增强银基电接触材料的电接触行为, 发现同等电接触参数条件下, Ag/GNPs 电接触材料具有最佳电接触性能, 其燃弧时间最短、燃弧能量最低、材料转移量和质量净损耗最少, 表明石墨烯是一种理想的银基电接触材料增强相^[31]。Hao 等^[32]通过化学还原法将 Ag 颗粒引入石墨烯纳米片中, 并通过粉末冶金法制备了具有良好分散的块状 Ag/GNPs(石墨烯质量分数 0.5%)电接触材料。与纯银相比, 该材料的硬度比银基体提高了 35.1%, 电导率达到了 98.62% IACS(国际退火铜标准)。Yang 等^[33]报道了一种简单有效的方法来制备具有优异机械和电性能的 Ag/GNPs 电接触材料。通过热压化学剥落氧化石墨

烯制得具有低的含氧官能团和缺陷密度的石墨烯后与 Ag 粉进行高能球磨得到复合粉末, 复合粉末采用放电等离子体烧结处理获得 Ag/GNPs 电接触材料。与纯 Ag 相比, 所制备的材料电导率提高了 11%, 显微硬度提高了 42%, 石墨烯的最佳添加量为 1%。Ag/GNPs 材料有望成为一种高性能新型银基电接触材料并应用于微型电子元件和开关电源。

5 结语

服役环境和条件不同, 对银基电接触材料的具体性能要求不同, 其研究侧重点也不同。新型强化第二相(如石墨烯、MAX 相等)不仅能够改善银基电接触材料的力学性能, 还能提高其在某一特定服役条件下的电气性能。寻求廉价、高效、易得的新型强化相, 并采用常规工艺将其应用到电接触材料实践生产当中, 制备出综合性能优异的新型银基电接触材料, 是当前银基电接触材料的研发方向。针对近年来开发的新型银基电接触材料, 笔者以为今后应主要关注以下 3 个方面的发展。

1) 探究新型第二相颗粒在银基体中高效分散的工艺途径。新型第二相颗粒作为增强体在银基电接触材料使用时, 关键科技问题在于, 如何弥散均匀分布以及与基体的界面如何形成。均匀分散的第二相颗粒不仅能细化晶粒、钉扎位错, 还能更有效地承担载荷。尽管已有的高能球磨、切丝压锭等工艺手段可以一定程度上提高第二相颗粒的分散性, 但针对石墨烯、MAX 相等新型强化相, 采用何种工艺途径能够更加高效的抑制其在银基体中的表面偏聚现象、改善新型银基复合材料的综合性能, 这仍需要电工领域科研人员去探究和求证。

2) 深入研究新型第二相颗粒与银基体间的界面关系。新型第二相颗粒与银基体间界面的结合状态和强度对材料的性能有着极其重要的影响, 界面结合强度太低的材料容易产生剪切破坏, 界面结合强度过高则易引起脆性断裂。然而, 对于新型银基电接触材料的界面关系这一关键科学问题, 目前尚未有全面系统的阐述, 还须科研人员对新型银基电接触材料界面的化学缺陷及结构缺陷、界面反应与界面稳定性及其热力学、动力学条件进行深入研究。

3) 实验和数值模拟相结合综合研究新材料的电侵蚀机制。数值模拟方法有助于揭示银基电接触材料的电弧侵蚀行为。由于银基电接触材料在使用中需要经历闭合电弧→接触电阻焦耳热→分断电弧

→自然冷却过程,故材料的侵蚀是多过程、多变量和多物理场耦合的结果。如果要深入研究这些过程中电接触材料的具体行为,须采用实验和数值模拟相结合的思路和手段:首先在实验数据的基础上,建立一定的数学模型;其次采用数值分析方法(主要是有限元方法)进行求解和计算;最后,通过计算结果和实验结果比较并完善数学模型,从而了解新型银基电接触材料的侵蚀机理、电接触过程和控制因素。

参考文献:

- [1] WANG H T, WANG Z X, WANG L Z, et al. Effect of sintering temperature on the physical properties and electrical contact properties of doped AgSnO₂ contact materials[J]. International journal of minerals metallurgy and materials, 2018, 25(11): 1275-1285.
- [2] 王海涛, 章枚, 杨梦林, 等. SnO₂ 粒度对 AgSnO₂ 触头材料性能的影响[J]. 稀有金属与硬质合金, 2019, 47(4): 58-64.
WANG H T, ZHANG M, YANG M L, et al. Effect of SnO₂ particle size on properties of AgSnO₂ contact material[J]. Rare metals and cemented carbides, 2019, 47(4): 58-64.
- [3] ZHANG M, WANG X H, YANG X H, et al. Arc erosion behaviors of AgSnO₂ contact materials prepared with different SnO₂ particle sizes[J]. Transactions of nonferrous metals society of China, 2016, 26(3): 783-790.
- [4] 梁磊. 第二相粒度对 AgSnO₂ 电器触头材料性能影响的研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2017.
LIANG L. Research on effects of the second phase particle size on the properties of AgSnO₂ electrical contact materials[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2017.
- [5] 杨增超. 高能球磨热挤压制备 AgSnO₂ 电触头材料及性能研究[J]. 电工材料, 2017(2): 3-5.
YANG Z C. Properties of AgSnO₂ contact material prepared by high energy ball milling and hot extrusion[J]. Electrical engineering materials, 2017(2): 3-5.
- [6] 吴地, 李爱坤, 谢明, 等. 添加碳纳米管对 AgNi10 电接触材料组织和性能的影响[J]. 稀有金属, 2018, 42(9): 918-924.
WU D, LI A K, XIE M, et al. Microstructure and properties of AgNi10 electrical contact materials with carbon nanotubes[J]. Chinese journal of rare metals, 2018, 42(9): 918-924.
- [7] 王塞北, 谢明, 刘满门, 等. AgNi 电触头材料研究进展[J]. 稀有金属材料与工程, 2013, 42(9): 875-880.
WANG S B, XIE M, LIU M M, et al. Research progress of AgNi contact materials[J]. Rare materials and engineering, 2013, 42(9): 875-880.
- [8] LI H Y, XI Y, ZHU T, et al. Effect of Ni addition on the arc-erosion behavior of AgTiB₂ contact material[J]. Vacuum, 2019, 161: 361-370.
- [9] GUO X H, LI H Y, YANG X H, et al. Material transfer behavior of AgTiB₂ and AgSnO₂ electrical contact materials under different currents[J]. Materials & design, 2017, 114: 139-148.
- [10] ZHOU Y T, PANG S J, ZHANG C Z. On sliding interface contact in layered smart structures[J]. Applied mathematical modelling, 2019, 67: 135-150.
- [11] WU C P, YI D Q, LI N N, et al. Influence of fabrication technology on arc erosion of Ag/10SnO₂ electrical contact materials[J]. Journal of alloys and compounds, 2018, 766: 161-177.
- [12] WEI Z J, ZHANG L J, YANG H, et al. Effect of preparing method of ZnO powders on electrical arc erosion behavior of Ag/ZnO electrical contact material[J]. Journal of materials research, 2016, 31(4): 468-479.
- [13] 周晓龙, 熊爱虎, 刘满门, 等. AgSnO₂NiO 电触头材料电接触性能的研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2019, 48(9): 2885-2892.
ZHOU X L, XIONG A H, LIU M M, et al. Electrical contact properties of AgSnO₂NiO electrical contact material[J]. Rare metal materials and engineering, 2019, 48(9): 2885-2892.
- [14] 郑忠. AgSnO₂NiO 电触头材料的组织与性能研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2017.
ZHENG Z. Study of microstructure and properties of AgSnO₂NiO electrical contact materials[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2017.
- [15] 赵彩甜, 王景芹, 蔡亚楠, 等. 纳米 Ag/SnO₂Bi₂O₃ 触头材料的性能及导电机理研究[J]. 人工晶体学报, 2017, 46(12): 2432-2437.
ZHAO C T, WANG J Q, CAI Y N, et al. Study on properties and conductive mechanism of nano AgSnO₂/Bi₂O₃ contact materials [J]. Journal of synthetic crystals, 2017, 46(12): 2432-2437.
- [16] 王海涛, 梁磊, 文攀龙, 等. 添加 Bi₂O₃ 对 AgSnO₂ 触头物理及电接触性能的影响[J]. 贵金属, 2016, 37(4): 21-26.

- WANG H T, LIANG L, WEN P L, et al. Effect of adding Bi₂O₃ on physical and electrical contact properties of AgSnO₂ contacts [J]. *Precious metals*, 2016, 37(4): 21-26.
- [17] 吴新合. Ag/SnO₂-Bi₂O₃ 电接触材料批量工艺优化及电寿命研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
- WU X H. Research on the batch processes optimization and electrical life of Ag/SnO₂-Bi₂O₃ electrical contact material[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018.
- [18] 王松, 郑婷婷, 刘满门, 等. 掺杂微量 CuO 对 AgSnO₂ 电接触材料加工变形行为和耐电弧侵蚀性能的影响[J]. *稀有金属与硬质合金*, 2015, 43(5): 54-57.
- WANG S, ZHENG T T, LIU M M, et al. Influence of trace CuO doping on machining deformation behavior and arc erosion resistance of AgSnO₂ electrical contact material[J]. *Rare metals and cemented carbides*, 2015, 43(5): 54-57.
- [19] LI G J, CUI H J, CHEN J, et al. Formation and effects of CuO nanoparticles on Ag/SnO₂ electrical contact materials[J]. *Journal of alloys and compounds*, 2017, 696: 1228-1234.
- [20] SUN Z M. Progress in research and development on MAX phases: a family of layered ternary compounds[J]. *International material review*, 2011, 56: 143-166.
- [21] NGAI T L, ZHENG W, LI Y Y. Effect of sintering temperature on the preparation of Cu-Ti₃SiC₂ metal matrix composite[J]. *Progress in natural science: Materials international*, 2013, 23(1): 70-76.
- [22] HUANG Z Y, BONNEVILLE J, ZHAI H X, et al. Microstructural characterization and compression properties of TiC_{0.61}/Cu(Al) composite synthesized from Cu and Ti₃AlC₂ powders[J]. *Journal of alloys and compounds*, 2014, 602: 53-57.
- [23] ZHANG M, TIAN W B, ZHANG P G, et al. Microstructure and properties of Ag-Ti₃SiC₂ contact materials prepared by pressureless sintering[J]. *International journal of minerals metallurgy and materials*, 2018, 25(7): 810-816.
- [24] HUANG X C, FENG Y, GE J L, et al. Arc erosion mechanism of Ag-Ti₃SiC₂ material[J]. *Journal of alloys and compounds*, 2019, 23: 152741
- [25] ALANAZI F, GHOSH S, FUNNIGAN R, et al. Synthesis and tribological behavior of novel Ag- and Bi-based composites reinforced with Ti₃SiC₂[J]. *Wear*, 2017, 376/377: 1074-1083.
- [26] 刘满门, 崔浩, 赵君, 等. 塑性变形与退火对 Ag-Ti₃AlC₂ 复合材料性能的影响[J]. *贵金属*, 2018, 39(4): 46-52.
- LIU M M, CUI H, ZHAO J, et al. Influence of plastic deformation and annealing on properties of Ag-Ti₃AlC₂ composites[J]. *Precious metals*, 2018, 39(4): 46-52.
- [27] 丁健翔, 田无边, 汪丹丹, 等. Ag/Ti₂AlC 复合材料的电弧侵蚀及退化机理[J]. *金属学报*, 2019, 55(5): 627-637.
- DING J X, TIAN W B, WANG D D, et al. Arc erosion and degradation mechanism of Ag/Ti₂AlC composite[J]. *Acta metallurgica sinica*, 2019, 55(5): 627-637.
- [28] WEJRZANOWSKI T, GRYBCZUK M, CHMIELEWSKI M, et al. Thermal conductivity of metal-graphene composites[J]. *Materials & design*, 2016, 99: 163-173.
- [29] LIU J H, KHAN U, COLEMAN J, et al. Graphene oxide and graphene nanosheet reinforced aluminium matrix composites: powder synthesis and prepared composite characteristics[J]. *Materials & design*, 2016, 94: 87-94.
- [30] WANG S, ZHENG T T, XIE M, et al. Densification behavior of Ag-graphene composites prepared by low-pressure compressing and vacuum sintering[J]. *Rare metal materials and engineering*, 2019, 48(11): 3494.
- [31] 王松, 王塞北, 李爱坤, 等. 不同碳质相增强银基复合材料的电接触行为[J]. *贵金属*, 2018, 39(4): 39-45.
- WANG S, WANG S B, LI A K, et al. Electrical contact behaviors of silver-based composites reinforced with different carbonaceous phases[J]. *Precious metals*, 2018, 39(4): 39-45.
- [32] HAO X, WANG X H, ZHOU S M, et al. Microstructure and properties of silver matrix composites reinforced with Ag-doped graphene[J]. *Materials chemistry and physics*, 2018, 215: 327-331.
- [33] YANG Y P, PING Y J, GONG Y N, et al. Ag/graphene composite based on high-quality graphene with high electrical and mechanical properties[J]. *Progress in natural science: Materials international*, 2019, 29(4): 384-389.