

## 国内电解精炼法制备高纯金综述

柳旭<sup>1,2</sup>, 张国清<sup>1,2</sup>, 陈怡兰<sup>1,2</sup>, 史秀梅<sup>1,2</sup>, 宋涛<sup>2</sup>

(1. 北京有色金属与稀土应用研究所, 北京 100012; 2. 北京市电子信息用新型钎焊材料工程技术研究中心, 北京 100012)

**摘要:** 介绍了高纯金的研究意义及电解精炼法制备高纯金的基本原理。从电解电源、阴极板的设计、电解环境、电解工艺、标准状况及主要生产厂家等方面, 综述了国内电解精炼法制备高纯金的生产研究现状, 并提出了制备满足新国标要求的5N高纯金的研究方向。

**关键词:** 有色金属冶金; 高纯金; 电解精炼; 工艺条件; 研究现状

**中图分类号:** TF831 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-0676(2017)04-0087-08

### Review on Production Status in China of High-purity Gold by Electro-refining

LIU Xu<sup>1,2</sup>, ZHANG Guoqing<sup>1,2</sup>, CHEN Yilan<sup>1,2</sup>, SHI Xiumei<sup>1,2</sup>, SONG Tao<sup>2</sup>

(1. Non-ferrous Metals and Rare Earth Research Institute, Beijing 100012, China;

2. Engineering Research Center of New Brazing Materials for Electronic Information, Beijing 100012, China)

**Abstract:** The significance and the basic principle of high-purity gold prepared by electro-refining were introduced. The domestic production status of high-purity gold by electro-refining were reviewed from the aspects of electrolysis power, cathode plate design, electrolysis environment, electrolysis process, standard condition and main manufactures. In the meantime, the research prospect of developing 5N high-purity gold process was also forecasted.

**Key words:** nonferrous metallurgy; high purity gold; electro-refining; preparation technology; research situation

金具有良好的韧性和可锻性, 可制成极薄(可达到0.001 mm)的金箔; 它还具有良好的延展性, 1 g黄金可拉长到3400 m以上。金的化学活性低、具有优良的抗腐蚀性能以及导电、导热性能, 且容易形成金属合金, 其蒸汽压远远低于银。

金优异的性能常常是现代高科技的一些关键环节所必需的, 金及其合金广泛应用于金融储备、珠宝首饰、电子工业、宇航工业、化学工业以及医疗行业等领域。其中, 金基材料是电子与半导体工业的基础, 主要用作电子封装用键合丝、内引线材料、薄膜材料和焊合材料等。为了保证材料的使用性能, 这些行业对金原料都提出了“高纯”的要求<sup>[1]</sup>。

高纯金的制备方法主要有: 化学还原分离法、溶剂萃取法、电解精炼法等几种<sup>[2-8]</sup>。其中电解精炼

法具有产品纯度高、金属损失少、操作简便、不产生有害气体、并可附带回收铂、钯等贵金属的优点。因此, 电解精炼法被广泛地应用于高纯金生产<sup>[9]</sup>。

本文综述了近年的文献资料, 从电解电源、电解环境、电解工艺(电解液中金离子的浓度、电流密度、电解温度)等方面, 归纳和总结了电解精炼提纯金的研究现状, 并对高纯金的未来发展趋势进行展望。

### 1 电解精炼法提纯金的基本原理

电解精炼法是以粗金属为阳极, 纯金属薄片(或特殊导电片)为阴极, 以含有游离酸的金属盐水作为电解液的电解过程。当通以直流电时, 粗金属从阳

极溶解, 呈离子状态进入溶液。通过控制电位, 使溶解电位比精炼金属正的杂质留在阳极或沉积在阳极泥中, 溶解电位比精炼金属负的杂质则溶入溶液, 不在阴极上析出, 从而在阴极上可得到精炼的高纯金属。

金电解的原料的纯度(质量分数, 下同)一般在 90% 以上, 因此电解精炼法提纯金一般以纯度在 90% 以上的粗金板为阳极, 以纯金片或惰性金属片为阴极, 以金的氯配合物水溶液及游离盐酸作电解液。电解过程中, 在阳极主要发生下列反应:



其中, Me 代表比较活泼的金属元素。

在阴极主要发生下列反应:



正常电解时, 阳极上主要发生金的氧化溶解反应。各种杂质金属在电化学反应中的行为与其电极电位(表 1)有关。

表 1 某些金属在酸性溶液中的标准电极电位

Tab.1 The standard electrode potential of certain metals in acidic solution

元素	Ag	Cu	Fe	Pb	Bi	Sb
$E^{\ominus}/\text{V}$	+0.79	+0.34	-0.44	-0.13	0.32	-0.51
元素	Si	Pd	Sn	Cr	Ni	Mn
$E^{\ominus}/\text{V}$	0.10	+0.99	-0.14	-0.74	-0.25	-1.18
元素	Cd	Al	Pt	Ti	Zn	Au
$E^{\ominus}/\text{V}$	-0.40	-1.66	+1.20	-1.63	-0.76	1.50

依据标准电极电位电极行为可分几种情况<sup>[9]</sup>: 银、钨、铈、钨不溶解进入阳极泥; 铂、钯有一部分与金形成合金进入阳极泥中, 还有一部分与金一道进入溶液, 但一般不在阴极析出; 比金电位负的金属, 除一部分银氧化溶解后迅速与溶液中的氯离子形成氯化银外, 铜、铁、铅、铋等绝大部分金属均进入电解液中。

在电解过程中, 通过选择适当的槽电压, 控制阴极只有金析出, 使活泼金属 Me 不析出, 仍留在电解液中, 从而达到纯化金的目的。

## 2 电解电源研究

金电解精炼工艺有常规直流电解、交直流叠加

电流电解、周期换向电流电解、非对称电流电解等方法。

采用常规的直流电解进行电解精炼作业, 可以简化电源结构, 减少操作程序。但在金的电解精炼过程中, 如果阳极的粗金中含有较多的银, 电解时阳极中的银会发生电化溶解, 与盐酸反应生成氯化银薄膜附着于阳极表面, 使阳极钝化, 并使槽电压升高, 造成电解过程中断, 电解难以正常进行。为了克服阳极钝化, 各国学者进行了相关研究, 主要是从电解电源上进行改进。研究表明, 采用交、直流叠加电源、周期换向电源、方波电源等替代常规的直流电解电源进行电解对缓解阳极钝化均有一定的作用。

1908 年沃耳维尔提出电解过程中采用脉动电流进行电解, 即电解时同时通入直流电和交流电形成脉动电流<sup>[10]</sup>。采用脉动电流进行电解时, 当脉动电流达到正峰值的瞬间, 阳极电流密度很高, 使阳极上有氯气或氧气产生, 这些气体可使氯化银脱落而进入阳极泥中, 从而达到消除阳极钝化的目的。此外, 脉动电流的产生还可以提高电解液温度、降低阳极泥中金的含量。因此, 此法被普遍采用至今。

1995 年, 盛枝等<sup>[11]</sup>报道了白银公司冶炼厂利用自主设计的交直流叠加电源设备代替原有直流电源的设计及生产状况。使用此种交直流叠加电源能充分满足金电解液制备和电解精炼的生产需要。设备的余量较大, 不仅可带动车间全部金电解槽, 而且可满足扩大生产能力的需要。在使用过程中, 电流效率达到 97.2%, 比原来提高了 32.8%; 单耗下降 4.65 倍; 产品质量由 99.95%~99.98% 提高到 99.98%~99.994%, 提高了 0.03%~0.014%。设备具有效率高、无噪音、可靠性高、操作简单、使用方便、无需特别维护等优点。

1996 年, 郑勇等<sup>[12]</sup>报道了用周期自动换向整流装置代替沃耳维尔法, 以解决沃耳维尔法的整流装置复杂、投资大的问题, 为中小矿山及首饰加工业进行金的电解精炼提供了便利。周期自动换向电源的原理是, 电解时正向电流导通, 阳极发生电化溶解, 阴极析出纯金。经数秒至几十秒后, 自动换向, 通以数秒反向电流, 此时阴极变成阳极, 阳极变成阴极, 从而消除阳极氯化银的钝化作用, 还可起到提高阴极电金质量的目的。此电源在某矿进行使用, 效果较好。其与产生不对称脉动电流的装置相比, 价格较低, 且无需进行特殊设计和装配, 操作方便, 控制简单。电解效果与交直流叠加电源相

当,但产量略低且控制电路复杂。1999年,郑勇<sup>[13]</sup>对周期自动换向整流器进行改进,设计了由2只硅整流管及1只可控硅组成的周期( $2\pi$ )换向金电解精炼新型电源。并用其它波形的电流与其对比,对含银8%的粗金进行电解。结果表明,周期( $2\pi$ )换向电解法克服阳极钝化的能力最强,且电源设备简单,阴极产品外观状态佳,色黄、平整、致密。经计算其电流效率可达93%~95%,电金成色可达99.99%。

2000年,付国民<sup>[14]</sup>报道了浙江遂昌金矿应用非对称交流电源电解生产金的情况。非对称交流电源为交流电,正半周导通,负半周小部分导通并可调。对含银量在0.79%~2.91%的金进行电解,正向电流控制在35~40 A,反向电流控制在4~6 A。并与交直流叠加电源以及方波电源电解效果对比,结果表明,方波电源和交直流叠加电源适合处理含银量较低的金阳极板;非对称交流电源适合处理含银量较高的金阳极板。

2002年和2003年,赵忱<sup>[15-16]</sup>报道了江西铜业公司串并联混合交直流叠加电路形式的电源装置。这种新型电源电解,不仅提高了电解液的温度和阴极电金的纯度和致密度,而且保证了阳极板的导电截面积,间接降低了电流密度,减少了金粉的形成,使阳极泥中金的含量减少,残极率降低,提高了金电解效率。

由此可见,电解电源对金的电解生产起着非常重要的作用。实际应用中可根据金原料中的银含量确定合适的电源类型及交流电与直流电的比值。

### 3 永久阴极板的设计与研究

传统的黄金电解精炼采用粗金作阳极,纯度为99.99%的金始极片作阴极,进行电解提纯金<sup>[17-20]</sup>。

金始极片的制作有轧制法和电解法2种<sup>[18]</sup>。电解法制取金始极片俗称电解造片。造片在与电解金相同或同一电解槽中进行。电解液为氯化金溶液,槽内装入粗金阳极板和纯银(钛)阴极板(种板)。种板在入槽前,先擦拭干净,并经烘热至30~40℃后打上一层极薄而均匀的石蜡,在种板边缘处一般经过沾蜡处理或用其他材料进行粘边或夹边,以利于始极片剥离。然后在一定的电流密度、温度等电解条件下电解,通电过程中阳极不断溶解,并于阴极种板上析出纯金。电解一段时间后,即能在种板两面析出一定量的金片。种板出槽后,剥下始极片,清洗、烘干,然后裁成合适尺寸,经钉耳、拍平,供

金电解使用<sup>[21]</sup>。

随着技术的快速发展,出现了以金为原料轧制制作始极片的新工艺。该工艺比传统的种板生产始极片成本较高,但是其表面质量较好,并且省去了电解制作始极片的电解槽。

但是传统的金始极片的使用存在一定的问题,如电解法制取始极片过程中对电解液的温度具有一定的要求,否则溶液脱蜡造成种板包边剥离不下而造成废种板。此外,电解制备始极片不但耗时而且还会造成资金占压等问题。为减少金原料在生产中的占用量,压缩生产占用资金,需寻找导电性好且耐强酸腐蚀的新材料替代金材。随着技术的发展,永久阴极板的研究成为热点。

文书毕<sup>[22]</sup>在用电解精炼制备高纯金的研究中用钼片作阴极进行电解实验,工艺方法简便易行,投资少,并成功应用于生产。

肖金娥等<sup>[23]</sup>研究了用钛材代替金阴极在金电解精炼中的使用情况。研究表明,用钛材作阴极,铜材作导电钩,可提高单位时间产量,减少黄金积压,加速资金周转,产品质量可以得到保证,操作方便,保管容易,可反复使用,具有极大的应用和推广价值。

## 4 电解环境研究

半导体集成电路、感光胶片、化学试剂、精密仪表等生产过程,都要在超净环境中进行。为保证产品的质量,某些高精产品的生产厂家都对环境进行了严密的控制。由于大面积的超净间造价很高,且达到高洁净度的难度很大,可以选择建立超净工作台、超净工作腔等局部超净环境。一般采用通入正压洁净空气以防止腔外不洁净的空气进入,保证洁净度。为了防止工作人员的衣服、肤发的影响,还要求工作人员穿戴专门的工作服,并要通过风浴室进行洁净。近年来,随着对高纯金原料要求的提高,高纯金的工作环境也逐步成为保证其纯度的必要考虑条件。

熊超<sup>[24]</sup>报道了江西铜业集团公司贵溪冶炼厂金线用高纯金生产设备的选型研究。为消除生产过程中环境污染对高纯金质量的影响,贵溪冶炼厂设计了洁净度达到10万级的生产环境,采用环集通风系统进行气体循环,并保证整个生产厂房内保持微正压;所有电解装置都放在FRP通风罩内,实现电解槽与周围环境的隔离,并使通风罩内保持微负压,

有效防止了电解过程中酸雾的挥发对环境的污染。此外,它们在生产区、包装区以及整流柜配电室均安装空调,保证洁净厂房的温度和湿度。在此环境下,成功研制出“一步法生产高纯金”生产工艺。

孙敬韬等<sup>[25]</sup>在“一步法生产高纯金”的工艺研究中也提到了对环境的改善。将电解槽安装在一个密闭的通风罩内,减少了酸雾对环境及器具的腐蚀;利用另一台风机对整个电解室送风,使厂房内呈正压,以防止室外粉尘进入。有效解决了环境通风及粉尘对产品质量的影响问题。

## 5 电解工艺研究

### 5.1 主要工艺参数

#### 5.1.1 电解液的制备

金电解液的制备方法主要有 3 种<sup>[26]</sup>:王水溶金法、隔膜电解法和均质阴离子交换膜造液法。

王水溶金法,是把王水与金片置于容器中加热至沸,使金溶解而成,然后把硝酸驱去。此法的优点是速度快,较简便,但赶硝比较麻烦,残余硝酸一方面会造成电解金的反溶,另一方面会引起阳极袋的氧化,从而造成阳极泥泄露影响电解金的品质。

隔膜电解法,是用粗金作阳极,用纯金作阴极,用稀盐酸作电解液进行电解。一般情况下,用陶瓷或塑料槽做电解槽,阴极用素烧陶瓷坩埚作隔膜,槽中电解液的比例为  $\text{HCl}:\text{H}_2\text{O}=2:1$ ,坩埚电解液的比例为  $\text{HCl}:\text{H}_2\text{O}=1:1$ 。坩埚内液面高于电解槽液面 5~10 mm。通入脉动电流,阳极粗金溶解,金以  $\text{Au}^{3+}$  进入阳极电解液(即电解槽中的电解液),由于受到坩埚隔膜的阻碍, $\text{Au}^{3+}$  不能进入阴极电解液(即素烧坩埚中的电解液)中,而  $\text{H}^+$ 、 $\text{Cl}^-$  可以自由通过。这样,阴极上无金析出,而只放出氢气, $\text{Au}^{3+}$  便在阳极液中积累起来,最后可制得含金液。可利用此溶液配制成金电解精炼的电解液。

目前,金电解生产厂家一般采用以上 2 种方法制备金电解液,而隔膜电解法较王水溶金法使用者居多,但二者都存在着许多缺点。隔膜电解法制取电解液时,电阻大,槽电压高,液温高达 68~70℃,坩埚使用寿命低(一般在 48 h 以内),坩埚渗金,回收困难,操作条件差,酸蒸气大,电流效率低(93%~95%)。王水溶金法制取电解液比较简单,但工作环境比素烧坩埚更恶劣,赶硝麻烦,硝赶不净,很容易造成金返溶。

随着技术的发展,近几年国内开发了均质阴离

子交换膜造液法的新工艺。均质阴离子交换膜具有膜薄、表面光滑;耐酸、耐碱和耐氧化;面电阻低、电流效率高;对离子选择透过性好,交换容量越大,黏度越低,反透性越小;干膜沾湿后,体积膨胀小等优点,在金电解液制备过程中具有独特的优势。

撒应福等<sup>[27]</sup>的报道中指出采用均质阴离子交换膜进行电解是国际上比较先进的工艺,但国外的报道较少,国内相关应用也较少。他们对比了采用均质阴离子交换膜造液与素烧坩埚隔膜电解法造液的情况。研究表明,采用均质阴离子交换膜进行电解阴极析出的金粉很少,且膜基本不粘金,金几乎可全部回收,电解的效果较好,满足电解液的质量要求且可以大大节约资源。

宋裕华等<sup>[28]</sup>研究了均质阴离子交换膜在金电解造液过程中的技术指标,并与素烧坩埚隔膜电解法进行了对比。研究表明,均质阴离子交换使用寿命比素烧坩埚长,成本低,电流效率高,金回收率高,操作条件好,是在金电解液制取过程中素烧坩埚的理想替代品。

#### 5.1.2 电解液中金离子的浓度

电解液中保持一定的金属离子浓度是正常进行电解的基本条件之一。一般来说,电解液中金属离子浓度增加,电流效率也相应的提高;且当溶液中有大量离子存在时能促进新晶核的产生,晶核的产生速度大于晶粒的生长速度,此时电解过程中不利于产生大的晶粒而有利于产生致密的沉积物。但是金离子的浓度又不能过高,这是由于浓度过高时阳极附近的电化学溶解的金离子向电解液中扩散就变得困难,容易引起阳极钝化。电解过程中应根据情况保持一定的金离子浓度。

#### 5.1.3 电流密度

电流密度是电解过程中的重要参数。在电流密度较低时,晶核的生长速度大于新晶核的生长速度,从而得到大结晶的沉积层;在其它工艺条件相同的条件下,提高电流密度可提高产量,新晶核的生长速度随之增大,故沉积层的晶粒细而致密。当电流密度很高时,离子的沉积速度大于扩散速度,阴极附近金属离子浓度低,此时晶粒有向离子浓度较大的方向生长的趋势,阴极会有树枝状结晶生成。此外,电流密度过高,电能消耗增加,阴极析出产品的质量也会恶化。当电流密度达到一定程度时,达到氢、氧的析出电极电位,则氢氧等将与金属同时析出,气体的析出能影响晶粒的长大过程,阴极生成多孔的、海绵状沉积物。由于电流密度既不能过

高也不能过低, 应选择合适的电流密度。

#### 5.1.4 电解温度

提高电解温度可以降低电解液的电阻, 提高电导率, 从而缓解浓差极化; 随着温度的升高, 晶核的生长速度随之增大, 有利于析出较大的枝晶状产物。但是电解温度过高, 容易造成溶液蒸发量大, 电解液挥发损失, 并使环境恶化。因此, 在电解过程中应控制合适的电解温度。

#### 5.1.5 电解溶液的酸度

在电解过程中, 其它条件一定的情况下, 降低电解液的酸度, 可使氢的析出电位变得更负, 不利于氢气的析出, 从而可以提高电流效率。但电解液酸度过低时, 阴极附近的电解液中  $H^+$  离子浓度降低, 会发生水解生成金属氢氧化物致使阴极沉积物呈海绵状, 并且酸度降低, 电解液的导电性差。因此, 电解时电解液需保持一定的酸度。

### 5.2 电解工艺研究

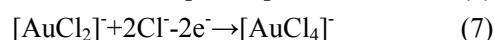
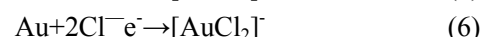
1972 年国外报道了采用金的王水溶液电解分离金<sup>[29]</sup>, 利用含金量不低于 70% 的金板作为阳极, 用抛光的钛板作为阴极。在电解精炼多尔合金时, 电解过程中电流密度为 800~1400 A/m<sup>2</sup>, 电极上的电压为 2.5~3.0 V。电解液中  $NO_3^-$  的浓度为 95~110 g/L, HCl 的浓度为 130~160 g/L。电解金的纯度达到 99.99%。王水电解法能在达到更高的阴极金质量的条件下, 可以处理低品位的、杂质含量较高的阳极金属。

1989 年, 国内也报道了用沃耳维尔法电解生产金<sup>[30]</sup>。采用交直流叠加电源, 金离子浓度为 160~220 g/L, 盐酸的浓度约 260 g/L, 通过电解将 92%~94%

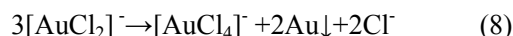
粗金纯度提高到 99.995% (按当时国标 Au-1 的要求检测 16 种杂质元素)。

陈东<sup>[31]</sup>报道了将黑金粉直接连续加入电解槽中进行电解, 从而得到电金的新工艺。电解过程中阴极在优良搅拌装置下不断转动, 电流密度为 10 A/dm<sup>2</sup>, 但详细电解工艺参数未见报道。

此外, 研究表明, 电解精炼金时, 在高浓度的电解液中会生成一种极细的金粉<sup>[9]</sup>。这是因为在电解过程中电解液里除了存在  $[AuCl_4]^-$  外, 还发现有一价  $[AuCl_2]^-$  离子的生成, 使电解液中存在以下平衡:



上述反应的平衡电位比较接近, 建立平衡很缓慢; 所以当一价金离子的浓度超过平衡值时, 容易在阳极附近发生分解生成金粉:



按上述反应析出的金粉沉于槽底, 使金离子不能全部迁移到阴极放电析出金, 影响电解金的产量, 使电流效率降低。因此, 这种现象应尽量避免。进一步研究表明, 这种情况不可能完全避免, 通过适当控制电解温度和电流密度可以使槽底金粉减少。

## 6 国内高纯金生产概况

### 6.1 高纯金产品标准

2010 年, 我国发布了《高纯金》国家新标准 (GB/T 25933-2010)<sup>[32]</sup>, 对金的纯度要求达到了新的高度, 具体要求如表 2 所列。

表 2 高纯金(Au99.999) (GB/T 25933-2010)杂质要求标准<sup>[32]</sup>

Tab.2 Impurity requirement standard of high-purity gold (Au99.999) (GB/T 25933-2010)<sup>[32]</sup>

$\omega(Au)/\%$	杂质元素质量分数/ $10^{-6}$ , 不大于																			杂质总量			
$\geq 99.999$	Ag	Cu	Fe	Pb	Bi	Sb	Si	Pd	Mg	As	Sn	Cr	Ni	Mn	Cd	Al	Pt	Rh	Ir	Ti	Zn	$\leq 10 \times 10^{-6}$	
	2	1	2	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	

由表 2 可见, 5N 高纯金要求检测的杂质元素有 21 种, 比原“99.995%”的 14 种元素的检测要求高。而 2015 年发布的《金锭》国家标准 (GB/T 4134-2015)<sup>[33]</sup>, 其中 IC-99.995 牌号金的杂质元素检测要求为 12 个, 也没有《高纯金》的要求高。

### 6.2 国内主要生产厂家

随着 5N 金新国标的出台, 许多公司都严格控

制电解过程中的各项技术条件, 以生产高质量的电金。根据文献报道, 近几年国内生产高纯金的厂家主要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, 其主要工艺条件列于表 3。山东招金金银精炼有限公司、中原黄金冶炼厂、金川集团股份公司、紫金矿业集团公司黄金冶炼厂也有生产。

表 3 部分生产高纯金的厂家及其工艺条件对比

Tab.3 The technology comparison of high-purity gold production in different companies

厂家	贵研铂业 <sup>[34]</sup>	江西铜业 <sup>[25]</sup>	浙江遂昌 <sup>[18]</sup>
报道年份	2010	2014	2014
粗金板 含金量/%	≥99.9	99.4	95~99
Au <sup>3+</sup> /(g/L)	60~90	80~120	-
酸度/(g/L)	50~60	60~90	-
NaCl/(g/L)	60~80	无	无
电解电源	恒流恒压恒 温控制系统	-	非对称 交流电源
电解液 制备	-	隔膜电解 造液	隔膜电解 造液
是否加热	是	自动热水 保温装置	否(自热)
电解温度/°C	50~60	35~40	自热
槽电压/V	2.8~3.0	0.5~0.6	0.25~0.5
阴极电流 密度/(A/m <sup>2</sup> )	300~400	245	-
电解液 是否循环	-	循环	充气搅拌
产品纯度	>99.999	>99.999 杂质含量均小 于 0.0001%	>99.997 杂质含量低于 99.999%的要求
测试元素 个数	18 个	-	18 个

注：“-”表示文献中未报道

2012 年,《黄金科学技术》报道了“紫金矿业具备年产 5 t ‘五九’高纯金能力”,产品经测试,23 个杂质元素全部优于国家标准。产品类型有金泥、金珠和金锭 3 种,并已经形成了一条稳定可靠的生产、检测和销售渠道<sup>[35]</sup>。

通过上述对比可知,随着工艺条件的改进,高纯金的质量不断提高。但是目前国内大多数厂家的高纯金产品还与 5N 高纯金的标准存在一定的差距,国内高纯金的制备生产水平有待进一步提高。

## 7 展望

生产高纯金既是当今社会发展的需要,又是企业在激烈的市场竞争中的生存之道。近年来,随着世界半导体产业向中国转移,金线的需求量每年以 50%~60% 的速度增长,相关企业迫切希望在国内寻找高纯金原料的供应厂商,以满足其生产需要<sup>[21]</sup>。高纯金具有广泛而迫切的市场需求。随着发展的需求,国内外不断对现有的高纯金标准进行修订,国家及行业对高纯金有更高的标准。目前,国内厂家

金的纯度大幅提高,但由于高纯环境及检测条件的限制,对某些杂质元素(如 Si)的避免和检测还存在一定的瓶颈。因此,真正能完全满足 5N 高纯金标准的电解生产工艺国内鲜有报道。由此可见,制备满足现行国标要求的 5N 高纯金,向国内外高纯金的标准看齐,是适应相关的产业发展需求的必由之路和行业领先的需要,是未来高纯金生产的主要发展方向。

## 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] 胡建华.一种高纯金的制备方法:CN102925679A[P]. 2013-02-13.  
HU J H. A method of high-purity gold preparation: CN102925679A[P]. 2013-02-13.
- [3] 胡秋芬.固相萃取技术在金提取和分析中的应用研究[D].昆明:昆明理工大学,2008.  
HU Q F. Study on the application of solid phase extraction technology in the gold extraction and gold determination[D]. Kunming: Kunming University of Technology, 2008.
- [4] 巩海娟.99.99%黄金提纯工艺的研究[D].长春:吉林大学,2006.  
GONG H J. An experimental study of 99.99% gold refining[D]. Changchun: Jinlin University, 2006.
- [5] 刘勇,阳振球,杨天足.金电解与溶剂萃取精炼工艺比较分析[J].黄金,2007,28(6):42-45.  
LIU Y, YANG Z Q, YANG T Z. The comparison between gold electrolysis and solvent extraction refining process[J]. Gold, 2007, 28(6): 42-45.
- [6] 魏莉,汪丹,郭平.黄金精炼提纯工艺研究与生产实践[J].黄金,2000,21(3):37-39.  
WEI L, WANG D, GUO P. Study and operation practice of the technology of gold refining[J]. Gold, 2000, 21(3): 37-39.
- [7] 霍松龄.黄金精炼工艺综述[J].黄金,2014,35(8):65-68.  
HUO S L. Overview on gold-refining technology[J]. Gold, 2014, 35(8): 65-68.
- [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] 吴玉. 金的电解精炼技术条件的控制[J]. *中国有色冶金*, 1984(11): 24-25.
- WU Y. Control of technology conditions of gold electrorefining[J]. *China nonferrous metallurgy*, 1984(11): 24-25.
- [10] 孙戩. 金银冶金[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1986: 376-37.
- SUN J. *Gold and silver metallurgy*[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1986: 376-379.
- [11] 盛枝, 张墨霞. 黄金电解电源[J]. *白银科技*, 1995(2): 50-53.
- SHENG Z, ZHANG M X. Gold electrolysis power supply[J]. *Silver technology*, 1995(2): 50-53.
- [12] 郑勇, 常占河, 李德俊. 周期自动换向金电解新工艺[J]. *黄金*, 1996, 17(4): 35-3
- ZHENG Y, CHANG Z H, LI D J. New technology of gold electrolysis with the installation of changing direction automatically at regular intervals[J]. *Gold*, 1996, 17(4): 35-38.
- [13] 郑勇. 周期(2 $\pi$ )换向金电解电源[J]. *黄金*, 1999, 20(12): 29-33.
- ZHENG Y. Power supply of cyclic(2 $\pi$ ) change over electrorefining of gold[J]. *Gold*, 1999, 20(12): 29-33
- [14] 付国民. 非对称交流电源在金电解生产中的应用[J]. *黄金*, 2000, 21(5): 37-39.
- FU G M. The application of non-symmetrical AC power supply in the operation of gold electrolysis[J]. *Gold*, 2000, 21(5): 37-39.
- [15] 赵忱. 金电解电源装置的优化设计与应用[J]. *矿冶*, 2002, 11(3): 77-79.
- ZHAO C. Optimum desing and application of power supply for gold electrolysis[J]. *Mining and metallurgy*, 2002, 11(3): 77-79.
- [16] 赵忱. 交直流叠加在金电解中的应用[J]. *设备管理与维修*, 2003(3): 19.
- ZHAO C. Application of AC/DC technology in gold electrolysis[J]. *Plant maintenance engineering*, 2003(3): 19.
- [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] 叶跃威. 高纯金的电解工艺[J]. *贵金属*, 2014, 35(1): 23-16.
- YE Y W. Electrolysis process of high purity gold[J]. *Precious metals*, 2014, 35(1): 23-16.
- [19] 胡建辉, 夏兴旺, 王日, 等. 一步法高纯金生产工艺: CN101122032A[P]. 2008-02-13.
- HU J J, XIA X W, WANG R, et al. One-step high pure gold production process: CN101122032A[P]. 2008-02-13.
- [20] 王日, 黄绍勇, 熊超, 等. 一种阴极金电解精炼工艺: CN102978658[P]. 2013-03-20.
- WANG R, HUANG S Y, XIONG C, et al. A cathode gold electrolysis refining process, CN102978658[P]. 2013-03-20.
- [21] 王银祥, 冯治兵, 周俊涛, 等. 一种提高金电解精炼工艺中金析出品位的方法: CN 103590071A[P]. 2014-02-19.
- WANG Y X, FENG Z B, ZHOU J T, et al. A method to improve gold precipitation grade in gold electrolysis refining process: CN103590071A[P]. 2014-02-19.
- [22] 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.
- [23] 肖金娥, 毛仕杰. 钛材阴极在我厂金电解的应用[J]. *株冶科技*, 1995(3): 40-42.
- XIAO J E, MAO S J. Application of titanium cathode in gold electrolysis in our plant[J]. *Zhuzhou science and technology*, 1995(3): 40-42.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 卢宜源, 宾万达. *贵金属冶金学*[M]. 湖南: 中南大学出版社, 2006.
- LU Y Y, BIN W D. *Precious metal metallurgy*[M]. Hunan: Central South University Press, 2006.
- [27] 撒应福, 郑焕荣, 曹海祥. 均质阴离子交换膜在电解提

纯金中的应用[J]. 贵金属, 1998, 19(3): 38-39.

SA Y F, ZHENG H Y, CAO H X. An application of homogeneous anion exchange membrane to gold refining by electrolysis[J]. Precious metals, 1998, 19(3): 38-39.

[28] 宋裕华, 张基娟. 阴离子交换膜在金电解中的应用[J]. 黄金, 2007, 28(12): 47-48.

SONG Y H, ZHANG J J. Application of anion exchange membrane in gold electrolysis [J]. Gold, 2007, 28(12): 47-48.

[29] 张兴仁. 金的电解精炼法[J]. 国外黄金参考, 2000(7): 28-31.

ZHANG X R. Electrorefining of gold[J]. Foreign gold reference, 2000(7): 28-31.

[30] 王定良, 毛仕杰. 沃耳维尔法电解金的生产实践[J]. 湖南冶金, 1989(2): 24-26.

WANG D L, MAO S J. Production practice of Wohlwill process in gold electrolysis[J]. Hunan metallurgy, 1989(2): 24-26.

[31] 陈东. 黑金粉直接连续金电解[J]. 黄金, 1987, 8(1): 64.

CHEN D. Direct continuous electrolysis of black gold powder [J]. Gold, 1987, 8(1): 64.

[32] 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, 2011.

SAC/TC 379. High-purity gold: GB/T 25933-2010[S]. Beijing: Standards Press of China, 2011.

[33] 全国有色金属标准化技术委员会. 金锭: GB/T 4134-2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.

SAC/TC 243. Gold ingot: GB/T 4134-2015[S]. Beijing: Standards Press of China, 2011.

[34] 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.

[35] 佚名. 紫金矿业具备年产 5 t“五九”高纯金能力[J]. 黄金科学技术, 2012, 20(2): 85.

Anon. Zijin Mining have a 5 ton production capacity of high purity gold[J]. Gold science and technology, 2012, 20(2): 85.

\*\*\*\*\*

### 《贵金属》征订启事

《贵金属》季刊, 大 16 开, 每期约 90 页, 每期 15 元, 全年 60 元 (含邮政印刷品邮费。若需快递, 采用到付形式), 海外订户全年 40 美元。可按以下 2 种方式订阅 (详见《贵金属》编辑部网站“联系我们”栏目):

- 银行汇款: 开户银行: 云南省工行营业部; 户名: 昆明贵金属研究所; 账号: 2502 0103 0902 0106 938。
  - 邮局汇款: 650106, 昆明市高新技术开发区科技路 988 号 贵金属编辑部 (收)
- 欢迎国内外相关专业的专家、学者、科研人员、大专院校师生以及科研院所和企业单位赐稿、订阅。

### 《贵金属》季刊订阅回执

订刊信息 (2018 年第 1~4 期: 60 元/年)	邮寄信息 (普通邮政印刷品及挂号信)
订刊份数: ____份; 汇款方式: 银行 <input type="checkbox"/> /邮局 <input type="checkbox"/>	邮编、省市、详细地址、单位及收件人信息:
汇款金额: <u>¥</u> ____ .00	
发票抬头:	
纳税人识别号:	
	收件人: _____ 手机: _____

此表可自制, 将相关信息用电子邮件发送至: [bjba@ipm.com.cn](mailto:bjba@ipm.com.cn) 或 [gjsz@chinajournal.net.cn](mailto:gjsz@chinajournal.net.cn)  
《贵金属》编辑部联系电话: 0871-68328632 网站: <http://www.j-preciousmetals.com>