

学校编码: 10384

分类号_____密级_____

学 号: 20520110153712

UDC_____

厦 门 大 学

博 士 学 位 论 文

无机纳米材料在光热疗及化疗 抗癌方面的研究

The Application of Inorganic Nanoparticles for Chemotherapy and Photothermal Therapy

汤少恒

指导教师姓名: 郑南峰 教授

专业名称: 无机化学

论文提交日期: 2014 年 6 月

论文答辩时间: 2014 年 7 月

学位授予日期: 2014 年 月

答辩委员会主席: _____

评 阅 人: _____

2014 年 6 月

无机纳米材料在光热疗及化疗抗癌方面的研究

汤少恒

指导教师 郑南峰 教授

厦门大学

厦门大学博士论文摘要库

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（ 郑南峰 ）课题（组）的研究成果，获得（ 郑南峰 ）课题（组）经费或实验室的资助，在（ 郑南峰 ）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）：汤少恒

2014 年 7 月 10 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)：汤少恒

2014 年 7 月 10 日

摘要	I
Abstract.....	III
第一章 绪论	1
§1.1 纳米材料应用于抗癌医学研究概述	1
§1.2 光热纳米材料概述	2
§1.2.1 光热金属纳米颗粒.....	3
§1.2.2 光热纳米颗粒在光热抗癌中的应用.....	8
§1.3 中空介孔材料概述	10
§1.3.1 中空介孔材料的合成.....	12
§1.3.1.1 软模板法.....	12
§1.3.1.2 硬模板法.....	14
§1.3.1.3 气雾模板法和无模板法.....	15
§1.3.2 HMMs 在生物医药方面的功能化及应用	15
§1.4 本论文的选题依据和研究内容	18
§1.5 参考文献	19
第二章 二氧化硅包裹的钯纳米片在光热疗抗癌方面的研究.....	36
§2.1 前言	36
§2.2 实验部分	37
§2.2.1 试剂与仪器.....	37
§2.2.1.1 试剂.....	37
§2.2.1.2 仪器.....	37
§2.2.2 实验步骤.....	38
§2.2.2.1 合成 41 纳米的钯纳米片.....	38
§2.2.2.2 合成 Pd@silica (SPNS) 纳米颗粒	38
§2.2.2.3 SPNS 光热转化实验.....	39
§2.2.2.4 合成荧光修饰的 SPNS	39
§2.2.2.5 用 APTES 对 FSPNS 进行表面修饰.....	39
§2.2.2.6 定量分析细胞对钯纳米片的内吞量.....	39
§2.2.2.7 监测细胞对 FSPNS-NH ₂ 的吞噬情况.....	39
§2.2.2.8 细胞培养及体外毒性实验.....	40
§2.2.2.9 体外光热疗实验.....	40
§2.3 实验结果与讨论	41
§2.3.1 SPNS 纳米颗粒的形貌表征	41
§2.3.2 SPNS 纳米颗粒近红外吸收及转换性能研究	43
§2.3.3 增强细胞内吞作用研究.....	44

§2.3.4	FSPNS-NH ₂ 的体外光热抗癌研究.....	48
§2.4	本章小结	52
§2.5	参考文献	53
第三章 超小钽纳米片的光热疗研究.....		55
§3.1	前言	55
§3.2	实验部分	56
§3.2.1	试剂与仪器.....	56
§3.2.1.1	试剂.....	56
§3.2.1.2	仪器.....	57
§3.2.2	实验步骤.....	57
§3.2.2.1	合成 4.4 纳米的超小钽纳米片.....	57
§3.2.2.2	体外光热疗实验.....	57
§3.2.2.3	血液循环及体内分布实验.....	58
§3.2.2.4	体内光热疗实验.....	58
§3.2.2.5	尿液排出实验.....	59
§3.3	实验结果与讨论	60
§3.3.1	小尺寸钽纳米片的形貌表征.....	60
§3.3.2	超小尺寸钽纳米片的表征.....	61
§3.3.3	超小钽纳米片的光热转化研究.....	61
§3.3.5	血液循环及体内分布研究.....	63
§3.3.6	体内光热转化研究.....	66
§3.3.7	体内光热疗研究.....	67
§3.3.8	体内代谢研究.....	69
§3.3.9	体内安全性研究.....	70
§3.4	本章小结	72
§3.5	参考文献	72
第四章 超小钽纳米片与阿霉素复合物的联合抗癌研究.....		76
§4.1	前言	76
§4.2	实验部分	77
§4.2.1	试剂与仪器.....	77
§4.2.1.1	试剂.....	77
§4.2.1.2	仪器.....	78
§4.2.2	实验步骤.....	78
§4.2.2.1	合成 4.4 纳米的超小钽纳米片 (SPNS)	78
§4.2.2.2	阿霉素(DOX)的负载及释放测试	79
§4.2.2.3	细胞培养及体外联合抗癌实验.....	79
§4.2.2.4	血液循环及体内分布实验.....	80
§4.2.2.5	体内光热疗实验.....	80
§4.2.2.6	尿液排出实验.....	81
§4.3	实验结果与讨论	81
§4.3.1	超小尺寸钽纳米片的表征.....	81

§4.3.2	SPNS-DOX 的光热转化行为研究.....	82
§4.3.3	SPNS-DOX 的体外化疗研究.....	82
§4.3.4	体外光热疗研究.....	84
§4.3.5	血液循环及体内分布研究.....	86
§4.3.6	体内光热转化研究.....	88
§4.3.7	体内光热疗研究.....	90
§4.3.8	体内代谢研究.....	92
§4.3.9	体内安全性研究.....	93
§4.4	本章小结	95
§4.5	参考文献	95
第五章 中空二氧化锆在运送抗癌药物方面的研究.....		99
§5.1	前言	99
§5.2	实验部分	100
§5.2.1	试剂与仪器.....	100
§5.2.1.1	试剂.....	100
§5.2.1.2	仪器.....	100
§5.2.2	实验步骤.....	101
§5.2.2.1	合成中空介孔二氧化锆.....	101
§5.2.2.2	阿霉素(DOX)的负载及释放测试	102
§5.2.2.3	细胞培养及体外毒性实验.....	102
§5.3	实验结果与讨论	103
§5.3.1	<i>hm</i> -ZrO ₂ 纳米颗粒的形貌表征.....	103
§5.3.2	<i>hm</i> -ZrO ₂ 纳米颗粒孔道结构研究.....	104
§5.3.3	阿霉素的吸附与释放行为研究.....	106
§5.3.4	<i>hm</i> -ZrO ₂ -DOX 的体外抗癌研究	109
§5.4	本章小结	113
§5.5	参考文献	115
第六章 总结与展望		119
§6.1	总结	119
§6.2	展望	120
附 录：攻读博士学位期间发表的论文及成果.....		122
致 谢		125

Contents

Abstract in Chinese.....	I
Abstract in English	III
Chapter 1 introduction	1
§1.1 Summarization of nanomedicine	1
§1.2 Summarization of photothermal nanomaterials	2
§1.2.1 Metal nanoparticles	3
§1.2.2 The application in cancer therapy	8
§1.3 Summarization of hollow-structured mesoporous materials.....	10
§1.3.1 Chemical synthesis of HMMs.....	12
§1.3.1.1 Soft-templating route	12
§1.3.1.2 Hard-templating route	14
§1.3.1.3 Aerosol-templating and template-free routes.....	15
§1.3.2 Functionalization and applications of HMMs in biomedicine.....	15
§1.4 Objectives and contents of this dissertation	18
§1.5 References	19
Chapter 2 Silica coated Pd nanosheets for photothermal therapy	36
§2.1 Introduction.....	36
§2.2 Experimental section	37
§2.2.1 Reagents and instruments	37
§2.2.1.1 Regents.....	37
§2.2.1.2 Instruments.....	37
§2.2.2 Experimental procedures	38
§2.2.2.1 Synthesis of 41 nm Pd nanosheets	38
§2.2.2.2 Synthesis of Pd@silica (SPNS)	38
§2.2.2.3 Photothermal conversion experiments of SPNS	39
§2.2.2.4 Synthesis of FITC-doped SPNS.....	39
§2.2.2.5 Modification of FSPNS with APTES	39
§2.2.2.6 Quantitative determination of endocytosis	39
§2.2.2.7 Measurement of endocytosis of FSPNS-NH ₂	39
§2.2.2.8 Cell culture <i>in vitro</i> toxicity testing	40
§2.2.2.9 Photothermal therapy <i>in vitro</i>	40
§2.3 Results and discussion	41
§2.3.1 Shape characterization of SPNS	41
§2.3.2 NIR absorption and photothermal conversion property.....	43
§2.3.3 Enhanced endocytosis.....	44

§2.3.4	Anticancer therapy <i>in vitro</i>	48
§2.4	Conclusions	52
§2.5	References	53

Chapter 3 Ultrasmall Pd nanosheets for photothermal cancer

therapy	55	
§3.1	Introduction	55
§3.2	Experimental section	56
§3.2.1	Reagents and instruments	56
§3.2.1.1	Reagents	56
§3.2.1.2	Instruments.....	57
§3.2.2	Experimental procedures	57
§3.2.2.1	Synthesis of 4.4 nm Pd nanosheets	57
§3.2.2.2	Photothermal therapy <i>in vitro</i>	57
§3.2.2.3	The blood circulation and biodistribution.....	58
§3.2.2.4	Photothermal therapy <i>in vivo</i>	58
§3.2.2.5	Excretion from kidneys.....	59
§3.3	Results and discussion	60
§3.3.1	Shape characterization of small Pd nanosheets	60
§3.3.2	Shape characterization of ultrasmall Pd nanosheets	61
§2.3.3	NIR absorption and photothermal conversion property.....	61
§3.3.4	Anticancer therapy <i>in vitro</i>	62
§3.3.5	The blood circulation and biodistribution.....	63
§3.3.6	<i>In vivo</i> photothermal conversion.....	66
§3.3.7	Photothermal therapy <i>in vivo</i>	67
§3.3.8	Excretion <i>in vivo</i>	69
§3.3.9	Biosafety <i>in vivo</i>	70
§3.4	Conclusions	72
§3.5	References	72

Chapter 4 Synergistic nanosystem for Combined Doxorubicin and

Photothermal Treatments	76	
§4.1	Introduction	76
§4.2	Experimental section	77
§4.2.1	Reagents and instruments	77
§4.2.1.2	Instruments.....	78
§4.2.2	Experimental procedures	78
§4.2.2.1	Synthesis of 4.4 nm Pd nanosheets (SPNS)	78
§4.2.2.2	Loading and release of DOX	79
§4.2.2.3	Cell culture and synergistic anticancer <i>in vitro</i>	79
§4.2.2.4	The blood circulation and biodistribution.....	80
§4.2.2.5	Photothermal therapy <i>in vivo</i>	80

§4.2.2.6	Excretion from kidneys.....	81
§4.3	Results and discussion	81
§4.3.1	Shape characterization of ultrasmall Pd nanosheets	81
§4.3.2	NIR absorption and photothermal conversion property	82
§4.3.3	Chemotherapy <i>in vitro</i>	82
§4.3.4	Photothermal therapy <i>in vitro</i>	84
§4.3.5	The blood circulation and biodistribution.....	86
§4.3.6	<i>In vivo</i> photothermal conversion.....	88
§4.3.7	Photothermal therapy <i>in vivo</i>	90
§4.3.8	Excretion <i>in vivo</i>	92
§4.3.9	Biosafety <i>in vivo</i>	93
§4.4	Conclusions.....	95
§4.5	References.....	95
Chapter 5 Hollow mesoporous zirconia nanocapsules for drug		
delivery.....		99
§5.1	Introduction.....	99
§5.2	Experimental section	100
§5.2.1	Reagents and instruments	100
§5.2.1.1	Reagents.....	100
§5.2.1.2	Instruments.....	100
§5.2.2	Experimental procedures	101
§5.2.2.1	Synthesis of <i>hm-ZrO₂</i>	101
§5.2.2.2	Loading and release of DOX	102
§5.2.2.3	Cell culture <i>in vitro</i> toxicity testing	102
§5.3	Results and discussion	103
§5.3.1	Shape characterization of <i>hm-ZrO₂</i>	103
§5.3.2	Structure characterization of <i>hm-ZrO₂</i>	104
§5.3.3	Loading and release of DOX	105
§5.3.4	Cancer therapy <i>in vitro</i>	109
§5.4	Conclusions.....	113
§5.5	References.....	115
Chapter 6 Summary and Outlook.....		119
§6.1	Summary.....	119
§6.2	Outlook.....	120
Appendix: Publications during Ph. D study.....		122
Acknowledgements		125

摘要

随着研究人员将纳米颗粒应用于医学研究，纳米医学得到了快速的发展，它在抗癌医疗领域带来了翻天覆地的变化。纳米医学一方面使传统抗癌手段的抗癌效能得到了有效地提高，另一方面也孕育出许多全新的抗癌手段。尽管人们在抗癌纳米颗粒的制备上已经取得了许多丰硕的成果，但是在新型纳米颗粒的制备和功能化方面依然纯在着巨大的发展空间。本论文的主要工作主要集中在对新型光热纳米颗粒和多功能中空介孔纳米颗粒的制备方面，具体内容如下：

第一章：简要综述了光热纳米颗粒和多功能中空介孔纳米颗粒的研究进展。并阐述了本论文的选题依据和研究内容。

第二章：我们通过用二氧化硅对钽纳米片进行包裹，成功地提高了细胞对纳米颗粒的吞噬能力。由于纳米颗粒厚度的增加和表面电荷正电化的修饰我们将细胞对钽纳米的吞噬能力提高了 10 倍。由于细胞对纳米颗粒的吞入量得到了有效的提升，此钽纳米片的光热抗癌效能得到了有效的提高，使其成为一种极具临床应用价值的光热抗癌颗粒。

第三章：我们成功地合成出一种超小的钽纳米片并将其应用于体内光热疗实验。这种超小的钽纳米片对近红外光具有很强的吸收能力，对 808 纳米的近红外光的光热转化效率高达 52.0%。经过谷胱甘肽的表面修饰之后，此超小的钽纳米片表现出很长的血液循环时间和很高的肿瘤富集量。在近红外激光的照射下可以高效地清除肿瘤。更为重要的是由于此纳米颗粒具有极小的尺寸，所有它可以通过肾脏进入尿液而被高效地排除体外。此超小钽纳米片表现出极高的临床应用价值。

第四章：我们将超小钽纳米片与抗癌药物阿霉素相结合发展出一种高效的联合抗癌体系。超小的钽纳米片既是光热抗癌材料也是药物载体。此联合抗癌体系表现出很强的协同效应，光热效应和化疗效果都得到了明显的增强。体内外的试

验中都表明,阿霉素的存在有效地促进了复合纳米颗粒在肿瘤部位的富集和癌细胞对其的内吞,同时我们也实现了利用更低的功率彻底清除肿瘤的目标。另外更重要的是,此纳米颗粒同样可以随尿液被高效地排出体外,生物安全性得到了进一步的保障,表现出极高的临床应用价值。

第五章: 我们成功地制备了中空的二氧化锆纳米胶囊并将其应用为药物载体。此药物载体具有很高的生物兼容性。现对于正常细胞,由于此纳米颗粒在癌细胞内对药物具有更快的释放速度,所以对癌细胞表现出更强的毒性。相对于游离的阿霉素,负载在中空介孔二氧化锆上的阿霉素对癌细胞的毒性要比对正常细胞的毒性要大,所以中空介孔二氧化锆非常适合作为药物载体对其加以应用。

第六章: 针对本论文所进行的研究工作进行了总结,并提出了无机纳米材料表面界面控制的挑战和展望。

关键词: 无机纳米颗粒; 光热疗; 功能化; 抗癌治疗; 药物传输

Abstract

Nanomedicines, for the medical applications of nanotechnology, are promising candidates for anticancer therapy. The nanomedicines are changing the future of therapy. New nanoparticles constantly improve the effect of the original anticancer approach and create new approach. Though many efforts have been devoted to develop new nanomaterials for cancer therapy, there is still plenty of room in study on nanomaterials' preparation and multifunction. Therefore, we made research efforts on the preparation of new photothermal nanomaterials and multifunctional hollow mesoporous nanoparticles, and main results are showed as follows:

Chapter 1. Recent research progress of photothermal nanomaterials and multifunctional hollow mesoporous nanoparticles has been briefly reviewed. Also demonstrated are my research significance and research project during the Ph.D period.

Chapter 2. We have coated silica on ultrathin Pd nanosheets to promote the uptake of Pd nanosheets by cancer cells. Together with the increased thickness of the nanosheets by silica coating, the positive charge induced by surface functionalization increased the Pd uptake by over ten times. The enhanced uptake significantly promoted the photothermal cell-killing efficacy of the functionalized silica-coated Pd nanosheets, making them promising for *in vivo* applications.

Chapter 3. We have demonstrated the facile synthesis of ultra-small Pd nanosheets for efficient *in vivo* photothermal cancer therapy. The as-prepared ultra-small Pd nanosheets have strong optical absorption in the NIR region and high photothermal conversion efficiency (52.0%) at 808 nm. Surface modification with GSH allows the nanosheets to exhibit prolonged blood circulation and high accumulation in tumors. Upon 808 nm NIR irradiation, the tumors can be completely ablated. More importantly, with the size below the renal filtration limit (<10 nm), the GSHylated Pd nanosheets can be cleared from body through the renal excretion route and into urine. Our work suggests that ultra-small Pd nanosheets have great potential

in photothermal cancer therapy.

Chapter 4. We have developed an effective cancer therapeutic nanosystem based on plasmonic ultrasmall Pd nanosheets. With the Pd nanosheets as both the NIR photothermal agent and drug carriers for anticancer chemical drug (DOX), the developed nanosystem exhibited a significant synergistic effect to enhance both chemotherapy of the chemical drugs and the photothermal therapy of the drug carriers. *In vitro* and *in vivo* studies clearly demonstrated that the loading of DOX improved the accumulation of Pd nanosheets in tumors and also optimized their uptakes by cancer cells. The synergistic effect allowed lower the dose of chemical drugs and the power of NIR laser for effective anticancer therapy. More importantly, due to the ultra-small size, the developed Pd-DOX-GSH hybrid nanoparticles were readily cleared from body through the renal excretion route and into urine. The chemo-photothermal therapeutic nanosystem demonstrated in this work hold great potentials for clinical applications.

Chapter 5. We have demonstrated hollow mesoporous zirconia nanocapsules as effective carriers offering high-loading of cancer drugs. While the inorganic nanocapsules alone are highly biocompatible, hm-ZrO₂ loaded with DOX exhibit faster DOX release and therefore a higher cytotoxicity for cancer cells than for normal cells. In contrast to free DOX, hm-ZrO₂ loaded DOX are more toxic to cancer cells but less toxic to normal cells, which makes them promising candidates for cancer drug carriers.

Chapter 6. Finally, conclusions and prospects are given to pose the challenges of preparation and multifunction of nanomaterials for anticancer therapy.

Keywords: Inorganic nanoparticles; Photothermal therapy; Multifunction; Cancer therapy; Drug delivery

第一章 绪论

§ 1.1 纳米材料应用于抗癌医学研究概述

癌症严重地威胁着人类的健康，如今全球每年大约有 800 万人死于癌症，仅中国每年就有约 200 万人死于癌症，自 1997 年以来癌症已经成为中国人的第一死因。为了攻克癌症，长期以来人们都在坚持不懈地与之斗争。发展至今医药工作者们，已经成功地开发出手术、化疗、放疗、干扰疗法、基因疗法等多种抗癌手段。经过若干年的发展，人们在这些抗癌领域都取得了长足的进步，对癌症的治愈率得到了不断地提高。但是无论哪种抗癌手段都还远未达到令人满意的程度，都存在着这样或那样的不足和缺陷。比如说，手术疗法，更适合于早期癌症的治疗，对于晚期癌症和易于扩散的癌症则会显得力不从心了，而化疗、放疗等治疗手段则表现出很强的毒副作用，病人在接受治疗的过程中，生存质量明显下降，往往要承受不亚于病痛本身的痛苦。

近些年来，由于新型材料，尤其是纳米材料的不断涌现，可以说极大地推动了抗癌研究的发展，为人类能够真正地攻克癌症带来了新的契机^[1-32]。总得来说，纳米材料的出现在抗癌领域引发的重大变革可以归纳为两个方面：第一，由于一些新型纳米材料的出现，科研人员们可以借助其特有属性而开发出一些全新的抗癌手段。比如近红外光热疗，就是一种伴随着近红外光热纳米颗粒的出现而新近被开发出来的一种全新的抗癌手段，由于其具备无创、毒副作用小等优良的特性而日益受到了人们的广泛关注。第二，一些新型纳米材料的出现，使得人们可以将其特殊的性能与传统的抗癌手段相结合，不但使传统的抗癌手段更加高效而且也使其本身的不足得到了有效地弥补。比如说，将一些具有中空介孔结构的纳米颗粒应用于对化疗药物的运送，不但使其抗癌效率大大提高，也有效地抑制了其毒副作用的发生，使传统的化疗手段得到了有效地优化。

本章将从光热纳米材料和中空介孔无机纳米材料的基本性质出发，对其结构、组成和制备等进行简要的介绍，并对目前这一方面的相关研究进行简要的综述，最后提出本论文的选题依据和研究内容

§ 1.2 光热纳米材料概述

人体温度的升高也被称作是发热反应，这是人体与生俱来的一种应激反应，当人体感染细菌或者病毒后，往往就会引起人体的发热反应。事实上，在上千年前人们就开始有意识的利用发热来治疗疾病。古希腊药师 Parmenides 曾经说过，“给我能使人发烧的能力，我将治愈所有疾病。”在目前的医药实践中，发热现象主要分为以下两类：第一种是中等程度的发热，这时温度一般低于 44 摄氏度，这会造成组织的坏死，第二种是热烧蚀，利用高于 55 摄氏度的高温将细胞烧蚀掉。中等程度的发热现象可以是局部的也可以是周身的，而热烧蚀这样的高温只能局部的。

到目前为止，可用来产生高温的方法主要有高频波、超声波或者是近红外光。其中利用近红外光对局部机体加热的方法具有很大优势，因为水、色素以及蛋白质对这个区域的光吸收能力非常弱。这就意味着 700nm 到 900nm 或者在 1050nm 左右的近红外光可以更加容易地穿透皮肤进入机体内部 (Fig.1-1)。

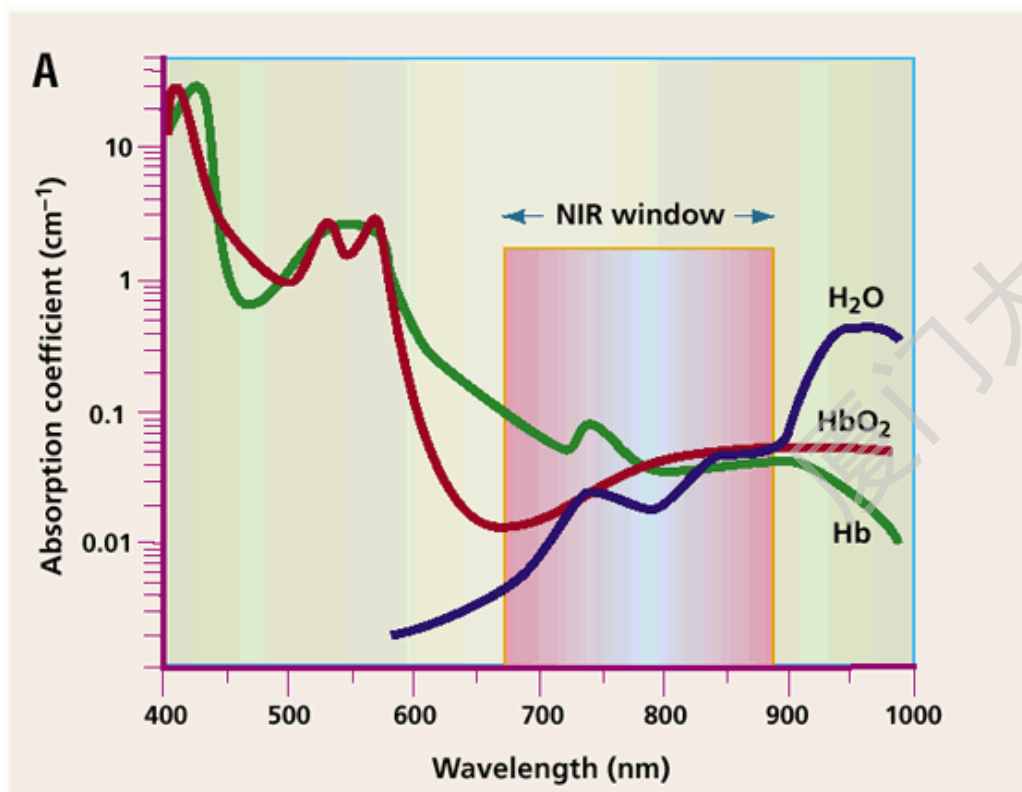


Fig.1-1. Absorption minima of water and hemoglobin from 700–900nm (a) and absorption minima of water to show the range from 1000–1100nm^[33].

近些年来,人们陆续开发出了一种具有光热转化性能的纳米材料即光热纳米材料,这种纳米材料可以有效地吸收外部照射过来的光并将其转化为热。逐渐的研究人员们通过对纳米颗粒的不断优化,现在已经开发出许多对近红外光具有极强吸收能力的光热纳米颗粒,通过将近红外光热纳米颗粒和近红外光有机地结合起来,人们逐渐的发展出了近红外光热疗。近红外光热疗这些年来发展势头极为迅猛,这是一种在外部近红外激光的照射下,通过近红外纳米颗粒将其入射的近红外光高效地转化为局部高温,从而杀死癌细胞的一种全新的抗癌疗法。

发展至今,人们已经成功地开发出了不少的光热纳米材料,其中主要的光热纳米材料依据其材料基本可以分为,金属和非金属这两大类,接下来我们就将对这两类中,比较典型的光热纳米材料和他们在光热抗癌中的应用做一个简要的介绍。

§ 1.2.1 光热金属纳米颗粒

一些球状、壳状、棒状的金属纳米颗粒,经过研究人员的精心调控之后,可以在 700-1100 的近红外区表现出很强的吸收能力。为了获得更好的光热抗癌效果,在研究人员的不断努力下,开发出了许多尺寸和形貌各异的纳米颗粒。

这些金属纳米颗粒,比如说金或银,由于其形貌和尺寸的不同会表现出各种各样的颜色(Fig.1-2)^[34, 35],这都是由于在其表面发生的等离子体共振(SPR)而引起的。表面等离子体共振的意思就是,当纳米颗粒表面的等离子体受部位电磁场照射时,就会加强其振荡,当等离子体振荡的频率和外部电磁场的频率相同时就会发生共振。其发生原理如 Fig.1-3 所示。



Fig.1-2. Visual demonstration of the tunability of metal nanoshells^[34, 35].

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