

配合物制备的铱锡氧化物涂层结构与稳定性

蒋玉思, 肖方明

(广东省稀有金属研究所, 广州 510651)

摘要: **目的** 改善铱锡氧化物涂层的稳定性, 提高涂层的使用寿命。**方法** 采用加成法合成含醋酸根的铱、锡配合物, 并应用热氧化分解法制备出铱锡氧化物涂层。借助扫描电镜、电子探针、X 射线衍射仪等技术分析铱锡氧化物涂层的表面形貌、表面成分分布和物相结构等表面物性, 采用强化电解法考察热氧化温度对铱锡氧化物涂层在含氟酸性溶液中稳定性的影响, 并与氯化物制备的铱锡氧化物涂层进行比较研究。**结果** 热氧化温度显著影响铱锡氧化物涂层的表面形貌、物相组成, 在 480~520 °C 下制备的氧化物涂层结构较为致密。随氧化温度的增加, 铱锡氧化物涂层的稳定性增加, 但超过 520 °C 时, 稳定性降低, 520 °C 下制备的氧化物涂层在含 20 mg/L F⁻ 的 1.0 mol/L H₂SO₄ 中, 强化寿命为 520 h。**结论** 以含醋酸根配体的铱、锡配合物为金属源物质, 制备氧化物涂层, 可有效改善涂层的微观结构、成分分布, 显著提高涂层的稳定性, 延长在含微量氟元素酸性溶液中的使用寿命。

关键词: 涂层; 电极; 铱锡氧化物; 稳定性; 电解; 电镀

中图分类号: TG174.4; TQ15 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2019)12-0347-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2019.12.042

Microstructure and Stability of IrO₂-SnO₂ Coatings Prepared by Complex

JIANG Yu-si, XIAO Fang-ming

(Guangdong Research Institute of Rare Metals, Guangzhou 510651, China)

ABSTRACT: To improve the stability and service life of IrO₂-SnO₂ coating, the iridium complex and tin complex containing acetate radical were synthesized by addition, and the Ir-Sn oxide coatings were prepared by thermal decomposition method. The surface morphology, composition distribution and phase structure of IrO₂-SnO₂ coatings were analyzed via scanning electron microscopy, electron microprobe and X-ray diffraction, respectively. The effect of oxidation temperature on stability of IrO₂-SnO₂ coating prepared by complex in acidic solution containing fluorine was studied through accelerated electrolysis, and comparative study of two coatings prepared by chloride and complex was made. Based on experiments, the thermal oxidation temperature had significant effect on surface morphology and phase composition. The compact coatings were prepared at 480-520 °C. With the increase of temperature, the stability of IrO₂-SnO₂ coatings increased, yet it decreased as the temperature was higher than 520 °C. The accelerated life of oxide coating prepared at 520 °C was 520 h in 1.0 mol/L H₂SO₄ solution containing 20 mg/L F⁻. In a word, IrO₂-SnO₂ coatings prepared by complex, may effectively improve the microstructure and composition distribution of the coating, remarkably improve the stability of the coating, and prolong the service life of the coating in acidic solution containing trace fluorine elements.

收稿日期: 2019-01-22; 修订日期: 2019-05-20

Received: 2019-01-22; Revised: 2019-05-20

基金项目: 国家科技支撑计划项目 (2015BAB02B03); 广东省科技计划项目 (2017A070702012)

Fund: Supported by National Science and Technology Support Program of China (2015BAB02B03); Science and Technology Plan Program of Guangdong Province (2017A070702012)

作者简介: 蒋玉思 (1974—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为应用电化学。邮箱: jiangys2002@163.com

Biography: JIANG Yu-si (1974—), Male, Master, Senior engineer, Research focus: applied electrochemistry. E-mail: jiangys2002@163.com

KEY WORDS: coating; electrode; Ir-Sn oxide; stability; electrolysis; electroplating

铂族金属氧化物基涂层具有电催化活性高、化学稳定性高等优点,一直受到学术界和工业界的广泛关注^[1-8]。目前已在氯碱工业、钢板镀锌、贵金属电镀、阴极保护和铝箔化成等领域得到较为广泛的应用^[9-12]。铱钽氧化物涂层(Ti/IrO₂-Ta₂O₅)、铱锡氧化物涂层(Ti/IrO₂-SnO₂)是硫酸溶液体系中综合性能较优的涂层材料。氧化铱为活性成分,起催化作用;氧化钽、氧化锡为惰性成分,起粘结、分散和稳定作用。

由于原料来源不同,通常导致铱、铜电解液等金属电液中含有少量的氟、氯和锰等杂质。为分析评价铂族金属氧化物基涂层的应用前景,S. Ttasatti、S. Nijjer 等人^[13]研究了 Ti/IrO₂-Ta₂O₅-MnO_x 电极在含锰硫酸溶液中的电化学反应,发现氧化锰在电极表面析出,会导致电极电催化活性的降低。笔者在前期的研究中发现,氟元素可影响铱钽氧化物电极的化学稳定性,而铱锡氧化物电极却表现出良好的耐氟抗锰污染特性^[12]。遗憾的是,通常以锡氯化物为源物质制备铱锡氧化物涂层电极^[14]。此种电极在制备过程中,锡的沉积率较低,仅为 30%^[15],涂层中锡的分布不均匀,铱锡摩尔比波动大,从而降低了铱锡氧化物的稳定性和服役寿命,阻碍了铱锡氧化物电极的应用。为了提高氧化物涂层电极的稳定性和寿命,一般将金属氯化物转型为挥发性低的化合物。早期用烷氧基锡制备含锡氧化物涂层,T. A. F. Lassali、J. F. C. Boodts 等^[16]以 CH₃(CH₂)₃SnOC₂H₅ 为锡金属源制备铱锡氧化物涂层电极。研究表明,该化合物可增大电极表面积和提高稳定性。本文采用加成配合法分别合成含醋酸根的铱、锡配合物,然后以此配合物为金属源物质,采用热分解法制备出铱锡氧化物涂层电极,借助扫描电镜、X 射线衍射仪等技术进行电极物性分析,采用强化电解法研究化学稳定性,并与氯化物制备的涂层电极进行比较研究,为其在含氟硫酸溶液体系中的应用提供参考和依据。

1 实验

1.1 材料与试剂

实验钛基体为纯钛 TA2。试剂主要有:三氯化铱、二氯化锡、四氯化锡、锡粉、双氧水、乙醇、冰醋酸、盐酸、硫酸、草酸、氟化钠,均为分析纯。

1.2 铱锡氧化物涂层电极的制备

1.2.1 配合物制备涂层电极

含铱溶液配制:按液固比 8:1,将三氯化铱加入 10% 的醋酸溶液中,在 120 °C 下蒸干,反复进行 2

次。最后用 10% 的醋酸溶液将蒸干物配制成含铱 0.9 mol/L 的溶液。

含锡溶液配制:首先称取二氯化锡 10 g,加入 25 mL 去离子水中,搅拌溶解,依次加入 10 mL 冰醋酸、5 g 锡粉,滴加 2 mL 双氧水,陈化 48 h,用双氧水调节氧化还原电位至 550 mV,得含锡 1.8 mol/L 的溶液。

涂层制备过程:选用纯钛板 TA2 为基体,对其喷砂、除油处理及 10% (质量分数) 草酸蚀刻。按铱、锡金属摩尔比为 3:7,分别量取含铱溶液和含锡溶液,混和后用乙醇稀释即得到涂液,涂液的总金属摩尔浓度为 0.25 mol/L。用软毛刷将上述涂液涂刷在基体上,每次涂刷后,在烘箱中 110 °C 下烘烤 5 min。然后在箱式热处理炉中 400~560 °C 下氧化 10 min,空冷,再涂刷下一层。反复共涂刷 10 次,最后在 400~560 °C 下退火 1 h。

1.2.2 氯化物制备涂层电极

钛基体预处理同前。按铱、锡金属摩尔比为 3:7,分别取三氯化铱、四氯化锡,溶于盐酸酸化的体积比为 1:1 的乙醇正丁醇混合溶剂中,即得到涂液,涂液的总金属摩尔浓度为 0.25 mol/L。用软毛刷将上述涂液涂刷在基体上,每次涂刷后,在烘箱中 110 °C 下烘烤 5 min,然后在箱式热处理炉中 500 °C 下氧化 10 min,空冷,再涂刷下一层。反复共涂刷 10 次,最后在 500 °C 下退火 1 h。

1.3 仪器及其性能测试

实验所用仪器有:电子天平,BS224S,德国赛多利斯科学仪器(北京)有限公司;电化学测试系统,CHI760E,上海辰华仪器有限公司;扫描电镜,Merlin,德国蔡司公司;电子探针,EPMA-1600,日本岛津公司;X 射线多晶衍射仪,D8A A25 X,铜靶 CuK α ,扫描速度 10 (°)/min,德国布鲁克公司;鼓风电热干燥箱;热处理炉。

强化电解试验:以 1.0 mol/L H₂SO₄+20 mg/L F⁻ 为电解液,铱锡氧化物涂层电极为阳极,钛片为阴极,极间距为 2 cm,阳极工作面积为 1 cm²。在 2 A/cm² 下恒流电解,槽电压升至 10 V 时为电极失效,所经历的时间为强化寿命。实验温度为 30 °C。

2 结果与讨论

2.1 涂层的表面形貌

配合物制备铱锡氧化物涂层的表面形貌如图 1 所示。由图 1 可知,所有涂层表面均由致密区和疏松

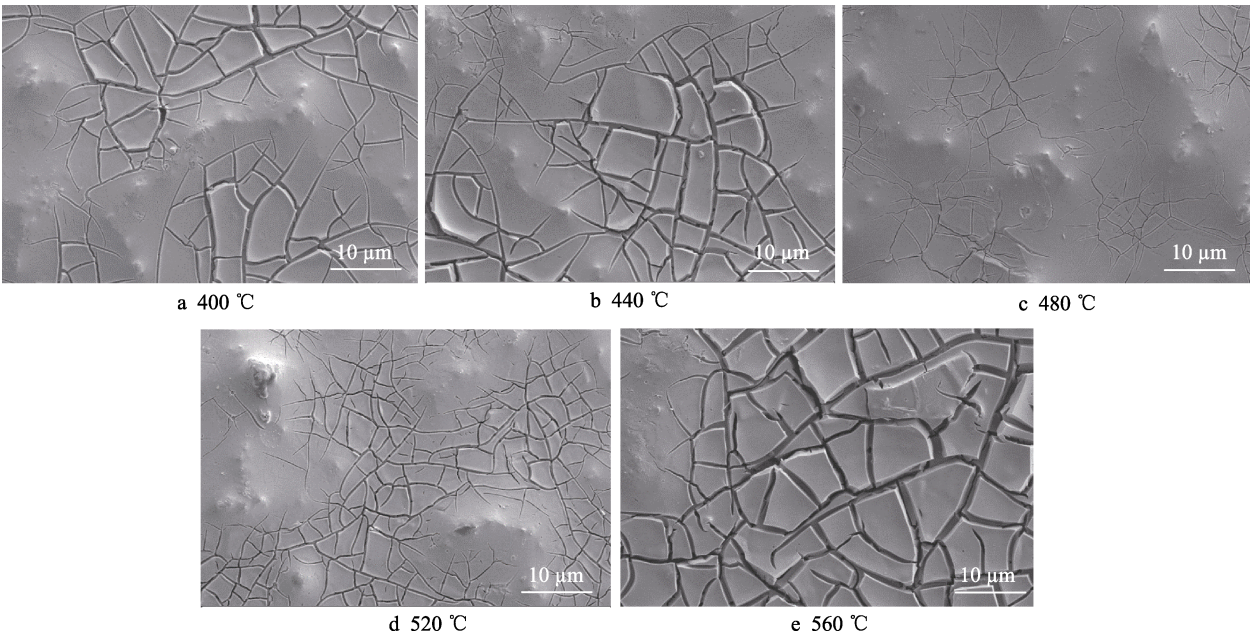


图 1 配合物制备铱锡氧化物涂层的表面形貌
Fig.1 SEM image of the IrO₂-SnO₂ coatings prepared by complex

区组成。在疏松区，随着制备温度的升高，表面裂缝宽度先变小后变大，而表面裂缝数量变化的规律同裂缝宽度。在 480 ℃下，涂层表面裂缝最小，最大裂缝宽度约为 0.25 μm；而在 560 ℃下，电极表面裂缝最大，最大裂缝宽度约为 1.0 μm。这说明在 400~480 ℃温度区间，涂层退火可使铱锡氧化物涂层收缩、致密化，有利于提高铱锡氧化物涂层的耐蚀性。高于 480 ℃时，钛基体与铱锡氧化物涂层存在较大的线膨胀系数差异，且在电极制备过程中经历多次的冷热循环，加之较高温度下氧化物固溶体结构的破坏，均可导致涂层表面出现宽度较大、数量较多的裂缝。

2.2 涂层成分与成分分布

借助扫描电镜能谱仪对铱锡氧化物涂层进行元素含量分析，结果见表 1。由表 1 可知，配合物制备涂层中铱锡元素的相对摩尔比为 2.8 : 7.2，与理论值

(3 : 7) 基本一致；氯合物制备涂层中铱锡元素的相对摩尔比为 5.8 : 4.2，与理论值相差较大，锡元素偏差为 60%。另外，涂层中还残有微量的氯元素、碳元素。氯元素的残留，可能是由于氯原子已进入铱锡氧化物的晶格或间隙中，而热力作用难以去除所致。碳元素的残留，可能是由于乙醇、丁醇挥发不彻底或配合物转化不完全所致。涂层中的钛元素、铝元素来自于钛基体。在配合物制备涂层过程中，铱、锡等源物质由氯化物转型为醋酸根、羟基等双配体化合物。与四氯化锡（沸点 114 ℃）相比，这种双配体化合物的挥发性较低，在干燥、烧结过程中挥发损失小，从而较好地实现了涂层中元素相对含量与涂液的一致性。由于涂层中氧化锡起稳定作用，所以采用配合物为金属源制备涂层，将有助于延长其服役寿命。另外，锡的可控沉积，有利于含锡氧化物涂层电极的实用化。

表 1 铱锡氧化物涂层元素含量
Tab.1 Surface element content of Ti/ IrO₂-SnO₂ coatings

Coating number	mol%						
	Ir	Sn	O	Cl	C	Ti	Al
Sample No.1 prepared by complex	7.15	18.52	64.89	1.37	3.72	2.59	1.76
Sample No.2 prepared by complex	6.99	18.37	65.06	1.47	3.86	2.54	1.71
Sample No.3 prepared by chloride	16.26	11.41	58.60	1.86	2.83	9.05	0
Sample No.4 prepared by chloride	15.58	10.99	59.02	1.59	2.64	10.17	0

为比较氧化物涂层中金属元素的分布，利用电子探针对涂层进行面扫描。铱锡氧化物涂层表面金属元素的面分布如图 2 所示。由图 2 可看出，两种涂层中铱元素的分布较为均匀。配合物制备的涂层中，锡元素的分布大致均匀，但在涂层表面凹处出现一定程度

的贫化。这表明铱元素、锡元素固溶较为均匀。锡元素在钛基体凹处发生贫化，则是因为凹处较平坦，锡化合物挥发较大和氧化锡不易成核。涂层活性成分氧化铱的均匀分布，有助于延长涂层电极的寿命，也有益于电解过程中电极表面初次电流的分布和金属沉

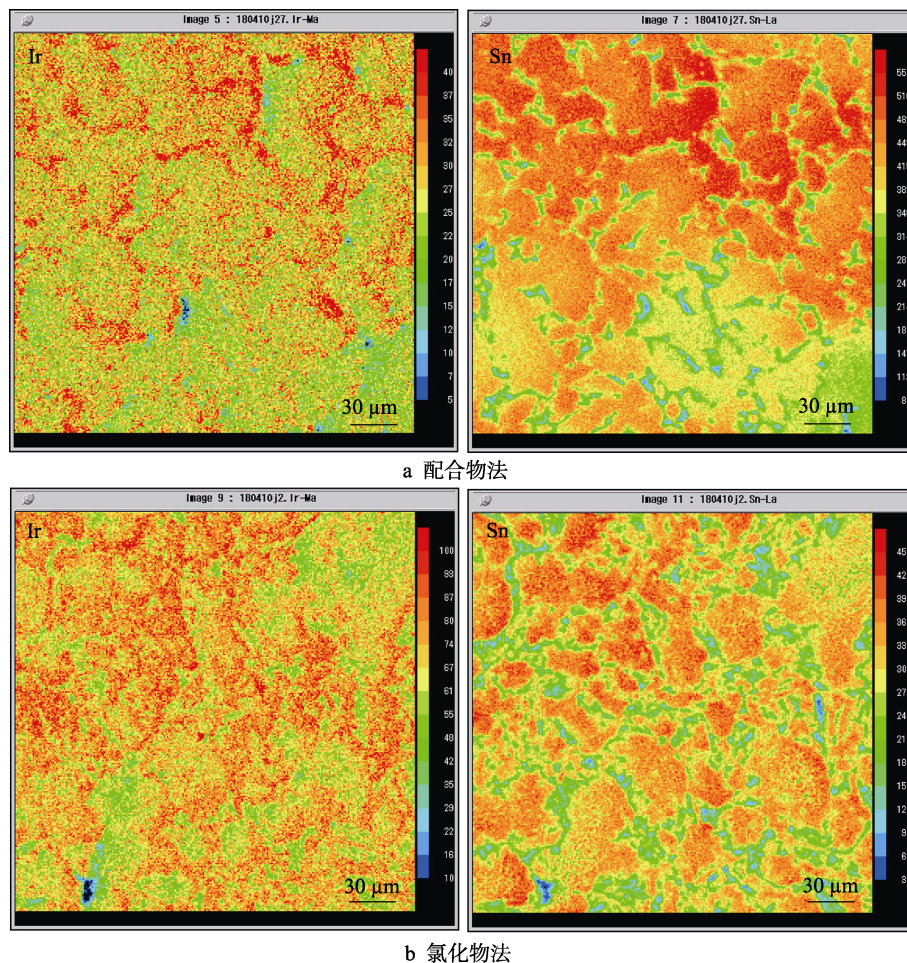


图2 铱锡氧化物涂层表面元素的面分布

Fig.2 Surface element distribution of IrO₂-SnO₂ coatings: a) complex; b) coating prepared by chloride

积层厚度的均匀性。氯化物制备涂层中锡元素的分布不均匀,为四氯化锡挥发不均匀所致。

2.3 涂层的结构分析

配合物制备铱锡氧化物涂层的X射线图谱如图3所示。由图3可看出,随着热氧化温度的提高,氧化物衍射峰的强度增加,而其半高宽趋于减小,晶化程

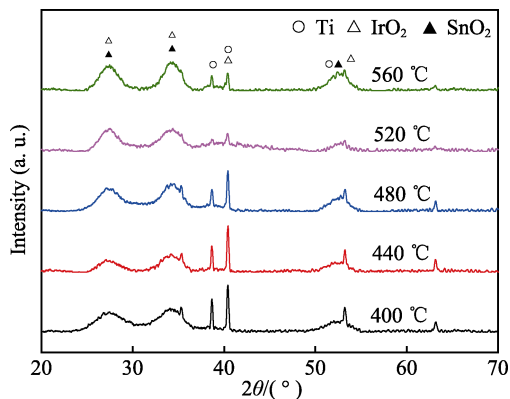


图3 配合物制备的铱锡氧化物涂层X射线图谱
Fig.3 XRD pattern of the Ti/ IrO₂-SnO₂ coatings prepared by complex

度增加。高于480℃热氧化时,有明显的衍射峰,结晶较为细小。560℃热氧化时,晶粒较大。依据四方金红石相SnO₂的26.61°、33.89°、51.78°分别对应(110)、(101)、(211)晶面^[17],金红石相IrO₂的27.98°、34.66°、53.93°分别对应(110)、(101)、(211)晶面。结合图谱可知,SnO₂与IrO₂形成了固溶体。图谱中出现了Ti特征峰,是X射线的穿透深度大于氧化物涂层的厚度所致。Ti的衍射峰强度随热处理温度的提高而降低,是Ti基体部分使氧化物涂层变厚的结果。

SnO₂属于金红石型晶体结构,金红石型的SnO₂中的Sn部分被Ir取代。由于Sn⁴⁺的离子半径为0.069 nm,而Ir⁴⁺的离子半径为0.063 nm,两者的半径较为接近,所以SnO₂的基本结构未变,IrO₂、SnO₂形成的固溶体仍为金红石型晶体结构。由于SnO₂为惰性氧化物,起稳定作用,IrO₂与SnO₂固溶体可增强IrO₂的耐久性,延缓在酸性环境中的溶解,增强涂层电极抵御新生氧钝化的能力,因此两者的互溶对提高涂层电极寿命有重要意义。

2.4 涂层的稳定性

热氧化温度对配合物制备铱锡氧化物涂层强化

寿命的影响如图 4 所示。由图 4 可知, 400~480 °C 温度范围内, 涂层电极强化寿命缓慢增加; 当高于 480 °C 时, 涂层电极强化寿命急剧增加; 超过 520 °C, 强化寿命下降。热氧化温度低时, 铱、锡化合物分解不完全。结合图 3 的衍射图谱可知, 所制备的涂层中氧化物大多呈非晶状态, 与钛基体的结合力较差, 难以抵御强化电解过程中氧气气泡的反复冲刷, 强化寿命较短, 而 480 °C 以上的温度结晶度较高, 强化寿命相应较长。热氧化温度过高, 超过 530 °C 时, 钛基体发生严重氧化, 涂层固溶体结构开始破坏, 裂缝变大, 数量增多, 涂层电极强化寿命下降。

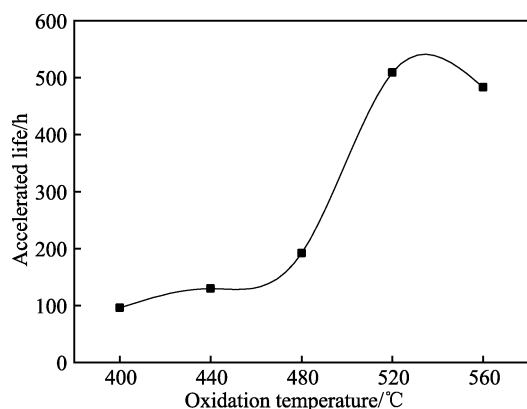


图 4 氧化温度对配合物制备铱锡氧化物涂层强化寿命的影响

Fig.4 Effect of oxidation temperature on accelerated life of the IrO₂-SnO₂ coatings prepared by complex

为分析金属源物质对涂层稳定性的影响, 研究了市售同类样品和配合物涂层电极作为工作电极时, 槽电压随电解时间的变化, 如图 5 所示。由图 5 可知, 两种涂层电极随电解时间的变化规律大致相同。电解初期, 由于涂层中未氧化转化物质的溶解而使槽电压降低, 之后随着时间的延长, 活性成分氧化铱溶解, 槽压逐渐升高, 直至失效。可以看出, 市售同类样品强化寿命为 175 h, 而 520 °C 下利用配合物制备的涂层强化寿命为 520 h, 后者较前者提高了 1.97 倍。通

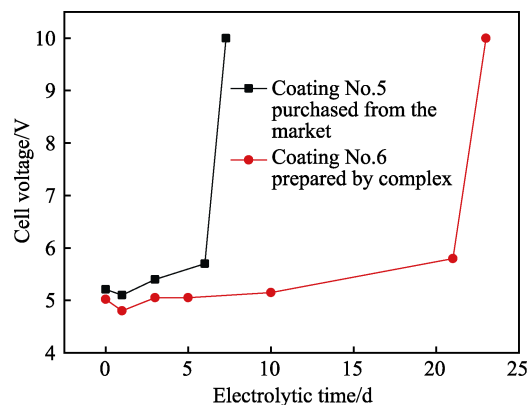


图 5 槽电压随电解时间的变化曲线

Fig.5 Curves of cell voltage changing with electrolytic time

常可利用单位面积通过的总电量衡量涂层电极的服役寿命。配合物制备涂层电极的强化寿命为 520 h, 换算成累计通过电量则为 10 400 kA·h/m²。如在 250 A/m² 下运转, 大致推算氧化物涂层电极的使用寿命可达 4.8 年, 这说明配合物制备氧化物涂层具有较好的应用前景。

3 结论

1) 以含醋酸根配合物为源物质, 制备铱锡氧化物涂层, 可实现涂液、涂层中金属元素含量比的一致性, 有效改善涂层的表面形貌和微观结构。

2) 热氧化温度显著影响铱锡氧化物涂层的表面形貌、微观结构和化学稳定性。在 480~520 °C 下, 利用配合物制备的铱锡氧化物涂层电极, 在含氟酸性溶液中的稳定性较优。

3) 配合物制备的铱锡氧化物涂层电极稳定性明显优于氯化物制备的涂层电极。

参考文献:

- [1] VERCESI G P, SALAMIN J Y, COMNINELIS C H. Morphological and microstructural study of the Ti/IrO₂-Ta₂O₅ electrode: Effect of the preparation temperature[J]. *Electrochimica acta*, 1991, 36(5/6): 991-998.
- [2] 张萌萌, 林均筠, 陈康宁. 铱钽氧化物阳极涂层的研究[J]. *无机材料学报*, 1999, 14(2): 251-256.
ZHANG Meng-meng, LIN Jin-yun, CHEN Kang-ning. Iridium-tantalum oxide anode coatings[J]. *Journal of inorganic materials*, 1999, 14(2): 251-256.
- [3] OLIVEIR-SOUSA A, SILVA M A S, MACHADO S A S, et al. Influence of the preparation method on the morphological and electrochemical properties of Ti/IrO₂-Ta₂O₅ coated electrodes[J]. *Electrochimica acta*, 2000, 45: 4467-4473.
- [4] 胡吉明, 张鉴清, 曹楚男. Ti 基 IrO₂+Ta₂O₅ 阳极的电化学特性[J]. *材料研究学报*, 2002, 16(4): 365-370.
HU Ji-ming, ZHANG Jian-qing, CAO Chu-nan. Electrochemical characteristics of Ti based IrO₂+Ta₂O₅ anodes [J]. *Chinese journal of materials research*, 2002, 16(4): 365-370.
- [5] MSINDO Z S, SIBANDA V, POTGIETER J H. Electrochemical and physical characterization of lead-based anodes in comparison to Ti-(70%)IrO₂(30%)Ta₂O₅ dimensionally stable anodes for use in copper electrowinning[J]. *Journal of applied electrochemistry*, 2010(40): 691-698.
- [6] YAN Zhen-wei, MENG Hui-min. Electrochemical investigation of the IrO₂-Ta₂O₅ coated anode with different heat treatment processes of the titanium substrates[J]. *Electrochemical and solid-state letters*, 2011, 14(10): 16-19.
- [7] TRASATTI S, PAULI DE C P. Composite materials for electrocatalysis of O₂ evolution: IrO₂+SnO₂ in acid solu-

- tion[J]. Journal of electroanalytical chemistry, 2002, 545/529: 145-151.
- [8] FERRO S, ROSESTOLATO D, MARTÍNEZ-HUITLE C A, et al. Charge-storage process in $\text{IrO}_2\text{-SnO}_2$ mixed-oxide electrodes. Role of coating composition, solution pH and temperature[J]. Electrochimica acta, 2014, 148(1): 85-92.
- [9] MENARD S. Insoluble anodes: The next generation latest products for electroplating improve performance, extend life and applications for SIA anodes[J]. Metal finishing, 2006, 104(6): 28-31.
- [10] JACKO PIJPER Q E. 长寿命铱混合金属氧化物不溶性钛阳极在连续钢板电镀过程中的应用[J]. 上海金属, 2007, 29(5): 59-65.
 JACKO PIJPER Q E. Long lifetime iridium mixed metal oxide coated insoluble titanium anodes for continuous steel strip plating lines[J]. Shanghai metals, 2007, 29(5): 59-65.
- [11] 蔡天晓, 鞠鹤, 吴宏让. 高性能涂层钛阳极在土壤阴极保护中的应用[J]. 表面技术, 2005, 34(5): 79-81.
 CAI Tian-xiao, JU He, WU Hong-rang. Application of high performance titanium anode in cathodic protection of the soil[J]. Surface technology, 2005, 34(5): 79-81.
- [12] 雷一锋, 蒋玉思. 钛基二氧化铱涂层电极的节能分析[J]. 中国冶金, 2016, 26(6): 61-64.
 LEI Yi-feng, JIANG Yu-si. Analysis on electric energy saving of IrO_2 coated titanium electrodes[J]. China metallurgy, 2016, 26(6): 61-64.
- [13] NIJER S, THONSTAD J, HAARBERG G M. Cyclic and Linear voltammetry on $\text{Ti/IrO}_2\text{-Ta}_2\text{O}_5\text{-MnO}_x$ electrodes in sulfuric acid containing Mn^{2+} ions[J]. Electrochimica acta, 2001, 46: 3503-3508.
- [14] MARSHALL A, BØRRESEN B, HAGEN G. Electrochemical characterisation of $\text{Ir}_x\text{Sn}_{1-x}\text{O}_2$ powders as oxygen evolution electrocatalysts[J]. Electrochimica acta, 2006, 51(5): 3161-3167.
- [15] COMNINELLIS C H, VERCESI G P. Problems in DSA[®] coating deposition by thermal decomposition[J]. Journal of applied electrochemistry, 1991, 21: 136-142.
- [16] LSSALI T A F, BOODTS J F C, BULHOES L O S. Effect of Sn-precursor on the morphology and composition of $\text{Ir}_{0.3}\text{Sn}_{0.7}\text{O}_2$ oxide films prepared by sol-gel process [J]. Journal of non-crystalline solids, 2000, 273: 129-134.
- [17] DONG Q, SHI Y, WANG K. Insight into perovskite solar cells based on SnO_2 , compact electron-selective layer[J]. Journal of physical chemistry C, 2015, 119: 10212-10217.

(上接第 346 页)

- [53] GANVIR A, CURRY N, MARKOCSAN N. Influence of microstructure on thermal properties of columnar axial suspension plasma sprayed thermal barrier coatings[J]. Journal of thermal spray technology, 2016, 25(1/2): 202-212.
- [54] LI X, YANG Q, HUANG X, et al. Isothermal oxidation behavior of VC and columnar structured thermal barrier coatings deposited by suspension plasma spray technology[J]. Journal of thermal spray technology, 2015, 24(6): 1060-1070.
- [55] BERNARD B, BIANCHI L, MALIÉ A, et al. Columnar suspension plasma sprayed coating microstructural control for thermal barrier coating application[J]. Journal of the european ceramic society, 2016, 36(4): 1081-1089.
- [56] CURRY N, VANEVERY K, SNYDER T, et al. Thermal conductivity analysis and lifetime testing of suspension plasma-sprayed thermal barrier coatings[J]. Coatings, 2014, 4(3): 630-650.
- [57] PADTURE N, SCHLICHTING K, BHATIA T, et al. Towards durable thermal barrier coatings with novel microstructures deposited by solution-precursor plasma spray[J]. Acta materialia, 2001, 49(12): 2251-2257.
- [58] BHATIA T, OZTURK A, XIE L D, et al. Mechanisms of ceramic coating deposition in-precursor plasma spray[J]. Journal of materials research, 2002, 17(9): 2363-2372.
- [59] JADHAV A D, PADTURE N P, JORDAN E H, et al. Low-thermal-conductivity plasma-sprayed thermal barrier coatings with engineered microstructures[J]. Acta materialia, 2006, 54(12): 3343-3349.
- [60] GOVINDARAJAN S, DUSANE R O, JOSHI S V, et al. In situ particle generation and splat formation during solution precursor plasma spraying of yttrium-stabilized zirconia coatings[J]. Journal of the american ceramic society, 2011, 94(12): 4191-4199.
- [61] GELL M, JORDAN E H, TEICHOLZ M, et al. Thermal barrier coatings made by the solution precursor plasma spray process[J]. Journal of thermal spray technology, 2008, 17(1): 124-135.
- [62] XIE L, MA X, OZTURK A, et al. Processing parameters effects on solution precursor plasma spray process spray patterns[J]. Surface and coatings technology, 2004, 183(1): 51-61.
- [63] BERNARD B, QUET A, BIANCHI L, et al. Thermal insulation properties of YSZ coatings: Suspension plasma spraying (SPS) versus electron beam physical vapor deposition (EB-PVD) and atmospheric plasma spraying (APS)[J]. Surface and coatings technology, 2017, 318: 122-128.