

学校编码: 10384

分类号 _____ 密级 _____

学 号: 20620070153575

UDC _____

厦 门 大 学

博 士 学 位 论 文

生物质还原法制备银纳米颗粒及乙烯环氧化
Ag/ α -Al₂O₃ 催化剂的研究

Investigation on Biomass-mediated Synthesis of Silver
nanoparticles and Ag/ α -Al₂O₃ Catalysts for Ethylene Epoxidation

国家高技术研究发展计划项目 (863 计划, 2007AA03Z347)

国家自然科学基金项目 (20776120, 20576109, 20976146, 21036004)

王 惠 璇

指导教师姓名: 李 清 彪 教 授

孙 道 华 副 教 授

专 业 名 称 : 工 业 催 化

论文提交日期: 2 0 1 2 年 6 月

论文答辩日期: 2 0 1 2 年 6 月

学位授予日期: 2 0 1 2 年 月

答辩委员会主席: _____

评 阅 人: _____

2012 年 6 月

厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为()课题(组)的研究成果,获得()课题(组)经费或实验室的资助,在()实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名):

年 月 日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

（ ） 1.经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

（ ） 2.不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年 月 日

摘要

银纳米材料是贵金属纳米材料的重要组成部分之一，由于其具有特殊的热学、磁学、光学、力学、化学等性质，被广泛地应用于超导材料、抗菌材料、光电器件、生物医学材料等领域，更在很早之前就作为一种性能良好的催化材料广泛用于部分氧化和还原反应的催化体系。近年来，关于材料制备过程绿色化的研究日趋活跃，纳米材料的绿色制备技术也受到越来越多的关注。利用生物质这一可再生的绿色资源合成贵金属纳米材料，为现代纳米材料的制备技术开辟了一条崭新的途径，成为当今的研究热点。近十年来，研究者们尝试采用多种微生物或植物生物质还原制备银纳米材料，该方法不仅充分利用了丰富的生物质资源，更加环保和安全，而且温和的反应条件可以降低能源及资源的耗费，并期待可获得具有特殊性质的银纳米材料以及开拓所制银纳米材料的应用领域。

本论文旨在利用生物质与银盐前驱体作用制备银纳米颗粒(Ag NPs)，通过对制备过程工艺的优化，建立一套形貌和粒度可控的 Ag NPs 的高效合成方法，并进一步拓展到银-金合金纳米颗粒的生物质还原制备中。另一方面，分别采用溶胶负载法、生物质辅助高温分解法和生物质原位还原法制备负载型纳米银催化剂，考察其在乙烯环氧化制备环氧乙烷中的催化性能，开拓了生物质还原法在贵金属负载型催化剂制备中的应用。

首先，采用毕赤酵母干菌粉或毕赤酵母提取液作为生物质还原剂，与银氨及银氨-氯金酸双金属前驱体盐溶液作用以合成 Ag NPs 及 Ag-Au NPs。研究表明，一定范围内碱性环境有利加快银氨离子的还原反应速率，获得粒径范围较窄、形貌规整的球形 Ag NPs，当 pH 为 12.5 时，毕赤酵母提取液还原制备的 Ag NPs 粒径为 14.2 ± 2.7 nm。在银-金双金属体系的生物还原中，通过调节体系 pH 改变两种金属离子的还原反应速率进而调控合金纳米颗粒的组成，当 pH 为 12 时，合金颗粒的组成最接近初始离子添加比例。

其次，利用毕赤酵母干菌粉还原制得的 Ag NPs，采用溶胶负载法制备乙烯环氧化负载型 Ag/ α -Al₂O₃ 催化剂。以毕赤酵母干菌粉作为生物质还原剂获得的银溶胶所制备的催化剂有最好的催化活性；低比表面积的两性材料 α -Al₂O₃ 作为载体所制备的催化剂能获得最高的环氧乙烷(EO)选择性；在 N₂ 气氛中焙烧活化银溶胶负载法制备的催化剂，600 °C 为最适宜的处理温度，所得催化剂在 320°C 的反应温度下，EO 出口浓度为 1.05%，选择性为 49.95%，时空产率达到 $136.76 \text{ g} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{L}^{-1}_{\text{cat}}$ ，该催化剂上 Ag 的粒径为 83.9 ± 25.6 nm。溶胶负载法制备的催化剂上 Ag NPs 与载体的相互作用不强，会影响催化剂活性。

再次，采用芳樟叶提取液辅助高温分解法制备 Ag/ α -Al₂O₃ 催化剂，通过均匀试验和

单因素试验设计, 考察了银负载量、芳樟叶提取液浓度、焙烧温度和焙烧时间等对催化剂制备的影响, 获得最佳制备条件为: 银负载量 15%, 芳樟叶提取液浓度 $0.25 \text{ g}\cdot\text{mL}^{-1}$, 高温分解条件为 N_2 气氛下 $600 \text{ }^\circ\text{C}$ 焙烧处理 60 min, 该催化剂在 $240 \text{ }^\circ\text{C}$ 反应温度下, EO 出口浓度达 1.65%, 选择性达到 75.31%, 时空产率为 $211.48 \text{ g}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{L}^{-1}_{\text{cat}}$, 可达工业生产指标。生物质辅助高温分解法在一定程度上改善了传统高温分解法中产生的银颗粒烧结团聚的情况。

最后, 采用生物质原位还原法制备 $\text{Ag}/\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 催化剂, 考察了银前驱体、银负载量、生物还原温度、芳樟叶提取液浓度、焙烧温度和时间以及助剂 Cs 的添加量等因素对催化剂性能的影响, 获得最佳催化剂制备条件为 15% 的银负载量、助剂添加量为 $150 \mu\text{g}\cdot\text{g}_{\text{cat}}^{-1}$, 以浓度为 $0.15 \text{ g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 的芳樟叶提取液作为生物质还原剂在 $60 \text{ }^\circ\text{C}$ 下还原银-乙二胺络合物 24 h, $50 \text{ }^\circ\text{C}$ 真空干燥 24 h 后在 N_2 气氛中 $600 \text{ }^\circ\text{C}$ 下焙烧处理 1 h。该条件制备的催化剂性能优于燕山石化生产的 YS-7 型工业催化剂: 在 EO 出口浓度相当的情况下, 前者反应温度较后者低 $10 \text{ }^\circ\text{C}$ 左右, 为 $190 \text{ }^\circ\text{C}$; 选择性高 9 个百分点, 达到 89.61%, 时空产率可达 $180.42 \text{ g}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{L}^{-1}_{\text{cat}}$ 。在催化剂的稳定性考察中发现, 在 48 h 内催化剂性能稳定, 之后活性有略微下降, 但通过小幅提高反应温度可恢复, 选择性可以维持在 85% 左右。生物质原位还原法制备 $\text{Ag}/\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 催化剂是银盐的还原、银颗粒的结晶生长及其在载体表面的负载三个过程的耦合, 生物质在此过程中同时起到还原剂和保护剂的作用, 有效控制了银纳米颗粒的形貌和粒径分布, 同时增强了银颗粒和载体间的相互作用。

关键词: 生物还原; 银纳米颗粒; 银催化剂; 乙烯环氧化

Abstract

Silver nanomaterials have been widely used in many fields such as construction of superconducting device, anti-bacterial materials, photonics, biomedicine due to their special thermodynamical, magnetic, optical and chemical properties. Also, they have performed very well to catalyze partial oxidation and reduction reactions. In recent years, green synthesis of nanomaterials attracts increasing attention, and biosynthesis of novel metal nanoparticles represents a new synthetic approach to nanomaterials. Within last decade, numerous species of microorganism and plants were explored for synthesis of silver nanomaterials. In addition to their environmental, economical and energy-efficient advantages, the biomass-mediated biosynthesized silver nanomaterials might possess other special properties and their applications might be extended.

The present work aimed to realize rapid biosynthesis of silver nanoparticles (Ag NPs) with controllable morphology and sizes using biomass through optimization of the synthetic parameters, based upon which silver-gold alloy nanoparticles (Ag-Au alloy NPs) were also biosynthesized. As well, Ag-supported catalysts were biosynthesized by Ag-sol immobilization method, biomass-assisted thermal decomposition method and in-situ bioreduction method, respectively. The catalytic performance of thus prepared catalysts for ethylene epoxidation was evaluated.

Firstly, Ag NPs and Ag-Au alloy NPs were biosynthesized by reducing silver and gold ions with both the dry powder and the aqueous extract of *Pichia pastoris* (*P. pastoris*), respectively. Bioreduction rate of silver ions could be enhanced to produce spherical Ag NPs with regular morphology and relatively narrow size distribution in an alkaline condition, e.g., at a pH value of 12.5, Ag NPs biosynthesized by *P. pastoris* extract was 14.2 ± 2.7 nm. For biosynthesis of Ag-Au bimetallic nanoparticles, the relative reduction rate of silver and gold precursors could be adjusted by manipulating the pH value, which thus allowed control over the composition of the as-prepared alloy NPs. It was found that the ratio of Ag to Au in the alloy NPs was close to the initial concentration ratio of their precursors when the pH value was 12.0.

Secondly, the Ag NPs synthesized by bioreducing silver ions with dry powders of various microorganisms were employed to prepare Ag/ α -Al₂O₃ catalyst for ethylene epoxidation through the Ag-sol immobilization method. The results revealed that the Ag NPs catalyst synthesized by *P. pastoris* demonstrated the best catalytic

performance. α -Al₂O₃ with small specific surface area was the optimal support for the catalyst to obtain the highest EO selectivity. The catalyst was calcinated in N₂ at 600 °C and the mean size of Ag NPs on thus obtained catalyst was 83.9 nm. When the reaction temperature was 320 °C, the concentration of EO was 1.05 %, and selectivity was 49.95 % with a space time yield 136.76 g·h⁻¹·L⁻¹·cat. For catalyst prepared through the Ag-sol immobilization method, the interaction between the Ag NPs and support was weak, which would undermine the catalytic activity.

Furthermore, Ag/ α -Al₂O₃ catalyst was prepared through thermal decomposition method assisted with extract of *Cinnamomum. Camphora* (*C. Camphora*) leaves, and effects of the parameters including Ag loading, extract concentration, calcination temperature and time on the catalytic performance were evaluated through uniform test and single-factor test. The results demonstrated that the optimal silver loading and the concentration of *C. Camphora* leaves extract were 15 % and 0.25 g·mL⁻¹, respectively. The optimal thermal decomposition condition should be at 600 °C in N₂ for 60 min. Thus prepared catalyst gives concentration of EO 1.65 %, selectivity 75.31 % and space time yield 211.48 g·h⁻¹·L⁻¹_{cat} at 240 °C, which satisfied the industrial standards. Compared with traditional thermolysis method, the sintering and aggregation behaviors of Ag NPs were alleviated in the present one assisted with biomass.

Finally, the Ag/ α -Al₂O₃ catalyst were prepared by in-situ bioreduction method using the extract of *C. Camphora* leaves, and effects of various factors on the performance of the catalysts were evaluated. The optimal preparative conditions were identified as silver loading 15 %, promoter (Cs) dosage 150 μ g·g_{cat}⁻¹, concentration of leaves extract 0.15 g·mL⁻¹ to react with silver ethylenediamine complex at 60 °C for 24 h and and calcination in N₂ at 600 °C for 1 h. The obtained catalyst demonstrated better performance than the commercial catalyst YS-7. Specifically, to achieve identical EO concentration, the temperature for the catalyst prepared in this work was around 190 °C, 10 °C lower than that of the commercial one. Moreover, the selectivity and time space yield of EO could be as high as 89.61% and 180.42 g·h⁻¹·L⁻¹_{cat}, respectively. The performance of the catalyst was stable within 48 h. Thereafter slight decrease in catalytic activity was observed, yet which could be recovered by slightly increasing the reaction temperature, with the EO selectivity maintained at around 85%. In the in-situ bioreduction method to prepare Ag/ α -Al₂O₃ catalyst, the three processes, i.e., bioreduction of silver precursors, crystallization of

Ag NPs and adsorption of Ag NPs on the support were coupled as a whole. The biocompounds in such a process served as both reductants and stabilizing agents, and they might also act as binding agents to enhance the interaction between the Ag NPs and the support.

Key Words: Bioreduction; Silver nanoparticles; Silver catalysts; Ethene epoxidation

厦门大学博硕士学位论文摘要库

摘 要	I
目录.....	VI
第 1 章 文献综述	1
1.1 引言	1
1.2 银纳米材料	2
1.2.1 银的物理化学性质.....	2
1.2.2 银纳米材料的性质.....	2
1.2.3 银纳米材料的用途.....	2
1.2.4 银纳米材料的传统制备方法.....	5
1.3 银纳米材料的生物还原制备法	9
1.3.1 生物还原法的概念.....	10
1.3.2 生物还原法的材料.....	10
1.3.3 生物还原法的机理.....	13
1.3.4 生物还原法制备银纳米材料的应用.....	16
1.4 乙烯环氧化	18
1.4.1 环氧乙烷概述.....	18
1.4.2 乙烯直接氧化法生产环氧乙烷.....	21
1.4.3 乙烯直接氧化法反应机理概述.....	22
1.5 乙烯环氧化银催化剂	24
1.5.1 催化剂的发展.....	24
1.5.2 催化剂的组成.....	25
1.5.3 催化剂的制备方法.....	26
1.5.4 催化剂的技术现状.....	28
1.6 本论文研究目标及研究内容	30
1.6.1 研究目标.....	30
1.6.2 研究内容.....	31
第 2 章 毕赤酵母菌体生物质还原制备银纳米颗粒.....	32
2.1 引言	32
2.2 实验部分	32
2.2.1 实验材料和试剂.....	32

2.2.2 实验仪器和设备	32
2.2.3 实验方法	32
2.2.4 还原产物的表征	34
2.3 结果与讨论	34
2.3.1 毕赤酵母干菌粉还原制备银纳米颗粒	34
2.3.2 毕赤酵母菌体提取液还原制备银纳米颗粒	43
2.3.3 毕赤酵母菌体提取液还原银-金双金属体系	49
2.4 小结	54
第3章 微生物还原银溶胶负载法制备 $\text{Ag}/\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 催化剂	56
3.1 引言	56
3.2 实验部分	56
3.2.1 实验材料和试剂	56
3.2.2 实验仪器和设备	57
3.2.3 实验方法	57
3.3 结果与讨论	61
3.3.1 含微生物菌体生物质银粉制备催化剂	61
3.3.2 含微生物银溶胶负载法制备银催化剂	65
3.4 小结	79
第4章 植物生物质辅助高温分解法制备 $\text{Ag}/\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 催化剂	81
4.1 引言	81
4.2 实验部分	82
4.2.1 实验材料和试剂	82
4.2.2 实验仪器和设备	82
4.2.3 实验方法	82
4.3 结果与讨论	84
4.3.1 均匀设计试验结果	84
4.3.2 单因素试验结果	90
4.3.3 传统高温分解法与生物辅助高温分解法的对比	100
4.4 小结	103
第5章 植物生物质原位还原法制备 $\text{Ag}/\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 催化剂	105
5.1 引言	105

5.2 实验部分	105
5.2.1 实验材料和试剂	105
5.2.2 实验仪器和设备	105
5.2.3 实验方法	105
5.3 结果与讨论	107
5.3.1 生物质还原过程对催化剂性能的影响	107
5.3.2 银盐前驱体对催化剂性能的影响	110
5.3.3 生物质还原温度对催化剂性能的影响	119
5.3.4 银负载量对催化剂性能的影响	125
5.3.5 生物质还原剂浓度对催化剂性能的影响	130
5.3.6 焙烧温度对催化剂性能的影响	134
5.3.7 Cs 助剂对催化剂性能的影响	139
5.3.8 生物质原位还原法制备的催化剂与工业催化剂的活性比较	151
5.3.9 催化剂稳定性考察	151
5.4 小结	153
第 6 章 结论与建议	155
6.1 主要结论	155
6.2 主要创新点	157
6.3 建议	157
参考文献	159
附录	178
在学期间的科研成果	180
致谢	183

Contents

Abstract.....	III
Contents	IX
Chapter 1 Introduction.....	1
1.1 Introduction.....	1
1.2 Silver nanomaterials	2
1.2.1 Physical and chemical properties of silver	2
1.2.2 Properties of silver nanomaterials.....	2
1.2.3 Application of silver nanomaterials	2
1.2.4 Conventional methods for synthesis of silver nanomaterials	5
1.3 Bioreduction methods for synthesis of silver nanomaterials	9
1.3.1 Concept of bioreduction.....	10
1.3.2 Biomaterial for bioreduction.....	10
1.3.3 Mechanism of bioreduction	13
1.3.4 Application of Silver nanomaterials prepared by bioreduction	16
1.4 Ethylene epoxidation	18
1.4.1 Overview of ethylene oxide	18
1.4.2 Direct oxidation of ethylene.....	21
1.4.3 Mechanism of the direct oxidation process	22
1.5 Silver catalysts for ethylene epoxidation	24
1.5.1 Development of the catalysts for ethylene epoxidation.....	24
1.5.2 Composition of the catalysts.....	25
1.5.3 Preparation of the catalysts	26
1.5.4 Current research on the catalysts	28
1.6 Scope and objectives of this work	30
1.6.1 Research objectives.....	30
1.6.2 Research contents.....	31
Chapter 2 Biosynthesis of silver nanoparticles by <i>Pichia pastoris</i>	32
2.1 Introduction.....	32
2.2 Experimental section	32
2.2.1 Materials and reagents	32

2.2.2 Apparatus	32
2.2.3 Experimental methods	32
2.2.4 Characterization of the resultants.....	34
2.3 Results and discussion	34
2.3.1 Biosynthesis of silver nanoparticles by the dried biomass of <i>Pichia pastoris</i>	34
2.3.2 Biosynthesis of silver nanoparticles by the extract of <i>Pichia pastoris</i> .	43
2.3.3 Biosynthesis of Ag-Au alloy nanoparticles by the extract of <i>Pichia pastoris</i>	49
2.4 Summary.....	54
Chapter 3 Preparation of Ag/α-Al₂O₃ catalysts by Ag-sol	
immobilization method.....	56
3.1 Introduction.....	56
3.2 Experimental section	56
3.2.1 Materials and reagents	56
3.2.2 Apparatus	57
3.2.3 Experimental methods	57
3.3 Results and discussion	61
3.3.1 Preparation of silver catalyst by Ag-biomass powders.....	61
3.3.2 Preparation of silver catalyst by Ag-sol immobilization method.....	65
3.4 Summary.....	79
Chapter 4 Preparation of Ag/α-Al₂O₃ catalysts by biomass-assisted	
thermal decomposition method	81
4.1 Introduction.....	81
4.2 Experimental section	82
4.2.1 Materials and reagents	82
4.2.2 Apparatus	82
4.2.3 Experimental methods	82
4.3 Results and discussion	84
4.3.1 Results of uniform design	84
4.3.2 Result of single factor experiment.....	90

4.3.3 Comparasion of the performance of Ag/ α -Al ₂ O ₃ catalysts prepared by traditional and biomass-assisted thermal decomposition methods	100
4.4 Summary	103
Chapter 5 Preparation of Ag/α-Al₂O₃ catalysts by in-situ bioreduction method	105
5.1 Introduction	105
5.2 Experimental section	105
5.2.1 Materials and reagents	105
5.2.2 Apparatus	105
5.2.3 Experimental methods	105
5.3 Results and discussion	107
5.3.1 Effect of in-situ bioreduction process	107
5.3.2 Effect of silver precursors	110
5.3.3 Effect of bioreduction temperature	119
5.3.4 Effect of silver loading.....	125
5.3.5 Effect of concentration of <i>C. camphora</i> leaf leachate	130
5.3.6 Effect of calcination pretreatment temperature.....	134
5.3.7 Effect of Cs content	139
5.3.8 Comparasion with the commerical catalyst	151
5.3.9 Stability of Ag/ α -Al ₂ O ₃ catalysts	151
5.4 Summary	153
Chapter 6 Conclusions and suggestions	155
6.1 Conclusions	155
6.2 Highlights of this work	157
6.3 Suggestions	157
References	159
Appendices	178
Selected publications and patents	180
Acknowledgements	183

第1章 文献综述

1.1 引言

纳米科学是 20 世纪 80 年代末、90 年代初才逐渐发展起来的交叉性新兴学科领域，与信息科学、生命科学并称为 21 世纪的三大支柱科学领域。纳米科学主要包括纳米材料学、纳米机械和工程学、纳米电子学和纳米生物学等，其中纳米材料学是基础，而其关键在于纳米材料的制备^[1]。近年来，关于材料制备过程绿色化的研究日趋活跃，纳米材料的绿色制备技术也受到越来越多的关注。与此同时，伴随着现代生物技术突飞猛进的发展，人们对生物质理化性质有了进一步的了解，利用生物质这一可再生的绿色资源合成纳米材料，为现代纳米材料的制备技术开辟了一条崭新的途径，成为当下诸多学者的研究热点。将生物技术融入纳米材料的制备过程，不仅充分利用了丰富的生物质资源，相较传统化学合成技术更加环保和安全，而且生物转化过程可以在较为温和的条件下进行，可以降低能源及资源的耗费。此外，如果生物质所具有的一些特征能够和目标材料相互作用，则更可能获得意想不到的成果，从而开拓所制备材料的广阔应用空间。

贵金属纳米材料作为纳米材料中重要的一支，由于其在热学、磁学、光学、力学和化学等方面具有特殊的性质，因此在诸多领域都有具备广阔的应用前景。银是贵金属中储量最丰富且价格最低的金属，同时也是导电性和导热性最好的金属，银纳米材料可以用于超导材料、抗菌材料、光电器件、生物医学材料等，很早就作为一种良好的催化材料用于部分氧化和还原反应的催化体系，如乙烯环氧化、甲醇部分氧化、甲醛部分氧化和 NO_x 的还原等^[2]。随着人们对物质需求的不断提高，对化学催化反应及催化材料的制备必然提出更高的要求，而新世纪纳米技术的飞速发展作为催化科学家和工程师在催化剂的设计、制备、修饰、表征和应用等方面提供了难得的机遇。除此之外，人类在能源和环境的可持续发展方面也面临着重大的挑战，因此，以通过绿色的制备过程获得高性能的催化剂为目标，将生物还原技术融入到贵金属催化剂的制备技术之中的研究具有十分重要的意义。

1.2 银纳米材料

1.2.1 银的物理化学性质

银，化学元素符号 Ag，原子序数为 47，属于元素周期表 I 类副族元素，相对原子质量 107.870，熔点 960.8℃，沸点 2210℃，密度 10.498 g·cm⁻³。纯银为银白色，具有面心立方晶格，它能与任何比例的金或铜形成合金。银具有极好的延展性，仅次于金，在所有金属中居第二位。银具有较高的化学稳定性，常温下不与氧反应，所以银在自然界中能以单质银存在。银易溶于硝酸和热的浓硫酸中，微溶于热的稀硫酸，不溶于冷的稀硫酸。银是贵金属中较为常见且相对廉价的一种，由于其优异的物理和化学性质，成为物理、化学、材料等科学领域的研究热点，同时也得到了广泛的应用^[3]。

1.2.2 银纳米材料的性质

当常态物质被加工到极其微细的纳米尺度时，会出现特异的表面效应、小体积(尺寸)效应、量子效应和宏观隧道效应等，其光学、热学、电学、磁学、力学、化学等性质也相应地发生十分显著，甚至是奇特的变化^[4]。纳米级的单质银颗粒除了具有纳米材料的各项物理化学性质外，还拥有一些独特的性质。例如块状银材料的熔点为 960.8℃，而直径为 2 nm 的银颗粒熔点能降到 100℃ 以下，纳米级单质银具有类似于绝缘体的很高的电阻^[4-5]，另外，其表面等离子体共振特性^[6-7]、三阶非线性光学性能^[8]、优异的杀菌性能等^[9]特殊性质也为银纳米材料在光学、生物学、医学和催化等领域开拓了广泛的应用空间。

1.2.3 银纳米材料的用途

作为一种性能优良的贵金属纳米材料，纳米银的应用前景十分广泛。目前，其应用领域主要包括以下几个方面：

(1) 催化剂

纳米材料因其大比热容、高硬度、大比表面积和多活性位点等特性成为理想的催化剂材料。纳米材料作为催化剂具有无细孔、使用条件温和以及使用方便等

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库