第三篇　岩石磁学

物性，既是物探工作的基础，也是物探科技发展的土壤。物性在为针对工区或地质任务进行物探方法技术的选择、在为物探数据的处理与解释之时提供基础之外，还由于物性与地质工作关系密切，是物探与地质联系的纽带，因而物性的研究又为物探技术的发展、物探方法的地质应用提供开拓性的思路。

作为岩石物性一个重要组成部分的岩石磁学，具有较扎实的物理理论基础、岩石实验前提、地质成因条件，因而得到了较为优先的研究与发展。自 1977 年始，余钦范教授和他的同事、学生一起发表了大量的以岩石磁学成果为重点的物性研究论著。代表性论文或译文诸如：

1）余钦范：《岩矿剩余磁性在解决矿区构造问题上的某些应用》（载《地质科技动态》，1977（5），40～46）。

2）余钦范、沈佩芝等：《岩石剩余磁性与褶皱构造》（载《实验地球物理文集》，415～422 页，北京，地震出版社，1989）。

3）余钦范译：《岩石与矿物的磁性》（载《国外地质勘探技术》，1990（6），总 127 期，51～96）。

4）黄宝春、余钦范译：《1987～1990 年地磁学和古地磁学进展》（载《物探化探译丛》，1992（6）总 83 期，1～7 页）。

5）郭友钊、余钦范：《磁性勘探的理论、方法和应用研究》（载《中国地球物理学会年刊》，地震出版社，1994）。

6）郭友钊、余钦范、谭承泽：《土壤磁性在石油天然气早期勘探中的应用》（载《石油物探》，1995）。

7）郭友钊、杨辟元、余钦范、谭承泽：《磁性勘探在金属矿床中应用的若干进展》（载《物探与化探》，1995，19（1），48～53、59）。

8）余钦范、郭友钊、曹奋扬、董金明：《安徽凤凰山岩体岩浆侵位过程的磁性研究》（载《物探与化探》，1997，21



羡慕这种岩石能够成为大坝的基石

(3)，203～208 页)。

9）余钦范、郭友钊：《磁性勘查新进展》（载《1997 全国古地磁学，环境磁学，与岩石磁学学术会议论文汇编》，1997)。

10）郭友钊、陈本池、余钦范、谭承泽：《试论磁倾角异常作为确定烃类渗漏带的参考系》（载《石油地球物理勘探》，1998，33（4)，503～510 页)。

11)《江苏省东海县毛北榴辉岩岩石磁学及地质意义的初步研究》，(载《第三届海峡两岸三地及世界华人地质科学研讨会论文集》香港 2001）等。

除上述之外，还出版了三本物性理论或应用研究的专著：一是郭友钊、罗壮伟、孟小红、余钦范：《石油天然气的磁性勘查》北京，地质出版社，1999。二是崔军文、唐哲民、邓晋福、岳永军、孟令顺、余钦范：《阿尔金断裂系》北京，地质出版社，1999。三是郭友钊、余钦范、李磊等：《岩石物性块体及其地质应用》北京，地质出版社，2003。

这些论著构成了我国岩石物性工作领域的重要文献，除岩石物性数据提供物探工作基础外，还在下列几个方面取得了开拓性的研究成果：



余钦范教授在汇报苏北大陆科学钻探靶区岩石物性的调查成果

1）提出了磁性勘查的概念，进行了磁性勘查的理论、方法与技术研究，并在全国几大油田和数个金属矿区进行了应用试验，取得良好效果。

2）提出了岩石物性块体的概念，并应用于河北省、河南省、山西省、陕西省以及江西省的区域物性研究，发现物性块体其实质是区域地质体结构的数字描述，物性块体在岩相古地理、盆地沉积体系、地幔热柱结构、成矿远景区位等方面具有宏观的指示功能，具有战略指导作用。

3）提出了重大地质问题，如在江苏省东海县榴辉岩的岩石磁学研究中提出了该区反磁化的榴辉岩具有比金伯利岩更好的发育并保存金刚石的地质条件，是寻找金刚石矿体的有利地质体等。

岩石与矿物的磁性[1]

Robert S. Carmichael 著　　余钦范 译

一、前　言

岩石由矿物颗粒与晶体组成，它们的磁化强度具有磁性的矿物组分所引起。全岩中的磁性矿物也许只占百分之几。正是因为占比例很小的这一部分岩石及其化学与物理状态，决定了岩石的磁性和磁化强度，于是就产生了两个结果：

1）在给定的岩体或构造内，磁性变化很大，它取决于化学不均匀性，沉积或结晶条件，以及形成后的地质历史。

2）根据岩性（岩石类型和名称）不一定能够准确地预测磁性特征。这是因为岩石一般是根据总的矿物成分，主要是硅酸盐矿物，来命名或分类的。然而，正是这一小部分，如铁的氧化物控制其磁化强度。

尽管标准岩石的磁性变异性大，但磁性与岩石类型和总体成分之间，存在着一般的关系，这仍然是一个事实。若了解了以下内容，那么正确地预测和解释磁性的可能性就增加。

1）结晶物质磁化的基本现象。

2）磁性矿物的磁性特征，以及磁性随化学成分、粒度、机械状态、温度、压力与其他因素的变化。

3）典型岩石的性质及其随地质条件的变化。

岩石磁性的应用包括：

1）用磁法勘探进行地下填图，对隐伏岩石的深度、规模、磁性矿物、磁性物质比例进行解释，并对岩石性质（岩石类型）作出推断。这种磁法勘探，无论是在地面、空中或海上进行，在勘探与隐伏地质构造、岩性、资源和矿床方面，都是首先使用的良好工具。用磁法勘探能够直接或是通过推断确定出矿体（例如铁矿）的位置。另外的例子是从厚的沉积地层下面隐伏的结晶的“基底”岩石的起伏界面，确定有利的储油气的构造环境。

2）为开展古地磁工作，了解岩石磁性的起因与性质，目的是解释剩余磁化强度。它能够表明在岩石形成时的地球磁场的特征，并用来进行地层的对比、年龄鉴定以及恢复过去的地壳运动。后者包括构造形变、海底扩张和大陆漂移——“板块构造”。正是岩石的磁性与磁化以及岩石序列中的磁化模式，给出了原始的定量证据，令人信服地证明了在地质历史上，地壳断面曾经历过大规模的横向位移。下面两句话，表明了这种作用：

---

[1] 译自：《Hand book of Physical Properties of Rocks》，1981；译者：余钦范；校者：王恕铭。

“磁性可能是恢复洋底和大陆漂移历史的关键”（Heirtzler J. R. , 1973）。“古地磁的研究，在过去十年内，已经引起地球科学的一场变革”（McElhinny M. W. , 1973）。

3）材料科学方面的应用，像生产具有预期磁性的材料，例如铁氧体存储器磁心、磁带或者永久磁铁。

二、符号与单位

岩石与天然物质的磁性研究包括：①地磁——地磁场的起源与成因，特征与形态以及随时间的变化；②岩石磁性——磁性矿物和岩石的磁性与特征；③古地磁——研究岩石中保留下来的剩余磁化强度，以作为一种方法来推演在整个地质年代地磁场经历的历史以及它的性质。地磁场的方向、强度、极性和形态具有重要的意义。

表 1　磁性的符号与单位

符号	名称	CGS 单位（cgs-emu）	MKS 单位（SI）
		（和单位的等价量级）①	
φ	磁通	10^8 Maxwell（麦克斯韦）	= 1 Weber（韦伯）
B	磁通密度 （感应）②	10^4 Gauss（高斯） 或 Maxwell/cm^2 （麦克斯韦/厘米^2） $1\gamma = 10^{-5}$ Gauss $\boldsymbol{B} = \boldsymbol{H} + 4\pi \boldsymbol{J}$	= 1 Tesla（特斯拉） 或 Weber/m^2（韦伯/米^2） = nanotesla（毫微特斯拉） $\boldsymbol{B} = \mu_0 (\boldsymbol{H} + \boldsymbol{J})$
H	磁场强度（力场）	$4\pi \times 10^{-3}$ Oersted （奥斯特） 或 1ine/cm^2 （磁力线数/厘米^2）	1 Oe = 79.5 = amp - turn/m （安·匝/米）
μ	磁导率	$10^7/4\pi$ · Gauss/Oe $\mu_0 = 1$ $\boldsymbol{B} = \mu \boldsymbol{H}$	= Weber/amp - m （韦伯/安·米） 或 Henry/m （亨利/米） $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ $\boldsymbol{B} = \mu_r \mu_0 \boldsymbol{H}$ $\mu_r = 1 + \kappa$
κ	磁化率④	4π③	
χ	比磁化率，$\chi = \kappa/\rho$	$\boldsymbol{J} = \kappa \boldsymbol{H}$	$\boldsymbol{J} = \kappa \boldsymbol{H}$
m	磁极强度	10emu（电磁单位） 10^8 单位磁极	= amp - m（安培·米）
$m \cdot d$	磁（偶极）矩	10^3 “emu” 或 Gauss/ cm^3（高斯/厘米^3）	或（安培/米）
J	磁化强度 单位体积的偶极矩	10^{-3} “emu”（Gauss）	= amp - m^2/m^3 或 amp/m（安培/米）

续表

符号	名称	CGS 单位（cgs-emu）	MKS 单位（SI）
I	磁化强度，单位质量的偶极矩库仑定律	Gauss – cm^3/g（高斯·厘米³/克） $F = (m_1 m_2) / \mu\gamma^2$	$F = (m_1 m_2) / (4\pi\mu_r\mu_0 r^2)$

①1 麦克斯韦比 1 韦伯要小 10^8。

②地球表面的磁通密度约为 0.6 高斯，或 60000γ（在 SI 单位制中为 0.00006 特斯拉）。此结果是由下面以 SI 单位表示的磁场强度（力）得到的：$H = \frac{B}{\mu_0} = \frac{0.6 \times 10^{-4}}{4\pi \times 10^{-7}} = 47.75$（安·匝/米）。在 CGS 单位制中，此 H 值为 $47.75 \times 4\pi \times 10^{-3} = 0.6$ 奥斯特。

③在有理单位制中，有理单位是以（1/4π）×无理单位。

④磁化率是没有量纲的，但习惯上标出单位，以表示它所依据的磁化强度 J 是 emu/cm（即磁化率 κ）还是 emu/g（即比磁化率 χ）。

上述工作已有长久的历史。几千年以前，中国人就把磁性岩石用于变戏法和导航。1269 年 Petro Peregrinus 研究了（磁性）岩石范围的极性特征，并且写下了也许是最早的一篇重要科学论文《Epistola de Magnete》，虽然这篇论文，直到 1558 年才公布。1600 年，William Gilbert 根据他对磁石（磁铁矿）周围磁场的实验观测结果，在英国发表了另一篇早期的科学著作“磁石”，并作出地球像一块磁铁的推论。

传统和习惯上单位一直采用厘米·克·秒-电磁单位制（CGS-emu），实际上所有文献上的数值都是采用这种 CGS 单位。全面过渡到采用国际单位制（SI）的时候尚未到来，因为对如何实现单位制的转换还缺乏一致意见。这是由于这个专门问题与磁学中基本量的定义有关。例如，它们应当建立在磁极的基础上还是建立在电流的基础上；是选择有理化单位或是无理化单位。

表 1 列出了厘米·克·秒制（CGS）和米·千克·秒制（mks）单位以及它们之间的换算，由于现存的岩石磁学方面的资料太多，加之工作者普遍的对 CGS 制的偏爱，所以在下面的图表中，仍采用 CGS 制单位。

三、磁化：类型与参数

1. 固有磁化的类型

反磁性
顺磁性
铁磁性
反铁磁性
自旋-斜交（反）铁磁性
亚铁磁性
超顺磁性

反磁性——反磁性物质的磁感应略小于外加磁场，也就是原子磁矩起反抗外磁场的作用。反磁性归因于电子绕原子核的轨道运动，磁化率 $\kappa = J/H$ 是负值，其大小为 10^{-6} emu/cm^3 左右。这种弱效应，在所有物质中都存在，而且只是在有外加磁场的情况下才具有。

顺磁性——顺磁性物质其磁感应略大于外加磁场。原子偶极矩有一部分在外加磁场方向上排列成行，增大了净磁化强度。顺磁性归因于不成对电子的自旋。其磁化率是小的正值，界于 $10^{-4} \sim 10^{-6}$ emu/cm^3 之间。这种效应是弱的且仅在有外磁场的情况下才具有。

铁磁性——铁磁性物质的原子磁矩，包括在不加外磁场的情况下，由于交换相互作用能，而强烈地趋向平行排列。磁矩指向同一方向。于是能有一内在的或自发的磁化强度和一剩余磁化强度保留下来。仅当温度为绝对零度时，才能达到完整的有序排列，在那种场合，磁化强度将恰好是所有原子的磁矩的总和。在绝对零度之上，热能开始使磁矩发生紊乱。物质在某一特征温度（居时温度 T_C），其磁矩的长程相互作用有序排列就消失。在低于居里点温度 T_C 时，铁磁性物质在外磁场内，使磁化排列得以致其磁感应远大于单独的场。磁化率为正值，大小在 $10 \sim 10^4 emu/cm^3$ 之间。高于居里温度时，物质变成顺磁性的。有一些物质，尤其是 Fe、Co、Ni 具有这种效应，它的强度在而且有剩余磁性。

反铁磁性——反铁磁物质在无外磁场存在时，其原子磁矩趋向反向平行的有序排列，于是样品没有净余的磁化强度。这类物质的例子是它们有两个磁矩相等但方向相反的磁原子亚晶格。譬如在每个亚晶格内，有相同磁矩的原子的数目相等或原子数不等但其磁矩与反方向的磁矩保持平衡。这类物质的磁化率类似于顺磁性物质。在温度高于奈尔点 T_N 以上时，磁性的相互作用被热能全部扰乱，于是转变成顺磁性物质。自旋斜交（反）铁磁性是反平行的磁矩，偏离反铁磁性平面，结果引起一种弱磁性或“寄生磁性”。该物质在居里温度时，磁性消失。赤铁矿（αFe_2O_3）是其中的一例。

亚铁磁性物质或铁氧体——此类物质的原子磁矩为反平行排列，但具有明显的净磁化强度。由于自旋电子的数量不等或是偶极矩不等，使磁性亚晶格并不具有平衡的磁矩。于是有了一剩余磁化强度。高于居里温度时，物质为顺磁性的。此类物质的例子有磁铁矿（Fe_2O_3）、磁赤铁矿（γFe_2O_3）以及几种具有尖晶石结构的矿物。

超顺磁性——此类物质是指磁性颗粒或磁性区域很小（小于 0.01μm），以致原子偶极矩的共同排列被热能的无序化效应所压倒。在一定的温度情况下，有一个阻挡尺寸，低于它时，磁性排列的驰豫时间很短。

2. 剩余磁化强度的类型

岩石和矿物可以保留各种形式的、取决于它们的磁性、地质起源和历史和剩余磁化强度。可分为以下几类：ARM、CRM、DRM、NRM、PRM、TRM 以及 VRM。

ARM——（非磁滞剩余磁化强度），它是由于样品置于衰减的交变场中，另加上一恒定的外磁场而引起的。交变场通常是由交流电通过螺线管或线圈产生。而定向场的作用是当交变场减到零时，来偏置磁矩的最后取向。它用于实验室研究和样品的品质鉴定。

CRM——（化学或结晶剩余磁化强度），它是在沉积或结晶后，经受某种物理化学变化而获得的一种磁性状态。这种物理化学变化，可以是氧化作用或者是还原作用，也可以是物相变化，脱水作用，胶泥的沉淀作用，出溶，再结晶或颗粒生长。其过程通常是在地磁场中恒温条件下发生的。对于某些沉积岩（红层）和变质岩而言，CRM 可能是重要的。

DRM——（沉积或碎屑剩余磁化强度），它是在碎屑沉积物中由于细的颗粒沉积在水体底部而形成的。最简单的情况是颗粒在静水中落在一个水平面上，也许伴随一些沉积后的转动和调整。这些颗粒顺地磁场优先取向，得到一个地磁场方向的净磁矩。对于海相沉积物、湖相沉积物和纹泥粘土，DRM 可能是重要的。

IRM——（等温剩余磁化强度），它是在施加外磁场以后，在样品中保存的剩余磁矩。这通常是在为室温的恒温条件下完成的。它可能类似于闪电－感应剩余磁性。这对在室内

分析岩石的磁性特征是有用的。

NRM——（天然剩余磁化强度），它是在采集样品时样品在自然状态或者在原地条件下所见到的磁化强度。NRM 是一个统称，它表示这里所描述的其他类型的剩余磁化强度中的一种或者是几种的组合。例如 NRM 可以是原有 TRM 的颗粒的 DRM，加上在形成后的地点在地磁场中获得小部分的 VRM。

PRM——（压力剩余磁化强度），它是样品在磁场中经过机械形变过程获得的。因此可以把它叫做形变剩余磁化强度，或叫做应变剩余磁化强度。外加的应力可以是在弹性或塑性范围内，也可以是有向的构造压力，流体静压力或冲击力。最显著的效应是与磁性矿物结构上的不可逆变化有关。

TRM——（热剩余磁化强度），它是样品在磁场中从高于居里温度冷却到常温条件下获得的。一般来说由于它众所周知的产生方式，它的稳定性。它在火成岩及导生于火成岩的沉积岩中有广泛的分布，以及它在古地磁应用中的可靠性，TRM 是最重要的一种剩余磁化强度。PTRM（部分热剩余磁化强度）是总热剩余磁化强度的一部分。它仅仅是在一个有限的温度间隔，即 $T_2 \sim T_1$ 范围内，在加有磁化场时样品冷却而产生的，这里 T_2 与 T_1 均低于居里温度 T_C。ITRM（反向热剩余磁化强度）是使样品在磁场中从低温加热到常温引起的。它存在于那些在低于居里温度 T_C 时遭受过一定的结构变化和磁性变化的磁性晶体（物质）中。

VRM——（黏滞剩余磁化强度），它是样品在一个小的外磁场中，随着时间的流逝逐渐获得的。一般是在低温和地磁场中发生的。其磁矩不可逆的增长，通常是时间的对数函数。这是一种使磁矩择优取向的过程，是由于热扰动所产生的。这种剩余磁化强度相当弱也不稳定，但多数岩石都有这种剩余磁性，这是由于岩石自从获得其原始磁化强度以来一直存在于地磁场中。

总磁化强度是剩余磁化强度 J_r 与感应磁化强度 J_i 之和。对于弱磁场，后者是与磁场成正比的，即 $J_{总} = J_r + J_i = J_i + \kappa \boldsymbol{H}$。

3. 术语与参数（磁滞，形状效应）

在对岩石磁性进行比较、描述和分类时用到以下的概念和术语：

（1）*磁滞*

这是指磁化强度 J 或者通量密度（磁感应）B 随外磁场 $H_{外}$ 的变化。图 1 表示一理想化的磁滞曲线。它有如下参数：

1）饱和（或“自发”）磁化强度 J_s。样品的总体磁矩是所有原子磁矩处在最完善的有序排列时的磁矩。这可由自发排列得到，例如在单磁畴晶粒度，加一个充分大的磁场，也能够达到饱和磁化。J_s 与温度有关，在居里温度时，它减小到零。

2）饱和等温剩余磁化强度 $J_{r,sat}$。它是当外加磁场减小到零时，从饱和磁场留在样品中的剩余

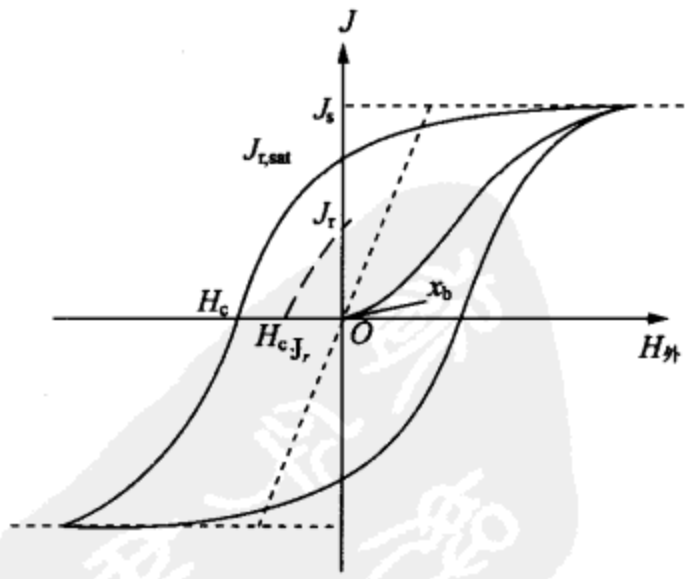


图 1　磁滞曲线的一般形态与参数

磁化强度。

3）剩余磁化强度 J_r。它是从不同于饱和 IBM 的 TRM，NRM 等某些磁化过程留下来的剩余磁化强度。

4）矫顽力或矫顽磁场 H_c。它是使 $J_{r,sat}$减到零所需的磁场。有时称为剩余矫顽磁场 H_{rc}。剩余磁性并不因此长久减到零，当磁场移去时，磁化强度曲线将沿着一条向上的轨迹在 J 纵坐标上达到一个剩余值。对识别岩石磁性特征和分类有用的其他参数是反向磁场，当加上它时，剩余磁化强度（例如 $J_{r,NRM}$将减小到零，见图 1 中 H_c，J_r。或者欲使剩余磁性减小到零，所要求的反向磁场 H_{rc}（$H_{rc} > H_c > H_{c,J_r}$）。

5）磁化率 κ。它表示在外磁场中物质磁化物质磁化的容易程度。通常 $\kappa = J/H$ 是 J 随 H 变化曲线的斜率。然而它随 H（横坐标）值的位置而变化。在小磁场时，磁化率是低的，外场增大 κ 值也增大，然后当接近 J_s时，κ 值随之减小。磁化率（或磁导率 μ，对 B 与 H 的关系曲线而言）能从曲线的任意点上测得，因此实验所得的变化很大。在岩石磁性和古地磁工作中，确切的磁化率值是在零磁场中测量得的，或者为了实用，在不超过地磁场（$H = 0.5$Oe）的磁场中测量得到的磁化率。磁化率的值确定岩石的感应磁化强度，因此它在关于隐伏构造和岩体或矿体的地质勘探中，对磁力图的解释与推断是有用的。

标准的参量是：

起始磁化率

$$\kappa_0 = \frac{dJ}{dH}\Big|_{H=0} \qquad \text{即 } J = 0$$

可逆磁化率

$$\kappa_{rev} = \frac{\Delta J}{\Delta H}\Big|_{H \pm \delta H}$$

式中：$H = 0$ 或者是 H 小于 0.5Oe。

剩余磁化率在 J_r处，即 $J = J_r$

$$\kappa_r = \frac{\Delta J_r}{\Delta H}\Big|_{\pm \delta H}$$

退磁或形状效应

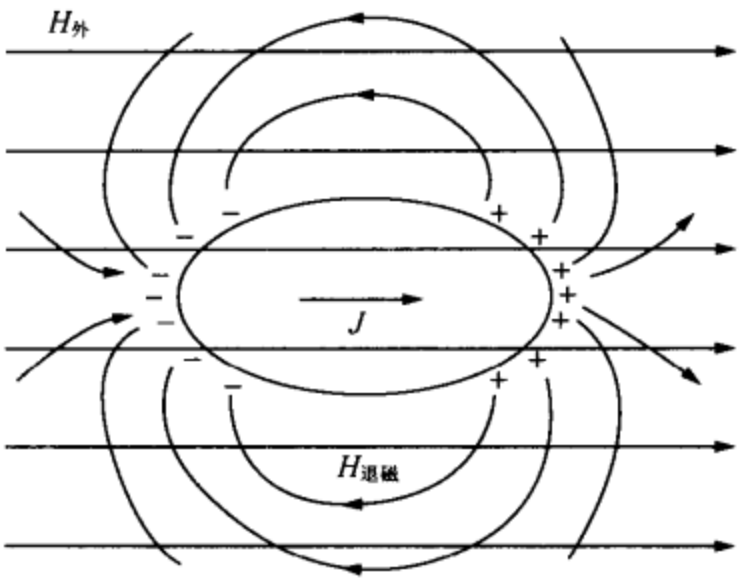


图 2　退磁场的影响

对于一个普通样品的磁滞曲线，在图 1 中有一个用虚线表示的向右上方延伸的斜率。这是由“形状效应”引起的，图 2 可以说明。在磁能状态不受其他因素，例如磁结晶各向异性能支配时，磁化强度往往趋向样品（颗粒、晶体）的最大尺寸（长轴）方向。这使产生与自由磁极有关的静磁能趋于最小值。由自由磁极产生的磁场是一个退磁场 H_{demag}，它与 J 的值成正比。这个磁化强度 J 可以是 J_s（例如，在一个单磁畴颗粒中）或者是某个剩余磁化强度 J_r。因此 $H_{demag} \propto J$，也即 $H_{demag} = NJ$，

N 为退磁系数，它取决于样品的形状。

于是作用于样品的有效磁场为：

$$H_{\text{eff}} = H - H_{\text{demag}} = H - NJ$$

在图 1 中，对于横坐标 H_{ex} 虚线的斜率是 $1/N$。如果将 H_{eff} 绘制到横坐标上，则磁滞回线便会被反“剪切”成直立（逆时针方向），以致倾斜的虚线变成垂直。即退磁效应将从曲线中消去，也就是 $N=0$

均匀的磁化体，其形状效应，导致以下 CGS 单位制的退磁系数关系：

物体形状	参阅图	
球体	3（a）	$N_a + N_b + N_c = 4\pi$

因此，$N_a = 4/3\pi$，并在方向余弦为 α_1，α_2，α_3 的方向上

$$N = N_a\alpha_1^2 + N_b\alpha_2^2 + N_c\alpha_3^2$$

无限长圆柱体	3（b）	$N_a = N_b = 2\pi$
（或长针）		$N_c = 0$
板状体	3（c）	$N_c = 4\pi$
（或圆盘）		$N_a = N_b = 0$

表 2 列举了椭球、圆柱、矩形棱柱体的退磁系数的值，以 $N/4\pi$ 作单位。

颗粒形状，特别是拉长的颗粒或者晶体中的磁区，对其磁性 κ 与 H_c 等有重要影响。

表 2　椭球体、圆柱体与矩形棱柱体的退磁系数（以 $N_a/4\pi$ 表示）

尺度比 a/b^2	椭球体①	圆柱体②	棱柱体③
0.01	0.9845	0.9650	0.9660
0.1	0.8608	0.7967	0.8051
0.2	0.7505	0.6802	0.6942
0.4	0.5882	0.5281	0.5482
1④	0.3944	0.3619	0.3843
2	0.3333	0.3116	0.3333
3	0.1736	0.1819	0.1983
4	0.1087	0.1278	0.1404
6	0.0754	0.0984	0.1085
8	0.0432	0.0673	0.0745
10	0.0284	0.0511	0.0567
100	0.0203	0.0412	0.0457
	0.00043	0.00423	0.00472

①椭球体的尺度 a/b（$a/b<1$ 为扁椭球体，$a=b=c$ 为球体，$a/b>1$ 为长椭球体）；长度为 h 的圆柱体其尺度比是 h/dia（dia 为直径）；长度为 h，宽度为 w 的矩形棱柱体，其尺度比为 h/w。

②根据 Stoner，E. C，1945；和 Osborn，J. A.，1945。椭球体能被均匀磁化，因而有均匀的退磁场。

③根据 Joseph，R. I.，1976，用“磁测方法”测出样品体积空间变化的退磁系数取平均求得的，假定样品为均匀磁化。

④球体（参见椭球栏）$N_a = 4\pi/3 = 0.3333 \cdot 4\pi$。

（2）*磁畴*

为了使磁化颗粒或晶体的磁能减到最小，区域有趋向重新排列或再分成磁化强度取向不同的“磁畴”。每一磁畴都保留饱和磁化强度 J_s。磁畴被畴壁平面区域隔开，在平面区域内，原子磁矩是逐渐偏转的。因此作为磁畴磁化强度矢量和的体磁矩小于 J_s。如果在能量上容许，磁畴完全重新排列，样品能“退磁”到 $J_r=0$。

磁畴的建立、大小、形状、取向以及它的稳定性，均取决于颗粒的大小，形状和机械条件（例如微裂缝的存在，有错位，颗粒边界，无磁性化学，内应力状态）以及温度等物理因素。它们还取决于结晶作用和交换能、磁结晶各向异性以和畴壁能等磁性因素。

有两种类型的畴壁：布洛赫壁与奈耳畴壁。布洛赫畴壁内，原子磁矩的矢量在含有邻畴内矢量的壁平面外旋转，而在奈耳畴壁内的矢量是在该平面内旋转（例如在薄膜内）。在一个布洛赫壁中，磁矢量的方向是按 90°、180°、70.5°或者 109.5°改变，这取决于晶体的各向异性。

图 4 表示了从单磁畴到多磁畴大小不同的颗粒的横截面略图。

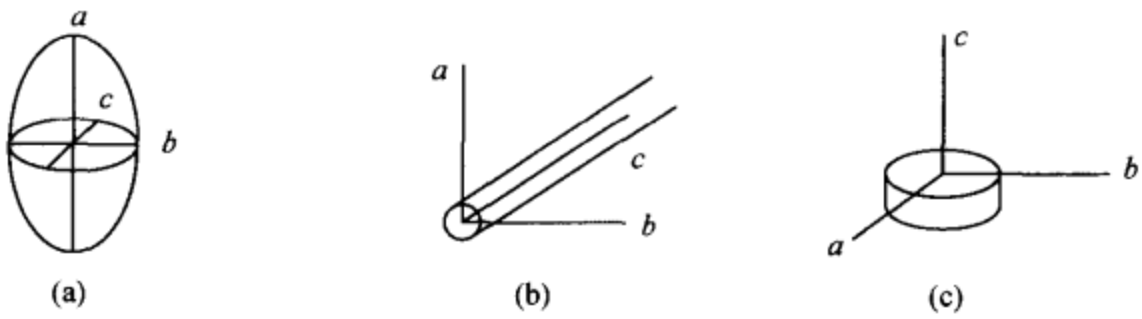


图 3　形状各向异性，为计算 N 用

（a）扁长椭 $a/b>1$；（b）无限长圆柱体；（c）圆盘

表 3 给出了磁铁矿（Fe_3O_4）和铁磁性金属典型的畴壁厚度。

表 3　磁铁矿（Fe_3O_4）和铁磁性材料的畴壁厚度

材料	畴壁类型	注解	畴壁厚度/μm
磁铁矿	180°	典型的	~0.15
		计算的	0.046
		计算的	0.138
		观测的	0.50
铁	180°		0.10
			0.07~0.41
	90°		0.05
	多磁畴计算结果		
		颗粒大小/μm	
		0.02	0.012
		0.04	0.016
		0.06	0.019
		0.10	0.023
镍	180°	典型的	~0.015
	70.5°/109.5°		0.1
			0.206
			0.09-0.11
钴	180°		0.016

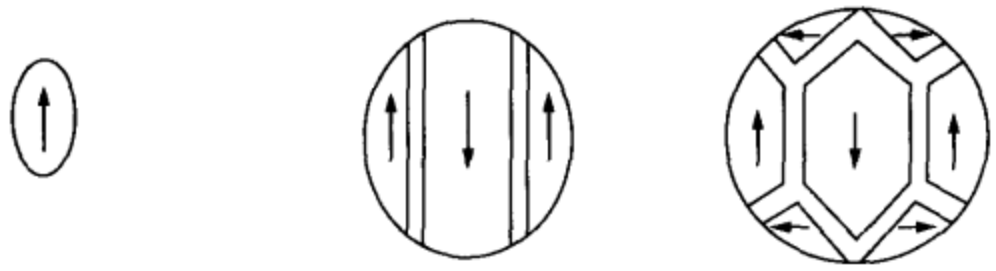


图 4　具有代表性磁畴外形的颗粒大小

（a）单磁畴大小；（b）多磁畴大小单轴的磁各向异性及三次的体各向异性具有闭合磁畴

很小的磁性颗粒不能保持原子磁矩的连贯一致的排列，它们是超顺磁性的。较大的颗粒能适应这种成行排列，具有磁化强度为 J_s 的单个磁畴；它们是“单磁畴”颗粒体，具有特殊的磁性和状态。它们的磁化强度在外加磁场，大的应力或者温度升高的影响下，随 J_s 矢量的旋转或倒转而改变。比“单磁畴临界尺寸”大的颗粒体，有一个以上的磁畴。它们可以有“多磁畴”的性质与状态特点，或者有一个“伪单磁畴”过渡尺寸、其中单磁畴和多磁畴的形态与特征都出现。对于多磁畴状态，磁化强度在外磁场中是靠一些磁畴生长而另一些磁畴消失而改变。这是伴随畴壁的横向运动而完成的。在足够大的磁场中，磁畴内的磁化强度本身可以转动。

（3）粒度效应

晶体中一个磁性颗粒或一个区域的大小，在决定固有磁化强度的性质（例如超顺磁性或铁磁性）以及它的状态（例如多磁畴或单磁畴）方面是很重要的。它影响剩余磁化强度的获得、保持和稳定性，也影响诸如 κ、H_c 和剩磁的强度。表 4 给出了粒度效应对磁性状态——不论是超顺磁性（SPM）、单磁畴（SD）、伪单磁畴（PSD），还是多磁畴（MD）的影响。

表 4　在室温条件下晶粒大小对磁畴状态的影响（晶粒大小以 μm 为单位）

材料	注解	超顺磁性 → 单磁畴 → “伪单”磁畴 → 多磁畴
磁铁矿	理论的；球形颗粒	0.03 ~ 0.1 — 0.03 — 0.05 — 15 ~ 17 —
		0.03
	$L/d \sim 10^a$	3
赤铁矿	理论的；球形颗粒	— 0.03 —— 10 — 0.03　　100 1500
铁		—0.13——0.018——
镍	理论的；球形颗粒	0.5
		0.05
	$L/d \sim 10^a$	0.2

a. L/d 是长度与直径的比。

关于磁铁矿颗粒的形状（横坐标）与粒度（纵坐标）的关系，所得计算的 SPM—SD—MD 的粒度范围示如图 5。形状以 a/b 比值表示（参阅图 3A，$a/b>1$ 与 $c=b$ 为长球体），a/b 的变化范围为 1 ~ 10。单磁畴向多磁畴，能向上延伸到图中的虚线。

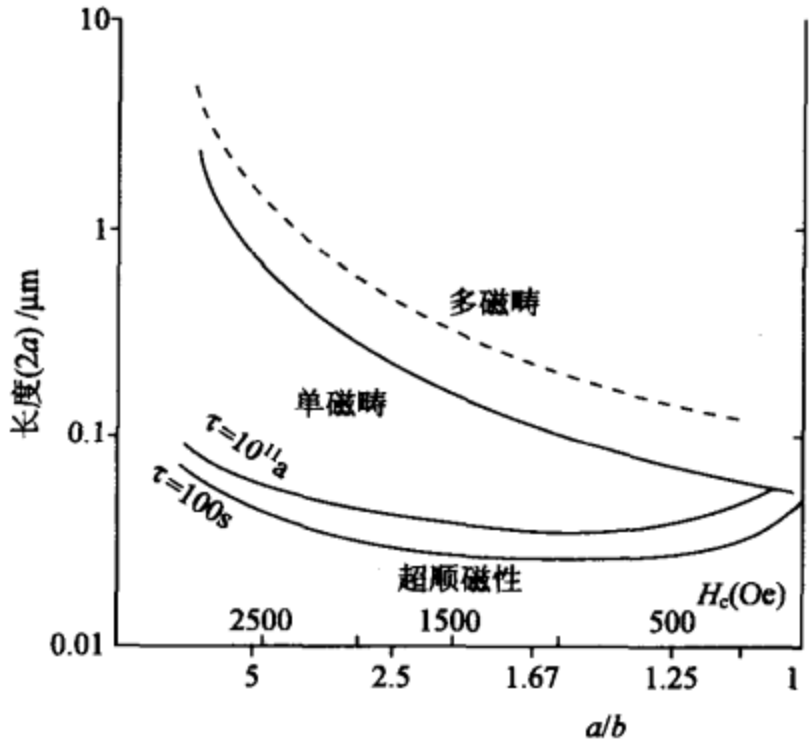


图 5　大小、形状不同的椭球磁铁矿（Fe_3O_4）颗粒的磁畴大小范围，（计算结果）。尺寸（a/b）如图 3（a）所示。矫顽力是根据形状各向异性计算的

图 6 给出了长椭球体从 $a/b=2$ 到 20 范围内 SPM—SD—MD 的分布范围，还给出了三种不同温度条件下，这种分布范围的转变。

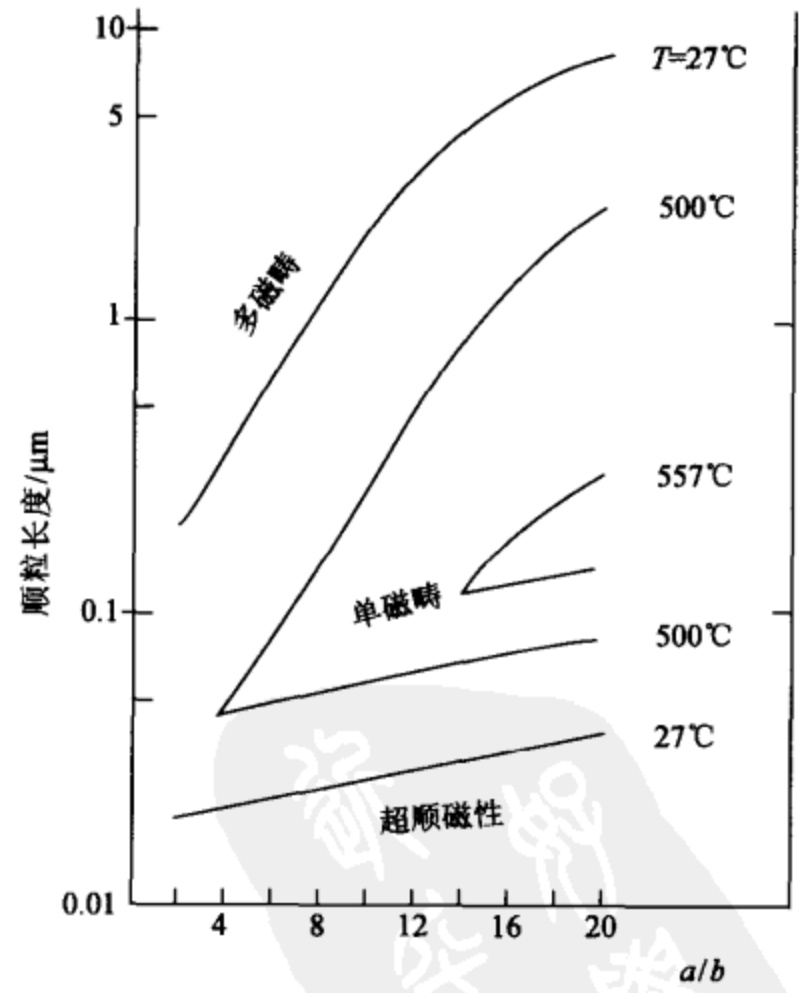


图 6　不同大小和形状的椭球形颗粒的磁畴分布范围。尺度（a/b）如图 3（a）所示

粒度对矫顽力 H_c 的影响用图表说明，根据磁铁矿粉末的测量结果示于表5，根据分散的磁铁矿粉末的测量结果示于图7。直径大（大于70μm）时，矫顽力与粒度的关系不太大，这是因为这时多磁畴排列主要不由粒度决定。磁化率 κ 和矫顽力 H_c 与粒度的一般关系，示于图8。总的来说，这两个参数具有的关系彼此相反。

表5　矫顽力（H_c）随磁磁铁矿粉末粒度的变化

平均粒径/μm	H_c/Oe
80	10
40	20
12	50
4	100
2	200
~0.08	250
~0.05	420

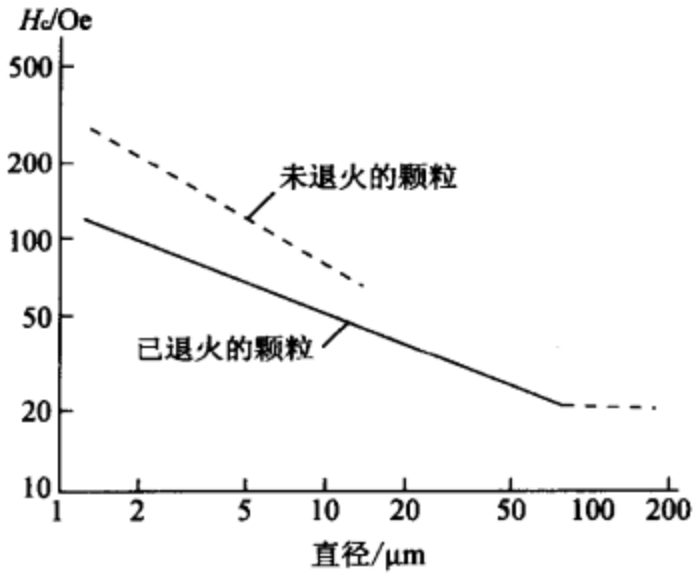


图7　分散性磁铁矿粉末的矫顽力与粒度的变化关系

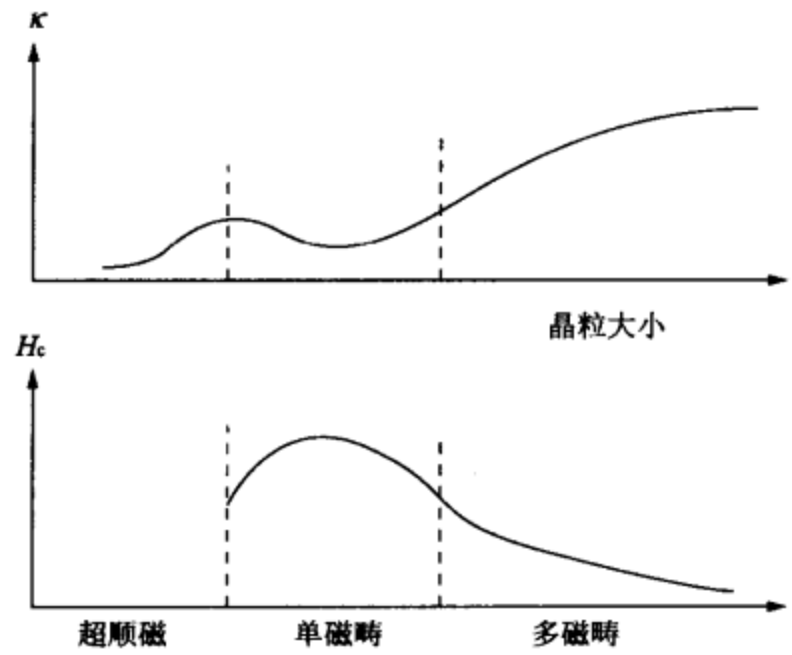


图8　磁化率（κ）和矫顽力（H_c）与粒度的一般关系

（4）磁晶各向异性

所谓磁晶各向异性是指磁化强度（磁矩）有向某一定的结晶方向优先取向的趋势。这是由于晶体的对称性所致。磁晶体具有一种磁性原子排列规则的晶格。

原子磁距之间有相互作用，这与它们在空间的取向以及原子间距有关。有些方向对于磁化排列具有较低的能量。由于这种各向异性，磁矩将趋向于磁晶各向异性能 E_x 为最小的方向，这些方向就是易磁化方向或称易磁化轴。使磁化强度偏离这些方向需要做功。对于一个单轴各向异性晶体，其磁晶各向异性能量 $E_x = K_0 + K_1\sin^2\varphi + K_2\sin^4\varphi + \cdots$ 式中 K_0 = 常数（“各向同性”项），K_1，K_2 = 磁晶各向异性常数，φ = 磁化强度与优先轴（易磁化轴）之间的夹角。这是一个消去了 $\sin\varphi$ 的奇数项，具有绕 $\varphi = 0$ 对称条件的级数展开式。$\varphi = 0°$ 与 180° 都是易磁化方向，两者在能量上是同样有利的。在一个立方晶系的晶体内，

$$E_K = K_0 + K_1(\alpha_1^2\alpha_2^2 + \alpha_2^2\alpha_3^2 + \alpha_3^2\alpha_1^2) + K_2\alpha_1^2\alpha_2^2\alpha_3^2 + \cdots$$

式中 α_s' = 磁化强度矢量相对于立方体各轴的方向余弦。

对于斜方晶系　$E_K = K_0 + K_1\alpha_1^2 + K_2\alpha_2^2 + K_{11}\alpha^4 + K_{12}\alpha_1^2\alpha_2^2 + K_{22}\alpha_2^4 + \cdots$

式中已利用 $\alpha_1^2 + \alpha_2^2 + \alpha_3^2 = 1$ 消去 α_3^2。

磁晶各向异性常数的数值随温度变化，在居里温度时，易磁化方向与难磁化方向之间的能量差别消失。有些物质在较低温度时，磁各向异性项可以互相抵消，趋近于零，或者改变符号。当它们的联合作用是将 E_x 减到零，晶体实际上成为磁各向同性的。过了这一温度，磁化强度优先的取向可以从一个轴或一组轴转换到另外的轴。这叫做磁晶各向异性转变，它发生在 T_K 温度时，而且可在多种物质中发现。

(5) 磁致伸缩各向异性

磁致伸缩现象是样品尺寸和机械形变的变化对它的磁化强度的大小和方向变化的依赖关系。在一个晶体中，原子偶极矩的成行排列引起弹性应变。尺寸上的变化也即应变，取决于磁相干性的程度，也就是磁化的强度 J。弹性形变除改变磁晶各向异性能外，还产生一磁致弹性各向异性能。磁致弹性各向异性能取决于应力（σ）的大小，应力相对于磁化强度矢量的取向以及磁致伸缩常数所反映的晶体对称性质。

对于一个立方晶体，其磁致伸缩各向异性能为

$$E_{\lambda\sigma} = 3/2\lambda_{100}\sigma(\alpha_1^2\beta_1^2 + \alpha_2^2\beta_2^2 + \alpha_3^2\beta_3^2) + 3\lambda_{111}\sigma(\alpha_1^2\alpha_2^2\beta_1\beta_2 + \alpha_2^2\alpha_3^2\beta_2\beta_3 + \alpha_3^2\alpha_1^2\beta_3\beta_1)$$

式中：σ = 应力（压缩应力带正号）；α = 磁化强度矢量 J 的方向余弦；β = 应力 σ 的方向余弦；λ_{110} = 晶体的［110］轴的磁致伸缩常数；λ_{111} = ［111］轴的磁致伸缩常数。

λ 是饱和状态时的常数，就是各个方向上饱和磁场（与 J_s）引起的应变。对于一个微晶无规取向的多晶样品，其总体（平均）饱和磁致伸缩常数用 λ_s 表示。

假如一个晶体受外加压力发生弹性应变，磁化强度和它的各向异性都受到影响，这个过程叫做反向的磁致伸缩，或叫压磁现象。

表 6 列出了某些磁性物质的磁晶各向异性常数 K 与磁致伸缩各向性常数 λ。

表 6　磁晶与磁致伸缩各向异性常数

材料

铁：（室温时的值）

K_1	K_2	λ_{100}	λ_{111}	λ_s
(10^{-5}ergs/cm^3)		(10^{-6}cm/cm)		
4.2	1.5	20	−20	−7

铁磁铁矿：钛尖晶石 − 磁铁矿

$xFe_2TiO_4 \cdot (1-x)\ Fe_3O_4$

（17℃时的值）

		磁晶		磁致伸缩			
	J_s	K_1	K_2	λ_{100}	λ_{111}	λ_{110}	λ_s
X	(emu/g)	(10^{-5}ergs/cm^3)		(10^{-6}cm/cm)			
0	93	−1.36	−0.44	−20	78	60	39

续表

		磁晶			磁致伸缩		
0.04	90	-1.94	-0.18		-6	87	50
0.10	82	-2.50	+0.48		4	96	59
0.18	73	-1.92			47	109	84
0.31	59	-1.81			67	104	89
0.56	29	-0.70			170	92	139
0.68	15	+0.18					

钛铁赤铁矿：钛铁矿

$yFeTiO_3 \cdot (1-y)\ Fe_2O_3$

（室温时的值）

	J_s	λ_{112}①	λ_{111}②	λ_s
y	(emu/g)	(10^{-6}cm/cm)		
0	0.5	8	1.3	8

镍：（室温时的值）

	K_1	K_2	λ_{100}	λ_{111}	λ_s
	(10^{-5}ergs/cm^3)		(10^{-6}cm/cm)		
典型的	-0.48	-0.38			
	-0.51				
	-0.5	-0.42			
	-0.46	-0.36			
			-46	-24	
			-46	-25	-34

①在基面（0001）上。

②正交于（0001）面。

四、磁性矿物学，结晶与磁性

在某些磁性矿物中保留着岩石的磁性。这些矿物及其物理化学状态，控制着剩余磁化和感应磁化的强度和超时的稳定性。就磁法勘探和古地磁而言，对岩石样品的磁性作出正确的地质解释，将取决于对岩石所含矿物的矿物学、结构、磁性与机械性质等方面的知识。

这里给出了重要特性方面有代表性的数值。这些数值是“典型的”。在已公布的数值之间有时存在相当大的差异，这常常是由于所研究的“天然”矿物和岩石条件和成分不同造成的。

1. 岩石磁学方面的重要的矿物

具有磁性或在磁性矿物研究方面有意义的主要矿物是：

（1）铁的氧化物

钛磁铁矿系列：　　钛尖晶石型－磁铁矿

$xFe_2TiO_4 \cdot (1-x)Fe_3O_4$

钛赤铁矿系列：　　钛铁矿－赤铁矿

$yFeTiO_3 \cdot (1-y)Fe_2O_3$

磁赤铁矿　γFe_2O_3

假象赤铁矿　αFe_2O_3

针铁矿　$\alpha FeOOH$　（自然界最常见的含水的氧化铁，即“褐铁矿”$Fe_2O_3 \cdot H_2O$）

纤铁矿　γFe_2O_3

四方纤铁矿　$\beta FeOOH$

（2）硫化物

磁黄铁矿系列：陨硫铁－磁黄铁矿

$$yFeS \cdot (1-y)Fe_{1-x}S$$

黄铁矿　FeS_2

白铁矿　FeS_2

四方硫铁镍矿　FeS

（3）碳酸盐

菱铁矿　$FeCO_3$

菱镁矿　$MgCO_3$

（1）铁的氧化物

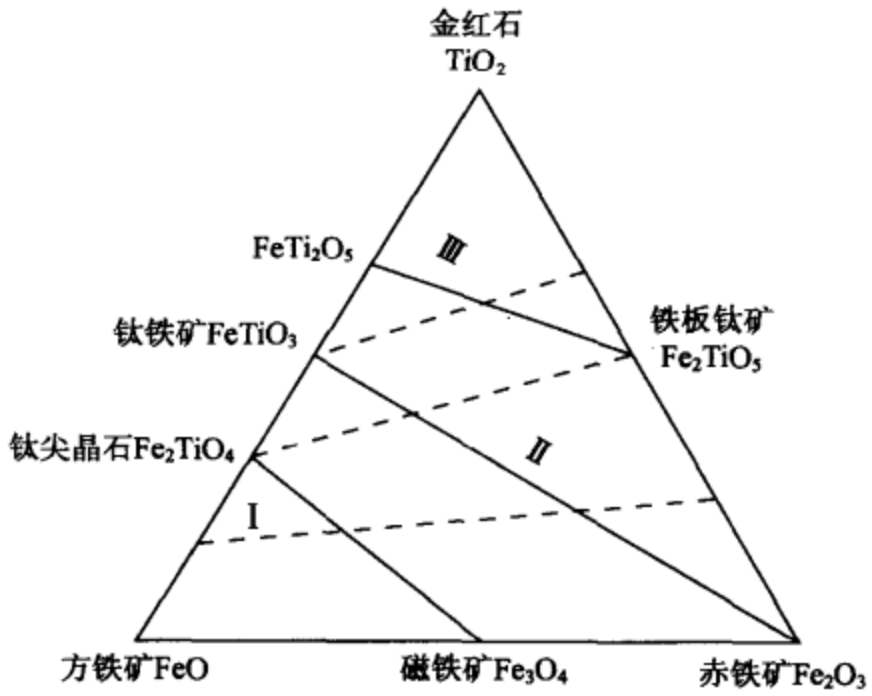


图9　$FeO-TiO_2-Fe_2O_3$ 三元系的成分

固溶体系列是：Ⅰ—钛磁铁矿；Ⅱ—钛赤铁矿；Ⅲ—假板钛铁矿。虚线表示氧化方向

在岩石磁学和古地磁学的研究中，最常见的造岩磁性矿物是铁的氧化物。它们能用图9所示的三元图 $FeO-TiO_2-Fe_2O_3$ 进行描述。有三个基本的固溶体系列：

a. 钛磁铁矿系列——立方晶系结构（反尖晶石型）

钛尖晶石型－磁铁矿

$xFe_2^{2+}Ti^{4+}O_4 \cdot (1-x)Fe^{3+}(Fe^{2+}Fe^{3+})O_4$

b. 钛赤铁矿系列——六方晶系/菱形六面体结构

钛铁矿－赤铁矿

$yFe^{2+}Ti^{4+}O_3 \cdot (1-y)Fe^{3+}O_3$

c. 假板钛铁矿系列——斜方晶系结构

$$zFe_2^{3+}Ti^{4+}O_3 \cdot (1-z)Fe^{2+}Ti_2^{4+}O_3$$

可能的杂质物相是 MnO、MgO、Al_2O_3和 V_2O_3。图 9 中的影区是自然界最有意义的固溶体范围。虚线是 Fe/Ti 比值为常数的线，表示氧化或还原的趋势。氧化作用向右增大。

TiO_2有三种同质多象变体。具有四方晶系结构（c 轴 =0.6Å）的叫金红石，如果四方晶系结构（c 轴 =0.8Å）则叫锐钛矿，而斜方晶系的叫板钛矿。

图是根据分子的比率画出的。例如：

$FeTiO_3 = FeO \cdot TiO_2$

$Fe_2TiO_4 = 2/3FeO \cdot 1/3TiO_2$

$Fe_3O_4 = FeO \cdot Fe_2O_3$

图 10 表示三元系的结晶学结构与磁性类型。在钛铁赤铁矿系列中磁性随成分变化如下：

$y=1$　反铁磁性　（Fe 与 Ti 两者相等地占有全部阳离子层）

$0.45 < y < 0.95$　亚铁磁性（Fe 与 Ti 的有序状态，Ti 离子占有和 c 轴垂直的每一个第二离子层）

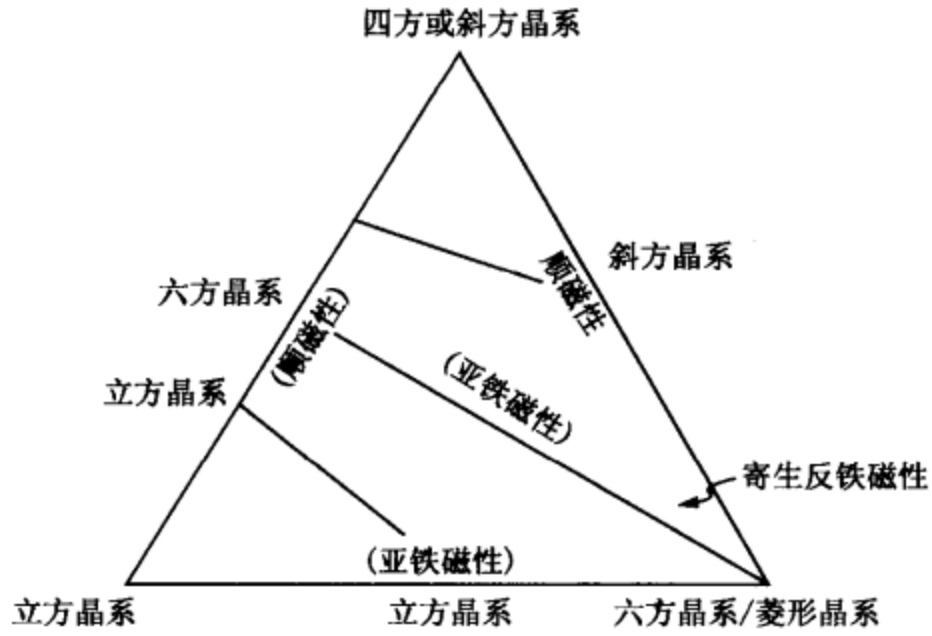


图 10　三元系的结构与磁性
（室温条件下）

$0 < y < 0.45$　反铁磁性
（寄生（自旋-斜交）反铁磁性，Fe 与 Ti 占有全部阳离子层，也就是无序状态）

对于 $0.45 < y < 0.60$，合成样品显示磁化的自反转。

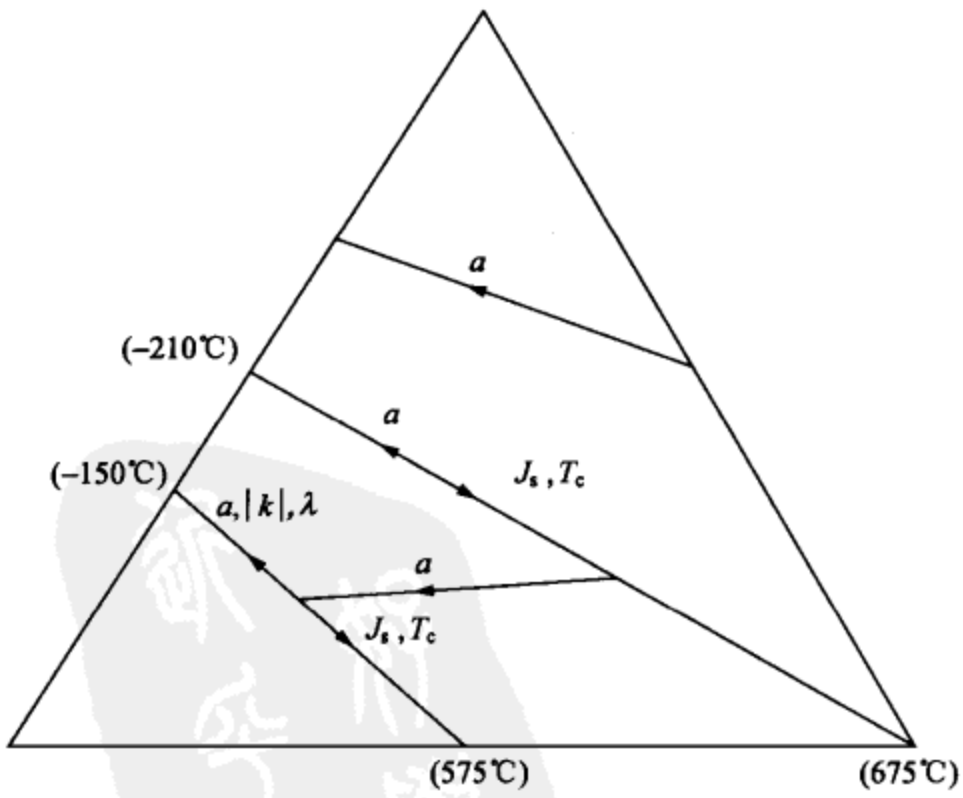


图 11　三元系的磁性参数
“a”是晶胞大小；箭头表示参量增大的方向

矿物的某些磁性特征概括于图 11。系列端员的居里温度以摄氏度表示。它们从一个端员均匀地变化。晶格参量“a”的增大用箭头表示，饱和磁化强度 J_s，磁晶各向异性常数 K 以及磁致伸缩常数 λ 也都同样如此。一个辅助系列是磁铁矿 - 黑锰矿（$1-x$）$Fe_3O_4 \cdot xMn_3O_4$。在 $0 < x < 0.6$ 时，它是立方（晶系）结构。在 $0.6 < x < 1$ 时，它是四方(晶系)。

铁的主要氧化物之间的关系示于图 12。所给的温度是近似的。文献中这种数值差别很大，这与样品状态和实验的条件有关，例如周围环境（空气，真空等）。磁

赤铁矿到赤铁矿的结构转换与压力有关。针铁矿到赤铁矿的结构转换可能发生在沉积物固结期间，例如 $2FeOOH \rightarrow Fe_2O_3 + H_2O$。磁铁矿到赤铁矿的氧化可能发生在火成岩冷却初期，温度大约在 600 ~ 1000℃之间。磁铁矿到磁赤铁矿的转换，可能以低温氧化作用出现时，和冷却后期或风化作用中一样。

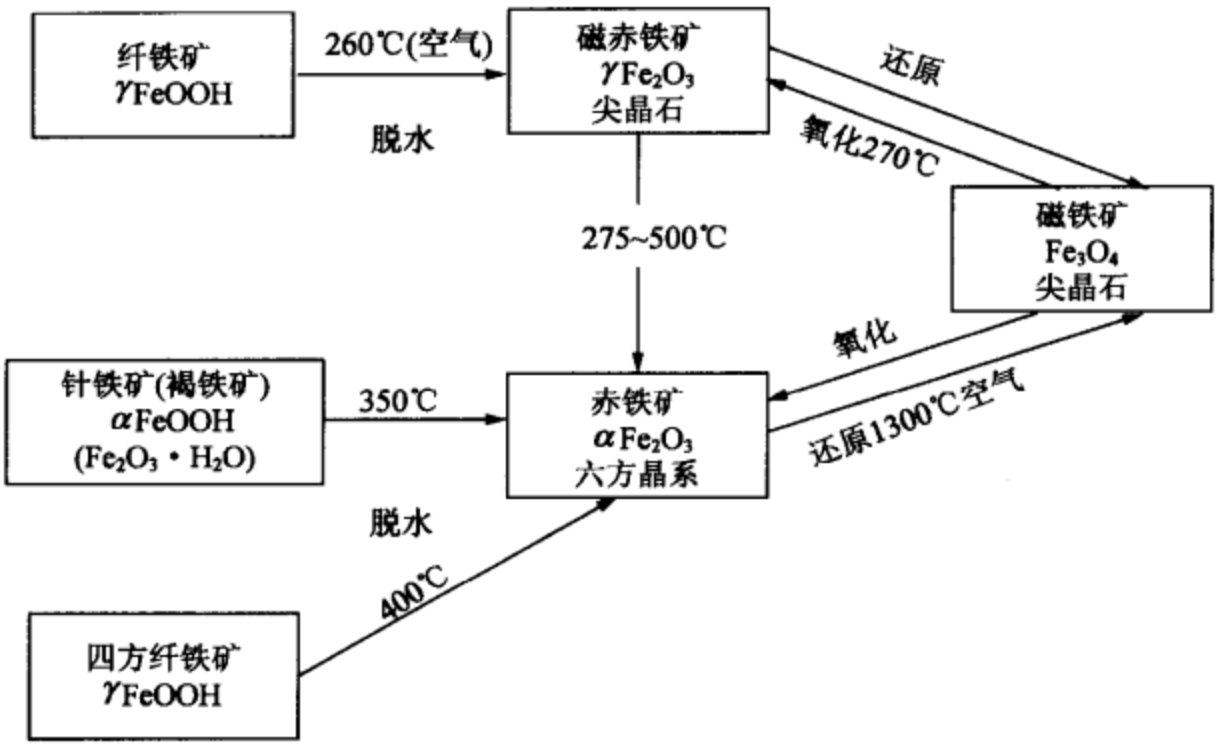


图 12　氧化铁磁性矿物的转换

温度是近似的

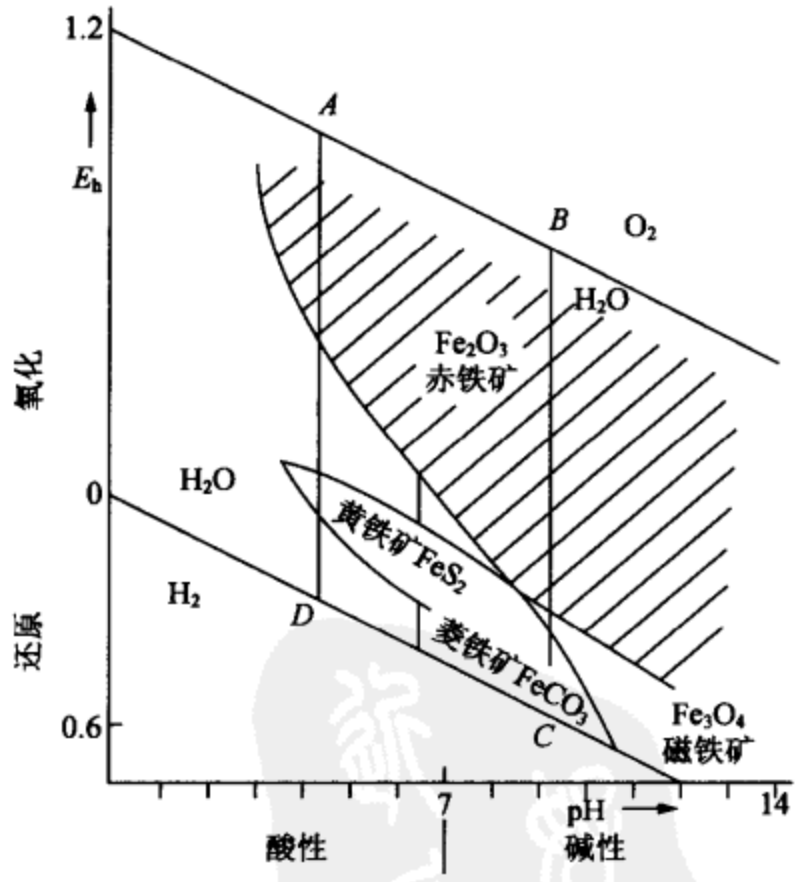


图 13　不同铁矿物的沉淀条件

不同铁矿物的沉淀条件示于图 13。由参量 E_h（伏特）（代表氧化位能）和 E_h（氢离子的浓度）代表酸性度或碱性度，画出了稳定域的轮廓线。稳定域还取决于溶液内组分的浓度（如 Fe）的浓度。*ABCD* 是天然溶液的分布区。图上部的阴影线的范围是 αFe_2O_3 的稳定范围。

现在对主要矿物作简要描述。这些氧化物与氢氧化物可用叠置的，“近乎密堆集”的氧原子层来描述，铁原子为其填隙物。这些铁原子具有的半径不能使其完全吻合地填入氧晶格的适当的位置，而不使氧的晶格变形。所有结构中氧原子面间的距离都大致相同，在 0.23 ~ 0.25nm 范围内。堆垛顺序是“紧密堆集”晶格的特征，不是 $-ab-ab-ab-$（六面体的紧密堆集）类型，就是 $-abc-abc-$（面心六面体）类型。

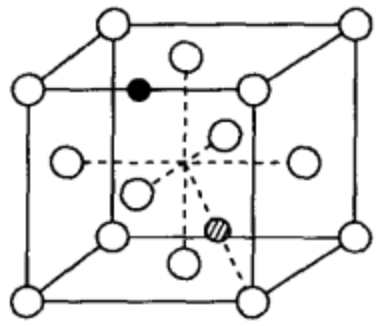
在下文中，Z = 每单位晶胞的化学式单位数；T_K = 磁结晶转变温度；T_C = 居里温度；T_N = 奈耳温度；E = 杨氏弹性系数；G = 剪切弹性系数（刚性系数）。

如不作另外注解，均是室温条件下的数值。

1）磁铁矿

a. 化学分子式：Fe_3O_4；$Z=8$；重量百分比：Fe^{2+}（24.1），Fe^{3+}（48.3），O^{2-}(27.6)。

b. 结构：立方晶系，倒转型尖晶石型结构（见图14）。六方紧密堆集的氧平面以 - abc - abc - 顺序 < 111 > 堆积。普通的尖晶石结构，$A^{+2}B^{+3}O_4^{-2}$，这里A占有一个四面体配位位置而B则占有八面体的配位位置。在单位晶胞内，有32个氧，有64个合适A的位置和32个合适B的位置。“标准的”尖晶石有8个A和8个B的八面体配位位置。阳离子层界于两个邻近的氧平面之间；相继层中的阳离子不是占据单个氧之间的八面体（B）的位置，就是在八面体内占据1/3，在四面体内占据2/3的位置。磁铁矿的反尖晶石结构是 Fe^{3+}（Fe^{2+} Fe^{3+}）O_4^{2-}。被占有的四面体位置，形成金刚石型的晶格。八面体位置有6次配位，四面体有4次配位。氧原子形成面心立方体晶格。在大约低于 -155℃时，反尖晶石结构转变为斜方结构。这种转变对人造磁铁矿晶体而言是突然发生的，但是对于天然晶体，可以展宽约10°。有杂质时使转变温度降低。在高压（大约225～240kbar）下，Fe_3O_4发生相变，变为密度大约为6.4g/cm³的单斜状态。晶胞大小（立方体状态）=9.394Å；｛111｝氧平面之间的距离约为2.9Å；Fe与O之间的距离，八面体位置为2.06Å，四面体位置为1.87Å；O-Fe-O之间的角度，八面体位置为88.1°、90°、91.9°，四面体的位置为109.5°。



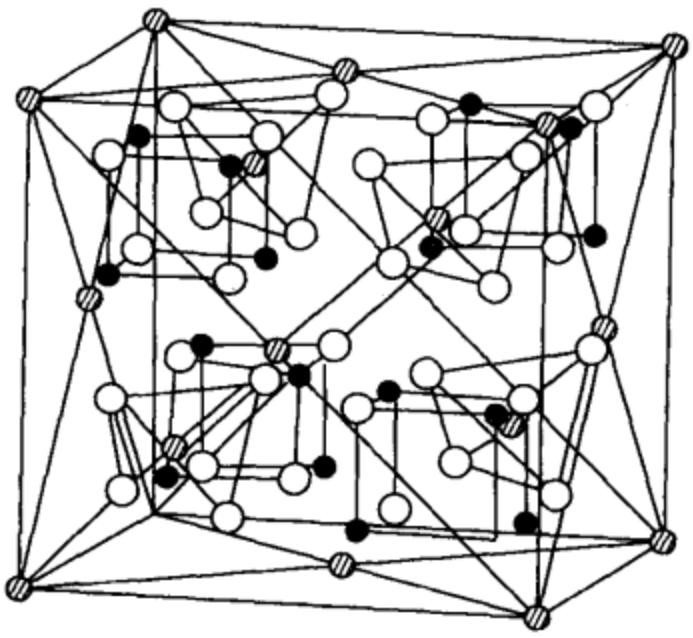


图14 磁铁矿的尖晶石结构上，上图立方体是单位晶胞的1/8

c. 矿物特征：晶体一般是八面体的形式｛111｝，但可以出现如立方的｛100｝或者十二面体的｛110｝形式；双晶和｛111｝在裂理；硬度约为6莫氏级；密度 = 5.1 g/cm³。

d. 磁性：室温状态下为亚铁磁性；饱和磁化强度 J_s 在0°K时约为98emu/g；在室温下约92 emu/g = 480 emu/cm³；临界单畴大小约为0.1～1μm；磁各向异性——磁晶在 T_K = -140℃发生转变。

$T_K < T < T_C$—— 易（磁化）轴 <111>
难（磁化）轴 <100>

-155℃ < $T < T_K$—— 易（磁化）轴 <100>
难（磁化）轴 <111>

$T < -155℃$——　　易（磁化）轴为斜方晶系的“c”轴

$K_1 = 1.35 \times 10^5 \text{ergs/cm}^3$

$K_1 = -0.48 \times 10^5 \text{ergs/cm}$

假如粒度太小（大约小于0.1μm），T_K 转变被抵制；$\lambda_{100} = -20 \times 10^{-6}\text{cm/cm}$；$\lambda_{110} = 60 \times 10^{-6}$；$\lambda_{111} = 78 \times 10^{-6}$；$\lambda_s = 40 \times 10^{-6}$；$T_C = 575℃$；布洛赫畴壁厚度约 50 ~ 150nm，其能量约为 1 ergs/cm^3。

e. 机械的和其他的性质：$E = 1.6 \times 10^6 \text{kg/cm}^2$；$G = 0.5 \times 10^6 \text{kg/cm}^2$；泊松比 $\mu = 0.3$；滑动面 {111}，错位滑动方向为 <110>；最大压缩强度（晶体）=1000 kg/cm^2；电阻率 $\rho = 10^{-3} \sim 10^2 \Omega \cdot \text{m}$（纳入半导体的 $10^{-5} \sim 10^8 \Omega \cdot \text{m}$ 范围内，其他铁氧体一般更不导电。）

2）钛尖晶石

a. 化学分子式：Fe_2TiO_4；质量百分比：Fe^{2+}（50），Ti^{4+}（21.4），O^{2-}(28.6)。

b. 结构：立方晶系，反尖晶石类型（见图 14）。Fe^{2+} 与 Ti^{4+} 交代磁铁矿中的 $2Fe^{3+}$。晶胞大小：$a = 0.8.5\text{nm}$。

c. 矿物特征：在磁铁矿 {100} 面上作为连晶出现；密度约为 4.8 g/cm^3。

d. 磁性：室温下为顺磁性；$T_C \sim -150℃$；低于 T_C 时为弱亚铁磁性（在理论上应是反铁磁性）。

3）磁赤铁矿

a. 化学分子式：γFe_2O_3

b. 结构：赤铁矿（αFe_2O_3）的一种同质多象变体；立方晶系，倒置缺陷尖晶石型结构（见图 14）。除失去 1/9 的阳离子外，与磁铁矿同结构。这些空位，或是在八面体与四面体配位位置上到处任意分布，或是只单独分布在八面体位置上，如 $4Fe_2^{3+}O_3 \rightarrow 3\ [Fe_2^{3+}O \cdot Fe_{5/3}^{3+}O_3]_{1/3}O_3$，其中 □ 表示一个空位。晶胞大小□ = 8.35Å；在 $t = 250 \sim 500℃$ 时，转变成 αFe_2O_3；Fe 与 O 之间的距离，八面体位置为 2.05Å，四面体位置为 1.86Å。

c. 矿物特征：可以形成磁的氧化产物（$3Fe^{2+} \rightarrow 2Fe^{3+}$）或从纤铁矿转变而来（见图 12）。四面体位置不如八面体位置有利于氧化，因为前者是共价结合而后者是离子结合；密度 $= 4.88\text{g/cm}^3$。

d. 磁性：亚铁磁性；$J_s = 83.5\text{emu/g}$（407emu/cm^3）；$T_C = 675 \sim 750℃$（取决于结构状态）。

4）方铁矿

a. 化学分子式：FeO。

b. 结构：立方晶系，NaCl 型结构；叠置的六角紧密堆积氧平面，以 $-abc-abc-$ 序列沿着 <111> 面方向。晶格与两个互相穿插的 f. c. c（立方面心）晶格一样，一个是氧的，另一个是铁的。缺陷结构，缺铁，即 $Fe_{0.83-0.95}O$；晶胞大小：$a = 4.30$Å；Fe 与 O 之间的距离为 2.15Å；O-Fe-O 之间的角度为 90°。

5）赤铁矿

a. 化学分子式：Fe_2O_3；质量百分比：Fe^{2+}（70），O^{2-}（30）；六方晶系的单位晶胞 $Z = 6$；三方晶系的单位晶胞 $Z = 2$。

b. 结构：六方晶系，在方晶系的亚系，三方晶系类（见图 15）。略有畸变的六方紧

密堆积氧平面，以-*ab*-*ab*-*ab*-序列沿着［0001］方向堆垛，刚玉结构。三个氧原子的群，形成两相邻八面体的一个共同面，有一人面平行于｛0001｝。化学计量（理想配比）数的铁原子占有八面体氧平面之间的间隙（6 次配位）。它们形成三方双锥形状的 Fe_2O_3 族。阳离子可占用的位置有 2/3 已被充填，在一近八面体内，铁离子被 6 个氧离子所包围。晶胞大小（参阅图 15）：六方形单位晶胞：$a = 5.035$Å；$b = 13.75$Å；菱形六方单位晶胞：$r_1 = r_2 = r_3 = 2.08$Å，$d_1 = d_2 = d_3 = 1.95$Å；O-Fe-O 之间的角度（角度由所列键线规定）：$r_1r_2 = r_2r_3 = r_1r_3 = 77°$；$r_1d_2 = r_2d_3 = r_3d_1 = 86.1°$；$r_3d_2 = r_2d_1 = r_1d_3 = 90.8°$；$d_1d_2 = d_2d_3 = d_1d_3 = 102.5°$。

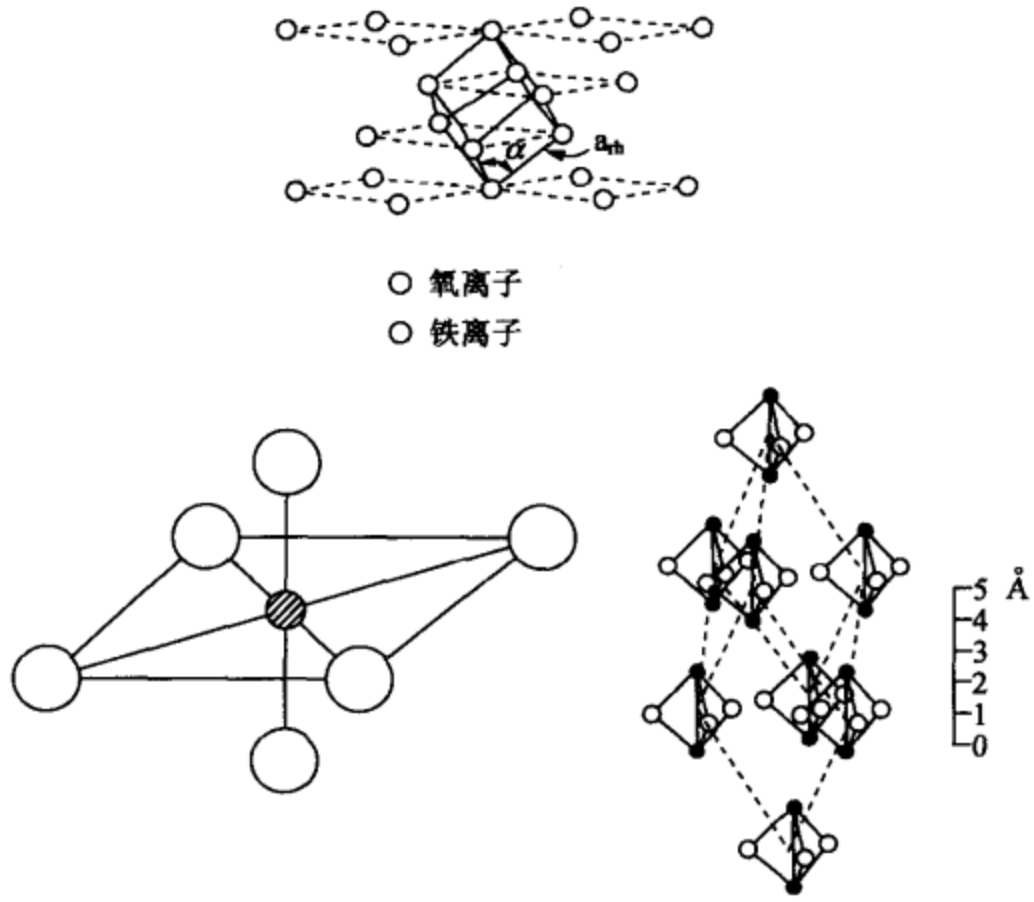


图 15　赤铁矿结构。上图为六方晶系内的菱形六面体；左图为 Fe-O 构造略图

c. 矿物特征：晶体有正菱形六面体｛10 $\bar{1}$1｝，负的菱形六面体｛01 $\bar{1}$2｝或者轴面体｛0001｝的形式；由于双晶在｛0001｝面或者菱形六面体平面｛01 $\bar{1}$2｝上有裂理。双晶依｛0001｝面为穿插双晶，依｛01 $\bar{1}$2｝面通常为片晶，硬度为 5 ~ 6 级；密度 = 5.27 g/cm^3。

d. 磁性：每一层铁都是铁磁性的，但层与层呈反铁磁性耦合，也就是有两个反铁磁性的亚晶格。对反向自旋位形有一系统的偏离，导致弱自旋 - 斜交反铁磁性。磁各向异性：磁晶转换温度 T_K 约为 -23℃（-13℃）-23℃ < T < T_C—（0001）面的原子磁矩。弱铁磁性。菱形六面体单位晶胞的三次轴上的铁原子，具有两个一组的平行自旋方向，指向四面体单位晶胞的“a”轴。易磁化轴是 <1001 >，难磁化轴是［0001］。T < -23℃—原子磁矩沿三次轴指向。完全反铁磁性（无净磁化）。相继的自旋指向相反。易磁化轴是［0001］。颗粒足够小时，转变被抑制。T_C < T < 725℃（T_N）——反铁磁性。有一个牢固的各向同性稳定的磁化强度，它一直保持到 T_N（奈耳点温度）。可能由于晶格缺陷或含杂质伴有不平衡的自旋，而且只在天然的赤铁矿发现有，在合成的赤铁矿中不存在。J_s = 0.45emu/g（2.4emu/cm^3）。随粒度而减小；T_C（弱铁磁性消失）≈675℃；T_N（反铁磁

性消失）$=725℃$。临界的单磁畴大小，约为 $10\sim100\mu m$；$\lambda_{111}=1.3\times10^{-6}cm/cm$（即与（0001）正交）；$\lambda_{112}=8\times10^{-6}cm/cm$（即在（0001）面内）。低于磁晶转变的区域，$\lambda_{111}$ 与 λ_{112} 都变为负值。

e. 机械性质：$E=2\times10^{6}kg/cm^{2}$；$G=0.8\times10^{6}kg/cm^{2}$；泊松比 $\mu=0.27$。

6）钛铁矿

a. 化学分子式：$FeTiO_3$；质量百分比：Fe^{2+}（36.8），Ti^{4+}（31.6），O^{2-}（31.6）；$Z=6$。

b. 结构：六方晶系，三方亚晶系，菱面体组。钛层被磁极性交错的铁层分开。晶胞大小：六方单位晶胞：$a=5.08Å$；$c=14.13Å$；菱面体单位晶胞：$a_m=5.52Å$；$\alpha=54°51'$。

c. 矿物特征：依 $\{0001\}$ 形成双晶，出现 $\{0001\}$，$\{01\bar{1}2\}$ 裂理；硬度 5～6；密度 $=4.78\ g/cm^{3}$；在 Fe_3O_4 八面体 $\{111\}$ 面可以片晶出现。

d. 磁性：室温下为顺磁性；$T_N=-210℃$；$T<T_N$ 时为反铁磁性。

7）假象赤铁矿

a. 化学分子式：αFe_2O_3。

b. 结构：次于磁铁矿的同质多象矿物，有立方尖晶石外形和菱形六面体的内部结构。

铁的氢氧化物

（含水的铁的氧化物族矿物，通常称其为褐铁矿。）

8）针铁矿

a. 化学分子式：$\alpha FeOOH$，或 $2HFeO_2$；$Z=4$。

b. 结构：斜方晶系，对应于赤铁矿。六方紧密堆积氧平面叠置结构，以-*ab*-*ab*-*ab*-序列沿［001］方向。铁原子只占据八面体的位置。向赤铁矿转变（见图 15）。晶胞大小：$a=4.66Å$；$b=9.95Å$；$c=3.02Å$。

c. 磁性：室温下为反铁磁性，由于自旋—斜交或者自旋不均衡，可能有些稳定的剩磁。沿磁轴［001］，铁原子交替自旋的指向。$T_N=120℃$。

9）纤铁矿

a. 化学分子式：$\gamma FeOOH$，或（$FeO\cdot OH$）；$Z=4$。

b. 结构：斜方晶系，氧氢平面堆垛，-*abc*-*abc*-序列沿斜方单位晶胞的 <051> 取向（相当于一畸变立方晶系排列的 <111> 方向）。氧原子的六方堆积在一层内是不规则的。铁原子只占据八面体的位置。第一氢原子都伴随一氧原子，形成一分立的羟基组。晶胞大小：$a=3.06Å$；$b=12.4Å$；$c=3.87Å$。

c. 矿物特征：$\{010\}$ 解理。

10）四方纤铁矿

a. 化学分子式：$\beta FeOOH$，$Z=8$。

b. 结构：四方晶系。

c. T_N 为 $-160\sim20℃$。

（2）*硫化物*

对岩石磁学有意义的主要磁性硫化物都在陨硫铁－磁黄铁矿系列。陨硫铁－磁黄铁矿 $y FeS\cdot(1-y)Fe_{1-x}S$。陨硫铁结构上为 Fe 与 S 原子层交替的六方晶系。具有红砷镍矿

（NiAs）的结构（见图16）。它是反铁磁性的，奈耳温度为320℃ 。四方体形式的FeS叫做四方硫铁镍矿。$x=1/2$ 或为黄铁矿（FeS_2）时，其结构为立方晶系，在室温下晶体为顺磁性。

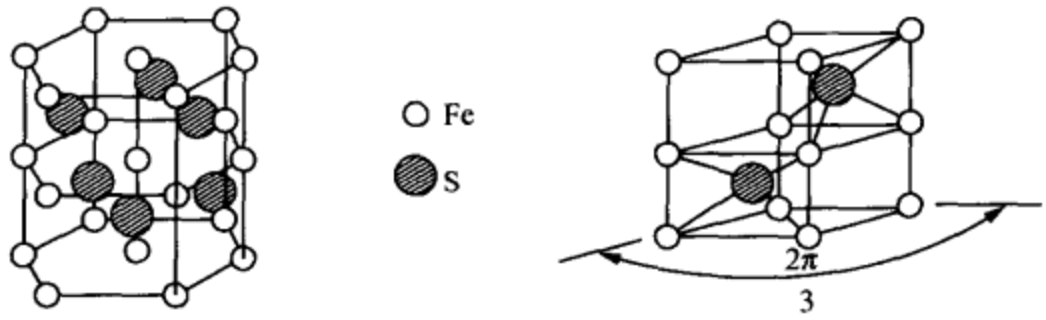


图16　磁黄铁矿的六方晶系（NiAs，红砷镍矿）结构

磁黄铁矿。

a. 化学分子式：$Fe_{1-x}S$，其中 $0<x<0.125$；$Z=2$。

b. 结构：六方晶系，菱面体组。在分子式 $Fe_{1-x}S$ 中，$x=0$ 为六方晶系；$0<x<0.07$ 为单斜晶系。在其为六方晶系时，它具有缺陷的NiAs结构（见图16）。这和FeS有关，Fe^{3+} 替换了 Fe^{2+} 而留下了一些阳离子空位。晶胞大小（$x=0.115$ 时）：$a=3.446$Å；$c=5.848$Å。

c. 矿物特征：晶体通常依 {0001} 呈板状；硬度为3.5～4.5；密度 $=4.6$ g/cm^3。

d. 磁性：$0<x<0.09$ 为反铁磁性；$0.09<x<0.14$ 为亚铁磁性；在单斜相 $J_s=18$emu/g（83emu/cm^3），此 J_s 最大值在 Fe_7S_8 或 $Fe_{0.875}S$（即 $x=0.125$）情况下出现。$T_C=320$℃；难磁化轴为［0001］。

（3）碳酸盐

1）化学分子式：$FeCO_3$，$Z=6$。

2）结构：六方晶系，三方亚晶系菱面体晶组。铁原子位于面心菱面体的点位上，CO_3 群在Fe群的中间。CO_3 群是三角，面状平行于［001］。晶胞大小：$a=4.72$Å；$c=15.46$Å。

3）磁性：反铁磁性：$T_N\approx-230$℃；沿［0001］磁化。

4）矿物特征：晶体通常为菱面体 $\{10\bar{1}1\}$。有时为 $\{01\bar{1}2\}$，$\{02\bar{2}1\}$，$\{40\bar{4}1\}$，或依 {0001} 呈板状；解理 $\{10\bar{1}1\}$；硬度4；密度 $=3.96$ g/cm^3。

磁性矿物和铁磁物的磁性随温度的变化示于表7。

表7　磁性矿物和铁磁物质的磁性与温度的变化关系

铁磁性矿物名称	T_K/℃	T_C/℃	易磁化轴与难磁化轴	
			T_K 以下温度	T_K-T_C 温度
磁铁矿（Fe_3O_4）	-140	575	易“C”或易<100>难<111>	易<100>难<111>，铁氧体磁性
赤铁矿（αFe_2O_3）	-23	675，725	易［0001］反铁磁性	易<1010>难<0001>，自旋-斜交（反）铁磁性
镍（Ni）	200	360	易<111>难<100>，铁磁性	易<100>
铁（Fe）		770	T_C 以下，易<100>难<111>，铁磁性	
磁黄铁矿（$Fe_{1-x}S$）		320	T_C 以下，难［0001］，难［0001］，亚铁磁性（$x=0.125$）	
陨硫铁（FeS）		$T_N=320$	T_N 以下，难［0001］，反铁磁性	

注：译者据原文改变。

五、磁　性

1. 饱和磁化强度、居里温度、奈尔温度与晶胞大小

表 8　磁性矿物，岩石和金属的 J_s 与 T_C/T_N

材　料	成　分	注　解①	密　度 $g \cdot cm^{-3}$②	T_C，T_N（℃）③	J_s	
					(emu/cm^3)	(emu/g)
矿物						
磁铁矿	Fe_3O_4	亚铁磁性的				
			（纯）5.18			
			（天然）5～5.4			
				578	480④	92.3（24℃）
					510④	98.2（0°K）
					471	
				580		
				575	480	
		0.6Ti			410～430	
		0.06%Ti			480～500	
	钛磁铁矿	$x=0.55$		210		
针尖晶石	Fe_2TiO_4	反铁磁性	4.8	-153		
磁赤铁矿	γFe_2O_3	亚铁磁性	4.88	675°	407④	83.5（24℃）
					417	
					545～675℃	
					750	
赤铁矿	αFe_2O_3	自旋-斜交（反）铁磁性或亚铁磁性				
			5.26	675	2.6	0.5（24℃）
				670	2.1	0.39（24℃）
		（合成物）		680	2.6	0.5
				680	2.2	0.42
		“缺陷”寄生反铁磁性		725		
		系列内最强的亚铁磁性		～10		19.5
钛铁矿	$FeTiO_3$	反铁磁性	4.72	-205		～0
				-216		
方铁矿	FeO	反铁磁性		-87		
				-83		
针铁矿	$\alpha FeOOH$	反铁磁性	4.27	120		
四方纤铁矿	$\beta FeOOH$	反铁磁性		-196～23		
镁铁矿	$MgFe_2O_4$	亚铁磁性⑦	4.18			24.5
				310	110	
					110	23

续表

材　料	成　分	注　解①	密　度 g·cm⁻³②	T_C，T_N（℃）③	J_s	
					(emu/cm³)	(emu/g)
				440	110 140	25 29（0°K）
锰尖晶石	$MnFe_2O_4$	亚铁磁性⑦	4.95	300	416 400 408 560	84 81 112（0°K）
铬铁矿	$FeCr_2O_4$	亚铁磁性⑦	4.5～5.1	-185		
镍磁铁矿	$NiFe_2O_4$	亚铁磁性⑦	5.35	5.85	270 300 267	51 56（0°K）
锌铁尖晶石	$ZnFe_2O_4$	亚铁磁性⑦	5.1～5.3	-258 -264		
铁橄榄石	Fe_2SiO_4	反铁磁性		-147		
辉石	Fe_2SiO_3	反铁磁性		-233		
磁黄铁矿	$Fe_{1-x}S$	亚铁磁性	4.6	300～325 320 300	62 90④	13.5④ 19.5，max，在 Fe_7S_8 状态
陨硫铁	FeS	反铁磁性	4.83	320 340		
软锰矿	MnO_2	反铁磁性	5.06	189		
二氧化铬	CrO_2	亚铁磁性		119	515	
菱铁矿	$FeCO_3$	反铁磁性	3.96	-233		
菱锰矿	$MnCO_3$	反铁磁性	3.70	-243		
金属						
铁	Fe	铁磁性	7.87	770	1714 1760	218 224（0°K）
镍	Ni	铁磁性	8.9	358 360 370	 485 510	 54 57（0°K）
钴	Co	铁磁性	8.85	1120	1420	160
高磁导率金属					1445	163（0°K）
4%硅铁				690		
45 坡莫合金				440		
μ合金				400		

续表

材　料	成　分	注　解①	密　度 g·cm⁻³②	T_C，T_N（℃）③	J_s (emu/cm³)	J_s (emu/g)
超导合金				400		
2V 波明德合金				980		
岩石						
砂岩		红色；英国；12 个采样点三叠系和泥盆系			$(0.2 \sim 1.2) \times 10^{-2}$	
玄武岩		钛磁铁矿 $x=0.6$		200～400		
磁铁矿矿石		磁石（Fe_3O_4）				50～80
月岩						
土壤		8 个样品				0.9～1.5
角砾岩		16 个样口 斜长角砾岩		765		0.05～2 0.145
斜长岩	2 个样品					0.7～2.6
玄武岩		10 个样品 3 个样品		760		0.2～2.2 0.1～2 0.1～3（0°K）
辉长岩		2 个样品				0.2～0.7
火成岩				760－790		
细粒角砾岩				745～790		
4Fe 陨石（即 Ni-Fe）				680～780		

①是在低于 T_C 或 T_N 温度条件下的磁性状态；超过该温度时呈顺磁性。

②用来将 emu/cm³ 变换为 emu/g 单位或相反。

③T_C 为居里温度，用于亚铁磁性或铁磁性材料；T_N 为奈尔温度，用于反铁磁性材料。

④据另外的 J_s 单位计算的。

⑤可能已变成赤铁矿。

⑥存在于天然样品中，由于晶格欠完美的影响。

⑦尖晶石结构，即 $A^{+2}B_2^{+3}O_4$。

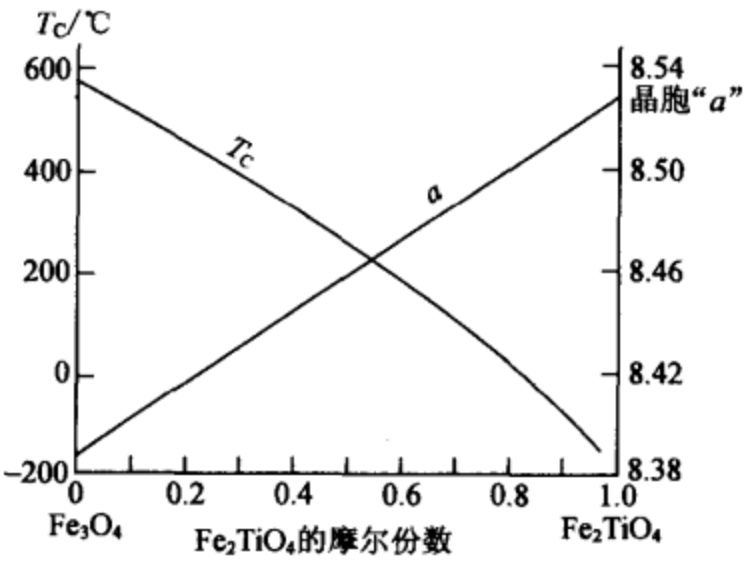


图 17　钛磁铁矿系列中居里温度 T_C 与晶体参数"a"的变化关系

J_s、T_C 及晶胞大小的变化与化学成分的关系。

钛磁铁矿系列是钛尖晶石—磁铁矿 $x\,Fe_2TiO_4 \cdot (1-x)\,Fe_3O_4$。图 17 示出居里温度（$T_C$）和晶胞大小（立方晶格参数，即单位晶胞大小"a"）随这个系列中"x"的变化关系。

钛磁铁矿的关系说明如下：

晶胞大小 $a = 8.395 + 0.135x$ Å

即 $a = 8.395$ Å——磁铁矿（$x=0$）

$a = 8.53$ Å——针尖晶石（$x=1$）

居里温度　　$T_C = 575 - 725x + 600x(1/2 - x)(1 - x)$℃

$T_C = 575$℃——磁铁矿

$T_C = -150$℃——针尖晶石

用 $FeO - TiO_2 - Fe_2O_3$ 三元系图（图 18）说明了在意义的成分范围内，居里温度（T_C）和晶胞大小“a”的变化关系。

钛磁铁矿系列在室温下，饱和磁化强度的变化由 $J_s = 92(1 - x) - 42x(1 - x)$ emu/g 给出，即磁铁矿的 $J_s = 92$emu/g，针尖晶石的 $J_s = 0$。

表 8 示出了在钛磁铁矿系列中，J_s 随成分变化有代表性实验测定结果。

钛赤铁矿系列是钛铁矿—赤铁矿 $yFeTiO_3 \cdot (1 - y)Fe_2O_3$。

图 19 表示出在该系列中 T_C 和晶胞大小 a_{rh} 与系列中的“y”的变化关系。其关系可表示为居里温度 $T_C = 680 \sim 890y$℃，即：（$y = 0$），$T_C = 680$℃，对于钛铁矿（$y = 1$），$T_C = -210$℃。J_s 随成分“y”的变化值列在表 9 中。

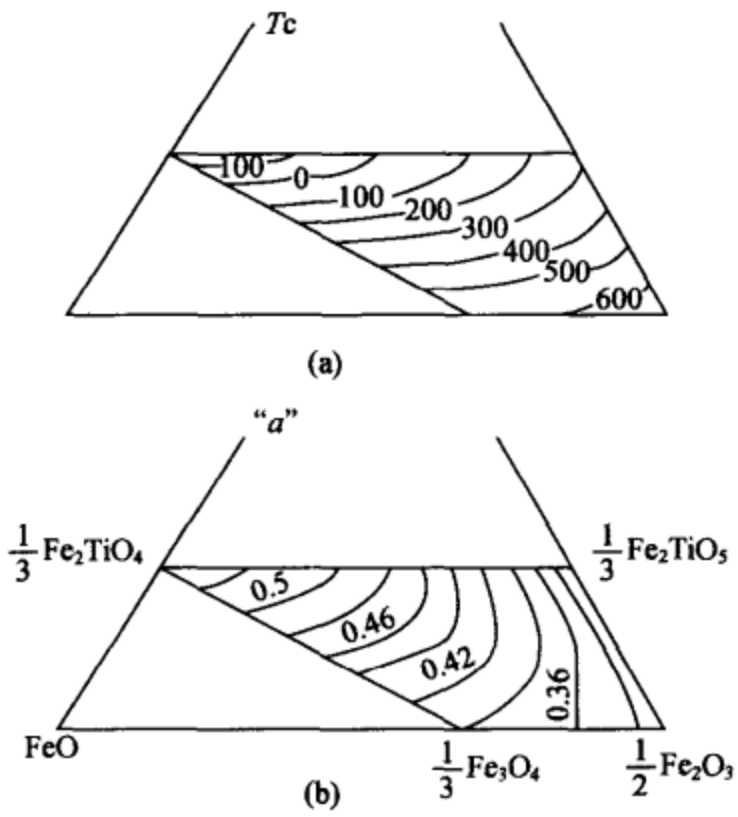


图 18　$FeO\text{-}TiO_2\text{-}Fe_2O_3$ 三元系图中，居里温度（T_C）和晶胞大小“a”的变化关系

图（A）中，T_C 以℃为单位；

图（B）中，“a”以 Å 为单位

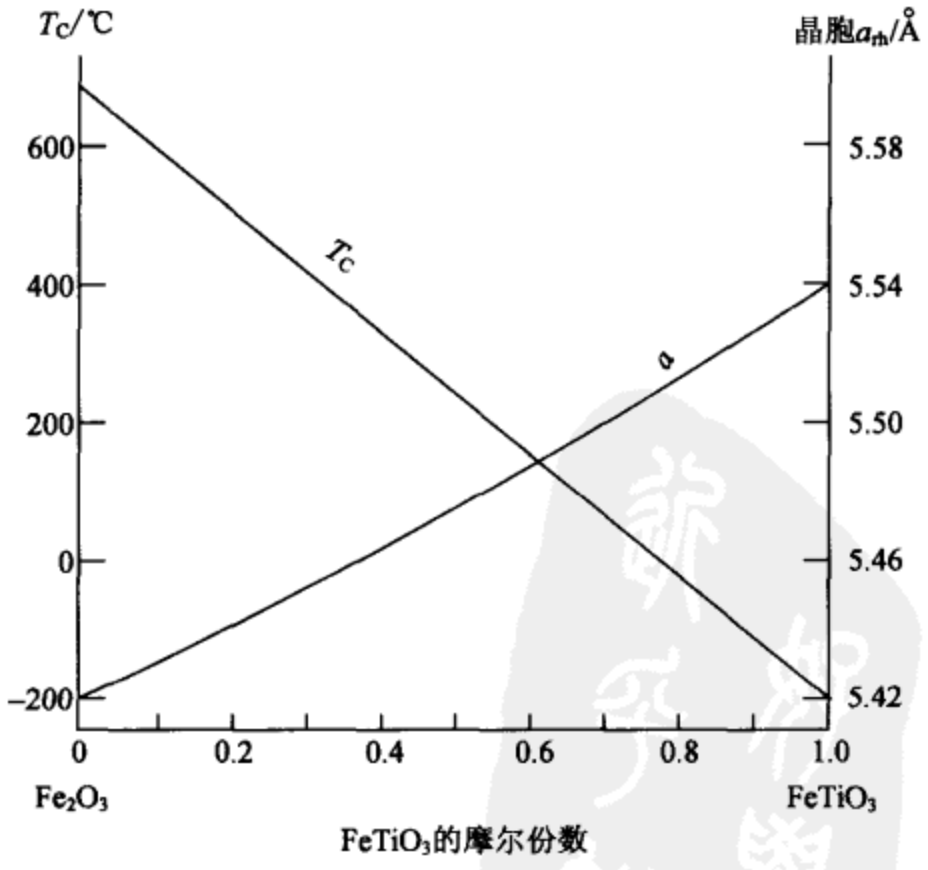


图 19　在钛赤铁矿系列中，T_C 和菱形六面体晶胞大小“a_{rh}”的变化关系

表 9　在钛磁铁矿的钛赤铁矿系列中 J_s 随成分的变化关系

钛磁铁矿 $x\ Fe_2TiO_4 \cdot (1-x)\ Fe_3O_4$		钛赤铁矿 $\gamma FeTiO_3 \cdot (1-x)\ Fe_2O_3$	
x	J_s/（emu/g）	y	J_s/（emu/g）
0	93	0	0.5①
0.04	90	0.25	0.6①
0.10	82	0.45	0.6①
0.18	73	0.5	2.9②
0.31	59	0.6	9.2②
0.56	29	0.7	17.4②
0.68	15	0.75	19.5②
		0.8	18.2②④
		0.9	5.3②④
		0.95	1.6②④
		1.0	0③④

①自旋-斜交（反）铁磁性。

②亚铁磁性。

③反铁磁性。

④当 $x>0.75$，T_C 低于室温，因此此物质在室温下为顺磁性。

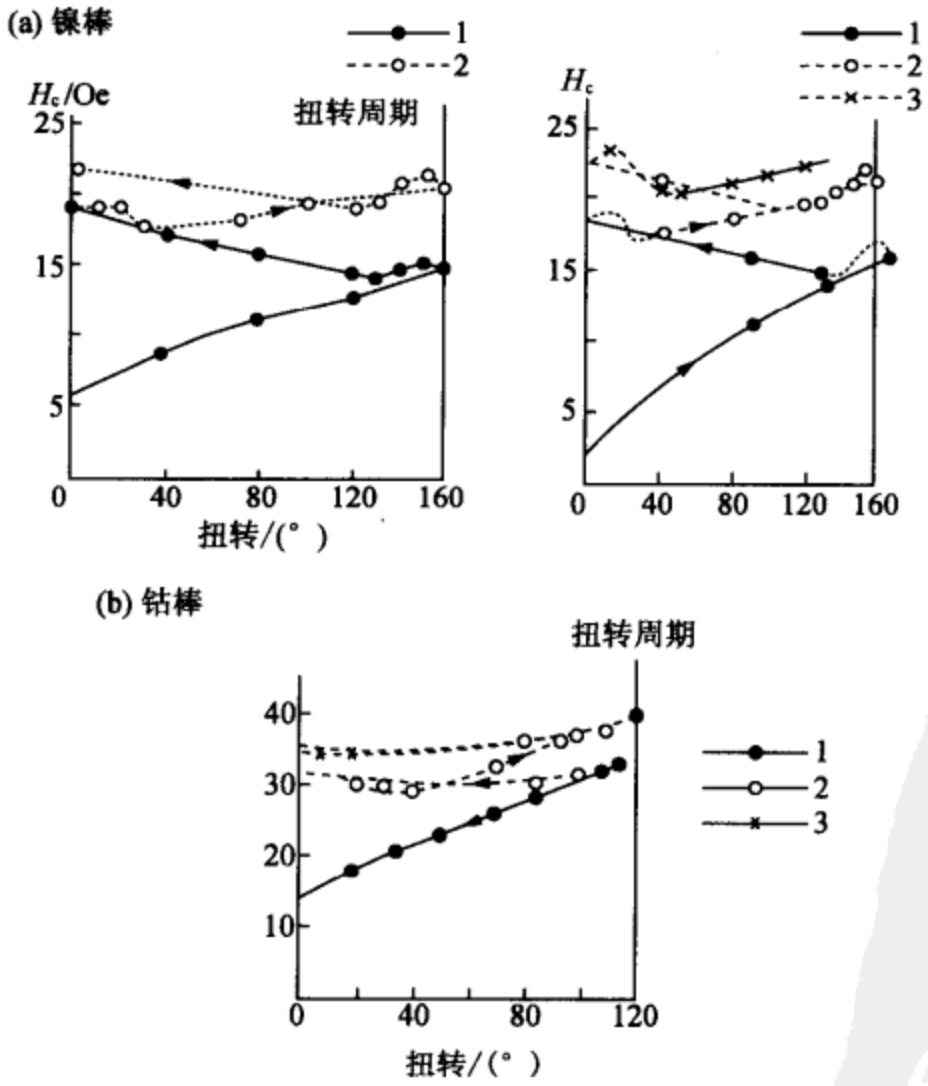


图 20　矫顽力 H_c 与镍（图 a）和钴（图 b）形变的变化关系

棒循环地变形，矫顽磁力 H_c 反映机械硬度和内部应力

2. 矫顽力

表 10 列举了磁性矿物，岩石，月球物质和铁磁性金属的矫顽力数值。这些数值均有代表性，但矫顽力是变化范围很宽的一种参数，取决于样品的粒度和形状，磁晶各向异性和机械状态。矫顽力通常反映机械硬度，退过火或重结晶的物质的矫顽力低，随变形的程度（例如冷处理、塑性变形）增大。这可以有在室温与压力的条件下能变形的铁磁性金属来说明。镍和钴的矫顽力随循环（疲劳）变形的变化，示于图 20。机械硬度（例如屈服点应力）的变化，由矫顽力的变化，得到可靠的反映。金属棒处于初始退火状态。形变刚好反向，H_c（与硬度）减小，反映了包辛格效应（疲劳软化），随着形变的继续，又重新

硬化。发现塑形或疲劳（反向）变形的岩石也有类似的特点。

表 11 列举了一些高磁导率和高矫顽力（永磁体）材料和矫顽力，饱和通量密度和最大磁导率的数值。

表 10　矿物、岩石和铁磁体的矫顽力数据

材　料	注　解	H_E/Oe，$J_{r,sat}$①
矿物		
磁铁矿	纯 J_r = 92emu/g（24℃） 纯　单晶体	20 10 ~ 25
赤铁矿	纯 J_r = 0.5emu/g（24℃） 合成物　J_r = 0.39emu/g（24℃）	7600 430
磁黄铁矿	纯	15 ~ 20
岩石		
磁铁矿矿石	磁石，<1% TiO_2，J_r = 60 ~ 70emu/gm； $H_{c,Jn}$ = 100 ~ 300Oe	300 ~ 900
砂岩	红色，英国，12 个采样点 有代表性的	2500 ~ 6000 3000 ~ 7000
玄武岩		70 ~ 300
	新澳大利亚，7 个采样点	160 ~ 225
月球岩石		
土壤	8 个样品	20 ~ 35
角砾岩	16 个样品	15 ~ 120
辉长岩	2 个样品、(4° K)	10 30 ~ 87
斜长岩	2 个样品	8 ~ 15
玄武岩	6 个样品 4 个样品、(4° K)	8 ~ 20 8 ~ 45 21 ~ 100
陨石		
铁陨石（即 Ni - Fe）		0.5 ~ 1
石铁陨石		0.7 ~ 10
金属		
铁	退火处理	0.1 ~ 2
镍	退火处理	0.5 ~ 3
	冷处理 冷处理	15 ~ 25 36
钴	退火处理 冷处理	5 ~ 20 30 ~ 90

①使饱和 IRM（$J_{r,sat}$）降到零所需要的磁场，有时称为剩余矫顽磁场 H_{rc}，以区别于使剩余磁化强度降为零时所需要的磁场 H_{re}。

表 11　高低矫顽力的磁性金属的磁性

材　料	注　解	H_c/Oe	饱和磁通量密度 B/Gs	最大磁导率值（Gs/Oe）
高磁导率材料				
钢	冷轧，98.5% Fe	1.8	21000	2000
铁	99.91% Fe	1.0	21500	5000
4% 硅－铁	96% Fe	0.5	19700	7000
45 坡莫合金	54.7% Fe，45Ni，0.3Mn	0.07	16000	50000
μ 合金	18% Fe，75% Ni，2% Cr，5% Cu	0.05	6500	100000
超导磁合金	15.7% Fe，79% Ni，5% Mo，0.3% Mn	0.002	8000	800000
2V 波明德合金	49% Fe，49% Co，2% V	2	24000	4500
		H_c/Oe	剩余感应磁通密度 Br/Gs	
永磁体材料				
碳钢	98.1% Fe，1% Mn，0.9% C	50	10.000	
钴钢	71.75% Fe，17% Co，0.75% C，2.5% Cr，8% W	150	9500	
铝镍钴磁钢 I	63% Fe，12% Al，20% Ni，5% Co	440	7200	
铝镍钴磁钢Ⅳ	55% Fe，12% Al，28% Ni，5% Co	700	5500	
铝镍钴磁钢Ⅵ	49% Fe，8% Al，15% Ni，24% Co，3% Cu，1% Ti	750	10000	
钴铁氧体	3% Fe_2O_3，44% Fe_3O_4，26% Co_2O_3	1000	1600	
铂－钴	77% pt，23% Co	3600	5900	

3. 磁化率

在研究岩石时，磁化率是鉴别和解释岩石有重要作用的参数。不管是在实验室内，还是间接地研究磁场以推断隐伏岩体的结构与岩性特征，都是如此。然而样品的磁化率变化范围大，与多种因素有关。如磁性矿物学，粒度与形状，外部磁场的大小，以及所含剩余磁化强度的相对大小。大体上 κ 值随粒度（在多磁畴范围时）和饱和磁化强度 J_s 的大小的增大而增大，反之所含剩余磁化强度（J_r）、温度以及矫顽力（H_c）的增大而减小。测量技术也可能引入变化范围大的数值（见“磁化”：类型与参数那一节）取决于所测量的是起始磁化率 κ_0（在 $H=0$，$J_r=0$ 时），还是在 $H=H_E=0.5$Oe 时测得的某些磁化率的数值。此外，假如使用动态（交变场）方法测量，测得的 κ 值还与所用的频率有关。最好是使用足够的频率，以便使样品的电导率响应可忽略不计。对于磁铁矿，频率最好小于 2000Hz。

某些重要的磁化率为：

1）κ_m——磁性材料的真磁化率。

2）κ_m——有效磁化率，取决于样品的形状或样品组成颗粒的形状（即取决于退磁系数 N）。

3）κ_{app}——视磁化率，当样品既有剩余磁化又有感应磁化时的测得的值。

受弱外磁场 H_{ex}，如地磁场 H_E 感应的磁化强度，与外磁场成正比关系，如同 $J_i \propto \kappa H_{ex}$，即 $J_i = \kappa H_{ex}$。

对于一磁性物质，考虑了其形状（退磁）效应，其感应磁化强度 J_i 为：

$$J_i = \frac{\kappa_m \cdot H_{ex}}{1 + N\kappa_m}$$

式中：κ_m = 磁性矿物的磁化率（即所含有磁性物质的真磁化率）。

若岩石或材料有一个体积百分数“V”的磁性材料，$J_{i岩石} = V \cdot J_i$，式中 $0 < V < 1.0$。于是实测的磁化率应当是

$$\kappa = \frac{J}{H_{ex}} = VJ_i/H_{ex} = \frac{V \cdot \kappa_m}{1 + N\kappa_m} = V\kappa'$$

对于一均匀磁化的球形颗粒，$N = 4\pi/3$（CGS 单位），因此有效磁化率为

$$\kappa' = \frac{\kappa_m}{1 + N\kappa_m} = \frac{\kappa_m}{1 + 4.2\kappa_m}$$

因此有效磁化率化为“真”磁化率（全部都是磁性矿物）需乘上一个因数 $1/(1 + N\kappa)$。

表 12 给出了浸染的球形颗粒有效磁化率 κ' 的计算值，并与矿物的真磁化率 κ_m 相比较。

表 12　浸染状磁铁矿球形颗粒的有效磁化率的计算值与真（矿物）磁化率的比较

矿物磁化率　κ_m/（emu · cm^{-3}）	有效磁化率　κ'/（emu · cm^{-3}）
0.01	0.0096
0.1	0.0705
1.0	0.193
5	0.228
10	0.233
100	0.238
∞	0.239

球形颗粒的退磁系数 $N = \frac{4}{3}\pi$。

对于细长的颗粒，N 比较小，所以其有效磁化率与矿物真磁化率相比减少并不是太多。与 1 ~ 2.5 emu/cm^3 的磁铁矿的真磁化率 κ_m 相比，浸染状磁铁矿颗粒的有效磁化率大约为 0.25（而球形颗粒约为 0.2）。

大多数岩石的主要磁性成分为磁铁矿，于是其有效磁化率为：

0.2 ~ 0.25 emu/cm^3 = （200000 ~ 250000）$\times 10^{-6}$ emu/cm^3。

实测磁化率：含 1% 磁铁矿时，应为

$\kappa = V \cdot \kappa' = 0.01 \times 0.25 = 0.0025$emu/cm^3 $= 2500 \times 10^{-6}$emu/cm^3，含 10% 磁铁矿时，$\kappa = 0.1 \times 0.25 = 25000 \times 10^{-6}$emu/cm^3，其感应磁化强度总是使用一磁化率值，即 $J_i = \kappa \cdot H_{ex}$。

表 13a 列出实测的一些岩石的有效磁化率。