

银基系列电接触复合材料的研发与应用

郑旭阳¹, 巫小飞¹, 龙小庆¹, 聂宝鑫¹, 谢明², 陈永泰², 王松²

(1. 贵研中希(上海)新材料科技有限公司, 上海 201603;

2. 贵研铂业股份有限公司 稀贵金属综合利用新技术国家重点实验室, 昆明 650106)

摘要: 银基电接触复合材料具有优异的电接触性能, 在低压电器、汽车电器和家用电器等行业有广泛的应用。从银基系列电接触复合材料的物理、力学、电学及加工性能等应用要求出发, 介绍了银基系列电接触复合材料的制备方法、种类、性能、特点及应用领域, 阐述了在已有的银基电接触材料中添加第三组元, 改善银基系列电接触复合材料性能的情况。同时介绍了 Ag-碳纳米管、Ag-导电陶瓷、Ag-石墨烯等新型银基电接触复合材料的性能、特点及应用领域。

关键词: 银基电接触复合材料; 制备方法; 性能; 特点; 应用

中图分类号: TB331, TG146.3⁺2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-0676(2018)S1-0066-06

Development and Application of Silver-based Series Electrical Contact Composites

ZHENG Xuyang¹, WU Xiaofei¹, LONG Xiaoqin¹, NIE Baoxin¹, XIE Ming², CHEN Yongtai², WANG Song²

(1. Guiyan Longsun (Shanghai) New Materials Technology Co. Ltd., Shanghai 201603, China;

2. State Key Laboratory of Advanced Technologies for Comprehensive Utilization of Platinum Metal, Sino-Platinum Metals Co. Ltd., Kunming 650106, China)

Abstract: Silver-based electrical contact composites are widely used in low-voltage electrical appliances, automotive electrical appliances and household appliances due to the excellent electrical conductivity, thermal conductivity, high specific heat, good machinability, and low and stable contact resistance in atmospheric environment. Based on the application requirements of physical, mechanical, electrical and processing properties of silver-based electrical contact composites, this paper introduces the preparation methods, types, properties, characteristics and application fields of silver-based electrical contact composites. In addition, the article describes the addition of a third component to existing silver-based electrical contact materials to improve the performance of silver-based series electrical contact composites. Meanwhile, the performance, characteristics and application fields of new silver-based electrical contact composites such as Ag-carbon nanotubes, Ag-conductive ceramics and Ag-graphene were described.

Key words: silver-based electrical contact composite; preparation method; properties; characteristics; application

银基系列电接触复合材料, 不仅化学稳定性高, 物理、力学及电学性能优良, 而且还具有独特的抗熔焊性、耐电弧烧损性、抗氧化性, 以及低成本等特点^[1], 是各类高低压开关、电器、仪器仪表、电子元器件的核心部件, 被广泛应用于现代工业领域

中的各种交直流接触器、断路器、继电器、转换开关等, 其性能的优劣直接决定整个电器产品的通断容量、使用寿命和运行可靠性等, 是现代国民经济和社会发展的重要支撑材料之一。随着科学技术和现代工业的发展, 电力、电子、电器、通讯、运输、

收稿日期: 2018-08-17

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB0305700)、国家自然科学基金项目(U1602275, U1602271, 51707087); 云南省重大科技专项(2018ZE011, 2018ZE012, 2018ZE022, 2018ZE026)、云南省应用基础研究计划项目(2018FB094, 2018FB088, 2017FB144)。

第一作者: 郑旭阳, 男, 高级工程师, 研究方向: 稀贵金属合金材料。E-mail: zxy@longsun.cc

能源、机电、航空、航天、军工等有关行业对银基系列电接触复合材料的需求越来越大，特别是清洁能源电器、开关触子、电工触头、集成电路桥架、大型高速涡轮发电机转子、高铁断路器、精密仪器仪表、机器人、无人机控制器件等新兴工业的发展，使贵金属系列电接触复合材料成为 21 世纪有色金属新材料领域发展的主导产业之一，美国、欧盟、俄罗斯、日本、韩国等世界工业发达国家纷纷把它列为高新技术产业给予支持和发展^[2]。

银基电接触复合材料主要包括三类：(1) 贵金属-陶瓷复合材料，如 AgWC、AgSnO₂、AgSnO₂In₂O₃、AgZnO、AgCuO、AgMgONiO、AgCuONiO 等；(2) 弥散强化复合材料，如 AgNi、AgC、AgW、AgMgONiO、AgCuONiO 等；(3) 双金属复合材料，如 Ag/TU1、Ag/H65、AgNi/TU1、AgSnO₂/TU1、AgCuNi/TU1、AgCu/4J29、AgNi10/QSn、AgPd/BZn、AgCe/QSn 等；复合材料可以加工成丝材、片材、铆钉、触头等元器件形状，满足接触器、开关、电位器、继电器、断路器等高中低不同应用负载条件

和配套器件规格尺寸的使用要求。

本文从银基系列电接触复合材料的物理、力学、电学及加工性能等应用要求出发，介绍了银基系列电接触复合材料的制备方法、种类、性能、特点及应用领域，阐述了在已有的银基电接触材料中添加第三组元，改善银基系列电接触复合材料性能的情况，并展望了银基电接触材料的发展趋势。

1 复合材料制备方法

银基电接触复合材料的制备方法主要有 4 类^[4]：1) 粉末冶金法；2) 合金内氧化法；3) 冷镦、轧制复合法；4) 特种焊接法。其主要工艺路线及特点如表 1 所列。其代表了银基电接触复合材料，包括铆钉、触头、复合带材等不同形状材料和元器件的加工方法，其主要应用于汽车电器、家用电器、低压电器、航空航天电器等的触点铆钉，微电机电刷和换向器片，开关、温控器、继电器、连接器、断路器等触头元件。

表 1 银基电接触材料制备工艺路线

Tab.1 Preparation process of silver based electrical contact materials

制备工艺	工艺路线	特点
粉末冶金法	Ag 或 Ag 合金雾化制粉→添加第三组元→混粉→冷等静压成型→真空或保护气氛烧结→挤压加工→表面处理→拉丝或轧制加工→热处理→性能检验→产品包装入库	可任意加入设计添加元素，复合粉体成分均匀，有利于成形烧结工序，易规模生产；雾化粉末形貌和粒度不好控制，混粉时间长，界面结合与润湿差，材料加工性能不好。适合于制备宽成分范围银基复合电接触材料。
合金内氧化法	Ag 合金熔炼→浇锭→挤压→丝或片→加压内氧化→拉丝或轧制→热处理→性能检验→产品包装入库	可获得超细、纳米级氧化物颗粒，氧化物粒子均匀弥散地分布在银基体中；材料密度高、组织性能均匀性、一致性好，电寿命得到改善；在材料中添加第三组元困难，对内氧化设备要求高。适合于制备氧化物颗粒增强银基复合电接触材料。
冷镦、轧制复合法	Ag 合金/铜或铜合金板→轧制复合→扩散退火→剪边→轧制→热处理→性能检验→产品包装入库	可获得二层或多层金属与金属复合材料；界面结合牢固，材料的组织性能均匀性、一致性好；电寿命得到改善；节约贵金属；对复合材料的加工设备要求高。适合于制备双金属银基复合材料。
特种焊接法	Ag 合金/铜或铜合金制备→表面处理→滚压焊或电子束焊→拉拔或轧制加工→性能检验→产品包装入库	可将具有不同特性的金属连续焊接在一起，焊接界面可靠，结合牢固，冲压后可直接使用；复合材料一致性好，可多层复合；对复合材料加工的设备要求高。适合于制备双金属异性复合材料。

2 电接触复合材料的种类和性能指标

银基电接触复合材料按其用途可分为电接点材料、电刷材料、换向片材料、接插件材料等；按其工作条件可分为：小功率(10 A)接触材料、中等功率(30 A)接触材料、大功率(<60 A)接触材料；按其

工作方式可分为：固定接触材料、通断接触材料、滑动接触材料、弹性接触材料^[5]。

银基电接触复合材料大量应用于中、小负荷的电器中，如各种开关、继电器、接触器、断路器等。由于它们的工作条件比较恶劣，其工作电压和电流大都在电弧极限电压或极限电流以上，因此，电接

触复合材料经常处于电弧的强烈热作用下,使材料容易熔化、气化,电弧侵蚀严重,要求电接触复合材料具有良好的导热性和导电性,抗电弧侵蚀和工

作寿命要长等。

银基电接触复合材料及复合带材的综合性能分别如表 2、表 3 所列^[6-9]。

表 2 银基电接触复合材料的物理、力学、电学性能

Tab.2 Physical, mechanical, and electrical properties of silver-based electrical contact composites

牌号	密度/(g/cm ³)	电阻率/ $\mu\Omega\cdot\text{cm}$	抗拉强度/MPa	HV	延伸率/%
AgSnO ₂ (10)	≥9.9	≤2.4	≥230	≥80	≥15
AgSnO ₂ (12)	≥9.8	≤2.5	≥240	≥90	≥11
AgSnO ₂ (15)	≥9.7	≤2.2	≥250	≥100	≥8
AgSnO ₂ (6)In ₂ O ₃ (4)	≥9.8	≤2.2	≥250	≥100	≥15
AgSnO ₂ (8)In ₂ O ₃ (4)	≥9.7	≤2.4	≥270	≥110	≥14
AgNi10	≥10.0	≤2.0	≥240	≥80	≥9
AgNi15	≥9.5	≤2.2	≥250	≥100	≥6
AgNi10RE1	≥10.0	≤2.1	≥250	≥90	≥7
AgNi15RE1	≥9.5	≤2.3	≥260	≥110	≥5
AgZnO(10)	9.5-9.7	≤2.2	≥250	≥80	≥14
AgC4	≥8.95	≤2.25	-	≥420	-
AgW50	≥13.15	≤2.9	-	≥1150	-
AgGNPs1	≥9.98	≤1.9	≥220	≥90	≥10

表 3 银基电接触复合带材的物理、力学、电学性能

Tab.3 physical, mechanical and electrical properties of silver based electrical contact composite strips

复合带材名称	复层厚度/ mm	复层宽度/ mm	电阻率/ ($\mu\Omega\cdot\text{cm}$)	抗拉强度/ MPa	HV		弹性模量/ GPa
					复层	基材	
Ag/TU1 面复合带材	0.05~0.5	3~8	1.88	340	93	112	-
Ag/H65 面复合带材	0.05~0.6	2~7	1.8	490	90	178	-
AgCe/TU1 嵌镶复合带材	0.05~0.8	2~8	1.77	350	80	110	-
AgCe/QSn 嵌镶复合带材	0.05~0.6	2~7	1.8	710	90	185	116.7
AgCe/H65 嵌镶复合带材	0.1~0.4	2~6	4.8	485	69	168	95.2
AgNi10/QSn 面复合带材	0.1~0.4	3~6	1.8	735	-	-	121
AgSnO ₂ /TU1 面复合带材	0.25~0.8	4~5	4.79	-	100	110	-
AgCuNi/QSn 面复合片材	0.05~0.08	5~10	7.6	640	90	360	81.34
AgCu/4J29 面复合片材	0.1~0.5	30~40	4.7	715	90	340	91.63
AgPd30/BZn 面复合带材	0.02~0.05	2~3	24.8	655	170	220	104
AgPd50/BZn 面复合带材	0.02~0.05	2~3	26.2	750	175	220	120

3 电接触复合材料的特点

1) AgSnO₂、AgZnO 复合材料。由于 SnO₂、ZnO 的分解温度 > 2000℃, 热稳定性较高, 在电弧的作用下不易分解和升华, 未分解的 SnO₂、ZnO 颗粒悬浮在银的熔池中增大了熔体的粘度, 阻止了银基体的飞溅, 减少了合金材料的电磨损, 有助于延

长材料的使用寿命。因此, AgSnO₂ 触头复合材料的电性能与 AgCdO 触头复合材料的相当, 且具有更优良的抗熔焊性和较低的电磨损^[10-13]。

2) AgNi 复合材料。在电弧的作用下, AgNi 复合材料不会产生纯银的熔池, Ni 颗粒钉扎在材料表面并形成 NiO, 不存在银基体的转移。Ni 颗粒通常以高度细小的弥散相沉淀分布在银基体中, 导致

合金材料的电弧侵蚀和烧损变得相当小。从而 Ag 基体中添加一定数量的 Ni 颗粒,可提高 Ag 的硬度、耐磨性、抗电弧烧损性等^[14]。

3) AgC 复合材料。该材料与电弧之间的作用机制是 C 与大气中的 O₂ 发生燃烧反应,在电弧产生的高温下石墨被燃烧、消耗,反应产物从材料中析出脱落。由于燃烧产物是一种有效的还原剂,使触头表面不会产生氧化膜,不发生熔焊,使材料的接触电阻低而稳定^[15]。

4) AgW、AgWC 复合材料。由高熔点、高硬度的 W、WC 骨架和高导电、导热的 Ag 构成的合金。在电弧的作用下,合金触头材料具有良好的耐电弧侵蚀性、抗熔焊性和高强度;此外,由于合金材料表面形成的氧化物不断脱落,从而使材料保持了稳定的接触电阻^[16]。

5) AgMgONiO 复合材料。含 Mg 和 Ni 在 0.5% 左右的银合金属于内氧化型合金。合金中的 Mg 原以固溶状态存在,但在空气或氧中加热时,由于氧原子可使 Mg 氧化成 MgO,并以高度分散的微粒状态弥散分布于银基体中,从而使合金显著强化,且其高强度可保持到高温(800℃)。内氧化后的合金不能进行塑性变形,所以须在制成接点零件后进行内氧化处理。在氧化前的退火状态下合金具有较好的加工性能。

6) Ag-Mg-Ni 合金。具有良好的弹性、导电性、导热性、耐腐蚀性;高温强度高、材料消耗和熔焊倾向小,因而广泛应用于制作航空微型继电器接点簧片及工作温度较高的弹性接触材料。

7) Ag/TU1、AgCe/TU1、AgLa/TU1、AgCe/QSn、AgCe/H₆₅ 复合材料。在电弧的作用下,AgCe、AgLa 合金中的金属间化合物 Ag₅Ce、Ag₅La 等首先分解为 Ag、Ce、La,消耗了电弧热,抑制

了触头材料的温升,具有一定的灭弧作用;同时,Ce、La 与 O₂ 形成表面氧化物强化相,提高了材料的抗金属转移性能,保护了银基体少受电弧的侵蚀,提高了材料的耐电弧烧蚀性和抗熔焊性能。

8) AgSnO₂In₂O₃/TU1 复合材料。In₂O₃ 的熔点为 900℃,比银的熔点低。在电弧的作用下,In₂O₃ 优先于银熔化、挥发,抑制了电工触头材料表面的温升,净化了触头表面,使材料的接触电阻低而稳定,从而提高了 AgSnO₂In₂O₃ 复合材料的电接触性能,且具有 AgSnO₂ 合金的特点^[17]。

9) AgCuNi/QSn 复合材料。该合金的组织由 Ag、Cu 和 Ni 构成,具有 AgCu 和 AgNi 合金的双重优点,从而可以获得抗熔焊性能优异,抗电侵蚀能力强,接触电阻稳定的电工触头材料。

10) AgPd/BZn 复合材料。Ag 与 Pd 在整个区间形成连续固溶体,当含 Pd 量超过 30%时,不仅能够提高银合金的硬度和机械性能,而且能够改善银的硫化倾向。含 Pd50%以上的银合金不产生硫化膜。AgPd 合金接触电阻稳定,材料消耗和金属转移较小,在电讯技术中,特别在电话继电器和转换开关的滑动接点中获得广泛应用。含 Pd50%的合金具有高的电阻率和低的电阻温度系数,适合于制作精密电位器绕组。

4 银基新型电接触复合材料

除了目前获得实用的上述电接触复合材料以外,贵研铂业股份有限公司、昆明贵金属研究所等单位新近开发的新型银基电接触复合材料主要有:Ag-碳纳米管(CNTs)、Ag-导电陶瓷(Ti₃AlC₂、Ti₃SiC₂)、Ag-石墨烯(GNPs)等,它们的技术性能指标和应用领域如表 4 所示^[18-23]。

表 4 银基新型电接触复合材料的技术性能指标及应用领域

Tab.4 Technical performance indicators and application fields of new silver based electrical contact composites

复合材料名称	熔点/℃	密度/ (g/cm ³)	电阻率/ (μΩ·cm)	抗拉强度/ MPa	HV	应用领域
AgCNTs1	960	9.94	2.08	258	66	<5 A 的继电器、开关、热保护器
AgNi10CNTs0.5	975	9.87	2.02	272	85	<20 A 的继电器、控制器、断路器
AgNi10CNTs0.75	980	9.78	2.14	293	90	<60 A 的接触器、断路器, 开关
AgTi ₃ AlC ₂ 1	995	9.70	2.16	230	96	<10 A 的继电器、开关、热保护器
AgTi ₃ AlC ₂ 1	998	10.20	2.05	220	95	<20 A 的继电器、控制器、断路器
AgGNPs1	960	10.20	2.01	240	92	<10 A 的接触器、断路器, 开关
AgGNPs2	960	9.70	2.25	255	98	<30 A 的继电器、开关、热保护器

5 银基新型电接触复合材料的特点

1) Ag-碳纳米管(CNTs)复合材料。碳纳米管(CNTs)具有独特的性能,如高强度、高导电、耐腐蚀、耐磨损、易变形等;采用一定的液相混合工艺可以使CNTs均匀地分布在Ag基体中,能够有效提高Ag的强度,CNTs在Ag基体中起到载荷传递和增强的效果;另外,Ag/CNTs的导电性比Ag-石墨好,复合材料导电、导热性比纯Ag稍差,是一类新型的电接触复合材料。采用化学镀镍CNTs与Ag粉高能球磨制备复合粉末,利用粉末冶金工艺技术,通过挤压的方法制备CNTs弥散分布的Ag-Ni-CNTs复合材料,具有导电性能好、耐电弧烧蚀和耐磨损等特点,可改善传统Ag-Ni材料的电接触性能^[24]。

2) Ag-导电陶瓷(Ti_3AlC_2 、 Ti_3SiC_2)复合材料:导电陶瓷(MAX)具有高导热、高电导、高温稳定性好、自润滑等特点,通过高能球磨、粉末冶金工艺技术制备的Ag- Ti_3AlC_2 、Ag- Ti_3SiC_2 复合材料,具有突出的力学、电学、抗熔焊、耐电弧侵蚀及加工性能。在Ag- Ti_3AlC_2 、 Ti_3SiC_2 复合材料中,第二相添加物,既作为增强相,承担增强基体、提高复合材料强度的作用,又作为固体润滑剂,发挥降低复合材料摩擦系数的功能,因此,导电陶瓷赋予银基电接触复合材料优异的电接触服役性能^[25]。

3) Ag-石墨烯(GNPs)复合材料:石墨烯具有独特的网状结构,其热导率、电导率均高于碳纳米管和石墨,同时,具有较高的抗拉强度和自润滑特性,是电接触复合材料理想的第二相添加物。采用机械合金化、冷等静压、真空烧结、正向热挤压等技术集成,制备出的新型银-石墨烯电接触复合材料,其中石墨烯体积的分数分别为1%、2%等,复合材料的耐电弧侵蚀和摩擦磨损性能,优于传统的AgC和AgSnO₂材料,是一类理想的新型电接触材料^[26-28]。

6 结语

触头服役环境(负载、密封、接触形式、温度)不同,对制备触头的材料性能要求不同,对其研究的重点也不同^[29-33]。针对银基系列电接触复合材料的研发与应用,笔者认为其研究重点和发展趋势主要应体现在以下几个方面。

1) 加强和完善银基电接触复合材料先进制备技术研发。银基电接触材料目前主要有粉末冶金法、

合金内氧化法、冷锻/轧制复合法和特种焊接法,但上述4种制备方法仍不完善,有其限定的使用范围。因此研发先进的银基电接触材料制备方法仍是该领域研究的热点,如加压内氧化法、冷喷射沉积法等。

2) 开展银基电接触复合材料物理冶金过程分析研究。触头服役过程中,将经历加热软化-熔化或汽化相变-熔池流动、喷溅-非平衡凝固等物理冶金阶段。与纯金属银均质材料相比,银基电接触复合材料因其成分、结构多元化使其上述阶段尤其复杂。因此,应重点研究电弧作用下触头表层冶金和相变过程。

3) 开展非对称配对触头材料的电弧特性研究。银基触头在使用时往往进行对称配对,如AgNi和AgSnO₂配对。在非对称配对使用条件下,触头的电弧特性是不同的。因此,应重点开展非对称配对触头的材料损耗特性、开关电弧特性和分断失效等问题研究。

4) 积极研发新品种银基电接触复合材料。随着低压电器行业对银基触头可靠性、稳定性、电寿命提出更严苛的现实要求,应积极研发银基电接触复合材料新品种以适应行业发展要求。可以预见,Ag-碳纳米管、Ag-导电陶瓷和Ag-石墨烯新型电接触复合材料将是未来银基电接触材料领域的研究热点和研究重点之一。

参考文献:

- [1] 宁远涛,赵怀志. 银[M]. 长沙:中南大学出版社,2005:147-150.
- [2] 易健宏,杨平,沈韬. 碳纳米管增强金属基复合材料电学性能研究进展[J]. 复合材料学报,2016,33(4):689-703.
- [3] 崔得锋. 我国电触头材料市场发展分析[J]. 电工材料,2016(2):24-25.
- [4] 王松,陈永泰,杨有才,等. AgSnO₂电接触材料的研究进展[J]. 贵金属,2013,34(S1):102-107.
- [5] 陈永泰,王松,谢明,等. 银基滑动电接触材料的研究进展[J]. 贵金属,2015,36(1):68-74.
- [6] 胡昌义,刘时杰. 贵金属新材料[M]. 长沙:中南大学出版社,2015:350-355.
- [7] 谢明,杨有才,陈永泰,等. 常用贵金属电接触材料及其应用[C]. 昆明贵金属研究所成立七十周年论文集,2008:177-189.

- [8] CHEN J H, CHEN S, LI M Y, et al. High speed imaging observation on molten bridge of AgSnO₂ electrical contact material[J]. Rare metal materials and engineering, 2017, 46(12): 3613-3620.
- [9] 王松, 付作鑫, 王塞北, 等. 银基电接触材料的研究现状与发展趋势[J]. 贵金属, 2013, 34(1): 79-83.
- [10] 王松, 陈家林, 郑婷婷, 等. 制备工艺对 AgSnO₂(12)电接触材料组织与性能的影响[J]. 贵金属, 2015, 36(4): 32-36.
- [11] JIANG Y, LIU S H, CHEN J L, et al. Preparation of rod-like SnO₂ powder and its application in Ag-SnO₂ electrical contact materials[J]. Materials research innovations, 2015, 19(S4): 152-156.
- [12] LIN Z, LIU S, SUN X, et al. The effects of citric acid on the synthesis and performance of silver-tin oxide electrical contact materials[J]. Journal of alloys and compounds, 2014, 588(9):30-35.
- [13] ZHANG L J, SHEN T, SHEN Q H, et al. Anti-arc erosion properties of Ag-La₂Sn₂O₇/SnO₂ contacts[J]. Rare metal materials and engineering, 2016, 45(7): 1664-1668.
- [14] WU C P, YI D Q, WENG W, et al. Arc erosion behavior of Ag/Ni electrical contact materials[J]. Materials and design, 2015, 85: 511-519.
- [15] 于冬, 赵正元, 刘炜. 一种银石墨触点材料静态接触电阻性能的试验研究[J]. 电工材料, 2018(4): 11-15.
- [16] NACHIKETA R, BERND K, TIMO M, et al. Effect of WC particle size and NSFC Ag volume fraction on electrical contact resistance and thermal conductivity of Ag-WC contact materials[J]. Materials and design, 2015, 85: 412-422.
- [17] 方文聪, 高伟. 银金属氧化物触点继电器电寿命的研究[J]. 电工材料, 2018(3): 8-13.
- [18] 李爱坤, 谢明, 王松, 等. 碳纳米管含量对 MWCNTs/Ag 复合材料组织和力学性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2016, 26(10): 2102-2109.
- [19] 王松, 谢明, 李爱坤, 等. 新型 Ag-CNTs 电接触材料的制备及其性能[J]. 有色金属科学与工程, 2015, 6(5): 40-44.
- [20] LIU M M, CHEN J L, CUI H, et al. Ag/Ti₃AlC₂ composites with high hardness, high strength and high conductivity[J]. Materials letters, 2018, 213: 269-273.
- [21] LIU M M, CHEN J L, CUI H, et al. Temperature-driven deintercalation and structure evolution of Ag/Ti₃AlC₂ composites[J]. Ceramics international, 2018, 44(15): 18129-18134.
- [22] ĆOSOVIĆ V, ĆOSOVIĆ A, TALIJANA N, et al. Improving dispersion of SnO₂ nanoparticles in Ag-SnO₂ electrical contact materials using template method[J]. Journal of alloys and compounds, 2013, 567: 33-39.
- [23] WANG S, WANG S B, LI A K, et al. Arc erosion behaviors of Ag-GNPs electrical contact materials fabricated with different graphene nanoplates content[J]. Journal of materials and applications, 2018, 7(1): 35-40.
- [24] PAL H, SHARMA V. Thermal conductivity of carbon nanotube-silver composite[J]. Transactions of nonferrous metals society of china, 2015, 25(1): 154-161.
- [25] 路金蓉. Ti₃SiC₂/Cu 复合材料的制备及真空触头应用基础研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2015.
- [26] 任芳, 朱光明, 任鹏刚, 等. 纳米石墨烯复合材料的制备及应用研究进展[J]. 复合材料学报, 2014, 31(2): 263-272.
- [27] 苏长泳, 黄林军, 王彦欣, 等. 石墨烯及 Ag/石墨烯纳米复合材料的原位合成[J]. 材料导报, 2015, 29(4): 55-59.
- [28] WANG S, XIE M, CHEN J L, et al. Fabrication and arc erosion behavior of Ag-GNPs as new electrical contact materials[J]. Precious metals, 2018, 39(3): 59-66.
- [29] 刘松涛, 思芳, 王俊勃, 等. 低银(Cu,La)复合掺杂 Ag/SnO₂ 材料的制备及抗熔焊性能分析[J]. 纺织高校基础科学学报, 2018, 31(1): 13-18.
- [30] 王耀东, 赵彦杰, 陈华江, 等. 内氧化型 Ag 基换向器合金材料耐磨性研究[J]. 微特电机, 2018, 46(4): 80-82.
- [31] 张国全, 巫小飞, 王剑平, 等. 内氧化型 AgCuONiO 电接触材料的组织与性能研究[J]. 贵金属, 2017, 38(2): 30-34.
- [32] 郑晓华, 杨芳儿, 张玲洁, 等. Ag/纳米 SnO₂ 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.
- [33] 朱艳彩, 王景芹, 安立强, 等. 添加稀土氧化物对 Ag/SnO₂ 电接触材料抗熔焊性能的影响[J]. 河北工业大学学报, 2014, 43(3): 16-20.