



操作次数对 Ag/ZnO 电触头 电弧侵蚀行为的影响

徐国富^{1,2}, 黄润章¹, 元 梦¹, 吴 琮¹, 吴春萍^{1,2}

(1. 中南大学 材料科学与工程学院, 长沙 410083;

2. 中南大学 有色金属材料科学与工程教育部重点实验室, 长沙 410083)

摘 要: 通过电弧侵蚀模拟实验、三维轮廓仪(3DOP)和扫描电镜(SEM)等, 研究操作次数对 Ag/ZnO 电触头电弧侵蚀行为的影响。结果表明: 不同操作次数下, Ag/ZnO 电触头电弧能量概率分布与电弧时间概率分布相似, 电弧能量平均值与电弧时间平均值变化趋势一致。当操作次数为 10000 次时, Ag/ZnO 电触头的电弧能量、电弧时间、温度变化、质量变化均最大, 而电阻率变化最小。随着操作次数的增加, Ag/ZnO 电触头表面形貌变化越来越大; 相同操作次数下, 阳极电触头表面形貌变化比阴极大。在电弧作用下, Ag/ZnO 电触头主要发生喷溅侵蚀, 并在触头表面观察到热水袋状、甜甜圈状、丝状等不常见典型电弧侵蚀形貌特征。

关键词: Ag/ZnO 电触头; 操作次数; 电弧侵蚀

文章编号: 1004-0609(2021)-05-1285-14

中图分类号: TG146.3

文献标志码: A

引文格式: 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. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-39771

XU Guo-fu, HUANG Run-zhang, YUAN Meng, et al. Influence of operation numbers on arc erosion behavior of Ag/ZnO electrical contact materials[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021, 31(5): 1285–1298. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-39771

银氧化锌(Ag/ZnO)是 20 世纪 60 年代末至 70 年代初发展起来的一种新型电触头材料^[1-2]。已有研究表明^[3-9], 尽管 Ag/SnO₂ 电触头材料可在大范围内代替享有“万能触点”美誉的 Ag/CdO, 但 Ag/SnO₂ 在阻性载荷下的电接触特性却远低于 Ag/ZnO。同时, Ag/ZnO 电触头材料的生产成本和 Ag/SnO₂ 基本相同, 且不会危害人体及环境^[10]。此外, Zn 属于元素周期表中 IIB 族, 其物理化学特征与 Cd 相似、氧化物蒸气压也与 Cd 相近, 且 Zn 的熔点为 1795 °C, 其热稳定性比 CdO 高。因此, Ag/ZnO 电触头因具有优良的抗熔焊性、好的耐电弧侵蚀性、低而稳定的接触电阻、易焊接等特点而成为电工材料领域中的研究热点^[11-16]。现有关于 Ag/ZnO 电触头的研究主要集中在制备工艺的改

进、添加剂的使用和电性能的评估方面。吴春萍等^[17]的研究表明: 雾化粉末热锻法制备的 Ag/ZnO 电触头材料组织和性能(密度、硬度、电导率)都要优于粉末冶金法。WEI 等^[18]综合对比了固相法、共沉淀法、银镜反应以及水热反应法制备的 Ag/ZnO 电触头材料相关性能, 结果表明共沉淀法制备的 Ag/ZnO 电触头材料性能最佳。GUZMÁN 等^[19]采用热机械化学工艺制备了 Ag/ZnO 合金, 实现了银基体中第二相的弥散均匀分布。范莉^[20]研究发现, 采用化学共沉淀烧结工艺制备添加少量镍的 Ag/ZnO 电触头具有基体强化程度高, ZnO 粒子弥散分布均匀, 力学性能和电性能优良的特点。AKIRA^[21]在 Ag/ZnO 体系中添加 Ni 或 Co 的金属间化合物, 获得了具有稳定接触电阻和良好抗

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51601225); 湖南省自然科学基金资助项目(2018JJ2510)

收稿日期: 2020-09-10; 修订日期: 2020-12-28

通信作者: 吴春萍, 副研究员, 博士; 电话: 13548575302; E-mail: wcp PhD@126.com

熔焊性能的新型接触材料。JOSHIA 等^[22]的研究表明通过在 Ag/ZnO 体系中添加 1.0%(质量分数)LiNO₃ 改善了烧结密度,并获得了细小而弥散的球形氧化物相。SCHOEPP 等^[23]通过添加钨酸银(Ag₂WO₄)和钼酸银(Ag₂MoO₄)改善 ZnO 颗粒与基体 Ag 的润湿性,以保证 ZnO 颗粒在电弧作用下与基体 Ag 的结合能力。KIM 等^[24]研究表明:在 Ag-Zn 合金中添加微量 Cu 可使氧化物颗粒弥散分布在 Ag 基体上,而添加微量 Sn 则可使氧化物颗粒更细小,从而改善材料的组织和性能。此外,通过添加 CuO、Bi₂O₃ 和 MoO₃ 等物质也可以有效地改善 Ag 与 ZnO 间的界面润湿性,减少 Ag/ZnO 电接触材料中的缺陷,提高材料的烧结密度和导电性^[25-26]。WEI 等^[27]研究了 ZnO 制备方法对 Ag/ZnO 电触头材料电弧侵蚀行为的影响,首次采用 XPS 分析结果来预测银在电弧作用下的喷溅程度。AKBI 等^[28]研究了 Ag/ZnO 电触头材料的光电发射和工作功能,发现根据触点的使用情况(低压、高压、电弧持续时间等)可以预测电接触材料的性质。

然而,目前关于 Ag/ZnO 电触头材料电弧侵蚀行为的研究还不够系统和深入。电弧侵蚀过程中,Ag/ZnO 电触头材料电接触物理现象和表面形貌的变化机制还不够明确。本论文系统研究了操作次数对 Ag/ZnO 电触头材料电接触物理现象(电弧能量、电弧时间、熔焊力、接触电阻和温升)、电弧侵蚀率、宏观侵蚀形貌和微观侵蚀形貌的影响,旨在为 Ag/ZnO 电触头材料的设计和规模制造提供理论指导。

1 实验

1.1 测试触头

电触头的形状和接触方式如图 1 所示。动触头表面为曲面,静触头表面为平面。采用气体雾化烧结挤压工艺(Atomization-sintering-extrusion, ASE)制备的 Ag/ZnO(10)铆钉(Ag: 90%; ZnO: 10%, 质量分数)作为测试触头,其制造工艺流程图和物理性能分别如图 2 和表 1 所示。

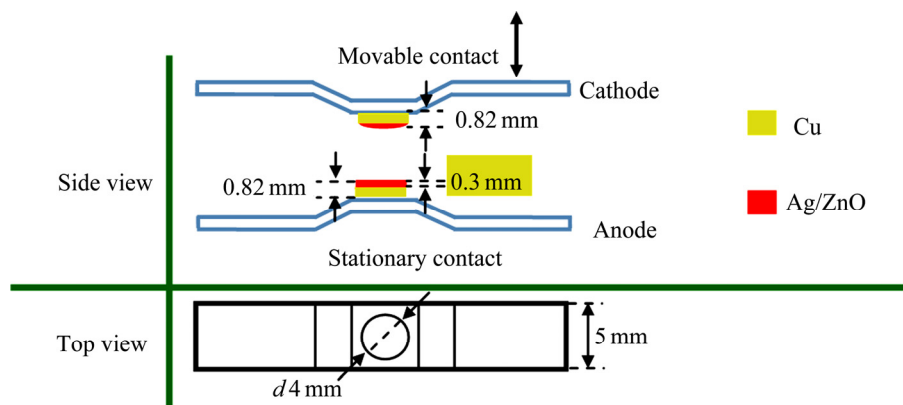


图 1 Ag/ZnO(10)电触头的形状和接触方式

Fig. 1 Shape and contact mode of Ag/ZnO(10) electrical contact material

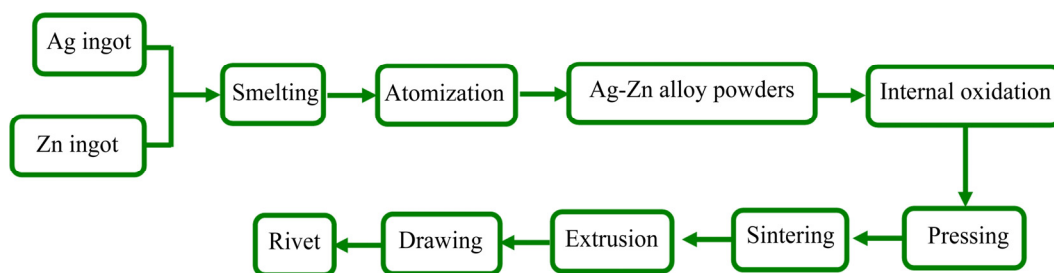


图 2 Ag/ZnO(10) 电触头制备工艺流程图

Fig. 2 Flow diagram of manufacture technology of Ag/ZnO(10) electrical contact material

1.2 电弧侵蚀试验

本实验采用小容量 ASTM 触头模拟动作与电性能测试系统(见图 3)对 Ag/ZnO(10)电触头材料进行通断试验, 此装置可以采集每次通断试验中的电弧能量、电弧时间、熔焊力、温度和接触电阻等参数。表 2 所列为电弧侵蚀试验条件参数。

表 2 电弧侵蚀试验条件参数

Table 2 Parameters of arc erosion test conditions

Parameter	Value
Frequency	0.67 Hz (On 0.3 s)
Operation number	1000, 3000, 5000, 10000, 20000, 30000, 40000
Switching mode	DC mode
Contact force	0.98 N
Surrounding gas	Air
Minimum arc voltage	10 V
Minimum arc current	0.7 A
Electrode spacing	2 mm
Circuit condition	DC19V, 20 A, Inductive load

1.3 分析测试手段

本实验采用电子天平测量电触头质量损失, 该

表 1 Ag/ZnO(10)电触头的物理性能

Table 1 Physical properties of Ag/ZnO(10) electrical contact material

Density/(g·cm ⁻³)	Electrical contact resistance/(μΩ·cm)	Hardness, HV _{0.3}	Strength of extension/MPa	Elongation after fracture/%
9.65	2.25	90	279	20

天平可准确测量质量变化 0.1 mg 以上。采用美国 WYKO NT9100 型三维光学轮廓仪(3DOP)观察 Ag/ZnO(10)电触头材料的三维宏观侵蚀形貌; 采用 Sirion-200 型的扫描电镜分析 Ag/ZnO(10)电触头材料的二维宏观和微观电弧侵蚀形貌。

2 结果与讨论

2.1 电接触物理现象

图 4 所示为 ASE 工艺制备的 Ag/ZnO(10)电触头材料在不同操作次数下电弧能量、电弧时间和熔焊力概率图(N 是操作次数, AD 是平均偏差, P 是概率因子)。Ag/ZnO(10)ASE 电触头材料电弧能量概率图(见图 4(a))表明: 当操作次数为 10000 次时, 电弧能量概率分布与其他操作次数时均不同, 电弧能量值也最大; 当操作次数为 1000 次和 3000 次时, 电弧能量概率分布具有 99% 的相似性, 其平均值也很相近(分别为 312.8 mJ 和 309.3 mJ); 当操作次数为 5000 次和 20000 次时, 电弧能量概率分布也基本相同(99% 的相似性); 40000 次时的电弧能量比 30000 次时的电弧能量要小。

Ag/ZnO(10)ASE 电触头材料电弧时间概率图

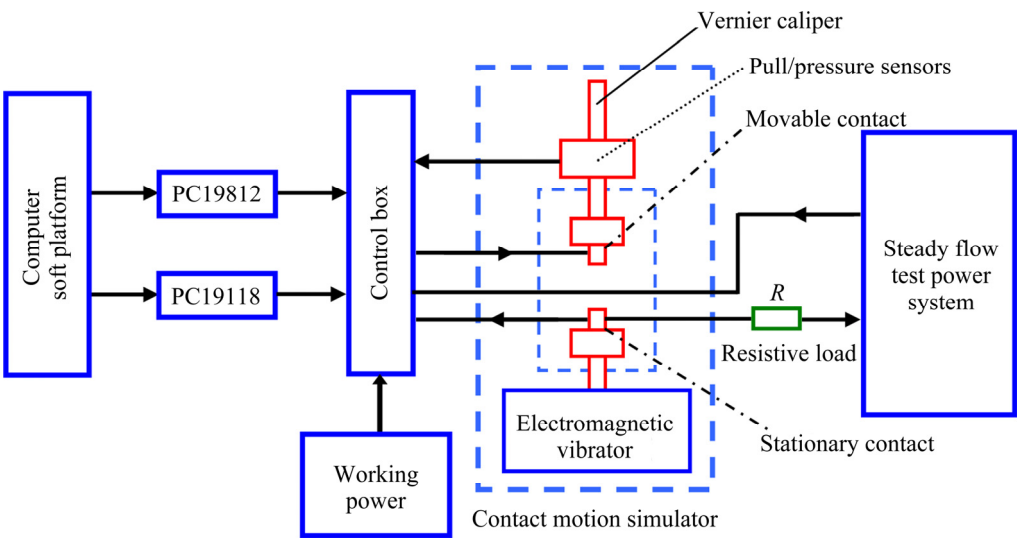


图 3 电弧侵蚀模拟实验装置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of experimental apparatus for simulating arc erosion

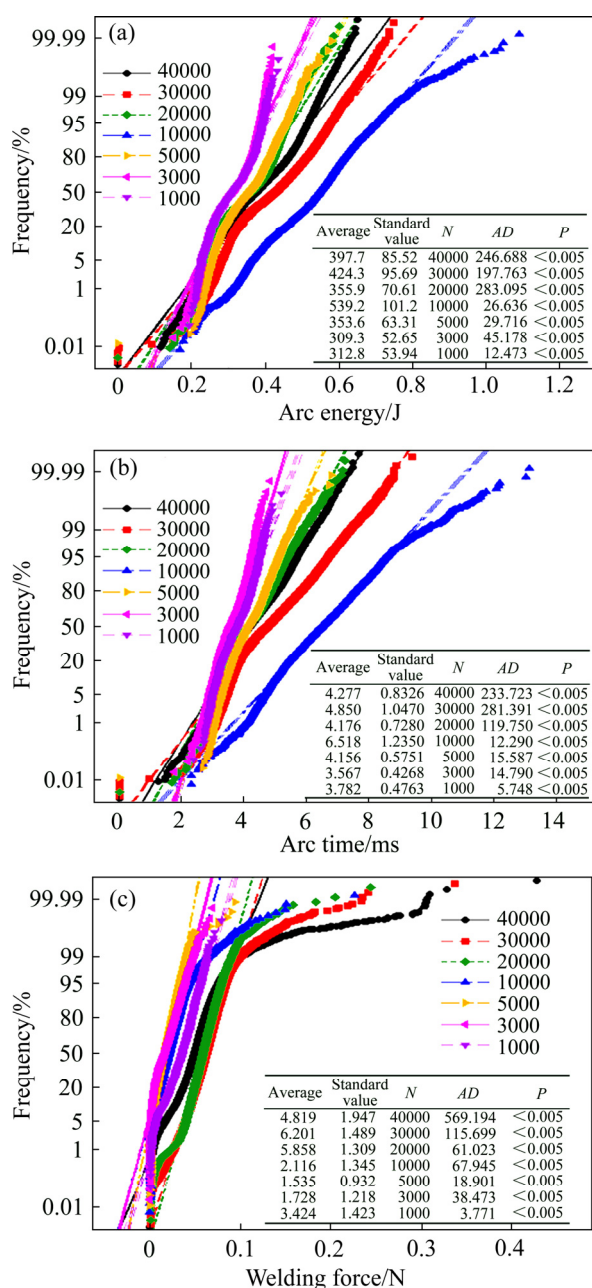


图 4 Ag/ZnO(10)ASE 电触头材料不同操作次数下的概率图

Fig. 4 Probability distribution of electrical contact physical phenomena of Ag/ZnO(10)ASE electrical contact materials during different operation numbers: (a) Arc energy; (b) Arc time; (c) Welding force

(见图 4(b))表明: 当操作次数为 10000 次时, 电弧时间的概率分布与电弧能量基本相同; 操作次数为 1000 次和 3000 次时, 电弧时间概率分布基本相同 (99% 的相似性); 操作次数为 5000 次、20000 次和 40000 次时, 电弧时间概率分布有 80% 的相似性; 操作次数为 30000 次时, 电弧时间比 40000 时次要

大; 操作次数为 10000 次时, 电弧时间最大。

Ag/ZnO(10)ASE 电触头材料熔焊力概率图(见图 4(c))表明: 操作次数为 3000 次、5000 次和 10000 次时的熔焊力概率分布基本相同, 99% 的熔焊力均小于 0.05 N; 操作次数为 1000 次的熔焊力稍大于 3000 次、5000 次和 10000 次, 99% 的熔焊力都小于 0.06 N; 操作次数为 20000 次、30000 次和 40000 次时的熔焊力均大于 1000 次, 99% 的熔焊力小于 0.1 N。

Ag/ZnO(10)ASE 电触头材料在不同操作次数下电弧能量、电弧时间和焊接力的平均值如图 5 所示。从图 5 可以看出: 随着操作次数的增加, Ag/ZnO(10)ASE 电触头材料电弧能量与电弧时间平均值变化趋势基本一致。当操作次数为 10000 次时, Ag/ZnO(10)ASE 电触头材料的电弧能量和电弧时间平均值最大, 分别为 539.2 mJ 和 6.518 ms。而在其他操作数(1000 次、3000 次、5000 次、20000 次、30000 次、40000 次)下, 电弧时间的平均值波动较小。操作次数从 1000 次增加至 10000 次, 电弧能量和电弧时间平均值随操作次数的增加而增大。随着操作次数的增加, Ag/ZnO(10)ASE 电触头材料熔焊力平均值变化趋势与电弧能量及电弧时间不同。当操作次数为 30000 次时, Ag/ZnO(10)ASE 电触头材料的熔焊力平均值最大(0.06 N)。操作次数从 1000 次增加到 5000 次, 熔焊力平均值随操作次数的增加而降低; 操作次数从 5000 次增加到 30000 次, 熔焊力平均值随操作次数的增加而增大。

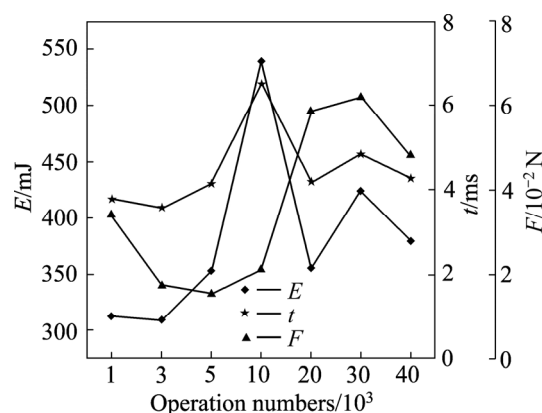


图 5 不同操作次数下 Ag/ZnO(10)ASE 电触头材料电弧能量、电弧时间和焊接力的平均值

Fig. 5 Average values of arc energy, arc time and welding force of Ag/ZnO(10)ASE electrical contact materials during different operation numbers

Ag/ZnO(10)ASE 电触头材料在不同操作次数下温度和电阻率变化值如图6所示。从图6可以看出:随着操作次数的增加,Ag/ZnO(10)ASE 电触头材料电阻率变化没有规律可循,而是呈锯齿状变化。当操作次数从1000次增加至10000次时,Ag/ZnO(10)ASE 电触头材料温升变化基本随着操作次数的增加而增大。当操作次数为20000次时,Ag/ZnO(10)ASE 电触头材料电阻率变化值最大(0.175 mΩ)。当操作次数为10000次时,Ag/ZnO(10)ASE 电触头材料温升变化最大,电阻率变化最小。

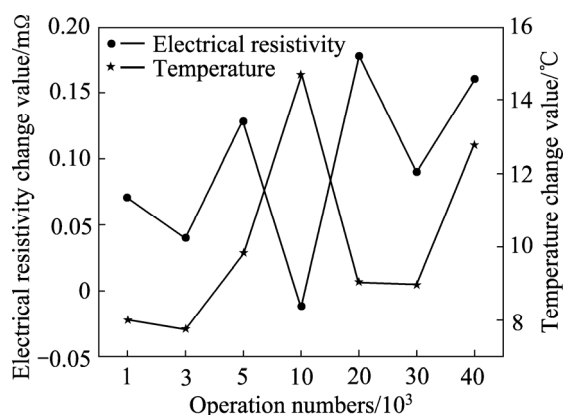


图6 不同操作次数下Ag/ZnO(10)ASE电触头材料温升和接触电阻变化的平均值

Fig. 6 Change value on electrical resistivity and temperature of Ag/ZnO(10)ASE electrical contact materials after different operation numbers

2.2 电弧侵蚀率

图7所示为ASE工艺制备Ag/ZnO(10)电触头材料在不同操作次数下的质量变化。从图7可以看出:在不同操作次数下,阴极电触头上的质量都降低了,其中操作次数为10000次时,电触头质量变化最大(1.2 mg);操作次数为3000次和5000次时,电触头质量变化相同且最小(0.2 mg)。当操作次数为5000次、30000次和40000次时,阳极电触头上的质量增加了,而在其他操作次数下(1000次、3000次、10000次和20000次),阳极电触头上的质量呈降低趋势,其中操作次数为1000次时,电触头质量变化最大,质量降低了0.5 mg。在不同操作次数下,阴阳两极电触头的总质量均降低。其中,操作次数10000次时的总质量变化最大(1.4 mg),操作次数5000次时的总质量变化最小(0.2 mg)。

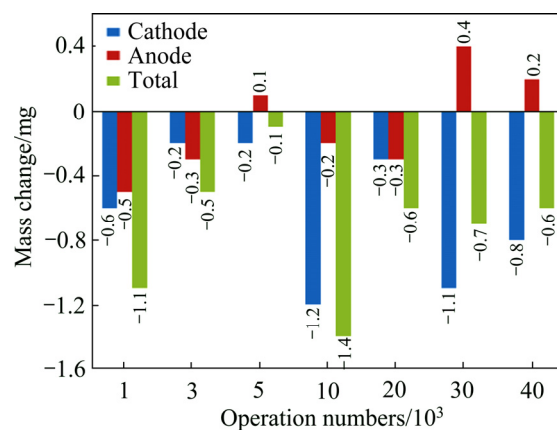


图7 Ag/ZnO(10)ASE电触头材料不同操作次数下的质量变化

Fig. 7 Mass change of Ag/ZnO(10)ASE electrical contact materials during different operation numbers

2.3 电弧侵蚀形貌

2.3.1 二维宏观电弧侵蚀形貌

图8所示为ASE工艺制备的Ag/ZnO(10)电触头材料在不同操作次数下阴、阳两极电触头的二维宏观电弧侵蚀形貌。从图8可以看出:当操作次数较小时(1000次),阴极电触头表面形貌变化不大,电触头表面中心出现了零星的几个点侵蚀,但阳极电触头表面则出现了圆形侵蚀斑。当操作次数为5000次时,阴极触头表面出现了较浅的圆形侵蚀斑,阳极电触头表面的侵蚀斑增大。随着操作次数的增加,阴、阳两极电触头表面形貌变化越来越显著,电触头表面出现的侵蚀斑也越来越大。在相同操作次数下,阳极电触头表面形貌变化比阴极严重。这说明随着操作次数的增加,电触头表面发生的电弧侵蚀越来越严重,且在相同操作次数下,阳极电触头上发生的电弧侵蚀比阴极严重。

图9所示为不同操作次数下ASE工艺制备的Ag/ZnO(10)电触头材料阴极、阳极和总侵蚀斑直径数据。从图9可以看出,在相同操作次数下,阳极电触头上侵蚀斑直径都要大于阴极。此外随着操作次数的增加阴极、阳极和总的侵蚀斑直径都增加。

2.3.2 三维宏观侵蚀形貌

二维宏观形貌可以直观地给出电弧侵蚀形貌在X和Y两方向上的变化,同时可以直观地给出侵蚀斑直径大小,但很难真正表征电接触材料在电弧侵蚀后表面轮廓的相关详细信息(如侵蚀坑的深度

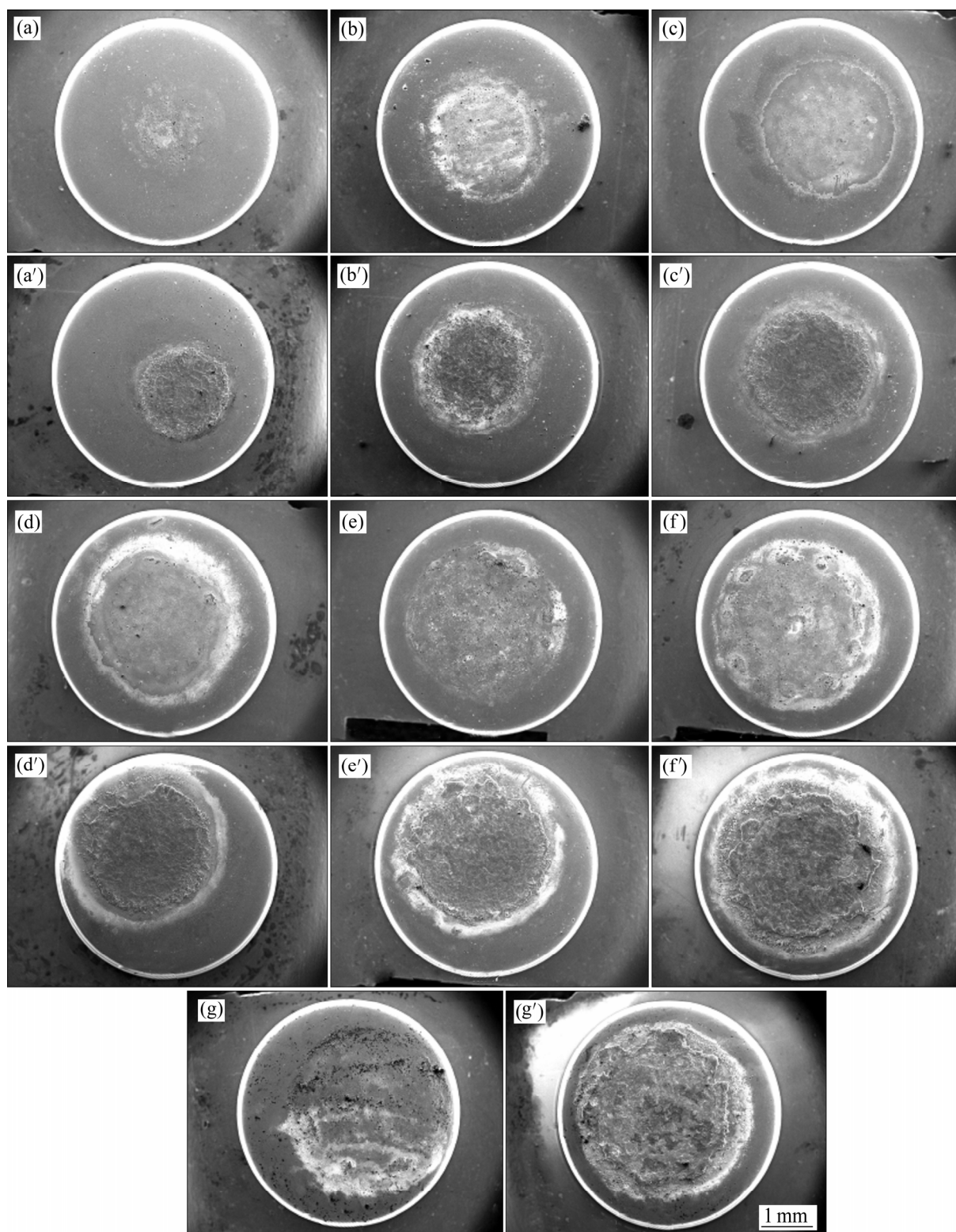


图 8 Ag/ZnO(10)ASE 电触头材料不同操作次数下的二维宏观电弧侵蚀形貌

Fig. 8 2D macroscopic morphologies of Ag/ZnO(10)ASE electrical contact materials after different operation numbers: (a) Cathode, 1000; (a') Anode, 1000; (b) Cathode, 3000; (b') Anode, 3000; (c) Cathode, 5000; (c') Anode, 5000; (d) Cathode, 10000; (d') Anode, 10000; (e) Cathode, 20000; (e') Anode, 20000; (f) Cathode, 30000; (f') Anode, 30000; (g) Cathode, 40000; (g') Anode, 40000

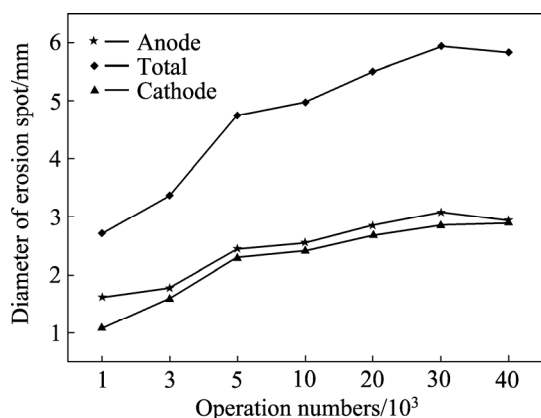


图 9 不同操作次数下 Ag/ZnO(10)ASE 电触头材料表面侵蚀斑直径

Fig. 9 Erosion spot diameter of Ag/ZnO(10)ASE electrical contact materials under different operation numbers

和宽度、转移峰的高度和宽度等)。而采用三维光学轮廓仪能够成功地获得各种有用的数据: 包括清晰的三维宏观表面电弧侵蚀形貌、侵蚀坑的深度和宽度、转移峰的高度和宽度等。图 10 所示为 ASE 工艺制备的 Ag/ZnO(10)电触头材料在不同操作次数下, 阴、阳两极电触头上的三维宏观电弧侵蚀形貌。从图 10 可以看出, 在电弧侵蚀作用下, Ag/ZnO(10)ASE 阴、阳两极电触头材料表面形貌均发生了变化, 且随着操作次数的增加, 阴、阳两极电触头表面形貌变化越来越大。当操作次数小于 5000 次时, 阴极电触头表面形貌变化不是很大, 而阳极电触头表面则出现了圆形的侵蚀斑, 且随操作次数的增加, 侵蚀斑的直径和深度都增加。当操作次数大于 5000 次时, 阴极电触头表面开始出现侵蚀小凸峰, 且随操作次数的增加, 小凸峰体积增大, 个数增多; 而阳极电触头表面的圆形侵蚀坑发生塌陷, 且随着操作次数的增加, 侵蚀坑塌陷越来越严重。随着操作次数的增加阳极触头上的侵蚀坑越来越大, 阴极触头上的侵蚀小凸峰个数越来越多, 体积越来越大。这说明随着操作次数的增加, 从阳极到阴极材料的转移越来越严重。在相同操作次数下, 阳极电触头表面的形貌变化比阴极电触头严重很多。因此, 在相同服役条件下, Ag/ZnO(10)ASE 阳极电触头上的电弧侵蚀比阴极电触头严重, 而且随着操作次数的增加, Ag/ZnO(10)ASE 电触头的电弧侵蚀越

来越严重。

2.3.3 二维轮廓剖面信息

图 11 所示为 ASE 工艺制备的 Ag/ZnO(10)电触头材料在不同操作次数下, 阴极和阳极电触头上的二维轮廓数据。当操作次数为 1000 次时, 阴极电触头 X 剖面 and Y 剖面轮廓变化不是很大(见图 11(a₁)); 而阳极电触头 X 剖面 and Y 剖面轮廓均发生了变化, X 剖面上右边的轮廓出现了塌陷, Y 剖面上则出现了侵蚀凹坑(见图 11(a₂))。当操作次数为 10000 次时, 阴、阳两极电触头 X 剖面 and Y 剖面轮廓均发生了变化, 阴极电触头 X 剖面出现了小凸峰和轻微塌陷, Y 剖面出现了小凸峰和较大塌陷(见图 11(b₁)); 阳极电触头 X 剖面 and Y 剖面均出现了较大的塌陷(见图 11(b₂))。当操作次数为 40000 次时, 阴极电触头 X 剖面出现了小凹坑, Y 剖面出现了小凸峰(见图 11(c₁)); 阳极电触头 X 剖面出现了凹坑和凸峰, Y 剖面则出现了凸峰和很严重的塌陷(见图 11(c₂))。因此, 随着操作次数的增加, Ag/ZnO(10)ASE 阴、阳极两极电触头二维轮廓变化越来越严重。

2.3.4 微观电弧侵蚀形貌特征

电弧侵蚀是一个复杂的物理化学过程, 它会导致材料的结构、成分和表面形貌发生变化。在电弧、各种磁、电的作用下, Ag/ZnO(10)ASE 电触头材料表面出现了不同的电弧侵蚀形貌特征。气孔、珊瑚状结构喷溅物、菜花结构喷溅物、熔银和裂纹是常见的电弧侵蚀形态特征。不同操作次数下, Ag/ZnO(10)ASE 电触头材料表面除了出现这些常见的电弧侵蚀形貌特征外, 还观察到了一些不同寻常的电弧侵蚀形貌特征, 如图 12 所示。从图 12 可以看出, 操作次数不同, 阴、阳两极电触头表面上的电弧侵蚀形貌特征不同; 在相同操作次数下, 阴、阳两极电触头表面上的电弧侵蚀形貌特征也不同。操作次数为 1000 次和 3000 次时, 阴极电触头表面上喷溅侵蚀物的形状分别为近球形(见图 12(a₁))和不规则形(见图 12(b₁)), 而且喷溅侵蚀物颗粒尺寸随着操作次数的增大而增大。操作次数为 1000 次和 3000 次时, 阳极电触头表面上都观察到了气孔。1000 次时的气孔尺寸细小且分布密集(见图 12(a₂)); 3000 次时的气孔少而大(见图 12(b₂))。操作次数为 5000 次时, 阴极电触头表面上出现了规则立方体形

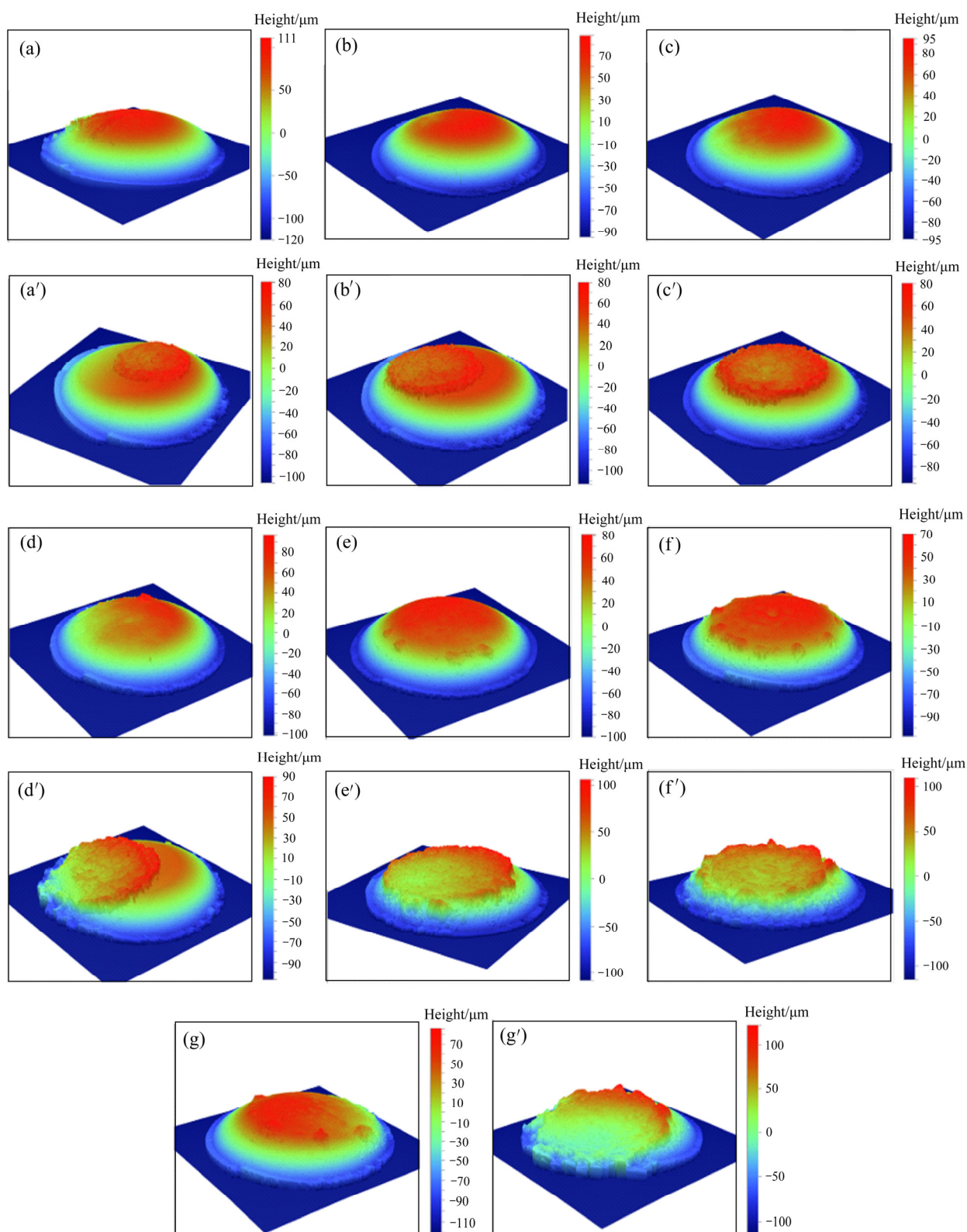


图 10 Ag/ZnO(10)ASE 电触头材料不同操作次数下三维宏观电弧侵蚀形貌

Fig. 10 3D macroscopic morphologies of Ag/ZnO(10)ASE electrical contact materials after different operation numbers: (a) Cathode, 1000; (a') Anode, 1000; (b) Cathode, 3000; (b') Anode, 3000; (c) Cathode, 5000; (c') Anode, 5000; (d) Cathode, 10000; (d') Anode, 10000; (e) Cathode, 20000; (e') Anode, 20000; (f) Cathode, 30000; (f') Anode, 30000; (g) Cathode, 40000; (g') Anode, 40000

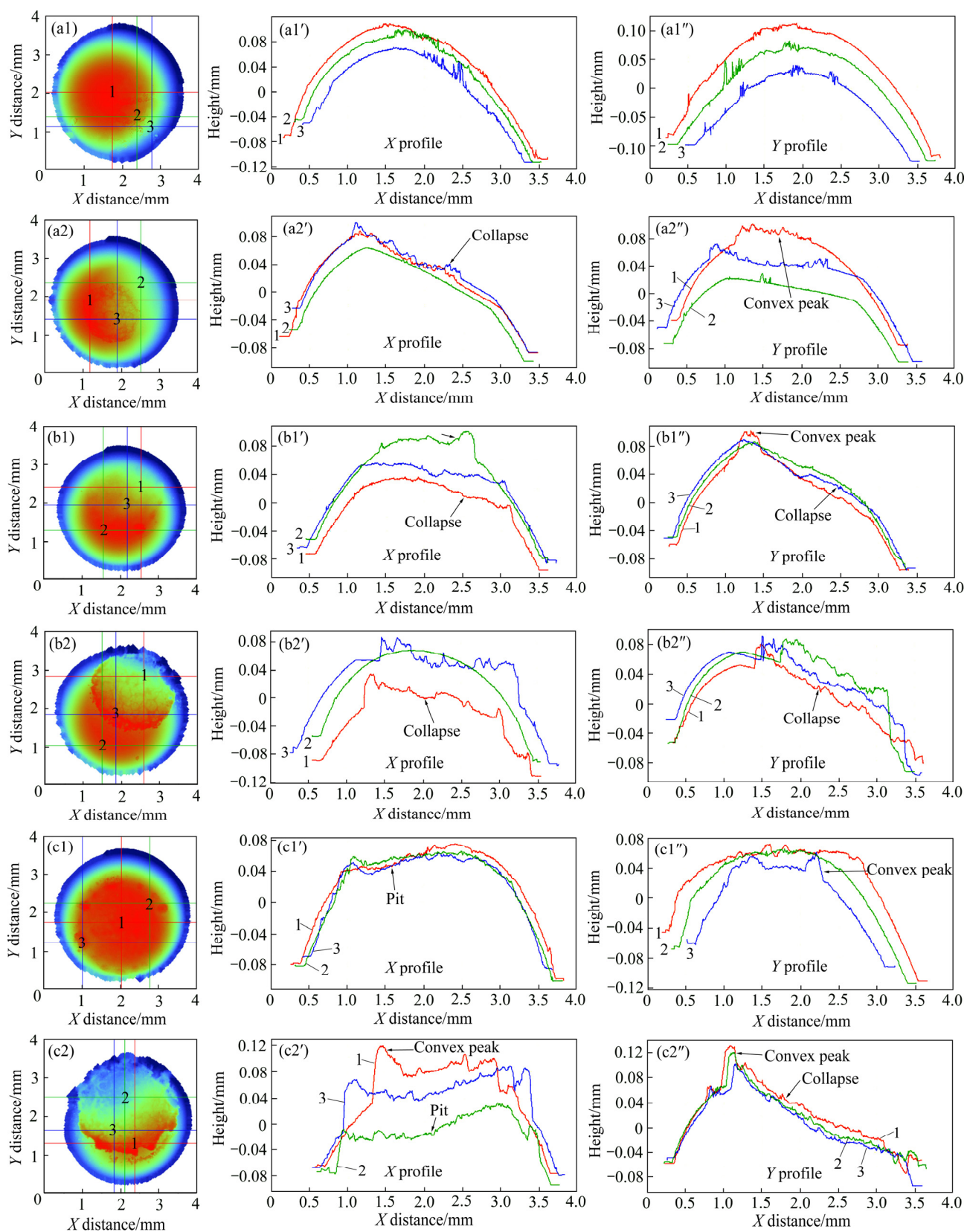


图 11 Ag/ZnO(10)ASE 电触头材料不同操作次数下的二维轮廓数据

Fig. 11 2D profiles of Ag/ZnO(10)ASE electrical contact materials after different operation numbers: (a1), (a1'), (a1''), (a2), (a2'), (a2'') 1000; (b1), (b1'), (b1''), (b2), (b2'), (b2'') 10000; (c1), (c1'), (c1''), (c2), (c2'), (c2'') 40000

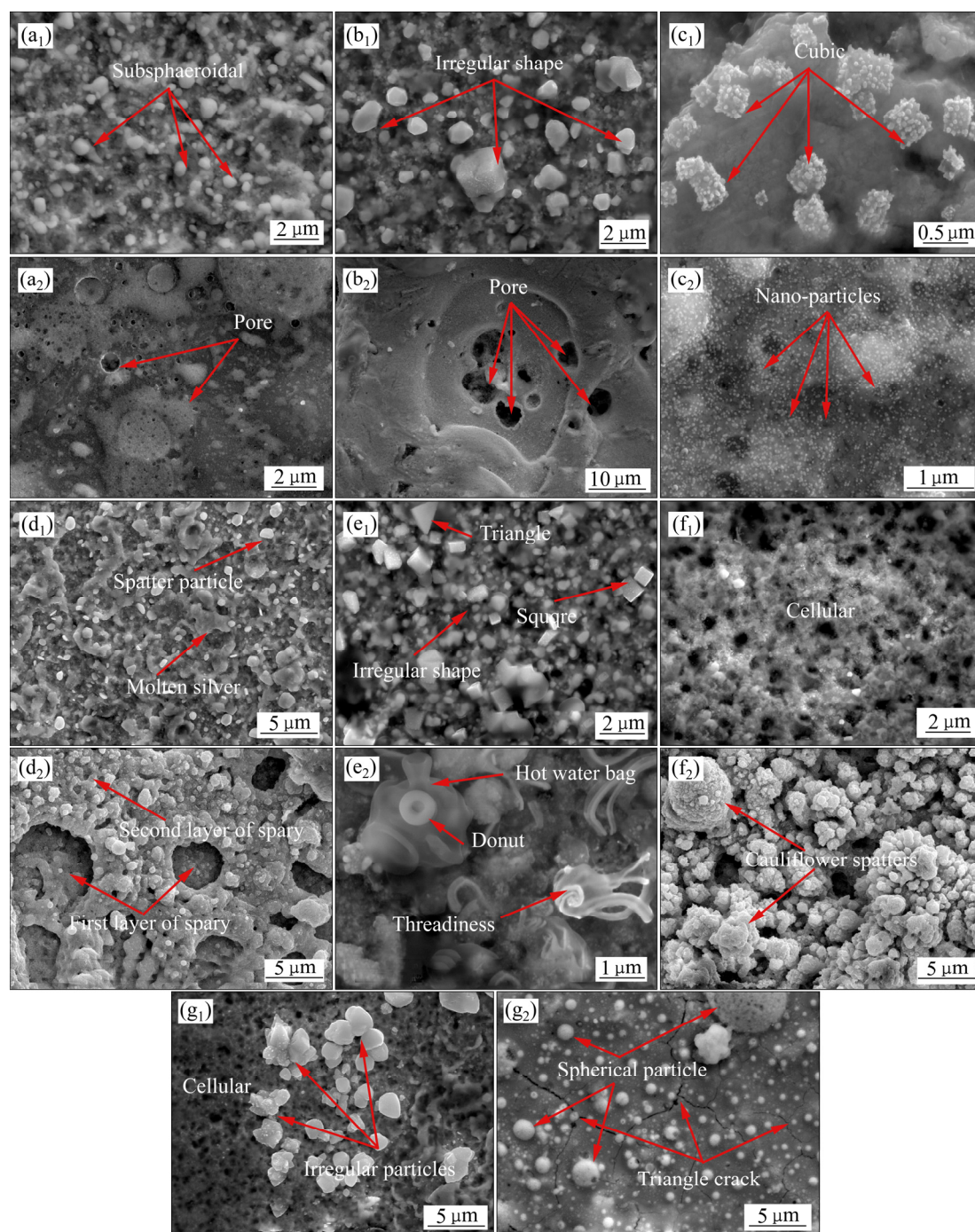


图 12 Ag/ZnO(10)ASE 电触头材料不同操作次数下的二维微观电弧侵蚀形貌

Fig. 12 2D microscopic arc erosion morphologies of Ag/ZnO(10)ASE electrical contact materials after different operation numbers: (a₁), (a₂) 1000; (b₁), (b₂) 3000; (c₁), (c₂) 5000; (d₁), (d₂) 10000; (e₁), (e₂) 20000; (f₁), (f₂) 30000; (g₁), (g₂) 40000

喷溅物，且规则立方体形喷溅物表面上观察到了细小的纳米级颗粒物(见图 12(c₁))。操作次数为 5000 次时，光滑平坦的阳极电触头表面上分布着纳米级的细小颗粒物(见图 12(c₂))。操作次数为 10000 次时，阴极电触头表面观察到了熔银和细颗粒喷溅物

(见图 12(d₁))；阳极电触头表面则观察到了至少两层的喷溅侵蚀产物，喷溅物均为颗粒状(见图 12(d₂))。操作次数为 20000 次时，阴极电触头表面观察到了不规则形、三角形和四方形喷溅物(见图 12(e₁))；阳极电触头表面观察到了丝状、甜甜圈状和热水袋状

电弧侵蚀产物(见图 12(e₂))。操作次数为 30000 次时, 阴极电触头表面观察到蜂窝状的电弧侵蚀形貌特征(见图 12(f₁)); 阳极电触头表面观察到了菜花状的电弧侵蚀产物(见图 12(f₂))。操作次数为 40000 次时, 阴极电触头表面观察到蜂窝状的电弧侵蚀形貌特征, 并在蜂窝状表面上观察到了不规则形状喷溅物(见图 12(g₁)); 阳极电触头表面则观察到了较多的三角裂纹和尺寸大小不等的球形喷溅物(见图 12(f₂))。

图 13 所示为 ASE 工艺制备的 Ag/ZnO(10)电触头材料在 10000 次操作后阴极电触头表面喷溅区的形貌特征和成分分析。从图 13 可以看出, 10000 次操作后, 阴极电触头表面上发生了严重的喷溅侵蚀, 并在表面上留下了颗粒大小不等的喷溅侵蚀产物。图 13(b)和图 13(c)的高倍照片表明: 菜花状的喷溅产物是由更细小的颗粒堆积而成。由图 13(d)可知, 喷溅产物由 Ag、Zn、O 元素组成, 其中 Ag

的质量分数为 58.21%、O 的质量分数为 13.39%、Zn 的质量分数为 28.39%。O 和 Zn 的摩尔比接近 2, 说明喷溅产物中除了含 28.39%氧化锌(ZnO)外, 银中还溶解了近 22%(摩尔分数)的 O。未发生电弧侵蚀前, Ag/ZnO(10)ASE 电触头中 Ag 的质量分数是 90%, 而喷溅产物中 Ag 的质量分数为 58.21%, 说明在电弧侵蚀作用下有近 32%的 Ag 发生了喷溅侵蚀。前面的电弧侵蚀率结果也表明, 当操作次数为 10000 次时的, 阴极电触头上质量变化最大(1.2 mg)。因此, Ag/ZnO(10)ASE 电触头在电弧作用下主要发生银的喷溅侵蚀。此外, 在电弧侵蚀过程中, 银的熔点较低(961 °C), 容易熔化和蒸发。一方面, 银的熔化增加了氧在银中的溶解度, 导致接触表面的氧含量增加。另一方面, 银的蒸发降低了接触表面的银含量。因此, 喷溅产物中 Ag 的由于发生喷溅而含量降低, 而氧则由于溶解了空气中的氧而含量增加。

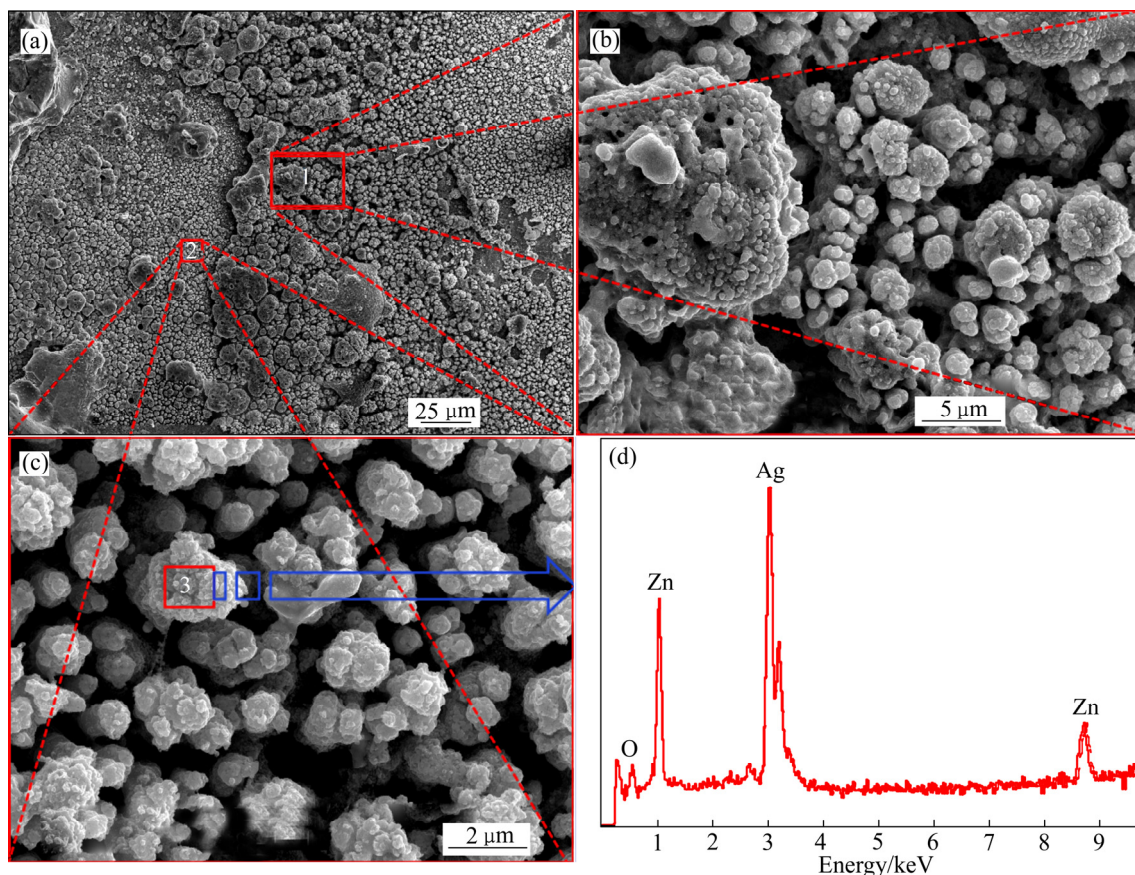


图 13 Ag/ZnO(10)ASE 电触头材料喷溅侵蚀形貌及成分

Fig. 13 Splash erosion morphologies and compositions of Ag/ZnO(10)ASE electrical contact material during operation 10000 times: (a) Morphology of splash erosion area; (b) High magnification image of area 1 in Fig. 13(a); (c) High magnification image of area 2 in Fig. 13(a); (d) EDS result in region 3 in Fig. 13(c)

3 结论

1) 不同操作次数下, Ag/ZnO(10)ASE 电触头材料的电弧能量概率分布与电弧时间概率分布相似, 电弧能量平均值与电弧时间平均值变化趋势一致。当操作次数为 10000 次时, Ag/ZnO(10)ASE 电触头材料的电弧能量平均值、电弧时间平均值、温度变化值和质量变化值最大, 而电阻率变化值却最小。

2) 在电弧作用下, Ag/ZnO(10)ASE 电触头材料主要发生的是喷溅侵蚀, 阴极电触头上出现小凸峰, 阳极电触头上出现侵蚀坑。在相同操作次数下, 阳极触头上的电弧侵蚀比阴极严重。随着操作次数的增加, 电触头材料表面形貌变化越来越严重, 材料发生的电弧侵蚀也越来越严重。在 Ag/ZnO(10)ASE 电触头材料表面除出现了典型形貌(气孔、熔银、裂纹等)外, 还观察到了热水袋状、甜甜圈状、丝状及表面附着纳米颗粒的规则立方体形的电弧侵蚀形貌特征。

REFERENCES

- [1] 胡建新, 黄道荣. Ag/ZnO/Cu 复合铆钉触头材料的研究[J]. 上海有色金属, 1994(2): 92–95.
HU Jian-xin, HUANG Dao-rong. Study on Ag/ZnO/Cu composite rivet contact material[J]. Shanghai Nonferrous Metals, 1994(2): 92–95.
- [2] JOSHI P B, RAO V J, REHANI B R, et al. Silver-zinc oxide electrical contact materials by mechanochemical synthesis route[J]. Indian J Pure Appl Phys, 2007, 45: 9–15.
- [3] 陶麒麟, 周晓龙, 周允红, 等. AgCuO 电触头材料的电接触性能[J]. 中国有色金属学报, 2015, 25(5): 1244–1249.
TAO Qi-ying, ZHOU Xiao-long, ZHOU Yun-hong, et al. Electrical contact properties of AgCuO electrical contact materials[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2015, 25(5): 1244–1249.
- [4] WU Q, XU G F, YUAN M, et al. Influence of operation numbers on arc erosion of Ag/CuO electrical contact material[J]. Journal of Materials Sciences (Materials in Electronics), 2020, 31(3): 2497–2513.
- [5] 许灿辉, 易丹青, 曹适意, 等. Ag-SnO₂ 复合材料的热压缩变形行为[J]. 中国有色金属学报, 2011, 21(9): 2091–2098.
- XU Can-hui, YI Dan-qing, CAO Shi-yi, et al. Hot compression behavior of Ag-SnO₂ composite material[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2011, 21(9): 2091–2098.
- [6] WU C P, YI D Q, LI J, et al. Investigation on microstructure and performance of Ag/ZnO contact material[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2008, 457: 565–570.
- [7] WU Q, XU G F, YUAN M, et al. Influence of operation numbers on arc erosion of Ag/CdO electrical contact[J]. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, 2020, 10(5): 845–857.
- [8] WU C P, YI D Q, WENG W, et al. Influence of alloy components on arc erosion morphology of Ag/MeO electrical contact materials[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2016, 26: 185–195.
- [9] WU C P, ZHAO Q, LI N N, et al. Influence of fabrication technology on arc erosion of Ag/10SnO₂ electrical contact materials[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 766: 161–177.
- [10] JOSHI P B, MURTI N S S, GADGEEL V L, et al. Preparation and characterization of Ag-ZnO powders for applications in electrical contact materials[J]. J Mater Sci Lett, 1995, 14: 1099–1101.
- [11] GAVRILLIU S, LUNGU M, ENESCU E. A comparative study concerning the obtaining and using of some Ag/CdO, Ag/ZnO and Ag/SnO₂ sintered electrical contact materials[J]. Optoelectronics and Advanced Materials-Rapid Communications, 2009, 3(7): 688–692.
- [12] SEKIKAWA J, SUGIA T, KUBONO T. Relationship between arc duration and motion of arc spots for break arcs of Ag and Ag/ZnO electrical collects[J]. IEICE T Electron, 2008, E91(8): 1249–1254.
- [13] SEKIKAWA J, MORIYAMA N, KUBONO T. Time resolved spectroscopic temperature measurement of break arcs in a DC42 V resistive circuit[J]. IEICE T Electron, 2008, E91(8): 1268–1272.
- [14] SEKIKAWA J, KUBONO T. Effect of contact materials of Ag/SnO₂ and Ag/ZnO on rotational motion of break arcs driven by radial magnetic field[J]. IEICE T Electron, 2010, E93(9): 1387–1392.
- [15] ARDESTANI M, ZAKERI M, NAYYERI M J, et al. Synthesis of Ag-ZnO composites via ball milling and hot

- pressing processed[J]. Mater Sci-Poland, 2014, 32(1): 121–125.
- [16] SCHOEPF T J, BEHRENS V, HONIG T, et al. Development of silver zinc oxide for general purpose relays[J]. IEEE Transactions on Parts, Hybrids and Packaging, 2002, 25(4): 656–662.
- [17] 吴春萍, 易丹青, 李 荐, 等. 制备工艺对 Ag-ZnO 触头材料组织与性能的影响[J]. 贵金属, 2007, 28(2): 298–33.
- WU Chun-ping, YI Dan-qing, LI Ji, et al. Effect of fabrication method on microstructure and performance of Ag-ZnO electrical contact materials[J]. Precious Metal, 2007, 28(2): 298–33.
- [18] WEI Zhi-jun, ZHANG Ling-jie, SHEN Qian-hong, et al. Preparation by different methods and characterization of Ag/ZnO composite for application in electrical contact materials[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2016, 45(1): 513–517.
- [19] GUZMÁN D, AGUILAR C, ROJAS P, et al. Production of Ag-ZnO powders by hot mechanochemical processing[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2019, 29: 365–373.
- [20] 范 莉. 化学共沉淀法制备 Ag-ZnO 复合材料的显微组织和性能[J]. 粉末冶金工业, 2013, 23(5): 26–29.
- FAN LI. Microstructure and properties of Ag-ZnO composites prepared by chemical co-precipitation[J]. Powder Metallurgy Industry, 2013, 23(5): 26–29.
- [21] AKIRA S. Composite electrical contact material comprising Ag and intermetallic compounds. US3880777[P]. 1975.
- [22] JOSHIIA P B, KROSNAN P S, PATEL R H, et al. Effect of lithium addition on density and oxide phase morphology of Ag-ZnO electrical contact materials[J]. Mater Lett, 1997, 33: 37–141.
- [23] SCHOEPF T J, BEHRENS V, HONOG T, et al. Development of silver zinc oxide for general-purpose relays[J]. IEEE Trans CHMT, 2002, 25: 656–662.
- [24] YOSHIDA K, SAWA K, SUZUKI K, et al. Influence of nickel content on various characteristics of Ag/Ni contacts for electromagnetic contactors[C]// 2014 IEEE 60th Holm Conference on Electrical contacts (Holm), 2014: 1–5.
- [25] ZHENG X, WANG Q. The types and the formation mechanisms of AgNi contact morphology due to breaking arc erosion[C]// Proceedings of the 39th Holm Conference on Electrical Contacts, 1993: 97–102.
- [26] KIM J K, JANG D J, II J K, et al. The effect of the Zn contents on rapidly solidified Ag-Zn electric contact materials[J]. J Korean Inst Met Ma, 2008, 46(7): 443–448.
- [27] WEI Z J, ZHAGN L J, YANG H, et al. Effect of preparing method of ZnO powders on electrical arc erosion behavior of Ag/ZnO electrical contact material[J]. J Mater Res, 2016, 31(4): 468–479.
- [28] AKBI M, CHERIF M. Photoelectric emission and work function of silver-zinc oxide Ag-ZnO (92/8) pseudo-alloy electrical contacts[J]. Materials Science and Engineering, 2019, 634: 012032. doi:10.1088/1757-899X/634/1/012032.

Influence of operation numbers on arc erosion behavior of Ag/ZnO electrical contact materials

XU Guo-fu^{1,2}, HUANG Run-zhang¹, YUAN Meng¹, WU Qiong¹, WU Chun-ping^{1,2}

(1. School of Materials Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China;

2. Key Laboratory of Nonferrous Materials Science and Engineering,
Ministry of Education, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: The influence of operation numbers on arc erosion behavior of Ag/ZnO electrical contact material was studied by arc erosion simulation experiment, three-dimensional profilometer (3DOP) and scanning electron microscope (SEM), etc. The results show that the probability distribution of arc energy of Ag/ZnO electrical contact material is similar to that of arc time under different operation times, and the change trend of arc energy average value is consistent with that of arc time average value. When the operation number is 10000, the arc energy, arc time, temperature change, mass change of Ag/ZnO electrical contact material are the largest, and the resistivity change is the smallest. With the increase of operation numbers, the change of surface morphology of Ag/ZnO electrical contact material is more and more serious. Under the same operation numbers, the change of surface morphology on the anode more serious than that on the cathode. Under the action of arc erosion, Ag/ZnO electric contact material was mainly eroded by splashing, and the shape of hot-water bag, doughnut, filamentous and other atypical arc erosion topography is observed on the surface of Ag/ZnO electric contact material.

Key words: Ag/ZnO electrical contact material; operation numbers; arc erosion

Foundation item: Project(51601225) supported by the National Natural Science Foundation of China; Project (2018JJ2510) supported by the Hunan Provincial Natural Science Foundation of China

Received date: 2020-09-10; **Accepted date:** 2020-12-28

Corresponding author: WU Chun-ping; Tel: +86-13548575302; E-mail: wcpd@126.com

(编辑 龙怀中)