

银纳米线制备及应用研究进展

许 杰¹ 贾 旺¹ 李 伟¹ 刘 皓^{1,2,3*} 李 津¹ 程博闻^{1,2,3}

(1.天津工业大学纺织学院,天津 300387;2.智能可穿戴电子纺织品研究所,天津 300387;
3.天津工业大学教育部先进复合材料重点实验室,天津 300387)

摘 要 银纳米线因呈现出与宏观银或单个银原子不同的特性(如小尺寸效应、介面效应、量子尺寸效应、宏观量子隧道效应和介电限域效应等)而受到越来越多研究人员的关注。综述了多元醇法、溶剂热法、紫外线照射法和模板法等四种常用的银纳米线制备方法的特点及银纳米线在催化、电学、光学和传感器等方面的应用进展。模板法可获得规整的银纳米线;紫外线照射法可应用于惰性金属纳米结构的制备;溶剂热法和多元醇法均适用于量产银纳米线,但溶剂热法因需要高温高压环境使得其生产成本提高,而多元醇法的制备工艺简单、成本低、效率高,因此具有更好的应用前景。银纳米线由于拥有良好的导电性和光学性被广泛应用于液晶显示器、可穿戴电子器件和太阳能电池等领域,而银纳米线良好的生物相容性、抗菌性以及大比表面积等特点使得其在生物传感器和催化电极等领域也有广泛的应用。

关键词 银纳米线,制备方法,应用,进展

Research progress of silver nanowire preparation method and application

Xu Jie¹ Jia Wang¹ Li Wei¹ Liu Hao^{1,2,3} Li Jin¹ Cheng Bowen^{1,2,3}

(1.Department of Textiles,Tianjin Polytechnic University,Tianjin 300387;
2.Institute of Smart Wearable Electronic Textiles,Tianjin 300387;
3.Key Laboratory of Advanced Textile Composite Materials,Ministry of Education,
Tianjin Polytechnic University,Tianjin 300387)

Abstract Silver nanowires have received more and more attention from the researchers due to the fact that silver nanowires present different characteristics comparing with macroscopic silver or single silver atoms (such as small size effect,interface effect,quanta dimension effect,macroscopical quanta tunnel effect and dielectric confinement effect). The characteristics of four common preparing methods of silver nanowires including polyol method, solvothermal method, ultraviolet irradiation method and template method and the application progress of silver nanowires which were employed in catalysts,electrics,optics and sensors,were reviewed.Neat silver nanowires were prepared by the template method. The ultraviolet irradiation method was employed to prepare noble metal nanostructure.The solvothermal method and polyol method were employed to fabricate silver nanowires at large scale. However,the cost of production with solvothermal method was increased due to the condition of high temperature and high pressure environment.On the contrary,the polyol method had better application prospect due to simple preparation technology,low cost and high efficiency.For its excellent electrical conductivity and optical property,silver nanowires were comprehensively used in liquid crystal display (LCD),wearable electronic devices,solar cell and so on.Moreover silver nanowires were widely applied to the biosensor and the catalytical electrode due to its biocompatibility, antibacterial property and large specific surface area.

Key words silver nanowire,preparation method,application,progress

一维纳米材料是指材料在其中一维方向上的尺度在 1~100nm 之间,而金属粒子在进入纳米级别

会呈现出与宏观金属或单个金属原子不同的特殊效应,如小尺寸效应、介面效应、量子尺寸效应、宏观量

基金项目:国家自然科学基金面上项目(51473122);中国博士后科学基金面上资助项目(2016M591390);国家大学生创新训练计划(201410058093)

作者简介:许杰(1991-),男,硕士研究生,主要研究方向为银纳米材料、智能纺织品。

联系人:刘皓,副教授,主要从事智能纺织品和纳米材料的研究。

子隧道效应和介电限域效应等。因此,金属纳米线在电学、光学、热学、磁学和催化等领域拥有极大的应用潜力^[1-5]。其中,银纳米线因其优异的导电性、传热性、低的表面电阻、极高的透明度和良好的生物相容性等特点而被广泛应用于催化剂、表面增强拉曼散射、微电子设备、薄膜太阳能电池、微电极和生物传感器等方面^[6-10]。银纳米线的制备方法分为物理法和化学法,其中化学法因其工艺简单、操作方便和容易规模化等特点得到快速发展。化学法包括湿化学法、电化学法、模板法、多元醇法、光还原法、溶剂热法等。笔者结合现有的研究成果对多元醇法、溶剂热法、紫外照射法和模板法等银纳米线的制备方法及应用进行了综述。

1 银纳米线的制备方法

1.1 多元醇法

2002 年, Sun 等^[11]第一次提出利用被还原的 Pt 作为异相晶种, 将乙二醇中的 Ag^+ 还原成 Ag, 并加入聚乙烯吡咯烷酮(PVP)使其指向生长为均匀的银纳米线。在此基础上, 2003 年, Sun 等^[12]探讨了多元醇法制备银纳米线的生长机理, 通过扫描电子显微镜观察到银纳米线的横截面是由五倍孪晶组织构成的五边形结构。此外, 多元醇法中使用的 PVP 与孪晶结构的 $\{100\}$ 面的相互作用要明显强于同 $\{111\}$ 面的作用。因此, 银的多重孪晶纳米结构在 PVP 的作用下沿着 $\{111\}$ 面逐渐生长成银纳米线。

多元醇法因其制备方法简单、产量高、反应条件温和和成本低等特点, 获得越来越多科研工作者的关注。在多元醇法制备银纳米线的过程中, PVP 的吸附效应和空间效应对银纳米线的形貌和产量有着重要的作用。随着 PVP 分子量和浓度的相应增加, 对银纳米晶体 $\{100\}$ 面的化学吸附作用增加, 银纳米的产量增加, 长径比提高。因此, 选择不同分子量和浓度的 PVP 可以有效控制银纳米线的形貌^[13-14]。PVP 的分子量越大, 其分子链越长, 对银纳米晶体的结合作用越强, 产物中银纳米线的含量增加, 且银纳米线的长度也呈现增加的趋势。而随着 PVP 浓度的增加, 银纳米晶体表面附着了更多的 PVP, 使银纳米线的直径减小, 长度增加, 长径比呈现增加的趋势。

Coskun 等^[15]详细探讨了温度、注射速度、PVP 与 AgNO_3 的摩尔比、NaCl 的量和搅拌速度等多个因素对银纳米线最终形貌的影响。研究表明, 反应温度为 170°C 、PVP 与 AgNO_3 的摩尔比为 7.5、

NaCl 为 $12\mu\text{mol/L}$ 、注射速度为 5mL/h 、搅拌速度为 1000r/min 条件下制备的银纳米线含量最高, 长径比最大。Tang 等^[16]探讨了多元醇法中氧化刻蚀对银纳米线的影响, 提出反应温度在 $180\sim 198^\circ\text{C}$ 时, 由于 Cl^- 浓度的增加和氧气的存在, 较小的银颗粒被快速刻蚀, 得到大量的银纳米线产物。Lee 等^[17]在多元醇法的基础上, 提出将第一步反应生成的银纳米线作为后一次反应的晶种继续反应, 成功制备出最大长度为 $400\sim 500\mu\text{m}$, 平均长度为 $120\mu\text{m}$ 的银纳米线。这种采用多级反应方式制备的超长银纳米线, 透明度高达 90% , 表面电阻值为 $19\Omega/\square$, 对透明柔性导电材料领域有着重大的意义。

1.2 溶剂热法

溶剂热法制备银纳米线与多元醇法比较相似。只是溶剂热法需要在一定的压力下, 在高于溶剂沸点的温度下加热, 随着温度的升高, 反应室的温度也随之升高, 高温高压为银纳米线的生长提供动力, 从而制备出银纳米线。而且在封闭的环境下, 产物也更加纯净。

Chen 等^[18]将 AgNO_3 、 Fe_3Cl 和 PVP 的混合乙二醇溶液放入高压反应釜中, 160°C 条件下加热 2.5h, 成功制备出高长径比的银纳米线。结果表明, Fe_3Cl 浓度对水热法制备银纳米线有着重要的影响。

Xu 等^[19]利用溶剂热法合成了尺寸形貌均匀的银纳米线, 通过调节 PVP 分子量的大小和黏度等参数, 控制银纳米线的尺寸形貌, 发现银纳米线的长径比随着 PVP 分子量的增加而增加。

1.3 紫外线照射法

紫外线照射法是光还原法的一种, 以 Ag^+ 为前驱体溶液, 添加合适的表面活性剂作为保护剂, 在紫外线照射条件下制备出银纳米结构产物。Zhou 等^[20]使用聚乙烯醇(PVA)作为保护剂, 15°C 下用紫外线照射 AgNO_3 和 PVA 溶液 48h, 制备出单晶银纳米棒和树状的超分子纳米结构。Zou 等^[21]在光化学还原的基础上通过晶种紫外线照射法, 在室温环境下成功制备出直径在 $35\sim 120\text{nm}$ 之间, 长度为 $50\mu\text{m}$ 的银纳米线。Liu 等^[22]以磷钼酸作为催化剂和稳定剂, 通过紫外线照射, 还原溶液中的 Ag^+ , 成功制备出银纳米线, 并探讨了温度、紫外线照射时间、 AgNO_3 与磷钼酸(PMo)的摩尔比对银纳米线形貌的影响。结果表明, 银纳米线对大肠杆菌、金黄色酿脓葡萄球菌和枯草芽孢杆菌表

现出良好的抗菌性,其抑制区域的平均直径分别为 15.4、20.9 和 26.7mm。

1.4 模板法

模板法不仅可以控制最终产物的形貌,还是制备同向规整纳米材料的重要工具。模板制备简单,可精确控制其参数,主要分为硬模板和软模板。硬模板有碳纳米管模板^[23]、硅质介孔模板^[24]和多孔阳极氧化铝模板^[25]。软模板有 DNA 模板^[26]和离子液体模板^[27]。其中,多孔阳极氧化铝(AAO)模板因其性能稳定、机械强度高、绝缘性好、制备方法简单、高度有序和孔径尺寸可控等优点,逐渐成为制备一维纳米材料的有效方法之一^[28-31]。

Lin 等^[25]通过 ArF 脉冲准分子激光器照射 AAO 模板中的 AgNO_3 制备出直径为 200nm,长度 30 μm 的银纳米线,并通过调节 AAO 模板的孔径大小改变银纳米线的长径比。Sun 等^[32]利用循环伏安法在 AAO 模板中制备出直径为 60nm,长度为 1~30 μm ,长径比为 5~500 的规整银纳米线阵列。结果表明:扫描速率 20mV/s,扫描次数为 2 次和 4 次条件下制备的银纳米线在去除 AAO 膜之后依然可以站立在导电基底上。利用银纳米线制备的具有高灵敏度的阵列检测器将被广泛应用到电子、离子和光子的检测领域中。

2 银纳米线的应用

2.1 催化方面的应用

银纳米材料,特别是尺寸统一、具有高长径比的银纳米材料,具有较高的催化特性。Lu 等^[33]以 PVP 作为表面稳定剂,采用水热法制备出银纳米线,并通过循环伏安法测试其电催化氧气还原反应(ORR)的性质,发现未添加 PVP 所制备出的银纳米线显著提高了 ORR 的电流密度,表现出更强的电催化能力。胡永利等^[34]应用多元醇法通过调控 NaCl(间接晶种)的量,快速方便地制备出银纳米线和银纳米粒子。通过线性电位扫描法测定发现,银纳米线和银纳米粒子在碱性条件下对 ORR 具有不同的电催化活性,银纳米线表现出更好的催化性能,且银纳米线在电催化 ORR 时对甲醇具有更好的抵抗能力。

Kwak 等^[35]采用多元醇法制备的银纳米线作为氧化锂电池的催化电极。结果发现,具有高长径比的银纳米线因其反应面积大,氧气还原能力强,促进了氧化锂电池在 3.4V 以下的分解反应,使其总电效率提高了 83.4%,表现出优异的电催化性能。

2.2 电学方面的应用

银纳米线因其优异的导电性、低的表面电阻和高的透明度逐渐成为电极材料的研究重点。Lee 等^[36]制备了表面光滑的透明银纳米线电极。实验中将 PVP 薄膜作为功能层,通过机械转移法覆盖到银纳米线薄膜表层,有效地改善了纳米线的表面粗糙情况,而且该电极的表面电阻只有 18 $\Omega/\square$ 。Chen 等^[37]制备了具有抗菌性的柔性透明导电薄膜,这种透明导电薄膜的表面电阻只有 9 $\Omega/\square$,而且弯曲 1000 次后(弯曲半径 5mm),其表面电阻和透光率并无明显变化,可被广泛应用到液晶显示器、可穿戴电子器件和太阳能电池等众多领域。

Gong 等^[38]以 4 个呋喃的单体的双马来酰亚胺(MDPB-FGEEDR)为基底,嵌入银纳米线所制备的透明导电聚合物。测试发现,这种导电聚合物受外力剪切后,缺口处在加热 110 $^{\circ}\text{C}$ 条件下可修复,且 97% 的表面导电性可在 5min 内恢复,而且相同位置可以多次循环剪切和修复。

Luo 等^[39]用银纳米线和形状记忆聚合物(SMPs)制备出具有双层结构的导电聚合物。结果表明,这种聚合物具有极好的柔韧性和导电性的,5s 内可以恢复 80% 的形变,且电压只需 5V,即使拉伸形变到达 12% 仍保持良好的导电性,此外,LED 的开灯电势只需 1.5V。该导电聚合物在未来的可穿戴电子设备领域具有着极大的应用潜力。

2.3 光学方面的应用

银纳米线不仅拥有良好的导电、导热性,而且其本身特有的高透明度也被广泛应用到光学器件、太阳能电池和电极材料等领域。Lee 等^[36]制备的表面光滑的透明银纳米线电极,导电性良好,透光度到达 87.6%,可用来替代有机发光二极管和太阳能电池中 ITO 材料。Chen 等^[37]在制备柔性透明导电薄膜的实验中探讨了银纳米线沉积次数对透光度的影响。发现随着银纳米线沉积循环次数增加到 1 次、2 次、3 次和 4 次,这种透明导电薄膜的透光度逐渐下降,分别为 92%、87.9%、83.1% 和 80.4%。

此外,银纳米线还可以作为表面增强等离子体的载体,被广泛应用于表面增强拉曼光谱(SERS)测试中,实现高灵敏无损的检测。Sun 等^[40]利用恒电势法在 AAO 模板中制备了表面光滑且长径比大的单晶银纳米线阵列。

2.4 传感器方面的应用

银纳米线凭借其良好的传热性、导电性、生物相容性以及抗菌性而被广泛应用到传感器领域。

Qin 等^[41]利用银纳米线和 Pt 制备的改性电极作为卤化物传感器,通过循环伏安法测试溶液体系中的卤族元素,在 $200\mu\text{mol/L} \sim 20.2\text{mmol/L}$ 的 Cl^- 溶液中,灵敏度为 $0.059\mu\text{A}/(\text{mmol}\cdot\text{L})$,在浓度范围 $0\mu\text{mol/L} \sim 20.2\text{mmol/L}$ 的 Br^- 和 I^- 溶液中,灵敏度分别 $0.042\mu\text{A}/(\text{mmol}\cdot\text{L})$ 和 $0.032\mu\text{A}/(\text{mmol}\cdot\text{L})$ 。

Prakash 等^[42]将银纳米线与壳聚糖复合制备的改性透明碳电极用来监测水中的 As 元素,具有很高的灵敏度。

Thirumalraj 等^[43]采用多元醇法制备的银纳米线,通过超声发生器对丝网印刷碳电极 (SPCE) 进行修饰,制备了非酶 H_2O_2 传感器。通过极谱法测试发现,该传感器在 H_2O_2 为 $0.3 \sim 704.8\mu\text{mol/L}$ 范围内表现出稳定的电流响应,其灵敏度达到了 $6.626\mu\text{A}/(\mu\text{mol}\cdot\text{cm}^2)$,且响应时间仅需 2s。此外,通过电流滴定法测试发现,这种传感器对人体血清中的 H_2O_2 恢复性达到了 94.3%,进一步确定了这种非酶 H_2O_2 传感器可以应用到生物样品的测量中。

3 结语与展望

综述了银纳米线的制备方法和相关应用。紫外线照射法多用于制备惰性金属的纳米结构,但是实验周期较长。多孔材料模板法可通过调节孔径和孔高等条件获得不同长径比的银纳米线,并且可以结合其他方法使用,这对规整纳米材料的制备有很大的意义。但是上述两种制备方法的工艺复杂,且银纳米线的产量很低。溶剂热法有效地解决了银纳米线不能量产的问题,但是其反应需在高温、高压环境下。而多元醇法不仅可以大规模生产银纳米线,而且制备工艺简单、成本低廉、效率高,是目前银纳米线的主流制备方法。高长径比的银纳米线因其反应面积大、导电性高而被广泛应用到催化领域。而表面电阻低、透明度高、导电性好的银纳米线与不同柔性基底制备的透明导电薄膜和作为 SERS 的活性基底在 SERS 等使用方面均呈现出巨大的应用潜力。此外,良好的生物相容性和抗菌性使得银纳米线在微量元素和气体的检测上发挥着重要作用。随着银纳米线制备技术的不断探索,银纳米线的应用已经涉及到电学、光学、热学、储能、生物传感器以及微纳米器件等多个领域,而银纳米线在可穿戴领域的应用吸引着越来越多的关注。

参考文献

[1] Yarulin A, Yuranov I, Cárdenaslizana F, et al. Size-effect of

Pd-(poly(*N*-vinyl-2-pyrrolidone)) nano-catalysts on selective hydrogenation of alkynols with different alkyl chains[J]. Journal of Physical Chemistry C, 2013, 117(26): 13424-13434.

[2] Tronc E, Fiorani D, Noguès M, et al. Surface effects in noninteracting and interacting $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ nanoparticles[J]. Journal of Magnetism & Magnetic Materials, 2003, 262(1): 6-14.

[3] Volokitin Y, Sinzig J, Jongh L J D, et al. Quantum-size effects in the thermodynamic properties of metallic nanoparticles[J]. Nature, 1996, 384(6610): 621-623.

[4] Wernsdorfer W, Orozco E B, Hasselbach K, et al. Macroscopic quantum tunneling of magnetization of single ferrimagnetic nanoparticles of barium ferrite[J]. Physical Review Letters, 1997, 79(20): 4014-4017.

[5] 余保龙, 吴晓春. 半导体 SnO_2 纳米微粒的光学特性[J]. 物理学报, 1995, 44(4): 660-665.

[6] Madaria A R, Kumar A, Zhou C W. Large scale, highly conductive and patterned transparent films of silver nanowires on arbitrary substrates and their application in touch screens[J]. Nanotechnology, 2011, 22(24): 7.

[7] Jose Andres L, Fe Menendez M, Gomez D, et al. Rapid synthesis of ultra-long silver nanowires for tailor-made transparent conductive electrodes; proof of concept in organic solar cells[J]. Nanotechnology, 2015, 26(26): 265201.

[8] Oh M K, Shin Y S, Lee C L, et al. Morphological and SERS properties of silver nanorod array films fabricated by oblique thermal evaporation at various substrate Temperatures[J]. Nanoscale Res Lett, 2015, 10(1): 962.

[9] Amiri M, Nough S I, Azizian-Kalanderagh Y. Facile synthesis of silver nanostructures by using various deposition potential and time; a nonenzymatic sensor for hydrogen peroxide[J]. Materials Chemistry & Physics, 2015, 155(2): 129-135.

[10] Kurowska E, Brzózka A, Jarosz M, et al. Silver nanowire array sensor for sensitive and rapid detection of H_2O_2 [J]. Electrochimica Acta, 2013, 104(8): 439-447.

[11] Sun Yugang, Gates Byron, Mayers Brian, et al. Crystalline silver nanowires by soft solution processing[J]. Nano Letters, 2002, 2(2): 165-168.

[12] Sun Y, Mayers B, Thurston Herricks A, et al. Polyol synthesis of uniform silver nanowires; a plausible growth mechanism and the supporting evidence[J]. Nano Letters, 2003, 3(7): 955-960.

[13] Song Y J, Wang M, Zhang X Y, et al. Investigation on the role of the molecular weight of polyvinyl pyrrolidone in the shape control of high-yield silver nanospheres and nanowires[J]. Nanoscale Research Letters, 2014, 9(1): 17.

[14] Lin J Y, Hsueh Y L, Huang J J. The concentration effect of capping agent for synthesis of silver nanowire by using the polyol method[J]. Journal of Solid State Chemistry, 2014, 214(214): 2-6.

[15] Coskun S, Aksoy B, Unalan H E. Polyol synthesis of silver nanowires; an extensive parametric study[J]. Crystal Growth & Design, 2011, 11(11): 4963-4969.

- [16] Tang X, Tsuji M, Jiang P, et al. Rapid and high-yield synthesis of silver nanowires using air-assisted polyol method with chloride ions[J]. *Colloids & Surfaces A Physicochemical & Engineering Aspects*, 2009, 338(1-3): 33-39.
- [17] Jin H L, Lee P, Lee D, et al. Large-scale synthesis and characterization of very long silver nanowires via successive multi-step growth[J]. *Crystal Growth & Design*, 2012, 12(11): 5598-5605.
- [18] Chen D, Qiao X, Qiu X, et al. Large-scale synthesis of silver nanowires via a solvothermal method[J]. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2011, 22(1): 6-13.
- [19] Xu L H, Kan C X, Wang C S, et al. Synthesis of g nanostructures with controlled shapes by a polyvinylpyrrolidone-assisted hydrothermal method[J]. *Acta Physico-Chimica Sinica*, 2014, 30(3): 569-575.
- [20] Zhou Y, Yu S H, Wang C Y, et al. A novel ultraviolet irradiation photoreduction technique for the preparation of single-crystal Ag nanorods and Ag dendrites[J]. *Advanced Materials*, 1999, 11(10): 850-852.
- [21] Zou K, Zhang X H, Duan X F, et al. Seed-mediated synthesis of silver nanostructures and polymer/silver nanocables by UV irradiation[J]. *Journal of Crystal Growth*, 2004, 273(1): 285-291.
- [22] Liu L, He C, Li J, et al. Green synthesis of silver nanowires via ultraviolet irradiation catalyzed by phosphomolybdic acid and their antibacterial properties[J]. *New Journal of Chemistry*, 2013, 37(7): 2179-2185.
- [23] Ilie A, Crampin S, Karlsson L, et al. Repair and stabilization in confined nanoscale systems-inorganic nanowires within single-walled carbon nanotubes[J]. *Nano Res*, 2012, 5(12): 833.
- [24] Ahn K W, Lim J Y, Yang J H, et al. In situ growth of silver nanoparticles in mesoporous silica by spray pyrolysis[J]. *J Nanopart Res*, 2010, 12(7): 2457.
- [25] Lin Y H, Chen K T, Ho J R. Rapid fabrication of silver nanowires through photoreduction from silver nitrite in anodic aluminum oxide template[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2010, 50(6): 065002-065002-4.
- [26] Jones M R, Osberg K D, Macfarlane R J, et al. Templated techniques for the synthesis and assembly of plasmonic nanostructures[J]. *Chem Rev*, 2011, 111(6): 3736.
- [27] Kim T Y, Kim W J, Hong S H, et al. Ionic-liquid-assisted formation of silver nanowires[J]. *Angew Chem Int Edit*, 2009, 48(21): 3806.
- [28] Lai M, Riley D J. Templated electrosynthesis of nanomaterials and porous structures[J]. *Journal of Colloid & Interface Science*, 2008, 323(2): 203-12.
- [29] Abbasi N M, Yu H, Wang L, et al. Preparation of silver nanowires and their application in conducting polymer nanocomposites[J]. *Materials Chemistry & Physics*, 2015, 166: 1-15.
- [30] Xu Y F, Liu H, Li X J, et al. A novel method for fabricating self-ordered porous anodic alumina with wide interpore distance using phosphoric/oxalic acid mixed electrolyte[J]. *Materials Letters*, 2015, 151: 79-81.
- [31] Xiang Xiongzi, Gong Wenya, Kuang Mingsheng, et al. Progress in application and preparation of silver nanowires[J]. *Rare Metals*, 2016, 35(4): 289-298.
- [32] Sun X Y, Xu F Q, Li Z M, et al. Cyclic voltammetry for the fabrication of high dense silver nanowire arrays with the assistance of AAO template[J]. *Materials Chemistry & Physics*, 2005, 90(1): 69-72.
- [33] Lu Y, Wang Y, Chen W. Silver nanorods for oxygen reduction: strong effects of protecting ligand on the electrocatalytic activity[J]. *Journal of Power Sources*, 2011, 196(6): 3033-3038.
- [34] 胡永利, 彭程. 银纳米材料的形貌可控制备及电催化氧还原性能[J]. *稀有金属材料与工程* 2015, 44(34605): 1197-1202.
- [35] Kwak W J, Jung H G, Lee S H, et al. Silver nanowires as catalytic cathodes for stabilizing lithium-oxygen batteries[J]. *Journal of Power Sources*, 2016, 311(3): 49-56.
- [36] Lee S H, Lim S, Kim H. Smooth-surface silver nanowire electrode with high conductivity and transparency on functional layer coated flexible film[J]. *Thin Solid Films*, 2015, 589(1): 403-407.
- [37] Chen Y, Lan W, Wang J, et al. Highly flexible, transparent, conductive and antibacterial films made of spin-coated silver nanowires and a protective ZnO layer[J]. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 2016, 76 (Jubilee-nsnummer): 88-94.
- [38] Gong C K, Liang J J, Hu W, et al. A healable, semitransparent silver nanowire-polymer composite conductor[J]. *Advanced Materials*, 2013, 25(30): 4186-4191.
- [39] Luo H, Li Z, Yi G, et al. Electro-responsive silver nanowire-shape memory polymer composites[J]. *Materials Letters*, 2014, 134(7): 172-175.
- [40] Sun B, Jiang X, Dai S, et al. Single-crystal silver nanowires: preparation and surface-enhanced Raman scattering (SERS) property[J]. *Materials Letters*, 2009, 63(29): 2570-2573.
- [41] Qin X, Wang H, Miao Z, et al. Synthesis of silver nanowires and their applications in the electrochemical detection of halide[J]. *Talanta*, 2011, 84(3): 673-678.
- [42] Prakash S, Chakrabarty T, Singh A K, et al. Silver nanoparticles built-in chitosan modified glassy carbon electrode for anodic stripping analysis of As(III) and its removal from water[J]. *Electrochimica Acta*, 2012, 72(2012): 157-164.
- [43] Thirumalraj B, Zhao D H, Chen S M, et al. Non-enzymatic amperometric detection of hydrogen peroxide in human blood serum samples using a modified silver nanowire electrode[J]. *J Colloid Interface Sci*, 2016, 470: 117-122.