

浅析物质在磁场中的受力^{*}

袁汝明^{**} 傅钢 韩国彬

(厦门大学化学化工学院 福建厦门 361005)

摘要 结合电磁学的基本原理,对古埃法测定物质磁化率实验中的受力情况进行了分析,并分析了误差的主要来源和消除方法。简要介绍了法拉第法测量磁化率的工作原理。

关键词 古埃法 磁化率 安培力

物理化学实验是大学本科阶段最后一门基础实验课程,它不仅涉及到无机、有机、分析化学里的一些基础知识,而且力学、光学、电磁学等基础物理知识更是贯穿始终。但现有物理化学实验书中,在原理部分却经常忽略了对相关物理背景的介绍。在教学过程中经常发现,尽管很多学生可以顺利地完成任务,但并不清楚所测物理量与化学性质之间的内在关系。据此,我们认为物理化学实验讲解要做到“化”、“物”并举,既要有化学内容,又要有物理知识。本文拟以古埃法测定物质(本科实验中通常测定的是配合物)磁化率实验为例,结合电磁学基本原理和受力分析,培养学生对知识的综合运用能力。

1 磁性的本质

磁性是物质的一种普遍性质,大到宇宙繁星(如地球),小到微观粒子(如质子、电子),几乎都会呈现出磁性。为什么物质具有磁性呢?早在 19 世纪,法国科学家安培就提出了著名的分子电流假说,即在物质内部存在着一种环形电流——分子电流,分子电流使每个物质微粒都成为微小的磁体,因此具有一定的磁矩。当没有外磁场作用时,由于分子的热运动,分子电流的取向是随机分布的,这时磁矩互相抵消,对外不显磁性(图 1(a));而当有外磁场作用时,由分子电流产生的小磁矩会沿外磁场的方向定向排列(图 1(b)),故对外显磁性。当外磁场撤销时,小磁矩的取向不能迅速恢复到无序状态,则称为剩磁现象,具有这种特性的物质称为铁磁性物质。

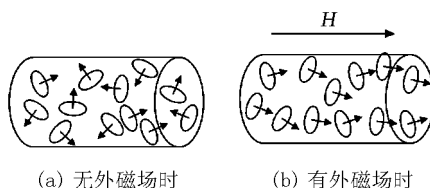


图 1 分子电流产生的磁场方向图示

近代原子结构理论证实了安培的设想,即物质中确实有电流存在。现在我们知道,物质是由原子构成的,而原子是由带正电的原子核和带负电的电子组成。核外电子在库仑引力作用下绕核高速旋转以及电子本身的自旋都会形成环形电流,并产生磁矩;而分子的磁矩可视为其所包含的原子中所有电子轨道磁矩和自旋磁矩的矢量和。对于不具有未成对电子的分子,其电子轨道磁矩的矢量和与自旋磁矩的矢量和均为 0;而当分子具有自旋未成对电子时,则具有净磁矩。在外磁场作用下,具有自旋未成对电

* 基金资助: 国家基础科学人才培养基金项目(No. J1030415)

** 通讯联系人, E-mail: yuanrm@163.com

子的物质磁矩最有利的取向是接近外磁场的方向,表现出顺磁性(图1(b))。在磁场中,轨道或自旋磁矩(μ)和外磁场方向并不是完全平行的,其间有一定的夹角(θ),这时环电流的平面会绕外磁场方向发生一个附加的转动(即拉莫进动),其方向与 $d\mu$ 方向相同。这种附加的转动同样可以等效为一个环形电流,并产生一个和外磁场相反的磁矩(图2)。事实上,电子在磁场中的运动可类比于陀螺运动:轨道或自旋运动相当于陀螺沿转轴的运动,而拉莫进动相当于陀螺转轴沿地面法线的运动。值得一提的是,所有的物质均会由于拉莫进动而具有逆磁性;而具有未成对电子的物质之所以表现出顺磁性是由于顺磁作用产生的附加磁场远大于逆磁作用^[1-2]。

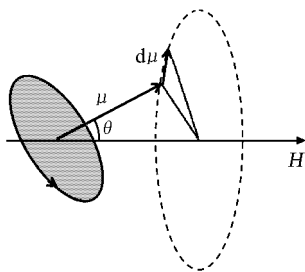


图2 电子在磁场中拉莫进动图示

2 配合物在磁场中的受力分析

在通常采用的物理化学实验参考书中^[1,3-4],顺磁性物质在古埃磁天平中会发生增重,而逆磁性物质在古埃磁天平中会发生减重,其内在原因到底是什么?事实上,利用基本的电磁学原理即可解释这一问题。图3(a)示意了古埃法测定磁化率的实验装置。如图3所示,对于顺磁性物质,可产生与外磁场同向的附加磁场 H' 。这时,分子电流的方向可利用右手螺旋定则来判断:右手握住,大拇指指向磁场方向,其余4个手指弯曲方向为线圈中的电流方向。事实上,分子中的环形电流可等效为一个环形线圈。我们知道,当通电线圈放在磁场中,会受到安培力的作用,其方向可用左手定则判断:伸开左手,使大拇指与其余4个手指垂直,磁力线垂直穿入手心,伸开的4个手指指向电流的方向,这时大拇指所指的方向,即为安培力的方向。如果将线圈放在均匀的磁场中,则各个方向所受的力相互抵消,线圈整体不受力;而如果将线圈置入非均匀的磁场中,其所受的力则与电流的强度及磁场的分布(梯度)有关。古埃法和后面介绍的法拉第法测量物质的磁化率都是利用了这一原理。

图3(b)示意了通过样品管且垂直于纸面的磁场剖面图。由于样品管放置在两磁极的中间,故分子电流所受安培力的水平分量(包括前后左右)可以抵消。实验要求样品管的底部置于磁场中心区域(霍尔探头之上),此处磁场强度较大,越往上磁场强度会逐渐减小,因此在垂直方向上受到的安培力无法抵消。可以选取上下半圆中对称的两小块体积元进行受力分析。由于安培力和磁感应强度呈正比,故 $F_{(下)} > F_{(上)}$ 。由此可见,整个线圈所受的净安培力是向下的,磁场梯度越大,则所受的力越大。在实际样品中,一般含有 $10^{21} \sim 10^{22}$ 个分子,其所受的力相当于这些分子所受力的合力。这样就很好地解释了古埃法中顺磁性物质会增重的原因。对于逆磁性物质,其附加磁场方向与外磁场方向相反,分子电流的方向亦与顺磁性物质相反,采用类似方法可以推出其在磁场中的受力朝上,故减重。事实上,古埃法也可将样品置于磁场的下方,同理可推出这时顺磁性物质反而减重,而逆磁性物质增重。

3 影响受力的主要因素

摩尔磁化率 χ_M 的计算公式为:

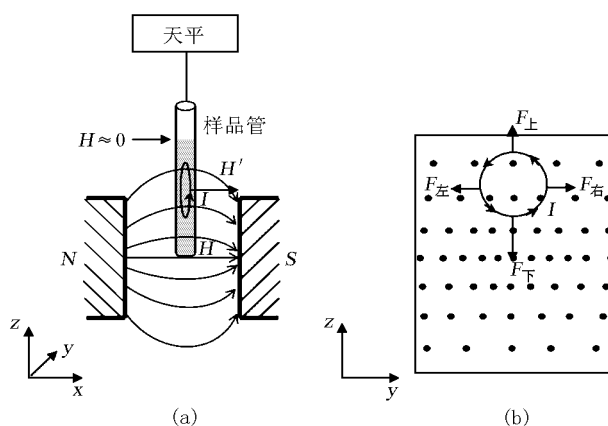


图 3 电子在磁场中的受力分析

(a) 古埃磁天平剖面图; (b) 磁场中电子的受力。

$$\chi_M = \frac{2ghM\Delta m}{mH^2} \quad (1)$$

式中 h 为样品高度 m 为样品质量 H 为磁场强度 $\Delta m = (\Delta m_{\text{空管+样品}} - \Delta m_{\text{空管}})$ 即样品在磁场中的实际增重量^[3]。

由式(1)可推导出摩尔磁化率的相对误差公式:

$$\frac{d\chi_M}{\chi_M} = \left| \frac{d\Delta m}{\Delta m} \right| + \left| \frac{dh}{h} \right| + \left| \frac{dm}{m} \right| + 2 \left| \frac{dH}{H} \right| \quad (2)$$

将实验测量值代入式(2)可计算得出右边第一项比后面几项要大 1~3 个数量级 故磁化率测定的主要误差来源是样品增重量。

为了认识影响样品增重的主要因素,下面对样品的受力情况做具体推导。设样品管的截面积为 A , 装入样品高度为 h 那么沿样品管长度方向上体积为 Adh 的样品在磁场梯度 $\frac{dH}{dh}$ 中所受到的作用力 dF 为:

$$dF = \chi H \frac{dH}{dh} Adh \quad (3)$$

式中 χ 为物质的体积磁化率, $\frac{dH}{dh}$ 为磁场强度的变化梯度。整个样品所受到的力为:

$$F = \int_{H=H}^{H=H_0} \chi H \frac{dH}{dh} Adh = \int_{H=H}^{H=H_0} \chi H AdH \quad (4)$$

值得一提的是,只有当样品装样均匀时,体积磁化率 χ 才为一常数,对式(4)积分可得:

$$F = \frac{1}{2} \chi (H^2 - H_0^2) A \quad (5)$$

实验要求装样要达到足够的高度(11~12cm) 这时样品最顶端的磁场强度近似为 0 故式(5)可简化得:

$$F = \frac{1}{2} \chi H^2 A \quad (6)$$

为了减小主要的测量误差 $\left| \frac{d\Delta m}{\Delta m} \right|$ 很显然需要增加 Δm 即增加物质在磁场中的受力。也就是说, 想要增加 Δm 需要增加样品管底部的磁场强度或适当增加样品管的截面积。

4 法拉第法测定磁化率

对于一些粉末样品,其装样的均匀性很难保证,这时可采用法拉第法进行测量^[5](图4)。

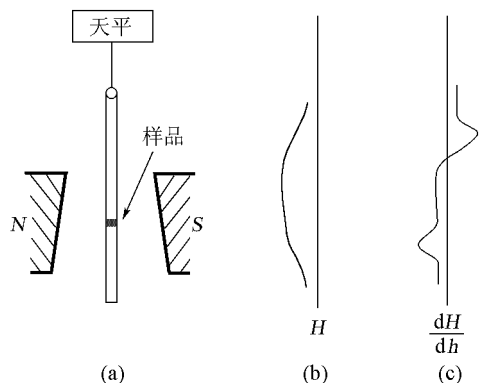


图4 法拉第法测定磁化率

(a) 测量装置; (b) 轴向磁场强度; (c) 轴向磁场梯度。

实验时,需将压成小片的固体放在磁场中 $H \frac{dH}{dh}$ 最大的区域,直接测量样品受的力。这时,式(3)可改写为:

$$F = \chi H \frac{dH}{dh} V \quad (7)$$

法拉第法将 $H \frac{dH}{dh}$ 视为一个常数。为了得到恒定的 $H \frac{dH}{dh}$ 区域(约几毫米),要求磁板具有特殊的形状(图4(a)),同时样品的重量和体积也要尽可能小。这时物质的摩尔磁化率为:

$$\chi_M = \frac{FM}{H \frac{dH}{dh} V \rho} = \frac{FM}{H \frac{dH}{dh} m} \quad (8)$$

法拉第法的优点是只要求少量的样品,其精确度可达到 $\pm 0.1\%$ 。

5 小结

本文从电磁学的基本原理出发,对磁性的本质、古埃磁天平工作原理、误差的可能来源以及其他的磁化率测定方法等进行介绍。这种从基本物理原理出发的分析方法,多年来已在实际教学过程应用,效果显著。同时,本文的部分内容已编入厦门大学主编的新版物理化学实验教科书的相关章节中^[4]。

参 考 文 献

- [1] 复旦大学,武汉大学,中国科技大学,等.物理化学实验.北京:高等教育出版社,2004
- [2] 武汉大学,吉林大学,北京大学,等.无机化学.北京:高等教育出版社,1994
- [3] 黄泰山,陈良坦,韩国彬,等.新编物理化学实验.厦门:厦门大学出版社,1999
- [4] 韩国彬,陈良坦,李海燕,等.物理化学实验.厦门:厦门大学出版社,2010
- [5] 游效曾.结构分析导论.北京:科学出版社,1980