

鎳在交變磁場中的一個磁內耗峯*

卡列爾·密歇克**

(中國科學院金屬研究所)

提 要

在鐵磁性物質中，彈性現象與磁性現象之間的耦合每每引起內耗。過去作磁彈性內耗研究所用的磁場大都是靜磁場。我們令鎳試樣在交變磁場中作扭轉振動，測量內耗。把內耗表示為磁場強度的函數時，得到一個顯著的內耗峯。這個內耗峯在靜磁場下不出現。把鎳試樣經過冷加工處理或在試樣中加碳，都足以把內耗峯的位置移向高磁場強度的一邊，而保溫退火則把內耗峯移向低磁場強度的一邊。此外，這個內耗峯的高度由於所用扭轉頻率增加而顯著地增加。

根據鎳的磁化曲線上各部分所相當的可逆及不可逆過程，可以定性地解釋上述內耗峯的來源及其所受各種因素的影響。

一. 引 言

在鐵磁性物質中，彈性振動能的消耗與物質的磁性狀態有關。這種內耗的來源固然是各色各樣的，但是在各種情況下彈性現象與磁性現象之間的耦合却都是由於磁致伸縮而起的^[1]。根據過去研究的結果，磁彈性內耗可以分為三類：宏觀渦流內耗，微觀渦流內耗，和磁滯內耗。第一類內耗是由於磁性物質在振動時，振動應變使試樣的磁感應發生變化，而這種變化便產生宏觀渦流，因而引起能量的消耗。第二類內耗是由於磁性物質中具有磁疇結構，因而試樣中的磁化狀態具有局部的差異，在振動應變的作用下產生局部的微觀渦流，也就引起能量的消耗。磁滯內耗的產生是由於應力使磁疇邊界作不可逆的運動，這種內耗不因為振動頻率之不同而異，但是在應力不太大的時候，却由於應力的增加而增加。

*1954 年 12 月 23 日收到。

**密歇克博士是捷克斯洛伐克科學院技術物理研究所的科學家，根據中捷文化合作協定前來中國作五個月的研究訪問（1954 年 7 月至 12 月）。

過去關於磁彈性內耗的研究大都是在靜態磁場下所作的,在交變磁場中的內耗現象則知道得很少,除去一些極早期的工作以外。最近有人研究了靜態應力及交變磁場對於純鐵及幾種鐵合金的磁彈性內耗的影響^[2]。我們最近觀察到鎳在交變磁場中有一個內耗峯(把內耗表示為磁場強度的函數)出現,這個內耗峯的表現與過去已知的各種磁彈性內耗很不相同。本文將敘述這個新的磁內耗峯的各種特點並提出一個定性的初步解釋。

二. 實 驗 裝 置

測量內耗所用的裝置是葛庭燧教授所敘述的扭擺^[3]。振動頻率約為每秒 1 次(0.5—3.0 週/秒)。最大的切應力是 0.05 千克/毫米²,這相當於測量標尺上 1 厘米的偏轉。磁化線圈是用銅線繞成的,套在電爐的外邊,因而磁場的方向與試樣的縱長平行。

由於條件的限制,磁化線圈所產生的磁場強度是用直流電來測量的(把蓄電池組接到磁化線圈上)。在隨後用脈動磁場和交變磁場所作的實驗中,却是根據通過磁化線圈的脈動或交流電流之值來決定磁場強度的大小。

試樣是用 99.8% 的電解鎳製成的,用打絲機由直徑約為 2 毫米錘擠至直徑約為 1 毫米。每根試樣之長約為 25 厘米。把試樣在約 950°C 的濕氫氣氛中加熱數小時然後淬入水中,以消除試樣中所含的微量碳及它種雜質。經過此種處理以後,試樣中的晶粒是比較粗大的,在試樣的截面上一般只含有幾顆晶粒。

三. 實 驗 結 果 與 分 析

第一次實驗是用在 950°C 退火一小時的純鎳試樣所作的,最先用的是 100 週/秒的脈動磁場(把一個全波整流器接在磁化線圈上),在室溫下漸漸增加磁場強度,得到一個顯著的內耗峯^[4]。後來又用 50 週/秒的交變磁場(把交流電源通過一個自耦變壓器而直接接到磁化線圈上)作實驗,也觀測到顯著的內耗峯。

隨後的實驗發現這種顯著的內耗峯只有在脈動磁場或交變磁場中才出現。

圖 1 中所示的曲線都是在室溫下測量的，扭動頻率是 1.2 週/秒。曲線 a 是在脈動磁場中所得的結果，曲線 b 和 c 是在恆定磁場中(用蓄電池組接到磁化線圈上)所得的結果(曲線 c 是當鎳試樣含碳時)，由此可見這個內耗峯只在交變磁場中出現。

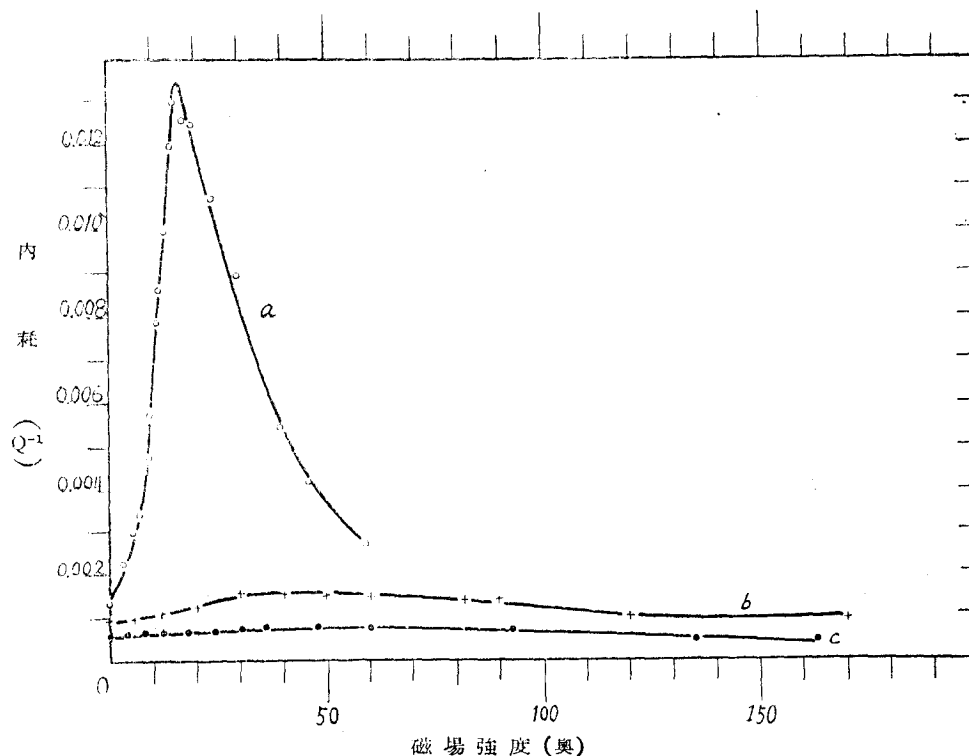


圖 1. 鎳在脈動磁場與恆定磁場中的內耗變化，扭動頻率 = 1.2 週/秒。
a—脈動磁場；b—恆定磁場；c—恆定磁場(鎳試樣中加碳)。

(一) 所觀測到的磁內耗峯與試樣的磁性有關

上述的實驗是把磁化線圈套在電爐外邊所作的。電爐上的熱電絲固然是用無磁場繞法來繞的，但是爐管本身是由碳素鋼所製成，扭擺實驗裝置中也有一部分是由鋼鐵所製成，而這些因素可能對於測量有影響。為了證明所觀測到的內耗峯只與試樣本身(鎳)的磁性有關，我們進行了下面的實驗。

另外製造了一套扭擺裝置，把磁化線圈直接套在試樣外邊，中間並不隔着鋼製爐管，試樣的兩端則用火漆膠固在玻璃管上(不用鋼夾頭)；這樣，磁化線圈以內除去試樣(鎳)以外並不含有任何的金屬部分。用這樣一套裝置，我們仍然在

室溫下得到顯著的磁內耗峯。

我們也曾經用非磁性物質（例如銅）的試樣在類似的情況下作內耗測量，並沒有觀測到磁內耗峯。

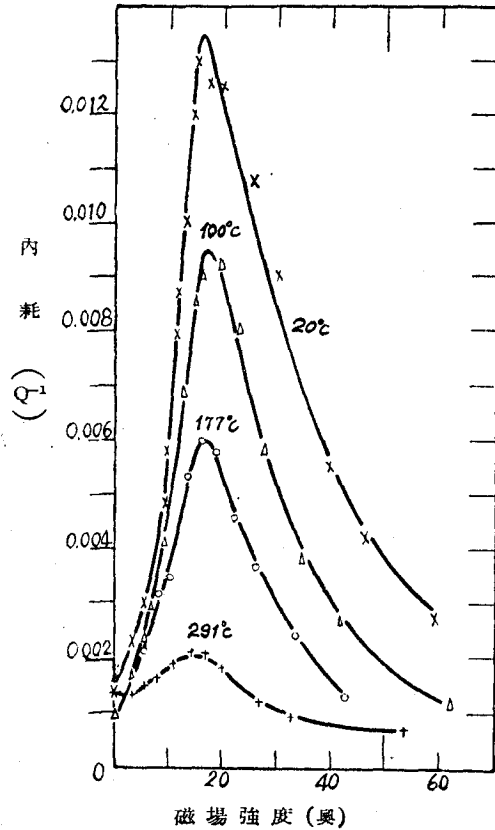


圖 2. 鎳的磁內耗峯在各種溫度下的變化。

與磁致伸縮係數二者隨溫度變化的趨勢相似。

(二) 冷加工與保溫的影響

圖 2 所示的內耗峯是用在 950°C 的濕氫氣氛中退火一小時的鎳試樣所作的。內耗峯巔值所相當的磁場強度是 18 奧斯忒。用冷加工後的試樣（錘擠以後未經退火）作實驗，則內耗峯的巔值出現在較大的磁場強度。圖 4 中的 a、b、c 是用三個不同的扭動頻率所得的曲線，它們的巔值磁場強度是 27 奧斯忒。把這試樣在 400°C 下保溫 24 小時，則內耗峯移向較低的磁場強度（曲線 d）。再把試樣在 1100°C 在濕氫中處理 2 小時後，則內耗峯更向左移到 6 奧斯忒（圖 4 中的 e、f、g 三條曲線是用三個不同的頻率所作的）。

又圖 2 表示在四個溫度（ 20° ， 100° ， 177° ， 291°C ）下測量所得的結果，用的是 100 週/秒的脈動磁場，扭擺的振動頻率是 1.2 週/秒。由圖可見各個內耗峯的位置（巔值磁場強度）並不由於測量溫度之不同而異，但是內耗峯的高度（巔值內耗）却隨着溫度的升高而降低。將巔值內耗（減去未加磁場時的背景內耗）表示為測量溫度的函數，則得到圖 3 中的曲線 I。把曲線引伸到鎳的居里點（ 358°C ），則巔值內耗為零。

上面這些實驗指明這內耗與鎳的鐵磁性質有關。

圖 3 中曲線 II 是鎳的磁致伸縮係數（負值表示張力使物質的磁化減少而物質在磁化時發生收縮）隨溫度變化的情形^[5]。由圖可見巔值內耗

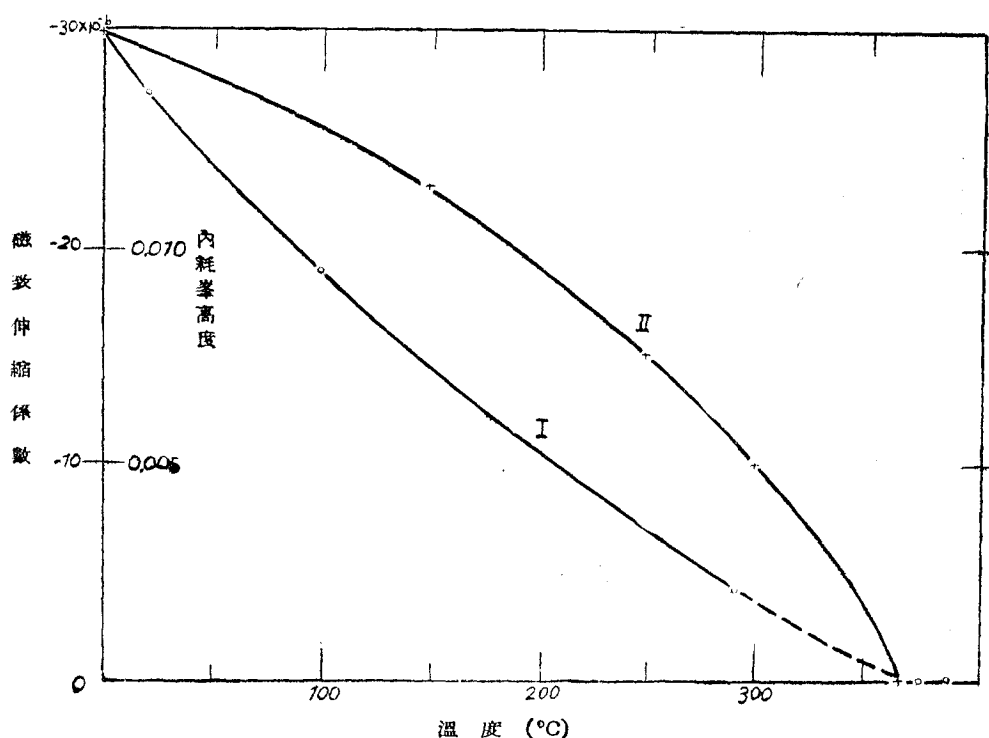


圖 3. 在各種溫度下鎳的磁內耗峯高度及磁致伸縮係數的變化。
I—內耗峯高度；II—磁致伸縮係數。

由圖 4 可以總結出下面的結果：冷加工使內耗峯移向高磁場強度的一邊並且使內耗峯降低；保溫退火使內耗峯移向低磁場強度的一邊並且使內耗峯升高；扭動的頻率對於內耗峯的位置沒有影響，但是頻率越大則內耗峯越高。

(三) 冷却速率的影響

把純鎳試樣在 1000°C 保溫 15 分鐘，然後分別用下列的方法冷却：淬入 10% NaOH 的水溶液中；淬入礦物油中；在空氣中冷却；在爐中乾氫冷却。各次測量所用的扭動頻率都是 1.5 週/秒。在各次實驗中，相當於冷却速率最低的試樣，其磁內耗峯最高。

(四) 振幅效應

圖 5 中所示的是用完全退火後的純鎳在室溫所作的實驗，振動頻率約為每秒 1 次。曲線 I 是不加磁場時的對數減縮曲線；曲線 II 是加上脈動磁場（磁場強度為 5.3 奧斯忒）以後的對數減縮曲線，相當於內耗峯巔值附近的情形。縱坐標是測量標尺上的偏轉，每 1 厘米的偏轉相當於 0.05 千克/毫米² 的切應力；

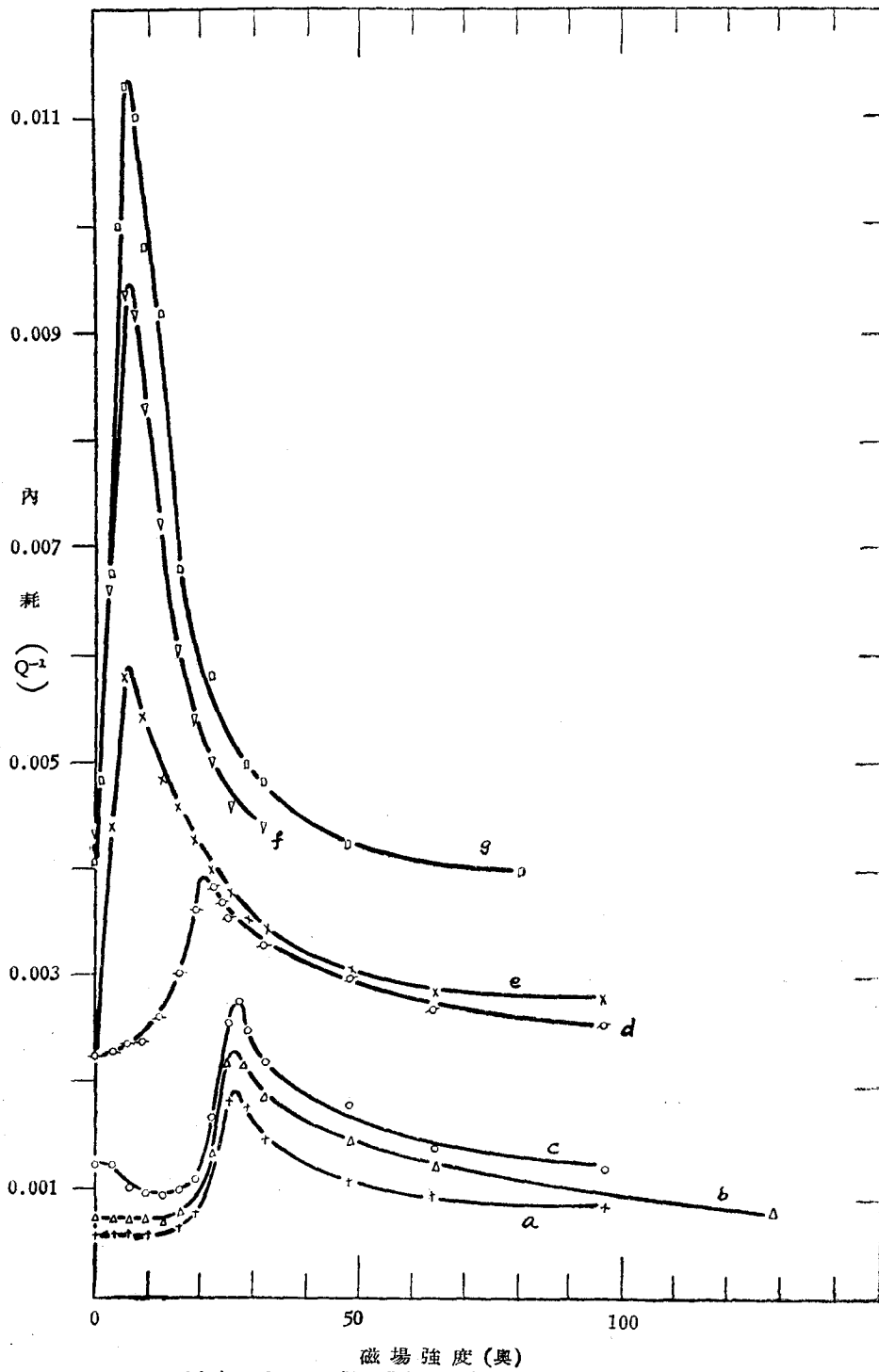


圖 4. 冷加工與保溫退火對於鎳的磁內耗率的影响。

- (1) 冷加工: a 的扭動頻率 $f=0.91$ 週/秒; b 的 $f=1.49$ 週/秒; c 的 $f=2.22$ 週/秒。
 (2) 400°C 退火: a 的 $f=2.17$ 週/秒。
 (3) 1100°C 退火: c 的 $f=0.77$ 週/秒; f 的 $f=1.30$ 週/秒; g 的 $f=2.00$ 週/秒。

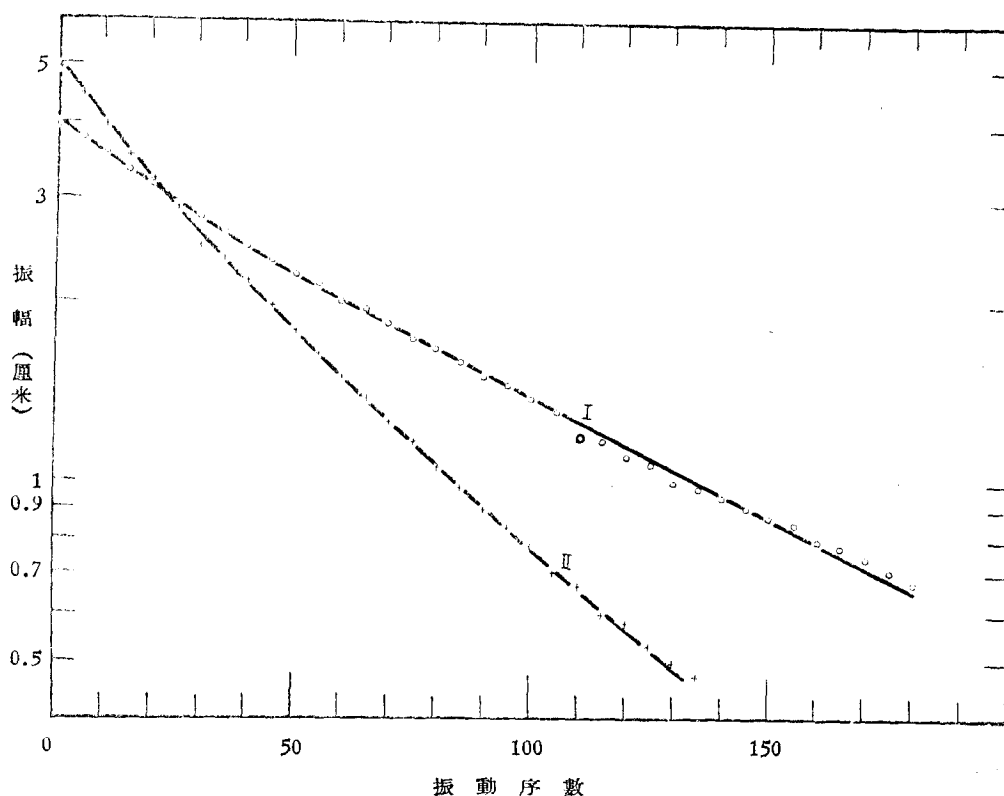


圖 5. 磁場對於鎳中內耗的振幅效應所發生的影響：I—未加磁場；II—脈動磁場。

橫坐標是振動序數。由曲線 I 可見，當偏轉小於 3 厘米時，對數減縮曲線成爲一條直線，即內耗不因振幅之不同而變。但是加上磁場以後，則當偏轉大於 1 厘米時便表現出很顯著的振幅效應（見曲線 II），內耗之值因振幅的增加而變大。由此可見，外加的脈動磁場使內耗的振幅效應變得更爲顯著。

（五）含碳量的影響

把另外一根鎳試樣加碳，即把試樣放在乾氫與苯（ C_6H_6 ）的混合氣氛中在 $950^\circ C$ 加熱 20 分鐘，然後淬入水中，用三種扭動頻率作測量，所得的結果見圖 6。內耗峯的位置較之未加碳時向高磁場強度的一邊移動，並且內耗峯的高度也較以前降低（與圖 1 中曲線 a 作比較）。根據燃燒分析法的測定，這根試樣在加碳處理後所含的碳量是 0.4%（以重量計）。這些碳的一部分是溶解在鎳中形成固溶體，因爲鎳試樣在加碳後的點陣常數較純鎳的爲高，並且用加碳後的試樣也觀測到由於碳在純鎳中擴散所引起的內耗峯（當頻率約爲 1 週/秒時出現在 $230^\circ C$ ）。

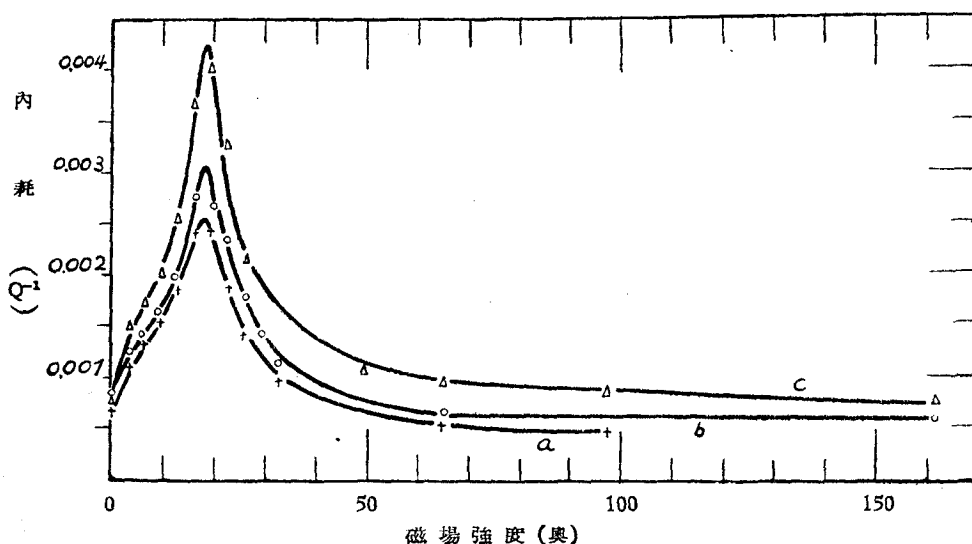


圖 6. 加碳使鎳的磁內耗峰向高磁場強度的方面移動 (與圖 1 中曲線 a 的位置作比較). a 的振動頻率 $f=1.98$ 週/秒; b 的 $f=1.30$ 週/秒; c 的 $f=0.78$ 週/秒.

左右,不加磁場)^[6]. 另一方面,根據金相的觀察,發現一部分碳也沉澱在晶粒間界上成爲球狀石墨.

由圖 6 也可以看出來,內耗峰因頻率的增加而升高. 把圖 6 與圖 4 作比較,可見對於鎳而言,加碳對於內耗峰的影響與冷加工的影響相似.

四. 關於新內耗峰的來源

上面所敘述的磁內耗峰與已知的各種磁彈性內耗不同. 這種內耗峰只在交變磁場或脈動磁場下才出現,因而產生內耗峰的必要條件是鎳試樣中的磁化狀態作不斷的週期性變化.

爲了了解這個新內耗峰的來源,我們必須討論鎳的磁化曲線及磁滯迴線的機構.

鐵磁性物質的磁化曲線可以分作三個部分來討論(圖 7). 第一部分包括磁感應強度 B 之值由 0 到 B_1 的範圍,這一部分被稱爲可逆的,因爲當磁場強度減小時,這部分曲線幾乎是可以(但並不是完全可以)照原路回去的. 根據磁嚙理論來講,這一部分主要是由於磁嚙邊界的可逆移動所引起. 第二部分包括由

B_1 到 B_2 的範圍，相當於磁疇邊界的不可逆移動的部分。第三部分是 B_2 以上的區域，相當於磁疇中的磁化矢量的可逆轉動。

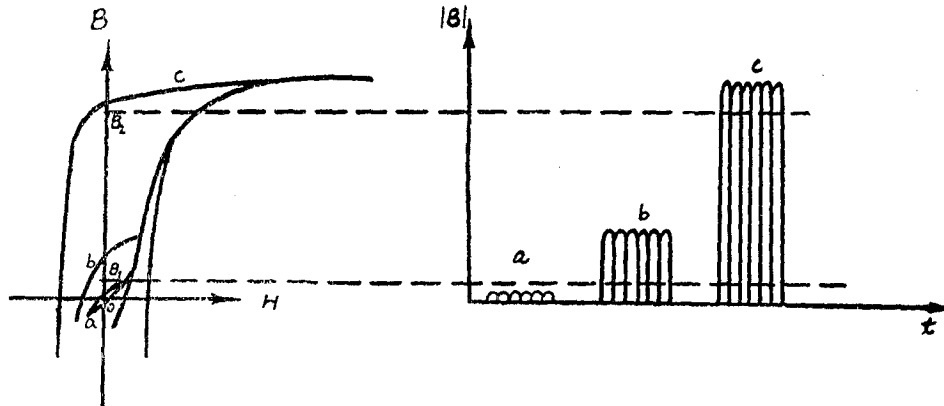


圖 7. 鎳的磁化曲線上的三個部分。 H 是磁場強度， B 是磁感應強度。

把鎳試樣放在脈動磁場或交變磁場中時，試樣的磁化狀態也就發生週期性的變化。當磁場強度很小時，試樣的磁化狀態按照圖 7 中的 a 迴線而變化，當磁場漸漸增大時則按照 b 迴線及 c 迴線而變化。如果使試樣作扭轉振動，則由於磁致伸縮效應的關係，應力的變化引起磁性狀態的變化。因此，應力的作用與外加磁場的作用相像，二者不同之處是應力對於方向恰好相反的兩種磁化狀態的作用相同。因此，我們在圖 7 中右邊所畫的只是交變磁感應強度的絕對值（橫坐標表示時間）。

當鎳試樣作扭轉振動時，由於磁致伸縮的關係而使試樣的磁化狀態發生變化。這樣所發生的磁化狀態的變化應該加到因磁場變化所引起的磁化狀態變化上，即加到圖 7 中右圖所示的 a 、 b 或 c 上。當外加的交變磁場很小，如 a 的情形時，磁疇邊界在交變磁場的作用下發生可逆的移動，扭應力使磁疇邊界的移動發生改變，但是因為應力很低，所引起的變化仍然保持在 0 到 B_1 的範圍，因而磁疇的移動仍然是可逆的，所以由於磁疇邊界的移動而引起的應變也是可逆的，因而在扭轉振動中應力與應變之間的變化也是可逆的。在這種情形下，對於振動能的消耗很小即內耗很低。

當所加的交變磁場較大，如 b 的情形時，則它所引起的磁疇邊界的移動是不可逆的，按照上面同樣的分析步驟，也可以斷定在扭轉振動中應力與應變之間的變化也是不可逆的，所以引起較大的內耗。

如交變磁場再行加大,如 c 的情形,則磁化過程又是可逆的(磁疇的磁化矢量的轉動),所以在扭轉振動中通過彈性現象與磁性現象的耦合以後,應力與應變之間的變化又是可逆的,所以內耗又降低。

由於上述的原因,可見磁場強度增大時,內耗要經過一個最大值。

如果試樣是在恆定磁場而不是在交變磁場的作用下,則試樣中的磁化狀態也是恆定的。很小的應力既然不可能使磁疇發生顯著的運動,所以也不可能遇到圖 7 中所示的 a、b、c 三種情形,因而也就不可能引起顯著的內耗峯。

根據上述的看法,內耗峯的位置與高度顯然與磁化曲線與磁滯迴線的形狀有關。從已知的冷加工、保溫、冷卻速率以及加碳沉澱對於磁化曲線及磁滯迴線形狀的影響,可以解釋這些因素為什麼使內耗峯的位置發生移動。

本文所觀測的內耗峯與已知的磁滯內耗雖然都起因於磁疇邊界的不可逆移動,但是二者的表現却在兩方面有顯著的不同:(1)磁滯內耗不因為振動頻率之不同而異,而現在的內耗却因為振動頻率的增加而顯著地增加;(2)在應力較低的時候,磁滯內耗由於應力的增加而成正比例地增加,但是現在的內耗峯所表現的振幅效應却很小。

關於第一方面的不同,可能是由於我們作實驗時所用的振動頻率(0.5—3 週/秒)遠比交變磁場的頻率(50 週/秒)及脈動磁場的頻率(100 週/秒)為小。在週期性的磁性變化與週期性的應力變化彼此發生交互作用的時候,如果二者的變化頻率越接近,則所發生的交互作用也就會愈大些,因而由於不可逆過程所引起的內耗也就越大些。我們所觀測的內耗之因振動頻率的增加而增加,可能是由於振動頻率越大則越與磁場變化的頻率接近的緣故。

關於第二方面的不同,可能是由於我們作實驗時所用的振幅極小的關係。在振幅(應力)極小的時候,內耗之值並不因振幅之不同而變,但是加上交變磁場以後,其作用有如增加了振幅,因而內耗在較低的振幅時便有振幅效應出現(見圖 5 中的曲線 II)。

作者深切地感謝中華人民共和國政府,使他有機會在中國進行研究工作。他特別衷心感謝中國科學院金屬研究所金屬物理研究室主任葛庭燧教授對於這項研究工作的關心和很有幫助的討論。他也要謝謝金屬物理研究室錢知強等在實驗工作上的協助。

參 考 文 獻

- [1] Bozorth, R. M., *Ferromagnetism* (Van Nostrand, New York, 1951), pp. 699-712.
[2] Cocharde, A. W., *J. App. Phys.*, **25** (1954), 670.
[3] Ké, T. S. (葛庭燧), *Phys. Rev.*, **71** (1947), 533.
[4] 初步結果已投稿 *Czechosl. J. Phys.* (1955). (致編者信)
[5] 同 [1], pp. 661-662.
[6] 葛庭燧、王其閣, 面心立方系金屬與合金中因含碳而引起的內耗峯, 投稿物理學報 (1955).

A MAGNETIC INTERNAL FRICTION PEAK IN NICKEL UNDER ALTERNATING MAGNETIC FIELD

KAREL MIŠEK*

(*Institute of Metal Research, Academia Sinica*)

ABSTRACT

The coupling between elastic and magnetic phenomena in ferro-magnetic materials often gives rise to internal friction. In previous studies on magnetoelastic internal frictions, the applied magnetic field was mostly static. In the present experiment, nickel specimen was made to vibrate in torsion under an alternating magnetic field, and a pronounced internal friction peak was observed when internal friction was plotted as a function of the alternating magnetic field strength. This peak did not appear under similar conditions when using a static magnetic field. The position of the peak was shifted toward the side of a higher magnetic field when the nickel specimen was either cold-worked or contained carbon; and it was shifted toward the side of a lower magnetic field when the specimen was previously annealed at an elevated temperature. The height of the peak was considerably raised with an increase of vibrating frequency.

A qualitative explanation of this peak is given on the basis of reversible and irreversible processes occurring at different stages of the magnetization curve of nickel. Factors affecting this peak are discussed.

*Scientist, Institute of Technical Physics, Czechoslovak Academy of Sciences at Prague, in China for a five-month research visit (July—December, 1954) under the Sino-Czechoslovak Cultural Agreement.