

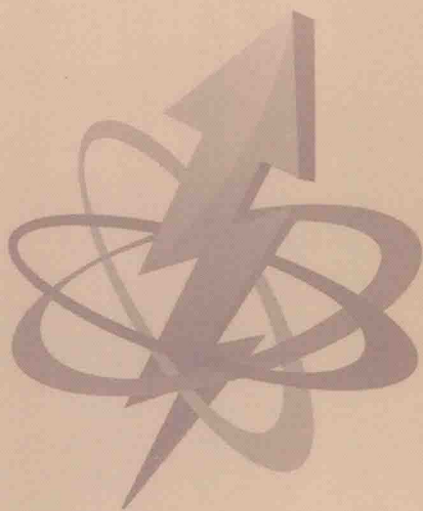


国家自然科学基金资助出版 (项目号51371091、51001054)
江苏大学专著出版基金资助出版

材料 电磁过程

Electromagnetic Processing of Materials

李桂荣 王宏明◎编著



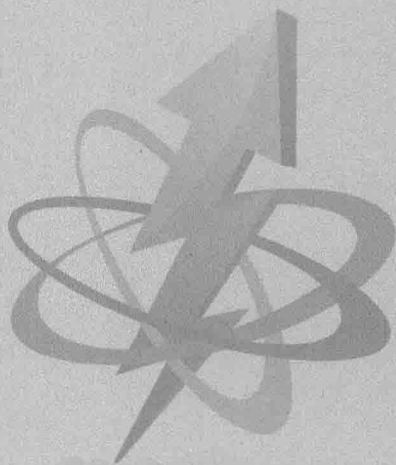
江苏大学出版社
JIANGSU UNIVERSITY PRESS

国家自然科学基金资助出版(项目号51371091、51001054)
江苏大学专著出版基金资助出版

材料 电磁过程

Electromagnetic Processing of Materials

李桂荣 王宏明◎编著



 江苏大学出版社
JIANGSU UNIVERSITY PRESS

镇江

图书在版编目(CIP)数据

材料电磁过程 / 李桂荣, 王宏明编著. — 镇江 :
江苏大学出版社, 2014. 12
ISBN 978-7-81130-899-0

I. ①材… II. ①李… ②王… III. ①电磁场—应用
—工程材料 IV. ①TB3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 311883 号



材料电磁过程

Cailiao Dianci Guocheng

编 著/李桂荣 王宏明

责任编辑/张小琴 吴蒙蒙

出版发行/江苏大学出版社

地 址/江苏省镇江市梦溪园巷 30 号(邮编: 212003)

电 话/0511-84446464(传真)

网 址/http://press. ujs. edu. cn

排 版/镇江新民洲印刷有限公司

印 刷/虎彩印艺股份有限公司

经 销/江苏省新华书店

开 本/718 mm×1 000 mm 1/16

印 张/15. 25

字 数/380 千字

版 次/2014 年 12 月第 1 版 2014 年 12 月第 1 次印刷

书 号/ISBN 978-7-81130-899-0

定 价/38. 00 元

如有印装质量问题请与本社营销部联系(电话:0511-84440882)

前 言

材料电磁过程是近年来国内外发展起来的新兴研究方向,主要是将物理、电工行业最新的先进场能技术应用到新材料制备中。它是以经济、环保、高效的手段将高密度电磁能量施加于多种材料的制备过程,特别是用于先进金属结构材料 and 功能材料的合成和加工过程,意在改善材料的合成和加工条件,调控材料的组织和性能进而实现新材料的研发。材料电磁过程是新型结构材料及功能材料设计和制备的重要途径,属多学科交叉的边缘科学,亦是材料科学与工程和钢铁、有色冶金领域的重要发展方向。

《材料电磁过程》全书详细阐述了电磁场类型和效应及其在现代新材料制备中的应用成果,并进行了机制分析。全书分为8章,前3章是开展材料电磁过程研究的必备基础知识,包括电磁场基础知识(第1章)、电磁场类型和功能(第2章)、电磁场的多种效应(第3章);第4章和第5章是近年来不同类型电磁场在新材料设计和制备以及冶金工程领域的应用成果;第6章和第7章叙述了强磁场在细晶、取向、相变、化学等领域的应用效果,并总结分析了强磁场的作用机制,有助于读者认识强磁场在新材料设计和制备中的潜力;第8章是磁场在改善材料塑性变形能力方面的研究成果。书中主要章节汇总了作者十余年来的研究成果,主要将不同类型电磁场应用到高强韧金属材料的设计、合成和塑性加工过程中。本书的出版是在国家自然科学基金资助下完成的,在撰写和编辑过程中得到了研究生王芳芳、李沛思、朱弋、薛飞、储强泽、郑瑞、袁雪婷、蔡云、李月明、彭琮翔等的协助,在此对他们表示感谢!

本书适合从事材料电磁过程研究的高校研究所教师、研究生和相关人士参考,欢迎广大读者对书中的不足之处提出宝贵意见和建议。

作 者

2014 年金秋

部分物理符号索引

符号	含义	数值或单位	首次出现的位置
h	普朗克常量	$6.63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$	1.1 式
e	电子电量	$1.6 \times 10^{-19} \text{ 库伦(C)}$	1.1 式
c	光速	$3 \times 10^8 \text{ m/s}$	1.1 式
m	质量, 不特指	千克(kg)	1.1 式
V	体积	立方米(m^3)	1.2 式
H	磁场强度	牛/库(N/C)	1.3 式
J	电流密度、传导电流密度	安培(A)	1.3 式
D	电通量密度	安培/平方米(A/m^2)	1.3 式
M	磁化强度	安培/米(A/m)	1.4 式
B	磁感应强度、磁通密度	特斯拉(T)	1.6 式
χ	磁化率	量纲一	1.7 式
χ_i	铁磁性物质磁化率	量纲一	1.2.3 节
χ_p	顺磁性物质磁化率	量纲一	1.2.3 节
χ_d	抗磁性物质磁化率	量纲一	1.2.3 节
F	力	牛顿(N)	1.8 式
q	电荷量、电量	库伦(C)	1.8 式
v	速度	米/秒(m/s)	1.8 式
Φ	磁通	韦伯(Wb)	1.9 式
A	面积	平方米(m^2)	1.9 式
μ	磁导率	亨利/米(H/m)	1.11 式
μ_0	真空磁导率	$4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$	1.10 式
μ_r	相对磁导率	量纲一	1.13 式
I	电流(不是感生电流 J)	安培(A)	2.1 式
θ	角度	度($^\circ$)	2.1 式
p	磁压强	MPa	2.9 式
N	形核率	个/秒	2.10 式
ΔT	过冷度	$^\circ\text{C}$	2.10 式

符号	含义	数值或单位	首次出现的位置
l	长度	米(m)	3.1 式
ε_i	感应电动势(单匝)	伏特(V)	3.25 式
ε	感应电动势(多匝)	伏特(V)	3.26 式
ψ	磁通链数	韦伯(Wb)	3.27 式
Q	热量	焦耳(J)	3.30 式
R	电阻	欧姆(Ω)	3.30 式
δ	透入深度	米(m)	3.31 式
ρ	电阻率	$\Omega \cdot \text{cm}$	3.32 式
P	接收功率	W/cm^2	3.33 式
γ	表面张力	N/m	3.34 式
R	与 r 同,表示半径	m	3.34 式
$\Delta G^\ominus$	标准吉布斯自由能	$\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$	4.3 式
ρ_p	颗粒密度	kg/m^3	4.18 式
ρ	基体密度	kg/m^3	4.18 式,与 3.32 式电阻率符号相同,需遵照具体公式中含义
U	内能	焦耳(J)	4.32 式
H	焓(变)	焦耳(J)	4.37 式,限于该公式,其他位置是表示磁场强度
η_i	表观黏度	帕·秒($\text{Pa} \cdot \text{s}$)	5.1 式
d	晶粒尺寸	米(m)	5.2 式
G	冷却速度	$^\circ\text{C}/\text{s}$	5.2 式
σ	表面张力	牛顿/米(N/m)	6.5 与 3.34 中的表面张力是同一性质的量
γ	整体剪应变	牛顿/米(N/m)	7.13 式,仅限于该公式
τ	外加应力	牛顿(N)	7.14 式
m	磁极强度	特斯拉(T)	7.18 式,仅限于该公式
D	位错密度	个/平方米	8.1 式,限于本章
l	半高宽度	度($^\circ$)	8.1 式,限于本章
b	伯格斯矢量		8.1 式



目 录

第 1 章 电磁场基础知识	(001)
1.1 物质的磁性起源	(001)
1.1.1 原子核磁矩	(002)
1.1.2 电子自旋磁矩和轨道磁矩	(003)
1.2 磁场相关的概念	(006)
1.2.1 磁场强度	(006)
1.2.2 磁化强度	(006)
1.2.3 磁化率	(007)
1.2.4 磁感应强度	(010)
1.2.5 磁导率	(010)
1.2.6 磁偶极子	(012)
1.3 物质磁性的分类	(013)
1.3.1 抗磁性和抗磁性物质	(013)
1.3.2 顺磁性和顺磁性物质	(014)
1.3.3 铁磁性和铁磁性物质	(017)
1.3.4 反铁磁性物质	(018)
1.3.5 亚铁磁性物质	(018)
1.3.6 超顺磁性物质	(019)
1.3.7 磁性材料	(019)
1.4 电磁场的产生	(020)
1.4.1 电与磁的关系	(020)
1.4.2 磁体及磁场发生设备	(022)
1.5 电磁技术的应用	(024)
第 2 章 电磁场类型和功能	(028)
2.1 静磁场	(029)
2.1.1 静磁场特征	(029)
2.1.2 静磁场功能	(030)



2.2	直流磁场	(031)
2.2.1	直流磁场特征	(031)
2.2.2	直流磁场功能	(032)
2.3	交变磁场	(032)
2.3.1	交变磁场特征	(032)
2.3.2	交变磁场功能	(032)
2.4	旋转磁场	(033)
2.5	行波磁场	(034)
2.5.1	行波磁场特征	(034)
2.5.2	行波磁场功能	(035)
2.6	脉冲磁场	(037)
2.6.1	脉冲磁场特征	(037)
2.6.2	脉冲磁场功能	(038)
2.7	移动磁场	(038)
2.7.1	移动磁场特征	(038)
2.7.2	移动磁场功能	(039)
2.8	调幅磁场	(040)
2.8.1	调幅磁场特征	(040)
2.8.2	调幅磁场功能	(041)
2.9	组合磁场	(042)
2.10	强磁场	(043)
2.10.1	稳态强磁场	(044)
2.10.2	脉冲强磁场	(045)
2.11	本章小结	(049)
第3章	电磁场效应及其应用	(050)
3.1	电磁场力效应	(050)
3.1.1	电磁力	(050)
3.1.2	电磁力的方向	(051)
3.1.3	电磁力的定量表征	(052)
3.2	电磁场热效应	(056)
3.2.1	电磁感应原理	(056)
3.2.2	电磁感应效应在材料制备中的应用	(065)

3.3 磁场其他效应	(069)
3.3.1 磁化学效应	(069)
3.3.2 磁致塑性效应	(069)
3.3.3 塞曼效应	(069)
3.3.4 磁致伸缩效应	(070)
3.3.5 磁共振	(071)
3.3.6 磁电阻效应	(072)
3.3.7 磁弹性效应	(072)
3.3.8 磁光效应	(072)
3.3.9 磁卡效应	(072)
3.3.10 磁生物效应	(072)
第4章 电磁场在复合材料制备中的应用	(074)
4.1 引言	(074)
4.2 颗粒增强铝基复合材料的合成机制	(074)
4.2.1 复合材料的合成过程	(074)
4.2.2 复合材料的凝固组织	(075)
4.2.3 复合材料的合成机制	(077)
4.3 电磁搅拌法合成铝基复合材料	(079)
4.3.1 电磁搅拌设备	(079)
4.3.2 电磁搅拌器中磁感应强度和电磁力分布	(081)
4.3.3 电磁搅拌条件下反应物粒子进入熔体的条件	(083)
4.3.4 电磁搅拌法合成复合材料的凝固组织	(085)
4.3.5 电磁场对原位合成过程的作用机制	(087)
4.3.6 强搅拌离心力下颗粒分布的梯度效应	(090)
4.4 高频正弦调制磁场下合成复合材料	(093)
4.4.1 高频调制磁场设备	(093)
4.4.2 高频调制磁场内磁感应强度分布规律	(095)
4.4.3 高频正弦调制磁合成复合材料的凝固组织	(098)
4.5 电磁场对原位反应热力学条件的作用机制	(100)
4.5.1 磁场对反应体系熵的影响	(100)
4.5.2 磁场对反应体系能量状态的影响	(102)
4.5.3 电磁场对复合材料原位合成过程的影响	(103)



4.6	本章小结	(105)
第5章	电磁场在熔体制备和凝固中的应用	(106)
5.1	电磁场在熔体制备中的应用	(107)
5.1.1	电磁场在合金熔炼时的作用	(107)
5.1.2	电磁场的熔体净化作用	(108)
5.2	电磁搅拌下熔体凝固	(112)
5.2.1	电磁搅拌器类型	(112)
5.2.2	电磁搅拌在凝固过程中的应用和效果	(113)
5.2.3	电磁搅拌下复合材料的凝固组织	(116)
5.3	静磁场下熔体凝固	(121)
5.4	直流磁场下熔体凝固	(122)
5.5	脉冲磁场下熔体凝固	(123)
5.6	软接触电磁连铸	(123)
5.6.1	软接触概念	(123)
5.6.2	软接触过程的力分析	(124)
5.6.3	软接触技术的应用	(126)
5.7	电磁铸造	(127)
5.7.1	电磁铸造原理	(127)
5.7.2	电磁铸造过程受力分析	(128)
5.7.3	电磁铸造的应用	(130)
5.8	电磁离心铸造	(131)
5.8.1	电磁离心铸造原理	(131)
5.8.2	电磁离心铸造应用	(132)
5.9	电磁制动	(133)
5.9.1	电磁制动原理	(133)
5.9.2	电磁制动的应用	(134)
5.10	电磁振荡	(136)
5.10.1	电磁振荡原理	(136)
5.10.2	电磁振荡的应用	(138)
5.11	本章小结	(138)

第 6 章 电磁场在相变和晶体生长中的应用	(140)
6.1 电磁场处理材料时的相变条件	(140)
6.1.1 磁场处理铁磁性物质时的热力学	(141)
6.1.2 磁场处理弱磁性物质时的热力学	(144)
6.2 磁场处理铁磁性物质时的相变	(146)
6.2.1 磁场对相变温度的影响	(146)
6.2.2 磁场对相变产物尺寸的影响	(147)
6.2.3 磁场对相变产物数量的影响	(149)
6.2.4 磁场对相变速率的影响	(150)
6.2.5 磁场对相变产物种类和形貌的影响	(150)
6.3 磁场对非铁磁性物质相变的影响	(151)
6.3.1 磁场处理铝合金时的相变	(151)
6.3.2 磁场处理钛合金时的相变	(151)
6.3.3 磁场处理镁合金时的相变	(153)
6.4 磁场处理后的材料性能	(155)
6.4.1 磁场处理后铁磁材料的性能	(155)
6.4.2 磁场处理后非铁磁材料的性能	(155)
6.5 本章小结	(159)
第 7 章 强磁场在材料制备和加工中的应用	(160)
7.1 强磁场的特征	(160)
7.1.1 超强磁场特征	(160)
7.1.2 脉冲强磁场特征	(161)
7.2 强磁场效应	(162)
7.2.1 磁化效应	(162)
7.2.2 强磁场中材料磁化的热力学分析	(162)
7.2.3 强磁场综合力效应	(164)
7.2.4 强磁场能量效应	(165)
7.2.5 强磁场诱导织构组织	(166)
7.2.6 强磁场诱导组装	(167)
7.3 强磁场下材料制备和加工技术	(167)
7.3.1 强磁场下金属凝固	(168)
7.3.2 悬浮熔炼	(171)



7.3.3	促进化学反应	(171)
7.3.4	磁场对分子取向的影响	(173)
7.3.5	磁场对材料内部残余应力的影响	(174)
7.3.6	强磁场在功能材料制备中的应用	(179)
7.3.7	强磁场下粒子自组装和有序结构材料制备	(180)
7.3.8	强磁场在物理化学领域的应用	(185)
7.4	强磁场发展前景	(186)
第8章	磁场对固体材料塑性的影响	(188)
8.1	磁场与材料塑性间的关系	(189)
8.2	强磁场下位错行为特征	(192)
8.2.1	强磁场处理铝基复合材料中的位错行为	(192)
8.2.2	强磁场处理镁合金中的位错行为	(197)
8.2.3	强磁场处理钛合金中的位错行为	(199)
8.3	磁致塑性效应的影响因素	(202)
8.3.1	磁场施加方式对位错行为的影响	(202)
8.3.2	热量与位错行为的关系	(203)
8.3.3	时间与位错行为的关系	(203)
8.3.4	掺杂元素与位错行为的关系	(203)
8.3.5	样品处理状态与位错行为的关系	(204)
8.3.6	应力场对磁致塑性效应的影响	(204)
8.4	磁致塑性效应机制分析	(206)
8.4.1	位错芯结构	(206)
8.4.2	缺陷动力学	(207)
8.4.3	位错滑移机制	(207)
8.4.4	磁场作用下的自由基对理论	(209)
8.4.5	将晶体塑性流动视作化学反应过程	(213)
8.4.6	磁场对材料内部能量状态的影响	(216)
8.5	本章小结	(218)
参考文献		(219)



第1章 电磁场基础知识

1.1 物质的磁性起源

研究表明,一切物质都具有磁性,任何空间都存在磁场。地球本身就是一个大磁场,图 1.1 是地球的磁场强度分布图。

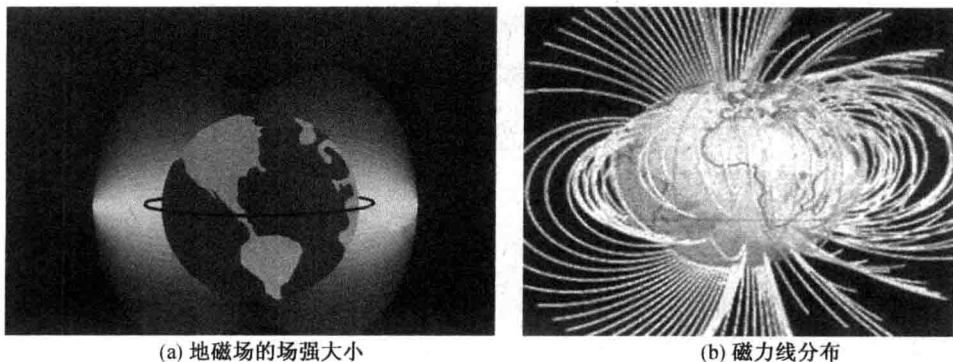


图 1.1 地球的磁场强度分布

磁场和磁现象贯穿宏观和微观世界,大到地球磁场,小到磁铁磁场和原子核磁场,图 1.2 是地磁、磁铁和核磁示意图。

磁性是物质的基本属性,就像物质具有质量和电性一样。简单来讲,一切物质都具有磁性,这是与物质的微观结构直接相关的。现代科学认为,物质的磁性来源于组成物质中原子的磁性,原子是保持物质物理性质的最小单位。图 1.3 是原子结构示意图,由内层原子核和外层电子构成。

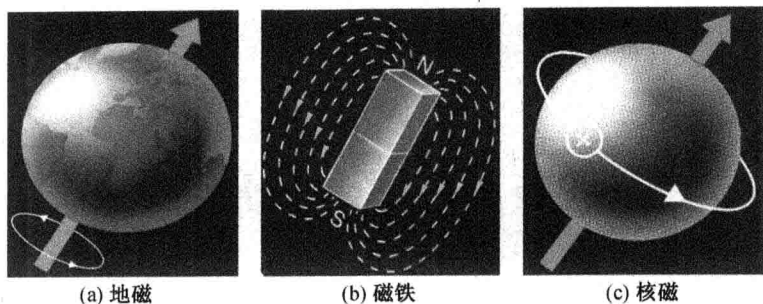


图 1.2 地磁、磁铁和核磁示意

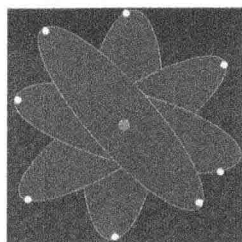


图 1.3 原子的结构模型

原子磁性由 3 部分构成：① 原子核的核磁矩；② 电子的自旋磁矩；③ 原子中外层电子的轨道磁矩。

1.1.1 原子核磁矩

原子核总是绕着特定轴进行旋转，因此具有一定的角动量，这种旋转方式称为自旋(Spin)，如图 1.4 所示。

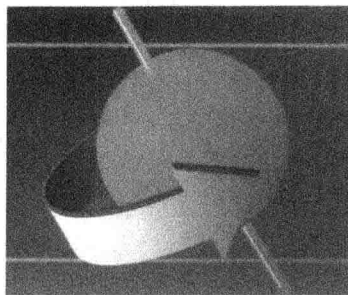


图 1.4 原子核自旋示意图

具有奇数质子或具有奇数中子结构的原子核在其自旋过程中能够产生自旋



磁动量,即形成原子核磁矩,如图 1.5 所示。

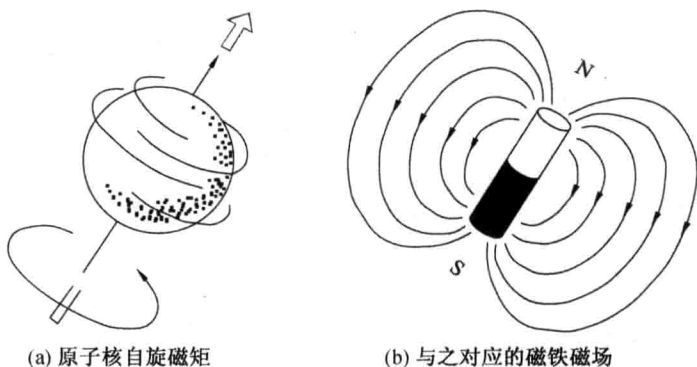


图 1.5 原子核自旋磁矩示意图

配对的质子磁场相互抵消,而未配对的质子可产生磁矩。此外,奇数中子的原子核,其电量分布不对称,在自旋过程中也可产生磁矩。

对比原子核磁矩与分子磁矩的区别与联系,可以认为:

① 原子核磁矩是分子磁矩的次要组成部分,形成分子磁矩的主要贡献者是核外电子;

② 原子核磁矩是由磁性核产生的磁矩,与核外电子无关,与原子核的性质和结构有关;

③ 原子核磁矩的方向与原子核的自旋方向相关。

综合来看,原子核磁矩较小,对材料的磁性影响不大。

1.1.2 电子自旋磁矩和轨道磁矩

物质磁性主要源于原子中电子的核外分布和电子运动规律。核外电子的分布具有以下特点:

① 核外电子从内到外分层排布(K,L,M,N),每层内按不同能级分布(s,p,d,f);

② 每层有 n^2 个电子轨道,最多容纳 $2n^2$ 个电子, n 为自然数;

③ 最外层不超过 8 个电子,次外层不超过 18 个电子;

④ 遵循泡利不相容原理;

⑤ 每个轨道最多只能容纳 2 个运动状态不同的电子。

根据电子层数和电子分布的原则,电子的填充次序可以表示为 1s,2s,2p,3s,3p,3d,4s,4p,4d,4f,...,如图 1.6 所示。

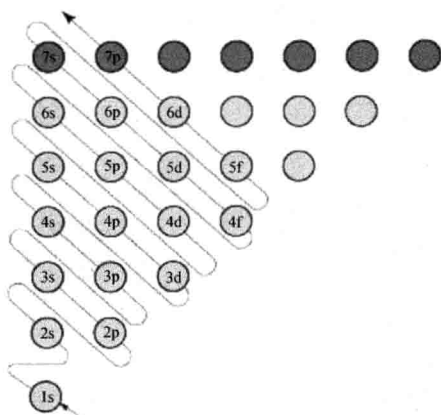


图 1.6 原子核外层电子填充次序图

但是在填完 3p 以后,会先填 4s,再填 3d;对于 4f 也有类似情况,先填 5p 和 6s,再填 4f。图 1.7 是电子运动示意图,从图中可以看出,电子在自旋的同时沿着一定轨道绕着原子核旋转。

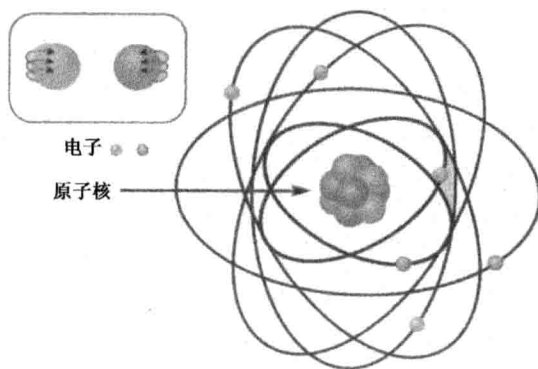


图 1.7 电子运动示意图

电子运动包含两种类型,一种是自身如陀螺般的旋转,称为电子自旋,形成的磁矩称为电子自旋磁矩;另一种是电子围绕原子核进行的运动,称为轨道运动,形成的磁矩称为轨道磁矩。图 1.8 是电子轨道磁矩和自旋磁矩示意图。若电子按照层数依次填满每一层,由于轨道的对称性,将不表现轨道磁矩,但是由于电子填充次序的特殊性,当存在没有填满的轨道时,原子才会存在轨道磁矩。

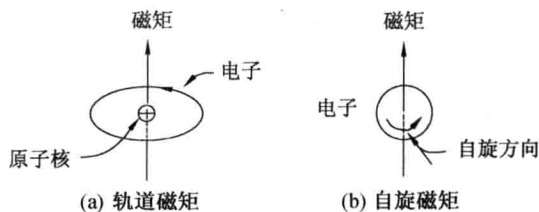


图 1.8 电子轨道磁矩和自旋磁矩示意图

轨道磁矩产生了带 N 极和 S 极的微小磁场。在大部分原子中,一个电子总是与另一个正在反方向旋转的电子成对出现,它们的磁场相互抵消。然而有些原子,其一个方向旋转的电子多于另一个方向的电子,当这些原子成群出现在一个地方时,它们就形成了一个磁区。磁区内所有原子的磁场呈线性排列。其 N 极都朝着一个方向,S 极朝着相反的方向。这样每一个磁区就像一个带 N 极和 S 极的微小磁体。

电子在轨道中以几乎接近光速的速度飞快地运行着,造成强电流。这不仅使粒子具有一个机械角动量 $h/2 \approx 5 \times 10^{-27}$ (h 为普朗克常量),而且还有一个可观察的磁偶极矩 $eh/2mc \approx 10^{-20}$ (其中, e 为电子电量, m 为电子质量, c 为光速),这个磁矩称为玻尔磁子,用 μ_B 表示。

$$\mu_B = \frac{eh}{4\pi m} \quad (1.1)$$

磁偶极矩的宏观效应就形成了可以感知的磁性,见式(1.2)。

$$M = \frac{\sum_{i=1}^n \mu_{m_i}}{\Delta V} \quad (1.2)$$

式中: M ——磁化强度, A/m;

μ_{m_i} —— i 电子的磁偶极矩;

V ——体积。

电子的轨道与轨道、轨道与自旋、自旋与自旋的直接或间接相互作用以及这些磁矩对外磁场响应的特性就构成了各种不同的磁性物质。一般来讲,在一个物质中有很多磁区,大多数物质的磁区随机排列,所以它们的两极指向所有不同的方向,磁极之间相互抵消,因此不产生磁场。然而,在磁体中,几乎所有磁区都是线性排列的。线性排列的各磁区的合力使该物质具有磁场,成为磁体。因此,磁区排列的差异导致了不同物质磁性的差异。