

Ag-MAX 电触头材料的研究现状及发展趋势

彭 韬, 谭志龙, 张晓波, 王兴宇, 罗仙慧, 巫小飞*
(贵研功能材料(云南)有限公司, 昆明 650106)

摘要: 电触头材料是继电器、电路开关、仪器仪表等电气设备中极为重要的组成部分, 承担接通、断开电路及负载电流的任务, 电触头材料的性能、质量好坏将直接影响仪器的寿命及使用可靠性。对近年来逐渐得到关注的 Ag-MAX 电触头材料进行简要介绍, 讨论了 Ag-MAX 电触头材料的种类、制备工艺及相关性能, 对 Ag-MAX 电触头材料的未来发展进行展望。

关键词: 电触头材料; Ag-MAX; 制备工艺; 发展趋势

中图分类号: TM501.3; TG146.3⁺² 文献标识码: A 文章编号: 1004-0676(2024)01-0070-08

Research status and development trend of Ag-MAX electrical contact materials

PENG Tao, TAN Zhilong, ZHANG Xiaobo, WANG Xingyu, LUO Xianhui, WU Xiaofei*
(Sino-Platinum Metals Functional Materials (Yunnan) Co. Ltd., Kunming 650106, China)

Abstract: Electrical contact materials are extremely important components of the electrical equipment such as relays, circuit switches, instruments, etc., for they are used for connecting or breaking circuits and loading currents. The performance and quality of electrical contact materials directly affect the life and reliability of the equipment. In this paper, we will briefly introduce Ag-MAX electrical contact materials that have gained attention in recent years, including their types, preparation process and related properties, as well as the future development.

Key words: electrical contact material; Ag-MAX; manufacturing process; development trends

电触头是由电接触材料制成的一组导电元件(工作时一般需要两只电触头配合), 它们彼此接触时能建立电路的连续性, 彼此分离时可以断开电路, 是影响低压电器寿命的关键部件, 被称为电器心脏。得益于银的高导热导电及价格低廉的特点, 银基电触头材料是目前电触头领域应用范围最广、用量最大的材料之一^[1-3]。但银本身的硬度、熔点较低且耐磨性不佳, 同时在高温及高湿度的环境下容易与环境中存在的硫元素反应生成硫化银薄膜, 这些问题的存在极大限制了银基电触头材料的应用^[4-5]。

目前, 通过添加其他元素或强化相是提升银基电触头材料硬度、抗熔焊、抗电弧侵蚀等性能的常见手段, 现阶段工业化应用较多的有 Ag-CdO、

Ag-SnO₂、Ag-Ni 等系列电触头材料, 其中“万能触头” Ag-CdO 作为最成功的银-氧化物电触头材料, 其所具有的优异抗熔焊性、抗电弧侵蚀能力及低而稳定的接触电阻使其曾广泛应用于多种低压电器中, 但由于 Cd 蒸汽的毒性, 近年来 Ag-CdO 正在逐渐淡出人们的视野^[6-8]。

目前, 最有望替代 CdO 的增强相是 SnO₂ 以及 ZnO, 并且通过不断努力两种新型材料的性能都已达到甚至部分超越了 Ag-CdO 材料。但不得不注意的是, Ag-SnO₂ 及 Ag-ZnO 材料虽能基本满足在低压电器中的使用, 但这两种新型材料存在加工性能差, 以及长时间工作后接触电阻增大、温升增加、强度下降的问题, 在很大程度上限制了新型材料的

收稿日期: 2022-11-21

基金项目: 云南省技术创新人才项目(2019HB107); 中央引导地方科技发展基金(202207AC110006)

第一作者: 彭 韬, 男, 硕士, 助理工程师; 研究方向: 稀贵金属材料; E-mail: pengt@ipm.com.cn

*通信作者: 巫小飞, 男, 高级工程师; 研究方向: 稀贵金属材料; E-mail: wxf@ipm.com.cn

应用及发展^[9-11]。近年来, $M_{n+1}AX_n$ 相(简称 MAX 相)因其兼具金属及陶瓷特性的优势而逐渐受到电触头材料领域学者的注意, 以 MAX 相作为强化相的复合电触头材料展现出了优异的电性能, 在低压电器领域拥有巨大的应用潜力^[12-13]。

1 MAX 相简介

MAX 相属于六方晶系, 是一类三元纳米层状过渡金属化合物^[14], 该类化合物最早由 Nowotny 团队^[15]首次制备得到, 而后在 1990 年代受到广泛关注。MAX 相组成元素种类众多, 其中 M 为前过渡金属元素(包括 Sc、Ti、Zr、Hf、V、Nd、Ta、Cr、Mo、Mn), A 为主族元素(包括 Cd、Al、Ga、In、Tl、Si、Ge、Sn、Pb、P、As、Bi、S), X 为 C 或 N, 其中 $n=1\sim 3$, 由此可大致将 MAX 相分为 211 系列: 如 Ti_2SnC ^[16]、 Ti_2AlN ^[17]等, 312 系列: 如 Ti_3SiC_2 ^[18]、 Ti_3AlC_2 ^[19]等, 413 系列如 Ti_4AlN_3 ^[20]、 Nb_4AlC_3 ^[21]等。

在 MAX 相中, M-A 键具明显的金属键特征, 而 M-X 键则以较强的共价键及离子键结合, 这种独特的结构使得 MAX 相兼具金属及陶瓷的特性^[22], 其层片状结构如图 1 所示。针对金属特性, MAX 相拥有良好的导热导电性及加工性能, 但硬度相对较低^[23-24]。而针对陶瓷特性, MAX 相具有高熔点、高强度以及优异的热稳定性及抗氧化性能。MAX 相的添加既可作为增强相增强基体并提升整体材料强度, 同时又可作为润滑剂增强材料的耐磨性能^[25-27]。

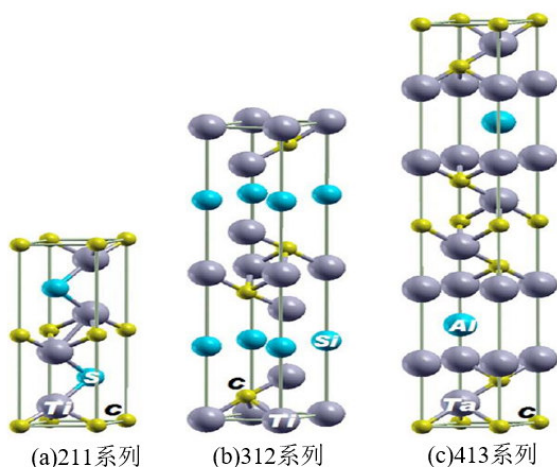


图 1 三种典型 MAX 相的结构示意图^[14]

Fig.1 Schematic diagrams of three representative MAX phases

2 Ag-MAX 电触头材料研究现状

MAX 相特殊的性能优势使得其在电触头材料领域有着较大的应用前景, MAX 相在电触头材料中的研究前期主要集中在 Cu 基材料中, 大量研究表明 MAX 相的添加并未对 Cu 基材料的导电性及加工性能产生严重影响, 反而提升了材料的分断能力、抗电弧侵蚀能力等电性能^[28-32]。近年来, 关于 MAX 相在 Ag 基触头材料中的应用也有了一定研究, 但现有的研究及报道主要集中于 Ti_3AlC_2 、 Ti_3SiC_2 及 Ti_2SnC 相等, 下文对这三种 MAX 相应用于银基电触头材料中的国内外研究现状进行讨论。

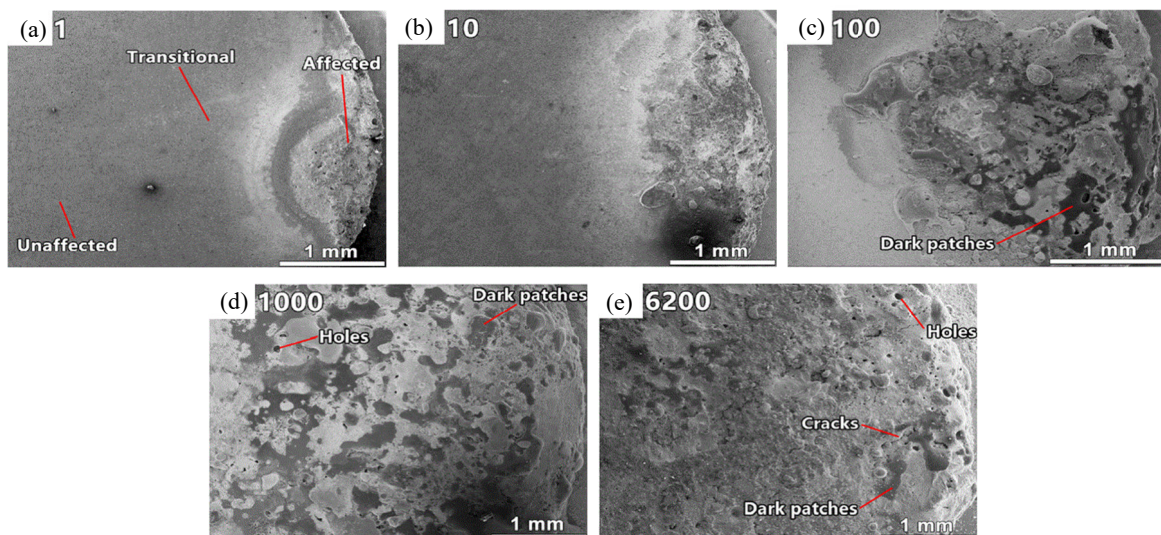
2.1 Ag- Ti_3AlC_2 电触头材料

Liu 等^[33]使用热压烧结制备了 Ag- Ti_3AlC_2 材料, 研究了不同 Ti_3AlC_2 相添加量对材料微观形貌、致密度、硬度、电阻率及拉伸强度的影响, 并在室温下对该材料、纯银、Ag-石墨复合材料进行了性能对比, 如表 1 所示。Ag- Ti_3AlC_2 材料电阻率、硬度随 Ti_3AlC_2 相含量增加而增加, 而抗拉强度则呈先上升后下降的趋势。结果表明, Ag- Ti_3AlC_2 材料能够在保持导电率与传统 Ag-石墨复合材料相同的情况下大大提升机械性能, 是一种极具潜力的新型电触头材料。

Ding 等^[34]对比分析了在 100A/400V/AC 条件下 Ag-10% Ti_3AlC_2 、Ag-20% Ti_3AlC_2 材料与商用 Ag-CdO 材料的电弧侵蚀行为, 结果发现 Ag-10% Ti_3AlC_2 的抗电弧侵蚀性能与 Ag-CdO 相近, Ti_3AlC_2 与 Ag 基体间的良好润湿性有效限制了熔融 Ag 的流动与飞溅。Ding 等^[35]进一步对 Ag-10% Ti_3AlC_2 材料进行动态电弧放电实验指出, 放电循环次数的不同在材料表面产生了如图 2 所示的前期(未受侵蚀)、中期(过渡区)和后期(完全侵蚀)三种侵蚀情况, 电弧侵蚀前期(图 2(a~b)), MAX 相将发生轻微分解, 生成少量 TiC_x 及部分 Al 元素, Al 元素将与 Ag 基体发生扩散, 同时少量 Al 元素发生汽化, Al 元素的损耗会导致 MAX 相呈多孔结构从而加速氧化。在侵蚀中期(图 2(c~d)), Ag 基体的融化, O_2 的吸收以及 Ag-O 的沉积导致了颗粒状及条状 Ag 的出现而形成过渡区, 并伴随着 Ti_3AlC_2 相快速的分解及氧化。在进一步侵蚀后, Al 原子的蒸发及扩散导致了 Ti_3AlC_2 相继续氧化并最终生成了 Ti_xO_y 氧化物, 氧化物的出现最初延缓了材料的整体氧化,

表 1 Ag-Ti₃AlC₂、纯银及 Ag-石墨复合材料室温性能对比^[33]Tab.1 Room temperature properties of pure silver, Ag-Ti₃AlC₂ and Ag-graphite composites

材料	HV _{0.1}	抗拉强度/MPa	延伸率/%	电阻率/($\mu\Omega\cdot\text{cm}$)	导电率/%
纯银	72.5 ± 0.2	153.5 ± 0.5	10.57 ± 0.03	1.96 ± 0.01	87.89 ± 0.09
Ag-5%(V/V) Ti ₃ AlC ₂	94.5 ± 0.3	220.0 ± 0.7	7.92 ± 0.02	2.90 ± 0.01	59.52 ± 0.06
Ag-10%(V/V)Ti ₃ AlC ₂	101.5 ± 0.3	246.9 ± 0.7	5.69 ± 0.02	4.20 ± 0.02	41.04 ± 0.04
Ag-15%(V/V) Ti ₃ AlC ₂	112.0 ± 0.3	308.4 ± 0.9	4.22 ± 0.01	5.26 ± 0.03	32.83 ± 0.03
Ag-20%(V/V) Ti ₃ AlC ₂	136.3 ± 0.1	357.3 ± 1.1	3.81 ± 0.01	7.19 ± 0.04	23.98 ± 0.02
Ag-25%(V/V) Ti ₃ AlC ₂	139.7 ± 0.2	317.3 ± 0.9	3.48 ± 0.01	9.43 ± 0.03	18.34 ± 0.02
Ag-30%(V/V) Ti ₃ AlC ₂	169.0 ± 0.2	235.5 ± 0.7	2.73 ± 0.01	10.87 ± 0.01	15.91 ± 0.02
Ag-12.61%(V/V)石墨(3% <i>m/m</i>)	52	/	/	1.96	88
Ag-16.28%(V/V)石墨(4% <i>m/m</i>)	48	/	/	2.14	80.5
Ag-19.72%(V/V)石墨(5% <i>m/m</i>)	42	/	/	2.21	78

图 2 Ag-Ti₃AlC₂ 材料随放电次数(1~6200)增加的整体形貌变化^[35]Fig.2 Overall morphological evolution of Ag-10%Ti₃AlC₂ material with an increasing number (1~6200) of discharges

但随着电弧侵蚀的不断进行, Ti_xO_y 层最终被电弧完全侵蚀(图 2(e))。虽然 MAX 相分解在一定程度上吸收的部分电弧能量提高了材料的抗电弧侵蚀性能, 但 MAX 相的大量分解严重削弱了其对液态 Ag 流动及喷溅的限制能力, 进而导致 Ag 基体被严重破坏直至材料完全失效。

为探究 MAX 相颗粒分布特征对材料性能的影响, Wang 等^[36]使用等通道转角挤压法(ECAP)分别制备得到了 MAX 相颗粒排列方向平行及垂直于侵蚀表面的两组 Ag-Ti₃AlC₂ 材料, 并对两组样品的抗

电弧侵蚀性能进行了对比及分析, 图 3 为两组等通道转角挤压材料的抗电弧侵蚀机理示意图。

研究发现, 两组试样侵蚀后表面均出现了富 Ag 层, 且垂直组富 Ag 层厚度约为平行组的 4 倍, 表明垂直组试样所受电弧侵蚀温度较高从而导致其熔池较深。当 Ti₃AlC₂ 颗粒基面排布方向垂直于侵蚀表面时, 颗粒中的 Al 元素更易扩散并气化, 这将导致 Ti₃AlC₂ 相更轻易的被分解及氧化, 最终表现为样品抗电弧侵蚀性能低于颗粒排布方向平行于侵蚀表面的样品。

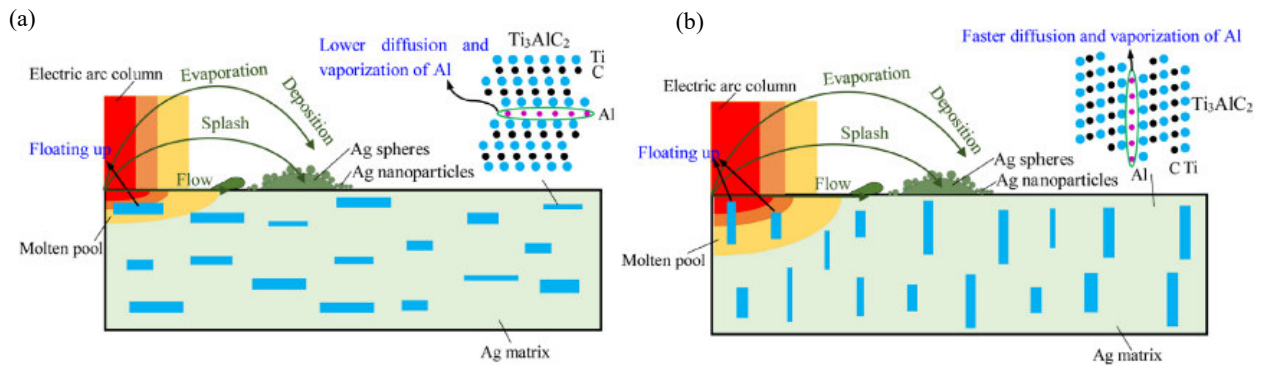


图 3 等通道转角挤压 Ag-Ti₃AlC₂ 电弧侵蚀示意图(Ti₃AlC₂ 相平行(a)及垂直(b)于接触面)^[36]

Fig.3 Schematic diagrams of ECAPed Ag/Ti₃AlC₂ with Ti₃AlC₂ alignment (a) parallel and (b) perpendicular to the contact surface

2.2 Ag-Ti₃SiC₂ 电触头材料

Zhang 等^[37]通过无压烧结法制备了 Ag-Ti₃SiC₂ 材料,并研究了不同工艺参数(成型压力、烧结温度、保温时间)对材料性能的影响。研究发现在成型压力为 800 MPa, 烧结温度 950℃下保温 1h 制得的材料具有较高的硬度、致密度并保持了良好的导电性,这主要得益于 Ti₃SiC₂ 相的陶瓷金属特性。制备得到的复合材料微观结构均匀,且 Ti₃SiC₂ 相与银基体间的相界面处并未发生明显反应,拥有较好的润湿性,这种非反应性润湿的特点为 Ag-Ti₃SiC₂ 材料带来了

较好的抗电弧侵蚀性能,表明 Ti₃SiC₂ 相在银基电接触材料中有较好的应用前景。

Alanazi 等^[38]对 Ag-Ti₃SiC₂ 材料的力学性能及摩擦磨损性能进行了研究,如图 4 所示。图 4 表明, Ti₃SiC₂ 增强相的添加在大幅提升材料屈服强度的同时,也有效增强了材料的耐磨性能,材料屈服强度由 47 MPa 提升至 164 MPa,增长了 3.5 倍,材料表面摩擦膜的生成是磨损率下降的主要原因,磨损率相较 Ag 基体下降了 12 倍。

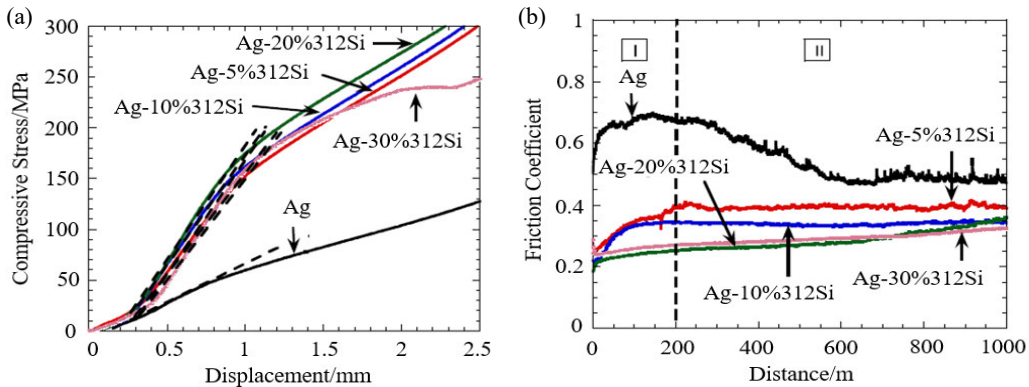


图 4 Ti₃SiC₂ 相的添加对 Ag 基体屈服强度(a)和摩擦系数(b)的影响^[38]

Fig.4 Effect of the addition of Ag matrix on the yield strength (a) and friction coefficient (b) of Ti₃SiC₂ phase

Wang 等^[39]对比分析了 Ag-Ti₃SiC₂ 和 Ag-Ti₃AlC₂ 复合材料的界面反应、物理性能及抗电弧侵蚀性能。对于 Ag-Ti₃AlC₂ 而言,由于 Al 元素在 Ag 中的固溶性良好且能与 Ag 生成固溶体,这促进了 Ag/Ti₃AlC₂ 的界面反应,而 Ti₃SiC₂ 相则在 Ag 基体中展现出了更高的结构稳定性,这样的差异也导致了二者物理性能的不同,烧结前后 Ag-Ti₃AlC₂ 的致密度均略高于 Ag-Ti₃SiC₂,且二者生坯时电阻率相当,但烧结过后 Ag-Ti₃AlC₂ 材料电阻率成倍增加,

远大于 Ag-Ti₃SiC₂ 材料。对材料进行电弧侵蚀实验的结果也表明,由于 Ag-Ti₃AlC₂ 的稳定性较差且电阻率更高,其在质量损失及侵蚀面积方面的表现均不如 Ag-Ti₃SiC₂ 材料。

目前电触头材料的研究大多集中于大气工作环境中,实际上电触头材料在不同工作气体介质中的抗电弧侵蚀机理也是不同的。应用于密封装置中的电触头材料大多工作气体介质为 SF₆,针对这种特殊的工作环境,Zhou 等人^[40-41]研究了 Ag-Ti₃SiC₂ 材

料在纯 SF_6 以及不同体积比的 SF_6/N_2 及 SF_6/CO_2 气体介质中的电弧侵蚀实验。结果发现,在纯 SF_6 气体介质中,多次电弧放电后,Ag 基体与 SF_6 气体反应,在材料表面生成了 Ag_2S ,使得电弧难以点燃,导致材料电弧击穿强度上升(如图 5)。

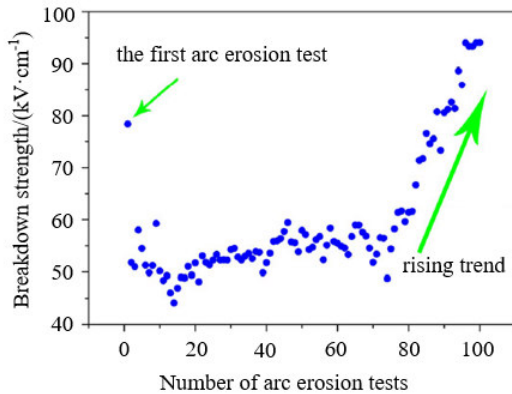


图 5 击穿强度与电弧侵蚀次数的关系^[40]

Fig.5 Relationship between breakdown strength and arc erosion number

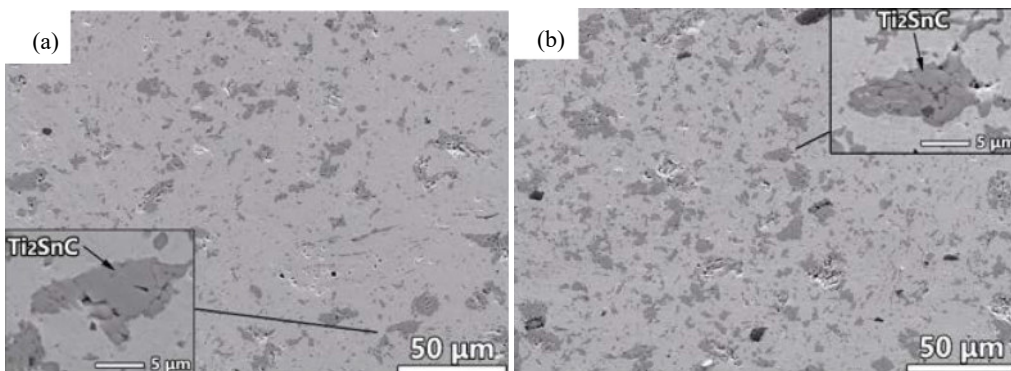


图 6 Ag-10%Ti₂SnC (a)和 Ag-20%Ti₂SnC (b)材料显微图像^[16]

Fig.6 Microstructures of (a) Ag-10%Ti₂SnC and (b) Ag-20%Ti₂SnC composites

从图 6 可以看到不规则的 Ti_2SnC 颗粒弥散且均匀分布于 Ag 基体中,随着 Ti_2SnC 相含量增加,其在 Ag 基体中的分布越来越拥挤。实验结果表明 Ag 基体与 Ti_2SnC 增强相间的润湿性良好,其中 Ag-10% Ti_2SnC 材料抗电弧侵蚀性能与传统 Ag-CdO 材料相当,适量 Ti_2SnC 相的添加有效提升了材料性能,但大量增强相的加入(20%)使得 Ag- Ti_2SnC 导热性能迅速恶化并加速 Ti_2SnC 相的分解,最终导致其抗电弧侵蚀性能的下降。进一步对 Ag-10% Ti_2SnC 材料在 100 A/400 V 条件下进行了不同次数的电弧侵蚀实验,当实验次数达到 6200 次时材料的损耗仅为 4.576%, Ag-10% Ti_2SnC 材料展现出了极为优

同时,由于 Ti_3SiC_2 相中 Ti-C 与 Si 原子的结合力较弱, Si 出现扩散并与 SF_6 生成 SiF_4 气体,从而带走电弧所产生的大量热量而改善了材料的抗电弧侵蚀性能。而在不同体积比例的 SF_6/N_2 及 SF_6/CO_2 气体介质中,随缓冲气体 N_2 及 CO_2 比例增加, Ag- Ti_3SiC_2 材料电弧击穿强度逐渐下降,而表面侵蚀面积与电弧能量不断增加。缓冲气体比例相同时, Ag- Ti_3SiC_2 材料在 SF_6/CO_2 气体中的电弧侵蚀情况更严重,这主要是由于 CO_2 中氧原子的存在使得 Ti_3SiC_2 相的分解氧化现象更加严重,新生氧化物散热性及与基体的润湿性远不及 Ti_3SiC_2 相,无法有效限制熔融 Ag 基体的流动与喷溅,最终导致材料被大量侵蚀失效。

2.3 Ag-Ti₂SnC 电触头材料

Ti_2SnC 相具有良好的导热导电性能、加工性能、高热稳定性和自润滑性能,但相对于 Ti_3SiC_2 及 Ti_3AlC_2 相来说, Ti_2SnC 相的制备更加困难^[22],所以关于 Ag- Ti_2SnC 材料的研究较少。Ding 等^[16]最先对 Ag- Ti_2SnC 材料的制备及抗电弧侵蚀性能进行了研究,图 6 为 Ag- Ti_2SnC 材料的显微结构图像。

异的抗电弧侵蚀性能^[42]。对 MAX 相添加量同为 10%的 Ag- Ti_3AlC_2 ^[39]、Ag- Ti_3SiC_2 ^[39]、Ag- Ti_2SnC ^[42] 材料在相同测试参数下(100 V/400 A,每次分断间隔 10 s)的质量损失进行总结,结果列于表 2。

表 2 不同 Ag-MAX 材料的质量损失对比^[39, 42]

Tab.2 Comparison in mass loss of different Ag-MAX materials

项目	Ag-10% Ti_3AlC_2	Ag-10% Ti_3SiC_2	Ag-10% Ti_2SnC
分断次数	6000	6000	6200
质量损失	6.6±0.3%	3.3±0.2%	4.576%

如前文所述, Ag-10%Ti₃AlC₂ 的抗电弧侵蚀性能与商用 Ag-CdO 相当^[34], 而 Ag-Ti₃SiC₂、Ag-Ti₂SnC 材料的抗电弧侵蚀性能较 Ag-Ti₃AlC₂ 更优, 表明部分 Ag-MAX 材料已在抗电弧侵蚀性能方面达到甚至超过了商用 Ag-CdO 材料, 证明了 Ag-MAX 材料的潜力。

3 结语及展望

新型增强相 MAX 相在银基材料中的应用不仅能对材料的力学性能进行改善, 还能对某些特定电学性能进行提升, 从而有效提升了材料的稳定性及电寿命。在寻求传统优势电接触材料 Ag-CdO 替代品的大背景下, 可利用常规工艺制备且性能优异的新型 Ag-MAX 电触头材料势必是未来银基电触头材料领域的重要研究方向及研究热点。MAX 相以其特有的陶瓷金属性能以及与 Ag 基体间良好的润湿性而受到人们关注, 现有研究同样证明 Ag-MAX 材料有潜力作为传统 Ag-CdO 材料的替代产品。

但不可否认的是, 目前关于 Ag-MAX 材料的研究尚在起步阶段, 对制备工艺及不同类型 MAX 相对银基电触头材料影响的研究有待深入。目前制备 MAX 相粉体与 Ag-MAX 材料的制备工艺主要集中在热压烧结、无压烧结及放电等离子烧结等粉末冶金手段, 且制备工艺还不算成熟, 现有制备手段大多仅适用于实验室的小批量制备, 真正在实际工业生产中的大批量生产仍有较大困难。同时现有研究大多局限于对 Ag-MAX 材料的初步探索, 如形貌、硬度、致密度及导电性等。来自东南大学的孙正明教授团队^[14]目前已对不同种类的 Ag-MAX 材料的抗电弧侵蚀性能做了大量研究, 为 Ag-MAX 材料的发展提供了更多的借鉴与思考, 但科研工作者们仍需对 Ag-MAX 材料的抗熔焊性能等更多电接触性能方面进行进一步测试以填补空白。

结合现有研究, 对新型 Ag-MAX 材料的发展提出以下展望:

1) 新型 MAX 相的研发与应用。结合 $M_{n+1}AX_n$ 相种类众多的优势, 后续研究可尝试对三种元素种类(M、A、X 区域)以及 n 值进行调整, 对 MAX 相与 Ag 基体的润湿性、MAX 相电流侵蚀过程中的稳定性等关键性能进行研究, 选择适配银基电触头材料的新型 MAX 相, 以期设计得到最优的 Ag-MAX 材料, 从而实现传统 Ag-CdO 材料全面替代的大愿景。

2) 新型制备工艺的开发。局限于现有制备技术, Ag-MAX 材料的制备过程较传统 Ag-MeO 材料更加复杂且价格相对昂贵, 在经济性方面不占优势, 所以后续研究可以通过对传统 Ag-MAX 材料的制备工艺进行改进优化, 或是尝试对新型材料制备技术进行研发, 以期在简化 Ag-MAX 材料制备工艺的同时降低成本。

3) 改进现有 Ag-MAX 材料性能。结合部分学者对银基电触头材料的研究, 可以看出塑性变形能够有效优化材料的组织形貌及力学、电学性能, 但目前使用塑性变形改善 Ag-MAX 材料性能的研究不多, 刘满门等人^[43]热挤压+冷拉拔的手段对 Ag-Ti₃AlC₂ 进行了加工形变, 塑性形变显著改善了 Ti₃AlC₂ 相在 Ag 基体中的分布均匀性, 弥散且均匀分布的增强相能够细化晶粒, 从而使材料获得了更优的性能。本文提到的 Wang 等人^[36]通过等通道转角挤压法对 Ti₃SiC₂ 相的排列方向进行调控, 从而在 Ti₃SiC₂ 相的特定排列角度上得到了整体 Ag-Ti₃SiC₂ 材料性能的提升。随着后续研究深入, 结合相关热处理对加工缺陷的消除, 相信塑性变形能够成为 Ag-MAX 材料的有效改性手段。

参考文献:

- [1] 郑旭阳, 巫小飞, 龙小庆, 等. 银基系列电接触复合材料的研发与应用[J]. 贵金属, 2018, 39(S1): 66-71.
ZHENG X Y, WU X F, LONG X Q, et al. Development and application of silver-based series electrical contact composites[J]. Precious Metals, 2018, 39(S1): 66-71.
- [2] 谢明, 杨有才, 黎玉盛, 等. 常用银基电工触头材料及无镉新材料的开发[J]. 贵金属, 2006, 27(4): 61-66.
XIE M, YANG Y C, LI Y S, et al. Development of in use silver base electrical engineering contact materials and cadmium free new materials[J]. Precious Metals, 2006, 27(4): 61-66.
- [3] 溥存继, 谢明, 杜文佳, 等. 贵金属基电接触材料的研究进展[J]. 材料导报, 2014, 28(7): 22-25.
FU C J, XIE M, DU W J, et al. Research development of precious metal-based electric contact materials[J]. Materials Reports, 2014, 28(7): 22-25.
- [4] 张文毓. 电接触材料的研究与应用[J]. 上海电气技术, 2021, 14(3): 62-66.
ZHANG W Y. Research and application of electrical contact materia[J]. Journal of Shanghai Electric Technology, 2021, 14(3): 62-66.

- [5] 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.
WANG S B, XIE M, LIU M M, et al. Research progress of AgNi contact materials[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2013, 42(4): 875-880.
- [6] 柏小平, 林万焕, 张明江. 低压电器用电触头材料[J]. 电工材料, 2007(3): 12-16.
BAI X P, LIN W H, ZHANG M J, et al. Contact materials for low voltage electric apparatus[J]. Electrical Engineering Materials, 2007(3): 12-16.
- [7] WANG J, LI D, WANG Y. Microstructure and properties of Ag-SnO₂ materials with high SnO₂ content[J]. Journal of Alloys & Compounds, 2014, 582: 1-5.
- [8] 蒋德志, 章杰, 白娅玲, 等. AgNi 触头材料应用性能及其主要制备工艺[J]. 电工材料, 2014(3): 19-23.
JIANG D Z, ZHANG J, BAI Y L, et al. Application performance and preparation technology of AgNi contact materials[J]. Electrical Engineering Materials, 2014(3): 19-23.
- [9] WANG Y P, LI H Y. Improved workability of the nanocomposited AgSnO₂ contact material and its microstructure control during the arcing process[J]. Metallurgical and Materials Transactions, A. Physical Metallurgy and Materials Science, 2017, 48(2): 609-616.
- [10] WU Q, XU G, YUAN M, et al. Influence of operation numbers on arc erosion of Ag/CdO electrical contact materials[J]. IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology, 2020, 10(5): 845-867.
- [11] 谢明, 王松, 付作鑫, 等. AgSnO₂ 电接触材料研究概述[J]. 电工材料, 2013(2): 36-39.
XIE M, WANG S, FU Z X, et al. Research of AgSnO₂ electrical contact materials[J]. Electrical Engineering Materials, 2013(2): 36-39.
- [12] MYHAR M. Crystal-chemistry from XPS analysis of carbide-derived M_{n+1}AX_n (n=1) nano-laminate compounds[J]. Journal of Physics and Chemistry of Solids, 2002, 63(11): 2063-2068.
- [13] XIE H, NGAI T L, ZHANG P, et al. Erosion of Cu-Ti₃SiC₂ composite under vacuum arc[J]. Vacuum Technology Applications & Ion Physics the International Journal & Abstracting Service for Vacuum Science & Technology, 2015, 114: 26-32.
- [14] SUN Z M. Progress in research and development on MAX phases: A family of layered ternary compounds[J]. International Materials Reviews, 2011, 56(3):143-166.
- [15] JEITSCHKO W, NOWOTNY H. Die kristallstruktur von Ti₃SiC₂-ein neuer komplexcarbidgebiet[J]. Monatshefte Für Chemie und Verwandte Teile Anderer Wissenschaften, 1967, 98(2): 329-337.
- [16] DING J X, TIAN W B, ZHANG P G. Preparation and arc erosion properties of Ag/Ti₂SnC composites under electric arc discharging[J]. Journal of Advanced Ceramics, 2019(1): 90-101.
- [17] 贾海龙, 朱刚, 谢明, 等. 新型 Ag-Ti₂AlN 电接触材料的电弧侵蚀行为研究[J]. 稀有金属与硬质合金, 2019, 47(1): 26-30.
JIA H L, ZHU G, XIE M, et al. Study on arc erosion behavior of a new type of Ag-Ti₂AlN electrical contact material[J]. Rare Metals and Cemented Carbides, 2019, 47(1):26-30.
- [18] 王塞北, 王松, 孙勇, 等. 新型银基电接触材料的研究进展[J]. 贵金属, 2019, 40(4): 72-77.
WANG S B, WANG S, SUN Y, et al. Research progress of new silver-based electrical contact materials[J]. Precious Metals, 2019, 40(4): 72-77.
- [19] WANG D D, TIAN W B, DING J X, et al. The beauty and the deed of silver during arc erosion of Ag/Ti₃AlC₂ contacts[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020, 820: 153136
- [20] DIN M, YANG C, YI T, et al. Efficient and cost-effective method to synthesize highly purified Ti₄AlN₃ and Ti₂AlN[J]. Journal of Advanced Dielectrics, 2019, 9(1): 19500085.
- [21] HU C, LI F, JIE Z, et al. Nb₄AlC₃: A new compound belonging to the MAX phases[J]. Scripta Materialia, 2007, 57(10): 893-896.
- [22] 陈艳林, 祝亚希, 方奇, 等. Cu 与三元层状化合物复合材料研究现状[J]. 硅酸盐通报, 2014, 33(1): 92-96.
CHEN Y L, ZHU Y X, FANG Q, et al. Research progress of Cu and three dimensional layered composite materials[J]. Bulletin of The Chinese Ceramic Society, 2014, 33(1): 92-96.
- [23] FINKEL P, HETTINGER J D, LOFLAND S E, et al. Low-temperature transport properties of nanolaminates Ti₃AlC₂ and Ti₄AlN₃[J]. Physical Review B, 2003, 67(23): 5108.
- [24] LOFLAND S E, HETTINGER J D, MEEHAN T, et al. Electron-phonon coupling in M_{n+1}AX_n phase carbides[J]. Physical Review B, 2006, 17(74): 3840-3845.
- [25] GUPTA, S, HABIB M A, DUNNIGAN N, et al. Synthesis and characterization of Ti₃SiC₂ particulate-reinforced novel Zn matrix composites[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2015, 24: 4071-4076.

- [26] WANG W J, GAUTHIER B V, BEI G P, et al. Powder metallurgy processing and compressive properties of Ti_3AlC_2/Al composites[J]. *Materials Science & Engineering A*, 2011, 530: 168-173.
- [27] 孙世成, 金松哲, 王蕾, 等. 放电等离子烧结制备 Cu/Ti_3SiC_2-TiC 复合材料[J]. *长春工业大学学报(自然科学版)*, 2007, 28(2): 124-127.
- SUN S C, JIN S Z, WANG L, et al. Cu/Ti_3SiC_2-TiC composites fabricated with spark plasma sintering[J]. *Journal of Changchun University of Technology (Natural Science Edition)*, 2007, 28(2): 124-127.
- [28] XIE H, NGAI T L, ZHANG P, et al. Erosion of $Cu-Ti_3SiC_2$ composite under vacuum arc[J]. *Vacuum*, 2015, 114: 26-32.
- [29] ZHANG P, NGAI T L, WANG A, et al. Arc erosion behavior of $Cu-Ti_3SiC_2$ cathode and anode[J]. *Vacuum*, 2017, 141: 235-242.
- [30] ZHANG J, WANG J Y, ZHOU Y C. Structure stability of Ti_3AlC_2 in Cu and microstructure evolution of $Cu-Ti_3AlC_2$ composites[J]. *Acta Materialia*, 2007, 55(13): 4381-4390.
- [31] 高闰丰, 梅炳初, 朱教群, 等. Cu/Ti_3SiC_2 新型受电弓滑板材料的研究[J]. *稀有金属快报*, 2005(11): 16-20.
- GAO R F, MEI B C, ZHU J Q, et al. Research on new material for pantograph slide plates- Cu/Ti_3SiC_2 [J]. *Rare Metals Letters*. 2005(11): 16-20.
- [32] 黄振莺, 翟洪祥, 李萌启, 等. Ti_3AlC_2 含量对热压制备 Ti_3AlC_2/Cu 复合材料的影响[J]. *稀有金属材料与工程*, 2011, 40(S1): 529-532.
- HUANG Z Y, ZHAI H X, LI M Q, et al. Effects of Ti_3AlC_2 content on Cu/Ti_3AlC_2 composites by hot pressing method [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*. 2011, 40(S1): 529-532.
- [33] LIU M, CHEN J, CUI H, et al. Ag/Ti_3AlC_2 composites with high hardness, high strength and high conductivity[J]. *Materials Letters*, 2018, 213: 269-273.
- [34] DING J X, TIAN W B, ZHANG P, et al. Arc erosion behavior of Ag/Ti_3AlC_2 electrical contact materials[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, 740: 669-676.
- [35] DING J X, TIAN W B, WANG D D, et al. Corrosion and degradation mechanism of Ag/Ti_3AlC_2 composites under dynamic electric arc discharge[J]. *Corrosion Science*, 2019, 156: 147-160.
- [36] WANG D D, TIAN W B, DING J X, et al. Anisotropic arc erosion resistance of Ag/Ti_3AlC_2 composites induced by the alignment of Ti_3AlC_2 [J]. *Corrosion Science*, 2020, 171: 108633.
- [37] ZHANG M, TIAN W B, ZHANG P G, et al. Microstructure and properties of $Ag-Ti_3SiC_2$ contact materials prepared by pressureless sintering[J]. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 2018, 25(7): 810-816.
- [38] ALANAZI F, GHOSH S, DUNNIGAN R, et al. Synthesis and tribological behavior of novel Ag- and Bi-based composites reinforced with Ti_3SiC_2 [J]. *Wear*, 2017, 376/377: 1074-1083.
- [39] WANG D D, TIAN W B, LU C J, et al. Comparison of the interfacial reactions and properties between Ag/Ti_3AlC_2 and Ag/Ti_3SiC_2 electrical contact materials[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, 857(3): 157588.
- [40] ZHOU Z, ZHAO T, FENG Y, et al. Arc erosion characteristics evolution of Ag/Ti_3SiC_2 composites during repetitive arc breakdowns in SF_6 gaseous medium[J]. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 2021, 18(5), 1716-1724.
- [41] ZHOU Z J, LIU D F, WEI Y J, et al. Investigation on arc erosion characteristics of Ag/Ti_3SiC_2 composites in SF_6 mixed with buffer gases[J]. *Vacuum*, 2022, 206: 111536.
- [42] DING J, TIAN W, WANG D, et al. Microstructure evolution, oxidation behavior and corrosion mechanism of Ag/Ti_2SnC composite during dynamic electric arc discharging[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, 785: 1086-1096.
- [43] 刘满门, 崔浩, 赵君, 等. 塑性变形与退火对 $Ag-Ti_3AlC_2$ 复合材料性能的影响[J]. *贵金属*, 2018, 39(4): 46-52.
- LIU M M, CUI H, ZHAO J, et al. Influence of plastic deformation and annealing on properties of $Ag-Ti_3AlC_2$ composites[J]. *Precious Metals*, 2018, 39(4): 46-52.