

# 岩石磁学

(日本) 永田武著

地质出版社

# 普通语言学

1956年11月

第11卷第4期



商务印书馆

# 岩石磁学

(日本) 永田武 著

地质出版社

1959·北京

# ROCK-MAGNETISM

by

TAKESI NAGATA

D. Sc., Professor of Geophysics  
University of Tokyo

1956

Maruzen Co., Ltd.  
Tokyo

本書詳盡地敘述了測定岩石磁性的方法和結果，關於岩石的鐵磁性理論及鐵銹氧體的理論、岩石磁性概述以及測量岩石磁性用的儀器，是一本良好的參考書籍。遺憾的是著者沒有把蘇聯學者的研究成果包括進去，可以說是最大的缺點。

本書可供地球物理工作者、地質工作者及從事於磁法勘探的工作人員閱讀。

全書由丁鴻佳同志照英文原版翻譯而成。為了對本書作出評價，書中將俄譯本序也翻譯了出來。

## 岩 石 磁 學

---

著者：（日本）永 田 武

譯者：丁 鴻 佳

出版者：地 質 出 版 社

北京宣武門外永光寺西街5號

北京市書刊出版：營業許可證出字第050號

發行者：新華書店科技發行所

經售處：各 地 新 華 書 店

印刷者：北 京 市 印 刷 一 廠

北京西便門南大街乙1號

---

印數（京）1—4,200冊 1959年8月北京第1版

開本787×1092 1/32 1959年8月第1次印刷

字數190,000 印張8 3/4

定價（10）1.16元

## 目 录

|   |     |
|---|-----|
| 序言 (英文原版序言)                               | 5   |
| 俄譯本序                                      | 7   |
| <b>第一章 鉄磁性造岩矿物的磁性</b>                     | 10  |
| § 1. 鉄磁学概述                                | 10  |
| § 2. 鉄磁性小顆粒团的磁性                           | 26  |
| § 3. 反鉄磁性和鉄淦氧磁性                           | 30  |
| § 4. 磁鉄矿 ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ )      | 34  |
| § 5. 赤鉄矿和磁赤鉄矿 ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) | 35  |
| § 6. 缺磁鉄矿                                 | 37  |
| § 7. 磁黄鉄矿 ( $\text{FeS}_{1+z}$ )          | 38  |
| § 8. 其它复合矿物                               | 39  |
| § 9. 从岩石中分出来的鉄磁性矿物的磁性                     | 45  |
| <b>第二章 測量岩石磁性的仪器</b>                      | 54  |
| § 1. 冲击法                                  | 54  |
| § 2. 磁力仪法                                 | 60  |
| § 3. 磁天平                                  | 68  |
| § 4. 交流电法                                 | 70  |
| 附录: 对于磁性測量有用的公式                           | 80  |
| <b>第三章 岩石磁性概述</b>                         | 84  |
| § 1. 岩石的磁化率                               | 84  |
| § 2. 岩石的磁滯曲綫                              | 96  |
| § 3. 岩石的居里点                               | 104 |
| <b>第四章 火成岩的温差頑磁性</b>                      | 116 |
| § 1. 火成岩的天然剩余磁性                           | 116 |
| § 2. 火成岩的温差頑磁性                            | 127 |
| § 3. 部分温差頑磁性                              | 133 |

|            |                            |            |
|------------|----------------------------|------------|
| § 4.       | 溫差頑磁性的物理特征 .....           | 144        |
| § 5.       | 焙燒粘土的溫差頑磁性 .....           | 153        |
| § 6.       | 产生溫差頑磁性的理論 .....           | 158        |
| § 7.       | 反溫差頑磁性 .....               | 167        |
| § 8.       | 反溫差頑磁性的理論 .....            | 173        |
| <b>第五章</b> | <b>沉积岩的天然剩余磁性 .....</b>    | <b>179</b> |
| § 1.       | 沉积岩的天然剩余磁化的方向与强度 .....     | 179        |
| § 2.       | 鉄磁性顆粒在磁場中的沉积作用 .....       | 183        |
| § 3.       | 沉积岩的天然剩余磁性的穩定性 .....       | 188        |
| <b>第六章</b> | <b>有关岩石磁学的地球物理問題 .....</b> | <b>196</b> |
| § 1.       | 概述 .....                   | 196        |
| § 2.       | 岩石的磁性与局部的磁異常 .....         | 197        |
| § 3.       | 岩石的磁性和局部異常在地磁場中的變異 .....   | 198        |
| § 4.       | 从火成岩研究古地磁学 .....           | 200        |
| § 5.       | 从沉积岩研究古地磁学 .....           | 203        |
| § 6.       | 反天然剩余磁性的問題 .....           | 205        |
| § 7.       | 有关岩石磁学的几个地質問題 .....        | 205        |
|            | 有关岩石磁性的苏联著作目录 .....        | 207        |

#### 英文参考文献縮写符号

|                    |   |
|--------------------|---|
| B. E. R. I.:       | The Bulletin of the Earthquake Research Institute.  |
| C. R.:             | Comptes Rendus des Séances.   |
| G. N. Tokyo Univ.: | Geophysical Notes (Published by the Geophysical Institute, Faculty of Science, Tokyo University,) |
| J. G. G.:          | Journal of Geomagnetism and Geoelectricity.   |
| J. G. R.:          | Journal of Geophysical Research.  |
| P. R. S.:          | Proceedings of the Royal Society.   |

## 序 言

(英文原版序言)

随着“天然磁石”(相当于天然的磁铁矿)的发现,在很早的时候,就开始知道了磁的知识。但是,关于物质磁性的物理学的发展,似乎与这个起源的现象无关。在磁法作为地球物理勘探的重要方法以前,很少有人对分布在地表各处的天然的磁化物体加以注意。

也许可以说,地磁学的开始是由于地壳中天然生成的磁石都有指北的特性。但是,地壳的磁学,或者说,组成地壳的各种岩石的磁学,在渊博的地磁科学中,仅佔有很小的部分。

“为什么地球像一个巨大的磁体”?这一个原始的,可是基本的问题,最近又吸引着自然哲学家的思想。同时,在研究这个问题时,岩石的磁学似乎重又成为一个重要的角色。但是,岩石的磁性似乎是这样的复杂,要想根据物质磁性的物理学加以系统的描述,是很少可能的。这一点对岩石中的铁磁性矿物来说,也是同样的,而对岩石的磁性作更进一步的详细的描述时,就愈困难。

困难的主要原因之一,可能是我们对金属氧化物以及其他金属和非金属元素化合物的基本的磁学知识还不完全;但是,这些东西是绝大多数磁性矿物的组成部分,当然也是大多数岩石的成分。说实话,我们关于物质磁性的知识,极大部分是对金属而言,可是最近的研究发现了金属氧化物和与之相似的化合物的磁性,这些东西的磁性与金属材料是绝不相同的。这可能标志着,岩石的磁学现在才开始找到了可靠的背景。

在这样的情况下,在有关磁性科学发展的现阶段,作者想把岩石的磁学放在物质磁性物理学的基础上,加以完整而系统的描述的这样

一个願望，無疑是不能實現的。雖然如此，作者還是把本書發表了；因為他相信這是從過去到現在的許多研究者，包括作者自己的總結。這總結是根據我們現在所認為最好的知識作為基礎而系統地寫成的，因此，作者希望，這本書對於岩石磁性問題的研究將會很有用處。

趁這機會，作者謹向已故的 J. G. 顧涅什培格爾教授在早期工作中對於作者的教益與建議致謝，并向 S. 中村(Nakamura)、S. 茅誠司、H. 祖耶（譯音，英文原名是 Tsuya）、C. 祖鮑（譯音，英文原名是 Tsuboi）及 M. 長谷川(Hasegawa) 等教授自始至終給作者的鼓勵與忠告表示謝意。作者感謝 H. 久野博士在岩石學方面的合作，也謝謝 S. 秋本及 S. 植田諸君在最近工作上以及將這本書付印的準備工作上給予的幫助。作者也衷心感謝 W.B. 斯泰勃斯（譯音，原文是 Stubbs）先生細心地校閱了英文校樣。

1953年6月1日

于東京



## 俄 譯 本 序

日本著名学者永田武的著作，論述了新的科学領域——岩石的磁学，这个研究領域，是物理、地球物理及地質这三門科学的匯合。

关于岩石磁性的知識，最近有了很大的發展。这是由于这門边缘科学的資料具有巨大的理論和实际的意义。由于研究岩石的磁性，鉄磁理論又产生了独立的分支，这里我們是指尼尔的反鉄磁性理論及鉄滲氧磁性的理論。

岩石的磁性决定于岩石中疏散分佈的鉄磁性矿物顆粒。因此对于不大的鉄磁性顆粒（粉末狀磁性結構）的理論研究，可以应用于岩石（鉄磁性顆粒当然包含在磁性体中）。

應該特別指出，岩石磁性的特征——磁化率和剩余磁性——决定于岩石各个部分的矿物結構以及在岩石形成时的溫度、压力及沉积的情况（如果是沉积岩）。因而，研究岩石磁性的規律，有助于了解它們的形成过程。

研究不同溫度下鉄矿及鉄的天然氧化物的磁性，是有很大大意义的。將这些性質和天然剩余磁性的值作比較，可帮助我們了解鉄矿形成时的条件，特别是当时热液溶液的溫度。当然，这样的研究首先应从相变的观点出發，这种相变可在實驗室条件下加热产生。

在岩石的磁性特征中，研究天然剩余磁性有很大作用。因为迄今为止的实际証明，大多数岩石的天然剩余磁性，是在弱的地磁場中冷却形成的。这就証明了所謂岩石的剩余磁性，不是旁的什么东西，而就是地磁場中的溫差頑磁性。因此，在實驗室条件下，研究溫差頑磁性的規律，对理解岩石天然剩余磁性形成的条件是有很大作用的。

如实验結果指出的，岩石剩余磁性的量值，特别是它的方向，是保存了百万年的岩石的很可靠的標誌。因此，它們的測定，对解决一系列的地質問題，特别是解釋由沉积岩及火成岩構成的巨大綜合体的大地構造运动的历史的問題，是很重要的。

此外，岩石的天然剩餘磁性是揭露大地磁場發展歷史的標誌，並可用以驗證大地地磁起源的各種學說。對各個地質時代的岩石剩餘磁性的研究，組成了古地磁學這門新的地球物理學的分支；最近，這門學科有很大的發展。

對於用磁法勘探有益礦物以及工業地球物理來說，研究岩石的磁性，同樣有着重要意義。如大家知道的，磁法勘探的數學解釋總是假定岩石的磁化是均勻的，不計算可能存在的不均勻磁化；當然，在實際情況中，它同樣產生感應磁性與剩餘磁性。因此，磁法勘探中，正確的解釋推斷是以仔細研究岩石的磁性為前提的，究竟這樣的岩石會引起哪一種異常，只有同時研究地面上的磁異常及地面下的岩石磁性時才可能確定引起異常場的物體的形狀及深度。

永田武幾乎詳盡無遺地收集了有關研究岩石磁性方面的材料。但應當指出，他沒有把蘇聯學者的研究收集到這本淵博的書中去，雖然其中某些研究對岩石的磁學是有貢獻的。此外，在這本值得推崇的著作中，沒有涉及岩石磁學的某些問題，特別是岩石的磁性與壓力的關係、與其中存有的順磁性及抗磁性部分的关系、與鐵磁性部分粉狀結構的关系以及磁化的型式等等。

在蘇聯，從岩石磁性的觀點研究岩石，開始於研究庫爾斯克磁異常的初期（本世紀20年代）；當時，H.K. 蕭德羅制定和描述了研究庫爾斯克磁異常含鐵石英岩的剩餘磁性和感應磁性的方法。這是收集在永田武著作中的唯一的蘇聯學者的研究。30年代，蘇聯科學院理論地球物理研究所成立，П.П. 拉扎列夫院士在實驗室中，首先研究了人工的和天然的氧化物的磁性（岩石主要的鐵磁性部分）<sup>[11, 12, 15, 17]</sup>●。此外，在弱磁性的沉積岩中，研究明白了那些鐵磁性部分、順磁性部分及抗磁性部分的物質對岩石磁性的影響<sup>[13]</sup>。而岩石的這一研究方向，在永田武的工作中幾乎沒有什麼反映。他的工作主要是研究了岩石的鐵磁性部分。至於噴發岩的磁化率與磁滯在不同場中的變化方面，蘇聯學者也做了一些工作<sup>[1, 3, 6, 9]</sup>。

● 見蘇聯文獻目錄

苏联地球物理学家对各种温度下的岩石的磁性，以及对岩石天然剩余磁性的研究，無論是正面的，反面的，都很注意<sup>[2, 4, 8, 16, 25, 26, 37, 38, 40, 42-48]</sup>。此外，苏联也开始研究不同彈性压力下的岩石的磁化率及剩余磁性<sup>[18, 33, 34]</sup>。为了解决以上的問題，苏联地球物理学者創造了必需的方法和仪器<sup>[7, 20, 23, 30, 36, 39, 41]</sup>。

現在，在研究岩石的溫差頑磁性規律方面，有三个学派：日本的永田武和他的学生們，法国的捷利也（Телье）和他的同事們以及苏联的 M. A. 格拉包夫斯基及 Г. Н. 彼得罗娃。因为这三个学派的工作是互相平行的，因此在物理量的术语和符号方面，我們的和法国及英国文献上所用的是不同的。自然我們希望有统一的术语和符号，但是在我們翻譯永田武的著作时，暫且采用苏联学者的术语。譬如，溫差頑磁性是指在外磁場作用下，从溫度高于居里点冷却至室溫时产生的，我們称为極限溫差頑磁性，而永田武称为饱和溫差頑磁性。

至于符号方面，我們保留了永田教授所采用的符号，因为它们是用得很成功的，希望所有的国家以后都能采用。本書中保留了永田教授采用的縮写符号，譬如用 *TRM* 表示溫差頑磁性，*IRM* 表示等溫剩余磁性以及 *NRM* 表示天然剩余磁性。等溫剩余磁性在苏联文献中也称正常剩余磁性。在永田武的書中，磁化率是用字母  $\kappa$  表示的，而在苏联及几乎所有的国外的文献中，是用希腊字母  $\chi$  表示的，所以在这譯本中，全部改用了  $\chi$ 。

永田武的著作，結構方面是很成功的，虽然他沒有能够包括所有苏联及国外在岩石磁学方面的工作。即使如此，本書在使这方面知識的系統化方面，以及尽可能的为地球物理的目的而闡明了理論和实际的意义方面來說，是很特出的。任何一个地磁学家都应该有这一本書，因为它几乎包含了所有的資料，这些資料在了解岩石磁学方面，是有重大意义的（可以了解地球物理中这一領域的發展）。

A. 卡拉施尼可夫 (А. Калашников)

# 第一章 鐵磁性造岩礦物的磁性

## § 1. 鐵磁學概述<sup>[1][2][3]</sup>

### 1.1 磁場與物質的磁化

設一無限大小的物質在均勻磁場  $H$  的作用下引起磁化，物質的每單位體積的磁矩用磁化強度  $J$  表示。物理量  $B$  則可用下式表示

$$B = H + 4\pi J \quad (1-1)$$

這個量稱為磁感應強度，意思是指磁化物質的磁通量密度。很明顯，在無磁化處，磁通量密度  $B$  等於  $H$ 。

在 *c.g.s.c.m.u.* 制中，磁場強度的單位是奧斯特，磁感應強度則為高斯。從(1-3)中看到， $H$  和  $B$  的量綱是相等的，同時此二量間並無基本的差別，所以  $B$  也是一種磁場強度。單位表示上的差別是為便於區別磁感應和磁場。某些地球物理學家經常用高斯表示磁場的單位，而在本書中，按照物理上的國際用法，明確的區別了高斯和奧斯特。

物理量  $\kappa$  的表示式為

$$\kappa = J/H \quad (1-2)$$

如磁化強度是由磁場  $H$  產生的，則  $\kappa$  稱為磁化率。另一方面，導磁率  $\mu$  的表示式為

$$\mu = B/H = 1 + 4\pi\kappa \quad (1-3)$$

這樣表示的  $J$  及  $\kappa$  是物質的每單位體積的物理量。如表示為單位質量的物理量（密度為  $\rho$  的物質），則

$$J/\rho = I, \quad \kappa/\rho = I/H = \chi \quad (1-4)$$

$I$  與  $\chi$  分別稱為比重磁化強度與比重磁化率。

如一物質的磁化率是負的，則此物質稱為抗磁的。抗磁性物質的

● 在俄譯本中，編者根據蘇聯及幾乎所有的國外文獻中磁化率  $\kappa$  都用希臘字母  $\chi$  表示的情況，將原文書中的  $\kappa$  均改為  $\chi$  —— 中譯本譯者註。

$\kappa$  的数量級一般在  $10^{-6}$ 。如一物質的磁化率是正的，它的大小在  $10^{-6}$  數量級，則此物質稱為順磁的。

順磁性與抗磁性物質的磁化率在一很大的磁場範圍內，譬如  $10^4$  奧斯特左右，保持一常數。

另一方面，某些物質如鐵，鎳，鈷及磁鐵礦等，與順磁性及抗磁性物質相比，有特別強的磁化強度 ( $J > 0$ )，它們的磁化率為  $10-10^5$  級。這樣的物質稱為鐵磁性的。鐵磁性物質的一種特性是它們的磁化強度在一定的磁場強度下達到飽和值。圖 1-1

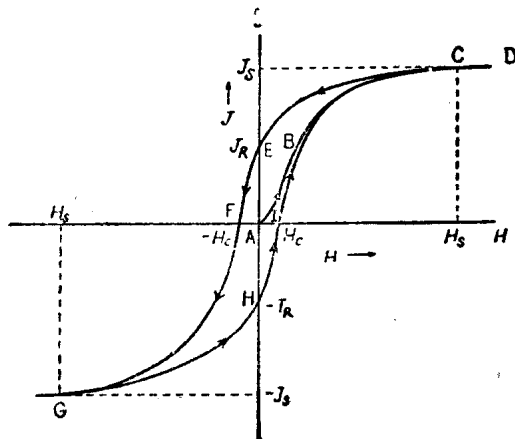


圖 1-1. 鐵磁性物質的磁化曲線

表示了鐵磁性物質的磁化強度  $J$  與磁場  $H$  間的關係。退磁良好的鐵磁性物質的  $J$ ，當  $H$  增加時，沿着  $A-B-C-D$  曲線增加，在  $C$  點時達到飽和值  $J_s$ 。隨着  $H$  的降低， $J$  隨着另一條曲線  $D-C-E$  降低。 $H=0$  時，磁化強度有一定值  $J_r$ 。再繼續往下，相反的磁場抵消了剩餘磁性，在  $F$  點， $H=-H_c$  時， $J$  等於零，以後在反磁場中增加直至  $G$  時達到飽和值。相反的過程隨着曲線  $G-H-I-C$  變化。這種對於  $H$  的磁化的不可逆現象，稱為磁滯。其中

$J_s$ ——飽和磁化強度，

$J_r$ ——剩餘（殘餘）磁化強度，

$H_c$ ——矯頑磁力。

磁滯現象只有鐵磁性物質才有。

必須注意，圖 1-1 中的磁場  $H$  應該是表示有效磁場  $H_{eff}$ ，這  $H_{eff}$  在一定長度的物質內與所施外磁場  $H_{ex}$  不同，原因是物質兩端都出現了自由磁極。退磁磁場  $H_d$  由於自由磁極的緣故，一般是不均勻的，

它随磁化强度的分佈以及鉄磁性物質的形狀而定；但是， $J$  均匀时， $H_d$  正比于  $J$ ，只是前者的方向和后者的方向恰相反，即

$$\begin{aligned} H_{eff} &= H_{ex} - H_d \\ H_d &= NJ \end{aligned} \quad (1-5)$$

此处  $N$  称为退磁系数。各种不同形状的退磁系数的大小附在第二章末。

如果某些岩石的磁化率在  $10^{-6}$  級，可是它的磁化强度在 3000 奥斯特左右的磁場下达到飽和值，并显示了磁滯現象，这样的岩石应该称为鉄磁性的而不是順磁性的。这种分类的事实根据是那些岩石包含有少量的鉄磁性物質，这些少量的东西是岩石磁性的主要表現者，好像整个是它所引起似的。

严格的說，鉄磁性或順磁性并不是与物質的物理状态無关的物質的普遍特性。鉄磁性物質在溫度增加时可轉变成順磁性的，反之亦然；所以这样的命名（指鉄磁性及順磁性）是对应于物質的物理状态，依赖于溫度而言的。

## 1.2 磁矩的起源

物質的磁矩可归之于組成物質的原子的磁矩这样一个根本的根源。原子內，对应于电子軌道运动的角动量  $N = \frac{lh}{2\pi}$  的磁矩  $m$  为

$$m = l \frac{eh}{4\pi m_0 c} \quad (1-6)$$

此处  $e$ ， $m_0$ ， $h$  及  $c$  分别指电子的电荷，电子的靜止質量，普朗克常数及光速，而  $l$  指角量子数。所以，一个电子的軌道运动的最小磁矩元是

$$\mu_B = \frac{eh}{4\pi m_0 c} = 0.9274 \times 10^{-20} emu \quad (1-7)$$

$\mu_B$  称为玻尔磁子。

軌道运动中，磁矩  $m$  和單个电子的角动量  $N$  之比为

$$\rho_0 = \frac{m}{N} = \frac{e}{2m_0 c} \quad (1-8)$$

另一方面，磁矩和电子自旋的角动量之比为

$$\rho_s = \frac{e}{m_0 c} \quad (1-9)$$

这就是說磁矩与自旋角动量之比的一半等于磁矩与軌道运动的角动量之比。

一般說来，原子的磁矩不是电子的自旋即是电子的軌道运动，或者兩者兼有。因此在原子內，磁矩与电子的角动量之比可表示为

$$\rho = g \frac{e}{2m_0 c} \quad (1-10)$$

此处

$$1 \leq g \leq 2 \quad (1-11) \bullet$$

$g$  这一量称为朗德系数，它給出了原子磁矩的軌道运动和自旋的分佈率。

### 1.3 抗磁性与順磁性

物質的抗磁性可归之于电子在磁場中作軌道运动的拉莫尔进动。所以任何物質都有抗磁性的特性。如無外磁場时，原子的磁矩为零，在磁場作用下，抗磁性显示它的淨值 (net value)；而在其他情況下，抗磁性为其它較强的現象所隱蔽了。抗磁性的磁化率为

$$\kappa = -N \frac{Ze^2}{6m_0 c^2} \sum_i \overline{r_{0i}^2} \quad (1-12)$$

此处  $N$ ， $r_{0i}$  及  $Z$  分别指單位体积內的原子数，从核中心算起的电子軌道的半徑及原子序数。

順磁性原是相互作用很小的，含有大量帶有磁矩的原子的綜合現象。無外界磁場时，順磁性物質的磁矩为零，原因是原子磁矩的不規則分佈。在磁場  $H$  作用下，在溫度  $T$  时，單位克分子的順磁性物質的磁矩  $M$  为

$$\frac{M}{M_0} = L_j(\alpha) = \frac{2j+1}{2j} \cot h \frac{2j+1}{2j} \alpha - \frac{1}{2j} \cot h \frac{\alpha}{2j} \quad (1-13)$$

$$\alpha \equiv \frac{\mu H}{kT}$$

此处  $\mu$ ， $j$  及  $k$  分别指單个原子的磁矩，內量子数及玻耳茲曼常数；

● (1-8)，(1-9)及(1-10)三公式原書上都印錯了，这里已改正——譯者註。

而  $M_0 = N\mu$  即为單位克分子中所有的原子磁矩的总和。(1-13)的导出是假定所有原子及原子的角动量的方向在热平衡状态下,自然还要求它們的磁矩服从量子理論的要求。当  $j \rightarrow \infty$  时, (1-13)成为

$$\frac{M}{M_0} = L_\infty(\alpha) = \cot h\alpha - \frac{1}{\alpha} \quad (1-14)$$

上式第一次由朗之万(Langevin)导出,所以  $L_\infty(\alpha)$ 称为朗之万函数。

設  $j = \frac{1}{2}$ , 即單个原子磁矩为單个自旋所形成的,則(1-13)成为

$$\frac{M}{M_0} = L_{\frac{1}{2}}(\alpha) = \tan h\alpha \quad (1-15)$$

注意以上的考虑不包括鄰接原子間的相互作用力在內,所以这些方程式只能用在順磁性气体或液体中。

因为一般  $\alpha \ll 1$ , (1-14)可近似地写为

$$\frac{M}{M_0} = \frac{\alpha}{3} = \frac{\mu H}{3kT} = \frac{M_0 H}{3RT}$$

因此每克分子順磁性物質的磁化率为

$$\chi_{mol} = \frac{M_0^2}{3RT} \quad (1-16)$$

#### 1.4 鉄磁性

在鉄磁性物質內,鄰接原子間的相互作用力非常强,因而有使全部原子的磁矩有相互平行的傾向以及抵抗热扰动产生的扰乱力。这就是說鉄磁性是一种“合作現象”(co-operative phenomenon)。

根据实验,鉄磁性原子的朗德系数  $g$  在大部分情况下近乎 2。这表示它們产生磁矩的主要根源是电子的自旋。所以鉄磁性的各种特性应该与原子中电子自旋的行为有关。

必須注意,軌道运动的磁矩和电子自旋的一样,都属于原子內的閉合壳層,作为全部来看应该消除和中和;所以原子的磁矩应该由那些属于不閉合的壳層所引起,鄰接原子間磁矩的可觀的相互作用的能量的主要組成是:(1)电子間的磁能;(2)它們間的交換能。

交換能涉及有关电子自旋的方向;同时由海森伯从表示每一电子的波函数的干涉中用量子力学导出。所以交換能不能从原子的經典模



型导出，可是在上面提到的能中，它通常佔有主要地位。

如鄰接原子的不閉合壳層中的电子自旋，由交換能的控制而相互平行，使总能量取極小值的情况，則这些原子的磁矩轉成平行而产生铁磁性的結果。

上面提到的交換能的作用可用“分子場”代替，这一点已由外斯(Weiss)在他的铁磁学的經典理論中作了介紹。这是說那些原子的有效磁場  $H^*_{eff}$  可写成

$$H^*_{eff} = H_{ex} + WJ \quad (1-17)$$

此处  $H_{ex}$  及  $J$  分別指由(1-5)中由  $H_{eff}$  产生的外磁場及磁化强度，而  $W$  則为一常数， $WJ$  表示假設的分子場。如(1-17)用 1.3 中同样方法表示为是每一克分子的量，則

$$H^*_{eff} = H_{ex} + \frac{W\rho}{A}M \quad (1-17')$$

此处  $A$  及  $\rho$  各为原子量及密度。

分子場的提出只是考虑了由于交換能产生的鄰接原子間的很强的相互作用。

現在，令  $\alpha = \mu H^*_{eff} / kT = M_0 H^*_{eff} / RT$  (1-17') 可写为

$$\frac{M}{M_0} = \frac{A}{W\rho} \left( \frac{RT}{M_0^2} \alpha - \frac{H_{ex}}{M_0} \right) \quad (1-18)$$

当(1-13)保持同样形式时

$$\frac{M}{M_0} = L_J(\alpha) \quad (1-13')$$

所以連系式(1-13')及(1-18)，一定得出相对磁化强度  $M/M_0$ ，如圖 1-2 所示。圖上的一个重要結果是：在  $H = 0$  的情况下， $M/M_0$  有一定值，如圖上  $O_2$  所示。換言之，磁化的存在与外磁場無关。这种磁化称作自發磁化，一般用这物質的單位体积的  $J_s$  表示（在圖上的  $M_s$  相应于每克分子的自發磁化）。

另一方面，圖 1-2 上， $\theta$  为

$$\tan \theta = \frac{ART}{W\rho M_0^2}$$