

学校编码: 10384

分类号 \_\_\_\_\_ 密级 \_\_\_\_\_

学号: 200215001

UDC \_\_\_\_\_

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

磁性纳米颗粒的制备以及在生物样品  
分离纯化中的应用

Preparation of the magnetite nanoparticles and application to the  
extraction of biological samples

廖逸群

指导教师姓名: 李庆阁 教授

专 业 名 称: 细胞生物学

论文提交日期: 2006 年 7 月 3 日

论文答辩时间: 2006 年 8 月 13 日

学位授予日期:

答辩委员会主席: 杨 丰

评 阅 人: \_\_\_\_\_

2006 年 08 月

# 厦门大学学位论文原创性声明

兹提交的学位论文，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的其他个人或集体的研究成果，均在文中以明确方式标明。本人依法享有和承担由此论文产生的权利和责任。

声明人（签名）：

年 月 日



## 摘要

本论文围绕着生物样品的磁性固相吸附分离纯化技术展开了研究。研究工作包括两个部分：超顺磁性纳米颗粒的制备及在 DNA 样品分离纯化中的应用，超顺磁性纳米颗粒的表面修饰及在 RNA 和蛋白质分离纯化中的应用。

第一部分，利用化学合成的方法制备出具有超顺磁性的纳米颗粒，并用二氧化硅和三氧化二硼复合包裹磁性纳米颗粒，很大程度上改进了包裹层的物理化学稳定性，克服现有的单纯以二氧化硅为包裹材料的磁性纳米颗粒在偏酸性环境易泄漏的问题。通过对多种样品 DNA 分离纯化，并和经典的酚/氯仿/异戊醇传统提取纯化方法比较，证实了复合包裹的磁性纳米颗粒分离纯化 DNA 样品具有良好的效果，通过一系列的后续实验证明了提取的 DNA 样品能够满足大部分分子生物学实验的需要。最后通过建立自动化提取体系，进一步减少了操作要求并缩短了操作时间，从而建立起一个方便、快捷、经济而又高通量的 DNA 提取体系。

第二部分，在第一部分的基础上，通过改变体系环境和对超顺磁性纳米颗粒表面的修饰改造，扩大该体系的应用范围。通过调整结合缓冲液成分和 pH 值将该体系应用于血清中的病毒 RNA 的分离纯化，通过在磁性颗粒表面修饰链霉亲和素将该体系应用于外周血标本 mRNA 的分离纯化，通过在磁性颗粒表面修饰 NTA-Co<sup>2+</sup>将该体系应用于 6×His-tag 融合蛋白的分离纯化。通过实验验证，都取得了理想的分离纯化效果。由于该磁性颗粒表面能够很容易地修饰大量功能基团，因此具有广阔的技术延伸前景。

关键词：磁性颗粒；生物样品；分离纯化

## Abstract

The dissertation is related to the field of application of magnetisable solid-phase supports (MSPS) to the purification of biological samples. It consists of two parts. The first part is preparation of magnetite and silica/boron-magnetite nanoparticles and their application to DNA extraction. The second part is surface modification of silica/boron-magnetite nanoparticles and application to isolation of RNA and protein.

In the first part, magnetite was synthesized and wrapped in a silica/boron shell which was proved more stable than the silica shell alone. A variety of resources of DNA samples were purified with these nanoparticles. The quality and quantity of the extracted DNA were comparable with those isolated by the classic method using phenol and chloroform. The yielded DNA with this method could satisfy the downstream molecular biology experiments. Finally, our magnetic nanoparticles were successfully used in an automatic DNA extraction system.

In the second part, the above synthesized nanoparticles were further modified to extend their applications. First, a viral RNA extraction system was established simply by changing the buffer component. Then two affinity chromatographic methods were built up based on surface modification of the above magnetic nanoparticles. Streptavidin was linked to the surface of magnetic nanoparticle to isolate human blood mRNA. NTA-Co<sup>2+</sup> was labeled on the surface of magnetic nanoparticles to isolate 6×His-tag fusion proteins. Both affinity chromatographic methods achieved similar isolation efficiency as commercial products. As the surface of these nanoparticles can be easily modified with a diversity of functional groups, more applications in other fields could be expected.

**Keywords:** magnetic nanoparticle, protein and nucleic acids, isolation

## 目 录

中文摘要 .....	1
英文摘要 .....	2
<b>第一章 超顺磁性纳米颗粒的制备、包裹以及在 DNA</b>	
<b>分离纯化中的应用 .....</b>	<b>3</b>
第一节 引言 .....	3
第二节 材料与方法 .....	5
第三节 实验结果.....	8
§ 3.1 超顺磁性纳米颗粒核心的制备 .....	8
§ 3.2 超顺磁性纳米颗粒核心的多层二氧化硅包裹 .....	9
§ 3.3 超顺磁性纳米颗粒核心的复合包裹及泄漏考察 .....	9
§ 3.4 用二氧化硅加厚包裹超顺磁性纳米颗粒核心 .....	11
§ 3.5 超顺磁性纳米颗粒对各种 DNA 提取的效果.....	12
§ 3.6 各种类型 DNA 在后续实验中应用的效果.....	15
§ 3.7 自动化取 DNA 的效果 .....	19
第四节 讨论 .....	23
参考文献 .....	24
<b>第二章 超顺磁性纳米颗粒的表面修饰以及在 RNA 和蛋</b>	
<b>白质分离纯化中的应用.....</b>	<b>26</b>
第一节 引言 .....	26
第二节 材料与方法 .....	29

---

第三节 实验结果.....	32
§ 3.1 用磁性纳米颗粒从 SARS 假病毒提取 RNA.....	32
§ 3.2 从 SARS 假病毒提取 RNA 的实时荧光 RT-PCR 检测.....	33
§ 3.3 SARS 假病毒稀释提取 RNA 的实时荧光 RT-PCR 检测....	34
§ 3.4 修饰有链霉亲和素的磁性颗粒对全血标本 mRNA 提取...	35
§ 3.5 NTA-Co <sup>2+</sup> 超顺磁性纳米颗粒表面钴离子密度计算.....	36
§ 3.6 修饰有 NTA-Co <sup>2+</sup> 超顺磁性纳米颗粒非特异吸附考察....	36
§ 3.7 6×His-tag 融合蛋白的分离纯化.....	39
第四节 讨论 .....	40
参考文献 .....	40
致谢.....	44

厦门大学博硕士学位论文摘要

---

**CONTENTS**

<b>Abstract(In Chinese)</b> .....	1
<b>Abstract(In English)</b> .....	2
Chapter I Preparation of magnetite and silica/boron- magnetite nanoparticles and their application to DNA extraction.....	3
<b>Section I Introduction</b> .....	3
<b>Section II Materials and Methods</b> .....	5
<b>Section III Results</b> .....	8
§3.1 Preparation of magnetite .....	8
§3.2 Preparation of silica-magnetite nanoparticles.....	9
§3.3 Preparation of silica/boron-magnetite nanoparticles .....	9
§3.2 Preparation of thick-silica-magnetite nanoparticles.....	11
§3.5 DNA extraction .....	12
§3.6 Downstream experiments .....	15
§3.7 Automatic DNA extraction .....	19
<b>Section IV Discussion</b> .....	23
<b>References</b> .....	24
Chapter II Surface modification of silica/boron-magnetite nanoparticles and application to isolation of	



---

RNA and protein .....	26
<b>Section I Introduction</b> .....	26
<b>Section II Materials and Methods</b> .....	29
<b>Section III Results</b> .....	32
§3.1 The isolation of SARS armored RNA.....	32
§3.2 Real-time RT-PCR of SARS armored RNA .....	33
§3.3 The isolation of diluted SARS armored RNA sample .....	34
§3.4 The isolation of human blood mRNA.....	35
§3.5 Co <sup>2+</sup> density on the surface of magnetite nanoparticles .....	36
§3.6 The nonspecific absorption of magnetite nanoparticles.....	36
§3.7 Purification of 6×His-tag protein .....	39
<b>Section IV Discussion</b> .....	40
<b>References</b> .....	40
<b>Acknowledgment</b> .....	44

# 第一章 超顺磁性纳米颗粒的制备、包裹以及在 DNA 分离纯化中的应用

## 第一节 引言

DNA 作为大多数生物体的主要遗传物质受到了许多生物科学工作者的重视。近几年随着分子生物学的进步和各种基因组计划的运行以及自动化程度极高的分析仪器相继问世,使基因分析技术和遗传工程技术得到迅速的发展并在各个领域中得到广泛的应用。但关键步骤 DNA 提取却是一项烦琐、耗时、费力的工作并且自动化程度不高,严重影响整体实验进度。高效、便捷、自动化的核酸提取方法的建立已成为燃眉之急,因此许多科学工作者一直在努力探索各种方便、快速、经济的 DNA 提取方法<sup>[1-15]</sup>。目前主要的基因组 DNA 提取方法有:1、经典酚/氯仿抽提法 2、非有机溶剂提取法(盐析法) 3、固相吸附提取法。

固相吸附提取法是当前被众多科学工作者看好的一项提取技术,它具有以下优点:1、操作过程简单、经济、方便、省时,宜于自动化操作。2、不用有机溶剂,不会残留酚类等杂质,不损伤核酸分子,提取的核酸适合于分子生物学实验。3、处理条件温和,所需试剂对人体无害。磁力固相吸附剂由于具有超顺磁性,即在外加磁场中有较强的磁性,没有磁场时,磁性很快消失,而不会被永久磁化,因此具备固液相易于分离的特点,在核酸提取、固相免疫检测、细胞吸附、酶的纯化等方面的应用受到越来越多的关注。目前对磁性颗粒进行包裹的材料主要有聚糖、蛋白质、二氧化硅、高分子有机聚合物等<sup>[3]</sup>。

由于二氧化硅在一定条件下对核酸具有很高的亲和力,并且在不同条件下亲和力相差很大,因此在本文中选用二氧化硅作为磁性颗粒包裹材料。在 pH 值等于或低于二氧化硅表面 pKa 值的高离子强度的结合缓冲液中,二氧化硅表面的负电荷减少,有利于吸附带负电荷的 DNA 磷酸骨架;同时大量离子形成了水合离子,核酸分子的水合程度随之降低而被驱使聚合到二氧化硅表面上。由于结合缓冲液能使核酸分子部分构相变化与二氧化硅表面形成氢键从而促进二氧化硅对核酸吸附。但在 pH 高于二氧化硅表面 pKa 值的低离子强度的洗脱缓冲液中,以上的作用力的变化正好相反,核酸分子就从二氧化硅表面洗脱下来<sup>[4]</sup>。

由于上述原因,对于以二氧化硅为核酸吸附材料的磁性固相吸附分离纯化 DNA 样品的研究受到了广泛的重视,例如 Kathryn A. Melzak 等对二氧化硅吸附核酸原理做出的总结<sup>[4]</sup>; Martin J. Davies 等对该方法提取质粒 DNA 的研究<sup>[5]</sup>; James I. Taylor 等对该方法提取基因组 DNA 的研究<sup>[1]</sup>; Smith 等在 2002 年 US Patent 6,368,800 中对用二氧化硅包裹的磁性颗粒的核酸提取研究<sup>[6]</sup>; 以及 Promega 在 CN1370230A 中公开的用二氧化硅包裹的磁性颗粒从其他物质中分离确定量的 DNA 靶物质的方法<sup>[7]</sup>。

使用这种磁性颗粒进行核酸提取还可以通过自动化提取仪中的磁棒的移动实现磁颗粒转移代替液体转移的操作实现对核酸提取的自动化。自动化提取具有以下优点:高通量、高重现性、样品体积小、受污染程度低、与后操作易衔接、减少手工操作的时间与劳动强度。

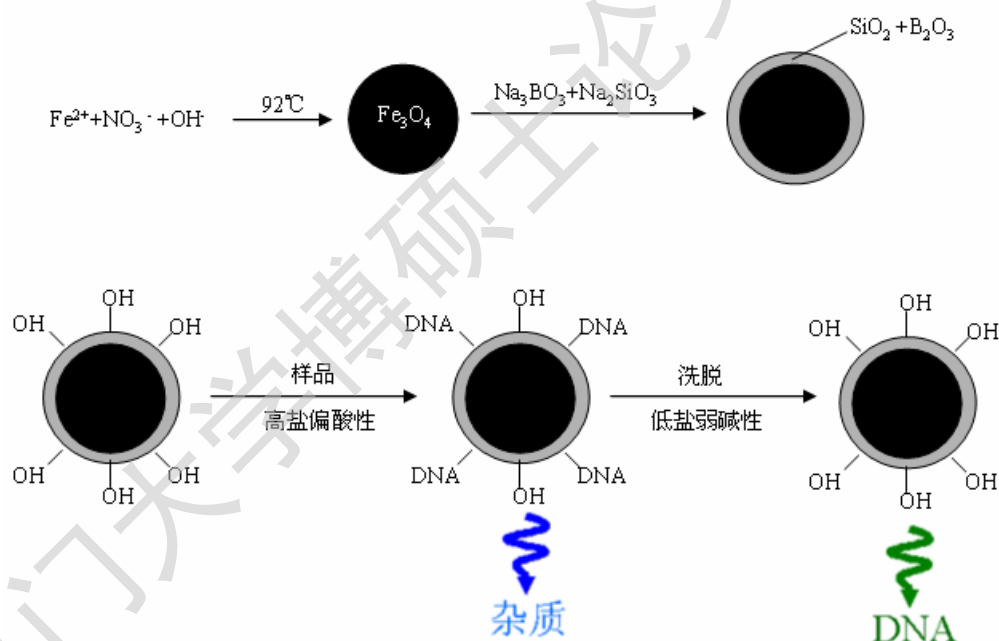


图 1-1 超顺磁性纳米颗粒制备及在 DNA 提取中的应用

Figure. 1-1 Preparation of magnetic nanoparticle and application of it to the isolation of duplex DNA.

本文描述了一种用二氧化硅和三氧化二硼复合包裹的超顺磁性纳米颗粒的制备方法(图 1-1)。实验结果表明硅硼复合包裹的磁性纳米颗粒比单纯采用硅包裹的磁性纳米颗粒能够耐受更苛刻的环境条件。在本论文中该磁性颗粒被应用于多

种 DNA 的分离纯化，并将提取的产物应用于各种分子生物学实验中去。通过将提取操作的自动化，提高了实验效率。

## 第二节 材料与方法

### § 2.1 超顺磁性纳米颗粒核心的制备

溶液 1：将 4.045g  $\text{KNO}_3$  和 9.430g  $\text{KOH}$  溶解于 50mL 去离子水中，在氮气保护下搅拌混匀并水浴预热至  $65^\circ\text{C}$ 。溶液 2：将 17.71g  $\text{FeSO}_4$  溶解于 150mL 超纯水中，在氮气保护下搅拌混匀并水浴加热至  $95^\circ\text{C}$ 。将溶液 1 和 2 迅速混合均匀后  $92^\circ\text{C}$  水浴加热并在氮气保护下搅拌 4h 自然冷却到室温，用去离子水洗涤直至悬浮液 pH 值为 7.0。用无水乙醇悬浮产物然后用  $50^\circ\text{C}$  真空抽干，称重后 40mg/mL 悬浮于去离子水中保存。

### § 2.2 用二氧化硅包裹超顺磁性纳米颗粒核心

将 8.3g  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  溶解于 200mL 去离子水中，过经 2M  $\text{HCl}$  预处理的强酸性阳离子交换柱。过柱后的溶液用原有的  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  溶液调节 pH 至 9.5，加入 15mL 的超顺磁性颗粒核心悬浮液和 3.3mL 的四甲氧基氢氧化铵 (TMA) 25% 水溶液，测得此时悬浮液 pH 值为 12.5。用 1M  $\text{HCl}$  调节 pH 值至 10.0，室温搅拌 2h，在此期间通过滴加 1M  $\text{HCl}$  保持悬浮液 pH=10.0。先用 95% 乙醇洗涤 2 次后用去离子水洗涤至悬浮液 pH=7.0，用无水乙醇悬浮产物然后用  $50^\circ\text{C}$  真空抽干称重后 40mg/mL 悬浮于去离子水中保存。

### § 2.3 用二氧化硅多次包裹超顺磁性纳米颗粒核心

以 § 2.2 制备的超顺磁性纳米颗粒为核心，用相同的方法重复包裹。

### § 2.4 用二氧化硅和三氧化二硼复合包裹超顺磁性纳米颗粒核心

在 § 2.2 的  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  溶液中添加 0.77g  $\text{H}_3\text{BO}_3$  和 0.5g  $\text{NaOH}$ 。

### § 2.5 用二氧化硅加厚包裹超顺磁性纳米颗粒核心

在 § 2.2 中室温搅拌 2h 步骤后缓缓加入 20ml 的无水乙醇，并室温搅拌 30min。然后用同样的方法洗涤，收集产物。

### § 2.6 包裹泄漏测试

用 1M 盐酸分别室温处理只用二氧化硅包裹和用二氧化硅/三氧化二硼复合包裹的磁性纳米颗粒一个小时。用分光光度计检测它们 10 倍稀释的上清液的 200nm

到 450nm 的吸收光谱。

## § 2.7 手动提取各种类型 DNA

### § 2.7.1 大肠杆菌基因组DNA提取

样品预处理：10,000rpm离心1min收集对数生长期菌体(DH5 $\alpha$ )湿重1mg，弃上清。加入100 $\mu$ L裂解液(1%SDS (W/V), 0.1 M Tris-HCl, 0.05M EDTA, 0.5M NaCl, pH=8.0)60 $^{\circ}$ C温浴15min。DNA提取：加入400 $\mu$ L结合缓冲液(4M NaCl, 25%PEG(w/v), 50U RNase, pH=4.5)和50 $\mu$ L的磁性颗粒室温混匀5min，用磁架吸附磁性颗粒，弃去上清。分别用800 $\mu$ L的洗涤缓冲液(20mM Tris-HCl, 20mM NaCl, pH=7.5 加四倍体积的无水乙醇)，75%乙醇和无水乙醇洗涤磁性颗粒一次。加入100 $\mu$ L的洗脱缓冲液(10mM Tris-HCl, pH=8.5)室温混匀3min。用磁架吸附磁性颗粒，收集上清，然后分别用1%琼脂糖凝胶电泳和230nm到320nm紫外吸收光谱扫描检测(TU-1901北京普析通用仪器有限公司)DNA的相对纯度和量(下同)。

### § 2.7.2 菠菜叶基因组DNA提取

植物样品预处理：将0.2g剪碎菠菜叶用液氮研磨，加1mL裂解液(2%CTAB(W/V), 2%巯基乙醇(V/V), 0.1M Tris-HCl, 0.025 M EDTA, pH=8.0)70 $^{\circ}$ C温浴30min, 10,000rpm离心5min除去碎片。取100 $\mu$ L样品预处理液用和细菌基因组DNA提取相同的方法提取菠菜叶基因组DNA(样品稀释10倍后用于检测)。

### § 2.7.3 人类胃癌细胞基因组DNA提取

人工培养动物细胞样品预处理：用细胞消化液(0.2g EDTA, 85mg NaCl, 0.5g 胰蛋白酶, 100mL 无菌水)将培养的胃癌细胞从培养瓶壁洗脱下来,4 $^{\circ}$ C 10,000rpm离心10min收计得胃癌细胞5mg。DNA提取：加入400 $\mu$ L的结合缓冲液(5M 异硫氰酸胍, 50mM Tris-HCl, 20%Trithon X-100, pH=5.0)和50 $\mu$ L的磁性颗粒室温混匀5min，用磁架吸附磁性颗粒，弃去上清。用预洗涤缓冲液(3M NaCl, 15%PEG(w/v), 50U RNase, pH=4.0)室温悬浮磁粒5min，用磁架吸附磁性颗粒，弃去上清。分别用800 $\mu$ L的结合缓冲液，洗涤缓冲液，75%乙醇和无水乙醇洗涤磁性颗粒一次。等待磁性颗粒间的无水乙醇挥发干后，加入100 $\mu$ L的洗脱缓冲液(10mM Tris-HCl, pH=8.5)室温混匀3min。用磁架吸附磁性颗粒，收集上清。

### § 2.7.4 人类外周血标本基因组DNA提取

EDTA抗凝血液样品处理：往200 $\mu$ L的外周血标本加入800 $\mu$ L的0.1M的PBS缓冲液

(pH=7.4) 悬浮, 10,000rpm离心10min搜集白细胞。样品预处理后用和人工培养动物细胞基因组DNA提取相同的方法提取外周血标本基因组DNA(样品稀释10倍后用于检测)。

### § 2.7.5 质粒 DNA 提取

样品预处理: 10,000rpm离心1min收集对数生长期带有pET-32a质粒的菌体(DH5 $\alpha$ )湿重2mg, 弃上清。加入100 $\mu$ L的溶液A(50mM 葡萄糖, 25mM Tris-HCl, 10mM EDTA, pH=8.0), 将菌体悬浮后, 加入200 $\mu$ L的溶液B(0.2M NaOH, 1%(w/v) SDS), 上下颠倒混匀3min后, 加入150 $\mu$ L的溶液C(3M KAc), 上下颠倒混匀3min。10,000rpm离心10min, 收集上清, 加入200 $\mu$ L的异丙醇和50 $\mu$ L的磁性颗粒室温混匀5min, 用磁架吸附磁性颗粒, 弃去上清。分别用800 $\mu$ L的洗涤缓冲液(20mM Tris-HCl, 20mM NaCl, pH=7.5 加四倍体积的无水乙醇), 75%乙醇和无水乙醇洗涤磁性颗粒一次。等待磁性颗粒间的无水乙醇挥发干后, 加入100 $\mu$ L的洗脱缓冲液(10mM Tris-HCl, pH=8.5) 室温混匀3min。用磁架吸附磁性颗粒, 收集上清。

## § 2.8 各种类型 DNA 在后续实验中的应用

### § 2.8.1 DNaseI 处理菠菜叶基因组 DNA

200 $\mu$ L 的菠菜叶基因组 DNA, 加入 10U 的 DNase, 37 $^{\circ}$ C 温浴 1h。

### § 2.8.2 PCR 扩增和 Real-time PCR 扩增人体基因组 DNA

使用标准 PCR 反应体系加入 1 $\mu$ L 的培养细胞或外周血标本基因组 DNA。扩增片段大小为 295bp, 位于保守的人体  $\beta$  肌动蛋白基因内。上游引物为: 5'-TCACC CACACTGTGCCATCTACGA-3'; 下游引物为: 5'-CAGCGGAACCGCTCATTGCCAATGG-3'。Real-time PCR 扩增使用的检测双链探针, 正链为: 5'-FAM-ATGCCCTCCCCATGCCA TCCTGCGT-P04-3'; 负链为: 5'-GCAGGATGGCATGGGGGAGGGCAT-Dabcyl-3'。PCR 反应条件为: 95 $^{\circ}$ C 预变性 3min 后 95 $^{\circ}$ C 变性 20s, 55 $^{\circ}$ C 退火 20s, 72 $^{\circ}$ C 延伸 30s, 重复 35 个循环。Real-time PCR 在退火时收集荧光数据。

### § 2.8.3 双酶切 pET-32a 质粒及插入 Luc 基因

用 § 2.6.5 中提取的 pET-32a 质粒和末端带有酶切位点 Luc 基因扩增产物分别用 Nde I 和 Bgl II 双酶切后胶回收。将回收产物用 DNA Ligation Kit Ver. 2.1 试剂盒 (Takara) 连接后分别转化宿主菌 JM109 和 BL21(DE3)。再次用 § 2.6.5 中的方法提取 pET-32a-Luc 质粒再次进行 Nde I 和 Bgl II 双酶切验证重组子。同时用

在对数生长期 ( $A_{600}=5.0$ ) 加入终浓度为 1mM IPTG 诱导表达过夜, 用虫荧光素酶检测底物 (20 $\mu$ M 虫荧光素, 60 $\mu$ M ATP, 15mM MgSO<sub>4</sub>, 30mM tricine, pH=7.8) 验证重组子。

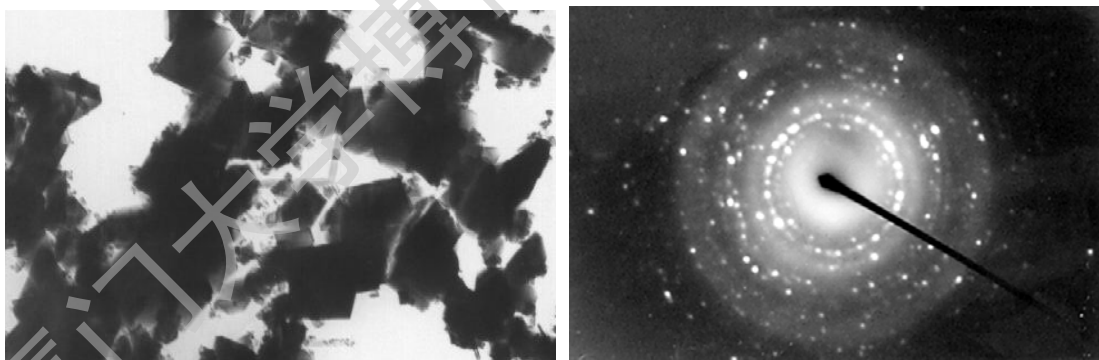
### § 2.9 自动化取 DNA

将各种试剂和预处理后的样品加入样品孔板内, 把编辑好的操作程序输入核酸自动提取仪 (KingFisher ML, 美国 Thermo Electron 公司) 自动提取仪将自动进行吸附磁性颗粒, 结合基因组 DNA 分子, 洗涤磁性颗粒, 洗脱基因组 DNA 分子的操作, 总时间 20min—25min。从样品孔板中收集含有 DNA 的洗脱液。

## 第三节 实验结果

### § 3.1 超顺磁性纳米颗粒核心的制备

所制备的超顺磁性纳米颗粒核心主要成分为 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 夹带有少量 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 能够在水或乙醇中均匀悬浮, 溶液呈深黑色悬浮液。通过透射电镜测量, 超顺磁性晶体颗粒大小 200nm 左右, 呈无规则片状黑色晶体结构 (图 1-2)。经过磁力吸附证明该晶体颗粒具有很好的超顺磁性, 即在外加磁场作用下能迅速吸附于靠磁架的管壁, 在无外加磁场作用下只须稍微摇晃就可以均匀悬浮起来。



A 100 000 倍放大观察

B 电子衍射图

A 100 000 times magnified

B Electron diffraction image

图 1-2 透射电子显微镜观察超顺磁性纳米颗粒核心

Figure.1-2 TEM image of the core of nanoparticle

### § 3.2 超顺磁性纳米颗粒核心的多层二氧化硅包裹

经透射电镜观察包裹前后颗粒的大小形态变化不大 (图 1-3), 仅仅只是在超顺磁性晶体颗粒表面包裹上一层几纳米厚的 SiO<sub>2</sub>, 并且在包裹层数较少时, 部分

超顺磁性晶体颗粒表面依旧裸露。因此增加  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  晶体颗粒包裹的  $\text{SiO}_2$  层数可加强对磁核的保护。

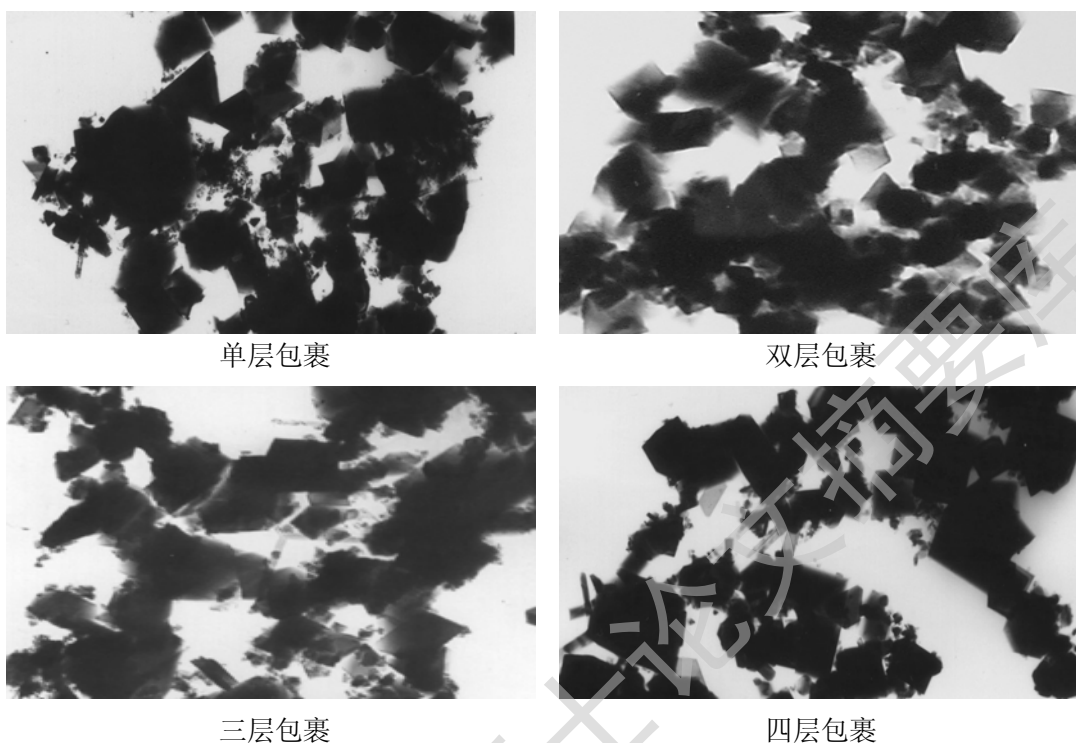


图 1-3 透射电子显微镜观察  $\text{SiO}_2$  包裹的超顺磁性纳米颗粒，分别为一层，两层，三层，四层包裹。(100 000 倍放大观察)

Figure. 1-3 TEM image of silica-magnetite, having one, two, three, four, consecutively deposited layers of silica. (100 000 times magnified)

### § 3.3 超顺磁性纳米颗粒核心的复合包裹及泄漏考察

由于用二氧化硅包裹的磁性纳米颗粒在长时间保存或在酸性环境中会产生泄漏现象，因此我们想通过在二氧化硅中掺杂三氧化二硼来提高包裹层的物理强度和减小网格孔径。通过对二氧化硅和三氧化二硼复合包裹的超顺磁性纳米颗粒的元素分析(图 1-4)，我们可以确认三氧化二硼已经成功掺入二氧化硅包裹层中。通过对 1M 盐酸的耐受实验的考察(图 1-5，左边离心管为单纯二氧化硅包裹的磁性颗粒在 1M 盐酸环境处理 12h 后的上清液明显，呈灰绿色；右边离心管为三氧化二硼和二氧化硅复合包裹的磁性颗粒经相同处理后的上清液，无色。分别检测两种上清十倍稀释后在 200nm 到 450nm 间的吸收光谱，灰色曲线为二氧化硅包裹的磁性颗粒处理后的上清；黑色曲线为复合包裹的磁性颗粒处理后的上清)，可以看



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](mailto:etd@xmu.edu.cn) for delivery details.

厦门大学博硕士学位论文摘要库