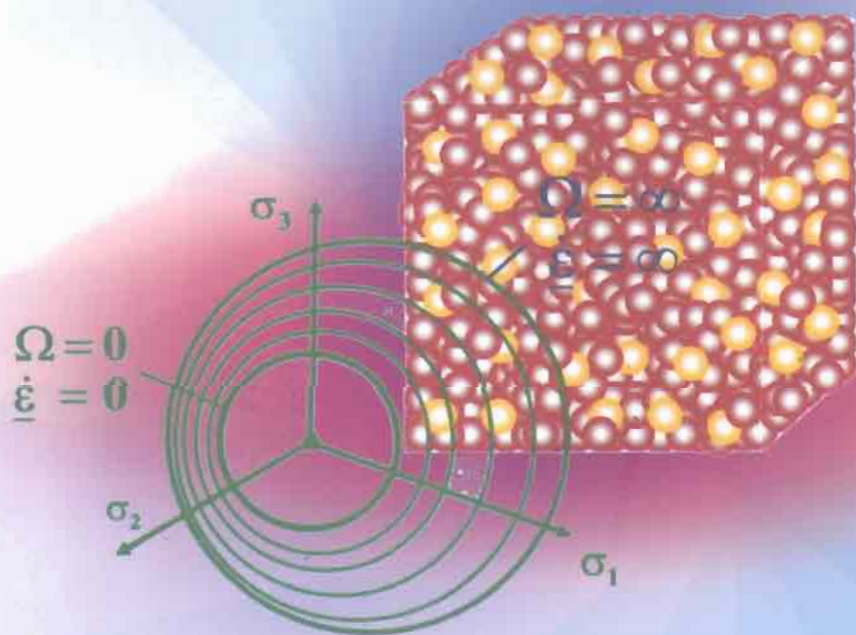


TRƯỜNG ĐẠI HỌC BÁCH KHOA HÀ NỘI  
NGUYỄN TRỌNG GIẢNG

# THUỘC TÍNH CƠ HỌC CỦA VẬT RẮN



NHÀ XUẤT BẢN KHOA HỌC VÀ KỸ THUẬT



TRƯỜNG ĐẠI HỌC BÁCH KHOA HÀ NỘI

NGUYỄN TRỌNG GIẢNG

# THUỘC TÍNH CƠ HỌC CỦA VẬT RẮN



NHÀ XUẤT BẢN KHOA HỌC VÀ KỸ THUẬT  
HÀ NỘI

60-605-531 113-35-03  
KHKT-04

## LỜI NÓI ĐẦU

---

Xây dựng cơ sở hạ tầng và phát triển kinh tế - xã hội nói chung đòi hỏi cung cấp nhiều loại vật liệu khác nhau với những tính năng sử dụng thích hợp. Do vậy, trong quá khứ và tương lai vật liệu bao giờ cũng là một trong những yếu tố thiết yếu, quyết định sự phát triển của công nghiệp đối với mọi quốc gia. Hiện nay tại các nước phát triển, vật liệu vẫn luôn là hướng nghiên cứu ưu tiên, bởi lẽ nó có khả năng tạo đột phá mang tính chất cách mạng cho công nghiệp. Chiến lược khoa học và công nghệ của nước ta từ nay cho đến những thập niên đầu của thế kỷ 21 cũng đã xác định rõ công nghệ vật liệu là một trong những định hướng ưu tiên phát triển.

Bất kỳ một vật liệu nào được ứng dụng trong thực tế sản xuất và đời sống cũng là kết quả của quá trình nghiên cứu trên cơ sở liên kết chặt chẽ giữa Hoá học (công nghệ chế tạo) vật liệu, Vật lý vật liệu và Cơ học vật liệu. Tính năng sử dụng và tuổi thọ của chi tiết máy, công trình, ... không chỉ phụ thuộc vào công nghệ chế tạo vật liệu mà còn được quyết định bởi quá trình xử lý cơ, nhiệt nhằm tối ưu cấu trúc, cơ-lý tính.

Cơ học vật rắn biến dạng nghiên cứu mối quan hệ giữa ứng xử của vật liệu và tác động cơ học từ bên ngoài lên nó, cũng như sự biến đổi hành vi của vật liệu trong quá trình tác động cơ học. Mối quan hệ nêu trên được thể hiện cụ thể dưới dạng các phương trình toán lý biểu diễn sự tương tác giữa ứng suất (tác động) và biến dạng (hành vi). Mối tương tác này lại được chi phối bởi sự biến đổi cấu trúc vi mô của vật liệu trong quá trình biến dạng thông qua các biến nội.

Cuốn sách **"Thuộc tính cơ học của vật rắn"** có nội dung đề cập đến các vấn đề nêu trên theo phương pháp tiếp cận "vi mô", dựa trên các nguyên lý cơ bản của cơ học và nhiệt động học của môi trường liên tục. Đây cũng là phương pháp tiếp cận được áp dụng phổ biến trong mô hình hoá thuộc tính cơ học của vật liệu. Các mô hình ứng xử của vật liệu thiết lập theo phương pháp tiếp cận này đang được áp dụng rộng rãi trong tính toán kết cấu và mô phỏng số các quá trình biến dạng tạo hình trong thực tế.

Sách được kết cấu thành sáu chương. Chương 1 trình bày khái quát về cấu trúc của vật liệu và cơ chế vật lý của biến dạng dẻo. Chương 2 nhắc lại các khái niệm cơ bản của cơ học môi trường liên tục và nhiệt động học của các quá trình không thuận nghịch, là phương tiện lý thuyết giúp cho bạn đọc dễ dàng theo dõi các chương tiếp theo. Chương 3 trình bày phân loại thuộc tính của vật rắn, xác định trên cơ sở thực nghiệm nhận dạng và được minh họa bởi các mô hình tương tự. Các chương tiếp theo dành cho mô hình hoá các dạng thuộc tính lưu biến của vật rắn. Các chương này được kết cấu tương tự như nhau, gồm : miễn ý nghĩa và ứng dụng, khái quát về hiện tượng quan sát được từ thực nghiệm, phương pháp tổng quát thiết lập mô hình thuộc tính dựa trên cơ sở nhiệt động học, xác định và nhận dạng các mô hình thuộc tính riêng. Theo sơ đồ kết cấu này, chương 4 đề cập đến các thuộc tính đàn hồi, đàn nhiệt và đàn nhớt tuyến tính. Chương 5 trình bày thuộc tính dẻo tức thời, với các mô hình được thiết lập xuất phát từ hàm thế năng tiêu hao liên kết với điều kiện dẻo. Chương này cũng nhấn mạnh đến dẻo hoá bền dị hướng, cho phép mô tả ứng xử của vật liệu trong trường hợp chất tải chu kỳ, có vai trò quan trọng trong việc tính toán dự báo phá hủy của vật liệu do mỏi. Chương 6 xử lý các vấn đề tương tự chương 5, nhưng áp dụng cho kim loại và hợp kim chịu tải ở nhiệt độ trung bình và nhiệt độ cao. Ở miền nhiệt độ này, vật liệu biểu hiện thuộc tính dẻo nhớt (dẻo phụ thuộc thời gian).

Với kết cấu và nội dung nêu trên cuốn sách có thể sử dụng đồng thời (theo trình độ yêu cầu) làm tài liệu giảng dạy cho các đối tượng là sinh viên đại học, sinh viên cao học thuộc hoặc liên quan đến lĩnh vực cơ học vật liệu, sau khi đã được trang bị một cách cơ bản kiến thức về cơ học môi trường liên tục. Cuốn sách cũng có thể dùng làm tài liệu tham khảo cho nghiên cứu sinh và nghiên cứu viên trong lĩnh vực cơ học vật liệu nói chung.

Đây là lần đầu tiên cuốn sách "**Thuộc tính cơ học của vật rắn**" ra mắt bạn đọc, do đó khó có thể tránh khỏi có những khiếm khuyết nhất định. Tác giả xin chân thành cảm ơn mọi ý kiến nhận xét, góp ý gửi về địa chỉ : Bộ môn Cơ học biến dạng và Cán, Kéo kim loại. Khoa Luyện kim và Công nghệ vật liệu, Trường Đại học Bách khoa Hà Nội.

**Tác giả**

## MỤC LỤC

---

	Trang
Lời nói đầu	3
<b>Chương 1. CÁC KHÁI NIỆM CƠ BẢN VỀ CƠ CHẾ VẬT LÝ CỦA BIẾN DẠNG ĐÈO</b>	
1.1. Kim loại và hợp kim	13
1.1.1. Cấu trúc	13
1.1.1.1. Các khái niệm về tinh thể học	13
1.1.1.2. Khuyết tật mạng tinh thể	18
1.1.2. Cơ chế vật lý của biến dạng	22
1.1.2.1. Biến dạng đàn hồi	22
1.1.2.2. Biến dạng dư	22
1.1.2.3. Giới hạn đàn hồi	26
1.1.2.4. Biến dạng của đa tinh thể	28
1.1.2.5. Tính không ổn định cấu trúc tổ chức vi mô	31
1.2. Một số vật liệu phi kim	32
1.2.1. Polime	32
1.2.1.1. Cấu trúc	32
1.2.1.2. Cơ chế vật lý của biến dạng	36
1.2.2. Vật liệu hạt : bê tông	37
1.2.2.1. Cấu tạo của bê tông	37
1.2.2.2. Cơ chế vật lý của biến dạng và phá hủy	39
<b>Chương 2. CÁC KHÁI NIỆM CƠ SỞ CỦA CƠ HỌC VÀ NHIỆT ĐỘNG HỌC CỦA MÔI TRƯỜNG LIÊN TỤC</b>	
2.1. Nguyên lý công ảo	41
2.1.1. Chuyển động ảo và công suất ảo	41
2.1.2. Hệ tọa độ qui chiếu và đạo hàm vật chất	42

2.1.3. Nguyên lý công suất ảo	43
2.2. Phương pháp công ảo	43
2.2.1. Công suất ảo	43
2.2.1.1. Chọn chuyển động ảo-Lý thuyết gradient bậc một	43
2.2.1.2. Công suất ảo của nội lực	44
2.2.1.3. Công suất ảo của ngoại lực	46
2.2.1.4. Công suất ảo động lượng	46
2.2.2. Phương trình cân bằng	46
2.2.3. Chuyển vị và biến dạng	47
2.2.3.1. Giả thiết chuyển vị nhỏ và biến dạng nhỏ	47
2.2.3.2. Giả thiết chuyển vị lớn và biến dạng lớn	49
2.2.4. Bất biến của tenxơ	52
2.3. Các yếu tố cơ bản của nhiệt động học	55
2.3.1. Các định luật bảo toàn - Nguyên lý nhiệt động học thứ nhất	55
2.3.2. Entropy - Nguyên lý nhiệt động học thứ hai	57
2.4. Phương pháp trạng thái cục bộ	58
2.4.1. Biến trạng thái	58
2.4.1.1. Các biến quan sát được	58
2.4.1.2. Các biến nội	59
2.4.2. Thế năng nhiệt động học - Các định luật trạng thái	60
2.4.3. Năng lượng tiêu hao - Các định luật bổ sung	62
2.4.3.1. Tiêu hao cơ năng và tiêu hao nhiệt năng	62
2.4.3.2. Thế năng tiêu hao	62
2.4.3.3. Quan hệ đối xứng Onsager	66
2.4.3.4. Phân tách năng lượng tiêu hao	66
2.4.3.5. Các hiện tượng tiêu hao tức thời	67
2.5. Một số khái niệm trong nhiệt động học	67
2.5.1. Định luật Fourier	67
2.5.2. Phương trình nhiệt	68
2.5.2.1. Truyền nhiệt	69
2.5.2.2. Nung đoạn nhiệt	69

**Chương 3. NHẬN DẠNG VÀ PHÂN LOẠI THUỘC TÍNH  
LƯU BIẾN CỦA VẬT RẮN THỰC**

3.1. Phương pháp hiện tượng tổng thể	71
3.2. Kỹ thuật thực nghiệm và nhận dạng mô hình thuộc tính	73
3.2.1. Các thí nghiệm đặc trưng	73
3.2.1.1. Thí nghiệm biến cứng kéo và nén đơn	74
3.2.1.2. Thí nghiệm rão kéo và nén	74
3.2.1.3. Thí nghiệm nối tăng suất kéo và nén	75
3.2.1.4. Thí nghiệm lặp hoá bền - nối	75
3.2.1.5. Thí nghiệm chu kỳ	76
3.2.1.6. Thí nghiệm phá huỷ	77
3.2.1.7. Thí nghiệm đa chiều	77
3.2.2. Kỹ thuật thực nghiệm	77
3.2.2.1. Thiết bị thử nghiệm	77
3.2.2.2. Kỹ thuật đo các biến đặc trưng	80
3.2.2.3. Mẫu thử nghiệm	84
3.2.3. Phương pháp nhận dạng mô hình thuộc tính	86
3.2.3.1. Thiết lập mô hình dưới dạng phương trình giải tích	87
3.2.3.2. Các phương pháp số nhận dạng mô hình	90
3.3. Sơ đồ hoá các thuộc tính lưu biến thực	92
3.3.1. Mô hình tương tự	92
3.3.2. Chất lỏng nhớt	94
3.3.3. Vật rắn đàn hồi	95
3.3.3.1. Đàn hồi lý tưởng	95
3.3.3.2. Đàn hồi nhớt	96
3.3.4. Vật rắn dẻo tức thời	97
3.3.4.1. Vật rắn cứng-dẻo lý tưởng	97
3.3.4.2. Vật rắn đàn dẻo lý tưởng	97
3.3.4.3. Vật rắn đàn-dẻo biến cứng	98
3.3.5. Vật rắn dẻo nhớt	100
3.3.5.1. Dẻo nhớt lý tưởng	100
3.3.5.2. Đàn-dẻo nhớt lý tưởng	100
3.3.5.3. Đàn-dẻo nhớt biến cứng	101



3.3.6. Đặc trưng hoá bền	102
3.3.6.1. Biến cứng đẳng hướng	102
3.3.6.2. Biến cứng động	103
3.3.6.3. Hiệu ứng Bauschinger	104
3.3.6.4. Hiệu ứng chất tải chu kỳ	104
3.4. Mô hình hoá lực ma sát	108
3.4.1. Mô hình Coulomb	108
3.4.1. Mô hình màng giới hạn	109

#### **Chương 4. ĐÀN HỒI, ĐÀN NHIỆT VÀ ĐÀN NHỚT TUYẾN TÍNH**

4.1. Đàn hồi	111
4.1.1. Miền ý nghĩa và ứng dụng	111
4.1.2. Thiết lập mô hình	112
4.1.2.1. Thế năng nhiệt động học	112
4.1.2.2. Đàn hồi tuyến tính đẳng hướng	113
4.1.2.3. Đàn hồi đối xứng trục giao	114
4.1.2.4. Đàn hồi đẳng hướng ngang	116
4.1.3. Nhận dạng mô hình	118
4.1.3.1. Các phương pháp tĩnh	118
4.1.3.2. Phương pháp động	120
4.2. Đàn nhiệt	121
4.2.1. Thiết lập mô hình thuộc tính	121
4.2.2. Nhận dạng mô hình thuộc tính	122
4.2.2.1. Phương pháp so sánh độ cứng	122
4.2.2.2. Phương pháp ứng suất nhiệt	123
4.3. Đàn nhớt	125
4.3.1. Miền ý nghĩa và ứng dụng	125
4.3.2. Phương pháp thiết lập nhiệt động học	126
4.3.2.1. Vật rắn Kenvin-Voigt	126
4.3.2.2. Vật rắn Maxwell	128
4.3.3. Thiết lập mô hình theo phương pháp phiếm hàm	131
4.3.3.1. Hàm dãn	131
4.3.3.2. Hàm nở	133

4.3.3.3. Mô hình thuộc tính ba chiều	134
4.3.3.4. Nhận dạng	134

## Chương 5. DÈO TỨC THỜI

5.1. Miên ý nghĩa và ứng dụng	137
5.2. Khái quát về hiện tượng	138
5.2.1. Hành vi một chiều	138
5.2.1.1. Giới hạn đàn hồi	138
5.2.1.2. Chảy dẻo, biến cứng và ngưỡng dẻo	139
5.2.1.3. Các quan hệ thuộc tính	141
5.2.2. Hành vi ba chiều	144
5.2.2.1. Điều kiện dẻo đẳng hướng	146
5.2.2.2. Điều kiện dẻo dị hướng	150
5.3. Phương pháp tổng quát thiết lập các mô hình thuộc tính	152
5.3.1. Giả thiết phân chia biến dạng	152
5.3.2. Chọn biến nhiệt động học	153
5.3.3. Mật chất tải và thế năng tiêu hao	155
5.3.3.1. Mật chất tải và điều kiện chất tải-dỡ tải	155
5.3.3.2. Dẻo không liên kết	158
5.3.3.3. Điều kiện tương thích - Biểu thức của hệ số nhân dẻo	160
5.3.3.4. Dẻo liên kết - Vật liệu tiêu chuẩn mở rộng	161
5.4. Các định luật chảy dẻo	162
5.4.1. Các định luật khác nhau của điều kiện dẻo và định luật chảy dẻo	162
5.4.2. Mô hình hoá bên đẳng hướng	163
5.4.2.1. Mô hình Prandtl-Reuss	164
5.4.2.2. Các mô hình chảy dẻo biến cứng đẳng hướng khác	169
5.4.3. Mô hình biến cứng động tuyến tính	170
5.4.3.1. Biến cứng động Prager	170
5.4.3.2. Mô hình Prager-Ziegler	175
5.4.4. Mô hình chảy dẻo cho chất tải chu kỳ hay bất kỳ	177
5.4.4.1. Mô hình hoá với các hệ số đặc trưng cập nhật	177
5.4.4.2. Mô hình đa lớp và phương pháp thiết lập Mroz	179
5.4.4.3. Mô hình hoá bên phi tuyến	182