不同碳质相增强银基复合材料的电接触行为

王 松,王塞北,李爱坤,谢 明*,陈永泰,杨有才,方继恒,侯 攀 (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:采用粉末冶金工艺制备碳质相质量分数为 3%的不同碳质相(石墨、碳纳米管和石墨烯)增强 银基复合材料,并对其微观组织和物理性能进行表征。对复合材料触头进行直流阻性负载条件下的 电弧侵蚀试验,研究了不同碳质相对复合材料电弧特征、材料转移和质量净损耗的影响。结果表明, 银-碳纳米管复合材料具有最佳的致密度、硬度和抗拉强度;而银-石墨烯复合材料具有最好的导电 率。复合材料触头的材料转移方式均为阴极向阳极转移。同等电接触参数条件下,银-石墨烯复合材 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。 关键词:复合材料;银基;碳质相;电接触;材料转移;电弧特征 中图分类号:TG146.3 文献标识码:A 文章编号:1004-0676(2018)04-0039-07

Electrical Contact behaviors of Silver-based Composites Reinforced with Different Carbonaceous Phases

WANG Song, WANG Saibei, LI Aikun, XIE Ming^{*}, CHEN Yongtai, YANG Youcai, FANG Jiheng, HOU Pan (State Key Laboratory of Advanced Technologies for Comprehensive Utilization of Platinum Metals, Kunming Institute of Precious Metals, Kunming 650106, China)

Abstract: Silver-based composites reinforced with 3% graphite, carbon nanotube or graphene were fabricated by powder metallurgy process. Their microstructures and physical properties were characterized by SEM. The arc erosion of the composite contact materials was tested under DC resistance load, and the effects of different carbonaceous phases on arc characteristics, material transfer and net mass loss were investigated by various methods. The results indicate that the silver-carbon nanotube composite has the best relative density, hardness and tensile strength, and that the silver-graphene composite has the best electrical conductivity. The material transfer method of all composite contacts is a cathode-to-anode transfer. The silver-graphene composite has the best electrical contact performance: the shortest arcing time, the lowest arcing energy, and the least material transfer and net mass loss under the same electrical contact parameters.

Key words: composites; silver-based; carbonaceous phase; electrical contact; material transfer; arc characteristic

第二相颗粒增强银基复合电接触材料,通过添加弥散分布的第二相颗粒,既强化了银基体,又在 一定程度上增强了材料抗熔焊和耐电弧侵蚀的能力,使其成为研究和应用最广、性能优良的一类电 接触材料^[1-3]。目前,国内外研究开发并得到大批量 实际应用的第二相颗粒增强银基复合电接触材料主 要有 Ag-CdO、Ag-SnO₂、Ag-Ni、Ag-W、Ag-C、 Ag-ZnO 和 Ag-CuONiO 等体系^[4-7]。在电接触材料

收稿日期: 2018-04-11

基金项目:国家自然科学基金项目(51707087、51507075)、云南省应用基础研究项目(2018FB094、2018FD142、2016FB092)。

第一作者: 王 松, 男, 硕士, 工程师, 研究方向: 新型稀贵金属电接触材料。E-mail: fenmoyejin@qq.com

^{*}通讯作者:谢 明,男,博士,研究员,研究方向:稀贵金属粉末冶金材料。E-mail: powder@ipm.com.cn

服役过程中,电弧放电、电弧侵蚀和材料转移现象 与电接触材料本身的组分及微结构有很大关系,这 使得研究者注重开发新型增强体的银基复合电接触 材料^[8-10]。

相比传统的石墨,碳纳米管和石墨烯具有独特 的结构和优异的力学性能,同时还具有优良的导电 性和良好的热稳定性, 被认为是研发高性能、长寿 命碳质相增强银基电接触的理想增强体[11-13]。王娟 等^[14]在银-石墨电接触材料中添加碳纳米管强化相, 发现少量的碳纳米管可以起到提高电接触性能的积 极作用,改善材料的硬度和电接触电阻。李爱坤等 人[15]采用粉末冶金法制备了银-多壁碳纳米管电接 触材料,结果表明,碳纳米管体积分数为8%时复 合材料力学性能最佳,其抗拉强度达到 297 MPa、 硬度(HV)达到 80.1。由于碳纳米管在银基体中起到 载荷传递和增强作用,复合材料表现出明显的塑性 断裂特征。王松等[16]采用粉末冶金法制备了多层石 墨烯/银电接触复合材料,研究发现石墨烯含量为 0.5%的石墨烯/银复合材料具有最佳的导电率 (84.5% IACS),而石墨烯含量为1.5%的复合材料表 现出最优异的抗电弧侵蚀性能。

然而,将不同碳质相增强银基电接触材料进行

系统对比研究的文献并不多见。鉴于此,本文采用 相同的粉末冶金工艺制备了不同碳质相(石墨、碳纳 米管和石墨烯)增强银基复合材料,即银-石墨、银-碳纳米管和银-石墨烯复合材料,并对其微观组织和 物理性能进行表征,通过测量复合材料电弧特征、 材料转移和质量净损耗,对比研究不同碳质相增强 银基复合材料的电接触行为,以期为新型碳质相增 强银基电接触材料的研发提供理论参考。

1 实验

1.1 实验原料

实验所使用的粉末原材料如图 1 所示。雾化银 粉(图 1(a))形貌为近球形,粒径 30~40 μm。石墨(图 1(b))呈鳞片状,层片结构明显,平均粒径 40~100 μm,厚度 5~10 μm。碳纳米管(图 1(c))为细长管状, 管径 0.01~0.02 μm,管长 3~5 μm,部分交互缠绕。 石墨烯为薄片状,粒径 10~20 μm,厚度小于 5 nm, 表面具有多层皱叠。值得指出的是,上述 3 种碳质 相除形态差别外,其颗粒尺寸由大到小顺序为石墨、 石墨烯、碳纳米管。



 ⁽a). 银粉(Silver powders);
 (b). 石墨(Graphite);
 (c). 碳纳米管(Carbon nanotube);
 (d). 石墨烯(Graphene)
 图 1 原材料的微观组织
 Fig.1 Microstructures of the raw materials

1.2 复合材料制备

采用粉末冶金法制备碳质相含量为 3%的不同 碳质相(石墨、碳纳米管和石墨烯)增强银基复合材 料。具体工艺流程如下。

1) 球磨混粉:按上述成分配比称取碳质相粉末 和银粉置于通入高纯氩气的 HCX-20L 型犁铲式高 能球磨机中混粉制得复合粉末,球磨时间 10~24 h, 转速 300 r/min,球料质量比 10:1,磨球材质为 304 不锈钢。

 2) 复合粉末退火:复合粉末置于 OTF-1200X-Ⅲ-S 型管式真空炉中退火,退火温度 380~420℃, 退火时间2h, 真空度低于1×10⁻³ Pa。

3) 压制成形: 退火后的复合粉末置于双向压制 钢模中在 YT32-315A 型油压机上双向压制成形制 得成形坯,成形压力 150~200 MPa,保压时间 5 min。

4) 热等静压:成形坯置于 RDJ800-2000-200 型热等静压机上热等静压进一步致密化,加热温度 700~750℃,工作压力 50~100 MPa。

5) 热挤压:复合材料置于 YT32-315A 型油压 机上采用 45°锥形钢模挤压成丝材,挤压温度 780~820℃,挤压比为 40~50。部分丝材样品镦制为 铆钉状触点用于电接触试验,其尺寸规格为

⁻

 $\Phi 3.0 \times 0.7 / \Phi 1.5 \times 1.4 \text{ mm}_{\circ}$

1.3 复合材料性能表征

采用阿基米德排水法对烧结样品进行密度测试,以蒸馏水为介质,3 次独立测量后取平均值。 复合材料的理论密度根据混合规则计算,其中银为 10.53 g/cm³,石墨、碳纳米管和石墨烯均为 2.2 g/cm³。

用岛津 HMW-FA2 型显微硬度计测量复合材料 样品的维氏硬度,每个试样测量 3 次取其平均值。

用岛津 AG-X100KN 型的万能电子试验机测试 试样的室温力学性能,丝材切断成标距为 100 mm 拉伸试样,拉伸速度为2 mm/min,每个样品测试 3 次并取平均值为实验有效值。

采用 QJ44 型四探针电阻率测试仪测定样品的 电阻率并换算为国际退火铜标准导电率百分数。在 JF04C 型综合电性能测试设备上对复合材料铆钉触 头进行直流阻性负载电接触试验,电压 24 V,电流 15 A,触头间距 1.0 mm,闭合压力 0.868 N,接触 频率 60 次/min。

采用精度为1 mg的 EA-320A 型电子天平称量 铆钉触头的质量,取3 次测量结果的平均值。

采用 S-3400N 型扫描电子显微镜观察银-石墨 烯复合材料触头电接触试验后的表面形貌。

2 结果与讨论

2.1 复合材料的显微组织

图 2 所示为不同碳质相增强银基复合材料的显 微组织照片。



(a). 银-石墨(Ag-graphite); (b). 银-石墨烯(Ag-grahpene); (c). 银-碳纳米管(Ag-carbon nanotube)

图 2 复合材料的微观组织 Fig.2 Microstructures of the composites

由图 2 可知,碳质相的形态和尺寸对银基复合 材料的微观组织有显著影响。银-石墨复合材料基体 中(图 2(a)),石墨呈不规则形态点缀分布,其弥散 程度较差,存在大量石墨严重聚集区域。银-石墨烯 复合材料基体中(图 2(b)),石墨烯呈薄片状分布, 其弥散程度较石墨有所提高,只有局部区域可见石 墨烯聚集,且石墨烯的尺寸比石墨更细小。银-碳纳 米管复合材料基体中(图 2(a)),碳纳米管呈弯曲流 线形分布,未见碳纳米管聚集区域,与石墨、石墨 烯比较,其弥散程度最好,组织致密。

2.2 复合材料的物理性能

表1所列为不同碳质相增强银基复合材料的物 理性能。

由表1可知,在相同的制备工艺和相同的碳质 相含量条件下,不同碳质相增强银基复合材料的物 理性能差异较大。随着碳质相尺寸的减小,复合材 料的致密度、硬度和抗拉强度逐渐增大。银-碳纳米 管复合材料具有最佳的致密度(99.2%),最大的硬度

表1 复合材料的物理性能

Tab.1 Physical properties of the composites

类型	密度/	相对	<i>HV</i> _{0.1}	抗拉强度/	导电率/
	(g/cm^3)	密度/%		MPa	%IACS
银-石墨	10.02	97.5	49	175	63
银-碳纳米管	10.18	99.2	78	286	74
银-石墨烯	10.15	98.7	61	219	86

(*HV*_{0.1}为 78)和最高的抗拉强度(286 MPa)。银-石墨 烯复合材料具有最佳的导电率(86%IACS)。碳质相 尺寸的减小,增加了银颗粒与碳质相颗粒之间的接 触面积,促进烧结过程中烧结颈的形成和生长。同 时,细小的碳质相颗粒具有更大的表面能和更好烧 结能力,这有益于复合材料致密化,表现为银-碳纳 米管复合材料具有最佳的致密度。根据晶体强化机 制,降低强化相颗粒尺寸或改善强化相弥散程度, 能够进一步提高复合材料的机械性能^[17]。3 种不同 碳质相增强体中,碳纳米管具有最小的颗粒尺寸且 在银基体中的弥散分布程度最好,因此,银-碳纳米 管复合材料具有最大的硬度和最高的抗拉强度。银 基体中碳质相的强化效率(*R*)可用下式定量计算^[18]:

$$R = (\sigma_{\rm c} - \sigma_{\rm m}) / V_f \sigma_{\rm m} \tag{1}$$

式中σ_c为复合材料的抗拉强度,σ_m为银基体的 抗拉强度(108 MPa),V_f为碳质相的体积分数 (12.89%)。由上述方程计算可知,碳纳米管在银基 体中的强化效率(R)为12.79,远高于鳞片状石墨的 强化效率(4.81)和石墨烯的强化效率(7.97),表明在3 种碳质相增强体中碳纳米管对银基体具有最佳的强 化作用。

至于银-石墨烯复合材料具有最优异的导电率,除石墨烯增强体本身具有高导电率(10⁶ S/m),已有研究表明,金属-石墨烯复合材料组织中暗含额外电子传输路径的存在,即复合材料中的金属-石墨烯异质结构会通过产生强电场来形成导电石墨通道^[19]。



the composites after electrical contact test

由图 3 可知,随着电接触试验操作次数增加, 复合材料阳极触头不断增重而阴极触头不断减重, 材料转移量不断加大,材料转移方式均为阴极向阳 极转移,且银-石墨烯复合材料阳极触头的增重量和 阴极触头的减重量最低,表现出最佳的抗材料转移 能力。根据电弧转移的微观 PSD 模型和电弧侵蚀综 合模型可知,金属相电弧导致的材料转移是由阳极 向阴极转移,而气相电弧则导致材料由阴极向阳极 转移^[20]。从材料转移来看,碳质相增强银基复合材 料的电侵蚀机制为金属相电弧侵蚀。另外,触头材 料除阴极-阳极之间的转移外,还发生了质量的净损 耗(图 4),且随着操作次数的增加,触头质量净损耗 加剧。触头在电接触试验过程中,由于电弧能量的 热-电-力耦合作用,使触头接触表面局部熔化、汽 银-石墨烯复合材料具有高达 86%IACS 的导电率, 表明石墨烯的添加不会严重劣化银基体导电性能。

2.3 复合材料的电接触性能

复合材料触头受到电弧侵蚀时,由于阳极或阴极触头受到的电弧输入能量大小和热流密度不同会引发侵蚀的不同,通常不是阳极或阴极触头单方面 产生损耗,而是两个触点均有材料的蒸发和喷溅, 所以触头在通断电路过程中阳极、阴极触点间均有 材料的相互转移。图3所示为电接触试验后复合材 料阳极和阴极触头的质量变化;图4为电接触试验 后复合材料阳极和阴极触头的质量净损耗;图5为 不同碳质相增强银基复合材料的燃弧时间随操作次 数的变化曲线;图6为燃弧能量随操作次数的变化 曲线;图7为银-石墨烯复合材料阳极和阴极经过 10000次分断操作后触头表面形貌。



化,以蒸汽或微液滴形式喷溅离开触头本体,形成 触头质量的净损耗。银-石墨烯复合材料触头的质量 净损耗比银-石墨、银-碳纳米管复合材料低,经 10000次分断操作后,其数值仅为78 mg。

触头材料电弧侵蚀程度与阴阳极触头间的瞬时 燃弧能量成正比,而燃弧时间的长短对燃弧能量有 重要影响。减小触头燃弧时间,有利于降低燃弧能 量、减轻触头电侵蚀,进而提高触头稳定运行的电 寿命。由图 5 和图 6 可知,燃弧能量和燃弧时间随 操作次数的增加,其增减幅度变化不明显,但银-石墨烯复合材料触头的燃弧能量和燃弧时间均比银 -石墨、银-碳纳米管复合材料触头低,表明同等电 接触参数条件下,其电弧侵蚀较弱、耐电弧侵蚀能 力较强。



由图 7(a)可看到, 银-石墨烯复合材料阳极触头 表面大部分区域由近球状和叠层状凸起构成。在电 侵蚀过程中, 阴、阳极触头间往往会形成液桥, 且 在阴、阳极触头分离时会瞬间断裂、凝固, 在阳极 表面形成非均匀性突起,在液态银表面张力、重力 和电磁力的共同作用下,出现熔化金属的非均匀流 动,凝固后形成近球状和叠层状凸起的特殊结构。 文献[5]对Ag-Ni电接触材料触头的电侵蚀形貌特征 研究也报导了相似的特殊凸起结构,但其具体的形 成机制尚未探明。由图 7(b)可看到,银-石墨烯复合 材料阴极触头表面大部分区域由微气孔和疏松状结 构组成。微气孔主要是由于复合材料银基体熔化时 吸收了空气,其随后冷却凝固时析出空气形成气孔。 形成表层疏松结构的原因一方面是由于分断电弧的 反复热冲击作用使基体银蒸发损耗且在凝固过程中 液态银未及时补充造成的。另一方面是由于基体银 和强化相石墨烯的热膨胀系数相差较大,触头表面 在反复的液-固相变过程中,发生极不均匀的热膨胀 和冷却收缩,进而逐渐发展为表层组织疏松。

触头是直接承担接通和分断电路的元件,其质 量对电器的稳定、安全运行起关键性作用。随着电 器自动控制化、智能化水平不断提高,材料触头的 电寿命和可靠性愈发受到重视^[21-28]。鉴于此,各取 4 对银-石墨、银-碳纳米管和银-石墨烯复合材料触 头进行电寿命试验,同种材料触头配对组成触头对, 并以配对触头发生首次静熔焊时的操作次数定义为 电寿命。在上海爱科测试设备有限公司研制的 AC-SM 型接触材料电性能模拟试验机上进行复合 材料触头电寿命试验,试验参数为:直流阻性负载 24 V/15 A, 动作频率 30 次/min, 闭合力 0.6 N, 分 断力/0.2 N, 触头间距 1.0 mm, 环境温度 19~24℃。 表 2 列出了不同碳质相增强银基复合材料的电寿 命,可以看出,当其他条件一致时,增强相的结构 对银基复合材料的电寿命影响显著。银-石墨烯复合 材料具有最长的平均电寿命,其次数分别为银-石墨 复合材料的3.5倍和银-碳纳米管复合材料的2.2倍。 银-石墨烯复合材料平均电寿命最长的原因在于其 耐电弧侵蚀能力最强,具体表现为在电接触过程中

表 2 复合材料触头的电寿命

Tab.2 Electrical endurance of the composite contacts

触头	电寿命/次					
	第1对	第2对	第3对	第4对	平均值	
银-石墨	7901	8021	8328	7725	7994	
银-碳纳米管	13012	12708	11561	13578	12715	
银-石墨烯	28129	27881	28322	27576	27977	

3 结论

1) 采用球磨混粉、压制成形、热等静压和热挤 压的工艺流程成功制备出碳质相含量为 3%的银-石 墨、银-碳纳米管和银-石墨烯复合材料。银-碳纳米 管复合材料组织均匀性最好,且具有最佳的致密度、 最大的硬度和最高的抗拉强度,而银-石墨烯复合材 料具有最优异的导电率,达到 86%IACS。

2) 受金属相电弧侵蚀作用,碳质相增强银基复 合材料触头的材料转移方式均为阴极向阳极转移。 银-石墨烯复合材料触头材料转移量最小,抗材料转 移能力优异。经 DC 24V/15A 阻性负载 10000 次分 断操作后,其质量净损耗仅为 78 mg。

3) 电侵蚀后银-石墨烯复合材料阳极触头表面 大部分区域由近球状和叠层状凸起构成,阴阳极触 头表面大部分区域由微气孔和疏松状结构组成。同 等电接触条件下,银-石墨烯复合材料的燃弧时间最 短、燃弧能量最低,表明其耐电弧侵蚀能力最强, 有望在低压电器领域替代传统的银-石墨复合材料。

参考文献:

- KESIM M T, YU H, SUN Y, et al. Corrosion, oxidation, erosion and performance of Ag/W-based circuit breaker contacts: A review[J]. Corrosion science, 2018, 135: 12-34.
- [2] DING J, TIAN W B, ZHANG P, et al. Arc erosion behavior of Ag/Ti₃AlC₂ electrical contact materials[J]. Journal of alloys and compounds, 2018, 740: 669-676.
- [3] 胡洁琼,谢明,孙绍霞,等. Y₂O₃/Ag 复合材料界面微 观结构与性能研究[J]. 中国稀土学报, 2016, 34(5): 560-565.

HU J Q, XIE M, SUN S X, et al. Interface structure and properties of Y_2O_3/Ag composite[J]. Journal of the Chinese rare earth society, 2016, 34(5): 560-565.

- [4] 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.
- [5] WU C P, YI D Q, WENG W, et al. Arc erosion behavior of Ag/Ni electrical contact materials[J]. Materials & design, 2015, 85: 511-519.
- [6] LI H Y, WANG X H, LIU Y F, et al. Effect of strengthening phase on material transfer behavior of Ag-based contact materials under different voltages[J]. Vacuum, 2017, 135: 55-65.
- [7] FINDIK F, UZUN H. Microstructure, hardness and electrical properties of silver-based refractory contact materials[J]. Materials & design, 2003, 24(7): 489-492.
- [8] 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.
- [9] 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.
- WANG X H, YANG H, CHEN M, et al. Fabrication and arc erosion behaviors of AgTiB₂ contact materials[J].
 Powder technology, 2014, 256: 20-24.
- [11] JIANG P, LI F, WANG Y P, et al. Effect of different types of carbon on microstructure and arcing behavior of Ag/C contact materials[J]. IEEE transactions on components and packaging technologies, 2006, 29(2): 420-423.
- [12] 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.
 WANG S, XIE M, LI A K, et al. Preparation and performance of a new type of Ag-CNTs electrical contact material[J]. Nonferrous metals science and engineering, 2015, 6(5): 40-44.
- [13] 汪伟伟. 石墨烯/银基复合材料的制备及性能研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2014.
 WANG W W. Research on the preparation and properties of graphene/silver matrix composites[D]. Hefei: Hefei university of technology, 2014.
- [14] 王娟,凤仪,李庶,等. 碳纳米管增强银/石墨复合材料 电接触性能研究[J]. 润滑与密封, 2008, 33(4): 51-55.
 WANG J, FENG Y, LI S, et al. Study on electrical contact properties of CNTs/Ag/G composite[J]. Lubrication engineering, 2008, 33(4): 51-55.
- [15] 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.

LI A K, XIE M, WANG S, et al. Effect of MWCNTs content on microstructure and mechanical properties of MWCNTs/Ag composites[J]. The Chinese journal of nonferrous metals, 2016, 26(10): 2102-2109.

[16] 王松,王塞北,谢明,等.石墨烯含量对多层石墨烯/银 复合材料组织和性能的影响[J].贵金属,2016,37(2): 51-56.
WANG S, WANG S B, XIE M, et al. Effect of graphene content on microstructure and properties of multilayer

graphene/silver composite[J]. Precious metals, 2016, 37(2): 51-56.

- [17] LAN J, YANG Y, LI X C. Microstructure and microhardness of SiC nanoparticles reinforced magnesium composites fabricated by ultrasonic method[J]. Materials science and engineering A, 2004, 386(1): 284-290.
- [18] LI Z Q, FAN G L, JIANG L, et al. Nacre-inspired, strong and ductile CNT/Al composites fabricated by flake powder metallurgy[C]. The 19th international conference on composite materials, 2013.
- [19] YANG M, WENG L, ZHU H X, et al. Simultaneously enhancing the strength, ductility and conductivity of copper matrix composites with graphene nanoribbons[J]. Carbon, 2017, 118: 250-260.
- [20] 郭凤仪,陈忠华. 电接触理论及其应用技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2008: 86-92.
 GUO F Y, CHEN Z H. Electrical contact theory and application technology[M]. Beijing: China electric power Press, 2008: 86-92.
- [21] YANG X C, HUANG J, LI Z B, et al. The preceding voltage pulse and separation welding mechanism of electrical contacts[J]. IEEE transactions on components packaging and manufacturing technology, 2017, 6(6):846-853.
- [22] 陈会东. 高性能 Ag-SnO₂ 材料的制备及其电寿命研究
 [J]. 材料开发与应用, 2012, 27(3): 19-22.
 CHEN H D. Preparation of high performance Ag-SnO₂ material and the electric property research[J].

Development and application of materials, 2012, 27(3): 19-22.

[23] 李旭超, 郭凤仪. 银基触点材料的电寿命评估[J]. 应用 科技, 2003, 30(1): 4-6.

LI X C, GUO F Y. Estimating the electrical life of Ag-based contact material[J]. Applied science and technology, 2003, 30(1): 4-6.

- [24] 周晓龙,曹建春,陈敬超,等. 制备工艺对 AgCuO 电接触材料组织和电寿命的影响[J].贵金属,2005,26(3):25-29.
 ZHOU X L, CAO J C, CHEN J C, et al. Effects of preparation method on microstructure and electrical contact performance for AgCuO composites[J]. Precious metals, 2005, 26(3): 25-29.
- [25] 黄凯, 李志刚, 杨屹. 电磁式继电器电寿命试验系统的研究[J]. 河北工业大学学报, 2008, 37(2): 1-6.
 HUANG K, LI Z G, YANG Y. Study on the system of electromagnetic relay electric endurance test[J]. Journal of hebei university of technology, 2008, 37(2): 1-6.
- [26] 郭凤仪, 臧义, 刘丽英, 等. 用模糊综合评判理论预测 触头材料电寿命[J]. 煤炭学报, 2002, 27(3): 310-314.
 GUO F Y, ZHANG Y, LIU L Y, et al. Predicting the electrical life of contact material by fuzzy comprehensive judgement theory[J]. Journal of china coal society, 2002, 27(3): 310-314.
- [27] 李奎, 周聪哲, 黄少坡. 交流接触器电寿命试验装置研 究[J]. 电器与能效管理技术, 2017(1): 58-61.
 LI K, ZHOU C Z, HUANG S P. Research on electrical life test device of AC contactor [J]. Low voltage apparatus, 2017(1): 58-61.
- [28] 姚爱明, 廖瑞金, 李剑. 基于人工神经网络和电寿命判 据的真空断路器仿真[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2005, 28(6): 34-37.

YAO A M, LIAO R J, LI J. Vacuum circuit breaker's condition simulation based on artificial neural network and electrical endurance quality criterion[J]. Journal of chongqing university(natural science edition), 2005, 28(6): 34-37.