

纳米镍粉增强银基触点材料的制备及其抗电弧侵蚀性能研究

Preparation of Silver-based Contact Materials Reinforced with Nickel Nanopowder and Study of Their Arc Erosion Resistance

供稿|李嘉文, 张慧敏, 李智国, 龙洲, 翟宇超, 宋文冰, 王军 / LI Jiawen, ZHANG Huimin, LI Zhiguo, LONG Zhou, ZHAI Yuchao, SONG Wenbing, WANG Jun

内容导读

为提升银镍 (AgNi) 触点的抗熔焊性能与使用寿命, 采用高能球磨与放电等离子烧结技术, 成功制备了不同纳米镍 (Ni) 含量的银基触点材料, 并系统探究了不同电弧侵蚀次数下的抗电弧侵蚀行为。实验表明, 当镍质量分数为 10% 时, 材料硬度适中 (HV 67.9), 且经 5000 次电弧侵蚀后, 其表面仍保持平整, 未出现明显裂纹或大范围烧蚀坑, 表现出良好的抗损伤与电流分散特性。相比之下, 镍含量为 20% 的材料硬度更高 (HV 109), 但在电火花长期作用下表面损伤更为显著。综合而言, 纳米镍质量分数为 10% 的银镍复合材料在保持良好导电与机械性能的同时, 具备更优的物理性能和抗电弧侵蚀性能。

电触点材料的发展已有百年历史。早期主要使用纯金、银、铂作为触点材料, 但因成本高昂难以满足大规模应用需求^[1]。20 世纪 20 年代, 人们研发出银-金属氧化物 (AgMeO) 电触点材料, 其中银氧化镉 (AgCdO) 被誉为“万能电触点材料”, 但直到 60 年代才开始大规模生产。从 70 年代起, 银氧化锡 (AgSnO₂)、银氧化锌 (AgZnO) 等材料的研发取得快速发展^[2]。然而, AgCdO 中的镉 (Cd) 有剧毒, 对人体危害较大, 因此欧盟在 2003 年发布了《限制在电气和电子设备中使用某些有害物质的指令》(ROHS) 和《废弃电子电气设备指令》(WEEE)

指令, 限制 Cd 在电器设备中的使用。近十年来, 研究人员致力于寻找能够替代 AgCdO 的新型环保电触点材料, 包括 AgSnO₂、AgZnO、银氧化铟 (AgIn₂O₃)、银氧化钇 (AgYO₂)、银氧化铁 (AgFeO)、银氧化铬 (AgCrO₂)、银镍 (AgNi)、银氧化铜 (AgCuO) 等^[3]。

自 1939 年问世以来, AgNi 触点材料因其优越的性能在全球范围内得到广泛应用。该材料在我国的研究和应用也日益深入, 在家庭开关、微型继电器、微型断路器及汽车继电器等领域展现出显著优势^[4]。

作者单位: 西安工程大学, 陕西 西安 710048

AgNi 作为一种低压触点材料,具备良好的导电性、塑性、耐磨性以及较低的接触电阻,这些特性使其在各类电气设备中发挥着关键作用^[5-6]。然而,尽管具有诸多优点,AgNi 触点材料仍存在一些不足,如机械强度相对较低、抗熔焊性能较差。这些问题在一定程度上限制了其应用潜力。为解决这些问题,近年来我国科研人员不断努力改进 AgNi 的制备工艺,以期提高其机械强度和抗熔焊性^[7]。

在改进 AgNi 制备工艺的过程中,研究人员通过优化原料配比、改进熔炼工艺及调整热处理条件等措施,逐步提升了材料的综合性能。此外,为进一步优化其性能,科研人员还通过添加合金元素、复合材料等手段来提高材料的机械强度和抗熔焊性能。AgNi 触点材料在与 Ag-C 类触点配合使用时,通常表现出良好的综合性能^[8-9]。谢晓宇等^[10]制备了含稀土氧化物 (ReO) 添加剂的 AgNi 电触头材料 Ag-15NiReO,并对其相结构、添加剂均匀性、金相组织、物理性能等进行了分析。结果表明,所制备材料中的稀土元素在 Ag 基体中分散均匀,金相组织无明显缺陷、无添加剂聚集现象;当添加 ReO 质量分数为 1% 时,材料的电寿命最高,有望应用于中等电流等级低压电器中。许福太等^[11]研究了化学包覆与机械混合复合制备 AgNi 材料的工艺,采用化学置换反应在镍粉表面包覆一层过渡层以实现表面改性,再将改性后的镍粉与银粉均匀混合来制备 AgNi 触头材料。利用此生产工艺制备的 AgNi 材料在加工性能和电气性能上均得到显著提高。聂宝鑫^[12]则研究了超细镍颗粒 AgNi 触头材料的组织和性能,对比分析了超细镍颗粒 ($\leq 8\ \mu\text{m}$) Ag-10Ni 材料与常规镍颗粒 ($\leq 20\ \mu\text{m}$) Ag-10Ni 材料的微观组织、机械物理性能及电接触性能。结果表明,超细镍颗粒 Ag-10Ni 材料的镍颗粒尺寸更细小、分布更均匀,对 Ag 基体的弥散强化作用更优,因而具有更高的强度和硬度;在电接触特性方面,超细镍颗粒 Ag-10Ni 材料具有较低且稳定的接触电阻和融焊力,在电寿命测试中表现出更高的电寿命。

根据以上研究,本文探索不同纳米 Ni 添加量对 AgNi 触点材料抗电弧侵蚀性能的影响,重点在于揭示 Ni 含量对 Ag 基体的规律性影响,并对经历多次电弧侵蚀的表面烧蚀特性进行深入分析。通过该纳

米复合技术制备的材料,一方面可用于研究不同纳米 Ni 含量对 AgNi 触点材料的影响机制,另一方面,高含量 Ni 的添加有助于减少 Ag 用量、降低成本。研究结果将为理解纳米 Ni 含量对 AgNi 材料性能的影响提供理论依据,并为相关材料的设计和應用提供指导。

实验材料及方法

根据前期研究,确定了粉末冶金工艺参数。首先,将纳米 Ni 粉与 Ag 粉按 2 种比例装入球磨罐进行球磨,球料比为 15 : 1,球磨转速为 300 r/min,球磨时间为 4 h 以使其均匀分散,之后在 500 °C 下进行退火处理。其次,在 6 MPa 的压力下对粉末样品进行冷压成型。最后,将冷压成型的坯体置于放电等离子 (SPS) 烧结炉中,在烧结温度为 730 °C、烧结压力为 50 MPa 的条件下保温 20 min,制备出 AgNi 合金。对制备的试样进一步分析纳米 Ni 粉含量对材料性能、电弧侵蚀行为以及材料转移情况的影响,并探究其对触点材料性能尤其是抗电弧侵蚀性能的变化规律。具体技术路线如图 1 所示。

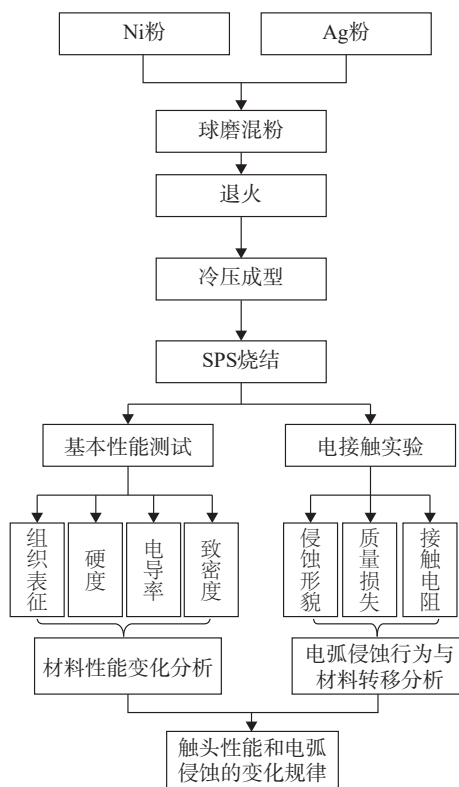


图 1 实验技术流程图

实验结果与分析

Ni 质量分数对材料基本性能的影响

对微观组织的影响

不同 Ni 质量分数为制备的触点材料经过抛光腐蚀后光镜下的材料微观组织见图 2。如图所示, Ni 相在 Ag 基体中呈网状分布, 形成了致密的复合材料结构。这种网状分布有助于改善 AgNi 触点材料的微观组

织, 从而提升其性能。观察可见, Ni 相分布于 Ag 基体中, 当 Ni 质量分数为 10% 时, Ni 相均匀分布在 Ag 相周围, 形成致密的三维网状结构; 当 Ni 质量分数增加至 20% 时, 该网状结构逐渐细化。这是由于 Ni 相具有铁磁性, 球磨后部分粉末因磁吸附作用发生小范围团聚, 且 Ag 颗粒的粒径远大于纳米 Ni 颗粒, 因此在球磨过程中纳米 Ni 颗粒附着在 Ag 颗粒表面, 并且通过热压烧结形成致密的三维 Ni 网状结构。

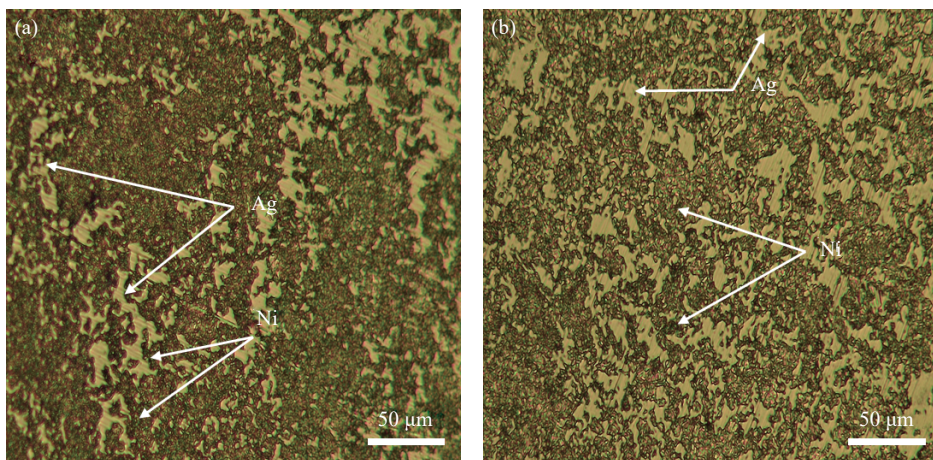


图 2 不同 Ni 质量分数 AgNi 触点材料腐蚀后的金相组织图: (a) 10%; (b) 20%

对物理性能的影响

不同纳米 Ni 含量对 AgNi 触点材料物理性能的影响如图 3 所示。由图 3(a) 可以看出, 当 Ni 质量分数从 10% 增加到 20% 时, 致密度从 97% 降至 96%。致密度下降的原因可能在于: 一方面, Ni 性质稳定, 与 Ag 润湿性差且难以烧结, 对放电等离子烧结

过程起到阻碍作用, 随 Ni 质量分数从 10% 增至 20%, 该阻碍作用增强, 导致致密度下降; 另一方面, 当 Ni 质量分数为 20% 时, Ni 颗粒发生明显团聚现象, 团聚体自身很难被烧结, 并形成大量孔隙, 使三维网状结构中的空隙增大从而导致材料致密度下降。

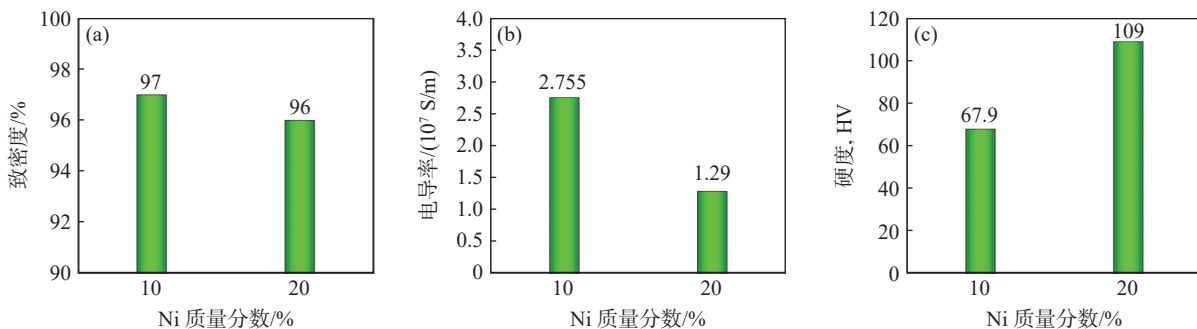


图 3 不同 Ni 含量 AgNi 触点材料的物理性能: (a) 致密度; (b) 电导率; (c) 硬度

AgNi 触点材料的电导率随着 Ni 含量变化的柱状图见图 3(b)。可以看出, 电导率随 Ni 含量的增加而降低。这是由于 Ni 的电阻高于 Ag, Ni 的加入会

增加材料的整体电阻, 从而降低电导率。此外, Ni 在 Ag 基体中呈网状分布, 这种结构也可能对电子流动产生阻碍作用, 进一步影响导电性能。

同时,如图 3(c)所示,随着 Ni 含量的增加,材料的硬度相应提高(由 HV 67.9 提升至 HV 109),这通常以牺牲部分电导率为代价。虽然 Ni 含量的增加会降低电导率,但也提高了材料的硬度和耐磨性。因此,在实际应用中选用 AgNi 触点材料时,需要综合考虑电导率、硬度、耐磨性等多个因素,以选择最适合特定应用的材料成分。

Ni 含量对抗电弧侵蚀行为的影响

通过对原料相同、配比不同制备的 AgNi 触点材料分别进行 1000、2000 和 5000 次的电弧侵蚀试验,监测其在相同外部条件下,经不同侵蚀次数后的表面形貌、质量变化、接触电阻以及温升变化。

➤ 对形貌的影响

触点材料在不同次数电接触后的扫描电子显微镜(SEM)形貌见图 4~6。由图 4 可见,1000 次的电弧侵蚀后,Ni 质量分数为 20% 触点材料表现出更严重的表面烧损,具体而言,其表面整体呈现出明显的凹凸不平形貌,其中,白色区域为富 Ag 相,而大部分黑色区域为富 Ni 相。

通过对比图 4(c)和图 4(d)的局部放大侵蚀形貌,可见材料表面呈现出堆积状特征。这种堆积状形貌源于电弧侵蚀过程中对材料表面造成的不平整

性:在电弧作用下,Ag 熔滴向四周喷溅并不断积累,而大部分 Ni 颗粒则滞留在表面形成富 Ni 层。随着熔化层逐渐增厚,表面的不平整性也逐渐增加。此外,文献 [13] 指出,Ni 含量的增加会影响 AgNi 触点材料的电弧侵蚀行为。随着 Ni 含量增加,材料硬度增大,可能导致燃弧能量波动较大,从而影响触点的抗熔焊性能。

观测图 5 发现,与 1000 次电弧侵蚀相比,2000 次电弧侵蚀后的触点烧蚀更为严重。在图 5(b)和 5(d)中能够清楚地观察到触点表面形成的气孔、Ag 熔滴流动及液滴溅射痕迹,这些现象使得材料质量损耗。同时,随着 Ni 含量增加,气孔或孔洞越来越多。这是由于氧气在 Ag 中的溶解度降低,气泡从熔池内部迅速上浮,并在到达熔池表面时因张力作用而破裂,从而在表面形成气孔。由图 5(d)还可见,Ag-20Ni 表面出现了裂纹。这是因为在电弧与触点材料的相互作用过程中,材料发生反复熔化、固化以及收缩,进而引起应力作用的结果。

从图 6(a)中可以观察到,Ni 质量分数 10% 的触点材料在经过 5000 次电弧侵蚀后,其表面相对平整,表明较低的 Ni 含量可能有助于保持表面完整性。当放大倍数增加至 1000 倍时,可明显看到触点表

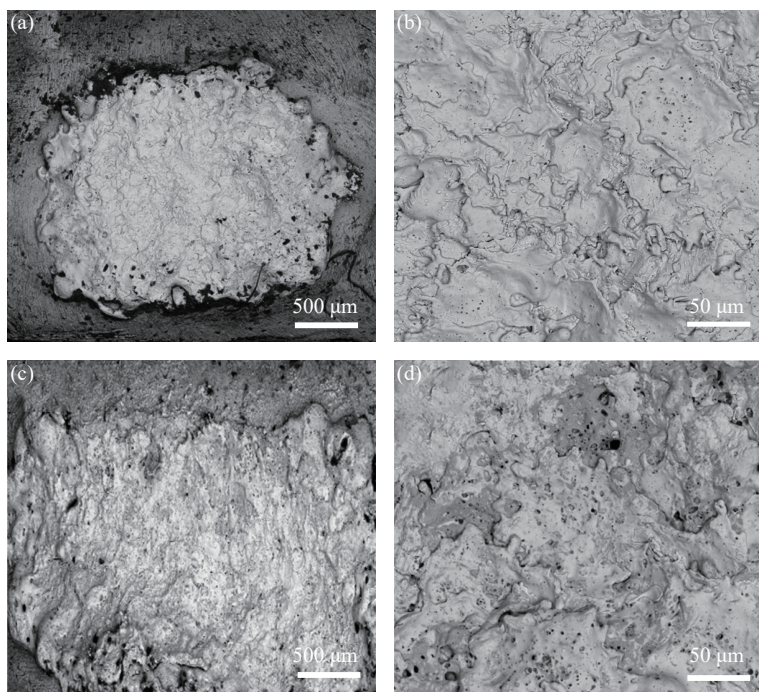


图 4 不同 Ni 质量分数试样 1000 次电弧侵蚀后的扫描电子显微镜图及局部放大图:(a, b) 10%; (c, d) 20%

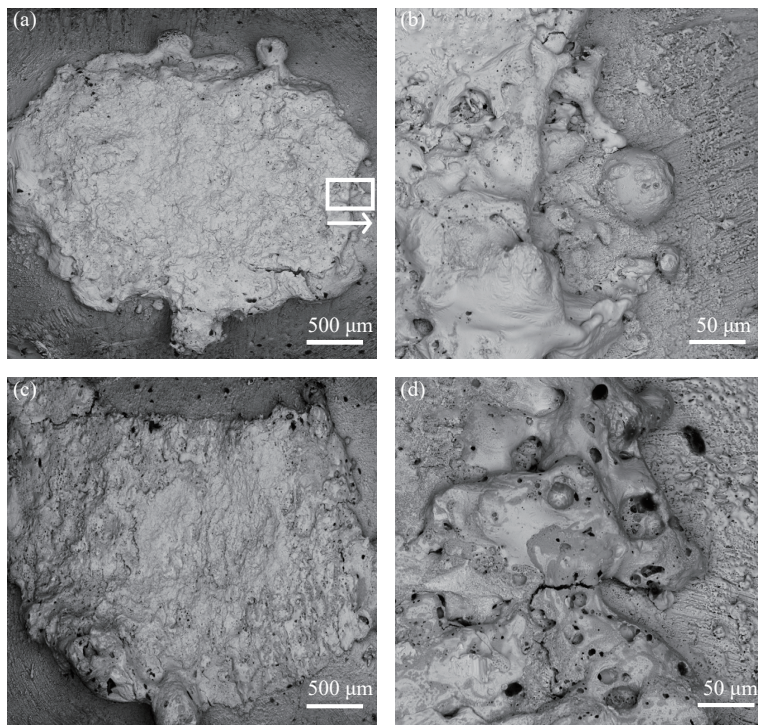


图5 不同 Ni 质量分数试样 2000 次电弧侵蚀后的扫描电子显微镜图及局部放大图: (a, b) 10%; (c, d) 20%

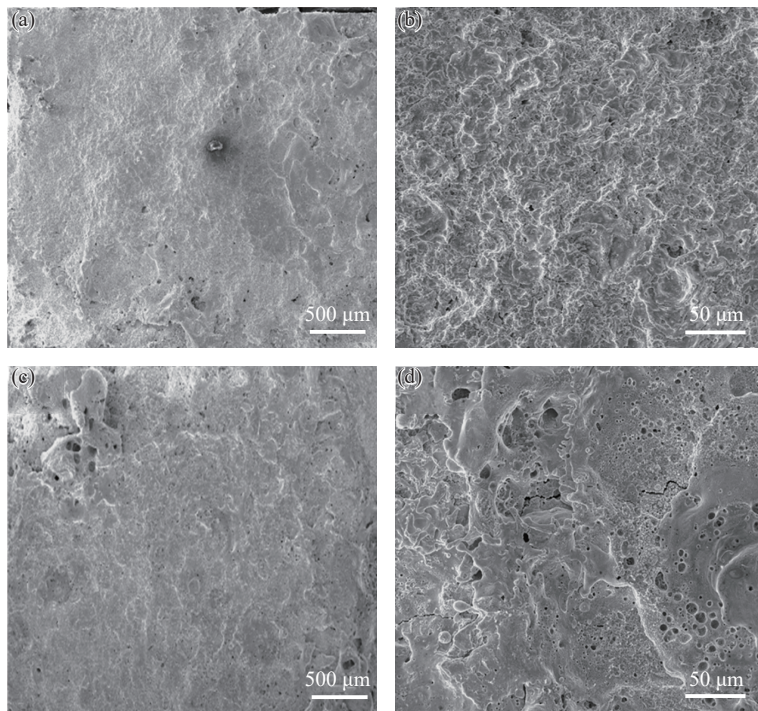


图6 不同 Ni 质量分数试样 5000 次电弧侵蚀后的扫描电子显微镜图及局部放大图: (a, b) 10%; (c, d) 20%

面存在的尖凸和凹坑,见图 6(b),这些特征是电弧侵蚀的直接结果。图中的金属流动痕迹和中心孔洞进一步证实了电弧对触点材料的侵蚀作用。从图 6(c)、

6(d)可以看出,20% Ni 质量分数的触点材料的电弧作用区域相对较小,但侵蚀特征更为明显。与 Ni 质量分数 10% 的试样相比, Ni 质量分数为 20% 的触

点材料同样出现凹坑和孔洞,且数量和尺寸有所增加。随着 Ni 含量的增加,触点材料的侵蚀形貌变得更加严重,表现为更多的凹坑、孔洞、裂缝和沉积带。其中,裂缝可能由电弧作用下的热应力引起,沉积带则可能是 Ag 熔滴喷溅后重新固化形成的。通过对图 6 的分析可知, Ni 含量的增加对 AgNi 触点材料在电弧侵蚀后的表面形貌有显著影响。高 Ni 含量材料在电弧侵蚀后表现出更严重的侵蚀特征和更大的材料损耗。这些观察结果对理解和优化 AgNi 触点材料的设计和性能具有重要意义。

➤ 对质量损失的影响

电接触材料的损耗和其寿命息息相关。电触点在闭合分断过程中,由于化学、机械和热力学的共同影响,材料会发生沉积、附着或喷溅现象,进而造成损耗。

不同 Ni 含量的触点材料在经过 5000 次电弧侵蚀后,其动、静触点的质量变化如图 7 所示。分析可知,不同 Ni 含量的触点材料均表现为动、静触点质量同时减少,且损失质量大体相同。由此可以得出, Ni 含量对 AgNi 触点材料的质量损失影响不显著。

➤ 对接触电阻的影响

对侵蚀后的触点材料施加不同压力测试接触电阻,如图 8 所示。在大多数情况下,施加在触点上的压力会直接影响其接触电阻:较高的压力有助于动、静触点更紧密地接触,减少接触面之间的空隙,从而可能降低接触电阻。由于侵蚀速率随 Ni 含量的增加先减小后增大,可以推测在侵蚀速率较低

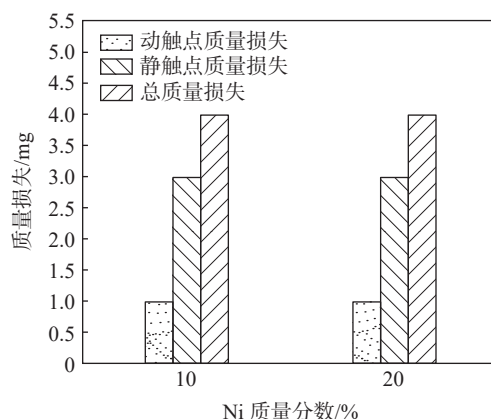


图 7 触点材料在 5000 次电弧侵蚀后动静触点材料质量变化

的阶段,触点材料的接触电阻可能相对稳定或略有下降。这是因为较低的侵蚀速率可能意味着材料表面更为平坦,有助于维持良好的接触状态和较低的接触电阻。然而,随着侵蚀速率增加,实际接触电阻可能高于预期,这是因为电弧侵蚀加剧导致材料表面粗糙或形成氧化层,从而增加接触电阻。综合以上分析,可以得出以下结论:

在较低压力 (5 N) 下, 10% Ni 质量分数的触点材料在电弧侵蚀初期接触电阻的增长速率较为稳定, 而 20% Ni 质量分数的触点材料在初期具有较低的接触电阻, 但随着电弧侵蚀次数的增加而逐渐增加且其接触电阻低于 10% Ni 质量分数的触点材料的接触电阻。

在较高压力 (10 N) 下, 2 种材料的接触电阻均随着电弧侵蚀次数缓慢上升, 但侵蚀速率较接触压力为 5 N 时较为缓慢, 表明更高的接触压力有助于降低接触电阻。

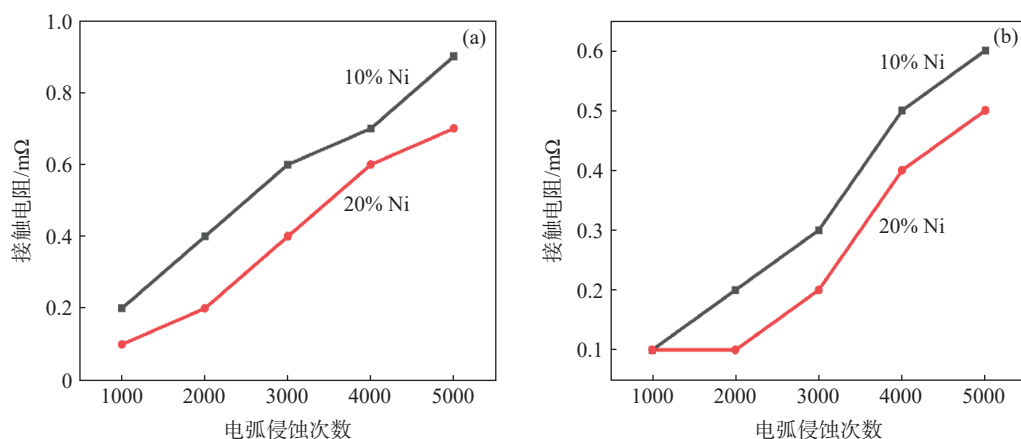


图 8 触点材料侵蚀后不同压力下的接触电阻: (a) 5 N; (b) 10 N

对温度的影响

AgNi 触点材料电弧侵蚀后的温度上升曲线见图 9。从图 9 中可以观察到,随着电弧侵蚀次数从 1000 次增加到 5000 次,2 种触点材料温度均呈现上升趋势,这表明电弧侵蚀会导致触点材料温度的升高。值得注意的是,Ni 质量分数为 20% 的触点材料温度上升速度较快。在同一电弧侵蚀次数下,其温度总是高于 Ni 质量分数为 10% 的触点材料。这可能是因为 Ni 质量分数为 20% 的触点材料在电弧侵蚀过程中具有更高的热敏感性或更低的热稳定性。

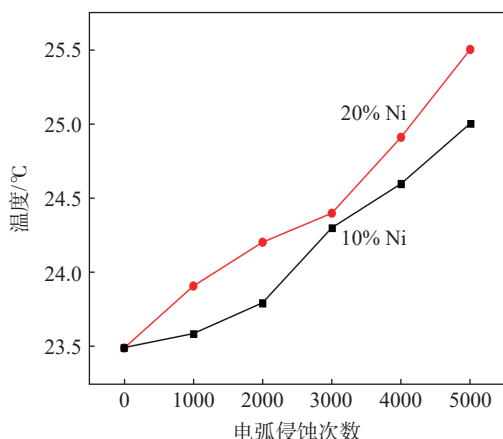


图 9 触点材料侵蚀过后的温度变化

结束语

(1) 采用高能球磨与粉末冶金工艺,制备了不同纳米 Ni 含量的 AgNi 复合粉末及触点材料试样。

(2) 随着 Ni 含量下降,AgNi 触点材料微观表面 Ni 在 Ag 基体上的分散程度逐渐下降,这使得 AgNi 触点材料的硬度从 HV 109 降至 HV 67.9,但其致密度和电导率都有所上升。从金相显微组织变化可看出,较高含量的 Ni 可以使 Ni 更加均匀且完整地分布于 Ag 基体中。

(3) 通过对不同质量分数 Ni 掺杂 Ag 基触点材料进行电弧侵蚀性能测试与形貌观察,Ni 质量分数为 10% 的 AgNi 触点材料在电弧侵蚀后表面平整、银熔池分布均匀。综合研究结果表明,纳米 Ni 质量分数为 10% 的 AgNi 触点材料表现出良好的物理性

能和抗电弧侵蚀特性。

参考文献

- [1] 韩春阳,王召斌,王占,等.触点材料及其性能测试技术概述.电工材料,2019(1): 27
- [2] 丁健翔,孙正明,张培根,等. Ag 基触头材料的研究现状与展望.材料导报,2018, 32(1): 58
- [3] 李文生,李亚明,张杰,等.银基电接触材料的应用研究及制备工艺.材料导报,2011, 25(11): 34
- [4] 杨昌麟,张秀芳,颜小芳,等.高性能继电器用 AgNi 触头材料的研究.电工材料,2021(3): 9
- [5] 韩春阳,王召斌,李维燕,等.银基触点材料性能对比与失效机理试验研究.电器与能效管理技术,2019(11): 8
- [6] Wang X H, Yao H, Chen M, et al. Fabrication and arc erosion behavior of Ag-TiB₂ contact materials. *Power Technol*, 2014, 25(6): 20
- [7] 张万胜.石墨添加剂对 AgNi 触头特性的影响.电工合金,1996(2): 25
- [8] 王珩,李素华,翁桅,等. AgNi 电触头材料制备工艺进展.电工材料,2013(4): 7
- [9] 陈力.新型 AgRENi(12、15)电接触材料的研制[学位论文].昆明:昆明理工大学,2006
- [10] 谢晓宇,黄锡文,莫培松,等.含稀土氧化物添加剂的 AgNi 电触头材料的组织及性能研究.电工材料,2024(4): 37
- [11] 许福太,盘志雄,陈天来,等.化学包覆与机械混合复合制备银镍材料工艺的研究.电工材料,2022(4): 26
- [12] 聂宝鑫.超细镍颗粒银镍触头材料的组织和性能.电工材料,2019(3): 3
- [13] 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.中国有色金属学报,2022, 32(12): 3746

基金项目:中国大学生创新创业训练计划资助项目(S202310709116)。

作者简介:李嘉文(2002—),男,陕西省宝鸡人,在读本科生。2021 年就读于西安工程大学材料科学与工程专业,主要研究方向:电接触材料及电弧理论。通信地址:陕西省西安市碑林区金花南路西安工程大学;E-mail: jarvanaaa@163.com。

通信作者:王军(1983—),男,西安工程大学材料与工程学院教授,主要研究方向:电接触材料及电弧理论。通信地址:陕西省西安市碑林区金花南路西安工程大学;E-mail: wangjun@xpu.edu.cn。