



Ni含量对AgNi电接触材料 性能和电弧特性的影响

李爱坤, 陈永泰, 胡洁琼, 王塞北, 陈松, 谢明

(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: AgNi触头是一种工业上应用最广泛的电接触材料。采用粉末冶金方法制备了不同Ni含量的AgNi电接触材料, 在直流阻性负载条件下(24 V, 20 A, DC)测试触点电弧侵蚀行为。利用扫描电子显微镜、力学性能测试以及电接触测试系统研究Ni含量对AgNi触头材料的微观组织、电弧侵蚀形貌、力学性能、电接触性能的影响, 揭示AgNi触头的电弧侵蚀机理。结果表明: Ni在Ag基体中呈纤维状弥散分布, 随着Ni含量增加AgNi材料的强度和电阻率都增大, 但塑性下降; 随着Ni含量增加, AgNi触点接触电阻显著增加, 抗熔焊性能下降。AgNi触点燃弧时间随Ni含量增加波动增大, 但平均燃弧时间和燃弧能量没有明显增大, AgNi30的最大燃弧能量随分断次数增加明显。除了AgNi10以外, AgNi触点材料转移方向为阳极向阴极转移, 转移量随Ni含量增加先增大后减小, 电弧侵蚀后触点形貌为阳极形成凹坑而阴极形成凸点, 且随着Ni含量增加, 凹坑和凸点大而集中。

关键词: AgNi电接触材料; 电弧侵蚀; 接触电阻; 燃弧时间; 材料转移

文章编号: 1004-0609(2022)-12-3746-12

中图分类号: TM501.3

文献标志码: A

引文格式: 李爱坤, 陈永泰, 胡洁琼, 等. Ni含量对AgNi电接触材料性能和电弧特性的影响[J]. 中国有色金属学报, 2022, 32(12): 3746-3757. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-42432

LI Ai-kun, CHEN Yong-tai, HU Jie-qiong, et al. Effect of Ni content on performance and arc behavior of AgNi electric contact material[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2022, 32(12): 3746-3757. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-42432

AgNi电接触材料由于Ag和Ni之间固溶度很小, 是一个典型的粉末冶金材料, 镍的加入有效提高了银基电接触材料的硬度、耐磨性和抗熔焊性能。AgNi电接触材料具有较高的强度及良好的导电性和导热性, 且其加工性能好、易焊接、制备成本低、直流条件下材料转移较少, 广泛应用于各类开关、温控器、继电器、接触器及微型断路器等领域^[1-3]。

触头在开启或闭合过程中在一定条件下会产生

电弧, 电弧作用在材料表面会引起触头表面烧蚀, 不断地重复开或关会造成触点表面成分或形貌发生严重变化, 从而直接对电器的寿命和稳定性造成影响。近些年, 围绕AgNi电接触材料的电弧侵蚀行为开展了很多相关研究, 一般认为, Ag基电接触材料的强化相的尺寸和形状对触点的性能具有一定的影响^[4-11]。BEHREN等^[12]研究了从亚微米到100 μm范围的Ni颗粒对AgNi电弧侵蚀的影响, 发现AgNi的电弧侵蚀与Ni颗粒尺寸并没有直接的关系,

基金项目: 云南省重大科技专项(202002AB080001-1, 202002AB080001-6, 2019ZE001-2); 科技人才与平台计划(202105AE160027); 国家自然科学基金资助项目(51767011); 云南省基础研究项目(2018FD142)

收稿日期: 2021-09-28; 修订日期: 2022-02-14

通信作者: 谢明, 教授级高级工程师, 博士; 电话13700669739; E-mail: powder@ipm.com.cn

AgNi的电弧侵蚀主要是由于电弧作用后熔池中Ni熔化和部分溶解在银中,在触点断开熔池凝固后Ni又重新沉淀析出,在接触面上建立了新的银镍熔体材料的平衡层。另外,研究表明Ni颗粒的分散和纤维化能够有效地减小电弧侵蚀,有利于提高AgNi电接触材料的使用寿命:LIN等^[13]报道了带状Ni的钉扎效应有利于降低触点质量损失;WANG等^[14]认为Ni的均匀弥散可以减少电弧冲蚀,但过量Ni增加了接触电阻,进一步加剧了电弧侵蚀;LUO等^[15]的研究表明,在Ag粒子周围细小Ni粒子的析出可以降低熔焊力,从而提高抗熔焊性;LI等^[16]利用球磨制备了Ni呈网状分布的Ag-8%Ni(质量分数)电接触材料,研究发现在电接触试验初期,阴极区域的网状Ni相抑制了熔池的膨胀,减少了电弧侵蚀。其次,添加物含量对Ag基电接触材料性能和电弧侵蚀特性具有重要的影响^[17-22]。YOSHIDA等^[23]研究发现,Ni含量对电弧持续时间和电弧能量没有明显影响,电弧电压的增加对闭合燃弧时间没有明显影响,但断弧、燃弧时间明显增加。目前,对AgNi电弧侵蚀机理并没有明确的、公认的理论,仍具有深入研究的价值。

此外,随着贵金属价格的不断上涨迫使电器设备制造商要求减少贵金属的用量,因此需要降低Ag的用量,积极开发高Ni含量的AgNi触头材料。然而,关于Ni含量对AgNi性能影响的研究报道甚少,尤其缺乏高Ni含量的AgNi电触头材料的电接触特性研究数据。因此,系统地研究Ni含量对AgNi触点性能的影响具有非常重要的应用价值。本文作者通过制备不同Ni含量的AgNi电触头,研究Ni含量对材料组织、性能以及电弧特性的影响,通过研究电弧特性参数、电弧侵蚀形貌演变,探讨了AgNi电弧侵蚀的机理。

1 实验

将纯Ag(纯度99.9%,粒径 $<74\mu\text{m}$)、羰基镍粉(纯度99.9%,粒径约 $2\sim 5\mu\text{m}$)按一定比例(Ni质量分数:10%,15%,20%,30%)在V型混料机中均匀混合,利用冷等静压200 MPa压制成型,在 N_2 保护气氛中 $850\text{ }^\circ\text{C}$ 烧结2 h,再经过热挤压(挤压比:

20:1)成 $\phi 6\text{mm}$ 的丝材,经过多道次拉拔成 $d 1.36\text{ mm}$ 的丝材,然后打制成铆钉,铆钉尺寸($d 3.0\text{ mm}\times 1.0\text{ mm}/d 1.5\text{ mm}\times 1.3\text{ mm}$)。采用阿基米德排水法测试AgNi试样的密度。采用Instron3369型万能力学试验机测试材料的拉伸强度,试样尺寸为 $120\text{ mm}\times d 1.36\text{ mm}$,标距100 mm。对试样进行显微硬度测试,条件为 $\text{HV}_{0.2}/15\text{ s}$,每个样品测试5个点。用日立S-3400N型扫描电镜以及FEI Helios Nanolab 600i双束电子显微镜观察材料的微观组织和分析触点的电弧侵蚀形貌。采用QZ-57电桥测试(精度 $10\ \mu\Omega$)AgNi丝材的电阻率,每个样品测量5次并取平均值。电接触实验采用昆明贵研金峰科技有限公司生产的电接触触点材料综合参数测试仪进行(型号:JF04C),实验条件如表1所列。

表1 电接触测试参数

Table 1 Parameters of electrical contact test

Parameter	Value
Circuit condition	DC 24 V, 20 A, resistive load
Operation number	10000
Contact force/cN	50
Frequency/Hz	2 (on 0.5 s)
Contact gap/mm	0.5
Surrounding gas	Air

2 结果与讨论

2.1 Ni含量对AgNi显微组织的影响

Ni在Ag基体中的固溶度为0.3%,当Ni含量高于0.3%(质量分数),AgNi合金为假合金。如图1所示为不同Ni含量的AgNi金相组织,灰色部分为Ag基体,深灰色颗粒状或纤维状的为Ni,从图1中可以看到Ni沿加工方向呈纤维状分布,随着Ni含量增加,纵截面Ni纤维体积分数增加但是Ni纤维并没有增长,Ni分布反而更加弥散,此外,Ag基体中存在少量的Ni颗粒聚集,随着Ni含量增加,Ni聚集程度并没有明显增加。弥散分布的Ni纤维对材料强度提升有积极的作用。

2.2 Ni含量对AgNi物理性能的影响

图2所示为AgNi电阻率、显微硬度随Ni含量的变化曲线。从曲线可以看出,电阻率和显微硬度

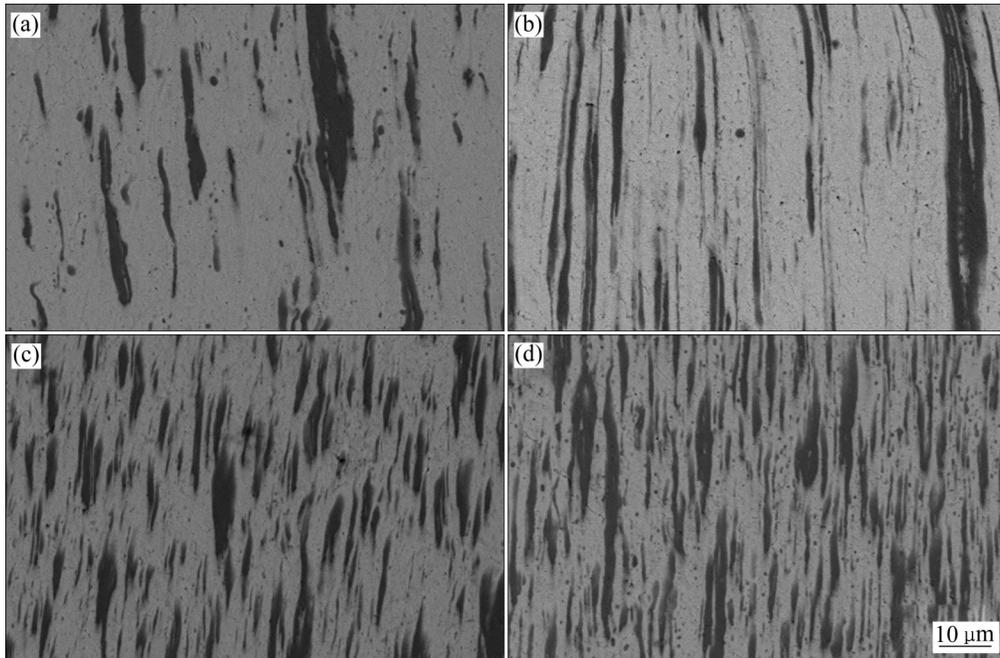


图1 不同Ni含量的AgNi丝材SEM像

Fig. 1 SEM images of AgNi with different Ni contents: (a) AgNi10; (b) AgNi15; (c) AgNi20; (d) AgNi30

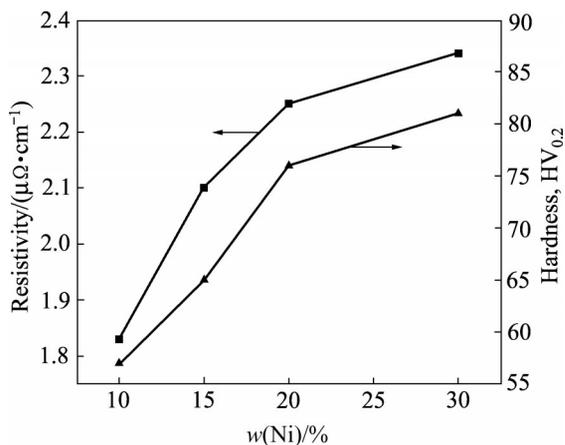


图2 不同Ni含量的AgNi电阻率和显微硬度变化曲线

Fig. 2 Resistivity and micro-hardness of AgNi with different Ni contents

变化曲线相近,随着Ni含量增加,电阻率和显微硬度先急剧增大后变缓慢增加,即呈抛物线趋势增大。由于Ag与Ni不能结合形成固溶体,是一种非均相合金,作为非均相合金,影响硬度和电阻率的主要因素是组成相的体积比和分散程度。由图1可知Ni相沿加工方向呈纤维状弥散分布,因此,材料硬度随Ni含量增加而增大。随着Ni含量的增加,第二相粒子体积分数增大,复合材料界面增多,加上基体银的晶粒尺寸减小、晶界增多,因此造成材

料对电子散射增强,导致材料的电阻率明显升高。表2所列为不同Ni含量的AgNi材料的物理性能,从表2中可以看出,制备的4组不同Ni含量的AgNi材料致密度都超过99%,因此,材料致密度对材料的性能影响可以忽略。从表2可以看出,抗拉强度和屈服强度随着Ni含量的增加而增大,但是相应地,伸长率随Ni含量的增加而减小,表明Ni含量的增加有效地提高了AgNi的强度,但是会降低AgNi材料的塑性变形能力。

2.3 Ni含量对AgNi触点电弧特性的影响

2.3.1 燃弧时间

图3所示为不同Ni含量的AgNi触点在直流阻性负载24 V/20 A分断10000次电弧作用过程中燃弧时间随分断次数变化图。从图3可以看到,不同Ni含量的燃弧时间平均值集中在10~15 ms,平均燃弧时间并没有随Ni含量增加有明显的增大。从图3(a)中可以看出,AgNi10电弧作用后燃弧时间较集中,在2000次分断之前燃弧时间比较稳定,随后燃弧时间略有下降,在6000~8000次分断期间燃弧时间有波动,全程中AgNi10的燃弧时间存在部分接近于0的短弧,在四组实验样品中其平均燃弧

表 2 不同 Ni 含量的 AgNi 材料物理性能

Table 2 Physical properties of AgNi materials with different Ni contents

Material	Relative density/%	Resistivity/ $(\mu\Omega\cdot\text{cm})$	Hardness, HV _{0.2}	Tensile strength/MPa	Elongation/%
AgNi10	99.5	1.83	57	216	28
AgNi15	99.2	2.10	65	234	24
AgNi20	99.1	2.25	76	268	21
AgNi30	99.2	2.34	81	282	17

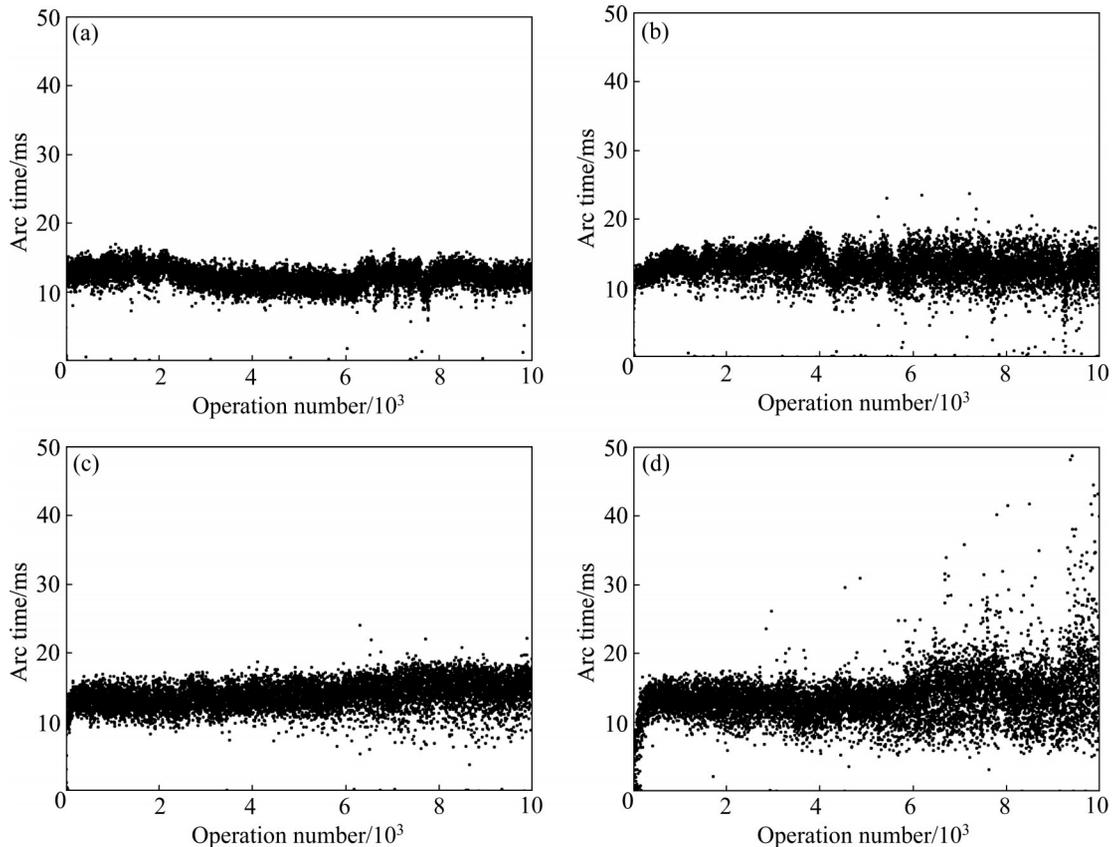


图 3 不同 Ni 含量的 AgNi 触点电弧作用下的燃弧时间随分断次数变化图

Fig. 3 Arc time versus operation number for AgNi contact materials with different Ni contents: (a) AgNi10; (b) AgNi15; (c) AgNi20; (d) AgNi30

时间最小。AgNi15 的燃弧时间随分断次数增加波动较大(见图 3(b)), 在 4000 次后出现较明显的燃弧时间接近于 0 的短弧。而 Ni 含量增加到 20% 时燃弧时间趋于稳定, 如图 3(c) 所示, 随着分断次数增加燃弧时间增大, 平均燃弧时间明显高于 Ni 含量为 10% 和 15% 的触点。而当 Ni 含量达到 30% 时, 在起始阶段有明显的燃弧时间随分断次数增加而逐渐增大的现象, 直到分断次数达到 300 次左右趋于稳定, 但是随着分断次数的不断增加, 燃弧时间波动越来越大, 尤其是在分断次数超过 7000 次以后燃弧时间波动非常明显。Ni 含量超过 15% 以后, 在

起始阶段燃弧时间有部分短弧, 燃弧时间随分断次数增加逐渐增大, 达到一定次数后趋于稳定, 但之后没有出现明显接近于 0 的短弧。

2.3.2 燃弧能量

图 4 所示为不同 Ni 含量的 AgNi 触点每 500 次测试取平均值和最大值的燃弧能量随分断次数变化的曲线。从图 4(a) 可以看出, 随着分断次数的增加平均燃弧能量除了 AgNi30 缓慢向上升高以外, 其他触点的平均燃弧能量随分断次数增加小幅波动。随着 Ni 含量的增加, 平均燃弧能量有所增大, 但增大程度并不明显。从图 4(b) 中最大燃弧能量曲

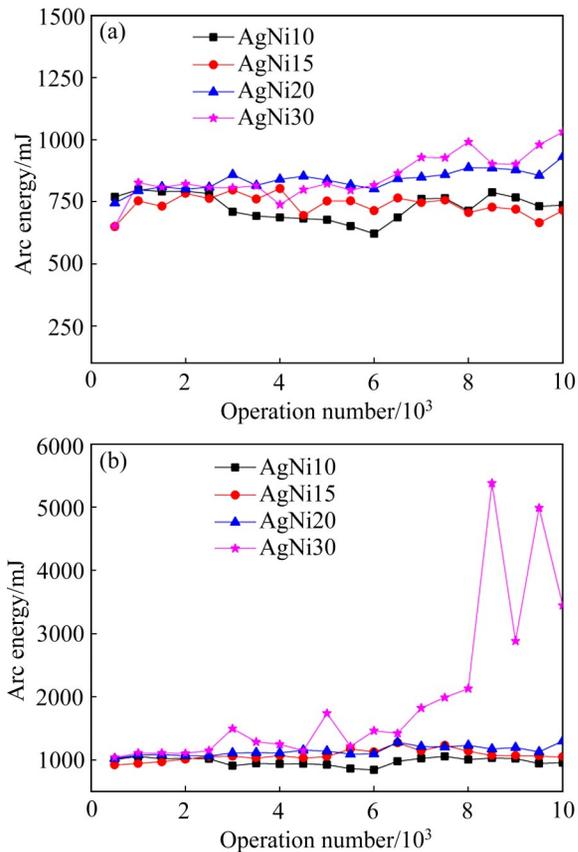


图4 不同Ni含量的AgNi触点平均燃弧能量和最大燃弧能量随分断次数变化曲线

Fig. 4 Average(a) and max(b) arc energy versus operation number for AgNi contact materials with different Ni contents

线中可以看出, AgNi30的燃弧能量显著差别于其他几组样品, 最大燃弧能量要明显高于其他, 且随着分断次数增加, 最大燃弧能量呈增大趋势, 与燃弧时间相似在分断次数超过7000次以后, 最大燃弧能量剧烈波动。而Ni含量为10%、15%、20%的最大燃弧能量接近且随分断次数的增加波动并不明显。燃弧的波动反映了触点在工作状态的可靠性, 波动越小电弧越稳定, 说明电弧侵蚀均匀发生; 而波动越大说明触点性能开始恶化, 直接影响触点的工作寿命。

2.3.3 接触电阻

图5所示为不同Ni含量的AgNi触点接触电阻随Ni含量的变化曲线。从图5可以看出, 平均接触电阻随Ni含量增加呈线性增大, 而最大接触电阻随Ni含量的增大呈抛物线向上显著增大, 最小接触电阻没有明显的差别。其中AgNi30的最大接触

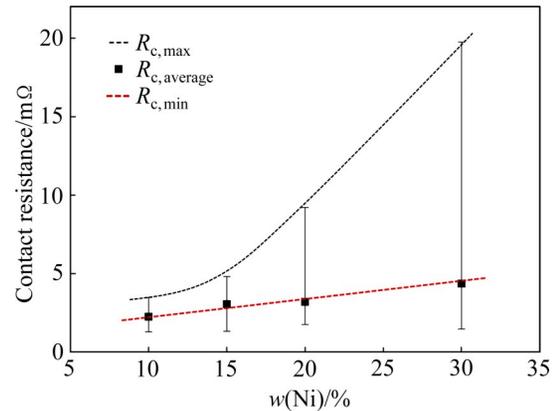


图5 不同Ni含量的AgNi触点电弧作用后接触电阻

Fig. 5 Contact resistances of AgNi contacts with different Ni contents

电阻为19.75 mΩ, 比AgNi10的最大接触电阻大近5倍。假设触点接触过程为塑性变形且有足够数量的接触斑点, 且界面是干净的, 则接触电阻可表示为^[1]:

$$R_c = \frac{\rho}{2} \sqrt{\frac{\pi H}{F}} \quad (1)$$

式中: R_c 为接触电阻; ρ 为材料的电阻率; F 为作用在触点上的接触力; H 为材料的显微硬度。初始阶段, 接触电阻的大小与材料硬度和电阻率成正比, 如表2所列, AgNi的电阻率和显微硬度随着Ni含量增加而增大, 因此接触电阻随Ni含量的增加而增大。而电弧作用后触点表面形貌和成分发生改变, 表面Ni的沉积和氧化会显著增大接触电阻, 因此, 随Ni含量增加, 触点的最大接触电阻显著增大。

2.3.4 抗熔焊性

图6所示为不同Ni含量的AgNi触点熔焊力累计频率图。从图6可以看到, 熔焊力累计频率为90%时, AgNi10的熔焊力最小为12 cN, 而AgNi30的熔焊力最大达到了50 cN, AgNi15和AgNi20则接近, 但是累计频率超过90%以后, AgNi20的熔焊力显著增大, 熔焊力随Ni含量的增加显著增大。当累计频率达到95%时, AgNi30的熔焊力为65 cN, 其值接近AgNi10的4倍。最大熔焊力也随Ni含量增加而增大, AgNi10最大熔焊力低于55 cN, AgNi15的最大熔焊力达到100 cN, 而AgNi20和AgNi30的最大熔焊力则高于120 cN。熔

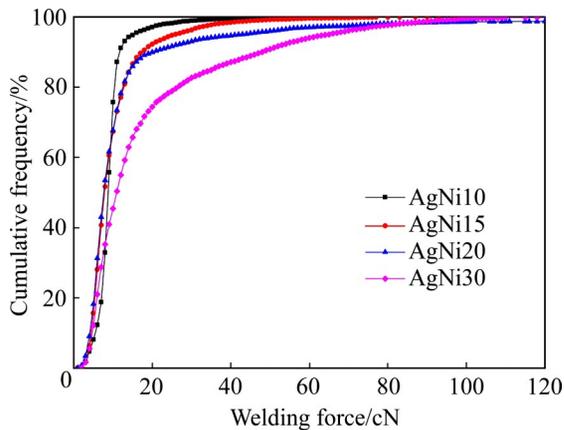


图 6 不同 Ni 含量的 AgNi 触点熔焊力频率分布曲线

Fig. 6 Cumulative welding frequencies according to welding force for AgNi contact materials with different Ni contents

焊力与材料的硬度和燃弧能量有密切关系^[1], 随着 Ni 含量增加, 材料的硬度增大, 尤其是 AgNi30 最大燃弧能量波动较大, 因此, 其抗熔焊性能下降。

2.4 Ni 含量对 AgNi 电弧侵蚀的影响

图 7 所示为不同 Ni 含量的 AgNi 触点在 24 V/20 A 直流负载分断 10000 次后的质量变化图。从图 7 可以看出, AgNi10 触点的材料转移方向与其他不同为阴极往阳极转移, Ni 含量超过 10% 以后材料转移方向变为阳极往阴极转移, 且 AgNi20 转移量最大(阴极质量增加 0.95 mg, 阳极质量减少 0.79 mg), 而 AgNi30 材料转移量比 AgNi20 显著减小, 分别为阴极质量增加 0.49 mg, 阳极质量减少 0.3

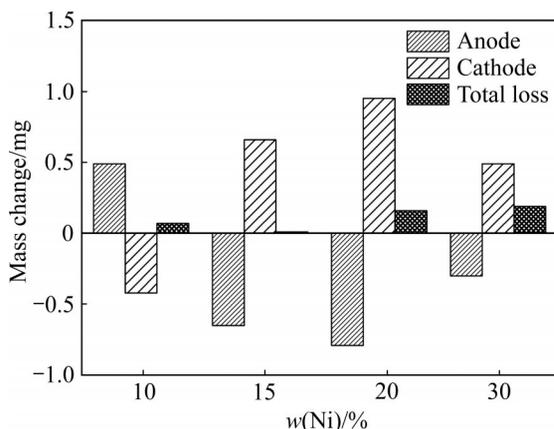


图 7 不同 Ni 含量的 AgNi 触点电弧侵蚀后质量变化

Fig. 7 Mass change of eroded anode and cathode for AgNi contacts with different Ni contents

mg。4 组样品的总质量损耗呈增加趋势, 说明 AgNi 触点受电弧热氧化后质量增加大于金属飞溅造成的质量损失。除 AgNi15 总质量基本不变以外, 随 Ni 含量增加, 总质量呈增加趋势, 其中 AgNi30 质量增加达到 0.19 mg。这主要是由于触点总质量的变化受金属的氧化以及金属飞溅的综合影响, 由图 4 可知 AgNi10 的燃弧能量低而稳定, 因此 AgNi10 触点发生均匀的腐蚀, 金属飞溅不明显, 最终触点总质量为 Ni 氧化后质量增加为主导。然而由图 3 和图 4 可知, AgNi15 的燃弧时间和燃弧能量比 AgNi10 大且波动更加明显, 导致金属的飞溅增大, 因此出现了 AgNi15 总质量增加比 AgNi10 少。然而, 随着 Ni 含量继续增大, 燃弧作用下的金属飞溅远小于 Ni 的氧化质量增加, 因此总质量随 Ni 含量增加而增大。

图 8 所示为不同 Ni 含量 AgNi 触点在 24 V/20 A 分断 10000 次后电弧侵蚀后的表面形貌图。其中, 图 8(a)、(b)、(c)和(d)所示为阳极触点, 图 8(a1)、(b1)、(c1)和(d1)所示为阴极触点。从图 8(a)和(a1)中可以看出, AgNi10 在电弧侵蚀后表面平整, 没有明显的尖凸和凹坑, 阳极表面有金属流动痕迹, 中心出现很少的孔洞, 阴极表面中心出现零散白斑, 外围接近触点边缘出现白色 Ag 飞溅后形成的沉积带。而从图 8(b)和(b1)中可以看出, AgNi15 的阳极表面电弧作用区域变小, 但是出现凹坑, 且孔洞比 AgNi10 明显增多, 与 AgNi10 类似, 阴极也出现部分白斑和沉积带, 但是作用区域比 AgNi10 有所减小。随着 Ni 含量的继续增加, 阳极表面的孔洞增多, 表面凹坑增大, 阴极的尖凸也更加明显。如图 8(c)所示, AgNi20 触点阳极中心出现较明显的腐蚀凹坑, 表面有明显的金属熔融后凝固痕迹, 熔化液滴较 AgNi15 更大, 而对应的阴极触头(见图 8(c1))中心出现不连续山峰状的凸起, 但是凸起比较分散, 喷溅形成的沉积带面积大小与 AgNi15 接近。当 Ni 含量达到 30% 时, 如图 8(d)所示, 阳极表面金属流动明显, 中心位置有明显的电弧作用形成的“火山坑”形貌, 而对应的阴极(见图 8(d1))位置有较大的凸起, 且凸起集中在中心位置。AgNi30 触点的阳极腐蚀区域并没有比含量低的 AgNi 扩大, 但是其阴极由于电弧作用金属喷溅

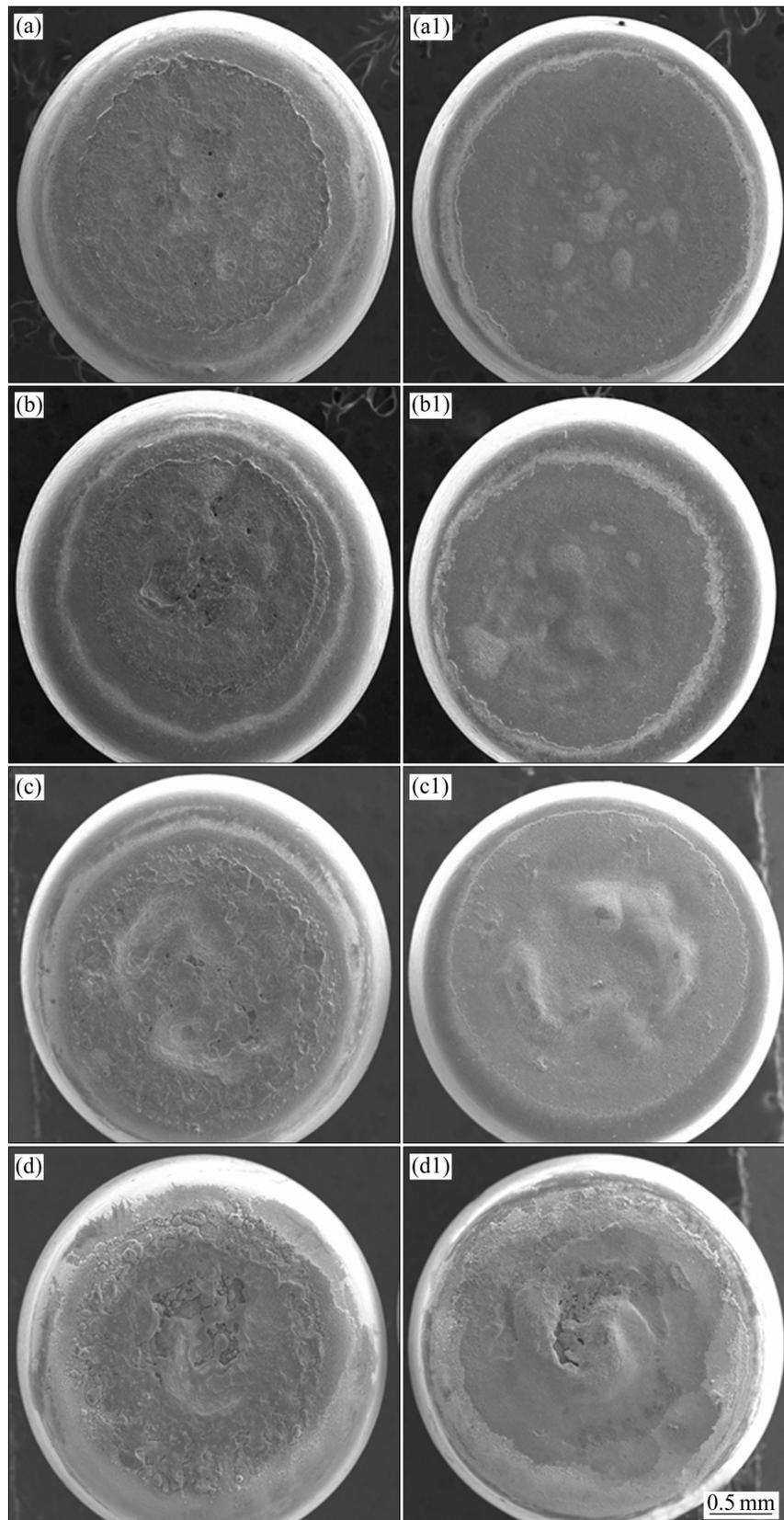


图8 不同Ni含量的AgNi电弧侵蚀后的触点表面形貌

Fig. 8 Erosion morphologies of eroded AgNi contacts with different Ni contents: (a) AgNi10, anode; (a1) AgNi10, cathode; (b) AgNi15, anode; (b1) AgNi15, cathode; (c) AgNi20, anode; (c1) AgNi20, cathode; (d) AgNi30, anode; (d1) AgNi30, cathode

的区域几乎覆盖了整个触点表面。

图 9 所示为不同 Ni 含量的 AgNi 触头分断 10000 次后阳极和阴极的纵截面 SEM 像。其中图 9(a)、(b)、(c)、(d) 所示为阳极腐蚀形貌, 图 9(a1)、(b1)、(c1)、(d1) 所示为阴极腐蚀形貌。从图 9(a) 中可以看出, AgNi10 的表面有凸起的 Ag 层, 同时出现了很小的腐蚀坑(如图 9(a) 箭头所示)。而随着 Ni 含量增加, 阳极触点腐蚀坑越来越大。AgNi15 的触点阳极电弧侵蚀后腐蚀区域和腐蚀深度比 AgNi10 显著增大, AgNi20 的腐蚀坑呈狭长型, 而 AgNi30 的腐蚀区域集中且腐蚀深度较大。相对应的, AgNi10 阴极表面出现腐蚀坑, 随着 Ni 含量增加, 阴极触点表面出现显著地凸起, 且凸起的面积大小基本与阳极的腐蚀坑大小一致。AgNi30 的阴极凸起非常集中, 且凸起部分有明显的裂纹。对比发现 AgNi20 的腐蚀区域最大, 但腐蚀区域分散, 而 AgNi30 的腐蚀坑深度最大, 腐蚀体积并不继续增大, 该结果与图 7 的材料转移结果一致。虽然 AgNi30 腐蚀体积不大但是触点发生的集中腐蚀对触点电寿命影响更大。

图 10 所示为 AgNi10 和 AgNi30 电弧侵蚀后触点纵截面放大后的 SEM 像。表 3 所列为图 10(b) 对应位置的 EDS 分析结果。从图 10(a) 和 (b) 中可以看出, AgNi10 和 AgNi30 触点阳极都有一定深度的腐

蚀区域。如图 10(a) 所示, AgNi10 触点的阳极 Ni 富集不严重, 除了表层出现部分不连续的富 Ni 层, 腐蚀区域 Ni 相对基体中的 Ni 出现一定聚集但是比较弥散, 同时腐蚀坑内也出现少量的孔洞等缺陷。而图 10(b) 所示的 AgNi30 触点的阳极腐蚀坑内 Ni 聚集较严重, 表层出现较明显的连续分布的 Ni 富集带, 从表 3 对应的 EDS 可知, 位置 1、2 和 5 的 Ni 含量超过了 60%, 在腐蚀坑内接近基体层也出现富 Ag 区(见图 10(b) 位置 3) 以及 Ag、Ni 混合区(见图 10(b) 位置 4), 同时也存在孔洞等缺陷。AgNi10 和 AgNi30 触点对应的阴极也表现出完全不一样的形貌。如图 10(c) 所示, AgNi10 触点的阴极没有明显腐蚀层, 而从图 10(d) 可以看出 AgNi30 银基触头表面有明显从阳极转移而来的 Ag 和 Ni 的沉积层, 沉积层是大量分断次数后材料发生转移不断累计堆叠而成, 越靠近基体可以看出明显的带状分布区域, 不同的带状主要由成分差异引起。

2.5 AgNi 电弧侵蚀机理分析

在电弧放电等离子体的热应力作用下触点表面微观熔池内的液态金属传热、流动及液滴溅射等直接决定了熔池凝固后腐蚀坑的形状、尺寸、温度分布以及燃弧后触点表面侵蚀情况。一方面, 触点阳极和阴极的表面侵蚀与弧根的运动行为有关^[23-24]。

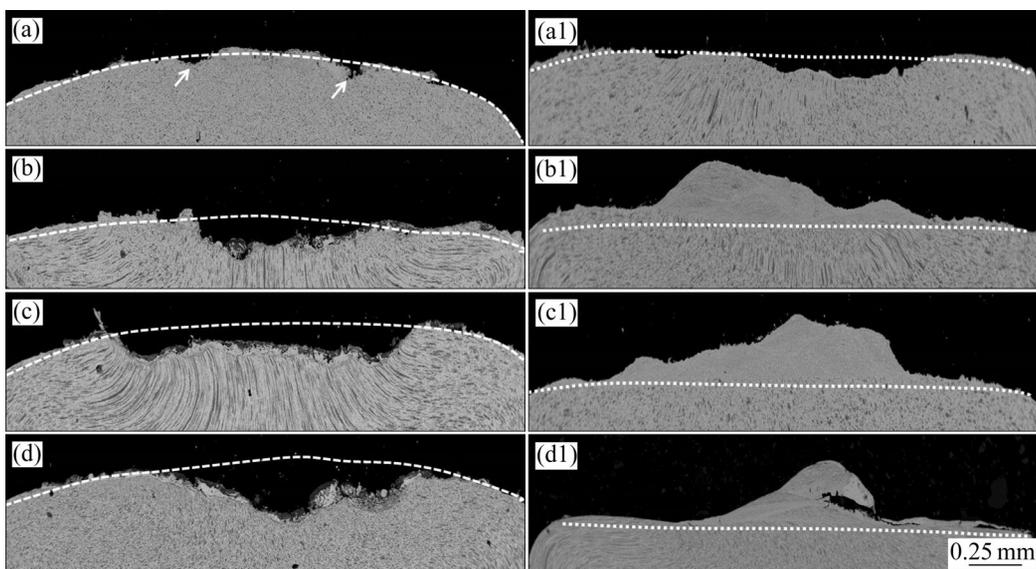


图 9 不同 Ni 含量的 AgNi 电弧侵蚀后阳极和阴极触点纵截面形貌

Fig. 9 Cross-sectional morphologies of eroded AgNi anode and cathode contacts with different Ni contents: (a) AgNi10, anode; (a1) AgNi10, cathode; (b) AgNi15, anode; (b1) AgNi15, cathode; (c) AgNi20, anode; (c1) AgNi20, cathode; (d) AgNi30, anode; (d1) AgNi30, cathode

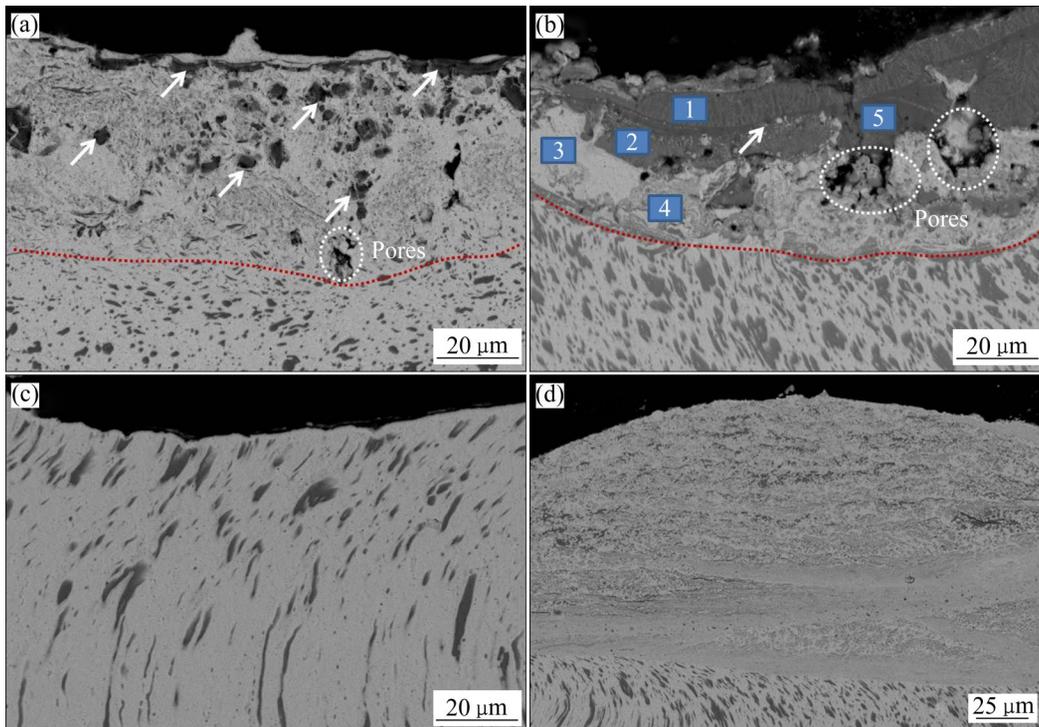


图10 AgNi10和AgNi30电弧侵蚀后触点纵截面形貌

Fig. 10 Cross-sectional morphologies of eroded AgNi10 and AgNi30 contacts: (a) AgNi10, anode; (b) AgNi10, cathode; (c) AgNi30, anode; (d) AgNi30, cathode

表3 图10中对应位置的EDS结果

Table 3 EDS result of marked positions in Fig. 10

Element	Mass fraction/%				
	Position 1	Position 2	Position 3	Position 4	Position 5
O	15.23	14.02	—	04.64	15.91
Ag	04.79	19.43	98.62	85.43	02.32
Ni	79.98	66.54	1.38	09.93	81.77

由于阴极的弧根快速连续移动，而阳极的弧根则是在某一点上保持不动或不连续移动。因此，触点阴极表面电弧侵蚀较浅，而阳极弧根不动的地方容易形成较大的熔池，侵蚀表面不均匀，易形成多坑结构或液滴重叠分布结构。但是，随着Ni含量增加，在电磁场作用下由于表面聚集大量的Ni使得分散的电弧相互吸引聚集成质量和能量高度集中的弧根，在阳极会形成较大的侵蚀坑，这使得Ni含量高的材料损耗增大，接触表面形貌更差。另一方面，电弧侵蚀后材料转移以及金属的飞溅和流动也是造成侵蚀面形貌变化的主要原因。根据物质转移理论^[25]，受电场影响，阴极发射的电子在触点间与金属蒸气碰撞产生金属离子，金属离子 Ag^+ 、 Ni^{2+}

从阳极往阴极转移。燃弧开始阶段以金属相弧为主，阳极表面可以在较短时间内熔化形成熔池，Ag和Ni一部分电离后转移至阴极表面，一部分由于Ag熔点低，相较于Ni更容易发生喷溅，喷溅的金属沉积在阴极外沿，而Ni则在阳极表面流动，直至凝固铺展在触点表面。随着燃弧持续，周围的气体将进入电弧，此时气相弧起主导作用，当气体离子获得能量到达阴极时，开始腐蚀阴极材料。阴极电弧弧根移动很快，表面的Ag、Ni快速气化，一部分飞溅至阴极周围，一部分转移至阳极表面。Ni含量增加，随着分断次数的不断累加，阳极表面的Ni富集加剧，由于Ni的功函数(4.61 eV)高于Ag的功函数(4.26 eV)，表面Ni含量的增加增强了表面

功函数,导致发射电流减小,平均燃弧能量没有随Ni含量的增加明显增大。当Ni含量较低时,表面Ni富集不严重,气相弧均匀腐蚀阴极,材料转移为阴极往阳极转移,触点表面没有明显的凹坑和凸点形成。而当AgNi中Ni含量高于10%后,由于阳极表面Ni的富集导致阳极弧根集中,阳极质量减少,阴极质量增加,材料转移为阳极往阴极转移,且由于阳极集中腐蚀,阳极触点表面形成明显的凹坑,相应地在阴极表面由于材料转移堆叠形成明显的凸点,Ni含量越高,阳极凹坑和阴极凸点越明显。一般转移的元素主要为Ag及部分溶解于Ag的Ni,随着AgNi触点Ni含量增加,基体中含有的Ag相应地减小,导致材料转移量有所减少。由于Ni容易氧化形成NiO,而氧化的质量增加大于飞溅引起材料的质量损失,因此触点整体表现为总质量增加。

3 结论

1) 随着Ni含量增加,AgNi电接触材料的电阻率、显微硬度、抗拉强度显著地升高。

2) 随着Ni含量增加,AgNi触点的燃弧时间波动增大;平均燃弧能量和平均燃弧时间随Ni含量增加并没有明显增加,但是接触电阻和熔焊力明显增大。

3) 在24 V, 20 A直流阻性负载下,AgNi10材料转移为阴极往阳极转移,当Ni含量超过10%后,材料转移为阳极往阴极转移,转移量随Ni含量增加先增大后减小。随着Ni含量增加,AgNi触点阳极形成凹坑和阴极形成凸点的趋势越来越明显,且凹坑和凸点大而集中。

4) AgNi30燃弧时间和燃弧能量随分断次数的增加波动显著增大,其阳极触点电弧侵蚀后腐蚀坑内Ni聚集严重,出现较明显连续分布的Ni富集带,且腐蚀凹坑深度最大。

REFERENCES

- [1] SLADE P G. Electrical contacts-principles and applications[M]. Boca Raton: CRC Press, 2014: 939-940.
- [2] 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(4): 875-880.
- [3] 周建仁,陈松,毕亚男,等. 银基电接触材料的最新研究进展和展望[J]. 贵金属, 2020, 41(S1): 1-16.
- [4] JIANG Peng, LI Feng, WANG Ya-ping. 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.
- [5] RAY N, KEMPF B, MUTZEL T, et al. Effect of WC particle size and Ag volume fraction on electrical contact resistance and thermal conductivity of Ag - WC contact materials[J]. Materials and Design, 2015, 85: 412-422.
- [6] 陶麒麟,周晓龙,周允红,等. AgCuO电接触材料的电接触性能[J]. 中国有色金属学报, 2015, 25(5): 1244-1249.
- [7] LI Ai-kun, ZHOU Wen-yan, XIE Ming, et al. Preparation and arc erosion behavior of AgNi10 contact material with different allotropes of carbon addition[J]. Diamond & Related Materials, 2021, 111: 108141.
- [8] CHEN Peng-yu, KENEL C, WANG Ya-ping, et al. SnO₂-Ag composites with high thermal cycling stability created by Ag infiltration of 3D ink-extruded SnO₂ microlattices[J]. Applied Materials Today, 2020, 21: 100794.
- [9] ZHANG Miao, WANG Xian-hui, YANG Xiao-hong, 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: 783-790.
- [10] 易磊. 复合电接触材料第二相颗粒大小及区域分布评价方法[J]. 机电元件, 2017, 37(6): 33-37.
- [11] 徐国富,黄润章,元梦,等. 操作次数对Ag/ZnO电触头电弧侵蚀行为的影响[J]. 中国有色金属学报, 2021, 31(5): 1285-1298.

- Ag/ZnO electrical contact materials[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2021, 31(5): 1285–1298.
- [12] BEHRENS V, MICHAL R, MINGKENBERG J, et al. Erosion mechanisms of different Ag/Ni 90/10 materials[C]. *Proc 14th Int'l Conference on Electrical Contacts*, 1988: 417–422.
- [13] 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: 163–171.
- [14] WANG Heng, YUAN Huan. 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.
- [15] LUO Qun-fang, WANG Ya-ping, DING Bing-jun. Microstructure and arc erosion characteristics of Ag/Ni contacts by mechanical alloying[J]. *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, 2005, 28(4): 785–788.
- [16] LI Hang-yu, WANG Xian-hui, HU Zhu-dong, et al. Investigation on arc behavior of AgNi electrical contact material with three-dimensional network structure[J]. *Vacuum*, 2020, 175: 109290.
- [17] WANG Jun, LI Dong-mei, WANG Ya-ping. Microstructure and properties of Ag-SnO₂ materials with high SnO₂ content[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2014, 582: 1–5.
- [18] FINDIK F, UZUN H. Microstructure, hardness and electrical properties of silver-based refractory contact materials[J]. *Materials and Design*, 2003, 24: 489–492.
- [19] 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 Ai-kun, XIE Ming, WANG Song, 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.
- [20] WANG Jun, KANG Yong-qiang, WANG Chen, et al. Resistance to arc erosion characteristics of CuO skeleton-reinforced Ag-CuO contact materials[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, 756: 202–207.
- [21] 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.
- [22] YOSHIDA K, SAWA K, SUZUKI K, et al. Influence of nickel content on various characteristics of AgNi contacts for electromagnetic contactors[C]. *2014 IEEE 60th Holm Conference on Electrical Contacts (Holm)*. New Orleans: IEEE, 2014: 261–265.
- [23] YOSHIDA K, SAWA K, SUZUKI K, et al. Influence of voltage on arc characteristics and electrode mass change of AgNi contacts for electromagnetic contactors[J]. *IEICE Transactions on Electronics*, 2011, 94(9): 1395–1401.
- [24] SWINGLE J. Performance and arcing characteristics of Ag/Ni contact materials under DC resistive load conditions[J]. *IET Science, Measurement and Technology*, 2011, 5: 37–45.
- [25] CHEN Z, SAWA K. Effect of arc behavior on material transfer: A review[J]. *IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology Part A*, 1998, 21: 310–322.

Effect of Ni content on performance and arc behavior of AgNi electric contact material

LI Ai-kun, CHEN Yong-tai, HU Jie-qiong, WANG Sai-bei, CHEN Song, XIE Ming

(State Key Laboratory of Advanced Technologies for Comprehensive Utilization of Platinum Metals,
Kunming Institute of Precious Metals, Kunming 650106, China)

Abstract: AgNi contacts are the most widely used electric contact materials. AgNi electric contact materials with different Ni contents were fabricated using powder metallurgy method, and the arc erosion behavior of the contacts was tested under a DC resistive load (24 V, 20 A, DC). The effects of Ni content on the microstructure, arc erosion morphology, mechanical performance, and electrical contact performance were systematically studied by SEM, mechanical property testing, and electrical contact test system. The arc erosion mechanism was discussed. The results show that Ni disperses in the Ag substrate as fibers. With the increase of Ni content, the AgNi materials show an increasing strength and electrical resistivity while a decreasing plasticity. The contact resistance increases significantly and the welding resistance decline for the AgNi contacts. Fluctuation of the arc time increases with increasing the Ni content, while the average arc time and arc energy show no obvious increment. The maximum arc energy of AgNi30 increases obviously along with the operation number. Except for the AgNi10, material transfers from the anode to the cathode, with the mass change first increases then decreases when the Ni content increases. A pit on the anode surface and a bump on the cathode surface are formed after erosion. The pit and bump become larger and more lumped with increasing the Ni content.

Key words: AgNi electric contact material; arc erosion; contact resistance; arc time; material transfer

Foundation item: Projects(202002AB080001-1, 202002AB080001-6, 2019ZE001-2) supported by Major Projects of Yunnan Province, China; Project(202105AE160027) supported by the Science and Technology Talent and Platform Program, China; Project(51767011) was supported by the National Natural Science Foundation of China; Project(2018FD142) supported by the Natural Science Foundation of Yunnan Province, China

Received date: 2021-09-28; **Accepted date:** 2022-02-14

Corresponding author: XIE Ming; Tel: +86-13700669739; E-mail: powder@ipm.com.cn

(编辑 王 超)