轻合金电磁冶金

崔建忠　巴启先　班春燕　乐启炽　著

东北大学出版社
沈　阳

需要全本请访问 www.ertongbook.com

崔建忠等 2005

图书在版编目（CIP）数据

轻合金电磁冶金 / 崔建忠等著 .— 沈阳 : 东北大学出版社，2005.1
ISBN 7-81102-095-5

Ⅰ.轻… Ⅱ.①崔 ②巴… ③班… Ⅲ.电磁流体力学 - 应用 - 轻金属合金 - 冶金
Ⅳ.TF19

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2005）第 01465 号

出 版 者：东北大学出版社

地 址：沈阳市和平区文化路 3 号巷 11 号

邮 编：110004

电 话：024—83687331（市场部） 83680267（社务室）

传 真：024—83680180（市场部） 83680265（社务室）

E-mail: neuph @ neupress.com

http: // www.neupress.com

印 刷 者：沈阳市光华印刷厂

发 行 者：东北大学出版社

幅面尺寸：184mm×260mm

印 张：25

字 数：640 千字

出版时间：2005 年 1 月第 1 版

印刷时间：2005 年 1 月第 1 次印刷

责任编辑：刘 莹 责任校对：文 玉

封面设计：唐敏智 责任出版：秦 力

定 价：36.00 元

前　言

我国钢铁工业突破亿吨产量以后，迅猛发展，2003 年钢铁产量达到 23000 万吨，成为世界钢铁第一生产大国．我国的轻金属（主要是铝和镁）高速发展．2004 年我国的原铝实际产量超过 540 万吨，占世界总产量的 20%左右．有人预测，2005 年我国的原铝生产能力将达到 600 万吨．2004 年，我国镁产量达到 34 万吨，占世界镁总产量的 60%多，已经成为名副其实的铝和镁生产大国．

我国现在已建成了比较完整的铝加工工业体系．目前，我国有铝加工企业 1400 多家，涵盖了熔铸、轧制、挤压、锻造、制粉、热处理、表面处理等铝加工的所有环节．总产能超过 500 万吨，能生产 18 大类 200 多个合金 2400 多个品种 14000 个规格的铝加工材．2001 年，我国铝材产量为 230.9 万吨，是仅列于美国、日本之后的第三铝加工材生产大国．

但是，我国人均铝消费量仅为 1.51 千克，仅为世界人均消耗量的一半；发达国家常用合金品种达 350 多个，我国才 200 多个；发达国家铝合金的热处理状态达 300 多个，我国才有 70 多个．同时我国铝工业还存在结构不合理、污染严重、能耗高等问题，尤其是一些高性能铝材，自己还不能生产，必须进口……这些表明，中国还不是铝工业的强国．

中国目前原镁生产厂家有 120 余家，产量从 1994 年的 2.52 万吨迅猛增加到 2004 年的 34 万吨．中国镁产量的高速增加，使世界镁价格大幅度降低，为镁的大规模工业应用奠定了基础．但是中国原镁的 90%出口，自己消费的很少，镁加工材更少．这表明中国镁工业仍旧以出卖资源、能源为主，不是一个镁工业的强国．

为了彻底改变上述局面，国家启动了一系列重大科技计划．包括国家重点基础研究计划（“973”计划）、国家高技术发展计划（“863”计划）和国家攻关计划．其中最重要的是“973”计划，列出了“提高铝材质量基础研究”等重大项目．我们有幸参加该项目，承担“外场作用下的铝合金凝固”课题．针对电磁场作用下铝合金凝固的基本问题，如液相线、固相线温度的变化；结晶形核和长大；合金元素的微观和宏观偏析；组织细化；微结构的变化及内应力与裂纹等问题进行了系统、全面的理论与实验研究．在此基础上，开发了“铝合金低频电磁连铸”、“铝合金低频电磁振荡连铸”和“电磁水平连铸”等新技术，并且进一步将该技术向高强铝合金中延伸，承担了“863”课题“超高强高韧铝合金产业化技术与装备研究”，向镁合金延伸，承担了“863”课题“镁合金锻

造轮毂产业化技术研究”和国家自然科学基金项目“镁合金凝固的电磁过冷理论”等课题．本专著是这些课题研究成果的总结和汇报，目的是建立轻合金电磁冶金的理论框架，推动电磁场在轻合金制备和加工中的更广泛应用．

我们从事轻合金电磁冶金研究已有 10 年。这 10 年间，一大批年轻有为的研究生在这块沃土上开拓、耕耘，他们是：刘志义博士、刘伟博士、张北江博士、张勤博士、班春燕博士、董杰博士、刘晓涛博士、张新建硕士等和在本实验室结业的一大批本科生，他们为轻合金电磁冶金的发展贡献了力量，本专著中凝聚着他们的智慧和心血．

本书共分 7 章，其中第 1 章“绪论”、第 4 章“电磁连铸工艺与理论”、第 6 章“磁场作用下的再结晶和界面扩散”、第 7 章“电场热处理”由崔建忠编写，第 2 章“ 金属材料电磁理论”由巴启先和班春燕编写，第 3 章“电磁凝固基础研究”由班春燕编写，第 5 章“ 镁合金电磁 DC 铸造”由乐启炽编写，全书由崔建忠统稿．写作过程中，参考和借鉴了“电磁冶金学”等著作，得到胡壮麒院士、梅田高照教授等海内外学者的帮助，提出许多宝贵意见，在此表示感谢．

由于电磁冶金是一个涉及多个学科，理论研究上没有全面深入的领域，我们对该领域的理解还很肤浅，因此本书中难免有各种错误和不足，希望大家批评指正．

作　者

2004 年 10 月

目　　录

1　绪　论 …… 1

2　金属材料电磁理论 …… 5

2.1　电磁现象的基本规律 …… 5

2.1.1　麦克斯韦方程组和洛伦兹力公式 …… 6

2.1.2　电磁场的能量和动量 …… 9

2.1.3　静电场和静磁场 …… 13

2.1.4　时变电磁场 …… 17

2.1.5　电磁场中的金属 …… 24

2.2　金属的电学性质 …… 28

2.2.1　金属量子自由电子理论 …… 29

2.2.2　晶体中电子的状态和布洛赫定理 …… 38

2.2.3　近自由电子近似 …… 42

2.2.4　紧束缚近似 …… 48

2.2.5　能带理论的简单应用 …… 52

2.2.6　金属的电阻 …… 59

2.3　金属的磁学性质 …… 66

2.3.1　物质的宏观磁性和磁体热力学 …… 66

2.3.2　原子磁矩 …… 70

2.3.3　带电粒子在磁场中的运动 …… 74

2.3.4　金属的抗磁性与顺磁性 …… 83

2.3.5　铁磁性金属的自发磁化和技术磁化 …… 91

2.3.6　简单的磁路 …… 98

2.4　液态金属的电磁特性 …… 101

2.4.1　流体力学基础 …… 102

2.4.2　磁流体力学方程 …… 108

2.4.3　磁应力和磁压强 …… 110

2.4.4　磁场的扩散和冻结 …… 113

2.4.5　磁流体力学波 …… 116

2.5　电磁效应的动力学理论 …… 122

2.5.1　玻耳兹曼方程 …… 122

2.5.2　金属电导 …… 124

2.5.3　金属热导 …… 127

2.5.4　热电效应 …… 129

2.5.5　电流磁效应 …… 131

参考文献 …… 136

需要全本请访问 www.ertongbook.com

3 电磁凝固基础研究 …… 137

3.1 铝及其合金细化方法简介 …… 137
3.1.1 铝合金细化方法分类 …… 137
3.1.2 不同细化方法比较 …… 138
3.2 材料的电磁过程发展现状 …… 139
3.2.1 材料电磁过程技术简介 …… 139
3.2.2 材料电磁过程技术分类 …… 140
3.3 交、直流磁场对金属液、固相线的影响 …… 140
3.3.1 引 言 …… 140
3.3.2 液相线和固相线温度的确定 …… 142
3.3.3 磁场对 Al - Cu 合金相图的影响 …… 143
3.3.4 磁场频率及强度对 7075 合金液相线、固相线温度的影响 …… 150
3.3.5 电磁场对合金结晶温度影响的热力学分析 …… 153
3.4 交、直流磁场对 Al - Cu 合金溶质分配系数的影响 …… 156
3.5 磁场对金属凝固组织的影响 …… 158
3.5.1 研究概况 …… 158
3.5.2 交、直流磁场对铝合金凝固组织的影响 …… 161
3.5.3 脉冲磁场对铝合金凝固组织的影响 …… 171
3.6 电流对金属凝固组织的影响 …… 175
3.6.1 引 言 …… 175
3.6.2 连续电流对铝合金凝固组织的影响 …… 178
3.6.3 脉冲电流对金属凝固组织的影响 …… 179
3.7 电场和磁场共同作用下的金属凝固 …… 182
3.8 电磁场对晶内溶质元素含量的影响 …… 182
3.8.1 提高合金元素固溶度的途径 …… 182
3.8.2 电磁场对合金元素晶内含量的影响 …… 183
3.9 电磁场对宏观偏析的影响 …… 190
3.9.1 研究概况 …… 190
3.9.2 电磁场对铝合金宏观偏析的影响 …… 191
参考文献 …… 196

4 电磁连铸工艺与理论 …… 201

4.1 轻合金电磁连铸的发展历史和现状 …… 201
4.2 电磁半连续铸造宏观物理场理论 …… 204
4.2.1 金属熔体中的交变电磁场 …… 204
4.2.2 电磁场与熔体交互作用 …… 207
4.2.3 电磁场对熔体流动的影响 …… 209
4.2.4 交变电磁场在铝合金半连续铸造过程中的应用 …… 211
4.3 EMC 电磁无模半连铸技术 …… 213
4.3.1 工艺原理 …… 214

4.3.2 EMC过程的数值模拟结果 …… 215
4.3.3 EMC铸造的实践 …… 220
4.3.4 铸造实践 …… 223
4.4 CREM法 …… 224
4.4.1 CREM法的工艺原理 …… 224
4.4.2 CREM法中的流场分析 …… 225
4.4.3 圆锭铸造 …… 227
4.4.4 方坯铸造 …… 229
4.5 低频电磁铸造(LFEMC)法 …… 234
4.5.1 LFEMC原理 …… 234
4.5.2 低频电磁铸造过程中宏观流场和温度场数值模拟 …… 234
4.5.3 电磁场铸造中铸锭的内应力 …… 248
4.5.4 7075铝合金的低频电磁连铸 …… 255
4.5.5 7075合金直径为200mm的圆锭铸造 …… 257
4.5.6 超高强铝合金的低频电磁连铸 …… 262
4.5.7 Φ270mm7A60合金的LFEC …… 281
4.6 电磁振荡半连铸 …… 294
4.6.1 电磁振荡原理 …… 294
4.6.2 工频电磁振荡的结果 …… 296
4.6.3 7075铝合金电磁振荡(LFEC)半连铸 …… 296
4.6.4 低频电磁振荡半连续铸造Φ270mm7A60铸锭 …… 305
4.6.5 低频电磁和低频电磁振荡铸锭质量比较 …… 314
4.7 铝合金电磁水平连铸 …… 315
4.8 电磁凝固理论 …… 317
4.8.1 磁致过冷 …… 318
4.8.2 磁致流动 …… 318
参考文献 …… 323

5 镁合金电磁DC铸造 …… 329

5.1 镁及其合金的特点与应用 …… 329
5.2 镁合金半连续DC铸造 …… 329
5.3 镁合金电磁铸造基本原理 …… 330
5.4 镁合金半连续DC铸造数值模拟 …… 332
5.4.1 建 模 …… 332
5.4.2 边界条件与初始条件确定 …… 333
5.4.3 电流与频率对熔体中感应电磁场分布的影响 …… 334
5.4.4 电磁场对温度场和流场的影响 …… 336
5.5 镁合金电磁半连续DC铸造工艺研究 …… 339
5.5.1 电磁半连续DC铸造AZ91镁合金锭坯的微观组织 …… 339
5.5.2 铸造速度对AZ系列合金电磁半连续铸造锭坯组织的影响 …… 347
5.5.3 电磁场对合金元素分布的影响 …… 351

5.5.4 ZK 系列镁合金 …… 354
5.5.5 其他镁合金 …… 356
5.5.6 低频电磁半连续铸造对镁合金组织缺陷和表面质量的影响 …… 359
参考文献 …… 361

6 磁场作用下的再结晶和界面扩散 …… 363

6.1 磁场作用下的合金再结晶行为 …… 363
6.2 磁场作用下的钢固态相变 …… 367
6.3 磁场作用下的界面扩散 …… 371
6.3.1 磁场作用下 Al - Mg 扩散偶的界面结构及长大规律 …… 371
6.3.2 磁场作用下 Al - Zn 扩散偶的界面结构及长大规律 …… 372
6.3.3 磁场作用下 Al - Cu 扩散偶的界面结构及长大规律 …… 374
参考文献 …… 375

7 电场热处理 …… 377

7.1 强电场作用下的塑性变形 …… 377
7.2 强电场作用下的再结晶 …… 378
7.3 强电场作用下的固态相变与合金元素扩散 …… 385
7.4 铝合金的强电场热处理 …… 386
7.4.1 铝合金的电场均匀化 …… 386
7.4.2 铝合金电场固溶 …… 388
7.4.3 电场时效 …… 389
7.4.4 电场作用下的克肯达尔效应 …… 390
参考文献 …… 391

1 绪　　论

材料电磁过程(Electromagnetic Processing of Materials,简称 EPM)是指将磁流体力学(Magneto Hydrodynamics,简称 MHD)与材料加工技术结合起来,将电磁场应用于材料制备和加工过程,从而实现对材料过程的控制及材料组织和性能的改善.经过多年的发展,目前已形成多学科交叉、应用领域广泛、工艺方法繁多的一门边缘科学[1~7].

早在 1823 年,Faraday[8]就从海洋流动与地球磁场的关系着手,测量了流体在电磁场中的运动情况.1923 年,Muck 获得了悬浮熔炼方法的专利.1938 年,Hartmann[9]系统研究和分析了水银在流动槽中运动时与电磁场的相互作用关系.1942 年,Alfvén 提出了磁冻结概念,Alfvén 波的发现,使人们对导电流体与磁场的相互作用有了本质上的认识和提高,然而磁流体力学理论的系统研究和发展却是直到 20 世纪 60 年代后才逐渐开展起来的,最初,在材料制备过程中的应用也仅限于半导体金属材料的成型.近二十年来,感应加热、电磁搅拌、电磁铸造等过程在有色金属和黑色金属冶炼及制备方面得到广泛的应用与发展.1982 年在英国举行的 I-UTAM(国际力学理论和应用联合会)学术会议上第一次提出材料电磁过程这一术语,到 1990 年和 1994 年,在日本先后召开的第六届 IISS(国际钢铁研讨会)以及第一届材料电磁工艺国际会议,预示着材料电磁过程时代的到来.

目前,材料电磁过程使用的电磁场主要有以下几种:①由传统线圈或超导线圈所产生的直流磁场,主要用于制备具有强磁场取向的金属材料和控制液体金属的流动;②频率从几赫兹到数十兆赫兹的交变磁场,通过对磁场频率的选择,可分别应用于感应加热、电磁搅拌、电磁加压、电磁输送等工艺过程;③移动磁场、脉冲磁场、变幅磁场等特殊磁场主要用于高效、节能等新技术工艺的开发.上述各种磁场不仅可以单独使用,还可以几种磁场或磁场和电场共同使用于某一材料加工过程.

材料的电磁过程按其应用可分为形状控制、驱动液体、抑制流动、悬浮、雾化、热量生成、探测、精炼和凝固组织的控制等功能,具体阐述如下.

(1) 形状控制功能

形状控制功能可分为利用高频交变磁场和利用直流磁场两类.前者在铝、铜及其合金的领域内已实现了电磁铸造、冷态坩埚、熔化金属的薄膜以及悬浮熔炼和熔化金属的喷射成形;后者主要利用在有直流磁场梯度的地方,可以设法使熔化金属的喷射流扁平化.由于直流磁场几乎不伴有发热现象,因此适用于金属的凝固过程.与使用高频交变磁场的情况不一样,利用直流磁场有可能使设备小型化,大大降低成本.

(2) 电磁搅拌功能

电磁搅拌是对金属凝固过程进行控制的一种有效手段,在制取半固态浆料方面,获得了广泛应用.电磁搅拌对金属凝固组织的改变主要表现在改变柱状晶生长方向、促使柱状晶向等轴晶转变、细化宏观组织、改变初生相形貌和尺寸、引起共晶组织形貌的变化、引起枝晶臂间距发生变化等方面.

电磁复合铸造也是利用共晶合金在电磁搅拌作用下产生分离共晶的原理,使之与连续铸

造技术相结合,开发出内表面分离共晶层为金属间化合物的铸件 .利用该技术生产的铸件基本不需要二次加工、内表面分离层自身生成、基体相容性良好、组织均匀,是优良的功能材料 .目前,已经开发出分离层为 Al - Ni, Al - Mn, Al - Fe 等金属间化合物的管件 .

(3) 电磁制动功能

单晶硅的拉制过程中,在熔池中加直流磁场,设法控制其对流和控制氧气含量的卓克拉尔斯基磁力法;以及在钢的板坯连铸中,以降低杂质卷入,防止漏钢为目的,抑制喷嘴出口弯液面波动的电磁制动法,均属于此类工艺 .

(4) 磁悬浮功能

从相互正交的方向将直流电流和直流磁场加到金属上,可以使金属悬浮起来 .磁悬浮列车以及水平式电磁铸造利用对喷嘴流出的熔融金属,施加相互正交的电流和磁场,使之在悬浮状态下冷却凝固,均是该功能的具体体现和应用 .

(5) 雾化功能

在细小喷射出的熔化金属和喷嘴对面的电极间施加一定的电场,在与电场正交的方向施加直流磁场,在通电的一瞬间,在喷嘴和电极间的熔化金属内就会产生电磁体积力,使熔化金属雾化,导致电流暂时被切断,而后流出的金属使电流重新接通,并同样被雾化,这样可以使这一过程反复进行下去 这种方法可以很好地控制金属的粒度及其分布 .

(6) 升温功能

利用向熔化金属直接通电流和施加中、高频磁场使金属内产生感生电流,加热和熔化金属,主要应用于感应炉 .

(7) 检测流速的功能

维韦斯根据楞次定律,研制出了流速传感器,原理是用导线布于小型强磁铁上,当电流接通时,产生感应电流,测得感应电流大小即可推算出流体的流速 .用此方法测得的流速精度很高,不过在居里点以上此方法无效 .

(8) 复合精炼功能

在 RH 脱气装置中,由于气泡泵作用,产生了循环运动 .如在真空室内进一步加上瞬态放电(电火花),使熔化金属飞散开来,这就是电磁精炼脱气工艺 .这种工艺能大幅度地简化真空设备 此外,在瞬时放电作用下,由于产生很多点状火点,也可望用来挥发活泼性物质(点状精炼) .

(9) 组织细化功能

利用电磁场对金属凝固组织的控制主要表现在电磁细化方面,电磁细化分为电场细化和磁场细化两大类 .电场细化是指在凝固过程中施加电场,使金属或合金材料在电场中凝固的方法 此法可以获得有别于常规铸造条件下的凝固组织和性能的铸锭 .磁场细化是指使金属和合金在磁场中凝固的方法,它利用了合金熔体与磁场的相互作用原理,使熔体在电磁力的作用下,产生振动和发生对流,以促进形核和等轴晶的形成,从而达到细化凝固组织的目的 .可以在金属凝固过程中,单独施加电场或磁场,也可以同时施加稳恒磁场和交变磁场,或者使电流和磁场叠加等 .

电磁场在轻合金制备与加工工业上应用最早和最广泛的技术是电磁搅拌,现代轻合金加工厂采用电磁搅拌来消除合金成分不均,均匀合金液的温度,减少烧损,取得显著效果 .电磁搅拌也被用来制备半固态浆料 .虽然,也有大量工作开发磁场热处理新工艺,但是研究工作大多

集中于轻合金的凝固与铸造.首先应归功于磁场对液态金属的作用显著,可以对凝固时的流场和温度场产生显著影响,因此可以控制凝固组织,获得均质细晶的理想结构.其次是轻合金的现代制备技术发展,使人们充分认识到铸态组织的控制是合金制备的关键,合金中的大部分问题源于铸造.铸造组织中的缺陷相当一部分在后续的加工和热处理中无法消除,或使加工和热处理无法进行.因此磁场作用下的合金凝固或电磁铸造是高性能、低成本轻合金研究领域发展的重要方向.

电磁场是高能量密度、清洁、非接触和可控的外场.这种外场施加于合金中,在宏观上,将影响液体的流动,因此将影响传热、传质和温度场;在微观上,将影响原子间的作用力,影响原子的运动,影响合金的热力学和动力学过程,所以电磁冶金领域孕育着一系新的现象和新的规律,等待人们去开拓.

由于电磁场的施加可以影响合金结晶过程的热力学和动力学条件,因此可以影响合金结晶的液相线和固相线温度;同时影响合金结晶后的元素分布、合金内溶质含量,因此影响凝固组织的微结构(如点阵常数、电阻、析出相等);同时也影响液态原子的扩散,可能使扩散具有方向性,也可以加速扩散;由于磁场下,离子、电子的运动发生变化,宏观的流场和温度场变化,因此,合金结晶形核、长大的机制和速度可能发生变化;在固态下,施加磁场,尤其是强磁场,由于磁化力可以影响固态相变的热力学条件,因此影响相变的速度,也可能出现新的相;同时可以影响溶质的分布和析出相的析出动力学,影响位错的发生、运动和组态……这些微观过程是材料电磁理论的基础,同时也是发现新现象和新规律的沃土.显然,这个领域的理论研究不足.这个领域的开发需要冶金、材料、物理学家的合作进行.

磁流体力学是目前在电磁冶金领域大量应用的理论,该理论是将电磁学、热学和流体力学相结合的新学科,该理论可以定量地分析液态金属在磁场下的宏观行为,是研究电磁场作用中数学模拟的基础.

理论是技术的基础,尽管电磁冶金的基础研究还远不能适应该领域的发展需要,但是该领域不断产生的新技术却使工程界为之一振,因为这些技术的发展为工程界带来了高效、经济的材料制备方法,推动了材料制备技术的飞跃.

在铝合金 DC 铸造时,施加中或高频磁场,可以使铸锭表面光洁如镜面,大大提高成材率和冶金质量.该技术已在发达国家大面积使用,使用该技术,全世界每年可以生产几百万吨高质量的铝锭坯.该技术近年引进钢铁连铸中,产生了电磁软接触技术,是目前人们开发的热土.铝合金电磁搅拌已经被广泛应用,在钢铁连铸中,也显示了重要作用,采用直流磁场的电磁制动式控制漏钢和防止夹渣卷入的好办法.采用直流磁场,可以抑制湍流,实现层流,是流动控制的手段.采用直流强磁场,还可以制备重元素均匀的偏晶合金.采用低频磁场,可以细化晶粒,抑制偏析,提高合金元素的固溶量,也可以减低铸锭内应力,避免裂纹.施加直流静磁场与高频电流,可以制造电磁超声波,显著细化铸造组织.施加直流静磁场和交流磁场,可以产生电磁振荡,也可以显著细化组织.采用脉冲电流或脉冲磁场,可以激发结晶形核,细化合金组织.在铸轧中施加磁场,可以细化组织.磁场也是铝合金中的杂质和夹杂净化的有效手段.

在合金的热处理中施加磁场,也可以促进和抑制原子的扩散,控制组织,如抑制再结晶、控制织构、提高固溶时效的效果等.

近年来,随着超导技术的高速发展,超导强磁场装置不断升级,目前已经有 25T 的高强磁场和 100T 的脉冲磁场,在强磁场下,材料的物性发生了人们不可想象的变化,因此,强磁场材

需要全本请访问 www.ertongbook.com

料科学异军突起,成为 EPM 研究的热点 .在强磁场中的一系列探讨使材料科学家们兴奋不已 如钢铁材料,在强磁场作用下,奥氏体/ 铁素体转变相图发生变化;退火时组织与常规显著不同;再结晶被抑制,回火时有新相析出;诱发马氏体转变,导致相变温度升高,增加马氏体转变量,细化晶粒,促进碳化物弥散分布,从而提高钢韧性、强度和寿命;强磁场促进了碳的材料同素异构转变,可以制备纳米类金刚石;强磁场加速球墨铸铁中的碳化物分解和碳的扩散;强磁场提高金属间化合物的强度和韧性;强磁场可以提高发光材料的光强;强磁场还可以增加高温超导材料临界电流密度……

电磁冶金作为一个全新的研究领域,蕴藏着丰富的新理论和新技术,该领域的研究和发展,不但对冶金、材料和物理学的发展有着巨大的推动作用,而且对化学、热学和其他学科的发展也有重大影响 最重要的是将为材料工业的发展,高性能性材料的研制开发,尤其是传统材料性能的进一步提高、生产成本的大幅度降低,提供经济、高效的技术 .

2　金属材料电磁理论

电性和磁性是金属材料的基本属性 .

在电磁场中,各种金属由于结构差异以及内部带电粒子对电磁场响应不同,呈现出千差万别的电磁特性 .有的是良导体,有的电阻很大;有的是强磁性材料,有的磁性微弱 .金属材料的电磁效应更是名目繁多,如霍尔(Hall)效应、热电效应、热磁效应、趋肤效应、箍缩效应、磁阻效应等 .金属与电磁场相互作用在生产技术上的应用不胜枚举,如感应加热、电磁搅拌、电磁屏蔽、悬浮冶金、电磁成形等,这一切预示着金属电磁行为是复杂的,其物理内涵是深刻的,应用前景是广阔的 .

人们经过几个世纪的不懈努力,已经形成内容丰富、多学科交叉的金属电磁理论 .但是随着科学研究的深入和生产实践的发展,新的现象不断涌现,新的概念不断提出,新的理论不断建立,这个理论仍在不断发展着、丰富着 .

本章着重讨论金属电磁理论的一些基本知识,通过这些简单的介绍,概要阐述金属与电磁场相互作用的规律,大致讲清金属电性和磁性的物理本质,希望读者由此“管中窥豹”,了解金属电磁理论之概貌 .

2 .1　电磁现象的基本规律

电磁现象是自然界最基本的现象 .物质间的电磁相互作用是通过场来传递的,这就是电磁场 .

描写电场和磁场的基本物理量是电场强度 E 和磁感应强度 B .若确定了电场强度和磁感应强度的时空函数形式 $E = E(r, t)$和 $B = B(r, t)$,就确定了一个电磁场 .如果 E 和 B 与时间 t 无关,则分别称为静电场和静磁场 .静电场由电荷激发,而对电荷有作用力是电场的特征性质 .根据这个特性,人们把单位试验正电荷在电场 r 处所受的力定义为点 r 处的电场强度 $E(r)$.电荷 Q 在电场 E 中受的力为

$$f = QE .$$

静磁场由稳恒电流激发,对电流有作用力是磁场的特征性质 .电流元 $I\mathrm{d}l$ 在磁场 r 处所受的力为

$$\mathrm{d}f = I\mathrm{d}l \times B .$$

上式就是磁感应强度 B 的定义式,描述了点 r 处磁场的性质 .如果 E 和 B 随着时间变化,那么除电荷电流可以激发电磁场外,变化着的电场和磁场可以相互激发,形成在空间传递的电磁波 .

电场强度 E 和磁感应强度 B 的函数形式可由这两个矢量所满足的偏微分方程组确定 .该方程组是麦克斯韦(Waxwell)在总结电磁场实验规律后提出的,称为麦克斯韦方程组 .

本节以麦克斯韦方程组和洛伦兹(Lorentz)力公式为基础,介绍电磁现象的一些基本规律 .

2 .1 .1 麦克斯韦方程组和洛伦兹力公式

人们在对电磁现象的长期观察和生产实践的基础上,逐渐揭示出电磁场的一些规律 .到 19 世纪中叶以后,这些规律已经形成四个实验定律 .

① 法拉第(Faraday)电磁感应定律 .闭合回路 L 中的感应电动势 E 与通过 L 所包围的 Σ 曲面的磁通量变化率成正比,即

$$E = -\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\int_{\Sigma} B\cdot \mathrm{d}\sigma .$$

规定: L 的围绕方向与 $\mathrm{d}\sigma$ 的法线方向成右手螺旋,负号表示当通过 Σ 的磁通量增加时,在线圈 L 中的感应电动势 E 与规定的 L 的围绕方向相反 .由于感应电动势 E 是电场强度 E 沿闭合回路的线积分

$$E = \oint_{L} E\cdot \mathrm{d}l,$$

因此电磁感应定律可写为

$$\oint_{L} E\cdot \mathrm{d}l = -\int_{\Sigma} \frac{B}{t}\cdot \mathrm{d}\sigma . \qquad (2.1\text{-}1)$$

② 安培(Ampere)环路定律 磁感应强度 B 沿任何闭合曲线 L 的线积分等于穿过该回路所有电流的代数和的 μ_0 倍,即

$$\oint_{L} B\cdot \mathrm{d}l = \mu_0 \sum I .$$

式中 μ_0 ——真空磁导率 .

若电流为连续分布,上式可以表示为

$$\oint_{L} B\cdot \mathrm{d}l = \mu_0 \int_{\Sigma} j\cdot \mathrm{d}\sigma, \qquad (2.1\text{-}2)$$

式中 j ——电流密度;

Σ —— L 所围的曲面 .

③ 电场高斯(Gauss)定理 .通过任一闭合曲面 Σ 的 E 的通量等于这闭合曲面所包围的电荷的总数除以 ε_0,而与 Σ 外电荷无关,即

$$\oint_{\Sigma} E\cdot \mathrm{d}\sigma = \frac{\sum Q}{\varepsilon_0} .$$

式中 ε_0 ——真空介电常数 .

若电荷在 Σ 所包围的区域 τ 内连续分布,电荷密度为 ρ,高斯定理可以表示为

$$\oint_{\Sigma} E\cdot \mathrm{d}\sigma = \int_{\tau} \frac{\rho}{\varepsilon_0}\mathrm{d}\tau . \qquad (2.1\text{-}3)$$

④ 磁场高斯定理 .由于磁力线是无始无终的闭合线,因此,通过任一闭合曲面 Σ 的磁通量恒等于零,即

$$\oint_{\Sigma} B\cdot \mathrm{d}\sigma = 0 . \qquad (2.1\text{-}4)$$

利用斯托克斯积分公式

$$\oint_{L} F\cdot \mathrm{d}l = \int_{\Sigma} (\Delta \times F)\cdot \mathrm{d}\sigma$$

和高斯积分公式

$$\oint_{\Sigma} F\cdot \mathrm{d}\sigma = \int_{\tau} \grave{e}\cdot F\mathrm{d}\tau,$$

式(2.1-1)至式(2.1-4)可以改写为

$$\left.\begin{aligned} \Delta\times E &= -\frac{B}{t},\\ \Delta\times B &= \mu_0 j,\\ \Delta\cdot E &= \frac{\rho}{\varepsilon_0},\\ \Delta\cdot B &= 0. \end{aligned}\right\} \tag{2.1-5}$$

式(2.1-5)中第二式的两边取散度,由于$\Delta\cdot(\Delta\times B)\equiv 0$,得出$\Delta\cdot j=0$.但电荷守恒定律指出:通过闭合界面 Σ 流出的总电流等于 Σ 所包围区域 τ 内的电荷减小率,即

$$\oint_{\Sigma} j\cdot \mathrm{d}\sigma = -\int_{\tau}\frac{\rho}{t}\mathrm{d}\tau,$$

利用高斯积分公式,上式变为

$$\Delta\cdot j+\frac{\rho}{t}=0. \tag{2.1-6}$$

式(2.1-6)表明,除非在恒定电流的特殊情况下$\left(\frac{\rho}{t}=0\right)$,才有$\Delta\cdot j=0$.一般来说,在非恒定情况下,

$$\Delta\cdot j = -\frac{\rho}{t}\neq 0.$$

由于电荷守恒定律是精确的普遍规律,所以式(2.1-5)的第二式就不具有普通性,应该加以修改,以服从普通的电荷守恒要求.为了解决这个问题,麦克斯韦引入位移电流 j_D,使

$$\Delta\cdot(j+j_D)=0 \tag{2.1-7}$$

在任何情况下都成立,则关系式

$$\Delta\times B=\mu_0(j+j_D)$$

就具有普通性,以式(2.1-5)中第三式代入式(2.1-6)中,有

$$\Delta\cdot j+\frac{}{t}(\varepsilon_0\,\Delta\cdot E)=\Delta\cdot\left(j+\varepsilon_0\frac{E}{t}\right)=0, \tag{2.1-8}$$

比较式(2.1-7)和式(2.1-8),得到位移电流的表达式为

$$j_D=\varepsilon_0\frac{E}{t},$$

这样得到普遍成立的关系式为

$$\Delta\times B=\mu_0 j+\mu_0\varepsilon_0\frac{E}{t}.$$

至此,已经把电磁学中最基本的实验定律概括为一组在普遍情况下互相协调的方程组

$$\left.\begin{aligned} \Delta \times E &= -\frac{B}{t}, \\ \Delta \times B &= \mu_0 j + \mu_0 \varepsilon_0 \frac{E}{t}, \\ \Delta \cdot E &= \frac{\rho}{\varepsilon_0}, \\ \Delta \cdot B &= 0, \end{aligned}\right\} \tag{2.1-9}$$

该方程称为真空中的麦克斯韦方程组.

当有介质存在时,电磁场与介质中带电粒子相互作用,使介质极化和磁化.由于极化和磁化,介质内部及表面上便出现宏观的束缚电荷、磁化电流和极化电流.这些宏观的电荷、电流分布又反过来激发起附加的宏观电磁场,使原来的外场分布发生变化.因此麦克斯韦方程中除考虑自由电荷 ρ_f 和自由电流 j_f 的作用外,还应该包含束缚电荷 ρ_p、磁化电流 j_m 和极化电流 j_p 的影响,有

$$\frac{1}{\mu_0}\Delta \times B = j_f + j_m + j_p + \varepsilon_0 \frac{E}{t},$$

$$\varepsilon_0 \Delta \cdot E = \rho_f + \rho_p .$$

在实际问题中,自由电荷和自由电流可以直接由实验条件控制及测定,而束缚电荷、磁化电流和极化电流则不可能.因此,若在方程中消去 ρ_p, j_m 和 j_p,则可使问题大为简化.为此,引入辅助物理量电位移 D 和磁场强度 H,对于各向同性线性介质,它们与基本物理量 E 和 B 的关系为

$$\left.\begin{aligned} D &= \varepsilon_0 \varepsilon_r E = \varepsilon E, \\ B &= \mu_0 \mu_r H = \mu H . \end{aligned}\right\} \tag{2.1-10}$$

式中 ε——电介质的介电常数;

ε_r——相对介电常数;

μ——磁介质的磁导率;

μ_r——相对磁导率.

介质中的麦克斯韦方程组为

$$\left.\begin{aligned} \Delta \times E &= -\frac{B}{t}, \\ \Delta \times H &= j + \frac{D}{t}, \\ \Delta \cdot D &= \rho, \\ \Delta \cdot B &= 0 . \end{aligned}\right\} \tag{2.1-11}$$

式中 ρ, j——自由电荷密度和自由电流密度.

通过高斯积分公式和斯托克斯积分公式,式(2.1-11)所列的微分方程与下列积分形式麦克斯韦方程组对应

$$\left.\begin{aligned}
&\oint_L E\cdot \mathrm{d}l = -\int_\Sigma \frac{B}{t}\cdot \mathrm{d}\sigma,\\
&\oint_L H\cdot \mathrm{d}l = I+\int_\Sigma \frac{D}{t}\cdot \mathrm{d}\sigma,\\
&\oint_\Sigma D\cdot \mathrm{d}\sigma = Q,\\
&\oint_\Sigma B\cdot \mathrm{d}\sigma = 0\ .
\end{aligned}\right\} \tag{2.1-12}$$

式中　Q, I——总的自由电荷和总的自由电流 .

在电磁场作用下,材料的界面或表面上,一般会出现电荷、电流分布,这些电荷、电流的存在又使界面两侧的场量发生跃变 .因此,界面两侧场量和界面上电荷、电流之间存在着制约关系,即所谓边值关系 .边值关系不能由式(2 .1-11)的场量微分方程导出,只能利用式(2 .1-12)积分方程 .推导得出的边值关系为

$$\left.\begin{aligned}
&n\times(E_2 - E_1) = 0,\\
&n\times(H_2 - H_1) = \alpha,\\
&n\cdot(D_2 - D_1) = \sigma,\\
&n\cdot(B_2 - B_1) = 0\ .
\end{aligned}\right\} \tag{2.1-13}$$

式中　1,2——界面两侧不同的介质;

n——界面法线的单位矢量;

σ, α——自由电荷面密度和自由电流线密度 .

由式(2 .1-13)可见,界面两侧电场 E 的切向分量连续,由于界面上自由电流 α 的存在,使磁场 H 的切向分量在边界上发生跃变;而界面上自由电荷 σ 的存在,使电场 D 的法向分量在边界上跃变,但磁场 B 的法向分量在界面两侧是连续的 .

电磁场与带电体之间有着密切的联系,但麦克斯韦方程只反映带电体系激发电磁场,至于电磁场对带电体系的作用,则需要用洛伦兹力公式来描述 .

已经知道,静止电荷 Q 受电场力 $f = QE$,恒定电流元 $j\mathrm{d}\tau$ 受磁场力 $\mathrm{d}f = j\times B\mathrm{d}\tau$.若电荷为连续分布,其体密度为 ρ,则带电体单位体积所受的力为

$$f = \rho E + j\times B\ . \tag{2.1-14}$$

洛伦兹把式(2 .1-14)推广到普遍情况下场对带电体系的作用力 .也就是说,无论 E 和 B 是否随着时间变化,也无论带电体系是否运动,式(2 .1-14)都成立 .式(2 .1-14)通常称为洛伦兹力密度公式 .对于电量为 q、以速度 v 运动的粒子,电磁场对它的作用力为

$$f = qE + qv\times B, \tag{2.1-15}$$

该式称为洛伦兹力公式 .

2 .1 .2　电磁场的能量和动量

电磁场是一种物质,像一切物质一样,具有能量和动量 .电磁场和带电物体之间相互作用过程中,伴随着能量和动量的转移 .下面从电磁场和带电物体的相互作用规律,导出电磁场的能量和动量表达式 .

考虑一个空间区域 τ,它的界面为 Σ,设 τ 内有电荷、电流分布 $\rho(r, t)$ 和 $j(r, t)$.能量守恒定律要求

需要全本请访问 www.ertongbook.com