

# 永磁合金工艺

金山器材厂《永磁  
合金工艺》编写组 编写

《金属材料研究》编辑部

《金属材料研究》丛书 第1号

# 永 磁 合 金 工 艺

金山器材厂《永磁  
合金工艺》编写组 编 写

《金属材料研究》编辑部

1975年4月 北京

---

## 内 容 提 要

本书深入浅出地对电磁现象、铁磁性、磁钢的基本知识,磁钢的发展概况,浇注磁钢的造型、熔炼,烧结磁钢的工艺,磁钢的热处理、磨加工、检验、质量分析,稀土钴永磁,永磁应用举例等作了较全面的介绍,可作为从事磁钢生产、研制的工人、干部、技术人员、院校师生和其他有关同志的自修读本或参考资料。

《金属材料研究》丛书 第1号

### 永磁合金工艺

金山器材厂《永磁  
合金工艺》编写组 编写

---

出 版 者:《金属材料研究》编辑部

(北京德外清河小营:北京冶金研究所)

印刷装订者:北 京 印 刷 二 厂

出 版 日 期:1975年4月第1版第1次印刷

---

开本 $130 \times 184 \frac{1}{32}$  页数384 印数1~10,000 定价0.80元

零售处:中国书店机电产品样本代销处(北京和平门外琉璃厂西街18号)

陕西省宝鸡市169信箱图书馆

---

# 毛主席语录

要把一个落后的农业的中国改变成为一个先进的工业化的中国，我们面前的工作是很艰苦的，我们的经验是很不够的。因此，必须善于学习。

我们必须打破常规，尽量采用先进技术，在一个不太长的历史时期内，把我国建设成为一个社会主义的现代化的强国。

我们能够学会我们原来不懂的东西。我们不但善于破坏一个旧世界，我们还将善于建设一个新世界。

中国人民有志气，有能力，一定要在不远的将来，赶上和超过世界先进水平。

鼓足干劲，力争上游，多快好省地建设社会主义。

---

## 前 言

在毛主席革命路线的指引下,在批林批孔运动的推动下,党的建设社会主义的总路线得到更好的贯彻执行。工业学大庆的群众运动更加深入开展。独立自主,自力更生,艰苦奋斗,勤俭建国的方针得到了进一步发扬。我国工业战线形势一派大好。我国广大工人、工程技术人员、革命干部意气风发,团结战斗,对我国国民经济的发展作出了新的贡献。

毛主席教导我们:“在生产斗争和科学实验范围内,人类总是不断发展的,自然界也总是不断发展的,永远不会停止在一个水平上。因此,人类总得不断地总结经验,有所发现,有所发明,有所创造,有所前进。”

遵照毛主席的教导,我们对我厂十多年来在磁钢的生产和研制中得到的经验教训作了初步的总结,并收集和参考了国内各兄弟单位的部分实践经验及国外有关文献资料,编成此书。我们希望通过本书的编写,为我国社会主义革命和建设事业贡献一份力量。在前一、二章内,我们还介绍了一些电磁现象、铁磁性和磁钢的基本知识和磁钢发展概况,供同志们自修之用。

本书的编写和出版工作,始终是在我厂党委和北京冶金研究所党委的指导与关怀下进行的。参加本书编写的有:徐锦华、陈子茂、丛瑞滋、仇仪俊等同志,由仇仪俊同志执笔。并得到了袁登明、杨顺清、潘才兴、邹飞鹏、孙元祥、凌铨、李世恩、林松鹏、郝连庆、汤全坤、叶奕勋、楚惠珍、曹桂



# 目 录

|                        |         |
|------------------------|---------|
| 前言.....                | 1 ~ 2   |
| 第一章 电磁现象与铁磁性的基本知识..... | 1 ~ 25  |
| 一、电磁现象.....            | 1       |
| 1. 磁的基本知识.....         | 1       |
| 2. 磁和电的关系.....         | 5       |
| 3. 电流和磁场的相互作用.....     | 7       |
| 4. 电磁感应.....           | 9       |
| 二、物质的磁性.....           | 10      |
| 1. 原子磁矩.....           | 10      |
| 2. 物质的磁性.....          | 13      |
| 三、铁磁体的一般知识.....        | 16      |
| 1. 铁磁体内部的磁畴.....       | 16      |
| 2. 磁矩、磁感应强度和磁场强度.....  | 19      |
| 3. 铁磁体的各向异性.....       | 19      |
| 4. 铁磁体的磁致伸缩和磁弹性能.....  | 22      |
| 5. 铁磁体的磁化曲线和磁滞回线.....  | 23      |
| 第二章 磁钢的基本知识和发展概况.....  | 26 ~ 45 |
| 一、磁性材料的分类.....         | 26      |
| 二、磁钢的基本知识.....         | 27      |
| 1. 磁钢的分类.....          | 27      |
| 2. 磁钢的基本特性和主要磁性参数..... | 31      |
| 3. 磁钢的应用范围.....        | 33      |

|                  |        |
|------------------|--------|
| 三、磁钢的发展概况        | 34     |
| 1. 磁钢的发展历史       | 34     |
| 2. 国外磁钢的生产概况     | 37     |
| 3. 金属硬磁材料的生产工艺流程 | 44     |
| 第三章 浇铸磁钢的造型      | 46~87  |
| 一、造型             | 46     |
| 1. 壳型铸造          | 47     |
| 2. 油砂型铸造         | 48     |
| 3. 精密铸造          | 49     |
| 二、普通砂型铸造         | 59     |
| 1. 造型材料的性能要求     | 60     |
| 2. 造型材料的组成       | 62     |
| 3. 型砂的制备         | 66     |
| 4. 型砂在生产中的运输     | 67     |
| 5. 砂型的制造         | 69     |
| 6. 砂型及型芯的烘干      | 70     |
| 三、磁钢的模具及浇注系统     | 72     |
| 1. 模具的设计         | 72     |
| 2. 浇注系统的设计       | 74     |
| 3. 型芯的应用与设计      | 85     |
| 第四章 浇铸磁钢的熔炼      | 88~113 |
| 一、浇铸磁钢用原材料       | 88     |
| 1. 杂质含量对合金磁性能的影响 | 88     |
| 2. 浇铸磁钢用原材料的技术标准 | 91     |
| 二、合金的熔炼          | 94     |
| 1. 熔炼原理          | 95     |
| 2. 高频电流的产生       | 96     |



|                          |         |
|--------------------------|---------|
| 3. 坩埚的制作 .....           | 97      |
| 4. 合金的熔炼工艺 .....         | 101     |
| 5. 合金的配料 .....           | 102     |
| 三、合金的浇注 .....            | 103     |
| 1. 浇包的准备 .....           | 103     |
| 2. 浇注 .....              | 103     |
| 3. 打箱、清理和修整 .....        | 105     |
| 四、制造具有定向结晶磁钢的方法 .....    | 105     |
| 1. 冷却金属垫法 .....          | 108     |
| 2. 高温铸型法 .....           | 108     |
| 3. 发热铸型法 .....           | 111     |
| 4. 区域熔炼法 .....           | 111     |
| 5. 电渣重熔法 .....           | 111     |
| 6. 连续铸造法 .....           | 112     |
| 7. 在引锭器上从熔体中拉制单晶方法 ..... | 112     |
| 第五章 烧结磁钢的工艺 .....        | 114~147 |
| 一、概述 .....               | 114     |
| 二、金属粉末的制备 .....          | 116     |
| 1. 金属粉末的生产方法 .....       | 117     |
| 2. 金属粉末的性能 .....         | 122     |
| 3. 烧结磁钢生产用金属粉末的制备 .....  | 126     |
| 4. 烧结磁钢合金粉末的配料与混合 .....  | 129     |
| 三、烧结磁钢的压制 .....          | 131     |
| 1. 压模 .....              | 131     |
| 2. 烧结磁钢的压制工艺 .....       | 135     |
| 四、烧结磁钢的烧结 .....          | 139     |
| 1. 烧结的定义 .....           | 139     |

|                         |         |
|-------------------------|---------|
| 2. 烧结的方法 .....          | 140     |
| 3. 合金的烧结过程和烧结制度 .....   | 142     |
| 4. 烧结磁钢的真空烧结工艺 .....    | 145     |
| 第六章 磁钢的成份和热处理 .....     | 148~204 |
| 一、铝镍钴系合金的相图及相结构 .....   | 148     |
| 1. 铁镍铝三元相图 .....        | 148     |
| 2. 铝镍钴系相图及相结构 .....     | 151     |
| 3. AlNiCo 合金的脱溶过程 ..... | 154     |
| 4. 磁场热处理 .....          | 156     |
| 二、铝镍钴系合金的成份 .....       | 158     |
| 1. 铝镍合金 .....           | 158     |
| 2. 含铜的铝镍合金 .....        | 159     |
| 3. 含硅的铝镍合金 .....        | 159     |
| 4. 低钴的铝镍钴合金 .....       | 159     |
| 5. 铝镍钴合金 .....          | 163     |
| 6. 含钛的铝镍钴合金 .....       | 170     |
| 三、磁钢的热处理工艺 .....        | 180     |
| 1. 铝镍合金的热处理 .....       | 181     |
| 2. 低钴的铝镍钴合金的热处理 .....   | 182     |
| 3. 铝镍钴合金的热处理 .....      | 183     |
| 4. 高钛高钴铝镍钴合金的热处理 .....  | 198     |
| 第七章 磁钢的磨加工 .....        | 205~225 |
| 一、概述 .....              | 205     |
| 二、磨削原理简述 .....          | 207     |
| 1. 磨削过程 .....           | 207     |
| 2. 磨削的基本概念 .....        | 208     |
| 3. 冷却液 .....            | 209     |

|                          |         |
|--------------------------|---------|
| 三、砂轮的选择 .....            | 210     |
| 1. 砂轮的选择 .....           | 210     |
| 2. 砂轮的平衡 .....           | 215     |
| 四、磨床用夹具 .....            | 217     |
| 1. 通用夹具 .....            | 217     |
| 2. 磁性夹具 .....            | 218     |
| 3. 正弦夹具 .....            | 219     |
| 4. 专用夹具 .....            | 219     |
| 五、其它加工方法 .....           | 221     |
| 1. 阳极切割 .....            | 222     |
| 2. 电解加工 .....            | 223     |
| 3. 电火花加工 .....           | 224     |
| 六、磁钢的胶合 .....            | 225     |
| 第八章 磁钢的检验和质量分析 .....     | 226~281 |
| 一、磁性能的检验 .....           | 226     |
| 1. 金属磁性材料的静态磁特性 .....    | 226     |
| 2. 样品的测量 .....           | 231     |
| 3. 产品的检验 .....           | 243     |
| 4. 磁钢的例行试验 .....         | 262     |
| 二、磁钢的尺寸及外观检验 .....       | 263     |
| 1. 磁钢的尺寸检验 .....         | 263     |
| 2. 磁钢的外观检验 .....         | 266     |
| 三、磁钢的质量分析 .....          | 266     |
| 1. 磁性能不合格的原因及防止方法 .....  | 267     |
| 2. 外观和几何尺寸不合格及防止方法 ..... | 268     |
| 3. 磁钢的内部缺陷 .....         | 274     |
| 第九章 稀土钴永久磁铁 .....        | 282~306 |

|                       |         |
|-----------------------|---------|
| 一、概述 .....            | 282     |
| 二、稀土钴金属间化合物 .....     | 283     |
| 三、稀土钴永久磁铁的制造 .....    | 290     |
| 1. 粉末冶金法 .....        | 290     |
| 2. 铸造法 .....          | 298     |
| 四、磁化与磁性测量 .....       | 300     |
| 五、稀土钴永久磁铁的稳定性 .....   | 305     |
| 六、稀土钴永久磁铁的应用 .....    | 306     |
| 第十章 永久磁铁的应用举例 .....   | 307~358 |
| 一、永磁磁路的设计 .....       | 307     |
| 1. 永磁磁路和磁路设计的任务 ..... | 307     |
| 2. 永磁磁路设计的计算方法 .....  | 309     |
| 二、在电声器件中的应用 .....     | 319     |
| 1. 动圈式扬声器 .....       | 319     |
| 2. 耳机 .....           | 320     |
| 三、在仪器仪表中的应用 .....     | 322     |
| 1. 电磁式仪表概述 .....      | 322     |
| 2. 电流表 .....          | 324     |
| 3. 电度表 .....          | 326     |
| 4. 毫伏指温控制计 .....      | 327     |
| 5. 其它仪表中应用举例 .....    | 327     |
| 6. 示波器中的磁电式振动物 .....  | 328     |
| 7. 磁性式转速表 .....       | 330     |
| 8. 双向测振仪 .....        | 330     |
| 四、在电真空器件中的应用 .....    | 332     |
| 1. 磁控管 .....          | 332     |
| 2. 行波管 .....          | 334     |

|                               |     |
|-------------------------------|-----|
| 3. 阴极射线管 .....                | 326 |
| 五、在微波铁氧体器件中的应用 .....          | 338 |
| 六、在机械中的应用 .....               | 339 |
| 1. 磁性表架及永磁吸盘 .....            | 339 |
| 2. 磁力选矿机 .....                | 339 |
| 3. 继电器 .....                  | 340 |
| 七、在电机中的应用 .....               | 342 |
| 1. 永磁直流力矩马达 .....             | 342 |
| 2. 直流永磁稳速电动机 .....            | 342 |
| 3. 永磁磁滞马达 .....               | 343 |
| 4. 直流脉冲电动机 .....              | 344 |
| 5. 磁电机 .....                  | 344 |
| 八、永磁合金的稳定性 .....              | 346 |
| 1. 时间稳定性 .....                | 347 |
| 2. 温度稳定性 .....                | 348 |
| 3. 外界磁场作用下的稳定性 .....          | 354 |
| 4. 与铁磁性物质接触作用下的稳定性 .....      | 355 |
| 6. 射线作用下的稳定性 .....            | 358 |
| 主要参考资料 .....                  | 359 |
| 附表 MKSA 和 CGSM 制磁学单位换算表 ..... | 368 |

# 第一章 电磁现象与铁磁性的基本知识

## 一、电 磁 现 象

### 1. 磁的基本知识

磁现象和电现象一样，很早就被发现了。我国是世界上最早发现磁现象及应用磁性材料的国家。“在很早的时候，中国就有了指南针的发明。”我国劳动人民在三千多年以前，就已发现磁石的相互吸引和磁石吸铁的现象。二千多年前战国时期已有“慈石召铁”的记载。我国劳动人民最先发明用磁石作为指示方向和校正时间，在《韩非子》和东汉王充著的《论衡》两书中所提到的“司南”就是指此。以后由于航海事业发展的需要，我国在十一世纪就发明了指南针。宋代沈括所著的《梦溪笔谈》中有“方家以磁石磨针锋，则能指南，然常微偏东，不全南也。”的记载。这不仅说明了指南针的制造，而且已经发明了磁偏角。直到十二世纪，指南针才由阿拉伯人传入欧洲。

#### (1) 磁体：

简单地说，磁体就是能吸铁的物体。磁体不但能吸铁和钢，还能吸引镍、钴等。能被磁体吸引的物质称为铁磁物质。

有的磁体是天然存在的，如磁铁矿 ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) 等；有的则是人造的。目前工业中应用的永久磁铁都是人造磁体，天然磁体很少。

磁体的各部分吸引铁磁物质的本领是不同的，如果把一块条形磁铁放入铁屑中，再拿起来，它上面便吸引了很多铁屑，而且以两端最多（图1.1）。磁铁的这两端叫做磁极，两磁极的连线叫做磁轴。

将一块条形磁铁悬起时，磁轴便旋转，直到它指南、北方向时静止。指向北方的磁极叫北极，用N表示，另一极叫南极，用S表示，如图1.2。

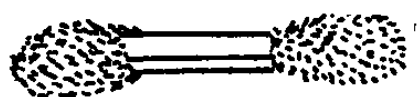


图1.1 磁铁的两极磁性最强

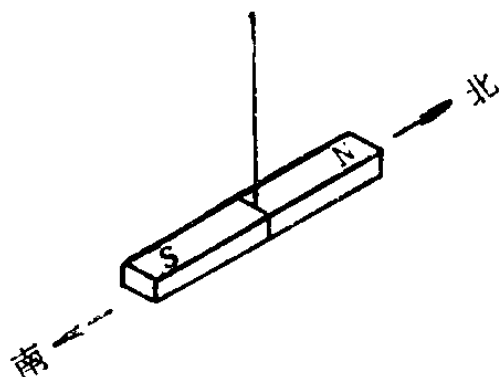


图1.2 磁铁的南极和北极

如果将一块磁铁悬挂起来，并用另一块磁铁去接近它（图1.3），则同性的磁极互相排斥，异性的磁极互相吸引。实验还指出：当一个用铁、镍、钴等制成的棒被永久磁铁吸引时，棒本身也变成了磁体，具有磁性。这种现象叫做磁化现象。凡是能被磁极吸引的物质都能被磁化。反过来说也是一样，只有能够被磁化的物质才能被磁极吸引。

磁体的磁极不能单独存在，如果打碎一块永久磁铁，则每一小块都变成各具有南北两极的小磁铁（图1.4）。

## （2）磁场和磁力线：

磁铁不但能够把跟它接触的铁、镍、钴等物质吸引住，而且即使互相远离，也要发生作用。例如把指南针靠近磁铁，指南针立即偏转，也就是说指南针受到力的作用。根据力学的知识，力是由物质的相互作用产生的。因此我们可肯定磁

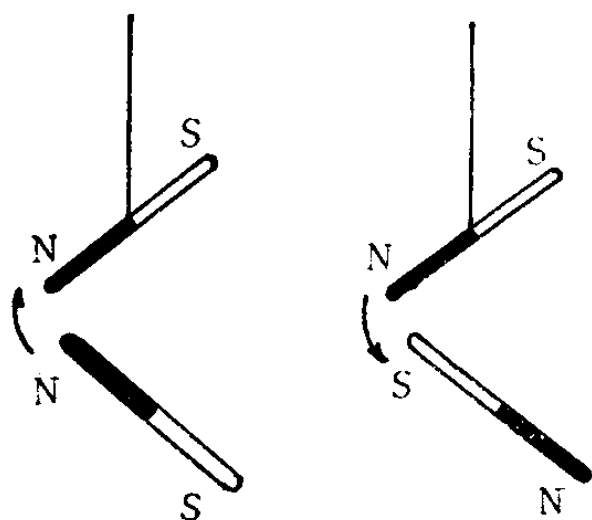


图1.3 磁极间的相互作用

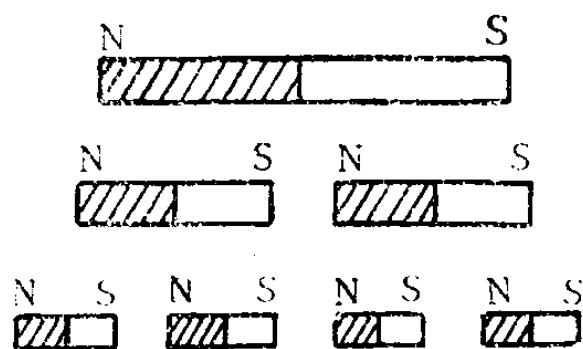


图1.4 磁极的不可分离性

铁周围空间存在着一种肉眼看不见、手摸不着的特殊物质。这种特殊物质称为磁场。

磁场是自然界中物质存在的一种特殊形式，它具有方向性。如果把指南针放在一块磁铁的磁场内，则它有一个完全确定的取向；并且，在磁场中不同的地方，指南针的取向也不同，如图1.5。

为了显示磁铁的磁场图象，我们将一块磁铁横放在一张

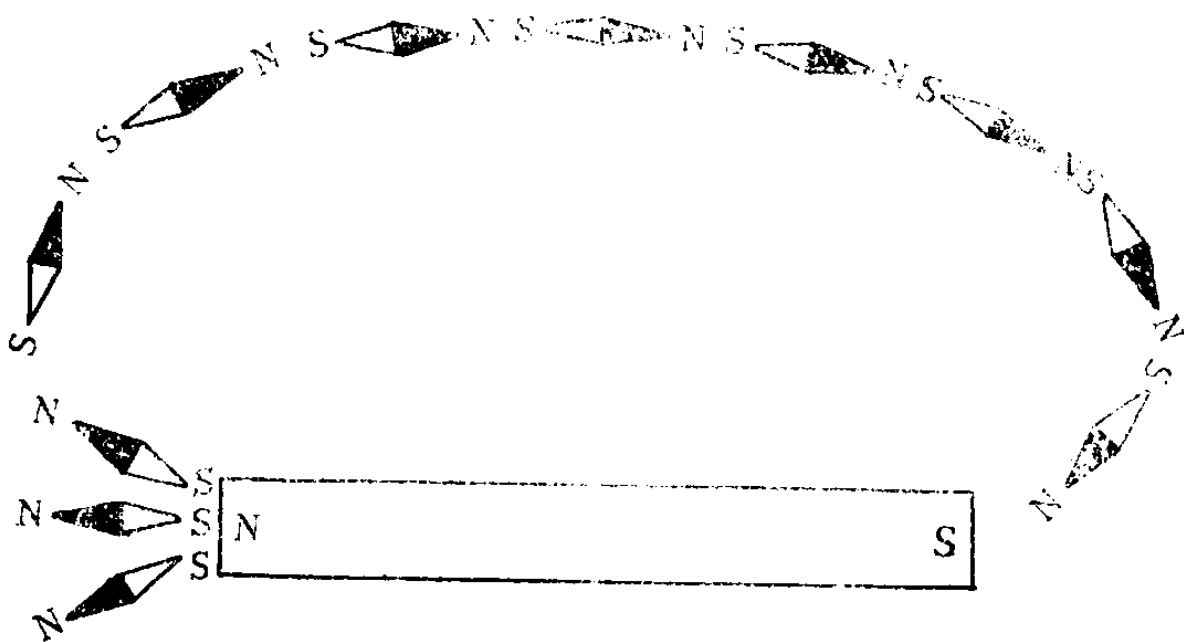


图1.5 放在磁铁磁场内指南针方向



卡片纸或玻璃片的下面，然后在卡片纸或玻璃片上面均匀地撒一些铁屑，这些铁屑都被磁化并彼此连接而形成许多线，这些线叫做磁力线。作图时用磁力线的疏密程度来表示磁场的强弱，用磁力线的流向表示磁场的方向。并规定磁力线的方向是由磁极的北极出发而回到南极（图1.6）。

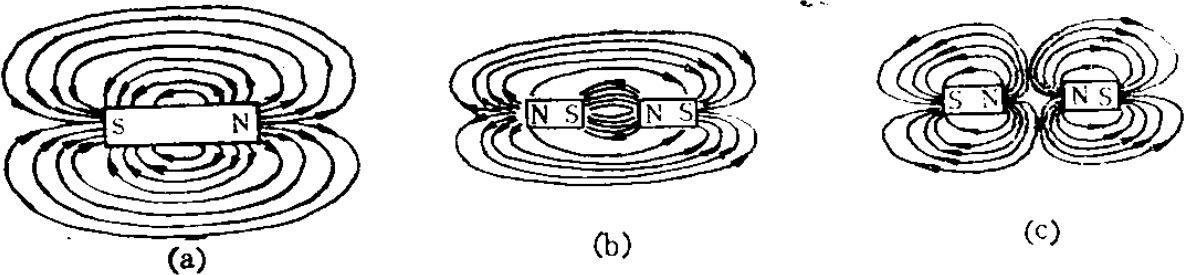


图1.6 磁力线的特性

（3）磁通和磁通密度（磁场强度和磁感应强度）：

磁场的强弱可以用磁力线的密度或磁通密度来表示，通常我们把通过某垂直面积  $S$  的磁力线的多少叫做磁通  $\Phi$ ，其单位为马克斯威（Max）。我们也时常直接用磁力线数来说明磁通的多少。1 马克斯威就是我们平常所说的一根磁力线。

前面说过，磁场是一种特殊物质，每一点都有一定的方向和大小。为此我们可用一个向量来描述它，称为磁场强度。其方向与磁力线的流向相同，其大小等于磁通密度。所谓磁通密度，是指单位面积上的磁通，亦即穿过单位面积（与磁力线垂直）的磁力线的多少。其单位为奥斯特（Oe），1 奥斯特 = 1 马克斯威/厘米<sup>2</sup>（Max/cm<sup>2</sup>）。一般我们把物质内的磁场强度称为磁感应强度。单位是高斯（Gs）。在 C、G、S、M 单位制中，高斯与奥斯特是相同的。

由前述可知，一个小指南针在磁场中将受到力矩的作用，使它的磁轴转到与磁场平行为止。根据实验，磁针所受到的力矩  $\vec{L}$  为