

1:5万地质测量方法参考书

地质测量中岩石磁性的应用

Л.Е.绍尔波、等著

地质出版社

1:5万地质测量方法参考书

地质测量中岩石磁性的应用

Л.Е.绍尔波 等著

陆克 丁鹏飞 王忠敏 译

(京)新登字 085 号

Методическое пособие по геологической съемке
масштаба 1:50000
использование магнетизма горных пород при гео-
логической съемке
Ленинград «НЕДРА» ленинградское отделение 1986
Л. Е. Шолпо

1:5 万地质测量方法参考书

地质测量中岩石磁性的应用

Л. Е. 绍尔波 等著

陆克 丁鹏飞 王忠敏 译

责任编辑：曹玉

地质出版社 出版发行
(北京和平里)

北京地质印刷厂印刷
(北京海淀区学院路29号)

新华书店总店科技发行所经销

开本：850×1168^{1/32} 印张：4.5625 字数：117000

1992年2月北京第一版·1992年2月北京第一次印刷

印数：1—710册 定价：3.60元

ISBN 7-116-01080-7/P·010

译 者 的 话

1:5 万地质测量是地质工作的最重要阶段，它兼有填图和找矿的双重任务。我国对这一工作十分重视。它已被列入国家计划，每年完成若干图幅。

前苏联出版了 1:5 万地质测量工作方法系列参考书，本书即是其中之一。本书全面而系统地叙述了岩石磁性的各种参数的物理意义和测定方法。岩石磁性反映了岩石的形成过程、形成条件及地质演化过程。在 1:5 万地质测量工作中，根据工作地区的实际地质情况，灵活运用岩石磁性，一定会解决有关构造、地层对比、地质演化等方面的问题，从而提高工作水平和质量。

由于篇幅所限，又考虑到岩石磁性的一般知识及古磁测量已在教科书和有关专著中做了详尽的叙述，因此删去原书的第一章和第七章。

中国地质大学谭承泽教授审查了译稿，指出了其中某些翻译错误，进一步提高了本书的翻译质量。在此表示感谢。

由于译者的水平有限，有不妥之处，敬请读者指正。

译 者

一九九二年二月北京

目 录

绪论	(1)
第一章 岩石磁化率	(6)
§ 1 磁化率及其信息	(6)
§ 2 岩石中磁性矿物分布的某些规律	(11)
§ 3 岩石磁性图的编制	(15)
岩石磁性图图例的编制原则	(16)
岩石磁性图的编制方法	(19)
§ 4 作为沉积条件指标的岩石标量磁特征	(21)
第二章 研究岩石磁性矿物的成分和结构的磁性方法	(37)
§ 1 研究磁性矿物的非磁方法概述	(37)
§ 2 磁性矿物的居里温度和热磁测定	(38)
§ 3 热磁方法的应用	(44)
§ 4 热磁分析及参数 Q_{rs}	(47)
热磁曲线的分类	(47)
参数 Q_{rs} 及其信息	(51)
表生作用的磁性特征	(55)
第三章 矫顽力谱法	(60)
§ 1 磁性矿物的矫顽力谱参数	(60)
§ 2 研究磁状态特点时矫顽力谱参数的应用	(68)
§ 3 天然剩余磁化强度性质的确定	(74)
§ 4 研究矫顽力谱的方法技术问题	(78)
第四章 估算岩石年代的磁性方法	(85)
§ 1 岩石磁性特征随时间的变化	(85)
§ 2 根据粘滞磁化强度确定岩石的年代	(86)
§ 3 岩石年代相互关系的确定	(90)

第五章 岩石的磁各向异性	(94)
§ 1 岩石磁各向异性的成因	(94)
§ 2 磁组构及其参数	(96)
§ 3 不同成因类型岩石的磁各向异性	(100)
沉积岩	(100)
火山岩	(101)
火成岩	(104)
变质岩	(107)
§ 4 确定岩石磁各向异性的方法	(109)
磁化率各向异性的确定	(109)
剩余磁化强度各向异性的确定	(111)
§ 5 岩石磁各向异性的地质信息	(112)
第六章 岩石磁性综合研究的实例	(114)
§ 1 Ветреный 地区超铁镁岩的划分	(114)
超铁镁岩的磁化强度、密度与变质交代改造的关系	(114)
超铁镁岩的磁化强度和密度	(116)
根据岩石物理特征划分超铁镁岩	(118)
§ 2 根据建造的专属性划分火山岩	(122)
参考文献	(135)

绪 论

岩石的物理性质是由岩石成分、形成条件和所有的后生变化所决定的。由于存在这种关系，岩石物性包含着相当丰富的地质信息。当然，提取和解释这些信息特别复杂，因为岩石由许多矿物组成，而这些矿物的物理性质明显不同，在某些外界影响下矿物又发生不同的变化。所以，可以把岩石物性与少量矿物的形成联系起来，就解决反问题的可能性来说，毫无疑问，研究岩石物性是最有前途的。这样的局面正是在研究岩石磁性中形成的。

在我们对岩石的“一小部分”进行研究的情况下，有可能建立磁性岩石的理论模型，该模型与实际情况一般稍有差异。这能够获得岩石的磁化作用或磁化现象的数值特征，详细制定出定量研究方法。研究岩石磁性很有前途，因为它不仅研究静态特征，而且还研究“动态”特征。随着温度上升，破坏磁序及磁化过程是这些特征中的最主要特征。从固体物理的角度来看，这些过程恰恰包含着关于铁磁体的化学成分和加工工艺及其结构，甚至外部作用所造成的磁经过史的主要信息。

此外，磁性现象采用“磁记忆力”的独特性质。除了岩石磁性鉴定方法外（这些方法研究磁性矿物成分、结构、构造和含量），还可以分出许多研究磁状态的方法，这种磁化状态保存着外部作用——磁场、机械应力、温度、时间的记忆。

由此可见，磁性在岩石物性中占有特殊地位。这种地位说明磁性研究和实际应用的方式及方向的多样性，而多样性需要进行统一分类，这种分类应以实际的、有物理根据的、评价岩石磁性的地质信息为基础。

岩石磁性现象的研究，首先与解决磁法勘探的问题有关。从建立磁法勘探开始，就精确地研究岩石和矿物的各种类型磁化强

度 I 和磁化率 κ ，揭示出岩石剩余磁化强度的许多规律。方法的成功发展和应用，除磁化强度外，使岩石磁性的其他主要特征的含义和作用更加明确。

这种概念被部分“机械”地引入新兴的年轻的地球物理学分支——岩石物理学。在研究磁化强度的基础上，在“岩石磁性”的划分中，岩石物理学面临着相当广泛而复杂的任务：确定岩石磁性与岩石成因和地质发展的一系列因素之间的相关关系。所提出问题的复杂性和深度要求综合研究磁性，除磁化强度外，也要探索其他磁性特征。

大约 30 年前，地球科学新分支——古磁学的出现，使岩石磁性研究在地球物理学领域内有相当大的扩展。作为岩石磁性的基本特征，显然特别注意岩石的天然剩余磁化强度 I_n 。深入弄清剩磁“机制”的必要性和制定保存剩磁原则的需要，以及古磁现象本身的复杂性和多样性，导致古磁学的物理原理的发展和完善。新的科学分支——岩石磁学本质上是古磁学的最重要的部分。

在研究天然铁磁体特性的铁磁性物理学的基础上，岩石磁性的研究人员首先力求确定岩石磁性受磁性矿物的含量、化学成分、相成分和岩石结构、构造特点，以及岩石形成的地质-地球物理环境及其后生变化所控制的具体模式。岩石磁学作为铁磁学的科学分支确信，为了最充分地提取和最准确地解释岩石磁性的信息，必须研究和应用各种岩石磁性及特征。在岩石磁性中，磁化强度和磁化率仅仅作为某种磁性而加以研究。

岩石磁学的发展（从古磁学的物理基础开始）揭示了解决许多地质-地球物理问题的可能性，目前为止，磁法勘探、岩石物理学甚至古磁学仍面临着这些问题。显而易见，用单独的某一种方法不能解决这些问题。换句话说，确定岩石磁性的地质信息的一般原理可应用于各种类型的研究中，而这种研究不可能（而且也不应当）属于磁法勘探、岩石磁学和古磁学的范畴内。

在某种情况下，上述地球物理学各分支利用了岩石磁学的研究结果。不久以前，看到了这一特点。无论是这些分支的局部研

究，还是大量的综合性工作，在岩石磁学物理基础的论述和研究水平，以及在分类法方面都各不相同。在许多情况下，甚至涉及磁现象和磁化过程的术语，在地球物理学的各个分支中，也有很大的区别。

分析近年来的文献，有可能比较乐观地估计目前的状况。可以看到，各种地球物理研究的概念、理论基础和方法原理明显地互相渗透，这些地球物理研究借助于岩石磁学的理论。磁场、岩石磁性和古地磁的综合研究，以及测定岩石磁性的某些其他方法，能够保证完全提取岩石磁性中所包含的信息。每一分支的成就促进了其它分支的比较深入而有效的发展。但这并不排除所应用的研究方法和所研究的目标，以及地质和地球物理成果的应用范围的特点。

本书为地质测量工作中选择和利用与岩石磁化现象有关的最合理而有根据的研究程序提供了帮助。正确认识磁性的信息，特别是在单独或某几种特征综合时，实事求是地评价每一种磁性特征的信息，非常全面地认识各种类型磁性及其研究的合理性是应用岩石磁性成功的基本条件。

众所周知，在进行地质测量和绘制合格的地质图时，必须根据填图对象的特点，解决各种问题。

在岩浆岩发育区，应当查明各种侵入体或火山岩层的成分和年代的相互关系，测定其绝对年龄，圈定某些地质体，确定其形态、构造位置及与围岩的关系，测定每种地质体的规模和查明建造的专属性。

在变质岩发育区，解决问题的范围基本也是这样。但是需要进行专门的研究，查明变质作用类型（动力热变质作用、接触变质作用、自变质作用等），确定经受变质作用的岩石的原始成分，查明变质的热力状态，划分岩石的变质相等。

对沉积岩填图时，重点是划分沉积岩的岩相类型，沿横向和纵向追索这些岩相，测量它们的厚度，查明角度不整合和地层不整合，划分地层、岩层、岩系，确定它们的年代，查明和追索标

准地层，绘制局部标准剖面 and 综合剖面等。

地质测量中所要解决的问题是很多的，用研究岩石磁性的各种方法不可能全部解决，而且这些方法的信息不一定与所列举的任务相适应。但是，把各种磁性方法引用到地质工作的某一阶段时，应当准确地了解它们的可能性，估计所获取的信息的可靠性，考虑装备的实际可能性和研究的技术水平以及所容许的时间。由于这些因素，在研究岩石磁性时，像任何一种科学研究一样，可以达到现有分析的某种定性和定量的水平。

本书列举了许多借助于一般仪器有可能进行某一方面的岩石磁性研究的简便方法和建议。本书主要供与地球物理学接触的野外队的地质填图人员使用。

同时，有必要研究其他信息，对比较复杂的磁性特征也已经进行过研究。这些资料在解决某些有争论的问题时，有时能够提供最适当的依据。因此，本书阐明和评价了野外较少使用的某些新方法，以及地质填图人员应当具有的关于方法的实质性的概念，以便必要时他们能够在科学研究所和高等学校的专门实验室里从事工作。

本书预料，读者对所阐述的内容会有创造性的见解。暂时还不能提供一种有助于地质填图和普查的研究岩石磁性的通用方法。对不同成因和年代的地质体，根据具体的任务选择不同的方法。

目前为止，现有的全部应用实例都有差别，没有得到应用磁性方法的统一而系统的情况。

在这方面，古磁学和岩石磁学研究的情况是最令人满意的。岩石物理学包括古磁学和岩石磁学，已取得“是地球物理学的不可分离的组成部分，与固体物理学和岩石学最紧密联系”的地位。不仅对各种类型的岩石，而且对杂岩和建造也都做了岩石磁性的分类。根据各种地质构造部位的岩石物理（特别是岩石磁性）特征的研究，提出必须进行的综合工作。

1984年出版了理论、技术和方法手册，相当充实地说明了

地质-地球物理调查中，特别是在地质填图时应用岩石磁性资料的可能性。因此，本书仅仅以不多的篇幅反映了研究磁化强度的岩石磁学的观点。古磁研究以研究具体的磁性特征——天然剩余磁化强度向量及其原生分量为基础，这些资料也只占较少的篇幅。

古磁方法研究得很深入，地质学中（特别是地层学和地层年代学）应用古磁方法的原则已经明显，许多著作对这些资料作了循序渐进而又系统的论述。因此，本书仅限于讨论地质填图中古磁学应用的主要问题。1982年出版的《古磁学》一书对这方面的问题反映不多。该书阐述了古磁学的基本原理和方法，以很大的篇幅介绍了包括现代方法和技术的古磁的一般工作。

作者向参加本书工作的其他单位和机关的所有同事们表示谢意。

第一章 岩石磁化率

§1 磁化率及其信息

岩石磁化率是磁性特征之一，它决定于铁磁体的含量及其成分、结构的所有特征的关系。从物理学观点看，岩石磁化率是在大约 0.5×10^{-4} T 的磁场中测定的。它是磁化曲线的一个起始“点”，磁化曲线可延伸到 $n \times 10^{-2}$ 和 $n \times 10$ T，也就是说，磁化率是铁磁体的一个局部特征。因而磁化率是岩石的富含信息的参数，成功地应用于岩石磁性的研究中。

许多著作提及到各种测定工作，如磁特征的获得（磁特征的分布规律与形成条件、岩石蚀变的关系），“岩石磁特征”的确定，磁化强度、磁性、“标量磁参数”的研究等。磁性特征主要决定于岩石中磁性矿物的含量（以及分布规律，磁性矿物与岩石构造类型、形成条件和蚀变条件的成因关系），磁性特征的含义包含在这些概念中。这是研究工作取得成功的原因。我们对此要做详细讨论。

概括说来，磁性矿物可以分为两种类型：1. 等轴对称晶格类型，即磁铁矿、钛磁铁矿和磁赤铁矿（钛磁赤铁矿）；2. 菱形晶格类型，即赤铁矿及其含钛铁矿的固溶体（根据 I_s 值磁黄铁矿介于这两种类型之间，它是弱铁磁性的或铁磁性的；这与成分有关）。粗略地说，第一类矿物是强磁性的，第二类矿物是弱磁性的。磁铁矿和磁赤铁矿的饱和磁化强度比赤铁矿高 2.5 个数量级，磁化率高 4—5 个数量级。

同一标本的晶粒逐渐被捣碎，采用直接实验的办法；或者根据 d 的变化范围将岩石分为几组，统计对比它们的 k 值；确定

表 1 麦美奇(Меймечит)岩磁化率
与磁铁晶粒大小的关系

$d(\mu\text{m})$	标 本 数	κ_0 $10^{-3} \times 4 \pi \text{SI}$
50	21	3.7
10—50	15	3.6
5—10	36	3.4
3—5	30	2.8
3	28	2.5

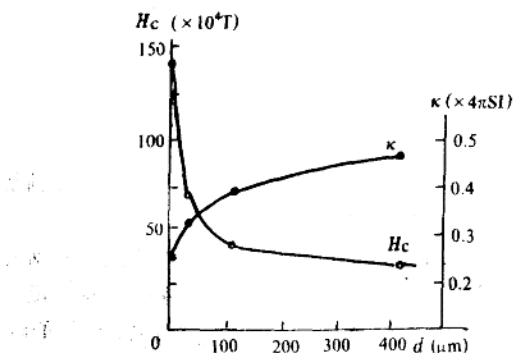


图 1 天然含钛磁铁矿的磁化率、矫顽力与晶粒大小的
关系[26]

κ_0 与晶粒 d 的关系。用 T. Nagata 的资料说明第一种方法 (图 1) [26]。从图上看, 磁性硬度增大, 即随着晶粒大小的减小, 其矫顽力增大。Б. В. Гусев 等人的著作中采用统计对比 κ 和 d 的方法, 根据所获资料编制表 1。测试标本是西伯利亚地台西北部的喷发麦美奇岩。测定了基性岩体的矿物的晶粒大小, 在

含量上浸染物占优势。五组标本的磁铁矿平均含量是一样的。根据作者的观点, 由于氧化作用的影响, 所测定的关系曲线与实际曲线有差别, 前者比后者有所加强。

所列出的测定结果表明, 磁铁矿晶粒减小时, 大约从 $60\text{ }\mu\text{m}$ 开始, κ_0 非常明显地降低; d 的变化大于几个数量级 (几个 μm) 时, κ_0 值大约降低 35—40%。我们指出, 在相同的晶粒大小的变化范围内, 赤铁矿的磁化率大约减小到 $\frac{1}{8}$ 。

晶粒大小对矿物磁性特征的影响的其他观点尚不清楚。我们已经看出, 微粒的尺寸小于某一临界值时, 由于磁畴边界的存在能量上是亏损的, 一个微粒由一个磁畴组成。对于磁铁矿, 单磁畴球状晶粒的计算的临界直径为 $0.03\text{ }\mu\text{m}$ 。微粒的形状对多磁畴结构的出现有很大影响。 $10 \times 1.5\text{ }\mu\text{m}$ 的磁铁矿针状连晶与单磁畴一样。钛磁铁矿晶粒中钛铁矿的微细薄层的形成, 也使晶粒的尺寸增大, 这时晶粒表现为单磁畴。

在单磁畴大小的球状晶粒的磁行为中, 热起伏起一定的作用。由磁场作用引起的晶粒磁矩取向稳定的时间几乎很小, 也就是说, 它们是超顺磁性的。在大于 $0.06\text{ }\mu\text{m}$ 的磁铁矿的近等轴晶粒中呈现铁磁性, 即只在多磁畴中出现这种情况。

对磁铁矿和赤铁矿计算同一数量级的边界能量时, 根据公式得到赤铁矿单磁畴晶粒的临界直径 $D_0 = 1500\text{ }\mu\text{m}$, 也就是说, 这个直径比磁铁矿大 50×10^3 倍。这个数值可能过高。专门的研究已经证实, 赤铁矿单磁畴的界限在 10 至 $15\text{ }\mu\text{m}$ 范围内 (Власов А. Я. 等, 1969), 或者在 10 至 $100\text{ }\mu\text{m}$ 范围内 (Danlop J., 1971)。 $0.5\text{ }\mu\text{m}$ 的赤铁矿晶粒, 被认为是超顺磁性的。由此可见, 赤铁矿晶粒大小的范围是非常宽的, 在这个范围内它们是铁磁性的和单磁畴的, 即具有很大的矫顽力和很小的磁化率 κ_0 ($10^{-5} \times 4\pi\text{SI}$)。很明显, 岩石的磁现象常常与单磁畴的赤铁矿和多磁畴的磁铁矿有关。

我们提醒一下, 岩石中存在的超顺磁性晶粒对磁化率有贡

献，但并不反映在剩余磁化过程中。含微细分散铁磁体的沉积岩的特征就在于此。

晶体构造的不均匀性对铁磁性晶粒的磁化率 κ_0 有影响。例如，氧化作用导致内部应力增加而产生不均匀性，即 κ_0 减小。正如已经确定的那样，在磁铁矿、赤铁矿、钛铁矿薄层的分界面上，由于它们的结晶网格不同，产生形变应力和位移应力。毫无疑问，在假象磁铁矿化时所产生的磁铁矿结构的不均匀性，与“纯”磁铁矿总数量减小的影响相比，对晶粒累积的总感应磁矩的影响不大。

由此可见，概括起来可以这样说，对于磁铁矿和含少量钛的钛磁铁矿及其他天然铁磁体，它们的起始磁化率的数值是存在明显差别的。随着晶粒尺寸的减小及内应力的增大， E_s 值减小；内应力通常与结构的不均匀性有关。磁化率是铁磁性矿物的结构敏感的特征。

含这些矿物包裹体的岩石的磁化率完全具有另外的意义。用 $0.5 \times 10^{-4} \text{ T}$ 的磁场所感应的磁矩 M ，来计算岩石的起始磁化率，即 $\kappa = 2M/V$ (V 是标本的体积)， κ 可以表示为如下形式：

$$\kappa = (\kappa_p V_p + \sum_i \kappa_i V_i) / V$$

式中， κ_i ——体积 V_i 中第 i 个造岩矿物的反或顺磁化率； κ_p ——铁磁性包裹体的磁化率； V_p ——铁磁性包裹体的总体积。

用 $\bar{\kappa}_n$ 表示所有 κ_i 的某一平均值，并考虑到 $\sum V_i \approx V \gg V_p$ ，我们得到 $\kappa = \bar{\kappa}_n + \kappa_p C$ ，其中 C 为体积含量。

从这个表达式得出如下结论：

1. 如果 $\kappa_p \approx \bar{\kappa}_n$ (例如在赤铁矿的情况下)，那么岩石的 κ 与铁磁体含量无关，也就是说， κ 不反映岩石中铁磁体的存在。

2. $\kappa_p C < \bar{\kappa}_n$ 时，实际上 κ 值也不受 κ_p 的影响。如果假设 $\bar{\kappa}_n = 10^{-5} \times 4 \pi \text{ SI}$ ， $\kappa_p = 1 \times 4 \pi \text{ SI}$ (磁铁矿)，那么在 $C \leq 10^{-5} \times 4 \pi \text{ SI}$ 时 (铁磁体的体积含量等于或小于 0.001%)，岩石的 κ 决定于造岩矿物的性质。 κ_p 减小时， C 的临界值增大，对于磁

黄铁矿 ($\kappa_p = 10^{-3} \times 4 \pi \text{SI}$), 平均为 1 %。

我们看出, 在这两种情况下, 根据剩余磁化强度的出现, 完全可以确定岩石中存在铁磁体。

3. $\kappa_p C > \bar{\kappa}_n$ 时, 随着 C 的增大, κ 线性地增大, 直到铁磁体的某些晶粒之间的磁作用不大为止 (甚至对于磁铁矿, C 值在 7 % 以下)。

钛磁铁矿成分的铁磁体对岩石 κ 的变化有抑制作用, 这一事实可以用简单的例子来说明。假设岩石的某一 κ 值是在磁黄铁矿含量变化 ΔC_p 时出现的 (磁黄铁矿在磁化率上是磁铁矿的“竞争对手”), 如果 κ 的变化与磁铁矿的含量 ΔC_m 有关, 那么 $\Delta C_m \leq 0.01 \Delta C_p$ 。

κ 和 C 的对比统计资料证实了这些结论。在 $C \leq 0.01\%$ (重量) 的情况下, 侵入岩磁化率一般与铁磁体含量无关。由此可以确定侵入岩 κ 值的平均“顺磁性水平”, 即 $\bar{\kappa}_n = 20 \times 10^{-6} \times 4 \pi \text{SI}$ [35]。至少在 $C = 10\%$ (重量) 以下, κ 和 C 之间保持线性关系。我们看出, 在侵入体范围内, κ 和 C 的线性关系一般是起作用的。

由此可见, 岩石磁化率反映了这样的事实: 如果 κ 值确实超过“顺磁性水平”, 则含有铁磁性矿物。因为 κ 值决定于 κ_p 与铁磁体含量 C 的乘积, 它不可能单值地与铁磁性矿物性质有关。由此得出结论: κ 是岩石中钛磁铁矿系列的铁磁性矿物含量的统计量, κ 的变化主要决定于铁磁性矿物的含量变化。这一事实恰恰在地质学中得到了有效的应用。

测定由地磁场 H_T 所感应出的岩石磁化强度 I_i , 很容易地换算成磁化率 κ 。这是研究岩石中磁性矿物含量的主要磁性方法。如果所谈及的是晶粒尺寸变化很小的内应力很弱的同一种铁磁体, 则在岩石的最典型的 C 值范围内, 这种方法是很精确的 (实际上除铁矿石以外, 应用了比较复杂的研究方案)。不固定的因素使简单的关系式 $\kappa = aC$ 变得复杂 (a 是常数), 有时引起含量 C 的解的非单值性问题。在这种情况下, 具有钛磁铁矿系列矿物“平均”性质的非常理想的铁磁体含量, 在岩石 κ 的变化中起

一定的作用。

“平均”铁磁体的概念，既不是形式上的，也不是用第一种观点能够说明的。现在我们讨论球状晶粒的视磁化率 κ' 与真磁化率 κ 的关系（图 2）。正如从曲线上看到的那样，在 κ 值不大的情况下， κ 的变化对视磁化率 κ' 的影响很小， κ' 接近极限值 $1/N$ （ N 是退磁系数）。不论用什么方法测定 κ 值的变化，实际情况的分析表明，必须认为这些因素的影响与铁磁体含量 C 的“随机”变化的影响相比，总是很小的。由此可见，可以把岩石磁化率看作是单值的磁性特征，提高了鉴定价值。

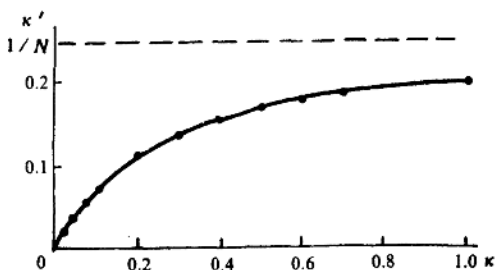


图 2 球状晶粒的视磁化率 κ' 与真磁化率 κ 的关系曲线

§ 2 岩石中磁性矿物分布的某些规律

现在我们叙述根据磁性矿物含量的信息，应用岩石磁性方法解决地质问题的基本原理。

1. 岩石中磁性矿物含量在很大的范围内变化：从痕量（小于 0.01%）到 7—10%。一般来说，不同时代的沉积层、杂岩、岩系及建造的磁化率是不同的。在地质填图时，可以利用磁化率进行岩石的划分和对比。常常用来划分粗略的等级：弱磁性、中等磁性和强磁性岩石。这些岩石分别对应于铁磁体的低、中、高含量。

2. 深成岩含不同岩浆结晶阶段形成的和次生作用下发生不