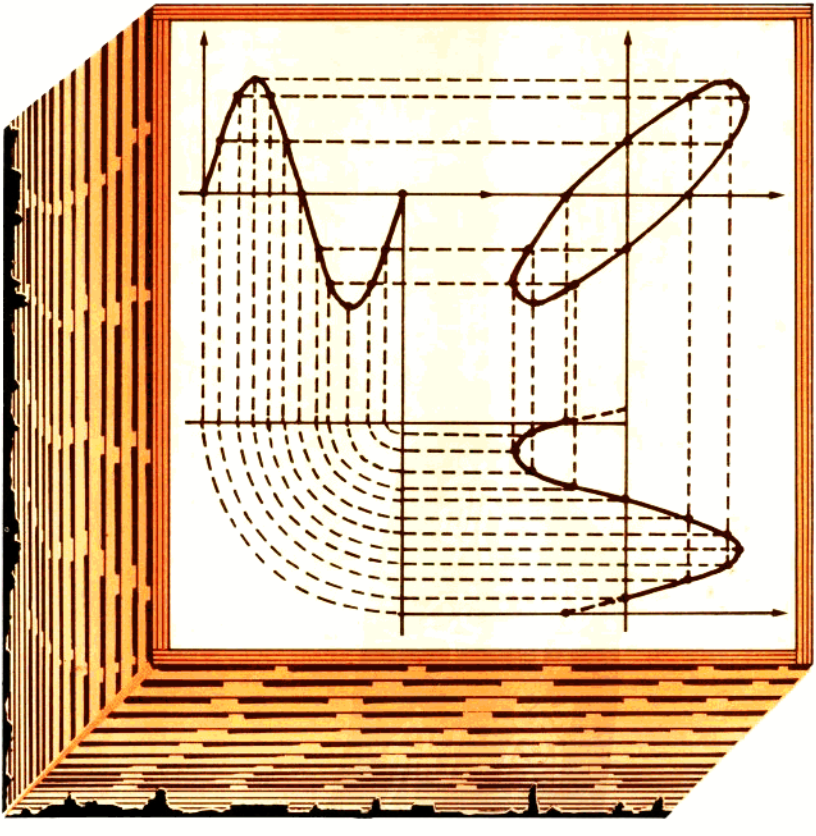
大 學 用 書

金屬物理性能及試驗

陳鴻賓・高道德　編著

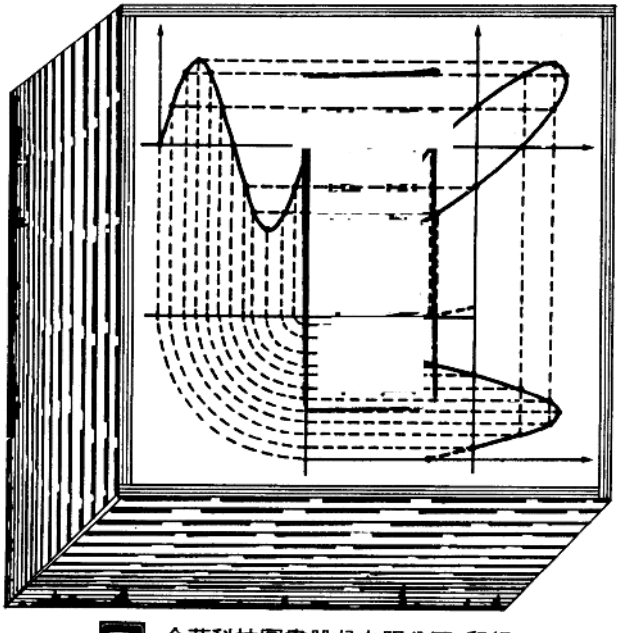


全華科技圖書股份有限公司 印行

大學用書

金屬物理性能及試驗

陳鴻賓・高道德　編著



全華科技圖書股份有限公司 印行

全華圖書　法律顧問：陳培豪律師

金屬物理性能及試驗

陳鴻賓 高道德 編著

出版者　全華科技圖書股份有限公司
地址／台北市龍江路76巷20-2號2樓
電話／5811300（總機）
郵撥帳號／0100836－1號
發行人　陳本源
印刷者　華一彩色印刷廠

門市部　全友書局（黎明文化大樓七樓）
地址／台北市重慶南路一段49號7樓
電話／3612532●3612534

定價　新臺幣 260 元
初版／75年11月

行政院新聞局核准登記證局版台業字第〇二二三號

版權所有　翻印必究

圖書編號 0111214

序言

本書取名爲"金屬物理性能及試驗"，這裡所用"物理性能"一詞是狹義的，不包含力學性能（又稱機械性能，Mechanical Properties）在內。

書中所涉及到的幾種物理性能，諸如：彈性、內耗、膨脹、熱學性能、電性和磁性等，從實用角度看，不僅是某些工業金屬材料的重要使用性能，而且，由於它們對金屬組織或組織變化的敏感性*，以及測量上的簡便性，亦都可以用於研究組織及其變化，從而使這些性能的測試成爲研究金屬的一種工具。各章大都注意從這個角度進行論述。雖然有的章節也較多的顧及到工程材料問題，但一般說來，本書注重物理性能的研究方法及其應用問題，爲此又專門寫了"物性研究方法的選擇及其綜合運用"一章（第八章），這是第一點要說明的。

第二，爲了使此書有較廣泛的適應性，對涉及這些性能的物理基礎，也作了較詳細的論述。其中，尤其是"金屬中的內耗及試驗"一章，作者根據自己多年研究中的體會，進行了較系統的闡述。因爲金屬的內耗研究，不僅是提供了一種性能和測試方法，而其本身包含着許多與實驗結果的解釋和分析相關的理論問題，并深入了解，這些理論無法運用這一試驗手段。並注意到，有關它的一些概念，實驗結果和理論，已屬於廣義金屬學的基本知識。這一章所佔篇幅最大，也可以說是本書的另一個特點。

* 彈性性能較特殊，詳見第一章。

第三，基於本書側重解決實驗問題的考慮，除在各章中都有"試驗方法"及"應用"的內容之外，又加寫"試驗數據及其處理"一章（第七章），從物理性能試驗的實用角度，對試驗誤差以及試驗結果的表達技術等進行了論述，相信這部份內容，不僅對金屬研究者，而且對從事其它領域研究的實驗工作者也有參考價值。

下面，試圖對金屬物理性能試驗方法在金屬材料科學中的地位和作用，談談個人的看法。

金屬材料科學所研究的內容，也許可以說不外乎化學成份、製程、組織、性能以及它們之間關係的研究。簡言之，化學成份是基本物質條件，製程是手段，性能（包括使用性能和可加工性）是目的。而組織（structure），則可以說是關鍵。合金化學成份之設計，製程之改進，無不以直接或間接獲得某種組織爲目標或依據；而所需性能之獲得，則是靠特定的組織來保證的。

從金屬實驗研究者的立場來看，最難以捕捉的也是金屬的組織。如所週知，不僅是金屬晶體結構，更重要的是各種晶體缺陷的種類、多少和分佈是決定金屬性能的主要因素。所謂晶體缺陷，包括點缺陷（空位、固溶雜質原子）、線缺陷（差排）和面缺陷（晶界、亞晶界）。目前已有的直接觀測技術，雖然可以觀察到線缺陷和面缺陷（無疑這種直接觀察是非常重要的），但對它們的動態特性（例如差排與間隙原子的相互作用，晶界的黏滯性流動特性等）無法獲知；而對點缺陷，如碳、氮等間隙原子的多少和分佈，則完全觀察不到，可是它們對鋼料性能（無論使用性能和可加工性）的影響却是極爲重大；此外，同素異構轉變，過飽合固溶體的時效過程等等，雖然用直接觀測法（電子顯微鏡、X光結構分析）可以研究，但仍不夠全面，而且複雜、昂貴。對於這類問題，採用物理性能試驗方法，可以解決，而所用設備和操作也比較簡單。

可見，用物理性能方法研究金屬組織或其轉變，有時是必要的，不可替代的，有時則因之簡便，而爲最合理的。但一般說來

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.

，物理性能方法所獲得的情報（ information ）是間接的，須進行綜合分析才能得出結論。

因此，將之與直接觀測方法配合使用，以及多種物理性能測試方法的配合使用，將是全面掌握金屬組織及其變化的根本途徑，在金屬材料科學的研究、應用和發展中將有越來越重要的地位和作用。

本書由高道德先生和本人合作完成，高先生編寫第五、六章，其餘各章由本人編寫。文中有不當之處，望讀者指正。

陳鴻賓

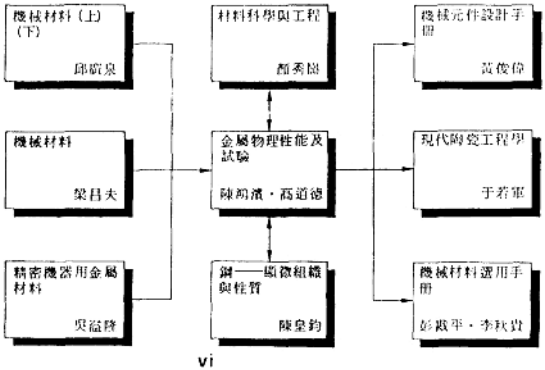
於高雄

編輯部序

「系統編輯」是我們的編輯方針，我們所提供給您的，絕不只是一本書，而是關於這門學問的所有知識，它們由淺入深，循序漸進。

本書主要論述彈性、內耗、膨脹、熱學性能、電性和磁性等物理性能，從實用角度而言，不僅是某些工業金屬材料的重要使用性能，而且這些性能的測試也是研究金屬的一種工具；因書中著重的是解決實驗問題的考慮，因此對於這些性能的試驗方法、應用、各種方法的選擇及綜合運用等，都有精詳的介紹，是大專機械科系機械材料最佳參考書籍。

同時，為了使您能有系統且循序漸進研習機械方面叢書，我們以流程圖方式，列出各有關圖書的閱讀順序，以減少您研習此門學問的摸索時間，並能對這門學問有完整的知識。若您在這方面有任何問題，歡迎來函連繫，我們將竭誠為您服務。



目錄

1 金屬的彈性及試驗 1

1.1 金屬的彈性變形及其物理本質 2
1.2 金屬的彈性模數 4
1.3 廣義虎克定律 9
1.4 彈性模數的測量及應用 13
1.4-1 彈性模數的測量 13
1.4-2 彈性模數的應用 15

2 金屬中的內耗及試驗 17

2.1 內耗現象及意義 18
2.2 滯彈性內耗 18
2.2-1 滯彈性現象及分析 18
2.2-2 滯彈性內耗及其與振動頻率的關係 22
2.2-3 滯彈性內耗與溫度的關係及激活能 27
2.2-4 滯彈性內耗峯的寬度 28
2.2-5 內參數 30
2.3 靜滯後內耗及阻尼振動內耗 32
2.3-1 靜滯後內耗 32
2.3-2 阻尼振動內耗 33
2.4 內耗的度量和測量 34
2.4-1 扭擺法 34
2.4-2 橫向振動法 38

2.4-3 超聲脈冲法 41
2.4-4 寬頻擺法 41
2.5 點缺陷引起的內耗 43
2.5-1 Snoek峯 45
2.5-2 Snoek峯在鋼鐵研究中之應用 51
2.5-3 Zener峯 65
2.6 差排內耗與Bordoni峯 67
2.6-1 釘扎差排內耗 67
2.6-2 Bordoni峯 77
2.7 點缺陷與差排交互作用引起的內耗峯 82
2.7-1 Snoek-Köster峯 83
2.7-2 Hasiguti峯（橋口峯） 88
2.8 晶界內耗峯 89

3 金屬的膨脹及試驗 93

3.1 金屬的熱膨脹及其物理本質 94
3.2 金屬的熱膨脹性能 95
3.3 膨脹的測量 98
3.4 膨脹試驗的應用 102
3.4-1 確定鋼鐵材料的相變點 102
3.4-2 確定冷卻轉變曲線 104

4 金屬的熱學性能及試驗 109

4.1 焓與比熱 110
4.2 金屬的熱學性能 110
4.2-1 純金屬的比熱 110
4.2-2 合金的比熱 113
4.2-3 相變的熱效應 114
4.3 熱分析的試驗方法 115
4.3-1 冷却（加熱）曲線法 115

4.3-2 示差熱分析法（DTA） 117
4.3-3 示差掃描熱量計法（DSC） 119
4.3-4 Sykes 法 120
4.3-5 Smith 法 121
4.4 熱分析方法的應用 123
4.4-1 建立合金狀態圖 124
4.4-2 鋼的轉變曲線的測定 125
4.4-3 研究鋼的回火轉變 127
4.4-4 研究鋁合金的時效 130
4.4-5 研究有序 —— 無序轉變 134

5 金屬的電性及試驗 135

5.1 金屬的導電 136
5.2 金屬導電的物理本質 137
5.3 影響金屬導電的因素 142
5.3-1 合金元素的影響 142
5.3-2 合金組織的影響 144
5.3-3 塑性變形及後續熱處理的影響 149
5.3-4 溫度的影響 152
5.4 超導電 159
5.5 電阻測定的原理 162
5.5-1 Wheatstone 電橋 162
5.5-2 測定方法 164
5.5-3 用電位差計測定 A1 淬火後電阻之變化（電阻測定實例） 168
5.6 電阻分析方法的應用 170

6 金屬的磁性及試驗 179

6.1 金屬磁性的度量 180
6.2 金屬磁性的物理基礎 181

6.2-1 磁感應及磁性論 181
6.2-2 金屬及合金的磁性機構 189
6.2-3 磁區及磁化變化和磁異方性 192
6.3 磁性材料 198
6.3-1 軟磁性材料 199
6.3-2 硬磁性材料（永久磁石材料） 201
6.4 磁性分析在金屬研究中的應用 203
6.4-1 殘留沃斯田鐵量之測定 204
6.4-2 回火過程之研究 206
6.4-3 TTT 曲線之測定 208
6.4-4 磁化率測定在研究金屬結構上之應用 210
6.5 磁性試驗方法 213
6.5-1 飽和磁化強度之測定（衝擊測量法） 213
6.5-2 矯頑磁力之測定（拋脫法） 215
6.5-3 强磁性體磁滯曲線之測定 216
6.5-4 磁化率之測定 218

7 試驗數據及其處理 221

7.1 試驗誤差及其分析 222
7.1-1 試驗誤差的來源 222
7.1-2 實驗的絕對誤差和相對誤差 223
7.1-3 綜合誤差分析 224
7.1-4 按試驗數據評定試驗精度 226
7.1-5 試驗的方差分析 228
7.2 試驗記錄及試驗結果的表達 233
7.2-1 試驗記錄 233
7.2-2 試驗結果的圖示法 235
7.2-3 經驗公式與半經驗公式的確定 240

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.

8 物性研究方法之選擇及其綜合運用 259

8.1 各種物性試驗方法的選擇 260

8.2 物性研究方法的綜合運用 264

附 錄 269

1

金屬的彈性及試驗

金屬彈性反映金屬的原子間結合力，是金屬的一種基本物理性質，在金屬材料研究和機械設計中均具有重要意義。本章論述它的物理本質，彈性性能指標的物理意義，測試方法及其應用。

1.1 金屬的彈性變形及其物理本質

當金屬所受到的外加應力很小時，僅產生彈性變形。所謂彈性變形，就是外力去除後可以立即消逝的變形。對特定的金屬材料而言，當應力超過某臨界值時，將發生塑性變形，此時彈性變形亦隨應力增大而增加，變形包括彈性變形和塑性變形兩部份，即進入彈塑性變形階段。外力去除後，彈性變形部份隨之消逝，塑性變形部分殘留下來。上述之“某臨界值”常常被稱爲彈性極限，但要注意它並不能反映金屬的彈性。這裡之所以強調這一概念，是由於甚至某些金屬材料專家亦把彈性極限誤解爲金屬的彈性性能指標。實際上，彈性極限反映金屬產生初始塑性變形的難易程度，它由差排（dislocation）開始運動的阻力所決定，是對金屬組織的變化敏感的性能，因此可以通過合金化、熱處理及冷塑性變形的方法而有效的加以改變。而金屬的彈性性能與之有本質上的差異。

從虎克定律（Hooke's law）可知，金屬的彈性應變和應力成正比，當外加應力爲正應力時，

$$\sigma = E\varepsilon \tag{1.1}$$

式中，σ爲正應力（拉應力或壓應力）；ε爲正應變（相對伸長或相對縮短）；E爲比例常數，稱爲正彈性模數或楊氏模數（Young's modulus）。

當外加應力爲剪應力時，

$$\tau = G\gamma \tag{1.2}$$

式中，τ爲剪應力，γ爲剪應變（用弧度來表示），G爲剪變彈性模數。

顯然，彈性模數E和G反映金屬產生彈性變形的難易程度。如外加應力大小相同，彈性模數越大，彈性應變量越小。在數值上彈性模數等於彈性應變量達到100%時的應力。它們的單位和應力的單位相同。

從公式（1.1）和（1.2）可知，僅彈性模數是與材料性質相關的。因此應把它作爲反映金屬彈性變形性能的指標，即以其值的大小和變化來衡量金屬的彈性。大量的實驗證明，彈性模數與合金元素的含量，熱處理方法的改變關係不大；冷塑性變形雖能使之降低，但通常在20%的範圍之內。這說明金屬

組織的改變（如微量的合金固溶含量、第二相的析出、晶粒的大小、差排和空位的多少與分佈的變化等），對彈性性能影響很小。因此，可以說金屬的彈性模數（彈性性能）是對金屬組織變化不敏感的。

爲了進一步理解金屬彈性的本質，下面將以雙原子模型進行說明。如所週知，固態金屬是結晶物質，原子的相對分佈是很規則的，原子間的相對位置，由它們之間相互作用的引力和斥力的平衡所決定。引力是由原子核與相鄰原子的自由電子之相互作用造成的，斥力是兩個原子的原子核之間以及它們的自由電子之間的相互作用造成的。圖1.1繪出引力與斥力隨原子間距離的變化關係曲線。無論是引力或斥力均隨原子間距離增大而減小，但斥力的變化遠較引力的變化急劇，合力的變化如曲線③所示。當原子間距爲r_0時合力爲零，這就是不受外力作用時兩原子間的距離。受到外加拉力的作用時，原子間距增大，產生伸長的變形。由曲線③可知，此時原子間作用的合力爲引力，與外加拉力相平衡。外加拉力去除時，在原子間引力的作用下，原子間距減小到r_0，伸長變形隨之消逝。相反，在受到外加壓縮力作用時，原子間距減小，產生縮短變形

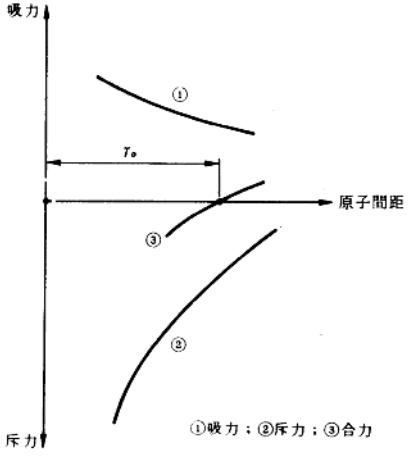


圖1.1　原子間相互作用力的雙原子模型

，原子間作用的合力爲斥力，與外加壓縮力相平衡，外加壓縮力去除時，在斥力的作用下，原子間距增加到r_0。這就是產生拉伸或壓縮彈性變形的物理過程。發生剪彈性變形的物理過程本質上與此相同。

由以上分析不難看出，正彈性模數實際上與曲線③的斜率相一致，因此嚴格說來並非常數，但是由於金屬通常在產生千分之幾的變形後就開始產生塑性變形，甚至產生了斷裂，也就是說金屬通常只能產生極小的彈性變形，在這個前提下，就可將彈性模數視爲常數。

從上述雙原子模型可以看到，金屬的彈性性能決定於原子的本性（即原子間的相互作用）。

1.2 金屬的彈性模數

金屬的彈性模數與金屬元素的價電子數量和原子半徑大小有關，原子半徑大小和原子的排列方式（即晶格形式如體心立方、面心立方，六方密等），也就決定了各個方向的原子間距離。顯然，不同晶向的彈性模數是不同的，因此單晶體的彈性具有各向異性。表1.1給出了一些金屬單晶體由於方向變化而

表1.1 一些金屬的彈性模數

點陣類型	金屬	正彈性模數 $E\times10^7$ N/m²				剪彈性模數 $G\times10^7$ N/m²			
		在單晶體中		在多晶體中		在單晶體中		在多晶體中	
		最大的	最小的	計算的	試驗的	最大的	最小的	計算的	試驗的
面心立方	鋁	7700	6400	7170	7200	2900	2500	2660	2700
	銅	19400	6800	11950	12100	7700	3100	4280	4400
	銀	11700	4400	7500	8000	4450	1970	2640	2700
	金	11400	4200	7750	8100	4100	1800	2650	2800
體心立方	α-鐵	29000	13500	20700	21400	11800	6100	7770	8400
	鎢	40000	40000	—	—	15500	15500	—	—
六方	鎂	5140	4370	4500	4500	1840	1710	1770	1800
	鋅	12630	3560	10000	10000	4970	2780	3620	3700
	鎘	8300	2880	5100	5100	2510	1840	2130	2200

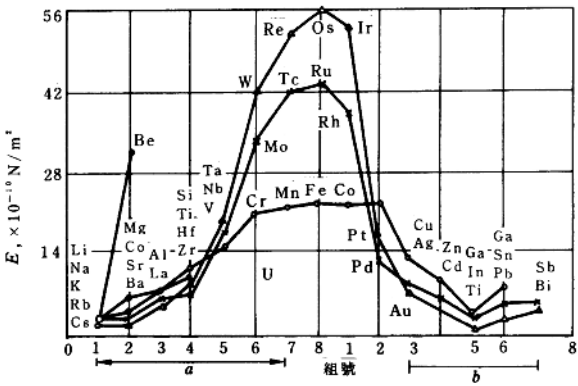


圖 1.2　金屬彈性模數的週期性變化

出現的最大值與最小值。對於各晶粒取向毫無規則的多晶體金屬而言，所測得的彈性模數爲其單晶體各晶向的平均值，因而不隨測量方位不同而改變，有人將之稱爲各向同性。但是，對於形成 Texure 的多晶體而言，由於各晶粒採取同一取向的態勢，因此又表現出彈性模數的各向異性。例如冷軋鋼板的橫向與縱向的彈性模數的大小就是不同的。

實驗證明，室溫下純金屬多晶體的彈性模數是原子序數的函數。隨著原子序數的變化，彈性模數發生週期性的變化，如圖 1.2 所示。同一組元素中（例如 Be、Mg、Ca、Sr、Ba）隨原子序數和原子半徑增大，彈性模數減小。但過渡族金屬（例如 Os、Ru、Fe、Mo、Co 等）與一般金屬不同，它們的彈性模數隨原子半徑的增大而增大，而且過渡族金屬的彈性模數值都很高（這一點在工程上具有重要意義）。此與這類元素 d 層電子的特殊的電子結構有關。

金屬在溫度昇高時，原子間距離增大，在巨觀上表現爲如所遇知的熱膨脹，此時原子間結合力減弱，彈性模數降低。由於純金屬的熔點也反映原子間的結合力，故與彈性模數有一定的關係，即

$$E = KT_s/V \tag{1.3}$$

式中 T_s 爲金屬熔點（以絕對溫度計量），V 爲比容，K 爲常數。圖 1.3 繪出 W、Mo、Rh、Be、Ta、In 等純金屬彈性模數和溫度的關係。

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.