

纳米金胶体的制备及其对血液光吸收性的影响

邢林庄¹ 李 东¹ 陈 斌¹ 吴文娟¹ 王国祥^{1,2}

¹西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 陕西 西安 710049

²阿克伦大学机械工程系, 美国 阿克伦 44325

摘要 纳米金是指粒径介于1~100 nm之间的金粒子,具有良好的生物兼容性、结构稳定性和光学性质,可用于强化激光治疗血管性皮肤病的光吸收。采用柠檬酸钠还原法制备纳米金胶体,研究了温度、加热时间、柠檬酸钠还原剂用量等因素对其粒径和吸收光谱的影响,得到了制备纳米金胶体的最佳条件。取制备得到的粒径为16 nm左右的纳米金胶体与血液混合后稀释,研究了胶体金对血液光吸收性能的影响及其随温度的变化规律。结果表明,加入胶体金后血液的光吸收性能随着加入体积比的增大而增强,当胶体金与血液的体积比为5时,血液在545 nm和581 nm处的吸收峰值分别提高了1.33倍和1.09倍。在变温条件下,胶体金不会对血液的动态吸收特性产生影响。

关键词 医用光学; 纳米金; 血液; 吸收峰波长

中图分类号 R318.51; R758.5 **文献标识码** A

doi: 10.3788/CJL201542.0604002

Preparation of Nano Gold Colloid and Its Effect on Blood Light Absorptivity

Xing Linzhuang¹ Li Dong¹ Chen Bin¹ Wu Wenjuan¹ Wang Guoxiang^{1,2}

¹State Key Laboratory of Multiphase Flow, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049, China

²Department of Mechanical Engineering, University of Akron, Akron 44325, America

Abstract Nano gold refers to the particles with size between 1~100 nm, it can be used to strengthen the light absorption of blood in the process of laser treatment of vascular dermatosis because of its good biological compatibility, structural stability and optical properties. The gold colloid is prepared with sodium citrate as reducing agent. Effect of temperature, reaction time, sodium citrate dose on the size and absorption spectra of gold colloid is studied. Thus the best condition for preparing gold colloid is obtained. After the gold colloid with size of 16 nm is prepared, it is added to blood to study the effect of colloidal gold on the properties of light absorption of blood as a function of temperature. The results show that the absorption of blood increases with the increase of volume ratio. Blood absorption peak values at 545 nm and 581 nm increase by 1.33 times and 1.09 times respectively when the ratio is 5. Under the condition of variable temperatures, colloidal gold does not affect the dynamic absorption characteristics of blood.

Key words medical optics; gold nanoparticle; blood; absorption peak wavelength

OCIS codes 170.1610; 170.1870; 160.4236; 350.4990

1 引 言

纳米金是指直径介于1~100 nm的微小金颗粒,将金盐还原后形成的纳米金颗粒溶液也被称为胶体金或金溶胶。纳米金具有良好的稳定性、小尺寸效应、表面效应、光学效应以及独特的生物亲和性,在工业催化、生物医药、生物分析化学、食品安全快速检测等领域具有广泛的应用^[1]。目前,已有很多学者对纳米金的制

收稿日期: 2015-01-09; 收到修改稿日期: 2015-03-09

基金项目: 国家自然科学基金(51336006)、陕西省国际科技合作与交流计划(2013KW30-05)、中央高校基本科研业务费专项资金

作者简介: 邢林庄(1989—),男,博士研究生,主要从事激光生物医学方面的研究。E-mail: xinglinzhuang1@stu.xjtu.edu.cn

导师简介: 陈 斌(1971—),男,博士,教授,主要从事生物传热传质及多相流数值模拟等方面的研究。

E-mail: chenbin@mail.xjtu.edu.cn(通信联系人)

备及其在生物医药等方面的应用开展了相关的研究。范拓等^[1]合成了一种基于碳纳米管和金纳米颗粒的复合材料,并将其作为表面增强拉曼散射基底进行了拉曼测试,结果表明这种新型复合材料可用于增强拉曼光谱信号。王飞等^[3]实现了金纳米颗粒的有序组装,使得表面组装成功的金颗粒样品吸收峰出现大幅度的红移,拓展了金颗粒的应用范围。谭信辉等^[4]提出了一种制备大面积表面金属光栅的方法,并成功合成了具有一定耦合效率的表面等离子激元耦合光栅,使得其表面等离子激发角接近理论值。李英等^[5]在亚微米光纤的特定位置沉积金纳米棒,利用金纳米棒的强共振吸收和光热效应,可将其用于微米颗粒的定点输送。Mukherjee等^[6]利用纳米金的生物相容性及其独特的生化性质将其作为载体对乳腺癌进行靶向治疗,效果显著。SunghoKo等^[7]将纳米金粒子组装在具有等离子共振性质的金芯片表面,可以提高传感器的灵敏度,用于临床诊断或者环境监测。刘志远等^[8]采用新型还原剂多巴胺合成金颗粒作为表面增强拉曼散射基底,发展了一种现场快速检测测草快的方法,相对于传统的气相色谱和液相色谱分析方法,该方法耗时短、操作简单、信号增强效果显著。杨玉东等^[9]对不同尺寸金纳米棒的光学性质作了理论上的定性分析,并简要综述了金纳米棒在生物分子检测、癌症诊断和光热治疗方面的应用,提出了金纳米材料在应用方面存在的问题,具有指导意义。张兴坊等^[10]利用 Mie 理论,研究了金纳米球壳结构的尺寸对表面等离子共振峰位、强度的影响,分析了其吸收和散射特性的变化规律,为金纳米球壳的合成提供了理论上的指导。

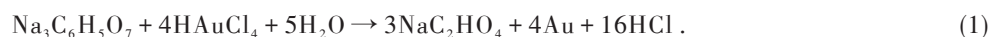
作为典型的血管性皮肤病,葡萄酒色斑(PWS)是一种由真皮内毛细血管膨胀引起的先天性血管畸形^[11]。PWS多见于脸部,尤其好发于三叉神经分布范围。目前PWS最有效的临床方法是激光治疗,其原理是Anderson等^[12]提出的选择性光热理论。根据该理论,激光皮肤手术中通过合理选择波长、脉宽及能量密度等参数可以达到选择性损伤皮下病变血管的治疗目的。但是由于血液对激光的响应程度受到各种因素的影响,实际治疗过程中血液的光吸收性较弱,导致激光治疗皮肤病的治愈率低于20%^[13]。

在激光的激发下,纳米金粒子导带电子会发生集体共振而引起对激发光的强吸收,通常称为表面等离子共振吸收(SPR)^[7],吸收带的峰位位置和宽度与纳米金粒子的形貌、尺寸紧密相关^[10]。这种通过表面等离子共振吸收特性有效吸收相匹配的激发光能量而产生局部放热的现象称为纳米金的光热效应^[14]。它可以使金颗粒能够接受特定波长光的激发,对生物体内部进行局部加热,导致靶向蛋白质变性、细胞死亡,从而将对周围正常组织的影响控制在可接受的范围内^[9]。利用纳米金这一独特的光热性质,通过向静脉血管注射微量的胶体金溶液,有望改善PWS激光治疗过程中血液光吸收较弱的问题,以改善和增强临床疗效。

纳米金主要包括纳米金颗粒和纳米金棒,常见的制备方法有物理法、化学法和生物合成法等。物理法包括激光消融法、真空蒸镀法、软着陆法等^[15],化学方法包括化学还原法^[8]、电化学法、晶种法等,生物合成法包括利用微生物以及植物合成纳米金的方法^[16]。物理法过程不可控,较难得到分散均匀的颗粒;生物合成法合成成本低,操作简便,适合大规模生产,但耗时较长;化学法设备简单,容易操作,制备时间短,能方便地制备各种不同粒径的纳米金。化学还原法中,柠檬酸钠还原性适中,兼具稳定剂的作用,制备得到的纳米金颗粒分散较均匀,本文采用柠檬酸钠化学还原法^[17]制备纳米金颗粒胶体,利用光谱仪和透射电子显微镜(TEM)测量其尺寸和光吸收性,研究了温度、加热时间、柠檬酸钠还原剂用量等因素对其粒径和吸收光谱的影响,以及最大吸收峰波长与颗粒粒径之间的关系。将制备得到的粒径为16 nm左右的胶体金和血液以1:1~5:1的体积比进行配比后稀释,研究变温条件下胶体金对血液光吸收性的影响。

2 胶体金的制备和表征

柠檬酸钠($\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7$)带有一个具有还原性的羟基,可以将氯金酸(HAuCl_4)中的金离子还原成单质金颗粒,分散于溶液体系中形成胶体金。柠檬酸钠还原法制备胶体金的反应方程式为



取100 mL氯金酸(质量分数为0.01%)用恒温磁力加热搅拌器加热到沸腾,将质量分数为1%的柠檬酸钠加入沸腾的氯金酸中。继续加热待反应液变为酒红色,停止加热,继续搅拌15 min后自然冷却至室温,定容至100 mL,4℃冷藏备用。

胶体金的形貌尺寸可以通过透射电子显微镜(JEOL2100,日本电子株式会社)获得。取10 mL胶体金进行离心,用蒸馏水重悬之后继续离心。重复三次后移除上层清液得到下层液,取少量滴在超薄碳支持膜上

风干,在透射电子显微镜下观测其形貌和尺寸分布。胶体金的吸收光谱由图1所示的光谱仪系统测量,该系统主要由光谱仪(HR400CG-UV-NIR,中国)、比色皿及其支架、光纤、光源(LS-1 卤钨灯)组成,测量范围为400~1200 nm。

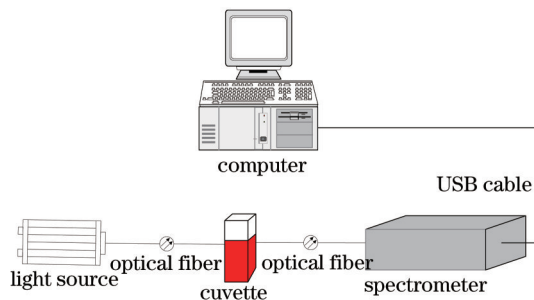


图1 胶体金吸收光谱测量系统

Fig.1 Schematic of colloidal gold absorption spectrum measurement system

3 胶体金形成的影响因素

3.1 柠檬酸钠还原剂用量的影响

固定反应温度为 100 ℃,加热时间为 10 min,氯金酸用量为 100 mL,加入不同量 1%(质量分数)柠檬酸钠溶液得到的胶体金最大吸收峰波长和尺寸如表 1 所示。定义 $W_{1/2}$ 为半峰宽度,即最大吸收峰波长与最小吸收峰波长(靠近 400 nm 处)之间的距离。

表 1 不同还原剂用量对胶体金的影响

Table 1 Impact of different reducing agent dose on gold colloid

Sodium citrate /mL	λ_{\max} /nm	λ_{\min} /nm	$W_{1/2}$ /nm	Size /nm
1.0	529.88	446.58	83.30	23.6
2.0	524.18	428.51	95.67	18.6
3.0	523.92	435.32	88.60	17.8
4.0	522.37	432.17	90.20	16.7
5.0	523.92	443.96	79.96	18.4
6.0	524.96	436.37	88.59	19.4

从表 1 可以看出,柠檬酸钠还原剂用量小于 4 mL 时,随着还原剂用量的增加,金颗粒的平均粒径减小,最大吸收峰波长也减小;柠檬酸钠还原剂用量大于 4 mL 时,金颗粒的平均粒径随着还原剂用量的增加而增大,最大吸收峰波长随之变大。这是因为还原剂用量较小时,纳米金的成核速率大于生长速率,反应主要以成核为主,故金颗粒粒径会减小;而当还原剂用量较大时,生长速率大于成核速率,金颗粒粒径的变化趋势正好相反。

通过透射电子显微镜测得的金颗粒形貌如图 2 所示,图中(a1)~(f1)所示为金颗粒的 TEM 图,(a2)~(f2)所示为粒径分布直方图。根据 TEM 图测量得到金颗粒的粒径,利用 GaussAMP 函数得到粒径分布的拟合曲线(图中蓝色曲线),图中横坐标为粒径分布区间,纵坐标为粒径尺寸落在该区间的概率。从图 2 中可以看出,柠檬酸钠用量为 1~2 mL 时,制备得到的金颗粒粒径偏大,且颗粒尺寸分布不规则,部分颗粒呈椭圆形或有轻微团聚[图 2(a1)、(b1)];当柠檬酸钠加入量大于 2 mL 时,得到的金颗粒的粒径分布较为均匀[图 2(c1)~(f1)]。从表 1 和图 2 可以看出,柠檬酸钠还原剂用量大于 1 mL 时,若 $W_{1/2} > 90$ nm,则粒径分布不太均匀,颗粒中会有不规则形状出现(如 2 mL 时得到的金颗粒); $W_{1/2} < 90$ nm 时,粒径的分布较为均匀,据此可以从胶体金的吸收光谱图中粗略地观测金颗粒的尺寸分布情况,即峰宽越小,粒径分布越均匀。

还原剂用量与胶体金最大吸收峰波长之间的关系如图 3 所示。从图 3 中可以看出,还原剂用量在 4 mL 以下时二者呈负相关,而在 4 mL 以上时呈正相关;4 mL 用量下制备得到的胶体金吸收峰最小,粒径最小,分散较均匀。实验发现,当柠檬酸钠还原剂用量大于 2 mL 时,得到的胶体金是酒红色的透明胶体,通过透射电子显微镜观测到金颗粒分布较为均匀[图 2(f1),柠檬酸钠还原剂用量为 6 mL];而还原剂用量小于 2 mL 时,得到的胶体金为稍显浑浊的紫蓝色或紫红色胶体,通过透射电子显微镜观察到金颗粒分布不均匀,颗粒中部

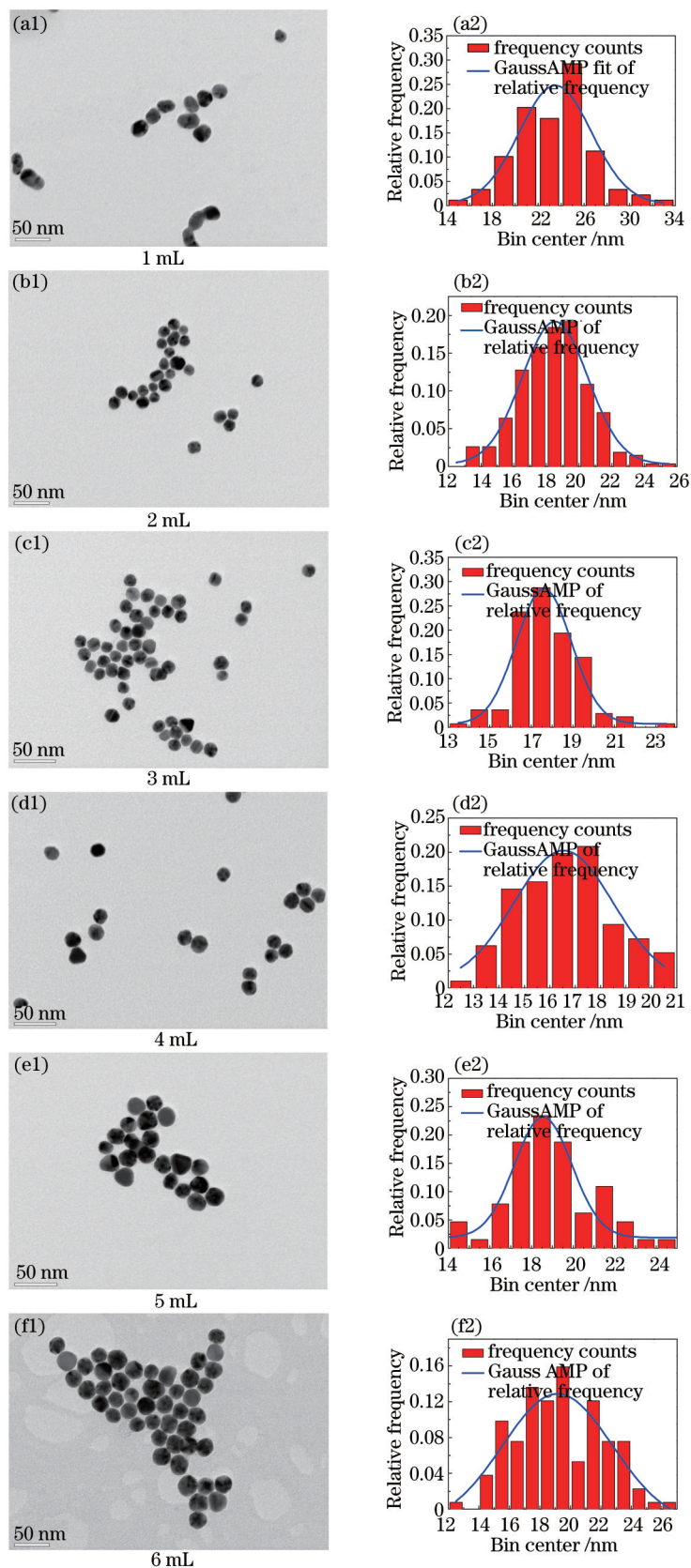


图 2 (a1)~(f1) 胶体金 TEM 图; (a2)~(f2) 粒径分布图

Fig.2 (a1)~(f1) TEM images of gold colloid; (a2)~(f2) distribution of particle size

分呈现不规则形状[图 2(a1), 柠檬酸钠还原剂用量为 1 mL]。这是由于还原剂用量过少时,生成的金颗粒作为其后续生长的种子,导致金颗粒分布不均匀。

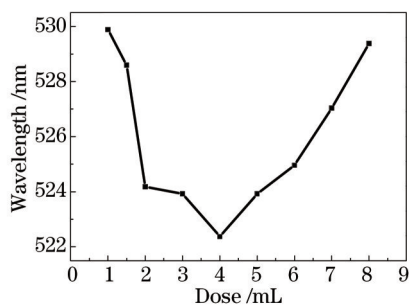


图3 还原剂用量与最大吸收峰波长之间的关系

Fig.3 Relationship between sodium citrate dose and wavelength of maximum absorbance

3.2 温度的影响

温度对纳米金的制备有重要影响,主要影响纳米金的成核和生长以及最后形貌的确定。固定加热时间为10 min,氯金酸用量为100 mL,柠檬酸钠还原剂用量为4 mL,控制加热温度依次为60 °C、70 °C、80 °C、90 °C和100 °C。测量制备得到的胶体金的吸收光谱,结果如图4所示。从图4中可以看出,随着加热温度的升高,胶体金的吸光度随之增大,峰宽变小,粒子的分散更为均匀。随着温度的升高,最大吸收峰位置出现蓝移,即最大吸收峰波长向短波方向移动,表明金颗粒粒径减小,反应更加完全。实验最佳的加热温度选择为100 °C。

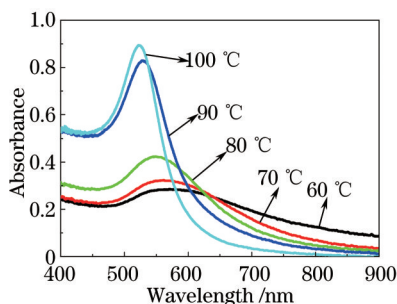


图4 温度对胶体金制备的影响

Fig.4 Impact of temperature on preparation of gold colloid

3.3 加热时间的影响

固定加热温度为100 °C,氯金酸用量为100 mL,柠檬酸钠还原剂用量为4 mL,研究加热时间对胶体金制备的影响。实验表明当加热时间小于5 min时,反应液体呈紫红色,此时生成的金颗粒粒径过大;随着加热时间的延长,体系的颜色逐渐变为酒红色;当加热时间大于10 min时,反应液体呈酒红色,此后体系的颜色随加热时间的延长不再发生变化,金颗粒粒径分布较为均匀。但随着加热时间的增大,反应液体体积减小,在反应器壁上容易形成较多的干点,造成金颗粒的损失。因此,最佳的加热时间为10 min。

3.4 粒径与最大吸收峰波长的关系

柠檬酸钠还原剂的用量对胶体金颗粒的直径有较大影响,从而影响金颗粒的最大吸收峰波长。纳米金颗粒的直径与其最大吸收峰波长的关系如图5所示。可以看出,两者之间存在正相关的关系,即随着金颗粒粒径的增大,最大吸收峰波长随之变大。

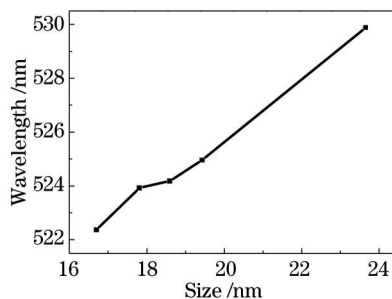


图5 金颗粒粒径与最大吸收峰波长之间的关系

Fig.5 Relationship between particle size and wavelength of maximum absorbance

4 胶体金对血液光吸收性的影响

实验用血液样本来自于西安交通大学医学院动物实验中心提供的SD(Sprague-Dawley)大鼠(100~120 g),取得血液后加入0.109 mol/L柠檬酸钠作为抗凝剂,抗凝剂与全血的比例为1:9。为了使血液样品具有一定的透明度以便于测量,将血液和水以1:200的比例稀释。实验过程中,使用4 mL柠檬酸钠还原剂还原100 mL氯金酸,得到最大吸收峰波长为522 nm、金颗粒粒径分布均匀且平均尺寸为16.7 nm、浓度为0.035 $\mu\text{mol/L}$ 的胶体金,将血液和胶体金以1:1、1:2、1:3、1:4、1:5的体积比配比。为了获得血液的光学吸收特性随温度的变化结果,利用温控系统(Quantum Northwest Inc., 美国,精度为 $\pm 0.01\text{ }^\circ\text{C}$)每间隔 $10\text{ }^\circ\text{C}$ 对血液的光吸收特性进行测量,得到血液随温度变化的动态吸收光谱规律。

图6所示为温度对胶体金光吸收性的影响,随着温度的升高,胶体金的最大吸收峰位置没有发生明显的变化,吸光度略有下降,表明在升温过程中胶体金的光吸收性能没有发生改变,光吸收性质不随温度的变化而变化。

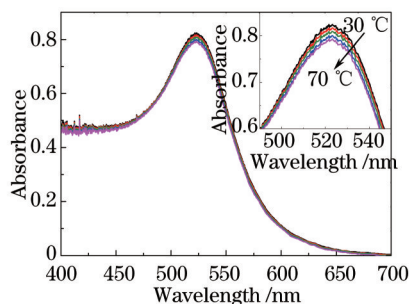


图6 变温过程中胶体金的吸收光谱

Fig.6 Absorption spectra of gold colloid during temperature variation

血液在可见光范围内的光吸收特性随温度的变化如图7所示,图7(a)为升温过程,图7(b)为降温过程。从图7(a)可以看出,血液在波长为545 nm以及581 nm附近有两个吸收峰,这也是临床治疗葡萄酒色斑广泛采用532、585及595 nm波长激光的重要原因。在 $65\text{ }^\circ\text{C}$ 以下,血液的光吸收特性变化不显著,545 nm及581 nm处的吸收峰峰值相当,吸光度曲线形状无明显变化,吸光度随着温度的升高略有下降;升温至 $70\text{ }^\circ\text{C}$ 时,吸光度曲线发生变化,在545 nm和581 nm处的吸收峰值开始增大,且在545 nm处的吸收峰值开始大于581 nm处的吸收峰值,同时630 nm处的吸收峰值有了明显的升高,血液开始发生蛋白质变性;升高至 $72\text{ }^\circ\text{C}$ 时,血液的吸光度相比于 $70\text{ }^\circ\text{C}$ 时有大幅增加,两个吸收峰接近平缓,此时血液的蛋白质基本完全变性; $75\text{ }^\circ\text{C}$ 及以后,血液的两个吸收峰消失,曲线形状不再变化,吸光度略有增加,蛋白质变性完全。从图7(b)可以看出,降温过程中血液的吸收曲线形状基本没有变化,吸光度略有增加,可见蛋白质的变性是一个不可逆的过程。

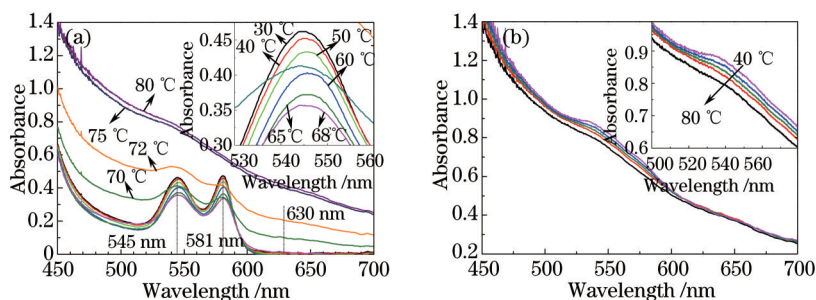


图7 变温过程中血液的动态吸收光谱。(a) 升温过程; (b) 降温过程

Fig.7 Dynamic absorption spectra of blood at different temperatures. (a) Heating process; (b) cooling process

为了研究胶体金对血液光吸收特性的影响,将制备得到的浓度为 $0.035\text{ }\mu\text{mol/L}$ 、粒径为16.7 nm、吸收峰位置在522 nm处的胶体金与血液以1:1、2:1、3:1、4:1、5:1的比例配比后稀释,测量常温下胶体金对血液光吸收特性的影响,结果如图8所示。图8(a)为血液、胶体金及 $R=1\sim 5$ (R 为胶体金和血液的体积比)时血液的吸收光谱,图8(b)为 $R=0\sim 5$ 时血液的两个吸收峰位置吸光度的变化情况。从图8可以看出,胶体金可以明显增

强血液的光吸收性。随着两者体积比的增加,吸收峰值基本呈线性增加。当 $R=5$ 时,两个吸收峰位置处的吸光度与没有加入胶体金相比分别增大了1.33倍和1.09倍。加入胶体金后,血液的光吸收曲线形状没有发生明显的变化。由于胶体金的吸收峰位置(522 nm)接近血液的吸收峰位置(545 nm),且在581 nm处胶体金的吸收峰值远小于该处的血液吸收峰,故加入胶体金后,血液在545 nm处的吸收峰值明显大于581 nm处的吸收峰值。581 nm处的吸收峰值在加入胶体金后略有下降,但随着胶体金量的增大,其吸收峰值高于血液的初始值,表现出一定程度的增强效应。

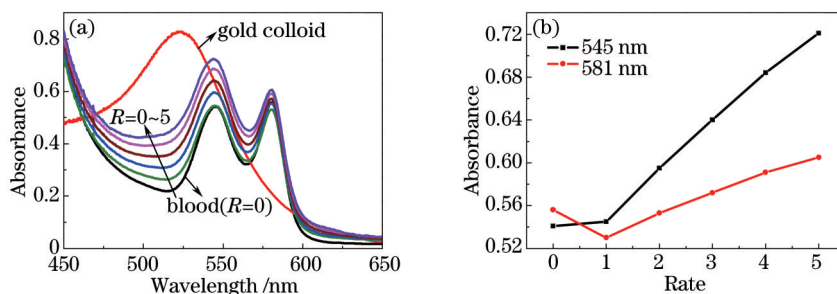


图8 不同纳米金配比下血液的动态吸收光谱。(a) 血液吸收光谱;(b)血液吸收峰值变化

Fig.8 Dynamic absorption spectra of blood at different volume ratios with gold colloid. (a) Absorption spectra of blood; (b) change of absorbance peak

图9所示为 $R=5$ 时血液的动态光吸收特性随温度的变化规律,图9(a)为升温过程,图9(b)为降温过程。由前文可知,胶体金的吸收性能不随温度而变化。从图9(a)可以看出,加入胶体金后血液的光吸收性随温度的变化和没有加入前的变化规律基本一致,可见加入的胶体金不会与血液发生化学变化,对血液的吸光度的增强只起到简单的加成作用。由于胶体金在522 nm处有一个强吸收峰,所以较低温度下545 nm处的吸收峰值要大于581 nm处的吸收峰值。随着温度的升高(小于 $65\text{ }^{\circ}\text{C}$),血液的吸光度整体略有下降,曲线形状未发生变化;升高至 $67\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右时,会在630 nm处有个小的突起;温度达到 $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,吸收曲线形状发生改变,整体的吸光度增大,血液开始发生蛋白质变性,产生高铁血红蛋白,在630 nm处的吸光度明显增大;温度达到 $74\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时在545 nm处仍有一个吸收峰,但在581 nm处的吸收峰接近消失,血液的蛋白质变性基本接近完全; $75\text{ }^{\circ}\text{C}$ 及以后,581 nm处的吸收峰完全消失,但在545 nm处仍有一个凸起,此时蛋白质已经完全变性,胶体金的存在使得该处仍会存在一个弱吸收峰。图9(b)为降温过程中血液的动态光吸收特性,可以看出,血液的光吸收曲线形状没有发生明显的变化,吸光度略有增加,血液的蛋白质变性过程是一个不可逆的过程,不因加入胶体金而改变。

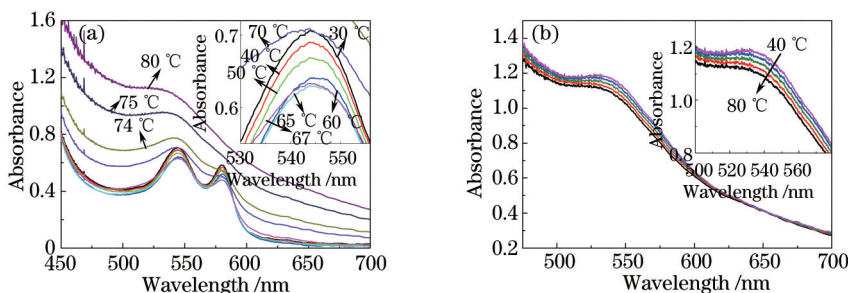


图9 变温过程中血液的动态吸收光谱($R=5$)。(a) 升温过程;(b) 降温过程

Fig.9 Dynamic absorption spectra of blood at different temperatures when $R=5$. (a) Heating process; (b) cooling process

5 结 论

采用柠檬酸钠还原法制备了纳米金颗粒,利用透射电子显微镜测量金颗粒的形貌尺寸,利用光谱仪测量胶体金的吸收光谱,研究了加热温度、加热时间、柠檬酸钠还原剂用量等因素对纳米金吸收光谱及颗粒尺寸的影响。将制备得到的粒径为16.7 nm、浓度为 $0.035\text{ }\mu\text{mol/L}$ 的胶体金和血液以不同的比例配比后获得了胶体金对血液光吸收性能的影响及其随温度的变化规律。

1) 高温有利于胶体金的制备,最佳温度为 100 ℃。加热时间过短,反应液反应不完全;加热时间过长,易造成反应液的溅射,最佳的加热时间为 10 min。

2) 柠檬酸钠还原剂的用量对胶体金颗粒的直径有较大影响,从而影响金颗粒的最大吸收峰波长。用量在 4 mL 以下时,随着还原剂用量的增加,颗粒尺寸随之减小,最大吸收峰波长亦随之减小;用量在 4 mL 以上时则与之相反。

3) 金颗粒粒径与最大吸收峰波长之间存在正相关的关系,金颗粒的粒径分布决定了胶体金吸收光谱的峰宽,分布越均匀,峰宽越小,据此可从胶体金的吸收光谱图中直观地观测到金颗粒粒径的变化趋向。

4) 结果显示胶体金的光吸收性质不随温度的变化而变化。加入胶体金后,血液在可见光范围的两个吸收峰位置不会发生变化,但吸收峰值随着加入胶体金和血液的体积比的增大呈线性增长,当两者的体积比为 5 时,吸收峰位置对应的吸光度分别增大了 1.33 倍和 1.09 倍。

5) 在变温条件下,胶体金不会对血液的动态吸收特性产生影响,血液在 70 ℃左右时发生蛋白质变性,545、581、630 nm 处的吸光度开始大幅度增加;75 ℃后蛋白质变性完全,545 nm 处的吸收峰基本消失,581 nm 处的吸收峰完全消失,吸收曲线不再发生明显变化,此过程不可逆。在充分考虑细胞可承受能力的情况下,向血液中注入微量的金颗粒,可以在一定程度上增强治疗部位血液的光吸收性,从而提高激光治疗血管性皮肤病的治愈率。

参 考 文 献

- 1 Wang Ying. The gold preparation and application research progress of gold nanoparticles[J]. *Inorganic Analytical Chemistry of China*, 2012, 2(4): 15-21.
王莹. 金纳米颗粒制备及应用研究进展[J]. *中国无机分析化学*, 2012, 2(4): 15-21.
- 2 Fan Tuo, Zhang Jie, Zhang Xiaolei, *et al.*. Surface-enhanced Raman scattering experimental research on composite structure of gold nano particles and carbon nanotubes with different sizes[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(s1): s106001.
范拓, 张洁, 张晓蕾, 等. 不同尺寸纳米金颗粒和碳纳米管复合结构的表面增强拉曼散射实验研究[J]. *中国激光*, 2013, 40(s1): s106001.
- 3 Wang Fei, Wang Yingwei, Fu Liping, *et al.*. Preparation and absorption characteristics of highly ordered Au nanoparticle array [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(s2): s216002.
王飞, 王迎威, 符力平, 等. 有序金纳米颗粒阵列的制备及其吸光特性[J]. *光学学报*, 2013, 33(s2): s216002.
- 4 Tan Xinhui, Cai Wei, Ji Zhichao, *et al.*. Light-induced gold nanoparticle grating and excitation of surface plasmon polaritons [J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(12): 1202011.
谭信辉, 蔡卫, 冀志超, 等. 光诱导金纳米颗粒光栅及表面等离子激元的激发[J]. *中国激光*, 2014, 41(12): 1202011.
- 5 Li Ying, Hu Yanjun. Position designated delivery of microparticles using a submicron fiber decorated with gold nanorods[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(7): 070602.
李英, 胡艳军. 用金纳米棒修饰的亚微米光纤定点输送微颗粒的研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(7): 070602.
- 6 Patra C R, Bhattacharya R, Mukhopadhyay D, *et al.*. Fabrication of gold nanoparticles for targeted therapy in pancreatic cancer[J]. *Adv Drug Deliv Rev*, 2010, 62(3): 346-361.
- 7 Ko S, Park T J, Kim H S, *et al.*. Directed self-assembly of gold binding polypeptide-protein A fusion proteins for development of gold nanoparticle-based SPR immunosensors[J]. *Biosens Bioelectron*, 2009, 24(8): 2592-2597.
- 8 Liu Zhiyuan, Du Jingjing, Yang Yingge, *et al.*. Preparation of Au nanoparticles and the study of their property as the surface enhanced Raman scattering substrates[J]. *Journal of Light Scattering*, 2013, 25(2): 133-137.
刘志远, 杜晶晶, 杨英歌, 等. 金纳米粒子的制备及其表面增强拉曼散射效应的研究[J]. *光散射学报*, 2013, 25(2): 133-137.
- 9 Yang Yudong, Xu Jinghua, Yang Linmei, *et al.*. Optical properties of gold nanorods and its application in cancer diagnosis and photothermal therapy[J]. *Applied Laser*, 2009, 29(3): 260-264.
杨玉东, 徐菁华, 杨林梅, 等. 金纳米棒的光学性质及其在癌症诊断和光热疗法中的应用[J]. *应用激光*, 2009, 29(3): 260-264.
- 10 Zhang Xingfang, Zhang Lamei, Fan Qunfang, *et al.*. Tunable localized surface plasmon resonance of gold nanoshell particle [J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(9): 0910001.
张兴坊, 张腊梅, 范群芳, 等. 金纳米球壳结构局域表面等离子体共振调谐特性[J]. *中国激光*, 2011, 38(9): 0910001.
- 11 van Gemert M J C, Nelson J S, Milner T E, *et al.*. Non-invasive determination of port wine stain anatomy and physiology for optimal

- laser treatment strategies[J]. *Phys Med Biol*, 1997, 42(5): 937–950.
- 12 Anderson R R, Parrish J A. Selective photothermolysis: Precise microsurgery by selective absorption of pulsed radiation[J]. *Science*, 1983, 220(4596): 524–527.
- 13 Kelly K M, Kimel S, Smith T, *et al.*. Combined photodynamic and photothermal induced injury enhances damage to *in vivo* model blood vessels[J]. *Laser Surg Med*, 2004, 34(5): 407–413.
- 14 Huang Longwang. Intensive laser heating by using gold nanoparticles[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2006, 43(7): 72.
黄龙旺. 金纳米颗粒强化激光加热[J]. *激光与光电子学进展*, 2006, 43(7): 72.
- 15 Yamada S. Toward plasmonics: Photoelectric conversion and laser writing utilizing gold nanoparticles[J]. *Journal of Light Scattering*, 2005, 17(3): 256–258.
Yamada S. 等离子体的光电转换以及激光刻蚀金纳米颗粒[J]. *光散射学报*, 2005, 17(3): 256–258.
- 16 Ahmad A, Mukherjee P, Senapati S, *et al.*. Extracellular biosynthesis of silver nanoparticles using the fungus *fusarium oxysporum*[J]. *Colloid Surface B*, 2003, 28(4): 313–318.
- 17 Schmitt J, Machtle P, Eck D, *et al.*. Preparation and optical properties of colloidal gold monolayers[J]. *Langmuir*, 1999, 15(9): 3256–3266.

栏目编辑: 吴秀娟