

MỘT VÀI ỨNG DỤNG CỦA SIÊU ÂM

ThS. PHAN THANH HÀ

Trung tâm Kỹ thuật Đo lường Thử nghiệm Quảng Bình

Trong tự nhiên chúng ta thường gặp hai dạng truyền sóng cơ bản: sóng điện từ truyền trong không gian và sóng đàn hồi - dạng thay đổi tuần hoàn trạng thái của môi trường theo không gian và thời gian. Đối với sóng điện từ, sự có mặt của liên kết đàn hồi của các hạt vật chất là không cần thiết. Trong khi đó, sự truyền sóng đàn hồi chỉ có được khi có mặt liên kết đàn hồi của môi trường. Hơn nữa, dải tần số của hai loại sóng này cũng rất khác nhau. Sóng điện từ tần số thấp (dải sóng vô tuyến) chúng ta không cảm nhận được. Khi tần số tăng, nó chuyển đến vùng nhìn thấy và sau đó là đến vùng của bức xạ tia X. Sóng đàn hồi tần số rất cao đồng nhất với chuyển động nhiệt trong vật chất. Chúng ta có thể cảm nhận được các dao động đàn hồi tần số đủ thấp nằm trong vùng từ 16 đến 16000Hz. Có thể chia sóng âm thành các miền sau:

- Hạ âm..... <16Hz
- Nghe được..... 16-16000Hz
- Siêu âm..... 16000Hz- 10^{10} Hz
- Cực siêu âm..... $>10^{10}$ Hz

Sóng siêu âm ngày càng được sử dụng rộng rãi trong những lĩnh vực khác nhau của đời sống, khoa học và công nghệ. Dưới đây, là một số ứng dụng quan trọng nhất.

1. Siêu âm trong công nghiệp, nông nghiệp và y học

1.1. Dùng siêu âm để kiểm tra chất lượng sản phẩm

Ngày nay, nhờ những tiến bộ về khoa học kỹ thuật mà các thiết bị kiểm tra bằng siêu âm được phát triển rất đa dạng và trong nhiều lĩnh vực như: Siêu âm kiểm tra chiều dày, độ đồng đều, phát hiện khuyết tật trong kim loại và mối hàn kim loại; Siêu âm phát hiện vị trí, đường

kính cốt thép và chiều dày lớp bê tông bảo vệ trong bê tông cốt thép; Siêu âm kiểm tra độ đồng nhất, phát hiện vết nứt, đo chiều sâu vết nứt và tính cường độ của bê tông; Siêu âm kiểm tra chất lượng bê tông cọc khoan nhồi...

Hình 1: Hình ảnh một số thiết bị siêu âm



a: Máy siêu âm kiểm tra khuyết tật kim loại



c: Máy siêu âm kiểm tra chất lượng bê tông



b: Máy siêu âm kiểm tra chất lượng bê tông cọc khoan nhồi

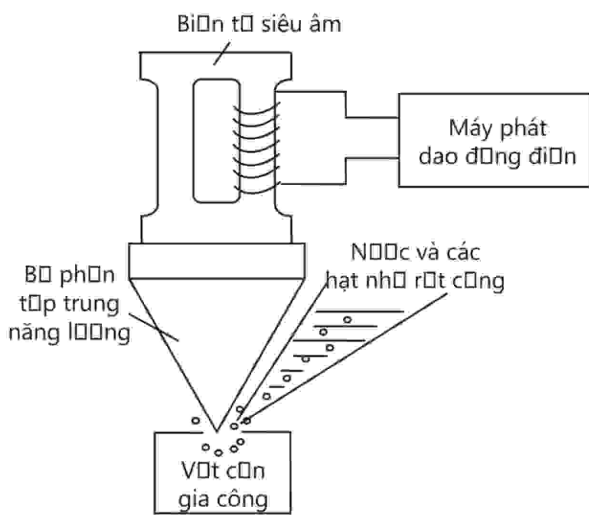
Nguyên lý kiểm tra bằng sóng siêu âm đó là sử dụng sóng siêu âm để tiến hành kiểm tra và thực hiện các phép đo. Hệ kiểm tra bằng siêu âm điển hình gồm bộ phát xung, biến tử, bộ phận hiển thị. Bộ phát xung là thiết bị điện tử có thể tạo ra xung điện áp, kích thích biến tử phát ra sóng siêu âm. Năng lượng âm được hình thành và lan truyền qua vật liệu ở dạng sóng. Khi có sự không liên tục (như nứt, rỗ) trên đường truyền

sóng, một phần năng lượng sẽ bị phản xạ trở lại từ bề mặt khuyết tật. Tín hiệu sóng phản xạ sẽ được chuyển thành tín hiệu điện nhờ biến tử và thể hiện trên màn hình. Thời gian truyền tín hiệu gắn liền với khoảng cách truyền qua. Từ thông tin nhận được này người ta có thể biết được vị trí, kích thước của khuyết tật và độ chắc đặc của vật liệu đang kiểm tra.

1.2. Gia công vật liệu cứng bằng siêu âm

Các vật liệu cứng thường rất giòn, nên việc gia công chúng rất khó khăn, nhất là với những hình dạng phức tạp và đòi hỏi độ chính xác cao. Người ta đã dùng sóng siêu âm để giải quyết các khó khăn đặt ra khi gia công các vật liệu nói

Hình 2. Sơ đồ nguyên lý gia công bằng siêu âm



trên. Có thể nói, đây là phương pháp rất độc đáo. Sóng siêu âm có thể khoan sâu vào các vật liệu cứng, tròn theo những hình dạng bất kỳ mang lại độ chính xác cao với quy trình tương đối đơn giản.

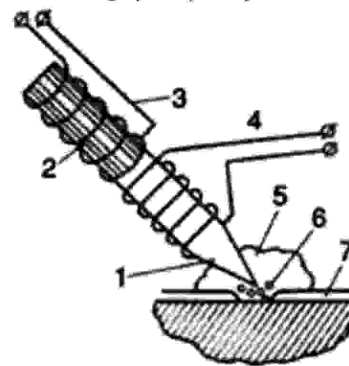
1.3. Hàn bằng siêu âm

Hàn bằng siêu âm tương tự như hàn ma sát. Các dao động siêu âm (tần số cỡ 20 kHz được kích thích bởi tín hiệu từ máy phát dao động điện công suất lớn) tác động vào một vùng nhỏ của mối hàn làm cho vùng cần hàn trở nên dẻo, sau đó dùng lực ép (cơ học hoặc khí nén) đẩy

các chi tiết cần nối lại với nhau tới khoảng cách tương tác của lực giữa các nguyên tử sẽ phát sinh mối liên kết chặt chẽ thành mối hàn có cấu trúc kim loại thay đổi ít nhất.

So với các phương pháp hàn khác, hàn bằng siêu âm có khả năng nối được các tấm rất mỏng (cỡ vài μm với các tấm rất dày, hàn được các chi tiết tinh vi, nhỏ bé mà không đòi hỏi làm sạch đặc biệt. Trong trường hợp này, sóng siêu âm vừa làm sạch, vừa hàn, vì vậy giảm được đáng kể điện năng tiêu thụ.

Hình 3. Sơ đồ nguyên lý máy hàn bằng siêu âm



- ① Đầu hàn (tập trung năng lượng);
- ② Nguồn siêu âm từ gião;
- ③ Cuộn nối với máy phát;
- ④ Cuộn nung mỏ hàn;
- ⑤ Chất hàn vữa;
- ⑥ Bột xam thực phá huỷ màng oxide;
- ⑦ Màng oxide

1.4. Tăng nhanh quá trình sản xuất bằng siêu âm

Suốt một thời gian dài, người ta cho rằng, một số chất lỏng không thể hòa tan vào nhau (nước với dầu hỏa, nước với thủy ngân, nước và nhiều dung môi hữu cơ quan trọng khác). Yêu cầu sản xuất của ngành công nghiệp thực phẩm, hóa dược, hóa học,... đòi hỏi phải chế tạo nhũ tương của các chất lỏng đó. Và, sóng siêu âm đã giúp giải quyết những khó khăn tưởng chừng như không thể đó.

Cho các chất lỏng không trộn lẫn được với nhau vào một bình chứa. Rất tự nhiên, giữa

chúng hình thành một ranh giới phân chia rất rõ ràng: Chất lỏng nặng hơn sẽ nằm phía dưới chất lỏng nhẹ hơn. Một chùm siêu âm công suất lớn tác động vào chúng sẽ gây ra hiệu ứng cavitation hoặc hiệu ứng gió âm, làm cho các chất lỏng bị xé ra. Kết quả là biên giới phân chia giữa chúng bị xóa bỏ, các phần tử nhỏ bé của các chất lỏng khuếch tán hoàn toàn vào nhau, nghĩa là, chúng đã trộn đều với nhau.

Nhờ sức mạnh của sóng siêu âm đối với các phản ứng hóa học mà nó được dùng rất phổ biến trong nhiều ngành kỹ thuật. Sóng siêu âm làm tăng quá trình polymer hóa, phá trùng hợp, quá trình kết tủa, đuổi khí, tinh thể hóa các đơn tinh thể và các quá trình tinh thể hóa trong luyện kim màu, luyện kim đen. Sóng siêu âm còn làm tăng nhanh quá trình nghiền nhỏ hạt trong công nghiệp luyện kim, quá trình chống lắng đọng ở thành bình. Trong công nghiệp hóa dược, sóng siêu âm có những đóng góp rất độc đáo, và gần như là không thể thay thế ở một số trường hợp.

1.5. Sấy khô bằng siêu âm

Trong kỹ thuật, sấy khô các loại vật liệu là một khâu không thể thiếu. Trước đây, có nhiều phương pháp sấy, song hầu hết là sấy nóng. Tuy nhiên, có nhiều loại vật liệu, vật phẩm không thể được sấy khô bằng nhiệt vì nhiệt độ cao sẽ làm thay đổi các tính chất hóa, lý của chúng. Vì vậy, sấy khô bằng siêu âm được lựa chọn như là một phương pháp tối ưu.

Sóng siêu âm có cường độ đủ mạnh làm các hạt của môi trường dao động với biên độ khá lớn. Các hạt môi trường tác động lên bề mặt vật liệu làm cho các phân tử ở đây dao động theo. Kết quả là, các liên kết yếu bị vỡ, cho nên hơi ẩm và hơi nước dễ dàng thoát ra ngoài.

1.6. Siêu âm trong công nghiệp thực phẩm

Trong các ngành công nghiệp thực phẩm, sóng siêu âm cũng được ứng dụng để bảo quản, nâng cao chất lượng sản phẩm. Dưới tác dụng của siêu âm có tần số, cường độ xác định trong một thời gian phù hợp, chất lượng của một số loại thực phẩm tăng lên rõ rệt. Ngoài ra, siêu âm còn dùng để tiệt trùng làm cho thực phẩm được

bảo quản lâu hơn với chất lượng cao hơn.

1.7. Siêu âm trong y học

Sóng siêu âm đã trở thành linh hồn của các thiết bị y học hiện đại. Từ việc chẩn đoán, điều trị đến phòng bệnh, sóng siêu âm đều có những đóng góp quan trọng.

Trước hết, sóng siêu âm cho phép chẩn đoán được các khối u trong các tổ chức của cơ thể ở giai đoạn đầu phát triển. Khi các khối u bắt đầu hình thành, các tế bào đó có sự thay đổi kích thước so với tế bào lành, làm thay đổi vận tốc của sóng âm khi truyền qua. Do sự không đồng nhất trong tổ chức cơ thể gây ra bởi các khối u này, người ta chiếu một chùm siêu âm định hướng rất hẹp vào cơ thể và ghi nhận tín hiệu phản xạ, từ đó xác định được khối u và vị trí cũng như mức độ phát triển của nó.

Sóng siêu âm còn dùng để điều trị bệnh rất hữu hiệu. Các nghiên cứu cho thấy, sóng siêu âm điều trị được khá nhiều bệnh, chẳng hạn như viêm dây thần kinh, viêm khớp, các bệnh về mắt (kể cả cận thị),... Hầu hết các bệnh viện lớn, hiện nay, đều có khoa trị liệu, trong đó đã dùng siêu âm để điều trị.

Trong phẫu thuật, sóng siêu âm cũng có những đóng góp đáng kể. Sóng siêu âm được dùng để phá hủy các tế bào của khối u mà không ảnh hưởng đến các tế bào lành. Một chùm sóng siêu âm rất hẹp có cường độ tương đối lớn (hàng chục W/cm^2) qua bộ phận tập trung năng lượng được tập trung vào một phạm vi rất nhỏ, nên sau một thời gian rất ngắn chúng có thể phá hủy các tế bào mang bệnh. Ngoài tác dụng chẩn đoán và điều trị bệnh, tác dụng sinh lý của sóng siêu âm, trong nhiều trường hợp còn có khả năng phòng bệnh một cách chủ động.

1.8. Siêu âm trong nông nghiệp

Một trong những khâu quan trọng nhất, quyết định năng suất của cây trồng là việc xử lý giống. Người ta đã dùng sóng siêu âm như là một phương pháp đặc biệt hiệu quả để xử lý hạt giống. Sóng siêu âm có thể làm thay đổi cấu trúc phân tử, thay đổi các thành phần của các acide amyli, đồng thời làm tăng nhanh quá trình

oxy hóa hạt giống. Vì thế, sóng siêu âm làm cho sản lượng của nhiều loại cây trồng tăng lên đáng kể. Ngoài ra, sóng siêu âm còn có thể xử lý đất trồng và cho kết quả rất tốt đẹp. Các nhà khoa học cho biết, có thể sóng siêu âm đã tác dụng lên vi sinh vật trong đất, kích thích chúng phát triển làm tỷ lệ mùn tăng lên, hoặc sóng siêu âm đã tiêu diệt các ký sinh trùng có hại cho cây trồng.

2. Siêu âm trong nghiên cứu biển và đại dương

2.1. Siêu âm và ngành địa chất biển

Trong lĩnh vực địa chất và thăm dò biển và đại dương, sóng âm có vai trò quan trọng, từ địa chất công trình, trinh sát mặt bằng, vẽ bình đồ bề mặt đáy biển, đến nghiên cứu cấu trúc phân lớp phức tạp của lớp vỏ trái đất nằm sâu dưới đáy đại dương, cũng như thăm dò các tài nguyên phong phú trữ trong lòng đáy đại dương.

Nhờ sóng siêu âm mà các nhà khoa học đã nghiên cứu đáy đại dương ở quy mô thế giới và phát hiện được rất nhiều điều kỳ lạ. Đó là những dải núi ngầm rất lớn dưới đáy Đại Tây Dương; những khe máng sâu, rộng chạy theo nhiều hướng khác nhau dưới đáy Thái Bình Dương, Ấn Độ Dương, Bắc Băng Dương,...

Bằng phương pháp định vị siêu âm, người ta biết được kết cấu phân lớp địa tầng đáy biển và phát hiện ra nhiều mỏ quặng, các mỏ nhiên liệu và nhiều tài nguyên có giá trị kinh tế cao.

2.2. Siêu âm với ngành cá biển

Gần đây, các thành tựu khoa học kỹ thuật tiên tiến đều được nghiên cứu, áp dụng vào nghề cá biển, trong đó, kỹ thuật mới hết sức hữu hiệu và có nhiều triển vọng là kỹ thuật siêu âm. Máy dò cá bằng siêu âm cho phép xác định vị trí, hướng di chuyển và vận tốc của đàn cá trong phạm vi hàng chục km. Ngoài ra, thiết bị này còn cho biết mật độ của đàn cá, tính chất gầy (béo) của từng loại cá. Nhờ vậy, sản lượng cá đã tăng lên đáng kể.

3. Siêu âm trong nghiên cứu khoa học

3.1. Tương tác phonon - electron

Vật rắn có cấu tạo tinh thể bền vững. Các electron liên kết với mạng tinh thể ở những mức

độ khác nhau, chỉ có các electron trong vùng dẫn (electron dẫn) tham gia tương tác với sóng đàn hồi (tức phonon). Khi có một chùm siêu âm vào tinh thể (bán dẫn, chẳng hạn) sẽ làm phát sinh tương tác giữa phonon và electron. Kết quả là có sự trao đổi năng lượng giữa chùm siêu âm và tinh thể bán dẫn thông qua trao đổi năng lượng giữa các phonon và electron. Nói cách khác, năng lượng của chùm siêu âm bị tiêu hao do sự hấp thụ của tinh thể bán dẫn. Nếu có thể điều khiển quá trình trao đổi năng lượng này theo hướng electron sẽ cung cấp thêm năng lượng cho phonon làm cho sóng siêu âm không bị hấp thụ, mà ngược lại được tăng cường thêm. Trong trường hợp này, tương tác phonon - electron đã phát xạ phonon. Một môi trường có khả năng phát xạ phonon do tương tác phonon - electron gọi là môi trường khuếch đại trực tiếp sóng siêu âm. Hiệu ứng này là cơ sở để chế tạo máy khuếch đại trực tiếp sóng siêu âm, một phương tiện rất thuận lợi để nghiên cứu cấu trúc của môi trường vật rắn nói chung. Hầu hết các thông số quan trọng của chất bán dẫn đều liên quan đến hệ số khuếch đại trực tiếp sóng siêu âm.

3.2. Tương tác photon-phonon. Máy phát siêu âm bằng laser

Laser là một thành tựu to lớn của khoa học kỹ thuật hiện đại nói chung và âm lượng tử nói riêng. Dùng một chùm laser chiếu vào một môi trường vật chất để tạo ra tương tác của photon với môi trường ấy. Thực chất, photon sẽ tương tác với các dao động mạng tinh thể (tức tương tác photon - phonon) gây ra hiện tượng *tán xạ tổ hợp*. Trong tương tác này, các photon không những không hấp thụ phonon mà còn phát xạ phonon nữa (hiện tượng khuếch đại phonon trong môi trường). Kết quả tạo ra nguồn phát phonon ở vùng tần số cực siêu âm với cường độ khá cao. Như vậy, tương tác photon - phonon cho phép chế tạo các máy phát sóng cực siêu âm đã tạo ra khả năng nghiên cứu các hiệu ứng phi tuyến của môi trường bằng cả hai phương pháp - quang học (quang phi tuyến) và âm học (âm phi tuyến). Đó là sự kết hợp chặt chẽ giữa quang

lượng tử và âm lượng tử tạo ra những công cụ hữu hiệu để nghiên cứu cấu trúc vật chất. Các máy phát phonon tần số cao, cường độ lớn đã trở thành sản phẩm quý giá trong nghiên cứu khoa học, một phần cũng do sự kết hợp giữa hai lĩnh vực này.

4. Dùng siêu âm để tổng hợp các vật liệu mới

4.1. Tổng hợp vật liệu hệ vô cơ - polymer

Mặc dù không được sử dụng thông thường như các vật liệu hữu cơ, các polymer với thành phần chủ yếu là vô cơ có một số tính chất đặc biệt đã làm cho chúng có ý nghĩa về thương mại. Theo một nghiên cứu, siêu âm sinh ra một gia tốc đáng kể trong việc trùng hợp cation của hợp chất cyclic siloxanes để chế ra các loại nhựa dẻo silicon rất quan trọng. Các polymer được chế tạo dưới tác động siêu âm đã hạn chế sự đa phát tán, có trọng lượng phân tử lớn hơn so với các polymer được chế tạo trong các điều kiện thông thường. Trong quá trình tăng sự trùng hợp, acid xúc tác tác động càng nhiều càng dẫn đến phản ứng đồng nhất, vì vậy, chiều dài chuỗi polymer giảm đi. Tuy nhiên, sự thoái biến do siêu âm ảnh hưởng đến chiều dài chuỗi polymer cần được nghiên cứu kỹ lưỡng trong suốt giai đoạn cuối cùng của phản ứng trùng hợp.

4.2. Tổng hợp vật liệu hệ hữu cơ - polymer: vinyl polymer

Đa số các polymer hữu cơ không được tổng hợp từ các monomer chứa tương tác liên kết đôi (chẳng hạn như olefins và vinyl monomers), mà phải trải qua sự phát triển chuỗi hoặc các phản ứng phụ. Phương pháp tổng hợp đơn giản nhất là bắt đầu từ các gốc tự do trong dung dịch. Các gốc tự do được tạo ra từ hiệu ứng hình thành lỗ hổng do tác động của sóng siêu âm trong chất lỏng.

Siêu âm tạo ra các gốc tự do cần thiết cho phản ứng trùng hợp ban đầu. Điều này có thể xảy ra theo hai hướng. Sự tác động của siêu âm lên các monomer tinh khiết làm phát sinh các gốc tự do thông qua sự phân hủy bên trong bọt khí hoặc ở bề mặt phân giới của nó; hoặc là sự phân hủy của các chất phụ gia ban đầu có thể

làm tốc độ phản ứng tăng nhanh hơn. Khi tạo được nhiệt độ, áp suất hơi dung môi và cường độ siêu âm phù hợp, người ta có thể phán đoán và điều khiển tốc độ của các phản ứng ban đầu. Tốc độ phản ứng ban đầu tỉ lệ với nồng độ monomer và phụ thuộc vào căn bậc hai của cường độ siêu âm. Trọng lượng nguyên tử cuối cùng thay đổi nghịch đảo với nồng độ monomer và tỉ lệ nghịch với căn bậc hai của cường độ siêu âm. Về cơ bản, tốc độ ban đầu tỉ lệ với số lượng các vị trí sinh lỗ hổng có thể có, nghĩa là phụ thuộc vào cường độ sóng siêu âm ban đầu.

4.3. Tổng hợp vật liệu sinh học

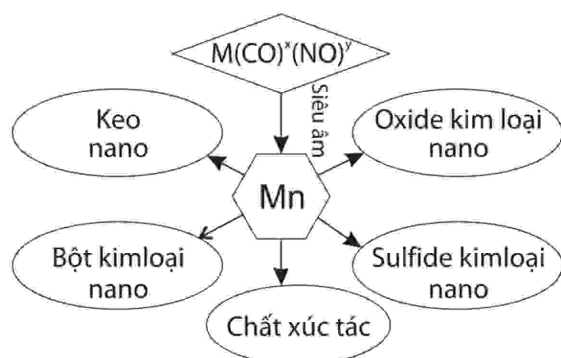
Một ứng dụng quan trọng khác của sóng siêu âm trong phản ứng hóa học là tổng hợp vật liệu sinh học, đáng chú ý nhất là các tiểu bào tử protein. Mặc dù, ảnh hưởng về mặt hóa học của siêu âm vào các dung dịch có nước đã được nghiên cứu trong nhiều năm nay, nhưng tác động siêu âm trong môi trường có nước đối với sự tổng hợp vật liệu sinh học mới được quan tâm gần đây, đặc biệt đối với polymer cao cấp. Cơ chế gây ra sự hình thành tiểu cầu tử là sự tổ hợp của hai hiện tượng âm học: Sự chuyển thành thể sữa và sự hình thành lỗ hổng. Sự chuyển thể sữa dưới tác động của siêu âm tạo ra sự phân tán cực nhỏ của dung dịch protein cần thiết để hình thành các tiểu cầu tử có chứa protein. Tuy nhiên, chỉ có sự hình thành thể sữa sẽ không đủ để sinh ra các tiểu cầu tử có thời gian sống dài. Thời gian sống dài của các tiểu cầu tử do sự liên kết chéo của các lớp protein dưới tác động của siêu âm.

4.4. Tổng hợp vật liệu vô cơ có cấu trúc nano

Các dung dịch rắn được chế tạo từ các thành phần có kích thước nano (sau đây gọi tắt là vật liệu nano) sở hữu nhiều tính chất khác biệt so với các các dung dịch rắn chế tạo theo phương pháp thông thường. Việc tổng hợp các vật liệu nano bao gồm các kỹ thuật pha khí, các phương pháp pha lỏng và các phương pháp hỗn hợp pha.

Hơn 10 năm trước, các phản ứng hóa học

Hình 4. Tổng hợp các vật liệu nano bằng phương pháp hóa sử dụng siêu âm công suất



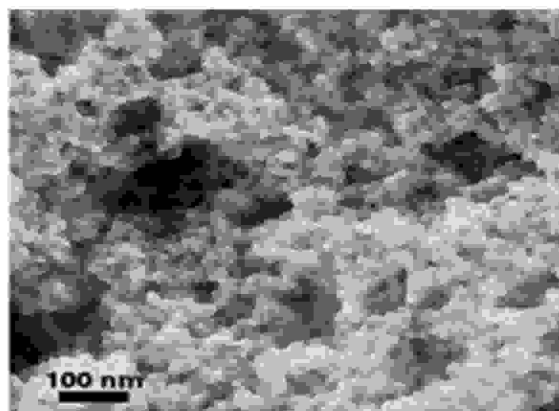
của các hợp chất hữu cơ kim loại dễ bay hơi dưới tác động của siêu âm đã được khai thác như một phương pháp thông thường để tổng hợp các vật liệu nano (hình 4).

Sử dụng các điều kiện mạnh bên trong bọt khí sinh lỗ hổng, Suslick và đồng sự đã tạo ra các trạng thái khác nhau của cấu trúc nano và thông thường của các kim loại vô định hình, hợp kim và đã kiểm chứng hoạt tính xúc tác của chúng. Các hợp chất hữu cơ kim loại dễ bay hơi phân hủy bên trong các bọt khí nổ tung, kết quả là các nguyên tử kim loại kết tụ để hình thành các vật liệu có cấu trúc nano.

4.5. Tổng hợp kim loại vô định hình, hợp kim, chất keo cấu trúc nano

Truyền sóng siêu âm vào các dung dịch chứa các hợp chất hữu cơ kim loại hoạt động dễ bay hơi làm hình thành sự kết tụ xốp ở mức cao của các đám kim loại vô định hình kích thước nano. Kỹ thuật hóa học dưới tác động của siêu âm (hóa siêu âm) được sử dụng để tổng hợp các hợp kim có cấu trúc nano. Suslick và các đồng sự lần đầu tiên chứng minh được điều này đối với hợp kim Fe-Co, với các nguyên liệu ban đầu là $Fe(CO)_5$ và $Co(CO)_8$. Hỗn hợp Fe-Co có thể điều khiển được dễ dàng bằng cách thay đổi tỉ số nồng độ dung dịch của các chất ban đầu, các hợp kim thay đổi thành phần Fe tinh khiết đến Co tinh khiết thu được dễ dàng và đồng nhất kích thước nano. Như Fe, Co và hợp kim Fe-Co được chế tạo bằng phương pháp siêu âm ban

Hình 5. Sắt vô định hình được tổng hợp bằng cách phân hủy $Fe(CO)_5$



đầu có trạng thái vô định hình. Các tính chất xúc tác của sóng siêu âm để chế tạo Fe-Co, hợp kim Fe-Co trong phản ứng cyclohexane đem lại các hiệu ứng thú vị: hợp kim Fe-Co tạo ra sản phẩm benzen nhiều hơn Fe-Co tinh khiết và bị nhiễm độc do một lượng nhỏ C bám trên bề mặt. Sự tồn tại các đám kết tụ có kích thước nano trong các vật liệu được tổng hợp bằng phương pháp hóa siêu âm đưa ra giả thuyết là có khả năng các hạt vật liệu bị bẫy trước khi chúng kết tụ. Các vật liệu sắt từ dưới dạng keo được đặc biệt quan tâm nhờ những ứng dụng quan trọng của chúng trong kỹ thuật, chẳng hạn như dung dịch sắt.

Các chất nhựa có sự phân bố cỡ hạt tương đối hẹp (khoảng một vài nm) và ở trạng thái siêu thuận từ. Sự phân tán của sắt pentacarbonyl dưới tác động của siêu âm với sự có mặt của chất ổn định để chế tạo chất keo từ các hạt sắt có kích thước nano. Các nghiên cứu về từ cho thấy các hạt sắt dưới dạng keo ở trạng thái siêu thuận từ với mật độ từ hóa bão hòa có giá trị đáng kể $101 \text{ emu/g (Fe) ở } 290\text{K}$ ■

Tài liệu tham khảo:

1. Võ Duy Dân (2010), Vật liệu điện môi và ứng dụng, Nxb Đại học Huế.
2. Nguyễn Đăng Tạc (1978), Siêu âm và ứng dụng, Nxb Khoa học và Kỹ thuật, Hà Nội
3. Jin Ho Bang, Kenneth S. Suslick (2010), "Applications of Ultrasound to the Synthesis of Nanostructured Materials", *Advanced Materials* (22), pp. 1039-1059.