

Ag/LaNi_xCo_{1-x}O₃ 触点材料的制备及电接触性能研究

邵紫阳¹, 杨芳儿¹, 王大帅¹, 刘振武², 沈涛², 李跃^{2,3}, 郑晓华^{1*}

(1. 浙江工业大学 材料科学与工程学院, 杭州 310014; 2. 浙江大学 材料科学与工程学院, 杭州 310058;
3. 浙江大学 温州研究院, 浙江 温州 325036)

摘要: 本文运用溶胶-凝胶燃烧法合成了双钙钛矿型 LaNi_xCo_{1-x}O₃(LNCO)纳米材料, 利用粉末冶金和热挤压技术制备了相应的 Ag/LNCO 触点材料及元件样品。重点考察了不同 Ni、Co 含量对 Ag/LNCO 触点材料微观结构、物相组成、物理性能、力学性能及电寿命服役能力的影响, 对其电弧侵蚀失效行为进行了研究, 并与 SnO₂ 粉体增强 Ag 基触点材料进行对比。结果表明: 溶胶凝胶法合成的 LNCO 纳米颗粒粒径为 20-30 nm, 经粉末冶金工艺制备的 Ag/LaNi_{0.5}Co_{0.5}O₃ 触点材料电学性能和电寿命都优于 Ag/SnO₂ 触点材料, 其电阻率低至 2.10 μΩ·cm, 电寿命性能达到 51287 次。表明 Ag/LaNi_{0.5}Co_{0.5}O₃ 触点材料性能较佳, 是一种可以取代 Ag/CdO 的新型触点材料。

关键词: 触点材料; 力学性能; 电弧侵蚀; 电寿命; La₂Ni_{1-x}Co_xO₃

中图分类号: TM501.3 文献标识码: A 文章编号: 1004-0676(2024)02-0019-07

Preparation and electrical contact performance of Ag/LaNi_xCo_{1-x}O₃

SHAO Ziyang¹, YANG Fanger¹, WANG Dashuai¹, LIU Zhenwu², SHEN Tao², LI Yue^{2,3}, ZHENG Xiaohua^{1*}

(1. College of Materials Science and Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China;
2. School of Materials Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China;
3. Institute of Wenzhou, Zhejiang University, Wenzhou 325036, Zhejiang, China)

Abstract: The double-perovskite LaNi_xCo_{1-x}O₃(LNCO) nanomaterials were synthesized by using sol-gel combustion method, and Ag/LNCO electrical contact materials and their component samples were fabricated by powder metallurgy combined with hot extrusion technique. The effects of different Ni and Co contents on microstructure, phase composition, physical properties, mechanical properties and electrical life service capability of the Ag/LNCO contact materials were investigated, followed by a preliminary investigation on their arc erosion failure behavior in comparison with that of the commercially available SnO₂ powder-reinforced Ag-based contact materials. The results show that the LaNi_xCo_{1-x}O₃ nanomaterials with a size of 20~30 nm can be synthesized by the sol-gel method. With a resistivity of 2.10 μΩ·cm and an electrical life service capability of 51287 cycles, Ag/LaNi_{0.5}Co_{0.5}O₃ prepared by powder metallurgy process displayed better electrical contact performance than Ag/SnO₂ materials. Therefore, Ag/LaNi_{0.5}Co_{0.5}O₃ is another potential substitute for traditional Ag/CdO.

Key words: electrical contact materials; mechanical property; arc erosion; electrical life service capability; La₂Ni_{1-x}Co_xO₃

电触点是接触器、断路器和继电器等控制电器装备的关键元件, 通过控制其相对运动实现电路的

分断或导通, 其电触点性能优劣直接决定了控制电器装备的服役寿命和安全可靠性。银基触点材料是

收稿日期: 2023-03-12

基金项目: 浙江大学科技创新合作专项(桂科 ZD20302002; 桂科 AB22036003)

第一作者: 邵紫阳, 男, 硕士研究生; 研究方向: 银基电触点材料的制备及电气性能研究; E-mail: szy742656375@163.com

*通信作者: 郑晓华, 男, 博士, 副教授; 研究方向: 电接触材料开发与应用; E-mail: zhengxh@zjut.edu.cn

电触点元件的关键材料,其主要由起到导电导热作用的银基体相和改善力学性能和电寿命能力的增强相组成。由于触点材料在频繁分断过程中需承受严重的电弧热和力学冲击,极易造成触点材料在服役过程中出现性能退化导致提前失效,这就要求触点材料需同时具备良好的塑性、合适的硬度、高导电导热与电寿命循环能力^[1-3]。

在银基触点材料体系中 Ag/CdO 因其优异的综合性能而被称为万能触点,但由于服役过程中挥发的 Cd 蒸气存在致癌和“镉毒”污染而被限制使用。作为替代 Ag/CdO 的最佳候选材料 Ag/SnO₂ 触点材料,一直以来是学者们的热点研究课题并取得了系列进展,但其在力学性能、电寿命能力等综合性能仍难以突破。鉴于此,部分学者的研究方向开始转向其他新型复合氧化物增强相体系。已有资料表明,高性能导电陶瓷如 La-Ni-O 系列^[4-5]、La-Sr-Co-O 系列^[6]、MAX 相系列^[7-8]等高温超导系列陶瓷在高温下表现出类金属特性,且结构性能参数可调,加工性能良好,是作为银基触点材料增强相材料的理想选择。王成建等研制 Ag/LaNiO_{3-δ}、Ag/LaFe_xNi_{1-x}O₃、Ag/La_{1-x}Sr_xMnO₃ 系列触点材料^[9-11],发现 La-Ni-O 系列触点材料具有良好的抗材料转移和抗熔焊特性。杨辉等制备的系列 Ag/La_{1-x}Sr_xCoO_{3-δ} 触点材料表现出优异的电学性能和抗电弧侵蚀能力^[6],具有较好的应用前景。郑晓华等采用 Cu 原子替代 La_{1-x}Sr_xCoO_{3-δ} 中的 Co 原子,研究了新型 Ag/LaSrCuO₄ 材料的工艺参数、形貌调控及其失效机制^[12]。

基于此,经调研发现 LaNi_xCo_{1-x}O₃ 导电陶瓷是一种结构特殊的双钙钛矿型金属氧化物,在普通钙钛矿型金属氧化物 ABO₃ 结构中,B 位离子处于周围六个氧组成的八面体中心。而且,在 La₂NiCoO₆ 结构中,B 位同时出现 Ni 和 Co 两种过渡金属元素,元素的原子数比例为 1:1,且在结构中 B 位原子的八面体结构有 LaNiO₆ 和 LaCoO₆ 交替排列而成,Ni 和 Co 离子被氧气隔开而形成 Ni-O-Co 结构,从而表现出良好的半导体及电、磁性能^[13]。Choudhary 等合成了 LaNi_{1-x}Co_xO₃(x=0.2~1),并表现出了很高的催化效率^[14]。吴艳波等采用静电纺丝法制备了 La₂NiCoO₆ 无机纳米纤维,具有很好的电化学性能,在超级电容器领域具有很高的应用价值^[15]。比如山东大学尹娜等曾开展了 LaNiO₄ 增强银基触点材料的相关报道,发现该材料体系具备优良的电学、力学性能及抗电弧侵蚀能力等^[5]。上述相关研究结果佐证了 LaNi_xCo_{1-x}O₃ 导电陶瓷在电学、力学等方面

与触点材料需要满足的性能要求基本吻合,在触点材料领域具有潜在应用价值。

因此,结合课题组的前期研究基础^[12],本文运用溶胶-凝胶燃烧法合成了双钙钛矿型 LaNi_{1-x}Co_xO₃ (LNCO) 纳米材料,利用粉末冶金技术结合热挤压技术制备了相应的 Ag/LNCO 触点材料及其元件样品;并将相应的 Ag/LNCO 元件样品安装至交流接触器(CJX2-09,正泰电器)开展 AC-4 电寿命型式试验研究;重点考察了 Ni、Co 含量对 Ag/LaNi_{1-x}Co_xO₃ 触点材料微观结构、物相组成、物理性能、力学性能及电寿命服役能力等研究,并对其抗电弧侵蚀失效行为进行了初探研究。本文研制的溶胶-凝胶燃烧法合成的双钙钛矿型 LaNi_{1-x}Co_xO₃ 增强银基触点材料在电学、力学及电寿命性能等方面表现优异,这为后续设计新型银基电触点材料体系提供新思路。

1 实验

1.1 实验原料

本实验所用试剂硝酸钴 Co(NO₃)₂·6H₂O、硝酸镍 Ni(NO₃)₂·6H₂O、硝酸镧 La(NO₃)₃·6H₂O、柠檬酸(CA)、乙二醇(EG),均为市售分析纯试剂。化学银粉,纯度(质量分数)≥99.99%,粒径≤74μm,购自温州宏丰电工合金股份有限公司,二氧化锡 SnO₂ 粉体纯度(质量分数)≥99.7%,购自福晨(天津)化学试剂有限公司。

1.2 LaNi_xCo_{1-x}O₃ 纳米粉体合成

运用溶胶-凝胶燃烧法合成双钙钛矿型 LaNi_{1-x}Co_xO₃ (LNCO) 纳米材料。按照化学计量比称取硝酸钴 Co(NO₃)₂·6H₂O 和硝酸镍 Ni(NO₃)₂·6H₂O 溶解于去离子水与乙二醇(EG)的混合溶液,用磁力搅拌器搅拌均匀后加入适量柠檬酸,在 70 °C 下加热搅拌并按照化学计量比加入硝酸镧 La(NO₃)₃·6H₂O,继续在 70 °C 下加热搅拌直至形成稳定的溶胶,其中金属离子、柠檬酸、乙二醇的摩尔比为 2:1:1。将凝胶在 100 °C 烘箱中干燥形成干凝胶,然后经 150 °C 预烧 0.5 h,再于 900 °C 下煅烧 6 h,研磨后得到黑色 LaNi_xCo_{1-x}O₃ 粉体。

1.3 Ag/LaNi_{1-x}Co_xO₃ 与 Ag/SnO₂ 触点材料制备

利用粉末冶金技术结合热挤压技术制备了相应的 Ag/LNCO 触点材料及其元件样品。分别以 LaNi_xCo_{1-x}O₃ 和 SnO₂ 为增强相,使用高能球磨工艺制备 Ag/LaNi_xCo_{1-x}O₃ 与 Ag/SnO₂ 复合粉体。所用球磨罐和球磨珠均为氧化锆材质,按照 Ag 与增强相

质量比为 90:10, 氧化锆球与复合粉体质量比 3:1 称取对应的氧化锆球、银粉和增强相粉, 并依次放入球磨罐中, 加入适量无水乙醇, 在转速 300 r/min 研磨 4 h, 制备出复合粉体。

将上述复合粉体经压制 (20 MPa)、烧结 (900 °C/6 h)、热挤压后得到 ϕ 3.9 mm 的 Ag/LNCO 和 Ag/SnO₂ 丝材。通过旋锻、拉拔、退火、线切割制备 ϕ 1.85 mm 的电触点并将其安装至 CJX2-09 交流接触器上进行电寿命循环测试。作为对照组, 以市购的 SnO₂ 为原料, 采用相同的制备工艺获得相应的 Ag/SnO₂ 触点材料。

1.4 结构与性能表征

采用 X 射线衍射仪 (PANalytical X'Pert PRO) 对 LNCO 粉体进行物相结构分析; 采用场发射扫描电镜 (GeminiSEM 360) 对 LNCO 及 Ag/LNCO 进行表面微观形貌观察; 采用维氏硬度计 (HVS-100)、密度计、数字金属导电仪及万能材料试验机 (68TM-30) 分别测量触点材料的显微硬度、密度、电导率及其力学性能。采用 AC-4 电寿命型式试验机对安装至交流接触器 (CJX2-09, 正泰电器) 上的触点材料样品进行电寿命性能评价, 相应的电寿命型式试验参数如表 1 所示。

表 1 电寿命循环实验参数

Tab.1 Arc ablation test parameters

项目	参数
电接触材料	Ag/LaNi _{0.75} Co _{0.25} O ₃ Ag/LaNi _{0.5} Co _{0.5} O ₃ Ag/SnO ₂
电流模式	54 A, 400 V
负载类型	感性负载
通断频率	300/times·h ⁻¹
循环模式	AC-4
环境温度	25 °C

2 结果与讨论

2.1 LNCO 粉体物相结构与微观形貌表征

采用 XRD 分析了 LaNi_xCo_{1-x}O₃ 粉体的物相结构, 见图 1。所有 LaNi_xCo_{1-x}O₃ 粉体的特征峰位置和形状基本相同, 均表现出相同的钙钛矿型结构特征峰 ($2\theta=23.1^\circ$ 、 32.7° 、 40.5° 和 47.3°), 表明利用溶胶凝胶法制备了 LaNi_xCo_{1-x}O₃ ($x=0.25$ 、 0.5 、 0.75) 钙钛矿粉体。 $2\theta=32.7^\circ$ 的分裂峰表明粉体为菱方对称晶系, 这是因为八面体配位中 Ni³⁺ 的离子半径 (0.60 Å) 与 Co³⁺ 的离子半径 (0.61 Å) 几乎相同, 有利于阳离子

在钙钛矿结构中的相互取代。当 $x=0.25$ 时, XRD 图谱中可观察到杂质峰, 这可能是由于 Ni³⁺ 过量会诱导金属氧化物的生成, 不利于合成高纯度物相的 LNCO 粉体。

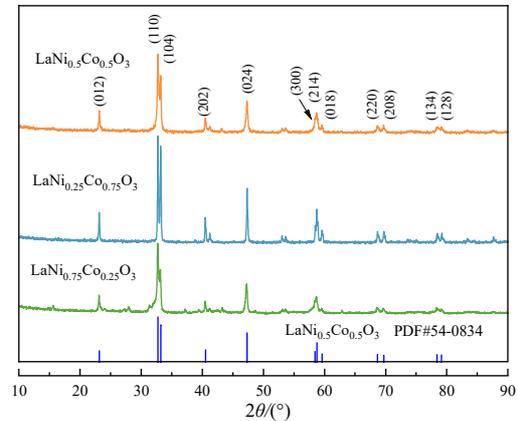


图 1 LaNi_xCo_{1-x}O₃ 粉体的 XRD 图谱

Fig.1 XRD patterns of the LaNi_xCo_{1-x}O₃ powders

图 2 为不同样品的“Williamson-Hall 图”, 通过“Williamson-Hall 图”计算^[16-17]样品的晶粒尺寸分别为 21.2 nm、25.3 nm、33.0 nm, 对应的微应变分别为 2.73×10^{-3} 、 2.48×10^{-3} 、 1.5×10^{-3} 。结果表明, 随着 Ni 含量的减少, 晶粒尺寸逐渐增大而微应变逐渐降低, 这说明 Ni 元素能够抑制晶体生长, 导致晶粒尺寸减小。微应变的发生说明晶粒被拉伸或膨胀, 即有新相生成的趋势, 这与 XRD 图谱相互印证, 微应变的降低意味着材料的变形能力也会降低, 这可能会对材料的力学性能产生影响。

采用场发射扫描电镜观察 LaNi_xCo_{1-x}O₃ 粉体的微观形貌, 如图 3 所示。由图 3(a~c)可以看出, 不同 Ni、Co 比例的 LNCO 均为纳米颗粒粘结组装而成的骨架结构, 骨架结构的形成是由于金属离子与柠檬酸反应生成络合物, 然后与乙二醇进行聚酯化反应形成凝胶, 经过煅烧处理形成了稳定的金属骨架结构。随着 Ni 含量的减少, 纳米颗粒尺寸与骨架结构中的孔洞逐渐变大, 这与“Williamson-Hall 图”计算结果相一致, 并且骨架结构开始相互粘结, 逐渐形成大团聚体。Ag/LaNi_{0.25}Co_{0.75}O₃ 复合材料在热挤压过程中发生断裂, 这可能是由于 LaNi_{0.25}Co_{0.75}O₃ 粉体的团聚物过大, 导致高能球磨过程中 Ag 粉与 LaNi_{0.25}Co_{0.75}O₃ 粉体混合不均匀, 热挤压过程中 Ag 与 LaNi_{0.25}Co_{0.75}O₃ 交界处应力集中, 从而使得 Ag/LaNi_{0.25}Co_{0.75}O₃ 材料在加工过程中断裂, 与其微应变小导致变形能力差相吻合, 因此下文不再讨论 Ag/LaNi_{0.25}Co_{0.75}O₃ 材料。

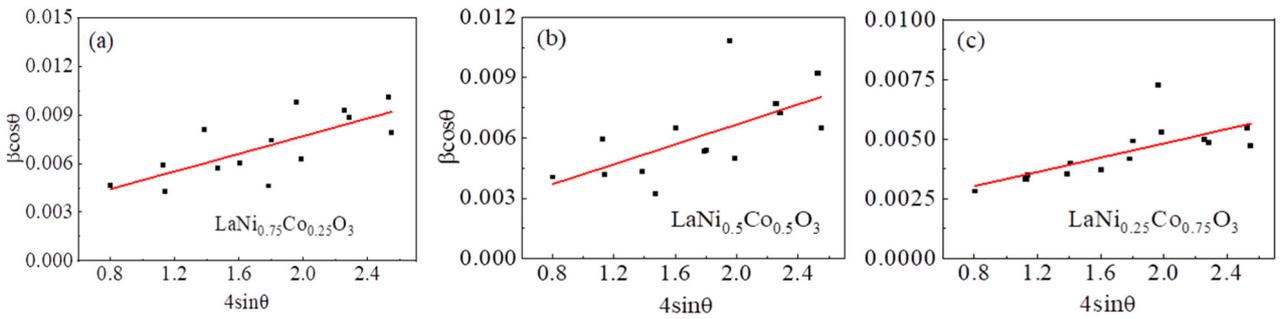
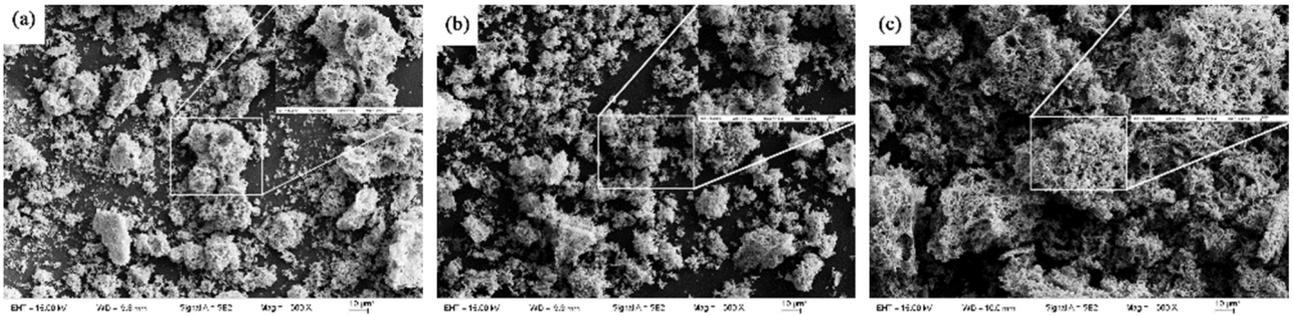


图 2 Williamson-Hall 图
Fig.2 Williamson-Hall plots



(a). LaNi_{0.75}Co_{0.25}O₃; (b). LaNi_{0.5}Co_{0.5}O₃; (c). LaNi_{0.25}Co_{0.75}O₃

图 3 LaNixCo1-xO3 粉体的 SEM 图像

Fig.3 SEM images of LaNixCo1-xO3 powder

2.2 电触点材料的物理性能

表 2 所示为电触点材料的硬度、密度和电阻率性能数据。虽然 Ag/LaNi_{0.75}Co_{0.25}O₃ 的电阻率最低，但其硬度和密度均低于 Ag/LaNi_{0.5}Co_{0.5}O₃，即其耐磨损性能较弱。相比之下，Ag/LaNi_{0.5}Co_{0.5}O₃ 的硬度和密度都接近于 Ag/SnO₂ 材料，其耐磨损性能有保障，同时还有较低的电阻率，从而降低接触电阻与温升，有利于提高触点材料的电寿命。

表 2 Ag/LNCO 电触点材料的物理性能

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

电接触材料	电阻率 /(μΩ·cm)	硬度 /MPa	密度 /(g·cm ⁻³)
Ag/LaNi _{0.75} Co _{0.25} O ₃	2.08	797.7	9.73
Ag/LaNi _{0.5} Co _{0.5} O ₃	2.10	972.2	9.85
Ag/SnO ₂	2.17	1026.1	9.87

2.3 复合材料的力学性能

采用万能材料试验机测试了复合材料丝材的力学性能，其工程应力-应变曲线如图 4 所示。由图 4 可知，Ag/SnO₂ 复合材料的断后延伸率为 16.9%，Ag/LaNi_{0.75}Co_{0.25}O₃ 和 Ag/LaNi_{0.5}Co_{0.5}O₃ 复合材料的

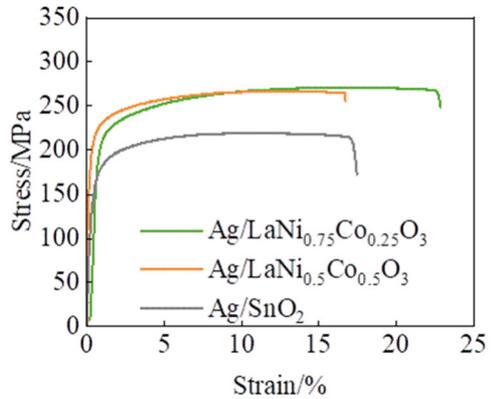


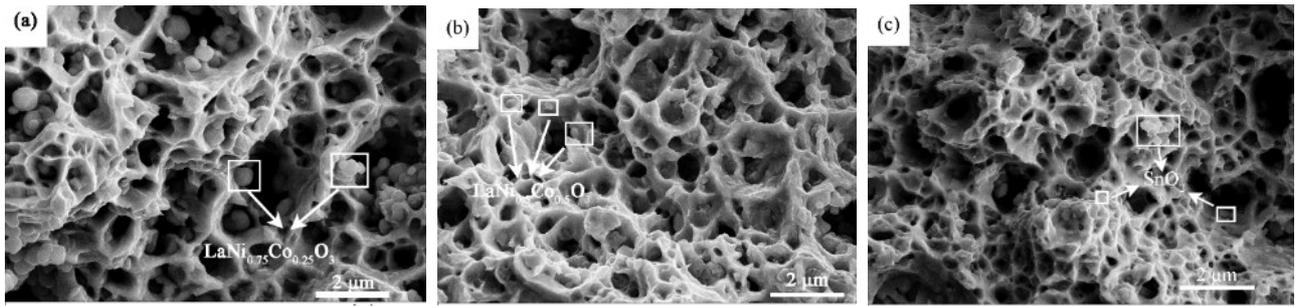
图 4 复合材料丝材的工程应力-应变曲线

Fig.4 Stress-true strain curves of the wire materials

断后延伸率分别为 22.3%和 16.3%，Ag/LaNi_{0.75}Co_{0.25}O₃ 的变形能力最好与其微应变最大紧密相关。

为了探究复合材料塑性差异的原因，利用 SEM 观察复合材料拉伸断口处的微观形貌，如图 5 所示。

由图 5(a)、(b)、(c)可以看出不同复合材料的断裂方式均为微孔聚集型断裂，形貌特征为多个韧窝，其中图 5(a)中的韧窝最大最深，数量较少，图 5(b)与图 5(c)的韧窝大小和数量接近，LaNi_{0.75}Co_{0.25}O₃ 颗



(a). Ag/LaNi_{0.75}Co_{0.25}O₃; (b). Ag/LaNi_{0.5}Co_{0.5}O₃; (c). Ag/SnO₂

图 5 复合材料丝材的断口形貌的 SEM 图像

Fig.5 SEM images of tensile fracture of the wire materials

粒的粒径明显大于 LaNi_{0.5}Co_{0.5}O₃ 颗粒与 SnO₂ 颗粒, 且韧窝内大多包含着第二相颗粒, 这说明微孔多萌生于第二相与基体的界面上, 即第二相粒子在应力作用下, 基体与第二相粒子间的界面脱开, 导致微孔形成, 并且在应力持续作用下, 微孔逐渐长大、聚合, 因此在一定范围内第二相粒子粒径越大、数量越少, 产生的微孔就会越大, 以此聚合而成的韧窝相应变大, 韧窝直径越大、深度越深, 则材料塑性越好, 这与实验结果保持一致。LaNi_{0.75}Co_{0.25}O₃ 颗粒的粒径较大的原因是在外加应力作用下, Ni³⁺ 有诱导颗粒团聚的作用, 而在一定范围内, 第二相颗粒粒径越大, 材料塑性相对变大, 但塑性与硬度往往是对立的, 即塑性越大, 其硬度就会较小, 所以要选择合适塑性与硬度的材料, 以保证加工性能的同时改善其耐磨损性能。

2.4 电触点材料的电弧侵蚀特性

将制备的电触点材料在特定参数下(见表 3)进

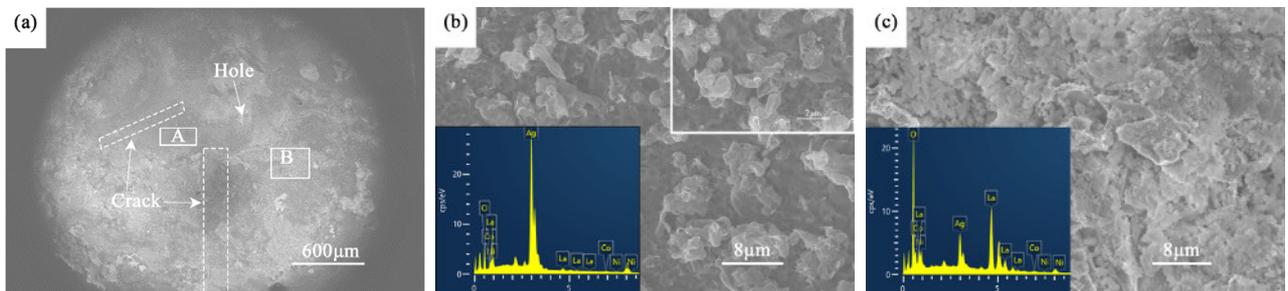
行电寿命循环实验, 直至电触点失效, 其电寿命循环次数与失效模式如表 3 所列。Ag/LaNi_{0.5}Co_{0.5}O₃ 电触点材料的电寿命达到 51287 次, 显著高于传统 Ag/SnO₂ 电触点材料。

表 3 电触点材料的电寿命循环次数与失效模式

Tab.3 Cycles and failure mode of electrical contact materials

样品	循环次数	失效模式
Ag/LaNi _{0.75} Co _{0.25} O ₃	29332	缺相失效
Ag/LaNi _{0.5} Co _{0.5} O ₃	51287	熔焊失效
Ag/SnO ₂	42772	液滴飞溅

Ag/LaNi_{0.75}Co_{0.25}O₃ 电触点材料失效后的电弧侵蚀形貌如图 6 所示, 失效后的电弧侵蚀形貌如图 7 所示。Ag/SnO₂ 电触点材料失效后的电弧侵蚀形貌如图 8 所示。



(a). contact surface; (b). rectangular areas A; (c). rectangular areas B

图 6 电弧侵蚀后 Ag/LaNi_{0.75}Co_{0.25}O₃ 电触点表面微观结构

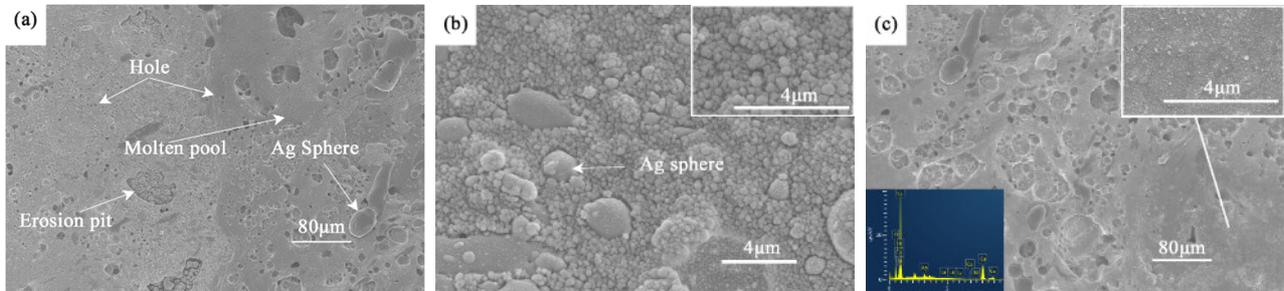
Fig.6 Surface arc ablation microstructures of Ag/LaNi_{0.75}Co_{0.25}O₃ electrical contact composites

由图 6(a)可以发现, 当 Ag/LaNi_{0.75}Co_{0.25}O₃ 电触点材料失效后, 电触点的侵蚀表面存在细长裂纹和少量孔洞, 裂纹延伸至触点边缘, 同时触头表面出现银聚集区 A 和氧化物聚集区 B; 由图 6(b)可观察

到银聚集区内分布着花瓣状银纳米片, 这些纳米片在触点表面随机分布, 各 Ag 片相互交叉, 可以推断这些 Ag 片是由物理气相沉积形成的; 图 6(c)所示为氧化物聚集区的微观形貌, 可观察到其表面为

杂乱的 La 氧化物和 Ag 氧化物组成,可能是由于 Ag 在高温和电弧的作用下气化,导致该区域氧化物聚集。Ag/LaNi_{0.75}Co_{0.25}O₃ 电触点材料失效是由于其硬度较低,耐电弧磨损能力较差,导致细长裂纹的

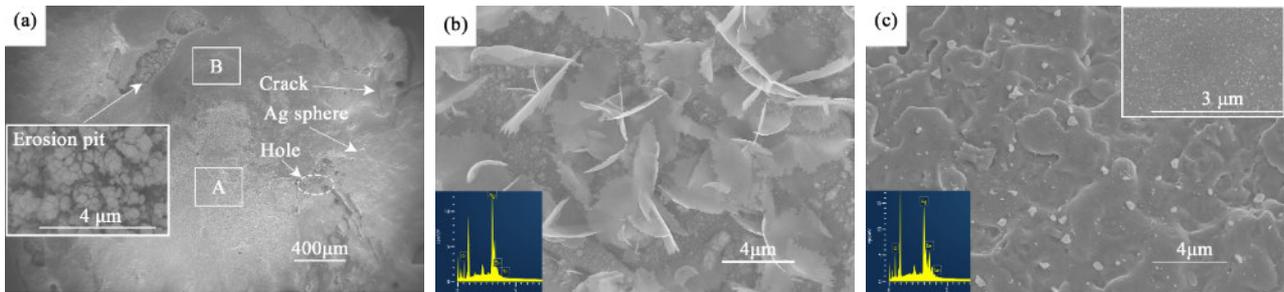
出现,而裂纹是电触点失效的主要原因,同时触头表面的氧化物聚集使得接触电阻增加,以至于电触点在机械与电弧冲击下缺相(断路)失效。



(a). contact surface; (b). rectangular areas of erosion pit; (c). rectangular areas of molten pool

图 7 电弧侵蚀后 Ag/LaNi_{0.5}Co_{0.5}O₃ 电触点表面微观结构

Fig.7 Surface arc ablation microstructures of Ag/LaNi_{0.5}Co_{0.5}O₃ electrical contact composites



(a). contact surface; (b). rectangular areas A; (c). rectangular areas B

图 8 电弧侵蚀后 Ag/SnO₂ 电触点表面微观结构

Fig.8 Surface arc ablation microstructures of Ag/SnO₂ electrical contact composites

由图 7(a)可见,Ag/LaNi_{0.5}Co_{0.5}O₃ 电触点材料失效后表面较平整,存在大量孔洞和小面积的侵蚀凹坑;图 7(b)为凹坑内的微观形貌,由 Ag 颗粒组装成珊瑚状,这是由于此处电弧热较集中,导致 Ag 最先从此处蒸发,凝固后即成为珊瑚状 Ag 颗粒;熔池表面(图 7(c))有大量 Ag 蒸发留下的气孔,气孔周围为 Ag 蒸汽沉积产生的 Ag 纳米颗粒,熔池成分主要是触头元件溅射到熔池内部的 Ag。Ag/LaNi_{0.5}Co_{0.5}O₃ 电触点材料失效是 Ag 大量蒸发之后触点材料接触电阻和温升升高导致的熔焊失效。

由图 8(a)可见,电触点电弧侵蚀表面除上述侵蚀形貌外还有明显的材料转移与液滴飞溅(虚线框内),而液滴飞溅为电触点失效的主要原因。侵蚀凹坑内为珊瑚状 Ag 颗粒,熔池表面 A 区域为 Ag 纳米片(图 8(b)),与 Ag/LaNi_{0.5}Co_{0.5}O₃ 电触点材料的侵蚀形貌类似;熔池 B 区域出现 Sn 聚集,(图 8(c))表面平整分布有 80~500 nm 的 Ag 颗粒。Ag 液滴飞溅

和熔池成分偏聚是 Ag/SnO₂ 电触点材料失效的主要原因。

3 结论

1) 用溶胶凝胶法在 900 °C 下煅烧 6 h 获得 20~30 nm 粒径的 LaNi_{1-x}Co_xO₃ 纳米颗粒。将 LaNi_{1-x}Co_xO₃ 纳米颗粒与银粉混合,再经过粉末冶金工艺成功制备出 Ag/LaNi_{1-x}Co_xO₃ 电触点材料。

2) Ag/LaNi_{1-x}Co_xO₃ 具有良好的电导率、硬度和力学性能。其中,Ag/LaNi_{0.5}Co_{0.5}O₃ 综合性能最佳:电阻率为 2.10 μΩ·cm,硬度为 972.16 MPa,密度为 9.85 g·cm⁻³,断后延伸率为 16.3%。

3) Ag/LaNi_{0.5}Co_{0.5}O₃ 电触点材料的电寿命性能达到最佳为 51287 次,比 Ag/SnO₂ 电触点材料提高了 20%。

参考文献:

- [1] 王金龙, 付翀, 宁静, 等. Ag-SnO₂ 电接触材料的研究进展及发展趋势[J]. 贵金属, 2021, 42(3): 85-92.
WANG J L, FU C, NING J, et al. Research progress and development trend of Ag-SnO₂ electrical contact materials[J]. Precious Metals, 2021, 42(3): 85-92.
- [2] 吴新合, 沈涛, 杨辉, 等. 环保型氧化物增强银基电接触功能复合材料研究进展[J]. 贵金属, 2021, 42(1): 79-87.
WU X H, SHEN T, YANG H, et al. Advances in eco-friendly oxide-reinforced silver-based electrical contact materials[J]. Precious Metals, 2021, 42(1): 79-87.
- [3] 沈涛, 张继, 穆成法, 等. 银金属氧化物触点材料电弧侵蚀退化机制研究进展[J]. 材料科学与工程学报, 2022, 40(6): 11.
SHEN T, ZHANG J, MU C F, et al. A review of arc erosion and degradation mechanism of silver metal-oxide electrical contact materials[J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2022, 40(6): 11.
- [4] YIN N A, WANG C, LIU X, et al. The resistance and arc erosion characteristics of Ag/LaFe_{1-x}Ni_xO₃ contact material [J]. International Journal of Modern Physics B, 2007, 21(15): 2635-2645.
- [5] 尹娜, 王成建, 刘雪燕, 等. Ag/La₂NiO₄ 复合触点材料的制备与性能[J]. 稀有金属材料与工程, 2006(6): 990-993.
YIN N, WANG C J, LIU X Y, et al. Preparation and performance of Ag/La₂NiO₄ composite contact materials[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2006(6): 990-993.
- [6] HE Q, YANG H, CHEN L, et al. Study on the mechanical alloying process for preparing Ag/LSCO electrical contact material[J]. Procedia Engineering, 2014, 94: 37-43.
- [7] WANG D D, TIAN W B, DING J X, et al. Anisotropic arc erosion resistance of Ag/Ti₃AlC₂ composites induced by the alignment of Ti₃AlC₂[J]. Corrosion Science, 2020: 171.
- [8] DING J, TIAN W, WANG D, et al. Microstructure evolution, oxidation behavior and corrosion mechanism of Ag/Ti₂SnC composite during dynamic electric arc discharging[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 785: 1086-1096.
- [9] YIN N, WANG H C, WANG C L. Effect of sintering temperature on morphology and arc erosion properties of La-Ni-O ceramic and its composites[J]. Journal of Rare Earths, 2009, 27(3): 506-509.
- [10] 尹娜, 王成建, 亓文鹏, 等. 添加剂对 Ag/陶瓷复合触点材料浸润性及电性能的影响[J]. 功能材料, 2006(12): 1895-1897.
YIN N, WANG C J, QI W P, et al. Influence of wettability on Ag/ceramic electrical contact materials[J]. Journal of Functional Materials, 2006(12): 1895-1897.
- [11] 刘雪燕, 王成建, 孙渝明, 等. Ag/LaFe_{1-x}Ni_xO_{3-δ} 触点电弧的多波长光谱测量[J]. 稀有金属材料与工程, 2007(12): 2240-2243.
LIU X Y, WANG C J, SUN Y M, et al. The multi-wavelength spectroscopy diagnostics of the breaking arc for Ag/LaFe_{1-x}Ni_xO_{3-δ} contact[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2007(12): 2240-2243.
- [12] 郑晓华, 吴君臣, 吴新合, 等. LaSrCuO₄ 粉体微结构对 Ag/LSCO 电接触材料性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2020, 49(4): 1306-1311.
ZHENG X H, WU J C, WU X H, et al. Effects of microstructure of LaSrCuO₄ powders on properties of Ag/LSCO electrical contact materials[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2020, 49(4): 1306-1311.
- [13] LI Z F, LI G B, SUN J L, et al. Structural and magnetic properties of ruddlesden-popper compounds in a double-perovskite family Sr_n(Fe, Ta)_nO_{3n}(SrO)[J]. Solid State Science, 2006, 8(9): 1035-1040.
- [14] CHOUDHARY V R, UPHADE B S, BELHEKAR A A. Oxidative conversion of methane to syngas over LaNiO₃ perovskite with or without simultaneous steam and CO₂ reforming reactions: Influence of partial substitution of La and Ni[J]. Journal of Catalysis, 1996, 163(2): 312-318.
- [15] 吴艳波, 毕军, 魏斌斌. 双钙钛矿 La₂CoNiO₆ 无机纳米纤维的制备及超级电容器性能[J]. 物理化学学报, 2015, 31(2): 315-321.
WU Y B, BI J, WEI B B. Preparation and supercapacitor properties of double-perovskite La₂CoNiO₆ inorganic nanofibers[J]. Acta Physico-Chimica Sinica, 2015, 31(2): 315-321.
- [16] LAL G, PUNIA K, DOLIA S N, et al. Structural, cation distribution, optical and magnetic properties of quaternary Co_{0.4+x}Zn_{0.6-x}Fe₂O₄ (x=0.0, 0.1 and 0.2) and Li doped quinary Co_{0.4+x}Zn_{0.5-x}Li_{0.1}Fe₂O₄ (x=0.0, 0.05 and 0.1) nanoferrites[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020, 828: 154388.
- [17] DHAYAL V, HASHMI S Z, KUMAR U, et al. Spectroscopic studies, molecular structure optimization and investigation of structural and electrical properties of novel and biodegradable Chitosan-GO polymer nanocomposites [J]. Journal of Materials Science, 2020, 55(30): 14829-14847.