

## 摘 要

烧结钕铁硼具有优异的磁性能，可用来制作成强磁场永磁机构。强永磁魔环是一种特殊的永磁机构，由若干充磁方向连续变化的永磁体组成，通过合理的设计，可以在其中心位置的有效空腔内产生永磁材料自身剩磁数倍的强磁场，这在诸多科学技术领域具有重要应用价值。

强永磁魔环机构装配过程中永磁体内容易产生局部饱和、局部退磁和旋转磁化等异常磁化现象，从而永磁体的工作点可能落在磁滞回线的四个象限内，另外旋转磁化涉及矢量磁滞问题。国外一些研究者虽然已制作出场强为 4~5 T 的强永磁机构，但并未充分考虑其中出现的异常磁化现象，理论设计值一般比实测值偏高。只有在磁场计算中准确模拟异常磁化，才能设计出符合预定要求的永磁机构。而一般的矢量磁滞模型，主要针对低磁场情况磁记录材料以及软磁材料的模拟，而且应用起来比较复杂。关于永磁机构中产生的强磁场下外场按任意规律变化的旋转磁化问题，其研究成果的报导较少。

针对以上问题，本文在研究了烧结钕铁硼的显微组织结构和技术磁化微观机理的基础上，提出了一种二维简化各向异性矢量 Preisach 磁滞模型，将该矢量磁滞模型与有限元分析耦合，只需利用永磁材料易轴和难轴方向上极限磁滞回线的数据，即可全面模拟强永磁机构装配过程中出现的局部饱和、局部退磁和旋转磁化现象，该方法简洁易于计算机编程实现。

本文利用上述各向异性矢量 Preisach 磁滞模型结合有限元法模拟了魔环装配过程，并设计制造了一种新的增强型永磁魔环机构。采用了加入软磁材料、调整充磁方向、选用两种不同牌号永磁材料以及采用磁屏蔽固定外壳等一系列方法，并利用正交实验法结合穷举法优化永磁魔环各部分尺寸和充磁方向，有效降低了局部饱和与退磁，增强了魔环有效区场强。

永磁魔环制造完成后，气隙内磁感应强度达到 4.10T，测试结果与理论计算值相比偏小，误差主要源于装配过程、加工精度、材料性能及测试等方面影响。基本证明了魔环机构设计方法的合理性和优化方法的有效性，为强永磁机构的设计奠定了理论基础。

关键词：永磁魔环，矢量 Preisach 磁滞模型，旋转磁化，烧结钕铁硼



# Solve of Abnormal Magnetization in The Design of Permanent Magnet Mechanism with High Field

## Abstract

Sintered Nd-Fe-B which has excellent properties can be used to produce high field permanent magnetic mechanism. There is a kind of special permanent magnetic mechanism—high field magic ring which is made up of permanent magnet segments with different magnetization directions. A magnetic flux density level several times as much as the remanence of permanent magnet material can be achieved if we design the magic ring properly.

However, abnormal magnetization including local saturation, local demagnetization and rotational magnetization occur in the assembly process of high field permanent magnetic mechanism, which result in operating point of the material move in all the four quadrants. Accurate design of high field permanent magnet mechanism is very difficult. Though some foreign researchers produced some mechanisms which flux densities reached 4-5T, the theoretical values were greater than the actual results evidently, because abnormal magnetization were not considered comprehensively. We can't design expected permanent magnet mechanism if simulation abnormal magnetization unaccurately in finite element analysis. But certain vector hysteresis models which can simulate rotational magnetization were related to magnetic recording mediums or soft magnetic materials. Otherwise, the varying pattern referred was circularly or elliptically rotational field, which is different from the arbitrary magnetization pattern, and the application of these models were very complicated. The information about rotational magnetization of hard magnetic material in condition of high field which is change arbitrarily is very little.

Based on analysis of microstructure and microscopic mechanism of magnetization and demagnetization of sintered Nd-Fe-B, a 2D simplified vector Preisach model is presented in this paper. Using this vector Preisach model in finite element analysis, abnormal magnetization occur in the assembly process of high field permanent magnetic mechanism are considered comprehensively. The method only requires the data of limiting magnetic

hysteresis loops of the material along easy and hard axis, so the application of vector model become convenient and efficient.

Combining the vector Preisach hysteresis model and finite element analysis a dynamic magnetic field analysis is implemented for a new magic ring in the process of assembling.

A series of methods such as adding soft magnetic material, adjusting magnetization directions, utilizing two grades permanent magnet materials and replacing anti-magnetic shell to magnetic shielded shell are adopted in the new magic ring. Furthermore, dimension of every part and certain directions of magnetization are optimized by method of exhaustion and orthogonal testing method. All these methods can reduce local saturation and local demagnetization to enhance magnetic strength in air cavity of magic ring.

Finally, after the model is completed and measured, the magnetic field strength is and is smaller than the result of expectation. The error is effect of assembly process, machining precision, material performance and measurement etc. The model verifies reasonability of the construction of magic ring and validity of the optimization method. The proposed method provides a theoretical foundation for the design of high field permanent magnetic mechanism.

Key Words : Permanent magnet magic ring, Vector Preisach hysteresis model, Rotational magnetization, Sintered NdFeB

# 目 录

|  |        |
|--|--------|
| 摘 要.....                               | I..... |
| Abstract .....                         | .....  |
| 1 绪论.....                              | .....  |
| 1.1 课题的来源与意义.....                      | .....  |
| 1.2 目前国内外发展状况.....                     | .....  |
| 1.2.1 永磁魔环的设计.....                     | .....  |
| 1.2.2 磁滞模型.....                        | .....  |
| 1.3 本文的主要研究工作.....                     | .....  |
| 2 烧结钕铁硼的显微组织结构与技术磁化.....               | .....  |
| 2.1 烧结钕铁硼的显微组织结构分析.....                | .....  |
| 2.1.1 烧结钕铁硼永磁材料制造工艺概述.....             | .....  |
| 2.1.2 烧结钕铁硼相的组成.....                   | .....  |
| 2.1.3 烧结钕铁硼的扫描电镜分析.....                | .....  |
| 2.1.4 烧结钕铁硼晶界的显微组织特征.....              | .....  |
| 2.2 钕铁硼永磁体的技术磁化和反磁化.....               | .....  |
| 2.2.1 自发磁化与磁畴理论概述.....                 | .....  |
| 2.2.2 技术磁化和反磁化概述.....                  | .....  |
| 2.2.3 钕铁硼永磁体技术磁化和反磁化过程中的磁畴移动.....      | .....  |
| 2.3 小结.....                            | .....  |
| 3 Preisach磁滞模型 .....                   | .....  |
| 3.1 标量 Preisach磁滞模型 .....              | .....  |
| 3.1.1 经典 Preisach磁滞模型 .....            | .....  |
| 3.1.2 Preisach磁滞模型的发展 .....            | .....  |
| 3.1.3 一种改进的标量 Preisach磁滞模型 .....       | .....  |
| 3.2 矢量 Preisach磁滞模型 .....              | .....  |
| 3.2.1 Mayergoy提出的矢量 Preisach磁滞模型 ..... | .....  |
| 3.2.2 旋转矢量 Hong 磁滞模型.....              | .....  |
| 3.2.3 一种简化矢量 Preisach磁滞模型 .....        | .....  |
| 3.2.4 本文提出的一种简化矢量 Preisach磁滞模型 .....   | .....  |
| 3.3 小结.....                            | .....  |
| 4 永磁魔环装配过程的数值模拟.....                   | .....  |

|                                     |  |
|-------------------------------------|--|
| 4.1 永磁魔环的基本结构与装配过程受力分析.....         |  |
| 4.1.1 低磁场永磁魔环结构.....                |  |
| 4.1.2 强磁场永磁魔环结构.....                |  |
| 4.1.3 温度对永磁魔环性能的影响.....             |  |
| 4.1.4 魔环的组装过程与受力分析.....             |  |
| 4.2 永磁魔环装配过程中异常磁化的数值模拟.....         |  |
| 4.2.1 装配过程中异常磁化产生的机理和本质.....        |  |
| 4.2.2 旋转磁化产生的条件.....                |  |
| 4.2.3 体电流法与矢量 Preisach 磁滞模型的耦合..... |  |
| 4.2.4 装配过程的数值计算方法.....              |  |
| 4.2.5 装配过程中局部饱和、局部退磁位置的显示.....      |  |
| 4.3 小结.....                         |  |
| 5 一种新的强永磁魔环机构的设计.....               |  |
| 5.1 一种新的强永磁魔环基本结构的确定.....           |  |
| 5.1.1 原 8 单元增强型永磁魔环机构.....          |  |
| 5.1.2 本文提出的永磁魔环基本结构.....            |  |
| 5.1.3 静磁屏蔽固定外壳的设计.....              |  |
| 5.2 永磁魔环机构的优化设计.....                |  |
| 5.2.1 磁性材料的确定与实验数据的处理.....          |  |
| 5.2.2 正交实验法与正交设计.....               |  |
| 5.2.3 穷举法及魔环机构优化结果.....             |  |
| 5.2.4 魔环机构设计合理性的验证.....             |  |
| 5.3 永磁魔环机构的制造工艺及检测.....             |  |
| 5.3.1 实际制造的魔环的结构及其制造工艺.....         |  |
| 5.3.2 魔环机构的磁场测量与误差分析.....           |  |
| 5.3.3 实际制造的魔环机构的缺点及改进方案.....        |  |
| 5.4 小结.....                         |  |
| 6 结论.....                           |  |
| 参 考 文 献.....                        |  |
| 附 录 烧 结 钕 铁 硼 极 限 磁 滞 回 环 数 据.....  |  |
| 在 学 研 究 成 果.....                    |  |
| 致 谢.....                            |  |

## 1 绪论

### 1.1 课题的来源与意义

近年来永磁机构的应用越来越广泛。永磁材料多用于电机、电器产品及电子设备，随着永磁材料性能的不断提高，特别稀土永磁材料钕铁硼的出现，它具有高剩磁密度、高矫顽力、高磁能积的特点，在很大程度上取代了铁氧体、钕钴等各类永磁材料，乃至推动永磁材料的发展进入了一个新的历史时期，永磁机构的研究和应用也随之更加活跃，出现了多种用途的永磁机构，如用于永磁传动、核磁共振测井、永磁悬浮、磁选、水处理、生物技术、电子设备磁聚焦以及磁疗用的永磁磁体等等<sup>[1]</sup>，于是永磁磁体设计制造正在从电子和电机的母体中分离出来成为专门的技术分支。

制造高强永磁体用以取代一部分电磁体和超导体是永磁体设计制造的发展方向之一。现阶段，强磁场的获得普遍采用超导线圈，但是超导设备需要庞大的冷却系统，而且使用维护困难，从而导致整套设备十分昂贵。如果用永磁材料生成 1T~4T 或者更强的磁场，在这一强度的磁场范围内就能代替超导设备，从而大大降低设备的成本，这具有广阔的应用前景。

传统永磁机构一般由永磁体和软铁磁极构成，气隙磁场无法超过永磁材料剩磁  $B_r$ ，即使采用剩磁为 1.2T 的钕铁硼，气隙场强一般也不超过 1T，要获得超过永磁材料剩磁的磁场必须采用特殊永磁磁体结构方案。其中最具有影响的是美国学者提出的魔球 (Magic Sphere) 和魔环 (Magic Ring) 结构，这种结构可以在较小的空间内产生永磁材料本身剩磁数倍的强磁场，而且这种结构具有重量轻、结构紧缩、能产生均匀磁场等优点，目前已用于许多实验设备中<sup>[2], [3], [4]</sup>。

理想的永磁魔球机构见图 1.1，它可以在封闭的圆球腔内产生高度均匀的磁场，魔球内部磁场满足下式：

$$H_0 = \frac{4 J_0}{3} \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (1.1)$$

式中  $J_0$  为永磁材料剩磁， $r_1$ 、 $r_2$  分别为魔球内径和外径，魔球比相同直径的魔环场强大 1/3，但其外部存在剩余磁极矩<sup>[5]</sup>。

魔环是一截全部由永磁材料制成的空心圆柱体，其设计思想来自于K. Halbach的旋转定理。令永磁材料充磁方向沿圆柱体的圆周作不同规律的变化，在空心圆柱体的内部可获得二极、四极、六极等不同极数磁场的磁体。理想魔环的空腔是完全均匀的场，所有的磁力线都在空腔和永磁材料的圆环之间形成回路，周围没有漏磁场。在  $r < r_1$  的区域内，磁场均匀分布，磁场大小为：

$$H_0 = \frac{J_0}{2} \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (1.2)$$

式中  $J_0$  为永磁材料剩磁， $r_1$ 、 $r_2$  分别为魔球内径和外径。

在单环结构的基础之上 Herbert A. Leupold又提出了一种磁场可以调节的双魔环永磁机构<sup>[6]</sup>。其断面结构如图 1.2 所示，它由内、外两个同心的魔环组成，其原理是通过内环和外环的同步反向旋转，来实现空腔磁场的可调，当所需要的有效工作气隙为轴向的针孔形状或者是横向的磁盘形状的时候也可以在空腔内加入一定形状的永磁材料或铁磁材料从而增大有效区域内的磁场。

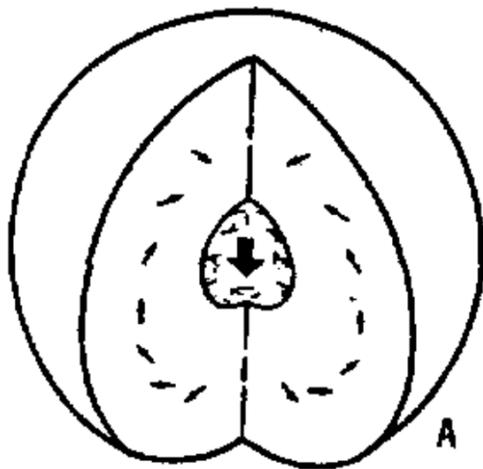


图 1.1 理想的永磁魔球

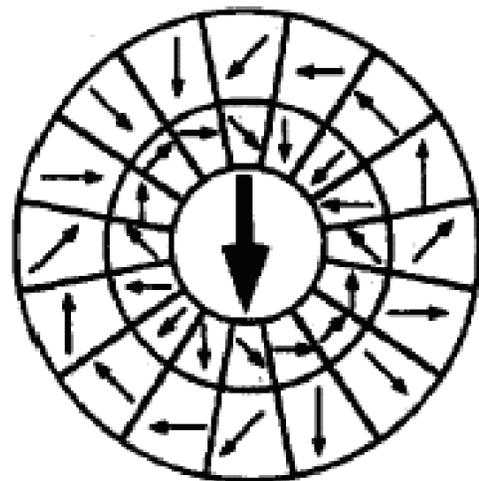


图 1.2 永磁双魔环

Fig. 1.1 Ideal permanent magnet magic sphere Fig. 1.2 Double permanent magnet magic rings

理想的魔环在工程上是办不到的，实际可行的办法是把连续的结构离散为若干块曲边梯形，每块梯形磁体的磁化方向尽量保持原来的变化规律，此时魔环部分磁场外漏并且气隙磁场有所降低，双环永磁魔环内外环相对旋转运动时出现反力矩。

理论上魔环结构的磁体可以产生无限大的场强，但实际情况并非如此。因为随着魔环内外径比值的增大，磁体的体积和重量也是随之不断增加，这使得制造磁体的成本迅

速增加；更重要的出现下列异常磁化现象，使气隙磁场低于理想值：

(1) 局部过饱和。强磁永磁机构中出现了局部合成磁场大于该处永磁材料本身剩磁，而且二者方向相同，材料的工作点落到磁化曲线的第一象限，当合成磁场大于永磁材料饱和磁感应强度时即出现局部过饱和问题。

(2) 局部退磁。强磁永磁机构中地出现了局部合成磁场大于该处永磁材料内禀矫顽力，而且方向与剩磁相反，材料的工作点可能过渡到磁滞回线的第三或第四象限，出现局部不可逆退磁问题。

(3) 旋转磁化。永磁机构通常由多个小块永磁体拼装而成，其装配工艺影响永磁机构安装后的性能。这是因为装配过程中局部合成磁场磁化方向与大小不断改变，使每个磁体各个部位磁化强度的大小和方向均随外界合成磁场的变化而改变，并且二者方向不同，于是出现了旋转磁化，在磁性材料各向异性时旋转磁化特性更为复杂。

另外，钕铁硼在某些放射条件下剩磁有所下降<sup>[7]</sup>；因为钕铁硼的居里点较低，温度系数较大，永磁机构工作环境温度的升高导致矫顽力和剩磁的降低。

一般的商用软件中采用的面电流等效法建立在材料被均匀磁化，磁化后极化强度达到饱和基础之上。而强永磁机构制作装配过程容易产上述异常磁化现象，使材料的工作点可能落在局部磁滞回线的四个象限内，引起磁体内部各个部位磁化状况不同，应用面电流等效法势必引起较大的误差。所以只有在磁场计算中利用磁滞模型准确模拟永磁材料饱和、退磁和旋转磁化等磁特性，才能设计出符合预定要求的永磁机构。

## 1.2 目前国内外发展状况

国外一些研究者虽然已经认识到了强永磁机构中出现的局部饱和、局部退磁现象，提出一些降低局部饱和、局部退磁的方法，并且已经制作出场强为 4~5 T 的永磁魔环和魔球机构，但并未考虑强永磁机构中出现旋转磁化现象，也没有把磁滞模型应用于强永磁机构的设计中，因此设计理论值往往比实测值偏高 10% 以上。魔环的组装过程中磁场的变化是没有规律的，针对这种磁场非圆形或椭圆形变化的磁化问题的文献报导很少，另外一些研究者提出的矢量磁滞模型，主要针对低磁场情况磁记录材料以及软磁材料的模拟，且应用起来比较复杂。

### 1.2.1 永磁魔环的设计

关于强永磁机构研究的论文在国内外见到的很少，文中提到的永磁机构一般可在很小的气隙内获得所用永磁材料剩磁三倍（4~5T）左右的强磁场。文献[8]中制作的模型是一个类似于魔球的椭球形磁体，模型体积为  $96\text{ mm} \times h120\text{ mm}$ ，中心处体积为  $6\text{ mm} \times h2\text{ mm}$  的空腔内可产生 4.3T 的磁场。它由 12 块  $30^\circ$  的永磁体拼装而成，其中每块磁体都由 16 块磁化过的梯形磁体组成。所用的材料为具有高剩磁的钕铁硼永磁体 ( $B_r=1.3\text{T}$ ) 和具有高饱和磁感应强度的铁钴合金 ( $B_s=2.4\text{T}$ )。内部中心处的磁体因承受较强的退磁场 (约 2T) 而选用高矫顽力的钕铁硼永磁体，内部中心处出现饱和的位置，用饱和磁感应强度更高的铁钴合金做成磁极代替钕铁硼永磁体。

文献[9]的作者为日本国家放射科学研究所制造了一台加速器用的增强型 12 单元永磁魔环。该魔环的内径为 6mm，外径为 200mm，高为 150mm。魔环因内外径之比较大，在内部靠近气隙处不可避免的出现退磁。为降低退磁作用，在原来全部由永磁体组成的魔环中引入了软铁作为磁极，魔环内、外层分别采用矫顽力较高和剩磁较高的钕铁硼永磁材料。磁体装配后气隙内磁场场强为 3.9T，比预期设计值低 14%。作者将其放在零下 25℃ 的低温下进行处理后，气隙处磁感应强度增大到 4.45T。另外，通过磁场垫补可改善磁场均匀性，使局部有效峰值偏差低于 0.4%。

文献[10]中的双魔环由内、外两个同心的八单元魔环组成，通过内环和外环的同步反向旋转，可实现空腔磁场的可调。其中内环的内径为 26mm，外径为 52.5mm；外环的内径为 47.5mm，外径为 110mm，魔环高 100mm。内外环产生的场强均为 1T 左右，气隙处场强为 2T 左右。内环承受外环 1T 左右的退磁场，不会造成大面积退磁。

文献[11]的 16 单元四极魔环用于美国卫星状况中心核子漂移管的直线加速器。其内径为 18.5mm， $h=35.00\text{mm}$ ，中心气隙处场强达 4.64T，各单元永磁替间即非粘接也非螺栓固定，而是采用一铝环安装在魔环外面起固定作用。

本人所在课题组曾用铁氧体和软铁制作了一个 8 单元二极增强型永磁魔环<sup>[12]</sup>，其内径为 24.4mm，外径为 414.2mm 轴向长度 85mm。所用铁氧体剩磁为 0.375T，二维计算结果表明磁体气隙内磁感应强度达到 0.93~1.238T，三维计算结果则为 0.582~

0.865T, 经实际测量磁体气隙内磁感应强度可达到0.35~0.68T。测试结果与理论计算值相比偏小, 误差主要由局部退磁、局部饱和、加工精度以及材料性能不均等引起。

### 1.2.2 磁滞模型

目前常用的磁滞模型有 Preisach 类磁滞模型和 Jiles-Atherton 磁滞模型。Preisach 类磁滞模型是目前应用最广泛的一类磁滞模型, 主要可分为标量 Preisach 模型和矢量 Preisach 模型。此外, 还有 Jiles-Atherton 神经网络磁滞模型、Stoner-Wohlfarth 磁滞模型<sup>[13]</sup>等多种模型。

20 世纪 30 年代德国的物理学家 F. Preisach 建立了经典标量 Preisach 磁滞模型, 因为它具有良好的普适性和数学表达的简明性, 几十年来得到了迅速发展。经典的 Preisach 模型有一些局限性, 它只考虑了磁化强度的不可逆分量, 没考虑材料的磁化过程中的可逆分量; 只能处理在稳态情况下, 磁场强度的极值对磁化强度的有影响, 而并没有考虑磁场强度的变化率对磁化强度的影响; 只能处理磁场强度与磁化强度在同一方向上的标量磁滞情况。另外 Preisach 模型的分布函数 ( , ) 通常需要利用统计实验测定的极限磁滞回线及一、二阶回转曲线的数据来进行大量的、复杂的插值运算而求得, 这在一定程度上限制了 Preisach 模型的应用。

为了克服经典 Preisach 模型的局限性, 研究者提出了几种新的模型。例如移动 Preisach 模型 (Moving Preisach Model) 这种模型考虑了材料磁化时, 磁化的材料本身也会产生磁场, 该磁场会对外加磁场产生影响, 并且考虑材料的磁化过程中的可逆分量。此外在动态 Preisach 模型 (Dynamic Preisach Model) 中考虑了外加磁场的频率因素。文献 [14]-[17] 提出 Preisach 模型分布函数可以按照一定的函数变换, 由  $H$  -  $M$  极限磁滞回环上的数据计算出来, 从而避免了大量的统计测试。

矢量 Preisach 模型 (Vector Preisach Model) 克服了经典 Preisach 模型的标量限制, 可以处理磁场强度与磁化强度不在同一方向的矢量磁滞问题。这类 Preisach 模型通过不同方法将矢量特性引入到模型中。I. D. Mayergoyz 从经典的标量模型出发, 认为在矢量模型情况下, 矢量磁滞是一种沿所有可能方向的分量的极值都可能会影响输出未来值的矢量非线性, 因此以标量模型为主要构成模块, 把矢量模型看作是标量模型在所有可能方

向上的矢量叠加，标量模型只是矢量模型的一个特例。此外 I. D. Mayergoyz 还将矢量模型扩展到三维情况。

文献[18]中以移动 Preisach 模型 (Moving Preisach Model) 为基础提出了旋转磁滞 Hong 模型，可以计算任意方向任意大小外场对应的磁化强度在 Hong 模型中给每一个磁偶极子赋予旋转矢量特性，磁偶极子根据外磁场可沿任意方向并能记录其方向。经典 Preisach 模型中 Preisach 平面分为磁偶极子为正、磁偶极子为负两部分，而 Hong 模型对应的矢量 Preisach 平面分为四个部分，分别为正磁偶极子部分、负磁偶极子部分、可逆磁化部分和旋转磁化部分，总磁化强度为分布函数在整个矢量 Preisach 平面内的积分。

Edward Della Torre 提出了两种简化矢量模型<sup>[19]</sup>SVPM (Simple Vector Preisach Model) 和 RVPM (Reduced Vector Preisach Model)，将矢量模型看作是二个（二维）或三个（三维）相互垂直的分别沿磁性材料易轴和难轴方向的基本标量模型的矢量叠加。采用栅格剖分法计算每个标量模型，可以避免计算复杂的二重积分。为确保场强较大时磁化强度不超过饱和值，引入状态函数对每个磁化强度分量进行修正，总磁化强度为各个方向上基本分量的矢量和。

### 1.3 本文的主要研究工作

本课题的任务是在原有铁氧体永磁磁环研究工作的基础上，运用 Preisach 磁滞模型和有限元计算相结合的方法，设计制造双极增强型钕铁硼永磁磁环，争取在较大工作空间内产生所用永磁材料剩磁磁密的三倍以上（4.5T 左右）的磁场。为完成这一任务，本课题主要工作包括：

(1) 研钕铁硼微观磁化机理。了解磁性体的磁性起源和磁性特征，研究烧结钕铁硼永磁体的微观显微结构及其技术磁化和反磁化过程，阐明烧结钕铁硼永磁体饱和与退磁时的微观机理，为合理钕铁硼永磁体设计永磁机构提供参考依据。

(2) 模拟钕铁硼的矢量磁滞特性。利用矢量磁滞模型模拟强永磁机构中出现的局部饱和、局部退磁和旋转磁化等异常磁化现象，利用 FORTRAN 语言通过自编程序实现矢量磁滞模型与有限元分析的耦合。

(3) 模拟永磁机构安装过程。永磁机构实际安装时，出现工作点逐渐由第二象限过渡到一、三象限的情况和复杂的旋转磁化，运用自编程序模拟安装过程并优化安装顺序

和步骤。利用 Ansoft Maxwell 三维磁场分析计算各单元块间力和力矩，为卡具的设计提供依据。

(4) 设计永磁魔环机构。利用各向异性矢量 Preisach 磁滞模型结合有限元法准确计算魔环产生的磁场，并且结合 Ansoft Maxwell 三维磁场分析设计增强型魔环。设计中应尽量降低魔环内部的饱和与退磁以提高气隙磁场，争取在较大工作空间内产生 4T 以上的强磁场。

(5) 参与制造永磁机构并检测磁场。完成永磁魔环机构结构设计和工艺设计，联系企业生产制造魔环。参与制造工作，并在永磁魔环制造安装完成后，测量气隙磁场强度，与理论值比较验证。

## 2 烧结钕铁硼的显微组织结构与技术磁化

迄今为止，永磁材料经过了近一个世纪的发展，其发展过程可分为六个阶段：磁钢，Ni-C 系磁体，铸造永磁体，铁氧体永磁体，Sm-Co 系稀土永磁体，Nd-Fe-B 系稀土永磁体。目前，Nd-Fe-B 系稀土永磁材料发展迅速，应用越来越广泛。不同工艺生产的 Nd-Fe-B 永磁材料中，烧结工艺生产的材料磁性能最好，产量也最高。

烧结 Nd-Fe-B 永磁材料  $BH_m$  比  $Sm_2Co_{17}$  高约 50%，为铁氧体的 10 倍；剩磁  $B_r$  是铁氧体的 3 倍；矫顽力是  $Sm_2Co_{17}$  的 2 倍，铁氧体的 5 倍。可见，烧结 Nd-Fe-B 永磁材料与其他永磁材料相比，具有高剩磁、高磁能积、高矫顽力的特点，是目前世界上发现的永磁材料中磁性能最强的一种。同时，其机械性能好，加工方便，成品率高，可装配后充磁。钕铁硼永磁体的缺点是工作温度低，剩磁温度系数大；温度高于 150℃ 时磁性能的不可逆损失超过 5%；热稳定和化学稳定性差，在高温潮湿环境中容易氧化，磁体锈蚀现象严重。

目前，Nd-Fe-B 系烧结磁体已发展到第五代产品。第一代始于 1983 年的 290 kJ/m<sup>3</sup> 级磁体；第二代始于 1989 年的 320 kJ/m<sup>3</sup> 级磁体；第三代始于 1992 年的 358 kJ/m<sup>3</sup> 级磁体；第四代始于 1996 年的 382 kJ/m<sup>3</sup> 级磁体；第五代始于 1998 年的 398 kJ/m<sup>3</sup> 级磁体，2002 年为 448 kJ/m<sup>3</sup>。可见烧结 Nd-Fe-B 永磁材料的磁能积提高极快，目前实验室研究得到的磁能积值已相当接近其理论值。

### 2.1 烧结钕铁硼的显微组织结构分析

#### 2.1.1 烧结钕铁硼永磁材料制造工艺概述

生产钕铁硼永磁材料的工艺方法主要包括：烧结工艺、粘结工艺、热变形工艺。烧结工艺制造的钕铁硼永磁体磁性能水平最高，其产量也最大。基本过程是将磁粉在强磁场中取向压制成形，辅以等静压处理用以提高密度和均匀性，经真空充氢烧结，回火或二次回火处理后即可。烧结钕铁硼永磁材料的主要工艺流程为：原材料准备、冶炼、铸锭、破碎与制粉、磁场取向与压型、烧结、回火、机械加工与表面处理以及检测。

钕铁硼永磁体的设计成分影响晶体结构、晶粒尺寸及晶界显微结构，从而影响永磁体的矫顽力、剩磁、磁能积、温度稳定性和抗腐蚀性等性能。所以选择原料时 Nd、Fe、B 的含量及 Al、Tb、Ga、Nb 等添加元素的含量应精确控制，S、P、O 等导致剩磁和矫顽力降低的有害元素含量应低于一定标准。熔炼时，为防止金属的挥发、氧化烧损和提高成分均匀性，一般采用 1.5kHz 的中频真空感应炉熔炼，并严格防止夹杂物和气体污染。铸锭时应提高铸锭冷却能力实现非平衡凝固，且铸模应具有单相冷却条件，以获得良好的铸锭组织：柱状晶生长良好，其尺寸细小，富 Nd 相沿晶界均匀分布，不存在 Fe 晶体。

随后将铸锭破碎成粉末颗粒，制作压型的钕铁硼粉末颗粒尺寸要小（3-4 μm），粒度均匀且圆整纯净。制粉分为粗破碎和磨粉两个过程，粗破碎方法分为机械破碎和氢淬，磨粉分为球磨制粉和气流磨制粉。将制得的粉末装入模具后放入强磁场中，使各粉末颗粒的易轴方向沿相同方向取向，取向程度对磁体剩磁和磁能积均有重要影响，但不可能使所有粉末颗粒的易轴完全平行磁场方向。磁场取向后进行粉末压型，将粉末压成一定形状的压坯并使其保持住晶体取向度，普遍采用的压型方法有模压法、模压加冷等静压、橡皮模压等等。

将压坯加热到粉末基体相熔点以下的温度（约 0.7-0.85T<sub>m</sub>），进行热处理一段时间，即烧结。烧结时压坯发生一系列物化变化，有机物和气体挥发和蒸发，应力消除，粉末颗粒表面氧化还原，变形粉末颗粒出现还原和再结晶。接着是原子的扩散，物质的迁移，颗粒间形成金属键或共价键。烧结后，出现烧结颈和烧结颈长大，密度提高，晶粒长大，强度提高，磁体具有了永磁性能的永磁体，但它的磁性能较低，回火处理可显著提高 Nd-Fe-B 合金的磁性能，特别是矫顽力，回火分为一级回火和二级回火，两级回火比单级回火可获得更加优化的显微组织。把 Nd-Fe-B 合金毛坯加工成一定标准的几何形状并防腐电镀后即得成品。

### 2.1.2 烧结钕铁硼相的组成

烧结 Nd-Fe-B 合金室温下主要由 Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B 相、富 Nd 相和富 B 相组成。Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B 相是烧结钕铁硼永磁材料的主相，其所占的体积分数约为 80-95%，永磁材料的性能主要

由主相决定。 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$  是具有单轴各向异性的硬磁性相，通过中子衍射和 X 射线衍射方法确定  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$  属于四方晶体其晶体结构如图 2.1 所示。 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$  化合物一个单胞

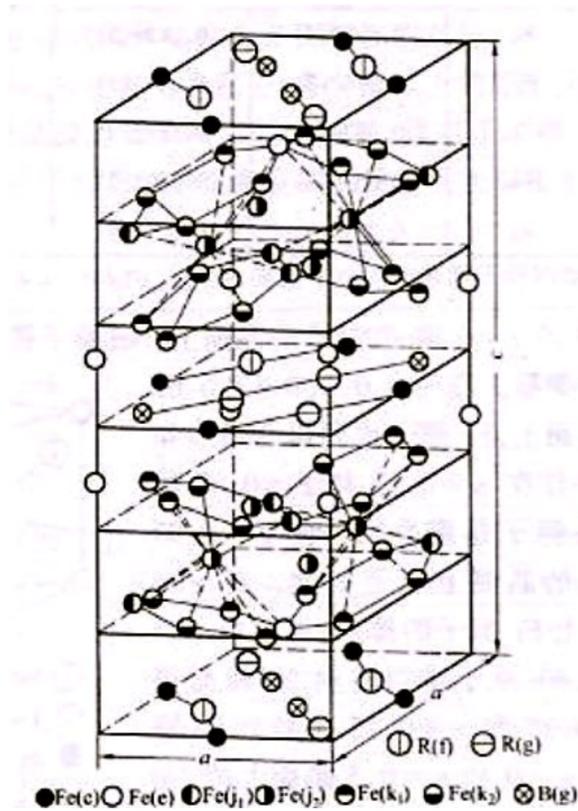


图 2.1  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$  的晶体结构

Fig. 2.1  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$  crystal structure

的晶体结构由 4 个  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$  分子组成，有 68 个原子，其中 8 个 Nd 原子，56 个 Fe 原子，4 个 B 原子，构成四方结构，点阵常数  $a=0.882\text{nm}$ ， $c=1.224\text{nm}$ 。Nd 和 B 原子分布在  $z=0$  ( $c$ ) 和  $z = 0.5c$  的两个结构层（即第一、第四层）内，排列成近似的大小菱形，而在第二、三、五、六结构层内仅有 Fe 原子，排列成六角形或三角形网。B 原子占据由基面 ( $z = 0$  或  $0.5$ ) 上边和下边各三个最近的铁原子所构成的三角棱柱体中心。

富钕相主要分布在主磁性相晶界周围，具有面心立方结构，体积百分数约为 5~20%。富钕相的存在，可促进磁性材料的烧结，使磁体致密化，沿晶界分布时可隔离主磁性相  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$  之间磁耦合作用，有利于矫顽力的提高。

富硼相为四方结构，占总体积的 0~8%，大部分以多边形颗粒存在于主磁性相晶界处。富硼相起稀释作用，对磁性能几乎无益。

此外，在烧结 Nd-Fe-B 永磁材料中往往还存在一定量的 Fe 相及其它软磁性相或非磁性相。

### 2.1.3 烧结钕铁硼的扫描电镜分析

烧结钕铁硼永磁材料的磁性能，尤其是矫顽力对其显微组织十分敏感。其显微组织具有遗传性，整个制造工艺过程包括材料、冶炼、铸态组织、制粉工艺、原始粉末的颗粒度等对其显微组织都有影响。大量的组织观察表明，烧结 Nd-Fe-B 合金显微组织具有如下特征<sup>[20]</sup>：（1）基体相  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$  的晶粒呈多边形，不同尺寸的晶粒其取向不同；（2）富 B 相以孤立块状或颗粒状存在；（3）富 Nd 相沿晶界或晶界交隅处分布，它呈薄层状或颗粒状，把基体相晶粒包围住；（4）在某些烧结 Nd-Fe-B 合金显微组织中还可观察到颗粒状的  $\text{Nd}_2\text{O}_3$  相、外来掺杂物和空洞等。

典型烧结 Nd-Fe-B 合金显微组织的扫描电镜图片如图 2.2 所示。其中灰白色晶粒是主相  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$  相，它是唯一的铁磁性相。其体积分数决定了 Nd-Fe-B 永磁合金的剩磁和最大磁能积。在压型之前， $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$  晶粒的易轴择优的沿磁化场取向，它的体积分数为合金磁极化强度与  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$  化合物磁极化强度之比。

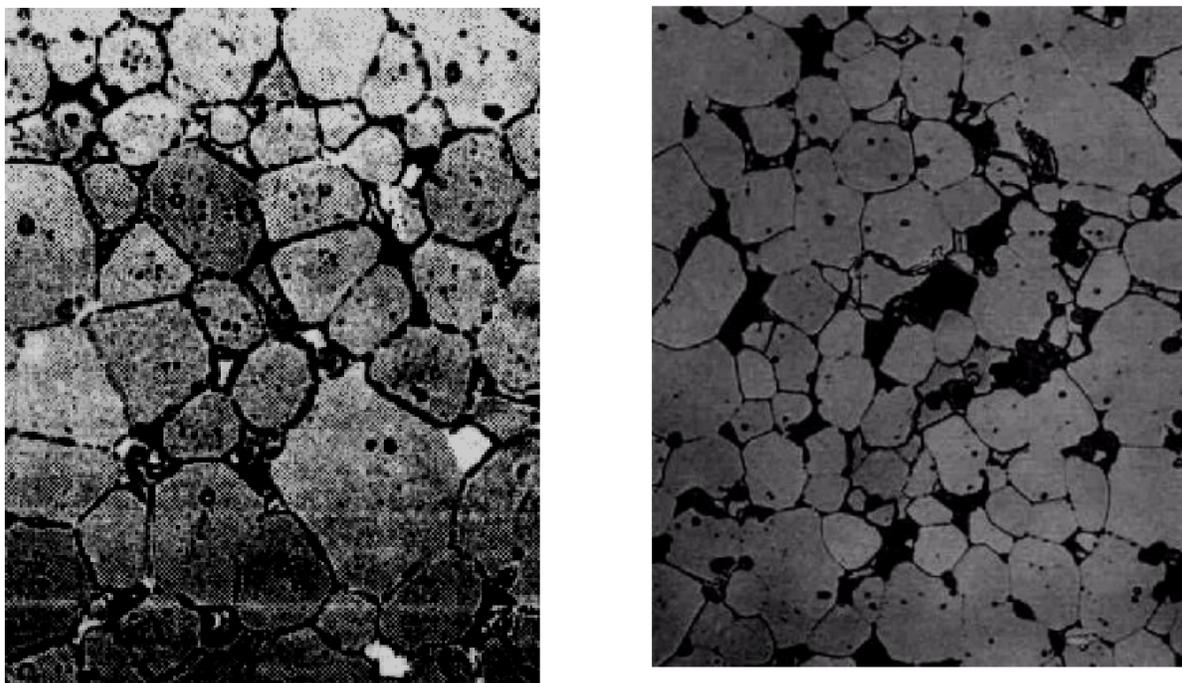


图 2.2 典型烧结 Nd-Fe-B 的扫描电镜图片<sup>[21], [22]</sup>

Fig. 2.2 Typical sintered Nd-Fe-B scanning electron micrograph

黑色粒状和块状的主要是富 B 相， $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$  晶粒内部也有细小的颗粒状富 B 相沉淀，它与基体是非共格的。在大块的富 B 相内部存在高密度的堆垛层错，富 B 相常常以不同变态的亚稳定相存在，其内部成分不均，Fe/Nd 比可在 3.6-3.9 范围内变化。若添加有 Si、Al、Zr 等元素时，它们在富 B 相中的波动很大。富 B 相的居里点温度为 13K，

室温上是顺磁性的，在 Nd-Fe-B 中起稀释作用，对永磁性能几乎无益。在 Nd-Fe-B 中富 B 相体积分数介于 0%–8% 之间，希望它的体积分数越小越好。

图中沿晶界或晶界交隅处主要是富 Nd 相。大量的显微组织观察表明，富 Nd 相有三种分布形态：一种是镶嵌在  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$  晶粒边界上的块状富 Nd 相；第二种是连续分布在沿晶界或晶界交隅处具有各种不同厚度的薄层状富 Nd 相；第三种是分布在  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$  晶粒内部的弥散的富 Nd 相，只在个别晶粒中可观察到，其数量很少。孤立的颗粒状的富 Nd 相具有六方结构，Nb 原子数约 97%，其余为 Fe。沿晶界分布的薄层状富 Nd 相具有面心立方结构，Nb 原子数约 75%，Fe 为 25%，此外还有不知到化学成分和晶体结构的富 Nd 相存在。富 Nd 相主要起三方面作用：促进烧结作用，使组织致密化；富 Nd 相沿晶界分布，起到去交换作用，有利于矫顽力提高；减弱了抗腐蚀性。

#### 2.1.4 烧结钕铁硼晶界的显微组织特征

烧结 Nd-Fe-B 合金回火后其矫顽力可提高一倍以上，回火后晶粒内部没有明显的变化，变化的仅是晶界，所以晶界的显微组织对合金矫顽力有重要影响。

经透射电镜观察，烧结 Nd-Fe-B 合金晶粒边界分四类：第一类是  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$  晶粒与非磁性相晶粒富 Nd 相、富 B 相直接接触的晶界；第二类是  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$  晶粒之间直接接触的晶界；第三类是存在一层相对薄（2nm）的富 Nd 相的  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$  边界；第四类是  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$  晶粒之间存在一层较厚（15–20nm）的富 Nd 相的  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$  边界，它由两个区组成，第一区是面心立方结构的边界中央的富结构 Nd 相区，B 含量较低，有氧富集，其厚度约为 1–5nm；第二区是过渡区，与  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$  相相比，Nd 含量较高，氧和碳的含量较高，构成由富 Nd 相向  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$  相的成分过渡区。

上述四种晶界一般同时存在于烧结 Nd-Fe-B 合金中，但随 Nd 含量的增高，第三、四类边界的数量增加，第二类边界的数量减少。在第二类边界边界内部不存在边界相，相邻两个  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$  晶粒直接接触，它们之间存在直接磁交换耦合作用，这是导致矫顽力降低的重要原因之一。回火时， $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$  晶粒外沿层的钕、氧、碳原子向富 Nd 相区扩散，而富 Nd 相区的铁、硼原子向  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$  相扩散，结果使  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$  晶粒的外沿层

的成分和结构向  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$  相的成分和结构过渡，界面变的更加平直和光滑，第四类边界的第一区厚度有所增加，从而  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$  晶粒外沿实现磁硬化，矫顽力得到提高。

通过大量的显微组织观察和相应磁性能分析得出，理想的微观结构应该是：（1）主相  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$  晶粒细小，分布均匀，形状规则；（2）晶界处有一薄层富 Nd 相将主相晶粒分隔开来，没有聚集成块的富 Nd 相存在；（3）结构没有大量氧化物及孔洞存在。在保证主相的体积分数足够大并且富 Nd 相含量适当的情况下，以上 3 个条件同时具备会使材料的磁性能最佳。

使烧结 Nd-Fe-B 永磁体矫顽力降低的显微结构主要有：（1）富 Nd 晶界相分布不均，部分晶粒间没有富 Nd 晶界而直接接触使它们变成不规则的“大晶粒”；（2） $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$  晶粒外形不规则，有尖锐的边和角，在晶粒表面凸凹的缺陷处存在较大的局域退磁场，引起反磁化畴核过早形成；某些铁磁性晶界存在，也会导致矫顽力降低。通过添加其它元素可以改善烧结 Nd-Fe-B 永磁体的相化学成分、晶体结构、晶粒尺寸及晶界显微结构，从而提高永磁体的矫顽力、剩磁、磁能积、温度稳定性和抗腐蚀性。

## 2.2 钕铁硼永磁体的技术磁化和反磁化

### 2.2.1 自发磁化与磁畴理论概述

物质大都是由分子组成的，分子由原子组成，原子又是由原子核和电子组成的。一般原子核和电子均有磁矩，原子磁矩主要来源于电子磁矩。在原子内部，电子不停的绕原子核旋转并同时做自旋运动，电子的这两种运动都会产生磁矩，3d 金属原子磁矩主要由电子的自旋磁矩来贡献，4f 金属原子磁矩由电子的轨道磁矩和自旋磁矩来贡献，这样每一个原子都相当于一个元磁铁。

原子的次电子层填满了电子的原子的磁矩为零，是无净磁矩的原子，这类物质属于抗磁体；顺磁体中交换作用十分微弱，热运动使原子磁矩混乱取向，变成磁无序；铁磁体原子间存在交换作用或间接交换作用，为使交换能最小，相邻原子磁矩夹角为  $0^\circ$ ，即彼此同向平行排列，即形成自发磁化；亚铁磁体中相邻原子电子磁矩也反平行排列，但净磁矩不为零，也可产生自发磁化；反铁磁体中相邻原子电子磁矩夹角为  $180^\circ$ ，彼此反向平行排列。

在稀土金属化合物中，由于间接交换作用，3d 金属自旋磁矩和 4f 金属自旋磁矩总是反平行排列。在轻稀土化合物中 3d 与 4f 电子磁矩是铁磁性耦合的，而重稀土化合物中 3d 与 4f 电子磁矩是亚铁磁性耦合的，这两种耦合都能产生自发磁化形成磁畴。

铁磁体和亚铁磁体在居里温度以下和无外磁场作用时，由于内部静磁场能、磁晶各向异性能和交换作用能等能量的作用，其内部分成若干小区域，每个区域内部包含大量原子，在每一小区域内原子磁矩因自发磁化同向平行排列，达到磁化饱和，这一小区域称为磁畴。宏观物体一般总是具有很多磁畴，无外磁场时，相邻的磁畴间原子磁矩排列方向不同，磁矩相互抵消，矢量和为零，所以整个磁体的磁矩为零，对外不显示磁性。

磁畴之间有一定宽度的过渡层，其中磁矩方向逐渐改变，这些过渡层称为畴壁。



图 2.3 几种常见的磁畴及其畴壁

Fig. 2.3 Ordinary magnetic domains and domain walls

实际的磁性材料中，磁畴结构五花八门，如条形畴、迷宫畴、楔形畴、环形畴、树枝状畴、泡状畴等。图 2.3 为在显微镜中观察到的磁性材料中常见的磁畴形状，其中左面是软磁材料常见的条形畴，黑白部分因为不同的磁畴其磁矩方向不同而亮度不同，它们的交界面就是畴壁；中间是树枝状畴和畴壁；右面是薄膜材料中经常见到的圆柱形的磁畴。

### 2.2.2 技术磁化和反磁化概述

磁畴结构在外磁场的作用下，从磁中性状态过渡到饱和状态的过程称为技术磁化。磁畴结构在外磁场的作用下，从饱和状态返回到磁中性状态的过程，称为反磁化过程。磁化过程可分为四阶段<sup>[23]</sup>：

第一阶段是可逆磁化过程。可逆是指磁场减小到零时， $M$  或  $B$  由原曲线减小到零。在可逆磁化阶段，磁化曲线是线性的，没有剩磁和磁滞。

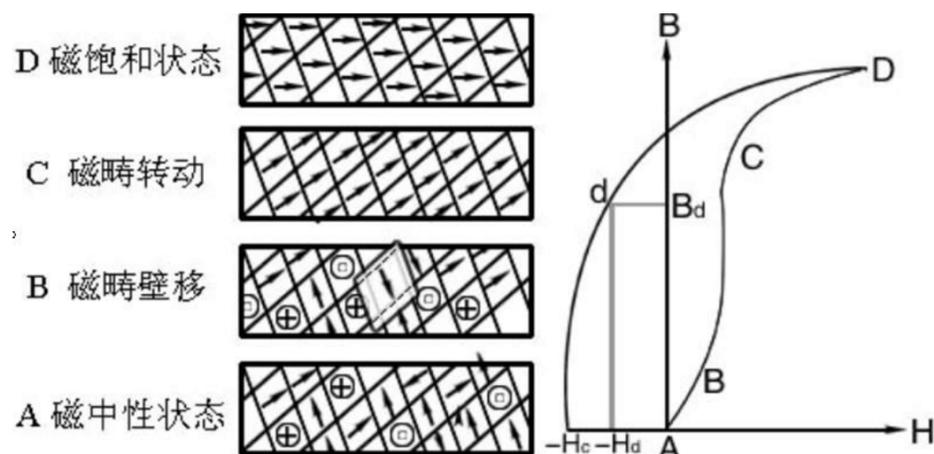


图 2.4 技术磁化对应磁畴状态示意图

Fig.2.4 Scheme of magnetization and the state of magnetic domains

第二阶段是不可逆磁化阶段。在此阶段内，随磁化场而迅速增加， $H$  与  $M$  或  $H$  与  $B$  的曲线不再是线性的，如果把磁场减小到零， $M$  或  $B$  不再沿原曲线减小到零，而是出现剩磁，这种现象称为磁滞。实际上，这一阶段是由许多  $M$  或  $B$  的跳跃性变化组成的，称为巴克豪森跳跃。

第三阶段是磁化矢量的转动过程，不可逆畴壁移动阶段结束后，畴壁已消失，整个磁体成为一个单畴体。但它的磁化强度方向与外磁场的方向不一致，因此随磁化场的进一步增加，磁矩逐渐转动到与外磁场一致的方向。

第四阶段是趋近饱和的磁化，磁体达到技术饱和，这是的磁化强度称为饱和磁化强度，相应的磁感应强度称为饱和磁感应强度。此后， $H$  与  $M$  或  $H$  与  $B$  的曲线以近似于水平，曲线已大体成为直线，此时继续增加磁化场， $M$  或  $B$  还稍有增加，这一过程也称为顺磁磁化过程。本文认为，实际的永磁体成分比较复杂，一般由表现为铁磁性、顺磁性、抗磁性等不同磁性质的成分组成，从而该段磁化曲线可看作是各种成分的磁化曲线的叠加。

物质经过外磁场的磁化达到饱和后，若将外磁场去掉，其磁化强度并不为零，而是具有剩磁，只有再反向加外磁场后，才能使磁化强度逐渐回复到零，这时外磁场称为内禀矫顽力，这些过程即为反磁化过程。

从磁畴结构变化的角度看，磁化过程的四个阶段又可归纳为两种基本方式：（1）畴壁的移动；（2）磁矩的转动。它们都可能发生在上述过程的每一个阶段，任何磁性材料的磁化和反磁化都是通过这两种方式实现的，至于这两种方式的先后次序和作用的大小，则须具体情况而定。譬如，在软磁材料中，大体可分为以上四个阶段；而在永磁材料中，畴壁的移动和磁矩的转动往往同时发生，很难象上面说的分清阶段。

### 2.2.3 钕铁硼永磁体技术磁化和反磁化过程中的磁畴移动

富 Nd 晶界的成分是变化的，这种成分波动增加了磁畴运动的阻力，增强了富 Nd 晶界对畴壁的钉扎作用，从而增加了磁体的矫顽力。Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B 晶粒的表面缺陷层厚度越厚，磁畴运动的阻力越大，从而磁体的矫顽力越大。Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B 的晶粒尺寸对磁畴运动影响较大，随晶粒尺寸的减小，磁体的矫顽力将增大，其作用的实质是 Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B 晶粒的表面缺陷层的体积占主相体积的分数及富 Nd 晶界占整个磁体的体积分数随晶粒尺寸的减小而显著增大。而富 B 相是反磁化畴的形核中心，有助于反磁化畴长大，可降低磁体的矫顽力。

另外，晶粒取向程度也会影响畴壁的运动。晶粒易磁化轴与磁化场 H 的夹角为  $\theta$ ，磁化场与磁体择优织构平行。理想状态下，所有晶粒的夹角  $\theta$  均为 0°，但实际情况并非如此。 $\theta$  越大，则反磁化畴出现得越早，即使在充磁场从正值变为零的过程中，也可能出现；而且在同样场强下，如果都出现反磁化畴， $\theta$  越大则反磁化畴所占晶粒面积越大。这表明，当晶粒取向  $\theta$  的分而主要集中在较大角度附近时，磁体的矫力会上升，但这种磁体的剩余磁化强度 Mr 会降低，而且在较小的退磁场下，Mr 就会急剧下降，使磁体没有工程应用价值。

#### (1) 钕铁硼永磁体技术磁化过程中的磁畴移动<sup>[24]</sup>

在烧结退火后，粉末烧结 Nd-Fe-B 磁体中，Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B 晶粒内均为多畴状态，充磁过程中，随着 H 增大，Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B 的磁畴通过畴壁移动而逐渐减少。由于主相内无缺陷，畴壁位移极易发生，在 M-H 曲线上表现为 M 迅速上升。随着 H 进一步增大，磁畴数量进一步减少，最后变为单畴，在 M-H 曲线上，M 急剧上升直至接近饱和。再增大 H，M

达到  $M_s$  值。H 继续提高，单畴的畴壁会逐步移到  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$  晶粒的表面缺陷层，再从表面缺陷层移动到富 Nd 晶界，直至单畴的畴壁被钉扎在富 Nd 晶界上。

依据上述磁畴运动模式，由于  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$  晶粒的表面缺陷层是软磁性区，和主相晶粒尺寸相比，缺陷层很薄，当单畴畴壁从主相晶粒内部运动到缺陷层边缘时，所有表面缺陷层对试样 M 的贡献很小，在 M-H 曲线上表现为 M 稍稍有点增加，在单畴畴壁通过所有主相晶粒表面缺陷层后，磁化强度 M 达到  $M_s$  值。由于富 Nd 晶界是非磁性相区，对试样的 M 没有贡献。因此，继续增大，单畴畴壁进入富 Nd 晶界后，磁化强度维持在  $M_s$ ，不再变化。

在 M-H 曲线上，虽然 M 在饱和前变化很小，但单畴畴壁从主相晶粒内部移动到表面缺陷层，再由此移动到富 Nd 晶界，直至被钉扎在富 Nd 晶界上，却需要足够大的磁场场强才能逐步实现。因此，这阶段 H 值增加很快。由于磁体内各微区的相组成不尽相同，各相成分不均匀，各主相晶粒的取向不完全一致，因此单畴畴壁移致力的三个阶段在各微区进行的过程有先有后。

## (2) 钕铁硼永磁体反磁化过程中的磁畴移动

根据 Nd-Fe-B 永磁体正向磁化场大小的不同，反磁化过程分为三个阶段。第一阶段：正向磁化场较小，在退磁过程中，对大多数晶粒没成为单畴状态或虽为单畴状态但单畴畴壁在主相成分平台内部的磁体，反磁化过程极易进行，这是因为：其一，在较小反磁化场作用下，有些磁畴的磁矩开始改变方向成为反磁化畴；其二，反磁化畴畴壁大面积移动很容易。所以在退磁曲线上，表现为 M 随 H 增大而急剧减少。

第二阶段：对大多数晶粒的单畴畴壁处在  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$  晶粒表面缺陷层的磁体，其反磁化过程是：反磁化畴壁首先要形核，然后长大，最后是在  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$  成分内部平移。此时，形核与核长大所需要的场是主要的，即要克服畴壁能密度的变化所造成的阻力，又要提供由于反磁化畴核体积和表面积的增加所需要的能量。在退磁曲线上，这一阶段表现为 M 随退磁场 H 增大而减少得较慢。

在第三阶段：正向磁化场较大，对于大部分晶粒的单畴畴壁钉在富 Nd 晶界上的磁体，在反磁化过程中，首先是富 Nd 晶界对畴壁的钉扎阻止单个正向磁畴的运动。三个或三个以上主相粒毗邻所构成的富 Nd 晶界对畴壁的钉扎作用最强。当单畴畴壁摆脱了富

Nd 晶界的钉扎，畴壁进入  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$  晶粒的表面缺陷层，就开始重复第二阶段的反磁化畴运动过程即反磁化畴核形核长大，反磁化畴进入无缺陷的  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$  区域并长大，形成反向畴，进而畴壁平移，形成正反向畴面积之代数和为零，此时的磁场即内禀矫顽力。

另外，第三阶段  $H_c$  还会缓慢增加。这是因为  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$  晶粒大小、取向程度、富 B 相、富 Nd 晶界及各相成分均存在一定的差异，因此各  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$  晶粒的单畴畴壁被钉扎在富 Nd 晶界的先后次序不一样。随着  $H$  的增加，会使越来越多的晶粒的单畴畴壁被钉扎在富 Nd 晶界上， $H_c$  增大。当所有主相的单畴畴壁被全部钉扎在富 Nd 晶界之后，此时磁体所对应的矫顽力最大，当磁化场再增加， $H_c$  不再增加，恒为最大值。

### 2.3 小结

本章介绍了烧结 Nd-Fe-B 的生产工艺，结合其显微组织结构分析阐述了烧结 Nd-Fe-B 技术磁化和反磁化的微观机理。

烧结 Nd-Fe-B 合金室温下主要由  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$  相、富 Nd 相和富 B 相组成，其显微组织具有如下特征：基体相  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$  的晶粒呈多边形，不同尺寸的晶粒其取向不同；富 B 相以孤立块状或颗粒状存在；富 Nd 相沿晶界或晶界交隅处分布，把基体相晶粒包围住；某些烧结 Nd-Fe-B 合金显微组织中还可观察到颗粒状的  $\text{Nd}_2\text{O}_3$  相、外来掺杂物和空洞。

烧结 Nd-Fe-B 在居里温度以下和无外磁场作用时因自发磁化形成磁畴。技术磁化和反磁化过程大致包括可逆磁化、不可逆磁化、磁化矢量的转动过程、趋近饱和的磁化等四个阶段，这四个阶段都是通过畴壁的移动和磁矩的转动来完成的，它们往往同时发生，很难分清阶段。

### 3 Preisach磁滞模型

描述磁滞过程的建模方法主要包括物理建模和唯象建模。物理建模深入到磁性产生的微观机理去建立模型，唯象建模是利用数学建模的方法对磁滞现象进行模拟，再将建立的数学模型耦合到麦克斯韦方程中，从而得到场问题的解。目前常用的唯象建模磁滞模型有 Jiles-Athert磁滞模型和 Preisach类磁滞模型。

Jiles-Athert磁滞模型是一种基于铁磁物质内能量平衡原理的磁滞模型，它通过考虑畴壁移动及能量平衡原理得到磁化强度与磁场强度的关系方程，通过对畴壁机理的研究，推导出描述不可逆微分磁化率和可逆微分磁化率的两个微分方程，配合合适的磁化函数求解这两个微分方程，即可得到磁化强度  $M$  随时间的变化规律。

Preisach磁滞模型是目前应用最广泛的一类唯象磁滞模型，Preisach类磁滞模型主要可分为标量模型和矢量模型。20 世纪 30 年代，德国的物理学家 F.Preisach建立了 Preisach磁滞模型，这个模型是基于对磁化物理机理的一些假设上提出的，起初只是被一些物理学家和工程学者所研究。19 世纪 60 年代，俄国数学家 M.Krasnoselski认识到 Preisach磁滞模型的物理思想中包含着一种新的数学思想之后，用一种纯数学的形式来描述这种模型，在此基础上形成了经典 Preisach磁滞模型。经典 Preisach磁滞模型只能处理磁场强度与磁化强度在同一方向上的标量磁滞情况，为了使 Preisach模型可以处理矢量场问题，利用多个不同方向上标量 Preisach模型进行矢量叠加，或是给每一个磁偶极子赋予矢量特性，从而形成了矢量 Preisach模型。

#### 3.1 标量 Preisach磁滞模型

##### 3.1.1 经典 Preisach磁滞模型

Preisach理论源于 1935 年德国物理学家 Preisach针对铁磁体的磁滞特性提出的一种磁滞模型。经典 Preisach模型可以用下式表示：

$$B = \int_{s_1}^{\infty} \int_{s_2}^{\infty} (H) d s_1 d s_2 \quad (3.1)$$

其中  $B$  为磁感应强度， $H$  为所加的外磁场强度， $(H)$  是磁偶极子  $(H)$  (见图 3.1) 的分布函数，且概括讲 Preisach模型是由简单的迟滞发生器  $(H)$  叠加构造成的，

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/687023046143010004>