

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2023.12.007

## 以聚丙烯酸钠为保护剂制备单分散纳米金粒子

董春法<sup>1\*</sup>, 熊力<sup>2</sup>, 陈峥淏<sup>2</sup>, 付锐平<sup>1</sup>

(1. 湖北理工学院机电工程学院, 湖北黄石 435003; 2. 湖北国安特殊钢检验检测有限公司, 湖北黄石 435003)

**摘要:** 以聚丙烯酸钠(PAAS)为保护剂, 氯金酸溶液为前驱体, 采用水合肼还原氯金酸的化学还原法成功地制备了单分散的纳米金粒子。利用X射线衍射(XRD), 紫外分光光度计(UV-vis), 透射电子显微镜(TEM)、红外光谱仪(FT-IR)和扫描电镜(SEM)等分析测试设备对样品进行了深入的研究与分析。讨论了反应条件对纳米金粒子粒径和形貌的影响。研究表明: 所得到的纳米金粒径较小, 分布较为均匀; 氯金酸溶液用量、PAAS溶液用量和还原剂用量等对纳米金粒子的粒径影响较大。在本研究中, 当PAAS溶液(0.1 g/L)用量为5 mL、氯金酸溶液(2 g/L)用量为1 mL、水合肼(85%)用量为4 mL时, 所制备纳米金的粒径最小, 平均粒径约为50 nm, 均匀地分布在20~60 nm之间。

**关键词:** 聚丙烯酸钠; 纳米金; 还原法

中图分类号: TB383 文献标识码: A

## Synthesis and characterization of monodispersed gold nanoparticles using sodium polyacrylate as protective agent

Dong Chunfa<sup>1\*</sup>, Xiong Li<sup>2</sup>, Chen Zhenghao<sup>2</sup>, Fu Ruiping<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical and Electronic Engineering, Hubei Polytechnic University, Huangshi 435003, China; 2. Hubei Guoan Special Steel Inspection and Testing Co., Ltd., Huangshi 435003, China)

**Abstract:** Monodispersed gold nanoparticles were synthesized by chemical reduction method using sodium polyacrylate (PAAS) as the protective agents, chloroauric acid solution as metal source, hydrazine hydrate as reducing agents. X-ray powder diffraction (XRD), UV-vis spectrum, transmission electron microscopy (TEM), Fourier transform infrared spectrometer (FT-IR) and scanning electron microscope (SEM) were used to characterize the as-prepared gold nanoparticles. Some reaction conditions which affect the particle size, morphology of gold nanoparticles, were discussed. The results show that the prepared gold nanoparticles are small in size with narrow distribution. The amounts of chloroauric acid solution, PAAS solution and hydrazine hydrate play vital roles in the size and morphology of gold nanoparticles. The optimized processing parameters in this research for preparation of gold nanoparticles can be obtained when the consumption of PAAS solution (0.1 g/L), chloroauric acid solution (2 g/L), and hydrazine hydrate (85%) is 5 mL, 1 mL, and 4 mL respectively. The average size of gold nanoparticles prepared at the optimum condition is about 50 nm with a narrowly distribution from 20 to

收稿日期: 2023-07-12

修回日期: 2023-09-04

作者简介: 董春法(1982—), 男, 副教授, 主要研究纳米材料及其应用、3D打印先进制造, email: dongchunfa@126.com

基金项目: 湖北省自然科学基金创新发展联合基金(2022CFD053), 湖北省教育厅科研计划项目(D20194502、B2019226), 国家自然科学基金青年科学基金项目(51405146), 湖北理工学院校级科研项目(19XJK02Z、19XJK02Y), 湖北理工学院矿区环境污染控制与修复湖北省重点实验室开放基金项目(2019102)

60 nm.

**Keywords:** sodium polyacrylate; gold nanoparticles; reduction method

纳米技术是现代科学中的一个重要领域,它涉及合成尺寸在1~100 nm的微粒子<sup>[1-2]</sup>。由于具有独特的物理性能,纳米粒子在医药、能源和光学等方面发挥着重要的作用<sup>[3-4]</sup>。在纳米材料当中,金纳米粒子具有较好的化学稳定性和其它优异的性能,在光、电、生物医学、传感和催化等许多领域具有明显的潜在应用价值,引起了人们极大的研究兴趣<sup>[5-6]</sup>。

目前,国内外有关金纳米粒子的合成已经有了大量的报道,主要可以分为化学法和物理法两类<sup>[8-9]</sup>。其中物理法原理简单,但是能源消耗较大,对设备要求较高,所制备的纳米粒子粒径不均匀<sup>[10]</sup>。而化学法是通过还原剂还原氯金酸而获得金纳米粒子的一种方法,制备工艺比较简单,成本低,对设备没有很高的要求<sup>[11-14]</sup>。但是,在该合成方法中,如果仅加入还原剂还原氯金酸,无法控制合成的金颗粒的大小和形貌。因此,为了控制金粒子的粒径,在金颗粒成核和生长的过程中,需要加入一定量的分散剂或保护剂。保护剂以某一种分子间的作用力吸附在已经生成的纳米金颗粒表面,形成空间位阻效应,或者导致纳米颗粒表面带电,使带电的金颗粒之间相互排斥,减少了金颗粒之间的碰撞机会,避免已经形成的纳米金粒子因碰撞而聚集在一起而形成的长大,从而达到控制纳米金粒子尺寸的作用<sup>[15-16]</sup>。例如,聚乙烯吡咯烷酮(PVP)、聚乙烯醇(PVA)、月桂酸钠、明胶、羧甲基壳聚糖(CMCS)等都被报道用来合成贵金属纳米粒子<sup>[17-21]</sup>。聚丙烯酸钠(PAAS)可在食品行业作为增稠剂,是一种价格比较低廉的新型功能高分子材料。在其分子结构中,有长链和较多的支链,因此可以用来当作分散剂<sup>[14]</sup>。目前,在国内外还未见利用PAAS制备贵金属纳米材料的研究报道。基于上述角度考虑,本文拟选择氯金酸溶液为金属源,聚丙烯酸钠为保护剂,水合肼为还原剂,在室温条件下合成纳米金溶胶。通过单因素分析的方法(采用扫描电镜和紫外-可见分光光度计分析表征),获得了合成纳米金粒子的最佳实验条件。通过透射电镜、扫描电镜、红外光谱等仪器对最佳条件下所制备的纳米金粒子进行了表征。该研究可为采用聚丙烯酸钠制备纳米金粒子的工业

化生产提供借鉴和参考。

## 1 实验部分

### 1.1 实验试剂

聚丙烯酸钠(分析纯)和氯金酸(分析纯)等主要试剂由阿拉丁试剂有限公司提供;丙酮(分析纯)由天津大茂化学试剂厂提供;无水乙醇(分析纯)由天津科密欧化学试剂有限公司提供;水合肼(85%,分析纯)由国药集团化学试剂有限公司提供。

### 1.2 实验仪器

高速离心机(DT5-2S型)由北京时代北利离心机有限公司提供;真空干燥箱(DZF型)由北京市光明医疗仪器有限公司提供;集热式恒温加热磁力搅拌器(DF-101S型)由巩义市予华仪器有限责任公司提供;超声波清洗机(KQ 50 DB型)由昆山超声仪器有限公司提供。

### 1.3 分析测试设备

JSM-7610F型扫描电子显微镜(日本电子株式会社),Tensor 27型傅里叶变换红外光谱仪(德国Bruker公司),JEM-2100型透射电子显微镜(日本电子株式会社),Ultima IV型X射线衍射仪(日本理学公司),Nano-ZS90型马尔文粒径分析仪(英国马尔文公司)和Specord S 600型紫外-可见分光光度计(德国耶拿)。

### 1.4 纳米金粒子的制备

称量一定量的聚丙烯酸钠和氯金酸粉末,分别溶解在水中,配制成0.1 g/L的聚丙烯酸钠溶液和2 g/L的氯金酸水溶液,放置在4 °C的冰箱中保存备用。

将一定量的上述氯金酸溶液和PAAS溶液混合,搅拌10 min,使两溶液充分混合均匀,同时加入一定量的蒸馏水,使溶液总体积控制在20 mL。在PAAS和氯金酸的混合溶液中加入一定量的水合肼,还原氯金酸,同时加入一定量的蒸馏水,调节混合溶液体积到30 mL,继续搅拌反应60 min,得到纳米金溶胶。将纳米金溶胶分成两部分,一部分于4 °C避光保存,备用。另一部分金溶胶采用离心机在10000 r/min的条件下离心分离,并用酒精、丙酮

等溶剂进行多次洗涤,以去除表面过多包覆的保护剂,然后40 °C下干燥24 h,得到聚丙烯酸钠保护的纳米金固体粉末,低温保存,为后续表征备用。

### 1.5 纳米金的表征

采用X射线衍射仪对PAAS制备的纳米金粉末在管电压40 kV,管电流30 mA,扫描速度8 °/min的条件下,在30 °~85 °的范围内进行物相和结晶度测试。

把少量PAAS制备的纳米金固体粉末和溴化钾粉末混合并研磨,然后压片并放置于红外光谱仪的样品室中进行红外测试。

量取一定量PAAS制备的纳米金溶胶置于石英样品池中,在250~800 nm波长范围内,采用紫外分光光度计进行分析并记录的吸光度数据。

取少量PAAS制备的纳米金粉末于无水乙醇中,超声分散5 min,用一次性滴管取1滴分散后的纳米金悬浮液,滴在铜网或沾有导电胶的铜台上,于真空干燥箱中40 °C下干燥30 min。所得试样采用透射电镜或扫描电镜分析微观结构,加速电压分别100 kV和5 kV。

## 2 结果和讨论

### 2.1 前驱体溶液用量的影响

在制备金属纳米溶胶时,有多种金属盐溶液可以作为前驱体。在合成纳米金溶胶时,氯金酸是首选的前驱体。在本研究中,配制成2 g/L的氯金酸溶液作为金源。为了研究氯金酸溶液用量对纳米金溶胶的影响,在其它反应条件不变的情况下,分别采用0.5 mL、1.0 mL和2.0 mL的前驱体溶液在室温下合成纳米金粒子。图1是在不同前驱体溶液用量下所

制备纳米金溶胶的UV-vis光谱。分析可知,在不同前驱体溶液用量下,对应的吸收峰的位置变化不是非常明显。当前驱体溶液用量为0.5 mL时,在575 nm处有一吸收峰,表明溶胶中存在纳米金粒子。当前驱体溶液为1.0 mL时,在568 nm处有一明显的吸收峰。吸收峰位置的左移说明对应溶胶中的纳米金颗粒的平均粒径在减小<sup>[5,10,18]</sup>。当前驱体溶液用量为2.0 mL时,对应纳米金溶胶的吸收峰的位置也在568 nm,证明过量的增加前驱体溶液用量,对溶胶中纳米金粒子的平均粒径影响不大。

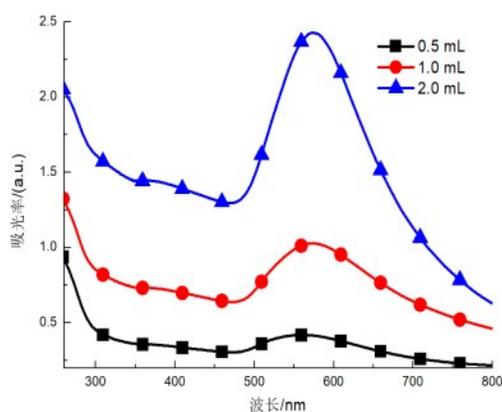


图1 不同氯金酸溶液用量下纳米金溶胶的UV-vis光谱图

Fig.1 UV-vis spectra of Au colloids synthesized at different amount of chloramic acid solution

图2是在不同前驱体溶液用量下所得纳米金的SEM图片。从图2可知,在3种条件下所得的纳米金粒子的粒径相差不是很大,所得的纳米金粒子都为球状或近似球状。相对来说,当氯金酸用量为0.5 mL时,所得的纳米金粒子的粒径稍大一些。

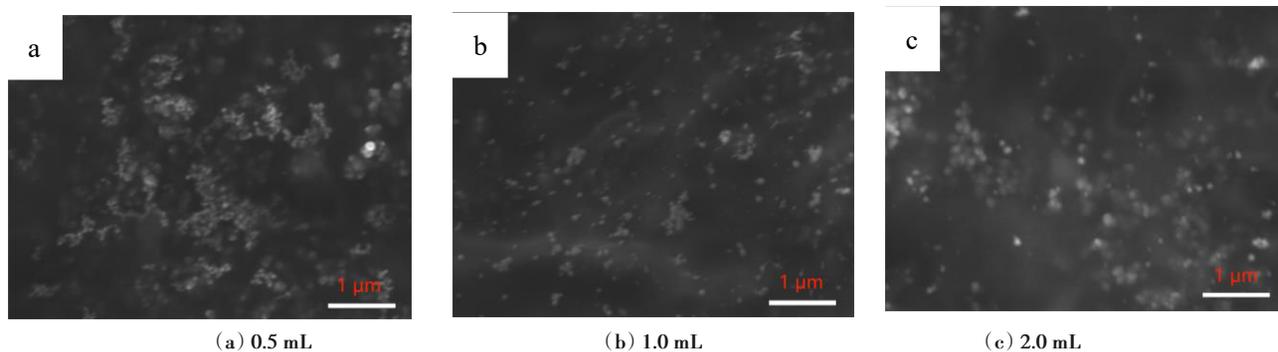


图2 不同氯金酸溶液用量下纳米金粒子的电镜照片

Fig.2 SEM images of Au nanoparticles prepared using different amount of chloramic acid solution

### 2.2 PAAS 溶液用量的影响

图3是在不同PAAS溶液(0.1 g/L)用量下得到纳米金溶胶的UV-vis光谱图。从图3可知,当PAAS溶液用量为3 mL时,对应的纳米金溶胶在580 nm处有一个比较强的吸收峰,表明PAAS用量较小时,就能较好的合成金纳米粒子。随着PAAS溶液用增加到5 mL时,相应纳米金溶胶的吸收峰蓝移到568 nm。蓝移说明了对应的纳米金溶胶的纳米粒子的粒径有所减小<sup>[5,12]</sup>。表明随着PAAS溶液用量从3 mL增加到5 mL时,对应的溶胶中纳米银粒子的粒径有所减小。但是继续增加PAAS溶液用量到8 mL时,对应纳米金溶胶的吸收峰出现红移,表明继续增加PAAS溶液用量,不能减小纳米金的粒径。这表明在采用PAAS溶液制备小粒径纳米金时,存在一个较为合适的保护剂溶液用量。当PAAS溶液用量较少时,随着保护剂溶液用量的增大,在保护剂聚丙烯酸钠的强表面保护作用下,抑制了金颗粒的聚集和生长。随着PAAS溶液用量的继续增加,反应体系中保护剂的浓度过大,使得溶液的黏度增大,从而阻碍生成金晶核在体系中的运动速度,导致纳米金粒子的紫外吸收峰红移,平均粒径又呈现出随着PAAS溶液用量的增加而又开始增大的趋势<sup>[22-25]</sup>。在先前实验中,配制了1 g/L的聚丙烯酸钠溶液制备纳米金粒子,实验体系的黏度过大,无法进行实验。

因此,在本研究当中,通过单因素实验的方法,确定5 mL的PAAS溶液用量为本实验体系的最佳用量。

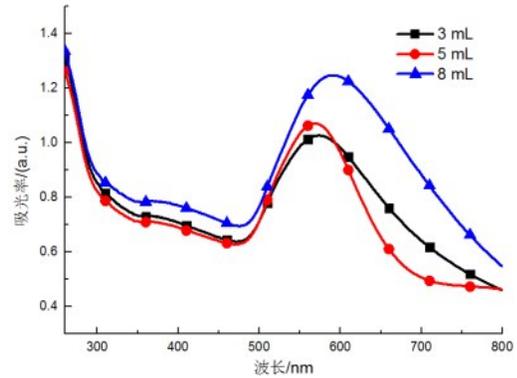


图3 不同PAAS溶液用量下纳米金溶胶的UV-vis光谱图

Fig.3 UV-vis spectra of Au colloids synthesized at different amount of PAAS solution

图4是在不同PAAS溶液用量下所制备纳米金的SEM图片。当PAAS用量为3 mL和5 mL时,对应的纳米粒子的粒径和形态变化不大。从图4可以看出,纳米金粒子形态差异不大,只是PAAS溶液用量为5 mL时,所得到的纳米金粒子的粒径略小些,而PAAS溶液用量为8 mL时,所得到的纳米金粒子的粒径略大些。这与相应的UV-vis分析基本一致。

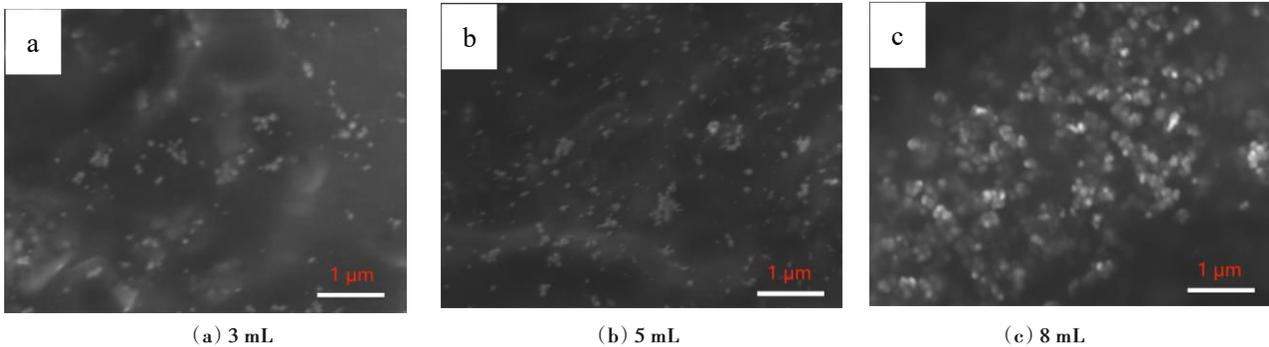


图4 不同PAAS溶液用量下纳米金粒子的电镜照片

Fig.4 SEM images of Au nanoparticles prepared using different amount of PAAS solution

### 2.3 还原剂用量的影响

图5是在不同还原剂用量下所制备纳米金溶胶的UV-vis光谱图,对应的吸收峰的位置差别较大。当水合肼用量为2 mL时,在578 nm处出现一个比较强的吸收峰。当还原剂用量为4 mL时,对应纳米金溶胶的吸收峰左移到568 nm,说明对应溶胶中纳米金粒子的平均粒径在减小<sup>[5,10,18]</sup>。当还原剂用量

为8 mL时,在600 nm处有一吸收峰,表明此时纳米金粒子的平均粒径有所增加<sup>[5,7,9,18]</sup>。当水合肼溶液用量较少时,随着水合肼用量的增加,体系中还原剂浓度增大,在反应初期生成的金核较多,从而达到减小纳米金粒子粒径的目的。当水合肼用量过大时,在反应初期生成的金核超过其临界饱和浓度,金核之间迅速结合在一起,使得纳米金粒子的粒径增

大<sup>[13,15,22,24]</sup>。因此,在此体系中,认为水合肼的最佳用量为4 mL。

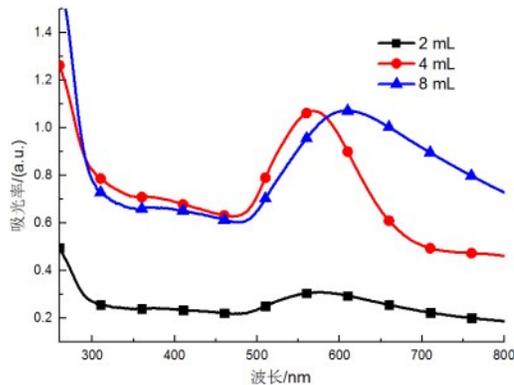


图5 不同水合肼用量下纳米金溶胶的UV-vis光谱图  
Fig.5 UV-vis spectra of Au colloids synthesized at different amount of hydrazine hydrate

图6是在不同水合肼用量下所制备纳米金的SEM图片。从图可以看出,当水合肼用量为8 mL时,纳米金粒子的粒径较大。水合肼用量为4 mL时,纳米金粒子的粒径最小。扫描电镜的结果也证实了图5的UV-vis分析结果。

#### 2.4 纳米金的结构与形貌

由上述分析可知,本实验体系中制备纳米金粒子的最佳反应条件为PAAS溶液(0.1 g/L)5 mL、水合肼溶液(85%)4 mL、氯金酸溶液(2 g/L)1 mL。图7是在此反应条件下所合成的纳米金溶胶所对应的UV-vis光谱图。分析图7,不难观察到在568 nm处有明显的吸收峰,并且吸收峰的形状比较对称,表明在最佳条件下所制备的纳米金粒子粒径较小,分布较均匀。

图8是在上述最佳条件下通过水合肼还原氯金酸的方法所合成的纳米金粒子的高倍SEM图。从

图中可以观察到,纳米金粒子的形貌以球状为主,粒径较小,分布比较均匀,约为50 nm。

图9是在最佳条件下合成的金纳米粒子的TEM图。从图中可知,除了个别粒子较大以外,大部分粒子在此条件下制备的金纳米粒子为球状的颗粒,粒径较小,分布在20~60 nm。

图10是在最佳条件下,以PAAS为保护剂,水合肼还原氯金酸溶液所得到纳米金粉末的XRD图谱。分析图10可以看出,4个峰分别座落在 $38.23^\circ$ 、 $44.35^\circ$ 、 $64.55^\circ$ 和 $77.48^\circ$ 处,与标准卡片JCPDS No.65-8601进行对照,分别对应着面心立方晶体(FCC)金的(111)、(200)、(220)和(311)晶面的衍射峰。图中4个衍射峰都比较尖锐,说明所制备的纳米金的结晶性较好。XRD分析表明,通过水合肼还原PAAS和氯金酸的混合溶液,可以得到结晶性较好的纳米金粒子。

图11是在最佳条件下合成的金纳米粒子的红外光谱图。落在 $3450\text{ cm}^{-1}$ 处最大的峰主要由于羟基(O-H)的伸缩运动造成的,而在 $2831\text{ cm}^{-1}$ 和 $1610\text{ cm}^{-1}$ 的两个小峰主要是由于C-H的伸缩运动和弯曲振动分别引起的, $1010\text{ cm}^{-1}$ 处的吸收峰主要是由于C-O的伸缩振动产生的。红外光谱分析结果表明,在纳米金粒子表面包覆有聚丙烯酸钠。

#### 2.5 反应机理

水合肼是一种中强还原剂,能够较快的把金属离子还原成金属原子,而自身被氧化成氮气<sup>[8,13]</sup>。在本研究中,在氯金酸和PAAS的混合溶液中加入一定量的还原剂时,氯金酸会被较快的被还原成单质金。在最开始时,单质金以原子的形式存在溶液当中,随着金原子数量的增加,若干个金原子自发的聚集在一起形成金核。随着反应的进行,金核数量越

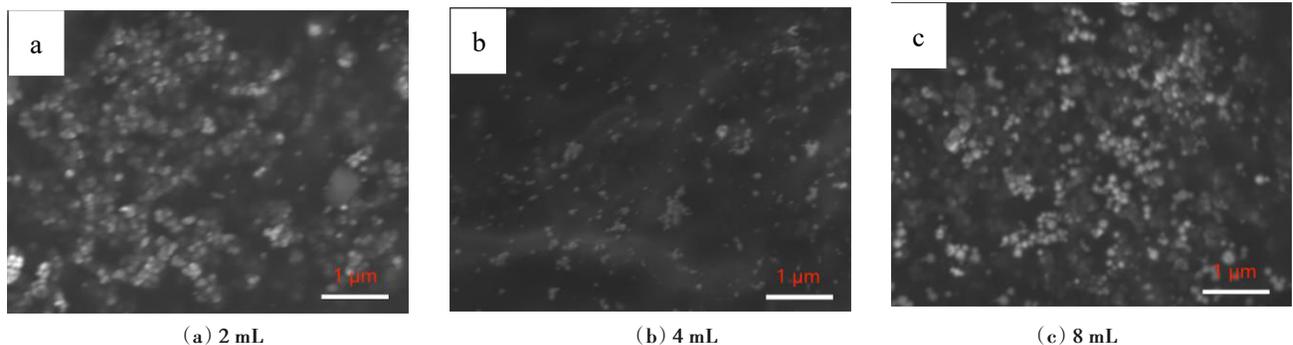


图6 不同水合肼用量下纳米金粒子的电镜照片

Fig.6 SEM images of Au nanoparticles prepared using different amount of hydrazine hydrate

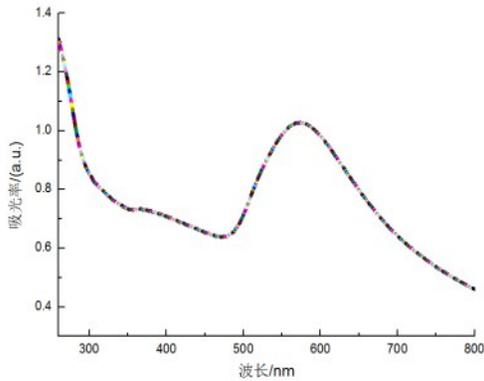


图7 最佳条件下制备纳米金溶胶的UV-vis光谱图  
Fig.7 UV-vis spectra of Au nanoparticles synthesized at the optimum condition

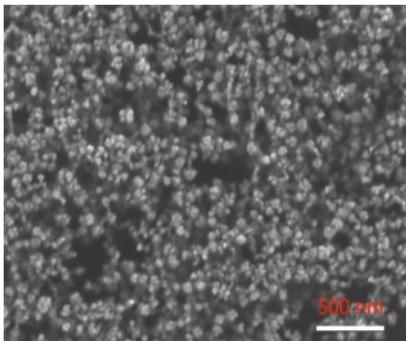


图8 最佳条件下制备纳米金粒子的SEM图  
Fig.8 SEM image of Au nanoparticles synthesized at the optimum condition

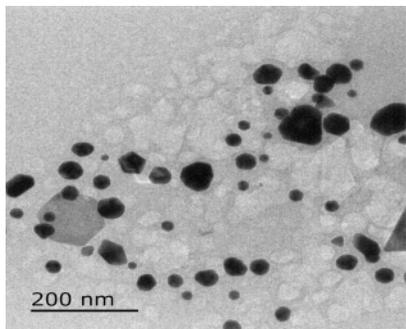


图9 最佳条件下制备纳米金粒子的TEM图  
Fig.9 TEM image of Au nanoparticles synthesized at the optimum condition

来越多,并和PAAS分子一起均匀分散在溶剂水中。当金核浓度达到临界饱和浓度时,金核与其附近新生的金原子或金核之间碰撞机会增加<sup>[20-22]</sup>。金核与原子或其它金核的碰撞可能会形成一个新的金粒子,使得金核的尺寸增大,形成纳米金粒子,并

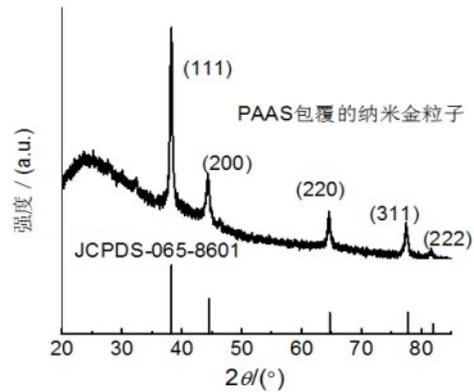


图10 纳米金的XRD图谱  
Fig.10 XRD pattern of Au nanoparticles

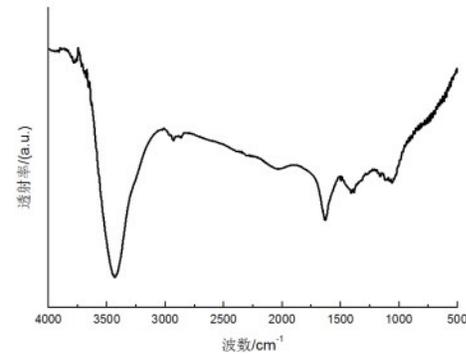
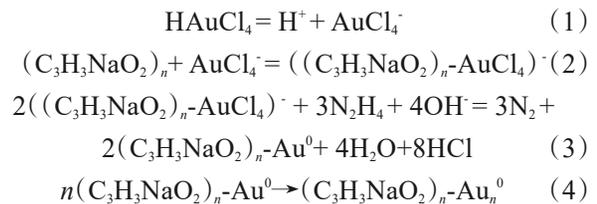


图11 纳米金的红外光谱图  
Fig.11 FT-IR image of Au nanoparticles

在表面包覆PAAS膜。由于PAAS分子的位阻效应,阻止更多金颗粒之间的相互碰撞,因此阻碍了纳米金粒子的进一步长大,从而得到小粒径的纳米金粒子<sup>[24-25]</sup>。在本研究当中,可能与其关联的化学反应方程式如下:



### 3 结论

(1)以水合肼为还原剂,氯金酸溶液为金源,聚丙烯酸钠为分散剂和保护剂,采用化学还原法成功地制备了金纳米溶胶和纳米金固体粉末。通过表征分析可知,纳米溶胶中的金纳米粒子被聚丙烯酸钠包覆,尺寸较小,平均粒径约为50 nm,较均匀地分布在20~60 nm,离心干燥后所获得的纳米金固体粉末具有较好的结晶性能。

(2)反应物PAAS溶液用量、前驱体溶液用量和还原剂用量等,对溶胶中纳米金粒子的粒径有着一定的影响,因此可以通过改变反应物用量来控制纳米金粒子的粒径和形貌。在本研究中,制备单分散纳米金溶胶的最佳反应条件为PAAS溶液(0.1 g/L) 5 mL,前驱体溶液(2 g/L) 1 mL,还原剂(85%) 4 mL。

### 参考文献

- [1] 徐光年, 乔学亮, 邱小林, 等. 微波法快速制备单分散纳米银溶胶[J]. 稀有金属材料与工程, 2012, 41(3): 531-534.
- [2] Burlibasa L, Chifiriuc M C, Lungu M V, et al. Synthesis, physico-chemical characterization, antimicrobial activity and toxicological features of Ag ZnO nanoparticles[J]. Arabian Journal of Chemistry, 2020, 13(2): 4180-4197.
- [3] 徐常有, 宫剑, 谢鹏志, 等. 基于五轴联动曲面3D打印设备的纳米银导电材料固化工艺研究[J]. 塑料科技, 2019, 47(2): 20-23.
- [4] Dong C, Zhang X, Cai H, et al. Green synthesis of biocompatible silver nanoparticles mediated by osmanthus fragrans extract in aqueous solution[J]. Optik-International Journal for Light and Electron Optics, 2016, 127(22): 10378-10388.
- [5] 张水洞, 林泽声, 黄加乐, 等. 氧化淀粉均相还原制备纳米金及用于催化丙烯环氧化反应[J]. 功能材料, 2017, 48(2): 2102-2106.
- [6] 李昀, 孙沫逸, 马超, 等. 纳米金颗粒的制备及其生物相容性研究[J]. 口腔医学, 2016, 36(9): 774-777.
- [7] Qidwai A, Kumar R, Dikshit A. Green synthesis of silver nanoparticles by seed of Phoenix sylvestris L. and their role in the management of cosmetics embarrassment[J]. Green Chemistry Letters and Reviews, 2018, 11(2): 176-188.
- [8] 董春法, 张祥林, 付锐平, 等. 纳米银及其导电浆料的制备与研究[J]. 电子元件与材料, 2013, 32(9): 30-34.
- [9] Sankar R, Rahman P K S M, Varunkumar K, et al. Facile synthesis of Curcuma longa tuber powder engineered metal nanoparticles for bioimaging applications[J]. Journal of Molecular Structure, 2017, 1129: 8-16.
- [10] 徐玥, 岳金方. 银/二氧化钛与聚乳酸复合材料的制备及生物性能研究[J]. 塑料科技, 2020, 48(11): 29-32.
- [11] 赵明, 郭国才, 宫尚霞, 等. 不同还原剂条件下的化学镀银研究[J]. 电镀与精饰, 2022, 44(9): 53-56.
- [12] 董春法, 张祥林, 蔡昊, 等. 海藻酸钠为保护剂葡萄糖为还原剂合成单分散银纳米粒子[J]. 稀有金属材料与工程, 2016, 2(45): 261-266.
- [13] 黄磊, 卢忠柏, 付锐平, 等. 小粒径金纳米粒子的可控制备与表征[J]. 塑料工业, 2020, 48(10): 103-107.
- [14] 付锐平, 董春法, 陈微, 等. 金纳米粒子的绿色制备研究[J]. 陶瓷学报, 2021, 42(2): 308-313.
- [15] 高向华, 王慧芳, 章海霞, 等. 淀粉包覆纳米银粒子的简易合成及其抗菌性能[J]. 稀有金属材料与工程, 2013, 42(10): 2097-2100.
- [16] 付锐平, 董春法, 郭小燕, 等. 桔子皮提取液绿色可控制备单分散纳米银的研究[J]. 电子元件与材料, 2021, 40(1): 30-35.
- [17] 程菲, 董春法, 李宏, 等. 月桂酸钠修饰纳米银颗粒的化学还原法制备与表征[J]. 湖北理工学院学报, 2016, 32(1): 18-22.
- [18] 姚宝慧, 徐国财, 张宏艳, 等. PVP催化还原及稳定化纳米银的微波合成[J]. 无机化学学报, 2010, 26(9): 1629-1632.
- [19] 黄磊, 卢忠柏, 董春法. 聚乙烯醇包覆银纳米粒子的可控制备与表征[J]. 微纳电子技术, 2020, 57(11): 899-904.
- [20] 魏占锋, 董峰, 王哲, 等. 载银纳米纤维素/聚乙烯醇复合膜的制备及性能研究[J]. 包装工程, 2018, 39(9): 51-55.
- [21] 梁雨轩, 张晓东, 黄林泉, 等. 镀铜银纳米线导电薄膜精细电路蚀刻的研究[J]. 电镀与精饰, 2022, 44(8): 61-64.
- [22] 丁刚强, 彭戴, 游立, 等. 室温条件下纳米银的温和制备和形貌调控[J]. 包装工程, 2022, 43(11): 8-14.
- [23] 李向果, 姚国佳, 马勇, 等. 表面活性剂对微米银粉的粒径与形貌的影响研究[J]. 电镀与精饰, 2022, 44(5): 50-56.
- [24] 邢亚阁, 廖兴梅, 李文秀, 等. 不同制备条件对纳米银绿色合成的影响[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(7): 231-237.
- [25] 董晓茹, 黄楚云, 贺华, 等. 不同形貌镀银铜粉导电胶的制备及表征[J]. 电镀与精饰, 2023, 45(6): 84-89.