

岩石的磁记录

岩石形成时能够记录当时地磁场信息,并能将这份磁记忆保存上百万年甚至数十亿年之久.古地磁学就是一门利用岩石的磁记忆来研究地磁场演化和板块构造运动的科学.早在1899年,Giuseppe Folgheraiter发现不同时代的陶器记录的地磁场方向相差超过 60° ,开始尝试测定古地磁场强度.到20世纪50年代,科学家认识到岩石记录的地磁场方向的明显变化是由于板块的水平运动造成的,从而证实了Alfred Wegener的大陆漂移猜想,开启了地学界的革命——板块构造学说.

Thellier 古地磁场强度测定方法

岩石在磁场中冷却时能获得热剩磁(TRM).在某一温度区间(如 $300\text{--}200^\circ\text{C}$)获得的热剩磁通常称为部分热剩磁(pTRM).Thellier夫妇(Émile Thellier和Odette Thellier)完善了Giuseppe Folgheraiter的古地磁场强度(以下简称古强度)测定方法,获得了对TRM特征的基本认识.目前普遍采用的Thellier古强度测定方法是:利用岩石或考古材料样品分别在零场和实验室外场中加热到同一温度冷却后测量;逐步增加温度直至居里温度¹⁾.随着加热温度的升高,样品失去的TRM(新获得的pTRM)越来越多.通过公式:

$$H_{\text{古强度}} = (\text{失去 pTRM} / \text{新获得 pTRM}) \times H_{\text{实验室}}$$

可以估计古强度值. Thellier实验结果常常利用归一化后的剩余TRM与新获得pTRM的关系表示(见图1). Thellier方法适用于pTRM具有可加性、独立性和可逆性的材料.

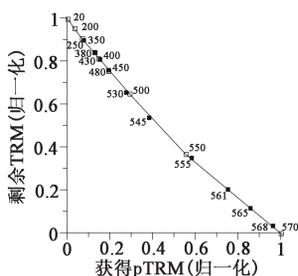


图1 Thellier古强度结果的剩余TRM与新获得的pTRM的关系图.图中实心 and 空心方框分别表示连续加热方法和传统两次加热方法的结果,二者基本一致.图中数字表示每步加热的最高温度,单位为摄氏度

Néel 的单畴理论

Thellier古强度测定方法的理论基础是Néel的单畴理论.当某种磁性矿物的粒径很小时,可能只包含单一磁畴²⁾颗粒.单畴颗粒的磁矩在外场中只有两种分布情况:平行或反平行于外场方向.Néel理论指出,单畴磁性颗粒的磁化强度随时间的变化满足:

$$\frac{1}{\tau} = C \exp\left(\frac{-\mu_0 VM_s H_c}{2kT}\right),$$

其中 τ 称为弛豫时间,是TRM衰减到初始值的 $1/e$ 所需的时间. C 为常数,约为 10^{-9} s^{-1} , V 为磁性颗粒的体积, H_c 为磁性颗粒的矫顽力, M_s 为磁性颗粒的饱和磁化强度, k 为玻

尔兹曼常数, T 为绝对温度, kT 为热能.其中 H_c 和 M_s 都随温度发生变化.在岩石从高温冷却过程中,当高于居里温度时, τ 很小,岩石不能记录TRM;随着温度降低至低于阻挡温度³⁾时,弛豫时间 τ 变大,岩石开始记录TRM.

岩石磁学温度计

岩石形成后,后期磁场和物理—化学作用等都会使岩石发生重磁化.岩石的pTRM不仅能记录获得时的地磁场方向和大小,而且还能记录形成时的温度,因此可作为古温度计.在20世纪80年代,科学家发现在美国纽约地区约4.2—4.9亿年的碳酸盐岩中,记录了约3亿年的重磁化分量.为什么岩石会获得这个重磁化分量呢?如果重磁化是由热事件造成的,从Néel公式推测,这个温度将会很高,与地质记录不符.研究证实,这一重磁化现象是由后期造山过程中的流体作用使岩石中的磁性矿物生长引起的.同时,科学家还利用岩石的pTRM记录测绘了澳大利亚东南部煤矿区的古温度曲线,从而来了解煤的形成过程.通过实验室测量pTRM的解阻温度(只需几分钟)就可以推断自然情况下的重磁化温度(时间需约10万年).Gunther Pullaiah及其同事进一步发展了这种基于Néel公式的 $\tau-T$ 等值线外推法,可应用于估算重磁化的温度和时间.

类似的研究思路也可用于行星际磁场研究.目前火星没有类似于地球的全球性磁场,但一些区域的磁场强度远高于目前地球磁场强度.科学家猜测这是约45.5亿年前火星刚形成后不久获得的TRM.火星的地壳能够获得这么强的TRM吗?利用热力学模型中的地壳冷却速度(每百万年 0.5°C)计算,这要求火星的全球动力学过程应至少持续1亿年.另一个问题是,火星岩石获得的TRM能在零场中保存40亿年吗?应用 $\tau-T$ 等值线外推方法,可以计算火星早期的全球动力学过程持续的时间,这段时间至少为3亿年.由此看来,火星演化早期很可能确实存在过全球动力学机制.

非单畴情况

按单个磁性矿物颗粒包含的磁畴个数和宏观磁学性质,可将磁性矿物粒径由小到大分为单畴、假单畴和多畴;其中的单畴磁性矿物遵守Néel单畴理论.自然界岩石中磁性矿物颗粒一般具有一定粒径分布,多数情况下不完全遵守Néel单畴理论.多畴颗粒一般会使TRM强度变低,如磁铁矿粒径超过单畴临界体积 d_0 (约70nm)时,获得TRM强度

本栏目是经美国物理联合会(AIP)授权,与Physics Today合作的项目

- 1) 居里温度:铁磁性矿物转变为顺磁性矿物的温度,超过居里温度时表现为顺磁性.磁铁矿的居里温度约为 580°C .——译者注
- 2) 磁畴:磁性材料内部能量最小的最稳定区域.——译者注
- 3) 阻挡温度:磁性矿物由不能载剩磁转变为能载剩磁的温度,与解阻温度对应.——译者注

会随粒径的增大而减小。其他强磁性矿物的特征与磁铁矿类似,但弱磁性的赤铁矿单畴和多畴 TRM 相当(d_0 约为 $20\mu\text{m}$)。多畴赤铁矿 TRM 的矫顽力仅为单畴 TRM 的约 1%,因此一般认为多畴赤铁矿的 TRM 不可靠。天然赤铁矿几乎都为单畴,而天然磁铁矿的粒径则多数都大于单畴。实验研究显示,这两种磁性矿物在粒径小于 $10\mu\text{m}$ 时,记录的剩磁大都可靠。那么,怎样的磁畴结构使磁铁矿在远大于临界体积 d_0 时仍然表现出单畴特征呢?

超过单畴临界体积 d_0 时,磁铁矿颗粒的磁畴磁矩开始呈涡流状分布;随着粒径的增加,逐渐形成新磁畴壁(见图 2)。在外场中,涡流线和磁畴壁都易于移动,因此,与单畴相比,涡旋和两畴结构的磁铁矿颗粒的矫顽力降低,磁矩也降低;但宏观磁学特征并没有明显变化,被称为假单畴。假单畴磁性颗粒的磁学参数随粒径增加逐渐发生变化,因此,假单畴磁铁矿颗粒记录的古代地磁场信息也比较可靠。

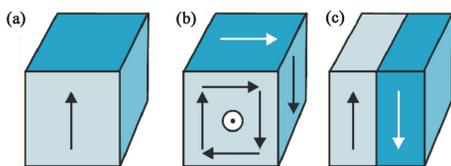


图 2 磁畴结构示意图 (a)单畴;(b)对称涡旋结构;(c)两畴(超过单畴临界体积后,随着粒径的增大,磁畴会呈现涡旋结构(b);粒径进一步增大时,会产生新的磁畴壁(c),磁畴磁矩的大小和方向也会发生相应变化)

磁畴的观测

大磁铁矿颗粒表现出经典多畴结构(见图 3),符合 Lev Landau 和 Evgeny Lifshitz 的预测。单畴磁铁矿颗粒在磁细菌中能按链状排列。探讨单畴和多畴界限得益于现代影像技术的发展。天然磁铁矿颗粒的磁畴状态常常很复杂,使较大粒径的磁铁矿颗粒可能表现出单畴特征。20 世纪 80 年代,科学家发现约 $10\text{--}15\mu\text{m}$ 的钛磁铁矿颗粒有时在磁滞回线上显示出单畴特征。当使单个颗粒获得 TRM 时,一些聚集的磁畴也会显示单畴特征。是不是这种亚稳态的颗粒导致了假单畴行为? 这些亚稳态颗粒具有足够强的剩磁,能满足古地磁研究需要;但是,不能满足稳定性要求,磁畴状态在很小的外场下就会变化。因此,亚稳态的单畴颗粒不太可能在变化的地球磁场中长久保存剩磁。

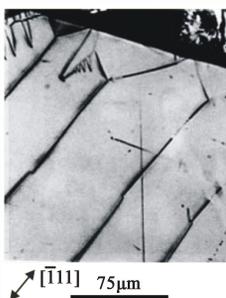


图 3 光学显微镜下大磁铁矿颗粒的多畴结构

群体行为

自然界中的单畴磁铁矿颗粒还能呈晶体棱柱状排列,空间上相隔很近的磁铁矿棱柱颗粒之间的相互作用很强,但因为相邻单个棱柱的极性相反,每组集合体只贡献很小的净磁矩。利用透射电子显微镜技术可以观察磁场表面分量和描绘磁畴结构。科学家观察到即使单个单畴磁铁矿颗粒被强磁化,但集体却表现出很小的净磁矩(见图 4)。理论微磁模型推测,只要稍大于单畴临界体积的磁性矿物颗粒就会表现为涡旋状,目前已得到全息电子影像的证实(见图 4)。当磁性矿物的粒径超过单畴临界体积时,剩磁和矫顽力会发生根本变化,但宏观磁学特征表现为随粒径的增大逐渐变化。

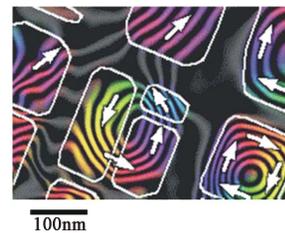


图 4 一组单畴磁铁矿阵列的电子全息影像。图中箭头表示平行于表面的磁通量方向,白线圈出单个磁铁矿颗粒位置。图中心位置显示三个单畴磁铁矿颗粒共同形成了一个较大涡旋,右侧显示单个磁铁矿颗粒也形成了一个涡旋

未知领域

磁性矿物粒径的微小变化或相互作用会产生明显不同的磁化效果,但是,宏观磁学测量并不能发现相应的临界值。新全息电子成像技术证实了涡旋和两畴结构在磁铁矿的单畴临界体积附近确实存在,然而,或许由于某种尚未发现的过渡状态,即使在超过单畴临界体积后,宏观磁学特征也没有发生明显变化。

一些微米大小的磁铁矿会表现出类似单畴磁铁矿特征,古地磁学研究有时会利用其记录的古地磁场方向信息,但一般不应用于古温度和古强度研究。利用 Thellier 方法对岩石开展实验来估计古强度也是一种折衷的方法,因为自然界中岩石的磁性矿物不能满足 pTRM 可逆性。天然岩石中磁性矿物颗粒的内部退磁场会导致磁畴壁移动,引起的剩磁尾效应造成 Arai 图中直线的弯曲(见图 1),使估计的古强度值不准确。因此,现代古强度方法研究的一个主要方面就是减少或校正 pTRM 尾效应。

描绘现代板块运动和地球动力学演化过程都需要依赖于一些事实上并不完美的微小磁性矿物颗粒,而这些磁性矿物颗粒的内部结构直到最近才能被人类观察到。微磁模拟主要研究粒径在单畴附近的磁性矿物颗粒,一些推测逐渐被观察证实。但是,由于计算限制,微磁模拟还不能模拟微米大小的磁性矿物颗粒的行为。利用先进的电子全息显微技术和磁力显微镜直接观察或许更容易在这一粒径尺度下获得更丰硕的成果。

(中国科学院地质与地球物理研究所 刘成英 编译自 David J. Dunlop, *Physics Today*, 2012, (6): 31, 原文详见 <http://ptonline.aip.org>)