

铁磁边界环流理论^{*}

陆夏莲, 沈 韩, 李智强, 陈 敏

(中山大学物理学系, 广东 广州 510275)

摘 要: 提出边界环流理论来解释铁磁性, 应用微分磁滞回线来研究铁磁性能获得更多有关铁磁物质的微观信息. 文中讨论了两种典型线型在宽位垒和窄位垒的微分磁滞回线.

关键词: 铁磁性; 边界环流; 微分磁滞回线; 高斯线型; 洛伦兹线型.

中图分类号: O482.51; TM936.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2001) 01-0116-02

自 1880 年观察到磁滞回线后, 历史上曾用各种复杂的铁磁模型作理论解释^[1]; 均未尽如意. 最近用电边界屏蔽电荷理论, 对各种类型的电滞回线定量地作了很好的统计解释^[2]; 其要点是不理会体系内部复杂的多级结构, 而去处理边界上屏蔽电荷的激发. 这种方法立刻可推广用来解释铁磁回线, 因为早就知道用分子电流引起的边界环流来解释铁磁性. 在理论和实验确认铁磁性来源于电子自旋后, 这种边界环流的等效概念仍是正确的. 图 1 画出了一个长为 l , 断面积为 $a \times a$ 的铁磁体; 其中的均匀磁感应强度为 B . 在体系内部各自旋引起的等效分子电流被互相抵消了, 边界上出现单位长度为 J 的未能抵消的环形电流; 如图中箭头所示, $B = \mu_0 J$. μ_0 为真空的磁导率.

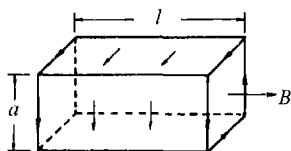


图 1 边界环流

Fig.1 The boundary circulating current

因边界环流是电子自旋所引起, 一个自旋反向所引起的环流元其磁矩记为 b ; J 是大量环流元之和, 故可用统计方法处理. 将铁电屏蔽理论中的电荷 e 改为 b , 就得到铁磁性边界环流理论. 激发一个环流元要跨过位垒 W . 在外磁场 H 作用下, 位垒高度降至 $(W - \beta H)$; $\beta = \mu_0 b$. 设位垒的归一化分布函数为 $g(W)$, 统计理论给出^[2]

$$B/\mu_0 = J = J_0 \int_{-\infty}^{+\infty} g(W) F(W - \beta H) dW \quad (1)$$

由费米统计公式得到^[3].

$$F(x) = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} [1 + \exp(E/kT)]^{-1} dE}{\int_0^{+\infty} [1 + \exp(E/kT)]^{-1} dE} = \ln [1 + \exp(-x/kT)] / \ln 2, x \geq 0 \quad (2)$$

而当 $x < 0$ 时, $F(x) = 1$. J_0 为全部自旋同向时的等效环流, 它很容易由样品的成份和结构参数计算出来.

分布函数 $g(W)$ 中含有许多关于物质结构的信息. 对磁性理论常集中讨论两种函数的典型线型^[4]. 一种为高斯型,

$$g(W) = \frac{1}{\Delta \sqrt{\pi}} \exp \left[- \left(\frac{W - W_0}{\Delta} \right)^2 \right] \quad (3)$$

另一种为洛伦兹型,

$$g(W) = \frac{\delta}{\pi} \cdot \frac{1}{\delta^2 + (W - W_0)^2} \quad (4)$$

其中, W_0 为分布函数的峰值位置; 参数 δ 表征曲线的半高宽度. 下面讨论如何由实验研究 $g(W)$. 在绝对零度下将(1)式对 H 求微商得到

$$\frac{d}{dH} \left(\frac{J}{J_0} \right) = \beta g(W) = \beta g(\beta H), T = 0 \quad (5)$$

一般地有 $\frac{d}{dH} \left(\frac{J}{J_0} \right) =$

$$\frac{\beta}{kT \ln 2} \int_{\beta H}^{+\infty} \frac{g(W) dW}{1 + \exp[(W - \beta H)/kT]}, T > 0 \quad (6)$$

称 $d(J/J_0)/dH$ 随 H 变化的曲线为微分磁滞回线. 类似于磁滞回线, 微分回线也有两支; 两支相对于原点为中心对称. 下面将只讨论其中的当 H 由 $-\infty$ 向 $+\infty$ 变化的一支.

利用(6)式可以计算出微分回线, 将它对 H 积分就可得到磁滞回线. 图 2 是用洛伦兹函数

* 基金项目: 中山大学青年教师科研启动基金资助项目 (99-019-429304)

收稿日期: 2000-06-06; 作者简介: 陆夏莲 (1966-), 女, 讲师.

得到的一些数字计算结果; 其中设定 $W_0 = 5kT$, 短划线为原始的 $g(\beta H)$ 函数, 黑点为由(6)式计算得到的结果. 将计算结果再用洛伦兹函数

$$g'(W) = \frac{\delta'}{\pi} \cdot \frac{1}{(\delta')^2 + (W + W'_0)^2} \quad (7)$$

拟合得到的结果示于图2中的黑线. 图2(a)假设了 $\delta = W_0$, (b)为 $\delta = W_0/10$. 计算表明, 当 $(\delta/W_0) \geq 60\%$ 时, 统计结果可足够精确地认为不改变线型; 但改变了线宽和峰值位置, 参见图2(a). 当 (δ/W_0) 由20减小至0.6时, $(W_0 - W'_0)/kT$ 渐次由1.25减小至1.00; 而 (δ'/δ) 由1.00增大至1.13. 对于比 W_0 小得更多的 δ , 统计结果越来越偏离 $g'(W)$; 变得在 W'_0 两侧严重地不对称, 而且峰高显著降低, 参见图2(b). 在洛伦兹线型中, δ 恰好就等于半高宽度.

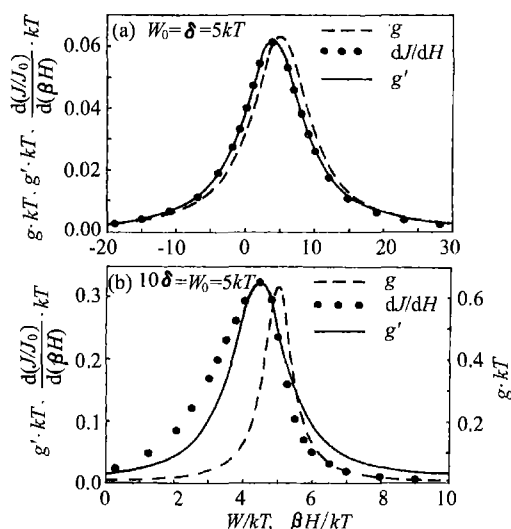


图2 洛伦兹型微分磁滞回线

Fig.2 The differential magnetic hysteresis loops of Lorentz profile

对于高斯线型, 统计结果引起的线型畸变十分类似于洛伦兹型; 此时, 半高宽为 0.833Δ . 总而言之, 当线宽不太小于 W_0 时, 统计结果不会改变线型; 只是峰值和线宽有不大的变化. 因为

微分回线可直接测量, 从而提供了铁磁体内部微观相互作用的重要研究方法. 类似的结论也完全适用于铁电体. 在磁滞回线和电滞回线中出现的各是什么线型, 成为重要的理论和实验新问题.

铁磁性的边界环流理论还可用来说明一些其它的重要问题. 在图1中若 $l \ll a$, 则铁磁体成为一个正方形薄片. 可以用外磁场使之磁化成为一个永磁薄片; 它的一个面为 S 极, 另一个面成为 N 极. 而总的环流等效于一匝线圈, 其中通有持久的电流 $(l \cdot J)$. 当薄片的边长 a 很大时, 这股电流在中部的 B 值应比靠近边界位置的小. 当 a 趋向无限大时, 远离边界部分应有 $B = 0$, 就是说一个无限大薄片在垂直于片的方向将不可能出现铁磁性. 另一方面, 若将磁化后的这个薄铁磁片弯曲并连接成一个轮胎面, 则边界上的环流反向互相抵消; 在垂直于此曲面方向应有 $B = 0$, 即不可能观察到铁磁性. 从实验角度看, 上述推论十分正确. 但从理论角度看, 这两个推论导致了严重困难. 因为第一种情况相当于无限边界, 第二种情况相当于循环边界; 这两种边界条件在固体理论中是公认地经常被采用的, 在铁磁性微观理论中也必须采用. 如何处理这个矛盾, 成为有趣的问题. 在铁电性理论中也存在类似矛盾. 采用无限边界或循环边界相当于认为体系没有边界. 一个无边界的体系能否出现铁电性和铁磁性, 有待研究.

致谢: 感谢李景德教授对本文工作的指导.

参考文献:

- [1] 戴道生, 钱昆明. 铁磁学(上册)[M]. 北京: 科学出版社, 1998.5.
- [2] 李景德, 李智强, 陆夏莲, 等. 铁电屏蔽理论[J]. 物理学报, 2000, 49(1): 160-163.
- [3] LAUDAU L D, LIFSHITZ E M. Statistical physics(part 1)[M]. Butterworth-Heinemann, 1980: 158-190.
- [4] 裘祖文, 裴奉奎. 核磁共振波谱[M]. 北京: 科学出版社, 1989.2.

The Boundary Circulating Current Theory of Ferromagnetism

LU Xia-lian, SHEN Han, LI Zhi-qiang, CHEN Min

(Department of Physics, Zhongshan University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: The boundary circulating current theory is promoted to explain ferromagnetism. Two typical types of differential magnetic hysteresis loops, which can reveal more ferromagnetic microinformation, display the difference between a broad potential barrier and a narrow one.

Keywords: ferromagnetism; boundary circulating; differential magnetic hysteresis loop; Gaussian profile; Lorentzian profile