

# 用壓電晶片法研究鐵在穩定磁場中 作橫振動時的聲頻內耗\*

葛庭燧 周本濂

(中國科學院金屬研究所)

## 提 要

用羅謝耳鹽 ( $\text{NaKC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ) 壓電晶片測量鐵在穩定磁場中作橫振動時的內耗, 所用的振動頻率是 1633 週/秒。當磁場強度小於 40—50 奧時, 內耗隨着磁場強度而變化的曲線幾乎是平的, 其後則變化較快, 在超過約 150 奧時, 內耗的變化又漸趨平緩, 最後達到一個差不多恆定的最大值。這個內耗最大值在飽和磁場強度下並不降低, 這種現象是以前所沒有觀察到的。

根據初步的分析, 認為所觀察到的內耗與鐵磁性物質在磁場中作橫振動時磁疇的磁化向量的轉動有密切關係。鐵中的磁疇的磁化向量由於試樣的彎曲而隨着轉向, 但是外加磁場的作用却要使它們轉回到與磁場方向一致。通過磁致伸縮的作用, 磁疇的轉動引起試樣的附加應變。這種磁性現象與彈性現象之間的耦合過程需要一定的時間, 因而造成一種應變落後於應力的情況, 在週期性應力的作用下便引起內耗。

在鐵磁性物質中, 彈性現象與磁性現象之間的耦合常常引起內耗。通過對於磁性內耗的觀測和研究, 可以協助瞭解許多磁性現象的內在規律。過去所觀察到的磁性內耗, 無論引起內耗的物理原因如何(宏觀渦流內耗、微觀渦流內耗、磁滯內耗), 都具有一個共同的特點, 即內耗在飽和磁場下顯著地降低或變為零。我們最近測量了鐵在穩定磁場中作橫振動時的聲頻內耗, 發現內耗在飽和磁場中仍然保持它的最高值。

在過去所作的磁內耗測量中, 無論在高頻或低頻, 所用的一般都是縱振動或扭轉振動, 而不是橫振動<sup>1)</sup>。高頻內耗測量所用的方法, 通常是把一塊經過適當方法截取的石英晶體膠結在試樣上, 然後應用壓電的原理來測定這個複合振盪器的內耗, 由此再算出試樣本身的內耗<sup>[1]</sup>。用這種方法適宜於測定在縱振動或在扭轉振動下的內耗。在

\* 1956 年 12 月 22 日收到。

1) 最近我們看到 Waller 的一篇簡短的表演實驗報導, 用鎗擊和耳聽的辦法來激發和測量鐵在磁場中作橫振動時的內耗, 得到了一些定性的結果, 見 Waller, M. D., *Proc. Phys. Soc.* 50 (1938), 144.

測量中頻（或聲頻）內耗時，一般都採用電學的或磁學的方法來激發和接收，例如靜電法<sup>[2]</sup>、渦流法<sup>[3]</sup>、電磁法<sup>[4]</sup>，這些方法適宜於測定在縱振動或在橫振動下的內耗，但是由於所用的電的或磁的裝置易受外加磁場的干擾，因而不適宜用於測量磁性內耗。至於低頻內耗一般是用扭擺進行測量的<sup>[5]</sup>，不能測定在橫振動下的內耗。

我們應用壓電晶片的方法能够很便利地測定鐵磁性物質在磁場中作橫振動時的內耗。

### 實 驗 裝 置

所用的壓電晶片是羅謝耳鹽 ( $\text{NaKC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ) 晶片，是蘇聯科學院烏拉爾分院金屬物理研究所巴甫洛夫 (B. A. Павлов) 的實驗室所贈送的。由於這種壓電晶片的壓電模量較大而強度較低，所以一般只用於接收系統，即把機械振動轉換為電振動。巴甫洛夫的裝置便是用電磁法來激發振動，用羅謝耳鹽晶片來接收的。在巴甫洛夫的裝置中，壓電晶片本身要承擔一定的彎曲載荷，因而不能支持較大的振動<sup>[6]</sup>。在我們所設計的裝置中（圖 1a），壓電晶片的振動通過一個適當的槓杆系統經由極細的銅懸絲而傳

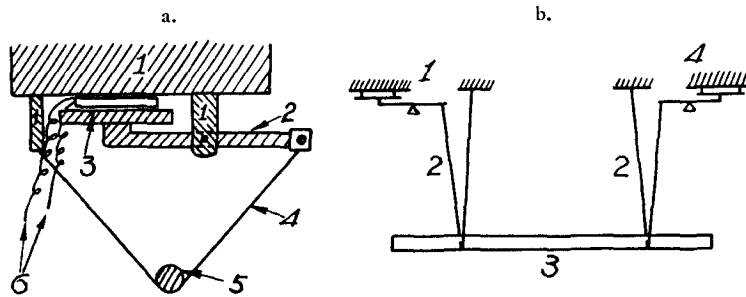


圖 1. 用壓電晶片測定內耗的裝置。

- a. 壓電晶片傳動裝置：1. 底板與支架； 2. 槓杆與托盤； 3. 壓電晶片；  
4. 懸絲； 5. 試樣； 6. 導線。  
b. 試樣的懸法：1. 激發系統； 2. 懸絲； 3. 試樣； 4. 接收系統。

到試樣上，壓電晶片本身只受到較小的壓力，因而克服了晶片的機械強度不高的困難。傳遞振動的效率可以通過槓杆系統的改進而大大提高。懸掛試樣的系統見圖 1b<sup>[7]</sup>，懸絲到試樣的振動節點的距離一般是 1—3 毫米。

曾將上述實驗裝置所得的內耗測量結果與我們實驗室中的電磁法聲頻內耗測量裝置的結果作比較，發現當懸絲掛在距節點 3 毫米遠時，並不至於增加額外的耗損，所測得的“內耗”值及諧振頻率都與用電磁法所測得的相同。用這種測量裝置所測得的最低內耗值是  $1.33 \times 10^{-5}$ 。

在進行磁性內耗測量時，我們把圖 1b 的整個裝置放在一個方形線圈內。線圈筒的尺度是  $12 \times 12 \times 45$  厘米，外面用銅線繞了許多層。所通過的電流是由蓄電池供給的。所用試樣的長度約為 34 厘米，安置在線圈內磁場均勻的部分。磁場的方向與試樣的縱長軸一致。

## 實 驗 結 果

所用的試樣是由蘇聯出品的 Armco 純鐵製成。原始的含碳量是 0.02%，曾在  $720^\circ\text{C}$  的濕氫中去碳 31 小時，並在  $720^\circ\text{C}$  真空中進行均勻化處理 12 小時，然後由直徑 12 毫米錘擠成直徑 8 毫米的圓棒。最後的含碳量用燃燒法測出為 0.002%。

所用的振動頻率是 1633 週/秒，相當於試樣的第二諧波的頻率。在這種頻率下，由於橫振動所引起的宏觀熱彈性內耗已經距內耗峯的巔值很遠，因而由於宏觀熱流所產生的內耗可以略去不計<sup>[8]</sup>。

在進行正式的內耗測量以前，我們首先測驗了所用的振幅對於內耗的影響。作為一個例子，圖 2 所示的內耗曲線是用在  $890^\circ\text{C}$  退火後的試樣所作的。圖中下面的曲

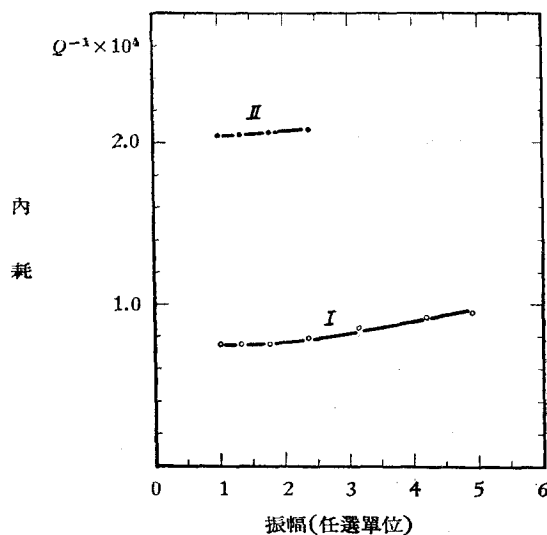


圖 2. 內耗與振幅的關係。I. 未加磁場；II. 磁場強度 = 120 奧。

線 (I) 是不加磁場的情形。橫坐標所表示的振幅是任選單位，把所能應用最小振幅當作“1”。由圖可見，當振幅增加到 2—3 倍時，內耗值並沒有顯著的上昇。隨後在實際測量時所採用的振幅都保持在“1”附近，因而對於所用的振幅範圍而言，可以說所觀測到的內耗與振幅無關。圖中上面的曲線 (II) 表示當外加的穩定磁場是 120 奧

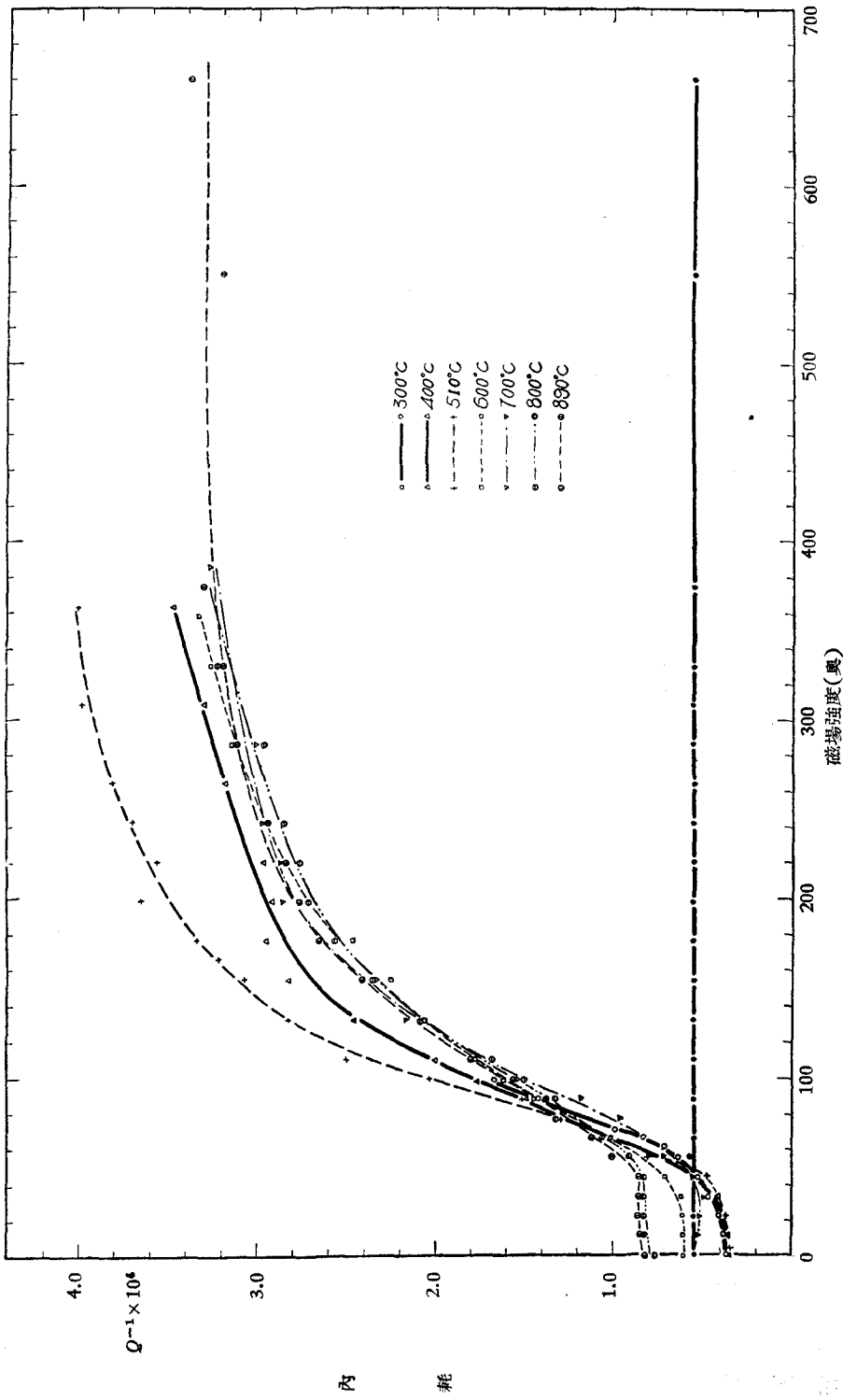


圖 3. Armco 鐵(冷加工後在各種不同溫度下退火)在不同強度的磁場中的內耗, 退火溫度見圖中所示數字, 振動頻率=1633 週/秒, 圖下方的直線是用黃銅作測量時的情形。

時的情形。內耗值雖然由於外加磁場而升高，但是並不由於振幅的增大而增加（在所測的振幅範圍內）。由此可以斷定所觀測的磁內耗是與振幅無關的。

把上述的冷加工後的試樣在各種不同的溫度下退火，每次退火都是在真空中保溫 30 分鐘（ $890^{\circ}\text{C}$  退火是在真空中保溫 15 分鐘）。在每次退火以後，都首先測定在不加磁場時的內耗，然後再測定在不同強度的磁場中直至飽和磁場中的內耗，所用的振動頻率都是 1633 週/秒。所得到的一系列曲線如圖 3 所示。試樣的處理狀態雖然

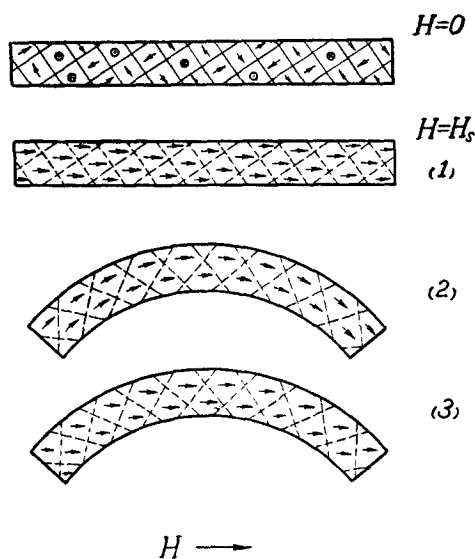


圖 4. 鐵在穩定磁場中作橫振動時產生內耗的一種可能情況。圖中的小箭頭表示磁畴的磁化向量， $H=0$ （未加磁場時）， $H=H_s$ （外加磁場等於飽和磁場時）：（1）試樣未受變力的作用時；（2）試樣受變力後；（3）試樣變彎以後又經過某一時間。

各不相同，但是由圖可以看出它們的內耗隨着磁場強度而變化的情況基本上是一致的，即在磁場強度小於 40—50 奧時，曲線幾乎是平的，其後則變化較快，在超過約 150 奧時，內耗的變化又漸趨平緩，最後達到一個差不多恆定的最大值。

爲了肯定所加的磁場確是達到了飽和值，我們用  $890^{\circ}\text{C}$  退火的試樣在更高強度的磁場中測定內耗。由圖可見，當磁場強度爲 660 奧時，內耗仍然保持它的最大值不變，而在這種磁場下，對於鐵的每一個主要結晶方向而言，都已經達到了飽和態<sup>[9]</sup>。

爲了指出所觀測的內耗與測量的本身無關，而是由於試樣的鐵磁性所引起來的，我們用一根尺寸相同的黃銅棒作了類似的實驗，由圖 3 下方的曲線可見，黃銅的內耗並不由於磁場而改變。

## 討 論

在前節中，我們斷定了本實驗所觀測到的內耗與宏觀熱流內耗無關。這種內耗是一種磁現象，因為它在黃銅試樣的情形不出現。

可以把圖 3 中所示的內耗曲線分作兩部分來看。一部分是當磁場強度較低的情形（小於 40—50 奧），這時曲線基本上是平的，但是內耗之值由於試樣退火溫度的不同而有若干的變化。第二部分是在磁場強度較高時的情形，這時內耗曲線雖然也由於退火溫度的不同而略有差異，但是主要的特徵却是內耗隨着磁場強度而生的變化有如  $B-H$  曲線的形狀，在飽和磁場強度下仍然保持最大值。

第二部分的磁內耗是過去所沒有觀察到的一個新現象。它並不是磁滯內耗，因為它與振幅無關（圖 2）。它也不是一般所說的宏觀渦流內耗和微觀渦流內耗，因為它在飽和磁場下仍然保持它的最大值。一種可能的解釋是與鐵磁性物質在較強的穩定磁場中作橫振動息息相關的。

當外加磁場很低時，試樣內部各磁疇的磁化向量的取向是無規則的（見圖 4）。當磁場漸漸增強後，通過磁疇邊界的移動和磁疇的磁化向量的轉動，便有較多的磁疇的磁化向量沿着外加磁場  $H$  的方向。當試樣因受力而彎曲時，其中的磁疇也就隨着轉向。由於外加磁場的方向是與試樣的平衡位置平行的，所以磁化向量的方向原來與磁場一致的那一部分磁疇的磁化向量，由於試樣的彎曲而與磁場方向形成某一角度。同時，外加磁場的作用却要使磁疇的磁化向量轉回到與磁場方向一致。通過磁致伸縮的作用，磁疇的轉動引起試樣的附加應變。由於這種磁性現象與彈性現象之間的耦合過程需要一定時間，便造成一種應變落後於應力的情況，因而在週期性應力的作用下引起內耗。

當磁化強度越大時，磁化向量的方向與磁場一致的磁疇的數目便越多，因而由於試樣彎曲而參加轉動和轉回的磁疇數目便越多，所以引起的內耗也越大。在飽和磁場的作用下，所有磁疇的磁化向量都與磁場的方向一致（見圖 4），由於試樣彎曲而參加轉動和轉回的磁疇數目達到一個最大值，因而內耗也達到一個最大值。

上面的看法可以說明只有在橫振動下才有這種現象發生，因為縱振動和扭轉振動並不能改變各磁疇的磁化向量相對於外加磁場的方向。也可以說明為什麼磁內耗隨着磁化強度而變化的曲線有如  $B-H$  曲線。

過去曾有人觀察到 Armco 鐵試樣在穩定磁場中在縱振動和在扭轉振動下的內耗<sup>[10]</sup>，這種內耗雖然在飽和磁場中大大降低到幾乎為零，但是在磁場強度未達到飽和

值以前却出現很高的內耗值。這種內耗已經被解釋為宏觀渦流內耗<sup>[11]</sup>。在我們所用的橫振動的條件下,也應該觀察到這種由於磁化狀態改變而引起的宏觀渦流內耗。但是當振動頻率不太高時,這種內耗是與振動頻率成正比的<sup>[12]</sup>,以前的人所用的振動頻率都在幾萬週/秒以上,而我們所用的只有 1633 週/秒,可能由於我們所用的振動頻率較低的關係,這種宏觀渦流內耗便變得很小,在圖 3 所示的曲線(第二部分)下成爲並不顯著的背景。

關於圖 3 中所示的第一部分內耗,我們認爲可能是微觀渦流內耗。這種內耗在沒有外加磁場時可以不等於零。根據過去實驗的結果,微觀渦流內耗對於試樣的內部結構是極其靈敏的<sup>[13]</sup>。由圖 3 可以看出這部分內耗由於退火溫度的升高而升高,這顯然是由於退火處理使試樣中的內應力逐漸消除,因而試樣中的磁疇邊界容易移動的緣故。

最後,應該指出通過本實驗所述的方法來研究鐵磁性物質中磁疇轉動的可能性,也可以研究各種因素對於這種磁疇轉動所發生的影響。關於這方面的研究以及用其它種鐵磁性物質(例如鎳)作實驗,正在進行中。

我們十分感謝 В. А. Павлов 同志和蘇聯科學院烏拉爾分院金屬物理研究所贈送我們羅謝耳鹽壓電晶片,沒有這種晶片,本實驗是不可能順利完成的。

### 參 考 文 獻

- [1] Quimby, S. L., *Phys. Rev.* **25** (1925), 558; Siegel, S. and Quimby, S. L., *ibid.* **49** (1936), 663.
- [2] Bancroft, D. and Jacobs, R. B., *Rev. Sci. Inst.* **9** (1938), 279.
- [3] Randall, R. H., Rose, F. C. and Zener, C., *Phys. Rev.* **56** (1939), 343.
- [4] Wegel, R. L. and Walther, H., *Physics* **6** (1935), 141; Kê, T. S. (葛庭燧), *J. App. Phys.* **20** (1949), 1226.
- [5] Kê, T. S. (葛庭燧), *Phys. Rev.* **71** (1947), 533.
- [6] ПАВЛОВ, В. А., 私人消息。
- [7] Förster, F., *Zeitschr. Metallk.* **29** (1937), 109.
- [8] Bennewitz, K. and Rötger, H., *Physik. Zeitschr.* **37** (1936), 578; Zener, C., *Phys. Rev.* **53** (1938), 90.
- [9] Bozorth, R. M., *Ferromagnetism* (Van Nostrand, New York, 1951), 478 頁。
- [10] Cooke, W. T., *Phys. Rev.* **50** (1936), 1158; Brown, W. F., *ibid.* **50** (1936), 1165.
- [11] Kersten, M., *Zeitschr. f. Techn. Physik* **15** (1934), 463.
- [12] 見 [9], 705 頁。
- [13] Köster, W., *Zeitschr. Metallk.* **35** (1943), 246.

## A STUDY ON THE ACOUSTIC INTERNAL FRICTION OF IRON VIBRATING TRANSVERSELY IN A STEADY MAGNETIC FIELD BY PIEZO-ELECTRIC CRYSTAL PLATES

KÊ T'ING-SUI and CHOW PEN-LIEN

(*Institute of Metal Research, Academia Sinica*)

### ABSTRACT

The acoustic internal friction of iron vibrating transversely in a steady magnetic field was measured by means of Rochelle salt ( $\text{NaKC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ) crystal plates, the frequency of vibration used was 1633 cycles/sec. When the strength of the magnetizing field is lower than 40—50 oersteds, the curve showing the dependence of internal friction on magnetic field strength is almost flat, and becomes steeper for a higher field strength. However, as the field intensity exceeds 150 oersteds or so, the change of internal friction with field strength becomes slower again, and finally approaches to a maximum value. This maximum value of internal friction does not decrease under a saturation magnetic field. Such a phenomenon has not been observed before.

According to a preliminary analysis, the observed internal friction may possibly be associated with the rotation of the magnetization vector of the magnetic domains in iron vibrating transversely in a steady magnetic field. The magnetization vector of the magnetic domains is turned because of the bending of the specimen. The action of the magnetizing field, however, tends to turn the magnetization vector back so as to be parallel with the field direction. Through magnetostriction, the rotation of the magnetization vector induces an auxiliary strain in the specimen. A definite amount of time is required in the process of the coupling between the magnetic and elastic phenomena. This creates a condition for which the strain lags behind the stress, and gives rise to internal friction under periodic stress.