

Polymerization
Quarterly, 2017
Volume 7, Number 2
Pages 3-12
ISSN: 2252-0449

Gold-polymer Nanocomposites and Their Applications

Jaber Keyvan Rad, Ali Reza Mahdavian*

Polymer Science Department, Faculty of Science, Iran Polymer and Petrochemical
Institute, P.O. Box: 14975/112, Tehran, Iran

Received: 8 November 2016, Accepted: 20 December 2016

Abstract

Unique properties of gold nanoparticles, such as the surface plasmon resonance (SPR), easy synthesis and modification, control on size and shape, chemically inertness and biocompatibility have attracted much attention in recent years. The plasmonic properties of gold nanostructures for different applications can be controlled by changing their size and the shape. Introducing gold nanoparticles into polymer systems or their surface modification will improve their solution stability and make them susceptible to respond to external stimuli due to the existing functionalities. Smart gold-polymer nanocomposite with defined properties can be obtained by employing responsive polymers to light, temperature and pH stimuli. Controlling SPR properties of gold nanoparticles make them appropriate for different purposes like photothermal treatment of cancer cells, photodynamic therapy, plasmonic vesicles for drug delivery system, surface enhanced Raman scattering (SERS) and tumor computed tomography imaging. Coating of magnetic nanoparticles with gold promotes their colloidal stability, optical and conductive properties and also enhances their surface chemical reactions and biocompatibility for in vivo applications. In addition, the remote control of plasmonic properties will become feasible by an external electromagnetic field.

Key Words

gold nanoparticles,
magnetic,
polymer coating,
nanocomposite,
plasmonic

(*) To whom correspondence should be addressed.
E-mail: a.mahdavian@ippi.ac.ir

بسیار

فصلنامه علمی-ترویجی

سال هفتم، شماره ۲

صفحه ۱۲-۱۳۹۶

ISSN: 2252-0449

نانوکامپوزیت‌های طلا- پلیمر و کاربردهای آن‌ها

جابر کیوان‌راد، علیرضا مهدویان*

پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران، پژوهشکده علوم، گروه علوم پلیمر، صندوق پستی ۱۱۲-۱۴۹۷۵

دریافت: ۱۳۹۵/۸/۱۸، پذیرش: ۱۳۹۵/۹/۳۰

نانوذرات طلا به دلیل داشتن ویژگی‌هایی مانند رزونانس پلاسمون سطح، سنتز آسان، روش‌های اصلاح سطح شیمیایی متنوع، کنترل شکل و اندازه، بی‌اثر بودن از لحاظ شیمیایی و زیست‌سازگاری خوب دارای اهمیت بسیار زیادی هستند. با تغییر شکل و اندازه نانو ساختارهای طلا می‌توان خواص پلاسمونی را کنترل و آن‌ها را برای کاربردهای خاص تنظیم کرد. وارد کردن نانوذرات طلا به سامانه‌های پلیمری یا اصلاح سطح آن‌ها، موجب پایداری محلول این نانوذرات شده و امکان وارد کردن گروه‌های عاملی خاص و پاسخگویی به محرک‌های خارجی را فراهم می‌کند. با استفاده از بسترهای پلیمری پاسخگو به محرک (نور، دما و pH) و اصلاح سطح نانوذرات با لیگاندهای خاص می‌توان نانوکامپوزیت‌های هوشمند پلیمر-طلا با ویژگی‌های مطلوب تهیه کرد. با تنظیم شرایط، از خواص پلاسمونی نانوذرات طلا برای اهداف متفاوت می‌توان بهره برد. خواص پلاسمونی نانوذرات طلا برای کاربردهای مختلف از جمله درمان نورگرمایی سلول‌های سرطانی، درمان نوردینامیکی بیماری‌ها، تهیه و زیکول‌ها در سامانه‌های انتقال دارو، پراکندگی تقویت شده سطحی رامان و تصویربرداری برش‌نگاری رایانه‌ای استفاده می‌شود. پوشش دهی ذرات مگنتیت با طلا، نه تنها سبب پایداری کلئیدی و بهبود خواص نوری و رسانشی ذرات مگنتیت می‌شود، بلکه سبب ارتقای واکنش‌های شیمی سطح آن‌ها شده و کاربردهای درون‌تنی این ذرات را بهبود می‌بخشد. افزون بر این، امکان کنترل از راه دور مکان اعمال خواص پلاسمونی را با استفاده از میدان مغناطیسی خارجی میسر می‌سازد.

چکیده



جابر کیوان‌راد



علیرضا مهدویان

واژگان کلیدی

نانوذرات طلا،
مغناطیسی،
پوشش پلیمری،
نانوکامپوزیت،
پلاسمونی

مقدمه

ویژگی‌های منحصر به فرد نانوذرات، مانند قابلیت اصلاح و کنترل مشخصات آن‌ها، نسبت سطح به حجم زیاد و کنترل اندازه و شکل موجب شده تا برای کاربردهای مختلف مورد توجه قرار گیرند [۱]. توسعه رویکردهای شیمی سطح نانوذرات، عامل دار کردن آن را با زیست مولکول‌های مختلف امکان پذیر می‌سازد. موفقیت در سنتز نانوذرات، به توسعه نانوذرات عامل‌داری منجر شده که قابلیت واکنش‌دهی با اعمال محرک‌های خارجی را دارند. این نانوذرات می‌توانند به شکل کووالانسی به زیست مولکول‌هایی مانند پپتیدها، پروتئین‌ها و نوکلئیک اسیدها متصل شوند [۲]. به دلیل وابستگی اندازه و تشابه‌های ابعادی نانوذرات به زیست‌درشت مولکول‌ها، فرصت‌های جدیدی برای بسیاری از کاربردهای زیست فناوری ایجاد شده است. مقایسه بین نانوذرات تک جزئی و نانوکامپوزیت‌های هیبریدی نشان می‌دهد، نانوکامپوزیت‌ها به سبب داشتن قابلیت واکنش با ترکیبات دارای گروه‌های عاملی مختلف، در این زمینه آمادگی زیادی دارند و نقص‌هایی مانند ناپایداری نانوذرات و تمایل به تجمع در آن‌ها برطرف می‌شود. در واقع، با نشان دادن نانوذرات روی پلیمرهای مختلف یا اصلاح سطح نانوذرات با آن‌ها، هم‌زمان از ویژگی‌های منحصر به فرد این ذرات و پوشش پلیمری می‌توان استفاده کرد.

نانوذرات طلا کاربردهای متنوعی در زمینه‌های برداشت انرژی خورشیدی، حسگرها، کاتالیزورها و همچنین کاربردهای پزشکی شامل تصویربرداری زیستی، انتقال دارو و درمان نورگرمایی سرطان دارند [۳]. اخیراً نانوذرات پلاسمونی (به ویژه نانوذرات طلا) به دلیل داشتن ویژگی‌های جذاب مانند رزونانس پلاسمون سطح (surface plasmon resonance, SPR) برای تهیه هیبریدهای نانوکامپوزیتی بسیار امیدبخش ظاهر شده‌اند [۴]. زمانی که بسامد نوسان پلاسمون با بسامد امواج الکترومغناطیسی تابیده به فلز برابر باشد، پدیده رزونانس پلاسمون سطحی و جذب یا پراش نور ورودی رخ می‌دهد. هنگامی که ابعاد فلز به مقیاس نانو کاهش یابد، پدیده رزونانس پلاسمون سطحی موضعی (localized surface plasmon resonance, LSPR) اتفاق می‌افتد. آثار SPR از نوسانات جمعی تعداد زیادی از الکترون‌های آزاد در ساختار نوار ظرفیت نانوذرات طلا ناشی می‌شود [۵]. این آثار به اندازه ذره، شکل، خواص دی‌الکتریک، شکل‌شناسی تجمع، اصلاح سطح و ضریب شکست محیط اطراف آن بستگی دارد و به آسانی با تغییر دادن اندازه و شکل نانوذرات تنظیم می‌شود [۶]. پراکندگی رامان سطحی تقویت شده (surface-enhanced Raman scattering, SERS)

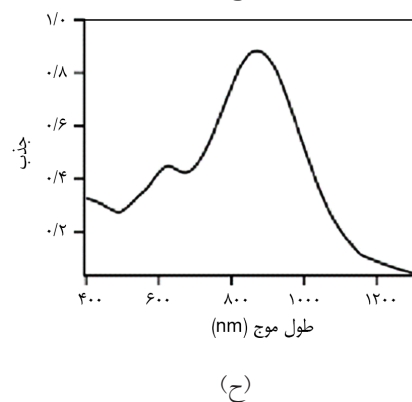
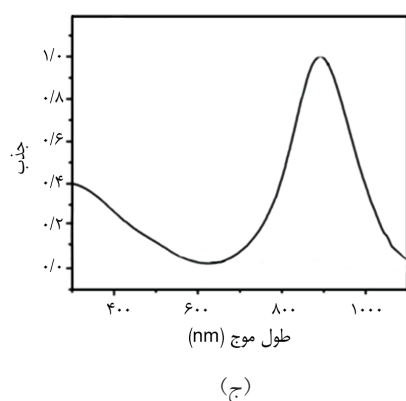
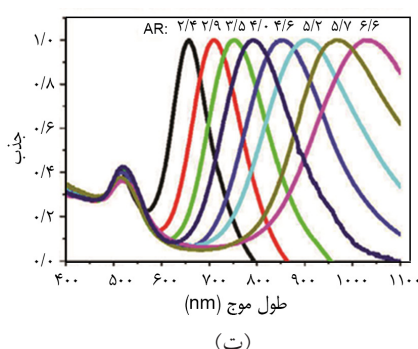
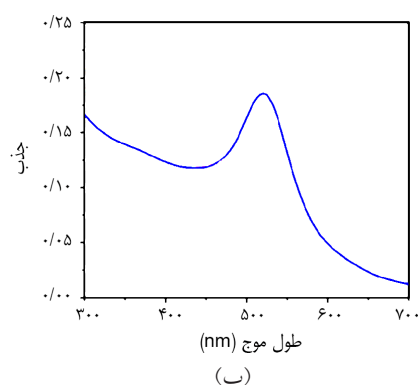
حاصل رزونانس پلاسمون سطحی نانوذرات است که از آن در افزایش کارایی روش شناسایی پراکندگی رامان استفاده می‌شود. در پراکندگی رامان، نور به طور غیرکشسان به نمونه برخورد و با انرژی بیشتر یا کمتر پراکنده می‌شود. این جابه‌جایی انرژی، بسته به ساختار شیمیایی مقدار مشخصی دارد که می‌تواند برای شناسایی آن استفاده شود. رزونانس سطحی نانوذرات طلا سبب شده است که میدان الکتریکی قوی در نزدیکی نانوذرات طلا با توجه به شدت نور ورودی ایجاد شود. در نتیجه چنانچه مولکولی نزدیک سطح این نانوذرات قرارگیرد، قابلیت پراکنش بیشتری در مقایسه با مولکول در حالت نبود نانوذره دارد. از کاربردهای این روش می‌توان شناسایی DNA و پروتئین‌ها را نام برد [۷].

کاربرد دیگر نانوذرات طلا تجمع گرماست. زمانی که نانوذرات طلا نور را جذب می‌کنند، الکترون‌های آزاد آن‌ها برانگیخته می‌شوند و برانگیختگی الکترون‌های آزاد نانوذرات طلا در بسامد رزونانس پلاسمون، نوسانات جمعی الکترون‌های آزاد را سبب می‌شود. در اثر برهم‌کنش الکترون‌های درحال نوسان و شبکه بلور نانوذرات طلا، انرژی گرمایی به شبکه بلور انتقال می‌یابد و الکترون‌ها آسوده می‌شوند. سپس، این انرژی از بلور به شکل گرما به محیط منتقل می‌شود [۸]. از این قابلیت در درمان نورگرمایی سلول‌های سرطانی استفاده می‌شود. از سوی دیگر، نانوذرات طلا قابلیت خاموش کردن فلئوئورسان بسیاری از فلئوئورفورهایی را دارند که در تماس با سطح آن هستند و از این خاصیت برای درمان نوردینامیکی (photodynamic therapy, PDT) بسیاری از بیماری‌ها استفاده می‌شود [۹].

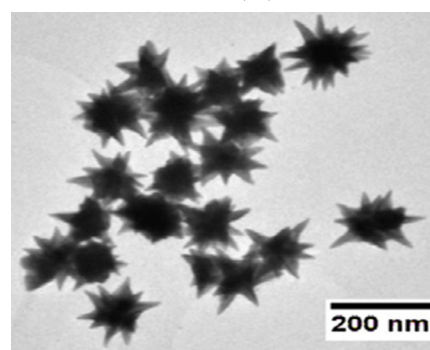
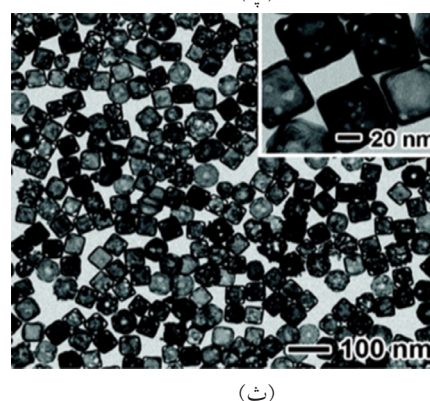
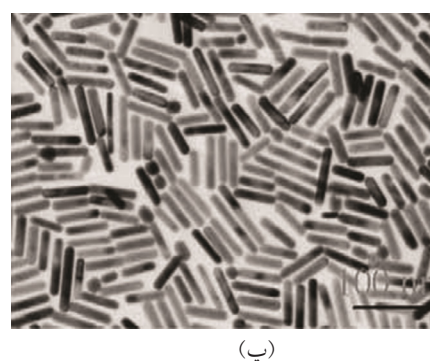
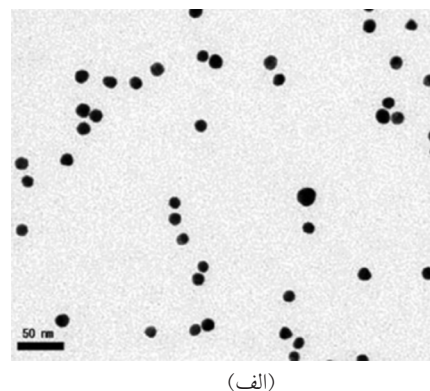
خواص نوری نانوذرات طلا

نانوذرات فلزات نجیب، خواص شیمیایی و فیزیکی خاصی دارند که آن‌ها را به طور کلی از توده این فلزات متمایز می‌کند. خواص نانوذرات فلزی موجب شده تا برای کاربردهای متعددی شامل حسگرهای شیمیایی، تصویربرداری و شناسایی و درمان سرطان استفاده شوند که همه این‌ها از نوسانات جمعی الکترون‌های لایه ظرفیت (پلاسمون‌ها) در پاسخ به تابش الکترومغناطیسی حاصل می‌شود. خواص الکترونیکی و نوری نانوذرات طلا، نه تنها با تغییر شکل و اندازه، بلکه با اصلاح سطح آن‌ها و نیز حالت جمعی می‌تواند تغییر کند [۶]. شکل ۱ ساختار و طیف‌های جذبی چند نوع از نانوساختارهای طلا شامل، نانوذرات، نانومیله‌ها، نانوقفس‌ها و نانوستاره‌ها یا نانوجل‌ها را نشان می‌دهد. برای نانوذرات کروی، نوسانات پلاسمون به دلیل تقارن کروی همسانگردند و معمولاً یک

شکل ذرات از کروی به میله‌ای، نوارهای پلاسمون چندتایی شامل هر دو نوار LSPR طولی و عرضی ایجاد می‌شوند که مقدار آن‌ها



پیک LSPR در 520 nm نشان می‌دهند که افزایش جزئی در طول موج جذبی افزایش اندازه ذرات را به همراه دارند [۱۰]. با تغییر

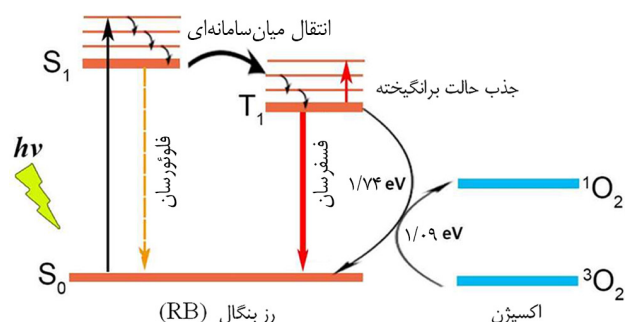


شکل ۱- پیک‌های جذبی پلاسمونی و تصاویر میکروسکوپی TEM از انواع مختلف نانوساختارهای طلا: (الف) و (ب) نانوذرات طلا، (پ) و (ت) نانومیله‌های طلا که با افزایش نسبت منظر، پیک جذبی پلاسمونی به طول موج‌های بیشتر جابه‌جا می‌شود، (ث) و (ج) نانوقفس‌های طلا و (چ) و (ح) نانوستاره‌های طلا [۹].

بر این، پوشش‌های پلیمری دوجزئی وجود دارند که می‌توانند مخلوط دوتایی از دو هوموپلیمر یا کوپلیمرهای دودسته‌ای باشند. نانوذرات طلای پایدار شده با پلیمرهای دوجزئی شانه‌ای، خواص ویژه‌ای مانند پاسخگویی ترکیبی به دما و گرما [۱۷]، چندتایی بودن دماهای محلول بحرانی کمتر (LCSTs) [۱۴، ۱۸] و همچنین خواص خودگردایشی بین‌سطحی ویژه [۱۹] دارند.

نانوذرات پلیمری حاوی طلا

نانوذرات طلا به دلیل داشتن قابلیت‌هایی چون سنتز آسان، روش‌های اصلاح سطح شیمیایی متنوع، اتصال آسان تعداد زیادی از مولکول‌های کوچک مانند درشت‌مولکول‌های زیستی سنتزی به سطح آن‌ها، بی‌اثر بودن از لحاظ شیمیایی و زیست‌سازگاری خوب دارای اهمیت هستند [۲۰]. این ویژگی‌ها، نانوکامپوزیت‌های هیبریدی پلیمر-طلا را به ابزار مناسبی برای مطالعات درمان نوردینامیکی تبدیل کرده است. درمان نوردینامیکی ابزار قدرتمندی برای درمان بسیاری از بیماری‌هاست [۹] و برای درمان سرطان پوست، ریه، مری و همچنین ضایعات پیش‌سرطانی استفاده شده است [۲۱، ۲۲]. اساس PDT بدین شکل است که از حسگرهای نوری برای انتقال انرژی نور به مولکول‌های اکسیژن محیط و تشکیل گونه‌های اکسیژن فعال (reactive oxygen species, ROS) استفاده می‌شود [۲۳]. ROSها سمی هستند و می‌توانند برای تخریب بافت‌های بدخیم و بیماری‌زها استفاده شوند [۲۴]. Wang و همکاران [۲۵] هیبریدهای نانوکامپوزیتی پلیمر-طلا را تهیه و کاربرد ضدباکتری آن را بررسی کردند. بدین منظور، نانوذرات پلیمری پلی‌آکرلیک اسید-کیتوسان را تهیه و سپس نانوذرات طلا با روش کاهش درجا روی سطح نانوذرات پلیمری تشکیل شدند. این نانوذرات به عنوان تقویت کننده پلاسمونی عمل کرده و حسگر نوری رز بنگال (Rose Bengal, RB) را نیز با واکنش گروه‌های کربوکسیلیک به گروه‌های آمینی کیتوسان متصل کردند.



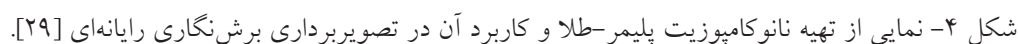
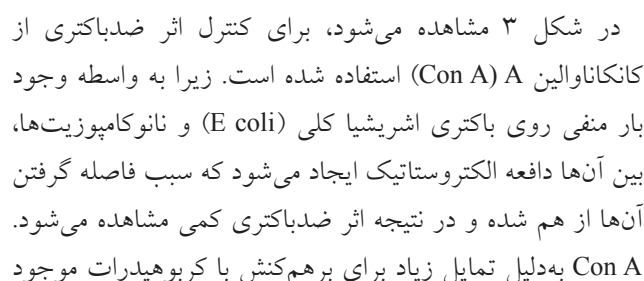
شکل ۲- نمودار سطوح انرژی رز بنگال (فسفرسان تقویت شده همراه با تولید گونه‌های اکسیژن فعال) [۲۵].

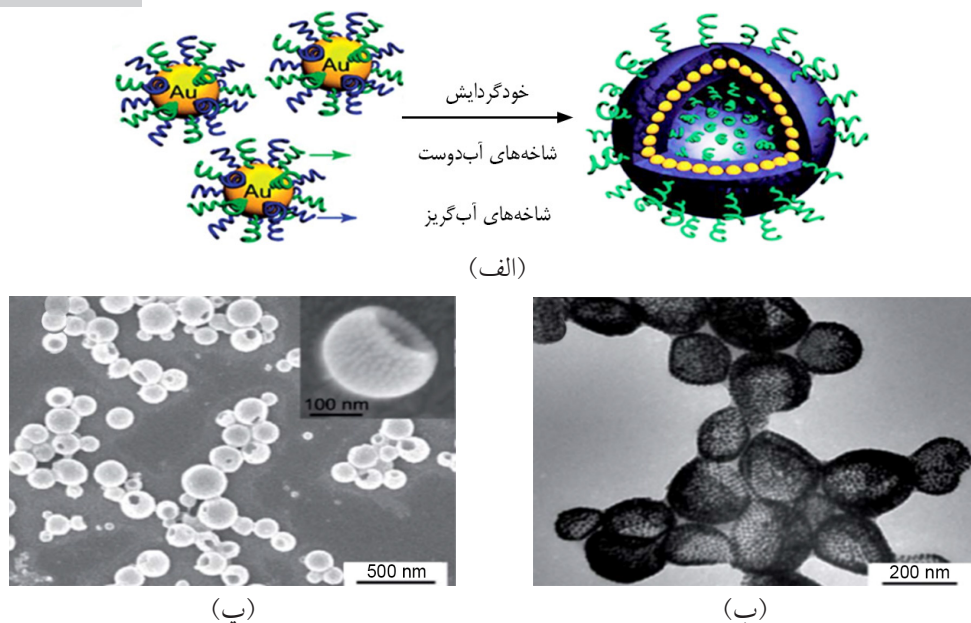
در جهات مختلف متفاوت است و با تغییر نسبت منظر (نسبت طول به عرض) می‌توان نوسانات پلاسمون را کنترل و تنظیم کرد. پیک شیوه عرضی (transverse mode) در ۵۲۰ nm است و پیک شیوه طولی (longitudinal mode) با افزایش نسبت منظر از ناحیه مرئی تا زیرقرمز نزدیک (NIR) قرار می‌گیرد [۹]. نانوقفس‌های طلا، نانوساختارهای مکعبی خالی با دیواره‌های متخلخل خیلی نازک و زاویه‌های کوتاه هستند. پیک LSPR این نانوساختارها با کنترل اندازه یا ضخامت دیواره‌ها از ۶۰۰ nm تا ۱۲۰۰ nm قابل تنظیم است [۱۱]. نانوستاره‌های طلا نیز با کنترل پیک‌های پلاسمونی تا ناحیه زیرقرمز نزدیک جذب نشان می‌دهند [۹].

اصلاح سطح نانوذرات طلا

نانوذرات طلا به منظور حفاظت در برابر تجمع که باعث تغییر خواص نوری، الکترونیکی و کاتالیزوری و نیز خواص بین‌سطحی می‌شود، معمولاً با لایه‌ای آلی پوشش داده می‌شوند. افزون بر این، پراکنش آسان از مسائل کلیدی در کاربرد آن‌هاست که در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است [۱۲]. از روش‌های پوشش نانوذرات استفاده از نانوذرات جانوس (Janus nanoparticles) است. نانوذرات جانوس به عنوان ذرات دوخصلتی در نظر گرفته می‌شوند که می‌توانند ساختارهای خودگردایش (self-assembly) یا حتی ساختارهای سلسله مراتبی با طول‌های مختلف تشکیل دهند [۱۳]. لیگاندهایی که برای پوشش نانوذرات طلا استفاده می‌شوند، نه تنها برای کنترل برهم‌کنش‌های بین نانوذرات، بلکه برای کنترل خواص مهندسی پلیمرها نیز استفاده می‌شوند [۱۴]. افزون بر مولکول‌های کوچک مانند سیتریک اسید، آمین و به ویژه مشتقات تیول‌ها، پلیمرها نیز به طور گسترده به عنوان لیگاند برای پایداری نانوذرات طلا استفاده می‌شوند. لیگاند‌های پلیمری مورد توجه بیشتری هستند، زیرا نه تنها پایداری پراکنه را فراهم می‌کنند، بلکه امکان وارد کردن گروه‌های عاملی مختلف، پاسخگویی به محرک‌های خارجی و همچنین کنترل و سازمان‌دهی نانوذرات طلا را در حالت جامد سبب می‌شوند [۱۴، ۱۵]. برای مثال، پلی‌اتیلن گلیکول (PEG) به طور گسترده به عنوان لیگاند برای پوشش‌دهی نانوذرات طلا استفاده شده است که سبب پایداری بسیار عالی و زمان گردش طولانی آن‌ها در خون می‌شود [۱۶]. نانوذرات پایدار شده با پوشش‌های پلیمر، عمدتاً با جذب شیمیایی یا فیزیکی گروه‌های انتهایی پلیمر یا جذب فیزیکی گزینشی کوپلیمرهای دسته‌ای روی سطح نانوذرات طلا پوشش می‌یابند. در بیشتر موارد پوشش‌های پلیمری نانوذرات از یک جزء تشکیل شده است. افزون

این گروه در کار دیگری برای بهبود قابلیت تصویربرداری با استفاده از پلیمر تهیه شده، گروه فولیک اسید را از راه واکنش



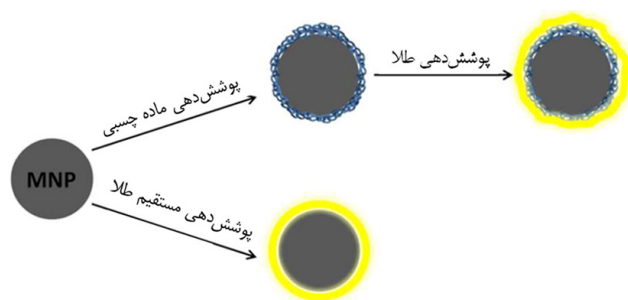


شکل ۵- (الف) نمایی از خودگردایش پوشش متشکل از مخلوط دوتایی PMMA/PEG روی نانوذرات طلا به ابرساختارهای وزیکولی و تصاویر وزیکول‌های نانوذرات طلا: (ب) TEM و (پ) SEM [۲۸].

در سامانه‌های انتقال دارو با رهایش کنترل شده استفاده کرد.

نانوکامپوزیت‌های حاوی مگنتیت-طلا

نانوذرات مغناطیسی به دلیل برهم‌کنش با میدان مغناطیسی و امکان کنترل از راه دور آن‌ها در زمینه‌های مختلف مانند نانوپزشکی، حسگرها در شیمی تجزیه، جداسازی و شناسایی آنالیت‌ها و همچنین تصویربرداری رزونانس مغناطیسی (magnetic resonance imaging, MRI) کاربرد یافته‌اند. با وجود قابلیت‌های زیاد این نانوذرات، دارای محدودیت‌هایی مانند رسانایی الکتریکی کم و خواص نوری محدودند که سبب شده تا اغلب به عنوان عناصر جاذب امواج مغناطیسی و نه خود حسگر استفاده شوند. از معایب دیگر آن‌ها، پایداری کم و تمایل به تجمع به دلیل نسبت زیاد سطح به حجم و تمایل کم برای انجام واکنش‌های شیمی سطح

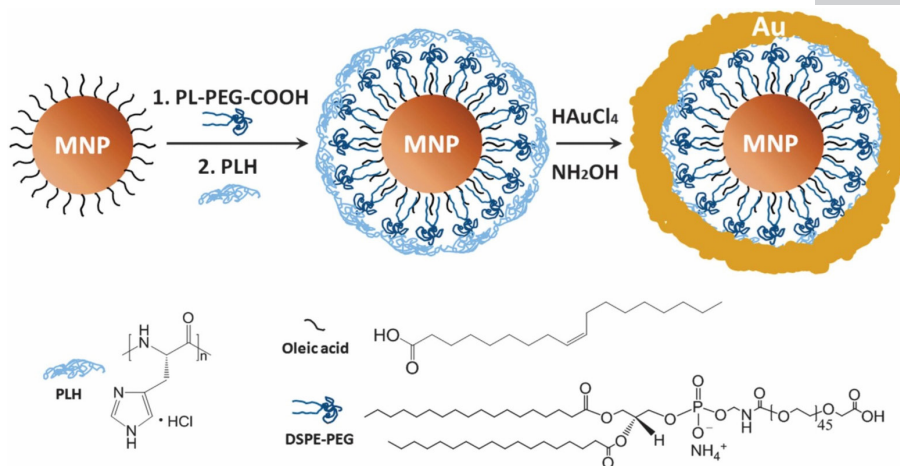


شکل ۶- نمایش دو روش مختلف برای ایجاد پوشش طلا روی ذرات مگنتیت [۲].

شیمیایی به بستر پلیمر وارد کردند. فولیک اسید به عنوان یک نانوکاوند عمل کرده و سبب شناسایی سریع سلول‌های سرطانی می‌شود، چرا که زن‌های پذیرنده فولیک اسید روی سلول‌های سرطانی هدف قرار دارند [۲۷].

Song و همکاران [۲۸] خودگردایش نانوذرات طلای عامل‌دار شده با مخلوطی از پلیمرهای شاخه‌دار پلی‌اتیلن گلیکول و پلی‌متیل متاکریلات به ابرساختارهای وزیکولی را گزارش دادند (شکل ۵). برای این کار، آن‌ها ابتدا با استفاده از حد واسط تیول‌دار، PEG را به سطح نانوذرات طلا پیوند زدند. در مرحله بعد، مونومر متیل متاکریلات با استفاده از آغازگر متصل به سطح نانوذرات طلا، پلیمر شده و با استفاده از روش بازآبدارشدن (rehydration) خودگردایش شد. برخلاف وزیکول‌های تشکیل شده از پلیمرها یا لیپوزوم‌ها، وزیکول‌های هیبریدی پلیمر-طلا پس از خشک شدن تحت خلأ برای تصویربرداری با میکروسکوپی الکترونی عبوری (TEM) و میکروسکوپی الکترونی پویشی (SEM)، هنوز ساختار کروی خود را حفظ کرده بودند.

تشکیل وزیکول‌ها به خاطر خودگردایش زنجیرهای آب‌گریز پلی‌متیل متاکریلات (PMMA) و زنجیرهای آب‌دوست پلی‌اتیلن گلیکول است. در ضمن مشاهده شد، با وارد کردن کسر کوچکی از مونومر ۴-وینیل پیریدین به قسمت آب‌گریز PMMA، امکان ازهم‌پاشیدن ساختار وزیکولی نانوذرات طلا با القای pH وجود دارد. این ویژگی نانوکامپوزیت‌های هیبریدی پلیمر-طلا را می‌توان



شکل ۷- روش تهیه نانوذرات هسته-پوسته مگنتیت-طلا با استفاده از پلی (L-هیستیدین) (PLH) به عنوان ماده چسبی [۲۹].

(فسفولیپید-پلی اتیلن گلیکول منتهی به کربوکسیلیک اسید) اصلاح شد. برای تشکیل لایه طلا روی سطح نانوذرات مغناطیسی اصلاح شده، به عامل کی‌لیت کننده پلی (L-هیستیدین) نیاز بود. در نهایت، با کاهش نمک یون طلا، پوسته طلا فلزی تشکیل شد (شکل ۷).

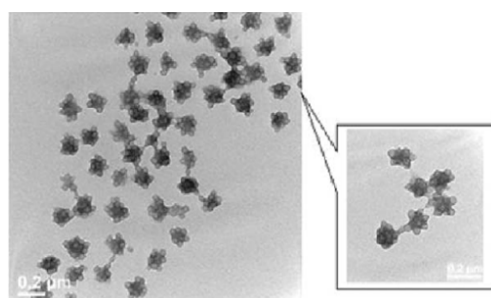
مزیت این کار در این بود که به واسطه فاصله ایجاد شده بین هسته و پوسته، لایه نازک و صافی از طلا روی سطح تشکیل شد. همچنین، ضخامت لایه طلا به راحتی با کنترل مقدار یون‌های طلا امکان پذیر بود که سبب توزیع باریک نانوذرات می‌شد. مهم‌تر اینکه خواص پلاسمونی نانوذرات طلا قابل کنترل بود.

برای کاربردهای درون‌تنی، پایداری ذرات در برابر تجمع بسیار مهم است، زیرا تجمع ناخواسته ذرات ممکن است سبب مسدود شدن رگ‌های خونی در pHهای معمولی شود. مهدویان و همکاران [۳۰] ذرات کامپوزیتی شامل سه قسمت مگنتیت، کوپلیمر اکتادودسیل متاکریلات-N-وینیل ایمیدازول و نانوذرات طلا را تهیه کردند. بدین منظور، آن‌ها ابتدا با روش پلیمرشدن ریزامولسیون لایه کوپلیمر حاوی وینیل ایمیدازول را روی سطح نانوذرات مگنتیت

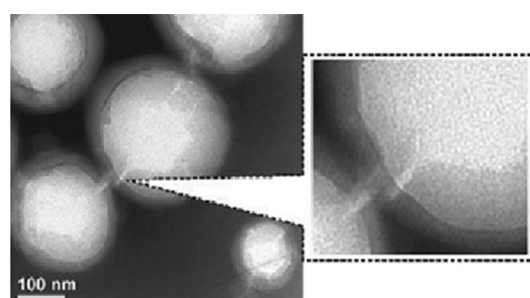
است. ایجاد پوشش طلا روی نانوذرات مغناطیسی به علت داشتن ویژگی‌هایی مانند رسانش پذیری، خواص نوری، زیست‌سازگاری، میل زیستی به دلیل عامل دار شدن با گروه‌های انتهایی، ایجاد پایداری شیمیایی با محافظت هسته مغناطیسی از تجمع، اکسایش و خوردگی بسیار اهمیت دارند [۲].

لایه طلا را می‌توان به دو روش مستقیم و غیرمستقیم روی هسته مگنتیت ایجاد کرد (شکل ۶) که در روش مستقیم لایه طلا به طور مستقیم روی سطح هسته کاهش می‌یابد [۲]. در حالی که در روش غیرمستقیم، ماده چسب (glue material) بین هسته مگنتیت و پوسته طلا قرار می‌گیرد [۲۹]. قابل ذکر است، در روش غیرمستقیم انتخاب ماده چسب بسیار مهم است. این ماده باید به طور کامل سطح هسته مگنتیت را بپوشاند و پایداری شیمیایی و فیزیکی آن را تضمین کند.

Jin و همکاران [۲۹] در سال ۲۰۱۰ از پلی (L-هیستیدین) به عنوان ماده چسب استفاده کردند. نانوذرات آهن اکسید که با اولئیک اسید احاطه شده بودند، برای پخش در محیط آبی با پلیمر دوخصلتی



(ب)



(الف)

شکل ۸- تصاویر TEM: (الف) از تشکیل لایه پلیمری روی ذرات مگنتیت با روش پلیمرشدن ریزامولسیونی و (ب) نانوذرات طلای تشکیل شده روی سطح ذرات هسته-پوسته مگنتیت-پلیمر [۳۰].

داشتن خواص پلاسمونی نانوذرات طلا دارای اهمیت بسیار زیادی هستند. این نانوکامپوزیت‌ها کاربردهای فراوانی در سامانه‌های پزشکی و حسگرهای شیمیایی دارند. سنتز معمول نانوساختارهای طلا با خواص پلاسمون سطحی از پیش معین و همچنین تمایل بسیار زیاد آن‌ها به واکنش با عوامل شیمیایی متنوع سبب شده است تا بتوان سطح این نانوساختارها را با انواع پلیمرها و کوپلیمرها، گروه‌های عاملی و زیست‌مولکول‌های مختلف اصلاح کرد. برهم‌کنش‌های قوی طلا-تیول امکان وارد کردن زیست‌مولکول‌ها را برای ردیابی، تهیه پلیمرهای خودگردایش و حساس به محرک برای کنترل از راه دور و رهایش کنترل شده، ایجاد سطحی با خواص شیمیایی و فیزیکی مشخص و همچنین پایدارسازی در نور گرمایی سرطان، انتقال دارو، تصویربرداری برش‌نگاری کامپیوتری و شناسایی زیست‌مولکول‌هایی مانند DNA و پروتئین‌ها با استفاده از پراکندگی رامان سطح تقویت شده از جمله کاربردهای این نانوکامپوزیت‌ها هستند.

تهیه کرده و با استفاده از تحلیل TEM لایه تشکیل شده را بررسی کردند (شکل ۸-الف). دلیل استفاده از وینیل‌ایمیدازول، قابلیت کی‌لیت شدن یون‌های طلا به آن بود. در مرحله آخر، یون‌های طلا کی‌لیت شده و به نانوذرات طلا کاهش داده شدند. مشاهده شد، نانوذرات طلای تشکیل شده به شکل تمشک بودند (شکل ۸-ب). ذرات کامپوزیتی تهیه شده کاربردهای پزشکی فراوانی دارند، زیرا می‌توان به طور هم‌زمان از ویژگی پلاسمونی نانوذرات طلا و امکان اصلاح شیمیایی سطح آن‌ها با عوامل زیستی مختلف استفاده کرد. بنابراین، می‌توان از خاصیت مغناطیسی مگنتیت برای کنترل مکان نانوکامپوزیت با اعمال میدان مغناطیسی و همچنین از بخش پلیمری برای وارد کردن داروهای آب‌گریز استفاده کرد.

نتیجه‌گیری

نانوکامپوزیت‌های هیبریدی پلیمر-طلا و مگنتیت-طلا به دلیل

مراجع

1. Davis M.E. and Shin D.M., Nanoparticle Therapeutics: An Emerging Treatment Modality for Cancer, *Nat. Rev. Drug Discovery*, **7**, 771–782, 2008.
2. Silva S.M., Tavallaie R., Sandiford L., Tilley R.D., and Gooding J.J., Gold Coated Magnetic Nanoparticles: From Preparation to Surface Modification for Analytical and Biomedical Applications, *Chem. Commun.*, **52**, 7528–7540, 2016.
3. Biju V., Chemical Modifications and Bioconjugate Reactions of Nanomaterials for Sensing, Imaging, Drug Delivery and Therapy, *Chem. Soc. Rev.*, **43**, 744–764, 2014.
4. Lin M., Pei H., Yang F., Fan C., and Zuo X., Applications of Gold Nanoparticles in the Detection and Identification of Infectious Diseases and Biothreats, *Adv. Mater.*, **25**, 3490–3496, 2013.
5. Kochuveedu S.T. and Kim D.H., Surface Plasmon Resonance Mediated Photoluminescence Properties of Nanostructured Multicomponent Fluorophore Systems, *Nanoscale*, **6**, 4966–4984, 2014.
6. Murphy C.J., Gole A.M., Hunyadi S.E., Stone J.W., Sisco P.N., Alkilany A., Kinard B.E., and Hankins P., Chemical Sensing and Imaging with Metallic Nanorods, *Chem. Commun.*, **5**, 544–557, 2008.
7. Sperling R.A., Gil P.R., Zhang F., Zanella M., and Parak W.J., Biological Applications of Gold Nanoparticles, *Chem. Soc. Rev.*, **37**, 1896–1908, 2008.
8. Govorov A.O., Zhang W., Skeini T., Richardson H., Lee J., and Kotov N.A., Gold Nanoparticle Ensembles as Heaters and Actuators: Melting and Collective Plasmon Resonances, *Nanoscale Res. Lett.*, **1**, 84–90, 2006.
9. Cheng L., Wang C., Feng L., Yang K., and Liu Z., Functional Nanomaterials for Phototherapies of Cancer, *Chem. Rev.*, **114**, 10869–10939, 2014.
10. Kim J., Park J., Kim H., Singha K., and Kim W.J., Transfection and Intracellular Trafficking Properties of Carbon dot-Gold Nanoparticle Molecular Assembly Conjugated with PEI-pDNA, *Biomaterials*, **34**, 7168–7180, 2013.
11. Skrabalak S.E., Chen J., Sun Y., Lu X., Au L., Copley C.M., and Xia Y., Gold Nanocages: Synthesis, Properties, and Applications, *Acc. Chem. Res.*, **41**, 1587–1595, 2008.
12. Zhou J., Ralston J., Sedev R., and Beattie D.A., Functionalized

- Gold Nanoparticles: Synthesis, Structure and Colloid Stability, *J. Colloid Interface Sci.*, **331**, 251–262, 2009.
13. Percebom A.M., Giner-Casares J.J., Claes N., Bals S., Loh W., and Liz-Marzán L.M., Janus Gold Nanoparticles Obtained via Spontaneous Binary Polymer Shell Segregation, *Chem. Commun.*, **52**, 4278–4281, 2016.
14. Chen L. and Klok H.A., Multifaceted Polymer Coated, Gold Nanoparticles, *Soft Matter*, **9**, 10678–10688, 2013.
15. Boal A.K., Ilhan F., De Rouche J.E., Thurn-Albrecht T., Russell T.P., and Rotello V.M., Self-Assembly of Nanoparticles into Structured Spherical and Network Aggregates, *Nature*, **404**, 746–748, 2000.
16. Otsuka H., Nagasaki Y., and Kataoka K., PEGylated Nanoparticles for Biological and Pharmaceutical Applications, *Adv. Drug Delivery Rev.*, **55**, 403–419, 2003.
17. Nuopponen M. and Tenhu H., Gold Nanoparticles Protected with pH and Temperature-Sensitive Diblock Copolymers, *Langmuir*, **23**, 5352–5357, 2007.
18. Boyer C., Whittaker M.R., Luzon M., and Davis T.P., Design and Synthesis of Dual Thermoresponsive and Antifouling Hybrid Polymer/Gold Nanoparticles, *Macromolecules*, **42**, 6917–6926, 2009.
19. Cheng L., Liu A., Peng S., and Duan H., Responsive Plasmonic Assemblies of Amphiphilic Nanocrystals at Oil-Water Interfaces, *ACS Nano*, **4**, 6098–6104, 2010.
20. Sykes E.A., Chen J., Zheng G., and Chan W.C.W., Investigating the Impact of Nanoparticle Size on Active and Passive Tumor Targeting Efficiency, *ACS Nano*, **8**, 5696–5706, 2014.
21. Nagata J., Hioka N., Kimura E., Batistela V.R., Terada R.S.S., Graciano A.X., Baesso M.L., and Hayacibara M.F., Antibacterial Photodynamic Therapy for Dental Caries: Evaluation of the Photosensitizers Used and Light Source Properties, *Photodiagn. Photodyn. Ther.*, **9**, 122–131, 2012.
22. Dai T., Huang Y.Y., and Hamblin M.R., Photodynamic Therapy for Localized Infections—State of the Art, *Photodiagn. Photodyn. Ther.*, **6**, 170–188, 2009.
23. Lucky S.S., Soo K.C., and Zhang Y., Nanoparticles in Photodynamic Therapy, *Chem. Rev.*, **115**, 1990–2042, 2015.
24. Yuan H., Chong H., Wang B., Zhu C., Liu L., Yang Q., Lv F., and Wang S., Chemical Molecule-Induced Light-Activated System for Anticancer and Antifungal Activities, *J. Am. Chem. Soc.*, **134**, 13184–13187, 2012.
25. Wang C., Cui Q., Wang X., and Li L., Preparation of Hybrid Gold/Polymer Nanocomposites and Their Application in Controlled Antibacterial Assay, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **8**, 29101–29109, 2016.
26. Zhou B., Zheng L., Peng C., Li D., Li J., Wen S., Shen M., Zhang G., and Shi X., Synthesis and Characterization of PEGylated Polyethylenimine-Entrapped Gold Nanoparticles for Blood Pool and Tumor CT imaging, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **6**, 17190–17199, 2014.
27. Zhou B., Yang J., Peng C., Zhu J., Tang Y., Zhu X., Shen M., Zhang G., and Shi X., PEGylated Polyethylenimine-Entrapped Gold Nanoparticles Modified with Folic Acid for Targeted Tumor CT Imaging, *Colloids Surf., B*, **140**, 489–496, 2016.
28. Song J., Cheng L., Liu A., Yin J., Kuang M., and Duan H., Plasmonic Vesicles of Amphiphilic Gold Nanocrystals: Self-Assembly and External-Stimuli-Triggered Destruction, *J. Am. Chem. Soc.*, **133**, 10760–10763, 2011.
29. Jin Y., Jia C., Huang S.W., O'Donnell M., and Gao X., Multifunctional Nanoparticles as Coupled Contrast Agents, *Nat. Commun.*, 2010, DOI: 10.1038/ncomms10.
30. Yang Y., Mahdavian A.R., Daniels E.S., Klein A., and El-Aasser M.S., Gold Deposition on Fe₃O₄/(co) Poly(N-octadecyl methacrylate) Hybrid Particles to Obtain Nanocomposites with Ternary Intrinsic Features, *J. Appl. Polym. Sci.*, **127**, 3768–3777, 2013.