

古地磁的研究方法

А. И. 赫拉莫夫等

科学出版社

7

76

古地磁的研究方法

[苏] A. H. 赫拉莫夫等著

王子昌 邓兴惠 李存悌 李华梅译

科学出版社

1965

А. Н. ХРАМОВ, Г. Н. ПЕТРОВА,
А. Г. КОМАРОВ, В. В. КОЧЕГУРА

МЕТОДИКА ПАЛЕОМАГНИТНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Гостоптехиздат

Ленинград

1961

內容簡介

本书共分九章，书中详细地叙述了如何应用古地磁的方法来研究地磁场的历史、地层、地质年龄、古大地构造、古地理等问题，并提出了古地磁方法今后有待解决的问题。

书中除介绍古地磁学的物理基础和岩石天然剩余磁化强度的测量和数据处理外，还全面介绍了古地磁的野外工作方法、设备和运输等，并提出了编写报告需要具备的资料。书中还搜集了各国古地磁的部分资料，并列表说明其应用效果。

本书对古地磁研究工作者和广大的地质人员都是一本较好的指导书，对地球物理工作者也有一定的参考价值。

古地磁的研究方法

[苏] А. Н. 赫拉莫夫等著

王子昌、邓兴惠、李存悌、李华梅译

*

科学出版社出版

北京朝阳门内大街 117 号

北京市书刊出版业营业许可出字第 061 号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1965 年 6 月第 一 版

开本：850×1168 1/32

1965 年 6 月第一次印刷

印张：4 3/16 插页：2

印数：0001—2,000

字数：104,000

统一书号：13031·2099

本社书号：3207·13-14

定价：[科七] 0.75 元

前 言

古地磁学是地球物理学一个新的分支学科，是根据岩石的天然剩余磁化强度来研究地磁场的历史。近几年来这个学科有飞跃的发展，基本上可用两个原因来说明。

古地磁的研究，除了其一般性的理论意义外，在地磁学方面还起非常巨大的作用。阐明地磁场的历史、地磁场在地质规模时间内的变化规律和地磁场变化过程本身跟地球发展过程中各种现象的联系，所有这些都毫无疑问地会促进我们对现代地磁场的本质、空间分布规律和在时间上的变化规律的認識。

但古地磁研究在用来解决地质年代学和地层学、古地理学和古大地构造学等广阔问题时，也还具有不小的意义。这些问题都跟普查和勘探有用矿藏等实际问题紧密联系着的。

由于古地磁工作具有明确的理论和实际意义，目前已有许多单位在进行或计划进行这一工作。缺乏古地磁研究的指导书籍，很难广泛地推广和进行这一工作。最重要是缺乏统一的工作方法，以致工作的结果很难对照。

本书主要是由赫拉莫夫 (А. Н. Храмов, 全苏石油地质勘探科学研究所)、彼特罗娃 (Г. Н. Петрова, 国立莫斯科大学)、科马罗夫 (А. Г. Комаров) 和科切古腊 (В. В. Кочегура, 全苏地质科学研究所) 根据自己五年以上的古地磁研究经验而编写的。此外他们还就苏联和外国古地磁学研究方面的一系列经验，也加以考虑。

本书由苏联科学院大地物理研究所的古地磁委员会同意并推荐作为苏联进行古地磁研究时的方法指导书。

§ 3, 5—9, 12, 13, 17—20, 25—25 和 27 由赫拉莫夫编写；
§ 1, 2, 4, 14 和 21 由彼特罗娃编写；§ 26 由他们两人合写；§ 10

和 11 由赫拉莫夫和科切古腊合編，而 § 15 和 16 則由科切古腊編写。附录由科馬罗夫編写。編者借此感謝迪阿諾夫-克洛科夫(В. И. Дианов-Клоков, 初等有机化合物研究所) 和皮昂特科夫斯基(С. С. Пионтковский, 苏联科学院大地物理研究所) 参加 § 16 的編写工作。

編者們对亞諾夫斯基(Б. М. Яновский 列宁格勒大学) 热情地担任本书的校閱工作，以及卡拉什尼科夫(А. Г. Калашников, 苏联科学院大地物理研究所)、克魯泡特金(П. Н. Кропоткин, 苏联科学院地質研究所) 和奧捷尔斯基(М. Л. Озерский, 全苏地球物理科学研究所) 审閱了原稿和提供了一系列宝贵的意見以及全部参加原稿討論的人，都表示深切的謝意。

目 录

前言	iii
书中所采用的符号	vii
第一章 古地磁学的物理基础	1
§ 1. 磁化种类	1
§ 2. 岩石天然剩余磁化强度 I_n 的形成	6
§ 3. 岩石天然剩余磁化强度的稳定度	12
§ 4. 岩石反向磁化强度的形成问题	17
第二章 古地磁研究的目的和任务	22
§ 5. 地磁场历史的研究	22
§ 6. 地质任务的解决	31
第三章 野外工作的准备	33
§ 7. 地质资料的分析和古地磁研究对象的选择	33
§ 8. 野外工作的工具和装备	37
第四章 野外的古地磁工作	39
§ 9. 野外工作的组织	39
§ 10. 地质体的研究方法	39
§ 11. 定向标本的采集	41
§ 12. 标本的运输、保管和加工	46
第五章 标本天然剩余磁化强度 I_n 的测量	50
§ 13. 亚诺夫斯基型和切尔内舍夫型无定向磁力仪的使用	50
§ 14. 在多耳吉诺夫无定向磁力仪上的测量	57
§ 15. 在 M-14 型磁力仪上的测量	62
§ 16. 在岩石发电机上的测量	64
第六章 磁测数据的整理	72
§ 17. I_n 和 κ 平均值的计算及其误差计算。成果图的表示	72
§ 18. 偏角和倾角平均值的计算以及在 I_n 方向测定中的误差	75

§ 19. 武耳夫网上磁测数据的整理	78
第七章 岩石天然剩余磁化强度稳定度的估算方法	86
§ 20. 测定天然剩余磁化强度 I_n 稳定度的野外方法。 I_n 部分不稳定的校正	86
§ 21. 标本 I_n 稳定度的实验室试验	99
第八章 古地磁研究报告的编写以及地球物理和地质问题的解决	103
§ 22. 报告的资料、结构和内容	103
§ 23. 古地磁剖面的编制和地磁场历史的调查	105
§ 24. 剖面的年代对比和岩石年龄的测定	109
§ 25. 地极迁移和大陆漂移的研究	110
§ 26. 岩石的形成条件和地质历史的研究	112
第九章 古地磁研究方法的问题	115
§ 27. 古地磁学的现状和方法上尚未解决的问题	115
附录: 利用火成岩的某些磁性标量特征近似地测定它们的年龄和变质程度的可能途径	118
参考文献	122

第一章 古地磁学的物理基础

§ 1. 磁化种类

每一个物体放在磁场里面都要磁化，但在一定大小的磁场里不同物体所得到的磁化强度是不同的。它取决于物体本身的性质和发生磁化时所处的条件。

按磁化性能，物体(和物质)可以分成三类——抗磁性的、顺磁性的和铁磁性的物体(或抗磁体、顺磁体和铁磁体)。

对抗磁体和顺磁体来说，磁化强度 I^1 跟磁场强度 H 间的关系，可用下式表示：

$$I = \kappa H, \quad (1)$$

这里常量 κ 叫做物体的磁化率。顺磁体的 κ 是正的，抗磁体的则是负的。

对铁磁性物体来说，这关系只在物体预先完全退磁的情形下才正确。但即使在这种情形中铁磁体的磁化率也不是常量，而是随磁场 H 、温度 t 和发生磁化过程时所处的一些其他条件而改变的。起始时 κ 随磁场的增大而增大，在某一磁场时到达一定的最大值 κ_m ，以后开始减小，逐渐减小到零。 κ

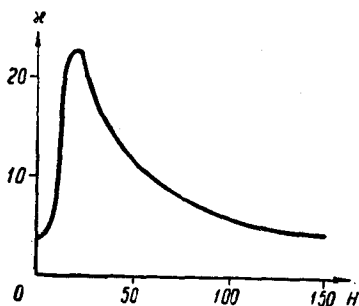


图1 铁磁体的磁化率 κ 跟磁场强度 H 的关系。

1) 这里和以后，矢量都用黑体大写拉丁字母来表示，并排成正写黑体。对于矢量的模、矢量的大小，则跟标量一样用斜体字母排印。

跟 H 的关系曲线在图1中示出。此外，在同一磁场数值时铁磁体的 κ 可以有不同的数值，随其过去的磁历史而定，也就是取决于这个磁场是作用在已退过磁的标本上，还是作用在已经受到过磁场作用的标本上。

铁磁体跟抗磁体和顺磁体不同，在外磁场除去后它的磁化强度并不同时消失。在磁场除去后铁磁体还保留着一部分磁化强度。这部分磁化强度叫做正常剩余磁化强度 I_r 。因此铁磁体内存在正常剩余磁化强度 I_r 时，把它放在磁场 H 里面，则它的磁化强度由下列关系式来表示：

$$I = \kappa H + I_r. \quad (2)$$

铁磁体的 κ 跟温度的关系是很复杂的。主要是在某一温度区间 κ 开始迅速减小，对每一种铁磁体在一定温度时到达最小值。这个一定温度叫做居里点。图2表示在不同磁化磁场数值时 κ 跟温度的关系。此外，铁磁体跟顺磁体和抗磁体还有 κ 数值大小方面的差别。如果说顺磁体和抗磁体的 κ 不超过 10^{-5} CGS制单位，

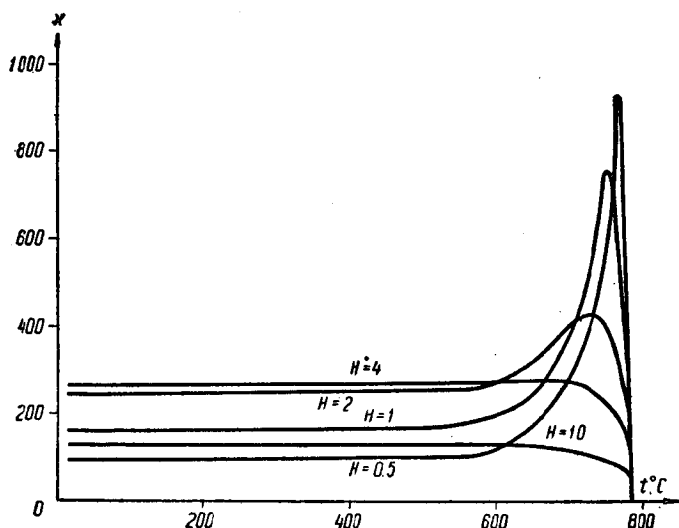


图2 在不同磁化磁场 H 数值时铁磁体的 κ 跟温度的关系。

那末鉄磁体的 κ 就可以到达 10^4 CGS 制单位。

岩石是由許多矿物組合而成。在它們里面可能有抗磁性的矿物、順磁性的矿物和鉄磁性的矿物。所有这三种矿物都可以影响到岩石 κ 的大小。

許多岩石在天然状态下就具有来源可能非常不同而又常常是最复杂的剩余磁化強度。这种磁化強度叫做岩石的天然剩余磁化強度，并且用 I_n 来表示。

如果岩石具有天然剩余磁化強度，或在实验室内进行試驗时显出能够获得剩余磁化強度，或者还显出 κ 跟磁場和温度有关，那末这也許只是由岩石里面存在的鉄磁性杂质所引起的。岩石的天然剩余磁化強度的数值，在經過某一段時間后还能保持这种磁化強度的能力以及居里点，都跟岩石里面鉄磁性成分的本質、状态和含量特別有关。

岩石的磁化規律也就是鉄磁体的磁化規律，只能在对鉄磁体如何經歷磁化过程有明确的概念时，才能了解清楚天然剩余磁化強度的产生机制。正如上面所講过的，鉄磁体的磁化过程，本質上取决于磁化时所处的各种条件。

使鉄磁体具有剩余磁化強度的各种过程，可能非常不同；据此可分別出几种不同的磁化过程。

如果鉄磁体磁化时温度保持不变，并且沒有外加的負荷和交变磁場（例如由具有交变电流的綫圈所产生）作用在它上面，我們就可得到正常的磁化。

磁化強度 I 跟磁化磁場大小的关系，可用图 3 所示的曲綫来表示。如果把預先退过磁的鉄磁体放在磁場 H 里面，然后逐漸增大 H ，对一种鉄磁体來說，它的磁化強度便会增长到一定的数值——飽和磁化強度 I_s 。这时磁化強度是沿着一条叫做基本磁化曲綫改变的。如果現在減小磁場，磁化強度也跟着減小，但比較減小得慢，这时是沿曲綫 2——磁滯曲綫改变的。在 $H = 0$ 时磁化強度并不消失，而且有一定数值的 I_{rs} 。 I_{rs} 叫做全循环的剩余磁化強度。为了使 I_{rs} 变成零，需要在相反方向加上一定的磁場。这个

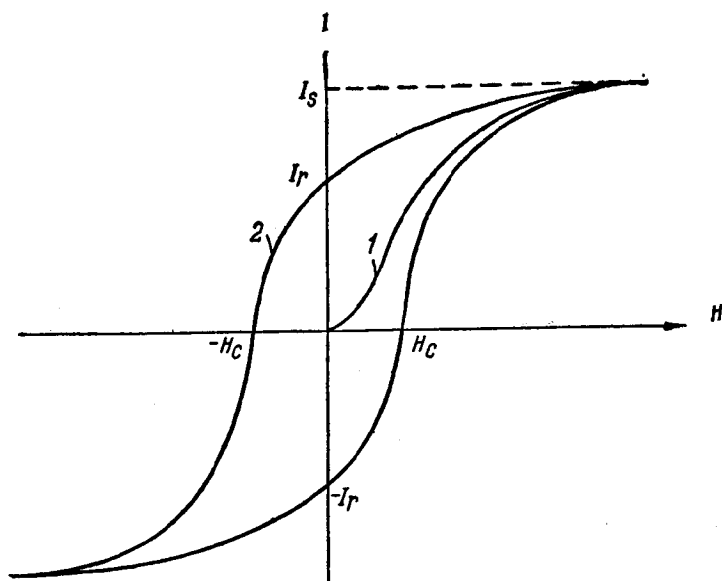


图3 铁磁体的磁化强度 I 跟磁场强度 H 的关系(磁滞迴线)。

磁场叫做矫顽力 H_c 。增大反方向的磁场，仍旧使铁磁体达到饱和磁化；以后减小磁场，在 $H = 0$ 时得到反方向的 I_r ，等等。这些变化的全循环(磁滞迴线)如图3所示。

如果在这些变化中最大的磁化磁场 H 还不足以使铁磁体达到饱和磁化，那末我们就得到分循环的磁滞迴线；这时所得到的剩余磁化强度，叫做在给定磁场 H 中的正常剩余磁化强度，并用 I_r 来表示。

如果在磁化时还有一个跟恆稳磁场一起同时作用在标本上的交变磁场而且这个交变磁场的振幅是从足以使这个标本饱和磁化的数值开始，缓慢地减小到零，这时我们就得到理想的磁化状态。在这种状态中便可产生理想的剩余磁化强度 I_{ri} 。

当磁化时还有一个跟恆稳磁场一起同时作用在标本上的交变负荷，这时所发生的磁化叫做动力学磁化。

如果铁磁体在恆稳磁场作用下温度从居里点以上降低到室

温，那末就发生热磁化。鉄磁体的磁化强度不仅对磁場显出磁滞的关系，而且在不变的磁場中还对温度显出磁滞的关系。

当鉄磁体加热后在磁場里面逐渐冷却时，它产生热磁化强度 I_t ；如果现在除去磁場，所保留下来的就是热剩余磁化强度 I_{rt} 。热剩余磁化强度的大小 I_{rt} （对給定的鉄磁体）既跟磁場强度有关，又跟磁場所作用的温度区间有关。对一定的磁場来说，在鉄磁体加热到居里点（或更高温度）然后冷却、并在所有温度区间都不断有磁場作用的情形下，便产生最高数值的 I_{rt} ；这时我们就得到总热剩余磁化强度 I_{rt} 。在另一种情形中（如果加热只进行到比居里点低，或只在某一温度区间有磁場作用）则产生分热剩余磁化强度 δI_{rt} 。

即使在很微弱的磁場作用下还是能够得到数值很高的 I_{rt} ，这一现象非常重要。一般在给定磁場里的磁化强度是 $I_t < I_{rd} < I_{rt} < I_{rt}$ ，在微弱磁場里这个差别特别大，而在强大磁場里则消失。在饱和磁化的磁場里这四种磁化强度达到一个极限值。

到现在为止，我們只讨论了一些本质上的、并没有涉及物体结构和组成的、在外界作用下所引起的鉄磁体磁状态的各种变化。但在自然界和实验室内可以产生各种非常不同的物理的、物理化学的和化学的过程，使物体在磁状态和磁性改变时可以形成剩余磁化强度。

当磁場存在时，除正常剩余磁化强度以外，在任何跟新鉄磁性物质的形成或物质从顺磁性状态过渡到鉄磁性状态所伴生的变化的情形中，都产生附加的剩余磁化强度。在有些情形中这种磁化强度也能在鉄磁体本身结构改变时产生。

当鉄磁体从溶液里结晶或再次结晶时，以及在矿物的顺磁性变体过渡到鉄磁性变体时，都要产生结晶剩余磁化强度。

化学剩余磁化强度是鉄磁体由化学方法形成时所产生的。悬浮在胶状溶液里面的质点在磁場作用下沉淀时所产生的剩余磁化强度，叫做沉积剩余磁化强度。这种磁化强度没有专门的符号。

在许多鉄磁体的磁化过程中，其中也包括岩石的磁化，时间因

素起非常重要的作用。这一个因素,虽然到现在为止还没很好地研究过,但对跟几百万年和几万万年有关系的古地磁学则非常重要。

实验室里的试验表明,铁磁体在磁场里面滞留的时间和磁场消失后所经过的时间,对正常剩余磁化强度的大小都要发生非常重要的影响,而且特别是在弱磁化磁场的情形下更为显著。磁化强度并不是在加上磁场时立即产生,而是逐渐增长的,跟时间的对数成正比;磁场消失以后磁化强度开始减小,也跟时间的对数成正比。

这种现象叫做磁的粘滞性,而在磁场里长期滞留以后所产生的剩余磁化强度,则叫做粘滞剩余磁化强度或时间剩余磁化强度 $I_{rh}^{1)}$ 。

粘滞剩余磁化强度的大小 I_{rh} 可用下列公式来表示:

$$I_{rh} = aH \ln \frac{t_1}{t_2}, \quad (3)$$

这里 a ——跟铁磁体性质有关的常量,对不同的物质是不同的;

t_1 ——在磁场 H 里滞留的时间;

t_2 ——磁场 H 除去以后所经过的时间。

§ 2. 岩石天然剩余磁化强度 I_n 的形成

组成地壳的所有岩石都受到地磁场的作用。同时它们全都正常地磁化。从实验室里的研究表明,在地磁场数量级的磁场里正常磁化时,正常剩余磁化强度 I_r 小于总磁化强度 1% ($I_r/I < 0.01$),而矫顽力则小于 0.05 奥斯特 ($H_c/H_T < 0.1$)。当地磁场的方向改变时, I 和 I_r 的方向也跟着改变。

岩石在形成过程中或在形成以后受到显著的加热(150°C左右或更高),在地磁场里冷却时一定要获得热磁化强度的。当岩石加热到所含有的铁磁性成分的居里点以上的温度(大部分岩石的 $T_k =$

1) 粘滞磁化强度所遵循的时间对数定律,只在磁化强度离开饱和和很远的区间才正确。

500 ~ 670°C) 时,就具有特别强大的热磁化强度。所有喷出岩和侵入岩都属于这一类岩石(图 4)。磁性最强的岩石在地磁场里所获得的热剩余磁化强度 I_r , 可以达到 10CGS。热磁化强度是一种最稳定的磁化强度。要使岩石产生的正常磁化强度数值等于在地磁场里所获得的 I_r , 就需要有强度在 50 奥斯特或更高数量级的磁场。所以要显著地改变 I_r 的大小和方向, 必须有一个大大地超过形成 I_r 所需要的磁场(这里形成 I_r 是地磁场), 因而地磁场的任何变化对 I_r 都不会发生显著的作用。岩石冷却以后可以在很长时期内保留住自己的磁化强度, 而且这个磁化强度的方向, 将跟岩石形成时候的、可以跟现代磁场方向非常不同的磁场的方向一致。

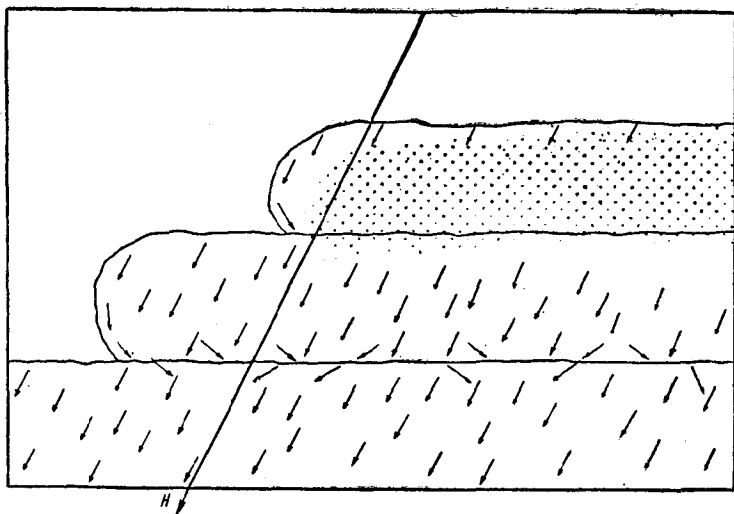


图 4 火成岩天然剩余磁化强度形成示意图。

所以所有火成岩一开始就至少具有两种磁化强度: 它们的剩余磁化强度是从岩石形成(或形成以后加热到高温)时起保留下来的热剩余磁化强度, 而感应磁化强度 $I_i = \kappa H$ 则是在现代地磁场里得到的, 而且是随现代地磁场一同改变的正常磁化强度。

由火成岩保留下来形成时代所获得的热剩余磁化强度这一事

实，我們就可以利用火成岩来解决古地磁学的问题。此外，铁磁体颗粒的热剩余磁化强度，在许多情形中可以使我們进行变质岩和沉积岩的古地磁研究。

火成岩中同时存在两种磁化强度：感应磁化强度和天然剩余磁化强度。它們在方向上可能彼此相差很大，在大小上后者要比前者大些。

在岩石磁学和古地磁学中，因子 $Q = \frac{I_n}{\kappa H_T}$ 起很重要的作用。即使在 $Q > 0.2$ 时，也可以有把握地说，岩石中除正常磁化强度外，还存在其他种类磁化强度。如果 $Q > 5$ ，那末这就証明热剩余磁化强度的存在，并且在岩石生存过程中这热剩余磁化强度的大小大概沒有遭受到重大的变化。

因子 Q 的中間数值，也就是 $5 > Q > 0.2$ ，它可以表示不同的意义。毫无疑问，对于火成岩，由于它曾经过从高温冷却的过程，故 Q 的这些数值証明岩石在形成时所获得的 I_{re} ，是由于以后时期岩石内部物理化学的变化，使它的大小部分地发生了变化，或者是由于以后时期，当地地磁场增强而方向也发生改变，岩石又受到二次加热，这样，就使它的大小和方向发生了变化。上述结果是在地磁场所产生的动力学的、化学的、結晶的、或是粘滞磁化的情况下获得，其方向与原来的有明显的不同。

闡明火成岩 Q 的这些数值的根源，需进行专门研究。

下面我們来討論，由碎屑沉积而成的沉积岩的天然剩余磁化强度形成的机制。

当母岩受到冲刷后，岩石的細小铁磁性质点便被水带走。它們里面最微細的质点，可以具有原铁磁体自发磁化强度区域内所固有的磁化强度¹⁾。由几个这种区域所(磁畴)組成的較大质点，它們保持了母岩原来所具有的磁化强度，即热剩余磁化强度。落在水

1) 按现代的概念，铁磁体是在內力作用下被磁化到饱和的区域的总和。这种自发磁化强度区域(磁畴)的尺寸，既跟铁磁性物体本身的尺寸和形状有关，又跟它的化学成分、固定的晶格等有关。铁磁性岩石质点里的磁畴的尺寸，一般在1到100微米之間。

流里面的质点，力图保持它们的磁化强度矢量的方向与地磁场方向一致。这种趋势的程度取决于地磁场的强度、质点剩余磁化强度的大小、质点的大小和形状、水流的强弱和特征等。

在沉积物形成过程中，想保持自己方向的铁磁性质点跟没有磁化的质点一同沉淀。在沉淀物的脱水作用中、铁磁性质点所得到的确定方向被固定下来，因而产生了方向与沉淀时所作用的地磁场一致的总的剩余磁化强度矢量（图 5）。

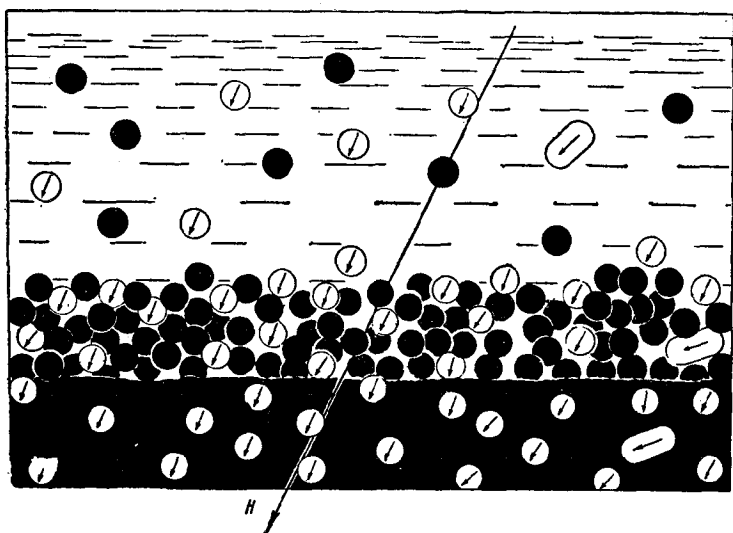


图 5 沉积岩天然剩余磁化强度形成示意图(高度放大)。

所以沉积岩的天然剩余磁化强度，是热磁性的或单畴磁性的起源，而 I_n 的方向则由沉淀过程中磁化质点的取向来决定。

许多岩石可由晚后的结晶磁化过程或化学的磁化过程而得到了天然剩余磁化强度。在许多情形中 I_n 的产生时间也可能精确地定出，因而也可以利用这种岩石来进行古地磁研究。同生结核体、红土（铝土矿）和一些其他岩石，都属于这一类型的岩石。某些热液成的和沉积成的铁矿，也可列入这种类型岩石内。

所有这些岩石在一定情况下可称做化学沉积岩。

變質岩在變質過程中得到了本質跟變質類型有關的剩餘磁化強度，也就是熱剩餘磁化強度或動力學的剩餘磁化強度。這種磁化強度既可以使原生磁化強度發生畸變，也可以使它全部消失。但在某些情形中，變質岩也可以用來進行古地磁研究。

變質岩可以具有已知各種磁化強度中的任何一種，這決定於變質岩的形成條件、以後的經歷和鐵磁性顆粒的成分。我們不能預先斷言，哪一種磁化強度對變質岩是主要的，同時由於變質岩獲得磁化強度的時間也不確定，因而就使古地磁研究變得很複雜了。

岩石里可以出現各個不同年代所產生的各種不同磁化強度。這些磁化強度具有對應不同地磁場方向的各種不同方向。在大部分情形中岩石里都存在幾種鐵磁性顆粒，而各種不同的磁化強度也許就跟各種不同的顆粒有關。例如火成岩里的赤鐵礦（磁性最穩定的鐵磁體）可以在幾百萬年時間內保持自己的原生 I_r 不變，而跟它共生在岩石里面的粗顆粒磁鐵礦，則可以失去跟赤鐵礦同時獲得的原生 I_r 的主要部分和得到相當顯著的粘滯磁化強度。如果含有居里點約 300°C 的鈦磁鐵礦顆粒和磁鐵礦顆粒的原生熱磁化的岩石里，在自己的生存過程中受到二次加熱，溫度達到 300°C ，那末鈦磁鐵礦就得到新生的熱磁化強度，而磁鐵礦則只得到一小部分使自己原生 I_r 幾乎沒有什麼改變的熱磁化強度。

最後，在變質過程中重新形成的鐵磁性顆粒，可以具有化學的磁化強度，此外在岩石里還跟它們同時存在着沒有受到化學變化、而保持了原生磁化強度的顆粒。

還要作一點補充說明，如果各種鐵磁體在磁性穩定方面，也就是在一次所得到的磁化強度能夠保持不變方面彼此非常不同，此外，如果每種磁化強度還有自己固有的一定的穩定性，那末岩石磁化強度的複雜程度，也就變成一件不難理解的事情了。實際上我們還沒有討論岩石里面各種不同磁化強度的合成問題，而只對岩石內同時存在幾種來源和穩定性不同的以及彼此獨立和按各種不同規律改變的磁化強度矢量進行說明。只有這些磁化強度所產生的外磁場可以迭加。