

高纯金制备技术研究进展

董海刚, 赵家春, 吴跃东, 阳岸恒, 裴洪营*

(昆明贵金属研究所, 贵研铂业股份有限公司 稀贵金属综合利用新技术国家重点实验室, 昆明 650106)

摘 要: 高纯金广泛应用于电子工业等领域, 且需求量越来越大。基于对 30 篇近期文献的分析, 综述了高纯金制备技术研究现状, 并对主要制备技术存在的优缺点进行了评述。电解法、化学还原法、溶剂萃取法都在相关企业得到了生产应用, 但在产品纯度稳定性、原料适应性、生产周期、环境污染等方面存在着不同程度的问题。随着电子工业技术的不断迭代升级, 未来对于金纯度要求将会越来越高。因此, 还需要进一步研发高纯金的制备技术, 研制出更高纯度的高纯金产品。

关键词: 有色金属冶金; 高纯金; 制备技术

中图分类号: TF837 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-0676(2022)02-0076-05

Research progress on high purity gold preparation

DONG Hai-gang, ZHAO Jia-chun, WU Yue-dong, YANG An-heng, PEI Hong-ying*

(Kunming Institute of Precious Metals, State key Laboratory of Advanced Technology of Comprehensive Utilization of Platinum Metals, Sino-platinum Metals Co. Ltd., Kunming 650106, China)

Abstract: High purity gold is widely used in electronic industry and other fields, and the demand is increasing. Based on the analysis of 30 recent literatures, the preparation technologies of high purity gold were summarized, and their advantages and disadvantages were reviewed. The electrolysis, chemical reduction and solvent extraction methods have been applied in the related enterprises, but there are different degrees of problems in product purity and stability, raw material adaptability, production period and environmental pollution issues. The requirement of gold purity will be higher and higher with the continuous iterative upgrading of electronic industrial technology in the future. Therefore, it is necessary to further develop the preparation technology of high pure gold and prepare high pure gold products with higher purity.

Key words: non-ferrous metallurgy; high purity gold; preparation technology

高纯金($\omega_{Au} \geq 99.999\%$)具有优异的导电性、导热性、抗氧化性、抗腐蚀性等, 广泛应用于电子技术、通讯技术、航天航空、靶材、光电子等高科技领域, 例如金及其合金材料主要用作电子封装用键合丝、内引线材料、薄膜材料、焊合材料, 晶体管和各种集成电路中的欧姆接点材料等^[1-3]。2010 年, 我国发布了《高纯金》国家标准, 规定了高纯金的金质量分数(ω_{Au})不小于 99.999%、杂质元素质量分数总量不大于 10×10^{-6} , 且对 21 种杂质元素质量分数也进行了限定^[4]。高纯金是电子行业如集成电路、

半导体器件等的重要蒸发镀膜基础材料之一。随着电子工业技术不断进步和升级, 电子材料开始向多功能化、复合化、低维化和智能化方向发展, 使得半导体器件、大规模集成电路等领域对基础材料金的纯度要求越来越高^[5-6], 需求量越来越大, 具有良好的市场发展前景。因此, 对于高纯金制备技术也引起了广泛关注, 相关企业、行业科研单位都开展了高纯金制备技术研究, 实现了产业化应用。从目前公开的文献报道来看, 高纯金的制备技术有电解法、化学还原法和溶剂萃取法等^[7-9]。

收稿日期: 2021-07-12

基金项目: 云南省科技项目(202004AR040005)

第一作者: 董海刚, 男, 博士, 研究员。研究方向: 稀贵金属冶金。E-mail: donghaigang0404@126.com

*通信作者: 裴洪营, 男, 工程师。研究方向: 贵金属提纯加工。E-mail: phy@ipm.com.cn

1 电解法

电解法是以粗金为阳极,高纯金片或钛板作为阴极,以由含氯金酸和游离盐酸的水溶液作为电解液的电解过程。通电后金从阳极溶解为离子,由于 Au/Au^{3+} 电极电位高于银、铜、铅、铁、镉、铋等杂质元素,通过适当控制电解条件,金在阴极优先析出、沉积,而活泼金属不析出或基本不析出,仍留于电解液中,从而实现粗金的提纯^[10]。电解过程中,阳极和阴极分别发生如下反应(Me 代表比较活泼的金属):



电解法制备高纯金的关键是在实际生产操作过程中要选择合适的电流密度、槽电压、温度、电解液成分、阴极板、电解电源、电解槽、生产环境及操作条件等,从而保证高纯金产品质量,提高单位时间产量,减少黄金的积压。

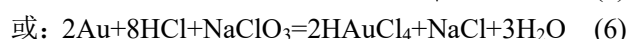
早期有文献报道以 $\omega_{\text{Au}}=99.9\%$ 的金为原料,通过二次电解才能获得 $\omega_{\text{Au}}\geq 99.999\%$ 高纯金^[11-12]。为了适应电子行业快速发展要求,缩短工艺流程,提高生产效率,相关研发人员经过持续不断优化改进各项电解工艺技术条件,能够通过一次电解直接制备出 $\omega_{\text{Au}}\geq 99.999\%$,甚至 99.9999% 以上高纯金。叶跃威^[13]采用非对称交流电源,对 $\omega_{\text{Au}}=95\%\sim 99\%$ 、 $\omega_{\text{Ag}}=0.8\%\sim 3.6\%$ 、 $\omega_{\text{Pb}}=0.43\%\sim 5.41\%$ 的原料采用特殊的工艺控制手段,一次性生产出 $\omega_{\text{Au}}\geq 99.999\%$ 高纯金。马贤杰等^[14]采用 001×14.5 型树脂和 001×7 型树脂对电解液进行净化除杂,获得纯净的金电解液 A 和 B,然后以 ω_{Au} 为 99.99% 金作为阳极,控制电解温度为 55℃,槽电压为 3 V 分别进行电解,得到的高纯金的 ω_{Au} 分别为 99.9992% 和 99.99997%。杨国祥等^[15]采用以 99.9% 金作为阳极板,以惰性材料为阴极,采用恒流恒压电解,得到 $\omega_{\text{Au}}>99.999\%$ 的高纯金。刘学山等^[16]以 $\omega_{\text{Au}}=99\%$ 金作为阳极板,钛板为阴极,在电解液中加入添加剂(骨胶、磷酸钠)减少杂质金属在阴极金中的夹杂和粘附,提高电解电流密度,强化了金配阴离子的扩散速度,经一次电解制备出 $\omega_{\text{Au}}>99.999\%$ 的高纯金。孙敬韬等^[17]的研究中针对粗金中 Cu、Ag、Pb 等杂质元素含量偏高的问题,电解时添加一定的硝酸盐改善电解液的导电性能和金析出性能,添加盐酸和硫酸解决铅、银

等杂质对电金质量的干扰和消除阳极钝化,电解后获得的高纯金 $\omega_{\text{Au}}\geq 99.999\%$ 。夏雯等^[18]采用多电极电解制备高纯金,以 $\omega_{\text{Au}}=99.99\%$ 金为阳极,阴极基板为 TA2 纯钛板,氯化金溶液为电解液,电解温度为 60℃,分别采用 670 A/m² 和 800 A/m² 的电流密度进行电解,得到的高纯金 ω_{Au} 分别为 99.999959% 和 99.999906%。李尚远等^[19]设计出一种基于离子半渗透膜技术的黄金电解新工艺,粗金阳极溶解于电解液中,形成含有杂质金属阳离子和含有金配阴离子的溶液,利用半渗透膜实现金配阴离子与杂质离子的分离,最后将金配阴离子溶液泵入阴极槽实现金的还原、析出。电解设备采用了多槽设计,单台设备中包含阳极板槽(电解槽)及阴极板槽(还原槽),其中电解槽中以半渗透膜分隔为金溶解槽与贱金属还原槽。实际生产中,以 $\omega_{\text{Au}}=99.98\%$ 粗金为原料,通过电解,得到 $\omega_{\text{Au}}\geq 99.999\%$ 的高纯金。

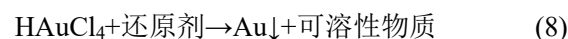
电解法设备简单、成本低、产品纯度稳定,金损耗量少,但对原料要求较为苛刻,原料适应性差,生产周期长,电解液、残阳极中黄金积压较多。据报道,目前国内采用电解法制备高纯金的企业有贵研铂业股份有限公司、江西铜业股份有限公司贵溪冶炼厂、浙江遂昌金矿有限公司、有研亿金新材料有限公司等。

2 化学还原法

化学还原法一般是将粗金用王水或盐酸+氧化剂(硝酸、氯气、氯酸钠等)溶解,过滤分离出不溶物,金溶液用还原剂还原后,获得高纯金。对于化学还原法制备高纯金过程要采取合适的技术有效去除金溶液中杂质,尽量选择不带入杂质的还原剂,同时严格调控溶液 pH 值、氧化还原电位防止杂质元素还原析出,才能保证高纯金的纯度。通常由于原料中金含量高低不同,制备工艺有所不同,或选择二次溶解-二次还原,或对金溶液进行净化除杂再进行还原,最终获得高纯金。一般来说,整个过程的主要化学反应如下,溶解过程反应:



还原过程反应:



对于金含量低的原料,通常采用一次溶解、还原仅能获得 $\omega_{\text{Au}}=99.99\%$ 纯度的金,需要经过二次溶解-二次还原才能获得 $\omega_{\text{Au}}\geq 99.999\%$ 的高纯金。文

献[20]对多种金废料(包括粗金、金基合金、熔炼渣等, $\omega_{\text{Au}}=2\%\sim 99\%$)采用二次溶解-两段还原制备高纯金, 将金废料用盐酸与硝酸溶解, 得到的金溶液加还原剂 A 还原, 所得的金粉用纯水充分洗涤至中性, 再用盐酸与硝酸混合酸溶解, 加还原剂 B 还原, 得到的高纯金产品中 $\omega_{\text{Au}}>99.999\%$ 。山东黄金矿业(莱州)有限公司精炼厂采用二次王水溶解-二次还原制备高纯金^[21], 分别将 3 种粗金(ω_{Au} : 91.849%, 95.901%, 99.882%)经粉化处理后, 采用王水溶解, 加入赶硝剂 A 赶硝, 调整 pH 值, 用还原剂 B 进行一次还原, 反应温度 $50^{\circ}\text{C}\sim 60^{\circ}\text{C}$, 氧化还原电位 $690\sim 720\text{ mV}$, 得到 ω_{Au} 为 99.99% 的金粉; 金粉用热水充分洗涤至中性后, 进行二次王水溶金及二次金还原, 获得 $\omega_{\text{Au}}=99.9995\%\sim 99.9998\%$ 的高纯金粉。山东招金金银精炼有限公司采用二次氯化-二次还原化学法精炼提纯工艺^[22], 将粗金锭(ω_{Au} : 99.943%, 99.946%, 99.944%)进行粉化至粒度在 125 目左右, 采用氯气或其他氧化剂的盐酸环境中溶解, 调节 $\text{pH}=0\sim 0.5$, 加入还原剂 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$, 控制氧化还原电位在 $690\sim 700\text{ mV}$, 得到 99.99% 纯度的金粉, 再经二次氯化、二次还原, 即可得到 $\omega_{\text{Au}}=99.9997\%\sim 99.9998\%$ 的高纯金粉。中国专利[23]公开了一种高纯金提取方法, 含金物料($\omega_{\text{Au}}=17\%\sim 31\%$)溶解造液后, 先用亚硫酸钠还原, 得到粗金; 粗金再次进行溶解造液, 再通入二氧化硫二次还原, 得到 $\omega_{\text{Au}}\geq 99.999\%$ 的高纯金。

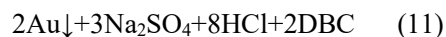
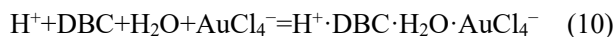
对于金含量较高的原料($\omega_{\text{Au}}>99.9\%$), 经溶解后, 对金溶液进行有效的净化除杂处理, 再选择合适的还原剂还原, 最终获得高纯金。中国专利^[24]将金锭($\omega_{\text{Au}}>99.95\%$)轧片后, 采用王水溶解造液, 加入硫酸、氢氧化钠, 静置, 使杂质金属离子充分沉淀, 采用微孔滤膜过滤分离沉淀, 金溶液中加入盐酸肼还原得到金粉, 再用稀硝酸+氢氟酸混合溶液煮洗、去离子水洗涤, 获得 $\omega_{\text{Au}}>99.999\%$, C、S 含量小于 1×10^{-6} 的高纯金。中国专利[25]提到将金原料($\omega_{\text{Au}}>99.95\%$)采用盐酸+氯气溶解造液, 金溶液先后通过中和沉淀、阳离子交换除杂, 获得纯净的金溶液, 然后以 H_2O_2 为还原剂进行还原, 得到海绵金, 再用混酸煮洗, 去离子水洗涤, 获得 $\omega_{\text{Au}}>99.999\%$ 的高纯金。文献[26]将 $\omega_{\text{Au}} 99.99\%$ 黄金用去离子水清洗、硝酸浸泡后, 用王水溶解, 赶硝, 稀释, 过滤分离 AgCl , 然后向得到的氯金酸溶液中通入 SO_2 气体, 控制溶液温度 $40^{\circ}\text{C}\sim 60^{\circ}\text{C}$, 当溶液电位为 $680\sim 730\text{ mV}$ 时停止通气, 最终得到 $\omega_{\text{Au}}>$

99.999% 的高纯金。

化学还原法制备高纯金工艺简单、易操作、全流程黄金积压少、产品直收率高、生产能力可控性及灵活性好, 规模可大可小, 不受原料多少的限制; 尤其对原料适应性强, 能够根据原料性质灵活选择合适的工艺条件, 例如金含量低的原料一次溶解、还原难以实现杂质的有效分离, 需要通过多次溶解、还原才能获得高纯金; 金含量高的原料经过溶解后, 将金溶液采用合适的技术手段进行深度净化除杂, 然后采用合适的还原剂进行还原, 得到高纯金。化学还原法的缺点是采用王水或盐酸+氧化剂(氯气、氯酸钠等)溶解, 产生 NO_x 、 Cl_2 等有害气体, 需要进行无害化处理; 溶液除杂、还原过程控制要求严格。据报道, 目前国内采用化学还原法制备高纯金的企业有山东招金金银精炼有限公司、山东黄金矿业(莱州)有限公司精炼厂、贵研铂业股份有限公司、中金黄金股份有限公司等。

3 溶剂萃取法

溶剂萃取法一般是利用盐酸体系下 Au^{3+} 与萃取剂生成的稳定配合物易溶于有机溶剂的原理而实现金的提纯, 载金有机相经反萃或直接用还原剂还原后, 得到高纯金。金的萃取剂很多, 例如醇类、醚类、酯类、胺类、酮类和含硫萃取剂等^[10], 应用较多萃取剂主要有乙醚、二丁基卡必醇(DBC)等。以 DBC 萃取为例^[27], 金以 AuCl_4^- 状态存在于氯化物溶液中, 利用 DBC 对金优越的选择性, 通过离子缔合机理, 使 AuCl_4^- 从水相转移到有机相中, 杂质留在水相, 达到提纯精炼的目的, 再通过还原反萃, 将金还原出来。整个过程发生的化学反应为:



文献[27]分别以电解粗金泥($\omega_{\text{Au}}=47.32\%$)、湿法金泥($\omega_{\text{Au}}=99.95\%$)和合质金($\omega_{\text{Au}}>99\%$)为原料采用萃取法制备高纯金, 原料通过王水溶解, 室温条件下, 保持金溶液酸度 $2.5\text{ mol/L}(\text{HCl})$, 二丁基卡必醇与水相比 1:1, 采用箱式萃取器 5 级萃取, 用 0.5 mol/L 盐酸洗涤, 载金有机相用 5% 亚硫酸钠溶液在温度为 $70^{\circ}\text{C}\sim 85^{\circ}\text{C}$ 下搅拌还原, 获得 $\omega_{\text{Au}}>99.999\%$ 高纯金。文献[28]提出采用氯酸钠分金+离心萃取工艺制备高纯金, 粗金($\omega_{\text{Au}}=95.31\%$)经过粉化到小于

150~200目,采用盐酸+氯酸钠溶解,金溶液采用二丁基卡必醇离心萃取,萃取相比1:1.5,转速3000 r/min,经过四级萃取,载金有机相利用稀盐酸四级洗涤,用亚硫酸钠还原,得到 $\omega_{\text{Au}}=99.9996\%$ 海绵金。有专利^[29]将 $\omega_{\text{Au}}=99.95\%$ 的金薄片用王水加热溶解,赶硝,浓缩,得到的三氯化金溶液按1:1的体积比加入高纯乙醚萃取,载金有机相用蒸馏水反萃,反萃液在50℃~80℃蒸发和破坏有机相,提纯后的三氯化金溶液中加入草酸还原,得到 $\omega_{\text{Au}}\geq 99.999\%$ 高纯金。专利^[30]将 $\omega_{\text{Au}}=99.9\%$ 的金粉化至60目,用碘、碘化钾和碘酸钾溶液溶解,调节碘金酸钾溶液pH=9.5,精密过滤器过滤,用30% N_{235} +70%磺化煤油在离心萃取器中萃取,使碘金酸根进入有机相,有机相用25%氢氧化钾溶液反萃,得到 $\omega_{\text{Au}}\geq 99.999\%$ 高纯金粉。专利^[31]报道了将 $\omega_{\text{Au}}>99\%$ 的金用王水溶解完全,不赶硝或不调pH值,将含金王水溶液在萃取器中加入等体积的纯净乙醚萃取,载金有机相在蒸馏器中加去离子水反萃取,加热使乙醚挥发,调整反萃液pH值,用 Na_2SO_3 还原,熔炼铸锭后得到 $\omega_{\text{Au}}=99.999\%\sim 99.9999\%$ 的高纯金锭。

萃取法获得的高纯金产品纯度高,而且其操作简便,对原料适应性较强。缺点是使用乙醚、二丁基卡必醇等萃取剂,易挥发,存在环境污染,生产工作条件较差,而且有机萃取剂存在易爆、易燃的问题,操作过程存在安全隐患。据报道,目前用溶剂萃取法制备高纯金的企业有紫金矿业集团黄金冶炼有限公司等。

4 结语

高纯金被广泛应用于电子工业等领域,且需求量越来越大。高纯金制备技术主要有电解法、化学还原法、萃取法等,在纯度稳定性、原料适应性、生产周期、环境污染等方面存在着一些问题。虽然现有的制备方法各有优缺点,国内相关企业结合自身实际情况,选择合适的制备方法来生产高纯金。作者认为,在实际生产中,需要结合企业自身实际情况、根据生产原料来源及性质,选择合适的方法以及自动化程度高、环保、规模化生产配套设备,实现高纯金的高效清洁规模化生产,生产出满足现行国家标准要求的高纯金。预计,随着电子工业技术不断迭代升级以及现代高新技术产业的转型升级,未来对于高纯金纯度的要求将会越来越高,甚至高纯金的 $\omega_{\text{Au}}\geq 99.9999\%$,市场需求量也将不断增长。因此,今后需要进一步研发更高纯度的高

纯金高效清洁制备技术,研制出更高纯度的高纯金产品。

参考文献

- [1] 郭学益,田庆华.高纯金属材料[M].北京:冶金工业出版社,2011:178-179.
GUO X Y, TIAN Q H. High-pure metallic materials[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2011: 178-179.
- [2] 阳岸恒,谢宏潮,贺晓燕.金基蒸发材料应用及生产现状[J].黄金,2010,31(2):6-9.
YANG A H, XIE H C, HE X Y. Application and production situation of gold based evaporation materials[J]. Gold, 2010, 31(2): 6-9.
- [3] 谭志龙,陈家林,闻明,等.电子行业用高纯金溅射靶材研究综述[J].贵金属,2019,40(2):83-87.
TAN Z L, CHEN J L, WEN M, et al. Review on study of high purity gold pattering target material used in electronics industry[J]. Precious Metals, 2019, 40(2): 83-87.
- [4] 全国黄金标准化技术委员会.高纯金:GB/T 25933-2010[S].北京:中国标准出版社,2010.
SAC/TC 379. High-purity gold: GB/T 25933-2010[S]. Beijing: Standards Press of China, 2010.
- [5] 阳岸恒,裴洪营,朱勇,等.一种集成电路用高纯金规则颗粒制备方法:CN108677029A[P].2018-03-28.
YANG A H, PEI H Y, ZHU Y, et al. Preparation method of high-purity gold regular particles for integrated circuits: CN108677029A[P]. 2018-03-28.
- [6] 赵家春,阳岸恒,吴跃东,等.蒸发材料用高纯金的制备研究[J].贵金属,2021,42(2):27-31.
ZHAO J C, YANG A H, WU Y D, et al. Study on preparation of high-purity gold for evaporation materials [J]. Precious Metals, 2021, 42(2): 27-31.
- [7] 柳旭,张国清,陈怡兰,等.国内电解精炼法制备高纯金综述[J].贵金属,2017,38(4):87-94.
LIU X, ZHANG G Q, CHEN Y L, et al. Review on production status in China of high-purity gold by electro-refining[J]. Precious Metals, 2017, 38(4): 87-94.
- [8] 张济祥,谢宏潮,阳岸恒,等.高纯金制备技术研究现状与展望[J].贵金属,2015,36(3):81-86.
ZHANG J X, XIE H C, YANG A H, et al. Status and prospect of preparative methods for high-purity gold[J]. Precious Metals, 2015, 36(3): 81-86.
- [9] 张卜升,吴永谦,张科,等.高纯金、银制备研究现状及展望[J].稀有金属与硬质合金,2017,45(6):1-5.
ZHANG B S, WU Y Q, ZHANG K, et al. Research status and prospect on preparation of high-purity gold and silver [J]. Rare Metals and Cemented Carbides, 2017, 45(6): 1-5.
- [10] 余建民.贵金属分离与精炼工艺学[M].北京:化学工业出版社,2006:92-107.

- YU J M. Separation and refining technology of precious metals[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006: 92-107.
- [11] 文书毕. 用电解精炼制备高纯金[J]. 有色金属与稀土应用, 1993(4): 1-3.
- WEN S B. Preparation of high purity gold by electrolytic refining[J]. Application of Nonferrous Metals and Rare Earth, 1993(4): 1-3.
- [12] 熊超. 金线用高纯金生产关键设备的研发实践[J]. 铜业工程, 2012(3): 18-20.
- XIONG C. Research practice on production equipment of high pure gold for gold wire[J]. Copper Engineering, 2012(3): 18-20.
- [13] 叶跃威. 高纯金的电解工艺[J]. 贵金属, 2014, 35(1): 23.
- YE Y W. Electrolysis process of high purity gold[J]. Precious Metals, 2014, 35(1): 23.
- [14] 马贤杰, 陈斐, 刘丹, 等. 离子交换法净化金电解液的研究[J]. 贵金属, 2020, 41(S1): 120-124.
- MA X J, CHEN F, LIU D, et al. Study on purification of gold electrolyte via ion exchange[J]. Precious Metals, 2020, 41(S1): 120-124.
- [15] 杨国祥, 邓志明. 键合金丝用高纯金的制备[J]. 贵金属, 2010, 31(2): 54-56.
- YANG G X, DENG Z M. Preparation of high pure gold used for gold bonding wires[J]. Precious Metals, 2010, 31(2): 54-56.
- [16] 刘学山, 王造吉. 一次电解精炼制备高纯金的工艺: CN104047024A[P]. 2014-09-17.
- LIU X S, WANG Z J. Process for preparing high-purity gold by primary electrolytic refining: CN104047024A[P]. 2014-09-17.
- [17] 孙敬韬, 邓成虎. 王日, 等. 一步法高纯金生产工艺开发与产业化[J]. 有色金属(冶炼部分), 2014(7): 45-48.
- SUN J T, DENG C H, WANG R, et al. Process development and industrialization for production of high purity gold with one-step process[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2014(7): 45-48.
- [18] 夏雯, 王书明, 左玉婷, 等. 电解高纯金的制备与表面织构研究[J]. 贵金属, 2020, 41(3): 39-43.
- XIA W, WANG S M, ZUO Y T, et al. Study on preparation and surface texture of electrolytic high purity gold[J]. Precious Metals, 2020, 41(3): 39-43.
- [19] 李尚远, 冯桂坤, 王兵强, 等. 黄金电解精炼新工艺研发与应用[J]. 现代矿业, 2020(6): 257-258.
- LI S Y, FENG G K, WANG B Q, et al. Application, research and development on new technology of gold electrolysis refining[J]. Modern Mining, 2020(6): 257-258.
- [20] 刘文, 谭文进. 高纯金制备工艺的研究[J]. 贵金属, 2007, 28(S1): 44.
- LIU W, TAN W J. Study on the hydrometallurgy processes of high purity gold[J]. Precious Metals, 2007, 28(S1): 44.
- [21] 李光胜, 王明双, 马涌. 化学还原法制备高纯金试验研究[J]. 黄金科学技术, 2015, 23(2): 103-106.
- LI G S, WANG M S, MA Y. Experimental study on the preparation of high purity gold by chemical reduction[J]. Gold Science and Technology, 2015, 23(2): 103-106.
- [22] 庄宇凯, 纪鹏. 二次氯化-二次还原法精炼高纯金工艺研究[J]. 黄金, 2014, 35(2): 57-60.
- ZHUANG Y K, JI P. Process study on high purity gold refinement by two-stage chlorination-two-stage reduction process[J]. Gold, 2014, 35(2): 57-60.
- [23] 黄军浩, 史凯. 一种高纯金提取方法: CN104745835A[P]. 2015-07-01.
- HUANG J H, SHI K. Method for extracting high-purity gold: CN104745835A[P]. 2015-07-01.
- [24] 董海刚, 裴洪营, 赵家春, 等. 一种电子行业用高纯金的制备方法: CN109777968A[P]. 2019-05-21.
- DONG H G, PEI H Y, ZHAO J C, et al. A method on preparation of high-purity gold for electronic industry: CN109777968A[P]. 2019-05-21.
- [25] 董海刚, 赵家春, 裴洪营, 等. 一种高纯金的制备方法: CN111889697A[P]. 2020-11-06.
- DONG H G, PEI H Y, ZHAO J C, et al. A method on preparation of high-purity gold preparation: CN111889-697A[P]. 2020-11-06.
- [26] 陈黎阳, 何永宁, 张俭农, 等. 一种湿法提取高纯金新工艺: CN102703691A[P]. 2012-10-03.
- CHEN L Y, HE Y N, ZHANG J N, et al. New technology for extracting high-purity gold by adopting wet process: CN 102703691A[P]. 2012-10-03
- [27] 孙根荣. 高纯金精炼试验研究[J]. 黄金, 2015, 36(11): 61-63.
- SUN G R. Experimental study on high purity gold refinement[J]. Gold, 2015, 36(11): 61-63.
- [28] 吴卫煌. 离心萃取制备高纯金的工艺研究[J]. 黄金, 2018, 39(6): 50-55.
- WU W H. Study on the preparation of high purity gold by centrifugal extraction[J]. Gold, 2018, 39(6): 50-55.
- [29] 胡建华. 一种高纯金的制备方法: CN102925679A[P]. 2013-02-13.
- HU J H. A method on preparation of high-purity gold: CN102925679A[P]. 2013-02-13.
- [30] 许良秋, 洪金铃, 梁昊天. 一种高纯金粉的清洁生产方法: CN111438354A[P]. 2020-07-25.
- XU L Q, HONG J L, LIANG H T, et al. high-purity gold powder clean production method: CN111438354A[P]. 2020-07-25.
- [31] 宋裕华, 刘建芳, 杨征, 等. 高纯金的提取方法: CN101570830A[P]. 2009-11-04.
- SONG Y H, LIU J F, YANG Z, et al. Extraction method of high-purity gold: CN101570830A[P]. 2009-11-04.