多元醇法制备银纳米棒的放大试验影响因素研究

陈 勇^{1,2}, 官建国^{2*}, 谭晓明¹, 朱 琼³, 谢洪泉⁴

(1. 荆楚理工学院 化工与药学院,湖北 荆门 448000; 2. 武汉理工大学 材料复合新技术国家重点实验室,武汉 430070;
3. 湖北本心环保科技股份有限公司,武汉 430074; 4. 华中科技大学 化学系,武汉 430074)

摘 要:采用银晶种为引导剂,以高浓度硝酸银溶液为银源,乙二醇为还原剂,聚乙烯吡咯烷酮为 盖帽剂,大规模制备银纳米棒。用扫描电镜,元素分析和X射线衍射对银纳米棒进行表征。结果表 明,通过预加银晶种的方式替代添加金属盐类,最佳的反应条件为:搅拌速度为350 r/min,反应温 度为160℃,硝酸银浓度不高于0.50 mol/L,采取体积放大6倍高浓度硝酸银制备银纳米棒时,需 要提高银晶种的浓度为9.81 mmol/L, PVP/AgNO3摩尔比为1.3,该方法利用银晶种的引导作用,调 控硝酸银的还原速度使之与银纳米棒的生长速度相匹配。

关键词:金属材料;银纳米棒;银晶种;多元醇;制备条件 中图分类号:O614.122,TB383.1 文献标识码:A 文章编号:1004-0676(2018)04-0032-07

Study on Factors Influencing Scale-up Experiment of Silver Nanorods Prepared by Polyol Method

CHEN Yong^{1,2}, GUAN Jianguo^{2*}, TAN Xiaoming¹, ZHU Qiong³, XIE Hongquan⁴

(1. College of Chemical Engineering and Pharmacy, Jingchu University of Technology, Jingmen 448000, Hubei, China;

2. State Key Laboratory of Advanced Technology for Materials Synthesis and Processing,

Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;

3. Hubei Benxin Environmental Protection Hi-tech Co. Ltd., Wuhan 430074, China;

4. Department of Chemistry, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: Silver nanorods were prepared in large scale by using silver crystal as guide agent, high concentration of silver nitrate solution as silver source, ethylene glycol as reducing agent, polyethylene pyrrolidone as cap agent. The prepared silver nanorods were characterized by scanning electron microscope, Elemental analysis and X-ray diffraction. The results showed that the optimum preparation conditions for the method by pre-adding silver seeds are: stirring speed of 350 r/min, reaction temperature of 160°C, silver nitrate concentration of not more than 0.50 mol/L. When the volume of silver nitrate solution is enlarged by 6 times, the concentration of silver seed needed to improve to 9.81 mmol/L, and the molar ratio of PVP/AgNO₃ was 1.3. The method utilizes the guiding action of silver seeds to regulate the reduction rate of silver nitrate to match the growth rate of silver nanorods.

Key words: metallic materials; silver nanorod; silver seed; polyol; preparation condition

收稿日期: 2018-06-04

基金项目: 荆楚理工学院引进人才启动项目(QDB201604)、湖北省教育厅科学研究计划指导性项目(B2017250)、荆门市科技计划项目 (2018YFYB048)、湖北省大学生创新创业训练项目(201611336016、201711336006)、荆楚理工学院大学生创新创业训练项目 (KC2016012、KC2017010)。

第一作者:陈勇,男,博士,讲师,研究方向:纳米材料、高分子复合材料、绿色化工和环境功能材料。E-mail: chenyong3089@126.com *通讯作者: 官建国,男,博士,教授,研究方向: 纳米材料。E-mail: guanjg@whut.edu.cn

银纳米棒具备独特的尺寸和物理化学形貌^[1], 在光学^[2]、柔性电子器件^[3]、催化^[4]、表面增强拉曼 散射^[5]和生物传感器^[6]等许多方面得到应用,大批 量生产银纳米棒的制备技术具有重要研究价值。

近年来,研究学者们开发了许多方法制备形貌 可控的银纳米棒。广泛应用的方法包括多元醇法[7]、 水热法^[8]、紫外光还原法^[9]、电化学法^[10]、DNA 模 板法[11]、多孔材料模板法[12]和有机金属络合高分子 法[13]等。其中多元醇法是一种高效合成银纳米棒的 方法。Sun 等^[14-16]利用银晶种和聚乙烯吡咯烷酮 (PVP)存在的条件下,用乙二醇(EG)还原硝酸银制备 出银纳米棒,所使用的硝酸银的浓度为 0.12 mol/L, 产物含有大约 70%的纳米棒。进一步的研究结果证 明自成种子(滴加的硝酸银被乙二醇还原形成银晶 种)的多元醇法中,硝酸银的浓度要低于27 mmol/L, 才能使大部分产物成为银纳米棒。制备过程中反应 物的滴加速度必须非常缓慢,如果加入少量盐到多 元醇体系中,将影响产物的形貌,在常规的多元醇 反应中, FeCl₃和 CuCl₂存在的情况下将有利于生成 银纳米棒。Lu等^[17]研究制备银纳米棒的反应进程, 考察了反应温度、滴加速度和硝酸银浓度等影响因 素,但是所使用的硝酸银的浓度低于 0.1 mol/L。上 面所有的工作都是在硝酸银低于 0.12 mol/L 的条件 下得到的。他们的研究均认为银纳米棒的产率与硝 酸银的浓度和复杂的操作工艺相关。Meng 等^[18]采 用晶种诱导的方法合成了超长银纳米线,用扫描电 镜(SEM)、透射电镜(TEM)、选区电子衍射(SAED)、 X 射线衍射(XRD)和紫外可见光谱(UV-Vis)等表征 手段考察了制备条件对晶种和银纳米线的影响。结 果表明, AgNO3浓度对晶种和银纳米线的形貌有影 响。在优化条件下, 5 min 内即可诱导合成长度为 70~100 µm, 直径为 90~200 nm 的具有良好均一性 的超长银纳米线。综上所述,在不引入其它金属或 盐的多元醇法的体系中大规模高浓度高效率制备银 纳米棒还未见报道。

为此,本文参考文献^[14]的制备方法,在滴加较 高硝酸银浓度(0.50~0.70 mol/L)的条件下,采用银晶 种-多元醇还原法制备银纳米棒。考察硝酸银浓度、 银晶种用量和制备转速对产物的影响;研究放大试 验的影响因素。

1 实验

1.1 实验原料

硝酸银(ω(AgNO₃)>99.9%)购自湖北新银河化 工有限公司; K-30 型 PVP(平均分子量(*M*_w)为 40000); 乙二醇、丙酮和乙醇均为分析纯; 实验所 用水为去离子水。

1.2 银晶种的制备

将 0.0222 g 硝酸银和 20 mL 乙二醇同时加入到 带有磁石的三口烧瓶中。将磁石的搅拌速度调整为 250 r/min,用恒温油浴锅将溶液加热到 160℃,保 温搅拌反应 1 h 得到银晶种溶液(c(Ag_{seed})=6.53 mmol/L)。在进行放大试验时,晶种制备所用硝酸 银浓度和溶液体积要进行相应调整放大,晶种制备 的搅拌速度未调整。

1.3 银纳米棒的制备

称取 0.8493 g 硝酸银和 0.6663 g PVP 分别倒入 到 50 mL 烧杯中,往两只烧杯中分别加入 10 mL 乙 二醇,然后放入磁石搅拌使其溶解,得到硝酸银和 PVP 的 乙 二 醇 溶 液 (c(AgNO₃)=0.50 mol/L, c(PVP)=0.60 mol/L,此时 n(PVP)/n(AgNO₃)=1.2)。 将两种溶液分别装入到 50 mL 的恒压滴定漏斗中, 连接到三口烧瓶上。控制滴加速度均为 0.375 mL/min,将两种溶液同步滴加到 160℃油浴加热保 温的银晶种溶液中,控制磁石的搅拌速度为 350 r/min。滴加完毕,混合物继续在 160℃回流反应 1 h 后,停止加热和搅拌,溶液静置冷却至室温。

产物用离心机经 10000 r/min 离心 10 min, 倾滗 去乙二醇液体, 沉淀用丙酮洗涤 1 次、去离子水洗 涤 3 次(反复多次离心操作能提高洗涤效果)。沉淀 在真空烘箱中 60℃保温 24 h,最终所得产物 0.50 g。

1.4 结构表征和性能测试

样品用乙醇超声分散后,滴到铝箔上,用日立 S-4800 场发射扫描电镜(SEM)表征产物的形貌(扫 描电镜加速电压 10.0 kV)。用 SEM 配置的能谱仪 (EDX, Oxford INCA Sight X)分析产物的元素成份。 将样品直接压片,用 X'Pert PRO (PAN) X 射线衍射 仪(XRD)测试产物的晶体结构。

2 结果与讨论

34

2.1 制备条件对银纳米棒结构的影响

2.1.1 搅拌速度对银纳米棒结构的影响

按 1.3 的条件实验,考察了搅拌速度对银纳米 棒结构的影响,如图1所示。

由图 1 可见,随着搅拌速度的增加,银纳米棒 的直径变大,长度变小。当搅拌速度为 200 r/min 时(图 1(a)),银纳米棒的长度为 3~8 μm,直径为 200 nm。随着搅拌速度从 200 r/min 升高到 350 r/min(图 1(b)),银纳米棒的长度为1~10 μm,直径为1μm。 随着搅拌速度进一步增大,搅拌速度为500 r/min(图 1(c)),银纳米棒的长度变得更短,产物中有很多颗 粒生成。根据上述现象分析,当搅拌速度很慢时, 银晶种能保持十面体孪晶的结构,五重孪晶结构是 银纳米棒内的一种常见结构,由两个五重孪晶组合 在一起形成的十面体孪晶,所以能很好的生长成直 径较小,长度较长的银纳米棒。而当搅拌速度较快时,银晶种不仅产生出十面体孪晶的结构,也有许 多单晶生成;孪晶生长为棒状结构,而单晶生长为 颗粒状结构,所以产物中有许多颗粒生成。



(a). 200 r/min; (b). 350 r/min; (c). 500 r/min 图 1 搅拌速度对银纳米棒结构的影响

Fig.1 The morphology of silver nanorods affecting by the stirring speed(SEM)

另外,滴加到溶液中的硝酸银和 PVP 需要通过 搅拌到达银晶种的表面,因此搅拌速度也影响反应 动力学过程。搅拌速度快,反应速度快;搅拌速度 慢,反应速度慢。由于晶体的生长是一个缓慢的过 程,当搅拌速度较慢的时候,有利于晶体的生长, 所以得到较长的纳米棒;但在滴加的时候,较快的 搅拌速度对硝酸银和 PVP 的分散有利。后续的陈化 过程也很重要,加热静置不搅拌可能对晶体的生长 更有利。因此,适宜的搅拌速度有利于形成直径较小,长度较长的银纳米棒,由图1可知,制备银纳米棒的最佳的搅拌速度为350 r/min。

2.1.2 反应温度对银纳米棒结构的影响

按 1.3 的实验条件,固定搅拌转速为 350 r/min, 通过油浴加热,同时表面包覆石棉布来精确控制反 应温度。考察了反应温度对银纳米棒结构的影响, 如图 2 所示。



(a). 157°C; (b). 160°C; (c). 163°C

图 2 反应温度对银纳米棒结构(SEM 图像)的影响

Fig.2 The morphology (SEM images) of silver nanorods prepared at various temperatures

当反应温度为157℃时(图 2(a)),产物中不仅有 银纳米棒,还含有较多尺寸不均匀的颗粒,其中纳 米棒的长度为 3~5 µm,直径为 0.5~1 µm;这是由 于温度较低的情况下,单晶成核生长速度大于孪晶 的速度,单一的晶体多面体为单晶,所以形成比较 小的颗粒。当温度为 160℃时(图 2(b)),产物中以银 纳米棒为主,其长度为 2~6 µm,直径为 600 nm~1.2 µm,长度和直径都较 157℃时变大。温度进一步升 高至 163℃(图 2(c)),产物中银纳米棒直径为 800 nm~1.3 µm,长度为 2~5 µm,纳米棒的直径变大, 长度变短,很多产物接近颗粒状。对比图 2 可知, 反应温度高有利于提高反应速度,但也会破坏晶种 的结构。温度高、反应速度快时容易各向同性成核, 所以生成的银颗粒比较多,163℃时银颗粒的直径为 2μm;温度低、反应速度慢时,硝酸银被乙二醇的 还原速度降低,晶体的生长速度也降低,而反应温 度高,反应速度快,不利于一维纳米棒的生长。综 合考虑硝酸银的还原速度和晶体生长速度的匹配, 制备银纳米棒的反应温度以160℃为宜。 2.1.3 硝酸银浓度对银纳米棒结构的影响

固定搅拌速度为 350 r/min,反应温度为 160℃, 考察了硝酸银浓度对银纳米棒结构的影响,如图 3 所示,测量得到的银纳米棒直径和长度数据如表 1 所列。



(a). 0.40 mol/L; (b). 0.45 mol/L; (c). 0.50 mol/L; (d). 0.55 mol/L; (e). 0.60 mol/L; (f). 0.70 mol/L

图 3 加入硝酸银浓度对银纳米棒形貌的影响

Fig.3 The SEM images of silver nanorods affected by the concentration of added AgNO3

表1 加入硝酸银的浓度对银纳米棒长度与直径的影响

Tab.1 Effect of added AgNO3 concentration on the length and

diameter of silver nanorods			
c(AgNO ₃)/(mol/L)	长度(L)/µm	直径(D)/nm	
0.40	1~10	200~300	
0.45	4~16	300~500	
0.50	1~6	300~500	
0.55	1~10	200~600	
0.60	3~13	200~600	
0.70	1~9	300~800	

由图 3 和表 1 可知,加入硝酸银的浓度影响银 纳米棒的形貌,随着硝酸银的浓度增加,银纳米棒 的长度变长,直径变大。但是当硝酸银的浓度超过 0.50 mol/L 后,由于增加了硝酸银的还原速度,造 成体系中还原速度与生长速度不匹配,产物中银纳 米颗粒数量逐步增加。当溶液中的五面体孪晶一定 的情况下,加入硝酸银的浓度必须小于 0.50 mol/L, 才能得到高浓度的银纳米棒。

2.2 银纳米棒的结构表征

将 1.3 条件制备所得银纳米棒样品进行能谱分 析及 XRD 扫描,结果如图 4 所示。

图 4(a)表明样品为银(图中铝元素吸收峰来源 于承载样品的基材铝箔)。样品的 XRD 图谱(图 4(b)) 也证明了产物为银;由于纳米颗粒的粒径比较小, 同时银纳米棒的表面具有一定的缺陷结构,从而导 致了样品的各个衍射峰低且宽。本实验条件下所获 得的银纳米棒在 38.16°、44.34°、64.48°、77.42°和 81.60°五个位置呈现出特征衍射峰,其衍射峰与银的标准图谱(JCPDS File 04-0783)(111)、(200)、(220)、(311)和(222)晶面的数据一致,表明所得银纳米棒属于面心立方晶体结构。与标准图谱相比,(111)面具有相对高的强度,因为 PVP 覆盖在晶体的(100)面上,在银纳米棒中导致(111)面出现大量银,从而能够定向生长为银纳米棒,而非各向同性生长为银纳米球的结构。



图 4 银纳米棒的 EDX(a)和 XRD(b)图谱(c(silver_{seeds})=6.54 mmol/L, c(AgNO₃)=0.50 mol/L, c(PVP)=0.60 mol/L) Fig.4 EDX(a) spectrum and XRD pattern(b) of the silver nanorods(c(silver_{seeds})=6.54 mmol/L, c(AgNO₃)=0.50 mol/L, c(PVP)=0.60 mol/L)

2.3 不同放大倍数制备的银纳米棒

2.3.1 不同体积放大倍数的对比

纳米材料的制备规模放大是一个很重要的课题,在工业上应用可以提高材料的性能和降低成本。

为考察放大制备的影响因素,进行了不同体积 放大倍数的实验。实验中晶种和银纳米棒的制备采 用与 1.2~1.3 相同的实验条件,硝酸银和乙二醇的 用量、体积同比例放大。不同体积放大倍数的具体 实验条件如表 2 所列,表 2 中同时给出了制备所得 银纳米棒参数,相应样品的 SEM 图像如图 5 所示。 将体积放大 2 倍和 3 倍时,同样能得到纯度较 高的银纳米棒,如图 5(a)和 5(b)所示,但银纳米棒 的直径、长度和长径比都降低(如表 2 所列)。这是 由于溶液体积增大后,硝酸银的还原速度保持不变, 但是银原子碰撞到银晶种表面的距离变长,几率降 低,所以降低了银棒的生长速度,得到直径和长度 都降低的银纳米棒。

表 2	不同放大规模制]备的银纳米棒的结构参望
		а щ на ««««ча» і» ії на» н і а » »

Tab.2 Structure parameters of silver nanorods synthesized at different scale

编	体积		产物构成	结构参数		
放大 号 倍数	放大	制备条件		平均直径	平均长度	长径比
			(<i>D</i>)/nm	(<i>L</i>)/µm	(L/D)	
(a)	2	<i>c</i> (Ag _{seed})=6.54 mmol/L; <i>c</i> (AgNO ₃)=0.5 mol/L; <i>c</i> (PVP)=0.60 mol/L	纳米棒	820	12.34	15.05
(b)	3	<i>c</i> (Ag _{seed})=6.54 mmol/L; <i>c</i> (AgNO ₃)=0.5 mol/L; <i>c</i> (PVP)=0.60 mol/L	纳米棒	320	3.15	9.84
(c)	6	c(Ag _{seed})=6.54 mmol/L; c(AgNO ₃)=0.5 mol/L; c(PVP)=0.60 mol/L	纳米棒+纳米颗粒	380	2.16	5.68
(d)	6	c(Ag _{seed})=9.81 mmol/L; c(AgNO ₃)=0.5 mol/L; c(PVP)=0.65 mol/L	纳米棒	310	5.41	17.45





Fig.5 SEM image of silver nanorods prepared by different volume amplification multiples

体积进一步放大到 6 倍,产物中有较多的银纳 米球(如图 5(c)所示)。其原因在于随着体积进一步 增大,尽管硝酸银的还原速度不变,但是银原子碰 撞到银晶种表面的几率大大降低,为了达到两者速 度相匹配,需要提高生长点(五面孪晶的数量),所 以要提高制备晶种所预加硝酸银的浓度。因此,将 晶种制备预加硝酸银的浓度提高到 9.81 mmol/L,提 高 PVP 浓度至 n(PVP)/n(AgNO₃)=1.3 时,又生成了 纯度较高的银纳米棒(如图 5(d)所示)。

2.3.2 放大实验机制探讨

因为预加硝酸银浓度的提高,生成较多的银晶 种,有利于增加银原子的生长点,提高了银原子在 银晶种表面的生长速度。而 PVP 是重要的盖帽剂, 盖帽剂会对某些晶面有选择性吸附作用,造成特殊 晶面的比表面降低,生长缓慢,起到调控纳米晶体 形状的作用。由于银晶种的增加,所以也要提高盖 帽剂的用量,提高盖帽剂的效能,产物中能得到高 产率的银纳米棒。以上结果表明银晶种的浓度、 PVP/AgNO3摩尔比对大批量制备银纳米棒很重要。

银纳米材料制备总的化学方程式为:

 $2HOCH_2CH_2OH+2AgNO_3=$

 $2Ag+H_3CCOCOCH_3+2H_2O$ (1)

PVP 在反应中起着盖帽剂和分散剂的作用,可以把反应简化为:

Ag_{seeds}+AgNO₃+PVP+EG= Ag_{nanorods} (2) 银纳米材料的制备与银晶种、反应物和分散剂 的浓度等都有关联。式(2)中,乙二醇不仅作为溶剂, 也作为还原剂。如上文所述,随着溶液体积变大, 银纳米棒的生长速度降低,所以需要提高银晶种、 PVP/AgNO₃的摩尔比,有利于提高银纳米棒的生长 速度。基于还原速度和生长速度相匹配的原则,可 以进一步放大反应规模,实现高浓度硝酸银体系下 大批量制备银纳米棒,满足工业应用的需求。

3 结论

 1)通过预加银晶种的方式替代添加金属盐类, 采用多元醇还原法,可以用高浓度硝酸银大批量制 备银纳米棒,提高制备效率。

2) 主要实验参数(包括硝酸银、搅拌转速和回流反应温度)过高或过低时,都会导致产生较多的颗粒产物,影响银纳米棒的产率。在选定的小试实验条件下(总体积 40 mL,其中 20 mL 银晶种浓度为 6.54 mmol/L 的-硝酸银乙二醇溶液),最佳搅拌转速

为 350 r/min、回流反应温度为 160℃, 滴加的硝酸 银浓度不宜超过 0.50 mol/L,体积放大 6 倍时,需 要提高晶种浓度和 PVP/AgNO3 摩尔比,才能得到 纯度较高的银纳米棒。

3) 采用银晶种法以高硝酸银浓度制备银纳米 棒时,银纳米棒晶体的生长速度与硝酸银的还原速 度相匹配时,才能减少颗粒物的形成,提高纳米棒 产率。在放大制备规模时,需增加晶种用量、提高 PVP的相对添加量。

参考文献:

- RYCENGA M, COBLEY C M, ZENG J, et al. Controlling the synthesis and assembly of silver nanostructures for plasmonic applications[J]. Chemical reviews, 2011, 111(6): 3669-3712.
- [2] ŠUBR M, PETR M, KYLIAN O, et al. Anisotropic optical response of silver nanorod arrays: Surface enhanced Raman scattering polarization and angular dependences confronted with ellipsometric parameters[J]. Scientific reports, 2017, 7(1): 4293.
- [3] MATSUDA S, YASUDA Y, ANDO S. Fabrication of polyimide-blend thin films containing uniformly oriented silver nanorods and their use as flexible, linear polarizers[J]. Advanced materials, 2010, 17(18): 2221-2224.
- [4] WANG X, CHEN L, CHEN L X. Colorimetric determination of copper ions based on the catalytic leaching of silver from the shell of silver-coated gold nanorods[J]. Microchimica acta, 2014, 181(1/2): 105-110.
- [5] HAN C Q, YAO Y, WANG W, et al. Highly sensitive silver nanorod arrays for rapid surface enhanced Raman scattering detection of acetamiprid pesticides[J]. Chinese journal of chemical physics, 2018, 31(2): 152-158.
- [6] WILEY B, DR Y S, DR B M, et al. Shape-controlled synthesis of metal nanostructures: the case of silver [J] Chem Eur J, 2005, 11(2): 454-463.
- [7] REYES-GASGA J, ELECHIGUERRA J L, LIU C, et al. On the structure of nanorods and nanowires with pentagonal cross-sections[J]. Journal of crystal growth, 2006, 286(1): 162-172.
- [8] AGARWAL R A. One step hydrothermal synthesis of transition metal based coordination polymers along with magnetic and electrical conductive Ag and Au nanosheres

and rods[J]. Journal of solid state chemistry, 2017, 251: 116-121.

- [9] SADOVNIKOV S I, GUSEV A I. Facile synthesis, structure, and properties of Ag₂S/Ag heteronano structure
 [J]. Journal of nanoparticle research, 2016, 18(9): 277.
- [10] MA H , YIN B , WANG S, et al. Synthesis of silver and gold nanoparticles by a novel electrochemical method[J]. Chem phys chem, 2010, 5(1): 68-75.
- [11] WEI G, ZHOU H, LIU Z, et al. One-step synthesis of silver nanoparticles, nanorods, and nanowires on the surface of DNA network.[J]. Journal of physical chemistry B, 2005, 109(18): 8738-8743.
- [12] LI Y, XU J, LIU H, et al. A template/electrochemical deposition method for fabricating silver nanorod arrays based on porous anodic alumina[J]. Nanomaterials & nanotechnology, 2017(7):1-7.
- [13] SHIRAZI F S, AKHBARI K, BOONMAK J, et al. Solidstate mechanochemical conversion of one-dimensional pencil shaped sodium coordination polymer nanorods to corrugated tape silver coordination polymer nanoparticles [J]. Inorganic chemistry communications, 2017, 82: 6-10.
- [14] SUN Y, GATES B, BRIAN MAYERS A, et al. Crystalline silver nanowires by soft solution processing[J]. Nano letters, 2002, 2(2): 165-168.
- [15] SUN Y, YIN Y, MAYERS B, et al. Uniform silver nanowires synthesis by reducing AgNO₃ with ethylene glycol in the presence of seeds and poly(vinyl pyrrolidone)[J]. Chemistry of materials, 2002, 14(11): 4736-4745.
- [16] SUN Y, MAYERS B, HERRICKS T, et al. Polyol synthesis of uniform silver nanowires: A plausible growth mechanism and the supporting evidence[J]. Nano letters, 2003, 3(7): 955-960.
- [17] LU Y C, CHOU K S, NOGAMI M. Process window for the synthesis of Ag wires through polyol process[J]. Materials chemistry & physics, 2009, 116(1): 1-5.
- [18] MENG X W, MAO Y Y, YANG Y W, et al. Synthesis of ultra-long silver nanowires by SNS-directed method and their characterization[J]. Precious metals, 2017, 38(2): 19-25.

孟宪伟, 毛永云, 杨宇雯, 等. 银纳米线晶种诱导法合成超长银纳米线及其分析表征(英文)[J]. 贵金属, 2017, 38(2): 19-25.