

磁参数工作中的几个问题

桂林冶金地质学院 王 钟 梁锦文

磁参数测量是磁法勘探的重要内容之一。岩、矿石磁性资料是磁法勘探设计和异常推断解释的地球物理依据。磁参数测定的质量好坏,在一定程度上影响其应用效果,本文针对磁参数测量中的若干问题进行了讨论,供有关同志参考。

磁参数工作应提供什么样的数据

磁参数工作主要是测定岩、矿石标本的视磁化率 κ' 和视余磁 J_r' ,对于定向标本还需测出 J_r' 的倾角 θ_r 和偏角 ϕ_r ,这是大家所熟悉的。但是,在实际工作中所提供的磁参数数据却很不统一,归纳起来有如下四种情况:

- (1) 只提供 κ' 和 J_r' ;
- (2) 提供 $J_i' (= \kappa' Z_0)$ 和 J_r' ;
- (3) 提供 $J (= J_i + J_r)$;
- (4) 提供经标本形状退磁改正后的 κ 和 J_r 。

我们认为,最后一种做法是正确的。标本的 κ' 和 J_r' 是物体磁性的基本数据,它与标本的形状有关。而经过标本形状退磁改正后的 κ 和 J_r 是物质磁性的基本数据,与标本形状无关,是具有共同语言的数据。例如一个等轴状标本测得 $\kappa' = 0.225 \text{ CGSM}$,另一个圆柱状标本测得轴向磁化率 $\kappa' = 0.462 \text{ CGSM}$,数据显然是不同的。但前者的 $N=4.2$,后者的 $N=20$,经退磁改正后两块标本的 κ 都是 6.00 CGSM 。我们只能根据 κ 来说明两种物质磁性相同,而不能根据 κ' 来说明两种物质的磁性不同。

致于(2)、(3)两种数据中的 $J_i' = \kappa' Z_0$ 和 $J' = J_i' + J_r'$ 则是错误的。值得指出的是这种做法有相当的普遍性。有人认为

$$\kappa_i' = \frac{5 \varepsilon_0 R^3 \Delta n_i}{Z_0 V} \times 10^{-6}$$

两边乘以 Z_0 则变为

$$J_i' = \kappa_i' Z_0 = \frac{5 \varepsilon_0 R^3 \Delta n_i}{V} \times 10^{-6},$$

不知道 Z_0 也没有关系,计算也省事,于是提供了这样的 J_i' 数据。实际上, κ 和 J_i 是两个概念不同的物理量, κ 反映物质的磁性本质,由物质成分、磁性结构等内在因素决定; J_i 则反映具有一定 κ 的物质在磁化场中的磁化特性,它除与 κ 有关外,还与磁化场有关。若 $\vec{T}_0$ 为磁化场,则有

$$\vec{J}_i = \kappa \vec{T}_0$$

$\vec{J}_i$ 与 $\vec{T}_0$ 的方向是一致的。在以地磁场为磁化场研究物质磁性时,上式中的 $\vec{T}_0$ 即代表地磁场

的总强度。磁秤法测参数，因磁秤只能测地磁场垂直分量，所以利用 Z_0 做为标本的磁化场，计算公式中的 Z_0 就是这样来的。弄明白了这一点，便可知道， $J_i' = \kappa' Z_0$ 这种数据实际上是 $J_i' z_0$ 。

对于 $J = J_i + J_r$ 这种数据，只有在已知 J_r 和 J_i 方向相同时才成立。在不知道 J_r 方向的情况下，笼统地提供 $J = J_i + J_r$ 这样的数据是无益的。

因此，磁参数工作只要能提供反映物质磁性的 κ 和 J_r 这样的基本数据就行了。

获得磁参数数据的方法技术问题

我国磁参数测定工作在方法技术上还是落后的。国外有些国家已实现了采样机械化，标本规格化，采用高精度仪器测量，并对测得的数据进行计算机处理。这里谈几点看法。

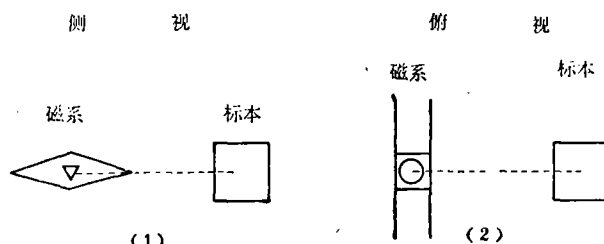
1. 标本规格化问题 手工采集的标本规格不一，形态复杂，体积、位置测量误差大，甚至无法控制，致使数据质量低劣，数据的利用受到限制。这是磁参数工作中长期存在的一个问题。有人在现行技术条件下，对手标本和规格化标本（轴径比为1的圆柱体）的测定结果进行了对比（表1）。实验数据表明，规格标本数据的质量有了明显的改善。实验本身还表明，只有标本规格化后，才能提高数据质量，才能使辅助设备及测试方法标准化。

表 1

对比项目	距离误差	体积误差	对中误差	相对误差
标本规格	厘米	厘米 ³	厘米	%
手 标 本	2	5	无法控制	30
圆 柱 标 本	0.2	0.5	0.2	5

适应机械化采样的技术条件，国内已有轻型汽油机（重3.5公斤）和金刚石钻头，这就为采集一定规格的标本创造了条件。

2. 磁秤法测定标本参数的位置问题 近年来，对于小体积标本和弱磁性标本，人们习惯于用磁秤法第二位置。采用这个位置的主要优点是 R 值可取得比较小。第二位置有两种摆法：摆法（1）——极端位置和摆法（2）——旁侧位置（图1）。极端位置 $R_{\min} > 5$ 厘米，旁侧位置 $R_{\min} > 10$ 厘米。在 R 较小时，标本不能看成是磁偶极子，磁系也不能看成是一个



磁秤法第二位置

图 1

点，因此出现了不满足磁偶极子条件的距离改正。但这仅适用于旁侧位置，对于极端位置是不适用的。冶金物探系统早在六十年代初期就已经不采用极端位置了，可是近十年来又盛行起来。我们觉得有必要重申不采用极端位置的理由。这里用双极磁场公式对两种摆法作如下粗略的计算（不考虑磁系磁场对标本的磁化影响）。设磁系长为 $2L$ ，标本长为 $2l$ ，标本中心到磁系中心的距离为 R ，则对于极端位置，标本在近磁极处和远磁极处的磁场分别为

$$\Delta Z'_{\text{极}} = \frac{M}{[(R-L)^2 + l^2]^{3/2}},$$

$$\Delta Z''_{\text{极}} = \frac{M}{[(R+L)^2 + l^2]^{3/2}}$$

式中M为标本的磁矩。这时，磁系所受的力矩为

$$\Delta Z'_{\text{极}} mL \cos \theta + \Delta Z''_{\text{极}} mL \cos \theta,$$

式中m为磁系的磁极强度。或写成

$$MmL \cos \theta \left\{ \frac{1}{[(R-L)^2 + l^2]^{3/2}} + \frac{1}{[(R+L)^2 + l^2]^{3/2}} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

对于旁侧位置，标本距磁系两极的距离是一样的，在磁极处的磁场为

$$\Delta Z'_{\text{旁}} = \Delta Z''_{\text{旁}} = \frac{M}{(R^2 + L^2 + l^2)^{3/2}},$$

磁系所受的力矩为

$$MmL \cos \theta \left\{ \frac{2}{(R^2 + L^2 + l^2)^{3/2}} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

以L = 5 厘米, l = 2 厘米 代入(1)、(2)式, MmLcosθ看作常数, 当R取不同值时, 可得出表2的结果。

表 2

R	力 矩 常 数	
	旁 侧 位 置	极 端 位 置
10	0.0012	0.0066
20	0.00022	0.00035
30	0.000070	0.000078
40	0.000030	0.000036
50	0.000015	0.000017

表2说明, 同一标本在同样观测条件下, 极端位置测的结果总比旁测位置测得的值大, 而且R 越小, 值越大。只有在R 足够大时, 两种摆法的测定结果才有可能趋于一致。由此可见, 极端位置是不满足磁秤法的理论前提的, 无法得到正确的数据。此外, 由于极端位置本身的弱点, 实际上所达到的误差比计算结果还大。图2是用磁铁矿粉(去掉Jr影响后)所得不同位置的κ'—R关系曲线。实验表明:

(1) 旁侧位置与第一位置结果基本一致;

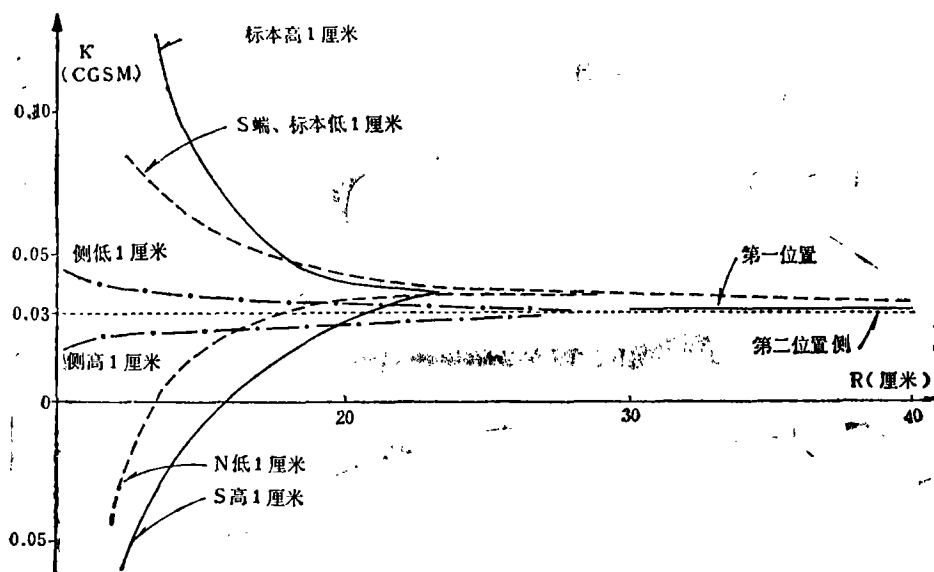


图 2

(2) 极端位置的 κ' 偏大;

(3) 当 $R < 25$ 厘米时, 极端位置对于对中误差反映灵敏, 如标本稍高或稍低, κ' 随 R 的减小而迅速变大或变小, 甚至出现负值;

(4) 当 R 更小时, 磁系磁极的磁场对标本磁化将出现图 3 所示的两种情况: 一是使 κ' 增大, 一是使 κ' 减小;

(5) 极端位置操作困难, 数据误差无法掌握, 手标本更是如此。

根据以上的理论分析及实验对比, 可得如下结论: 磁秤法第二位置的正确摆法是旁侧位置, 即将标本放在磁系旁侧中垂线上。

3. Z_0 问题 铁磁性物质的磁化率随磁化场的变化而变化。磁法勘探研究的磁铁矿感应磁场是在现代正常地球磁场的磁化下形成的。因此, 测定岩、矿石磁化率时, 也必须将标本置于正常地球磁场之中, 不能放在异常场中。只有这样, 才能由正确的 κ' 标本推算出正确的 κ' 矿体。磁秤法一般使用垂直磁秤, 所以该法用的标本磁化场是正常地球磁场的垂直分量 Z_0 , 即标本产地的 Z_0 。 Z_0 值通常是由地磁图上查得的, 使用时必须使测试点的实际 Z_0 值与查得的 Z_0 值一致, 否则将会出现无法控制的误差。例如同一块标本在不同点上测得如表 3 的结果, 数据 I、III 的测算都是对的, 但我们需要的是数据 I。数据 II 是错误的, 这个错误, 检查观测是发现不了的。

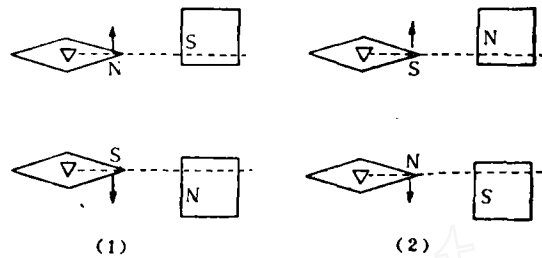


图 3
使 n 减小, $n_0 - n$ 增大, K' 大
使 n 增大, $n_0 - n$ 减小, K' 小, 甚至变成 $-K'$

表 3

数据编号	测试点	实际 Z_0 值	计算用 Z_0 值	κ'	误差
I	正常场	0.264	0.264	0.164	合格
II	异常场	0.364	0.264	0.316	合格
III	异常场	0.364	0.364	0.232	合格

剩余磁化强度的“退磁改正”

所谓退磁效应, 是指在外磁场磁化作用下, 有限介质内部产生的与物体磁化强度及物体形状有关的反磁化场的影响问题。对于剩余磁化强度, 因为它与现代磁化场无关, 所以不存在反磁化场, 也不存在退磁改正问题。但实际上我们是按公式

$$J_r = \frac{\kappa}{\kappa'} J_r'$$

进行余磁“退磁改正”的。如何理解这个问题呢?

我们知道, 有限磁介质在磁化场 Z_0 的磁化下, 介质内部产生的反磁化场 Z_e 为

$$Z_e = -N J_e$$

对于铁磁介质, 这里的 J 应包括 J_i 和 J_r 。而有效磁化场 Z_b 为

$$Z_b = Z_0 + Z_e$$

在标本参数测定条件下, 考虑某一轴向的情况, 当取正轴向时, 则有

$$J_{i\text{正向}} = \kappa Z_b = \kappa [Z_0 - N (J_{i\text{正向}} + J_r)] = \kappa Z_0 - N \kappa J_{i\text{正向}} - N \kappa J_r,$$

或

$$J_{i\text{正向}} = \frac{\kappa}{1 + N \kappa} Z_0 - \frac{N \kappa}{1 + N \kappa} J_r,$$

或

$$J_{\text{正}} = J_{i\text{正向}} + J_r = \underbrace{\frac{\kappa}{1+N\kappa} Z_0}_{\text{感磁}} - \underbrace{\frac{N\kappa}{1+N\kappa} J_r}_{\text{余磁}} + J_r \dots\dots\dots (3)$$

反轴向时, 类似的有

$$J_{\text{反}} = J_{i\text{反向}} - J_r = \underbrace{\frac{\kappa}{1+N\kappa} Z_0}_{\text{感磁}} + \underbrace{\frac{N\kappa}{1+N\kappa} J_r}_{\text{余磁}} - J_r \dots\dots\dots (4)$$

测量参数时, 是按下面两个公式来计算标本的视磁化率和视余磁的:

$$\kappa' = \frac{1}{2Z_0} (J_{\text{正}} + J_{\text{反}}) \dots\dots\dots (5)$$

$$J_r' = \frac{1}{2} (J_{\text{正}} - J_{\text{反}}) \dots\dots\dots (6)$$

将(3)、(4)式代入(5)、(6)式得

$$\kappa' = \frac{\kappa}{1+N\kappa} \dots\dots\dots (7)$$

$$J_r' = -\frac{\kappa'}{\kappa} J_r \dots\dots\dots (8)$$

显然, 对于铁磁性标本, 由于余磁影响了退磁场, 使感磁增加了一个余磁改正项 $\pm \frac{N\kappa}{1+N\kappa} J_r$ 。

将 J_r 与感磁的余磁改正项归并在一起, 便出现了(8)式这种形式。仿照 κ' 引进了 J_r' 。因此, 余磁“退磁改正”并不是自身的需要, 而是 J_r 对 J_i 退磁效应的影响, 为数学处理上的方便而引进的, 它与感磁退磁改正的意义是有区别的。

由(8)式可知, 余磁要不要做退磁改正, 完全由 κ' 的大小决定, 与 J_r 本身无关。

强磁性标本的参数测定问题

在一些强磁性铁矿区经常测到很大的 κ' 值, 并且出现 $N\kappa' > 1$ 而使 κ 变为负值。如何认识这种反常现象和解决这个问题, 值得我们重视。

1. κ' 具有临界值 根据 $\kappa = \kappa' / (1 - N\kappa')$ 及介质磁化率的物理意义可知 $\kappa' < 1/N$ 。这就是说, 在弱磁场中测得的标本视磁化率是以 $1/N$ 为临界值的。 κ' 不能大于 $1/N$, 也不能等于 $1/N$, 因为这样 κ 就没有意义了, κ' 只能趋近于 $1/N$, 在这种情况下, κ 可以趋于无穷大。图4计算出 N 为不同值时的 $1/(1 - N\kappa')$ 和 κ' 的函数关系曲线, 曲线明确地指出, κ' 在任何 N 值时都有确定的临界值。从这个意义上讲, 实测的 κ'_{max} 是有界的, 如等轴状标本 $N=4.2$, 则 $\kappa'_{\text{max}} < 1/4.2$, 即 $\kappa'_{\text{max}} < 0.238$ 。 κ' 及 κ 都不能是负的。

2. J_r 很大时对 κ' 测算的影响 前面已指出, 铁磁性物质的磁化率不是常数, 它随磁化场的

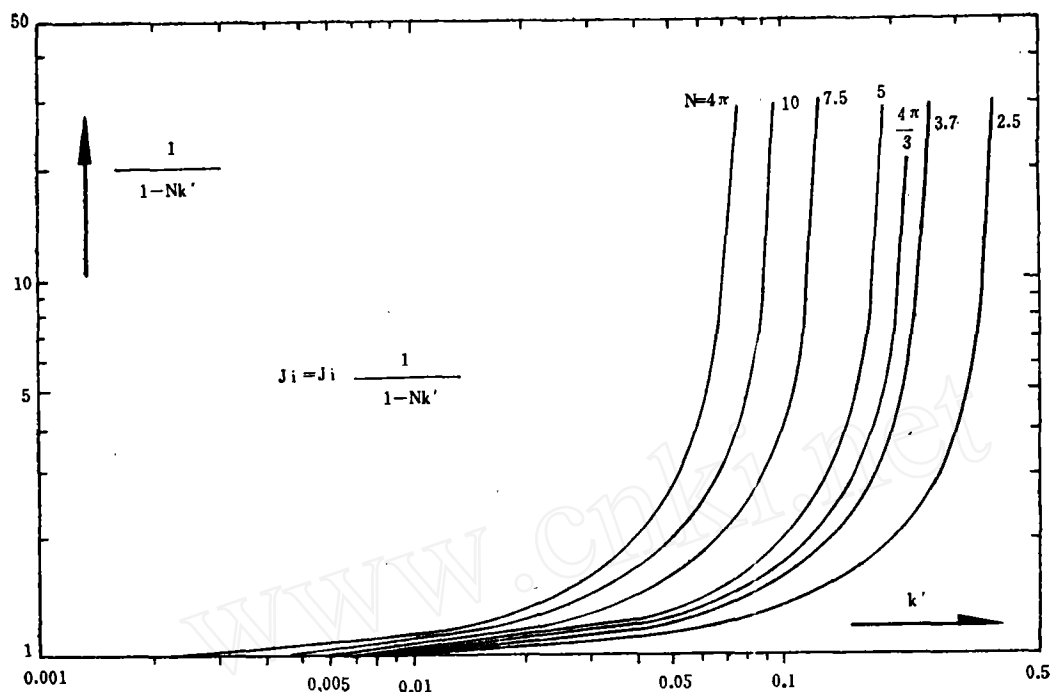


图 4

变化而变化。当磁化场为零时，铁磁性物质有一原始的磁化率 κ_0 ，磁化场增大， κ' 将迅速增大，并在磁化场达到一定数值时达到极大值；磁化场继续增大， κ' 将较缓慢地减小。磁法勘探研究岩、矿石磁化率是在弱磁化场（小于1奥斯特）条件下进行的，这个弱磁化场是以当地正常地磁场垂直分量 Z_0 为标准的。某些强磁性铁矿标本常具有较大的余磁，例如许多地区都曾测到级次为 $n \times 1.0 \text{ CGSM}$ 的余磁。在用磁秤法测定标本 κ' 时，这样强大的余磁将在标本内部产生退磁场 $-NJ_r$ ，数值可达几到十几个奥斯特，使标本的正常磁化场增大或减小（标本翻转）许多倍。以第二位置为例的磁秤法公式将变为

正向向

$$\kappa'_1 = \frac{10\epsilon R^3}{Z_{01}V} \Delta n_1 \times 10^{-6} \text{ CGSM}$$

反轴向

$$\kappa'_2 = \frac{10\epsilon R^3}{Z_{02}V} \Delta n_2 \times 10^{-6} \text{ CGSM}$$

式中 κ'_1 、 κ'_2 为正、反轴向的视磁化率， $Z_{01} = Z_0 + NJ_r$ ，

$Z_{02} = Z_0 - NJ_r$ ， Δn_1 、 Δn_2 为正、反向的读数差，因 J_r 的影响而不同。但实际计算又是按不考虑 J_r 影响的常规公式进行的，因此无法得到正常地磁场中的 κ' 值，甚至出现 $\kappa' > 1/N$ 的反常现象，其实这是一种错误。

3. N值对 κ' 的影响 当实测标本 κ' 值接近临界值时，N值不准的影响是不可忽视的。对于不规则标本，这个影响更大。我们知道，等轴状标本的退磁系数是

$$N_x = N_y = N_z = 4\pi/3 \approx 4.19,$$

一般来说, 标本三个轴向退磁系数之和应满足

$$N_x + N_y + N_z \leq 4\pi (\approx 12.57)。$$

例如, 取 $N \approx 4.2$, 临界值为 $1/N \approx 0.238$, 若 $\kappa' \approx 0.237$, 则 $\kappa \approx 51.52$; 若用 $N \approx 4.0$, 则 $\kappa \approx 4.56$ 。相差这样大的 κ 值是无法用于异常解释的。从图 4 中也可明显地看出, 当 $\kappa' \rightarrow 1/N$ 时, N 的取值很关键, 稍有不慎就会造成错误结果。

4. 方法技术上的问题 由于上述复杂因素, 再加上我们在方法技术上的不严格, 在强磁性铁矿标本的 κ' 测定中, 必然会得到许多难以理解的数据, 致使结果无用。这是值得重视的。

强磁性铁矿标本 κ' 和 J_r' 的测定

1. 在 $Z_0 = 0$ 的条件下测定 J_r' 及 κ_0' $Z_0 = 0$ 时, 外磁化场为零, 原始视磁化率 κ_0' 是个常量, 有利于突出余磁 J_r' 。这时对 κ_0' 来说, 只有一个因 J_r' 引起的标本内部的退磁场 NJ_r' 做为磁化场。因此磁秤法公式 (以第二位置某一轴向为例) 将变为正向

$$\varepsilon(n_0 - n_1) \times 10^{-5} = \frac{V[\kappa_0'(-NJ_r' + J_r')]}{R^3} = \frac{V}{R^3}(1 - N\kappa_0')J_r',$$

$$\text{反向} \quad \varepsilon(n_0 - n_2) \times 10^{-5} = \frac{V[\kappa_0'(NJ_r') - J_r']}{R^3} = -\frac{V}{R^3}(1 - N\kappa_0')J_r',$$

两式相减得

$$J_r' = \frac{5\varepsilon R^3(n_2 - n_1)}{V(1 - N\kappa_0')} \times 10^{-5} \text{ CGSM},$$

式中 κ_0' 需用实验方法确定。具体做法是, 先将标本在强交变磁场中退磁, 使 $J_r' = 0$, 然后在人工磁场中测出 κ' 与磁化场 Z_0 关系曲线的前枝, 改变 3~4 个 Z_0 的数值即可 (如使 $Z_0 = 0.01, 0.02, 0.03, 0.1$), 根据 $\kappa' \sim Z_0$ 曲线的趋势求得 $Z_0 = 0$ 时的 κ_0' , 代入上式即可得 J_r' 。

2. 测定在正常地磁场下标本的 κ' 这时只需将已退磁 ($J_r = 0$) 的标本放在当地正常地磁场 Z_0 条件下, 用常规方法即可准确地测得 κ' 。

3. 实验室中人工磁场装置的设计 以上 $Z_0 = 0$ 的条件及 Z_0 的变化条件都是借助人工磁场装置来实现的, 其原理与磁秤格值仪所用的赫姆霍兹线圈相同, 直径以 2.0~2.5 米为佳, 均匀场范围应保证 0.6~1.0 米, 此外, 双线圈法具有轻便、适于野外应用的特点, 也可采用。

4. N 值测定 谈到 N 值影响及 N 值测定问题, 这里不能不再次强调标本的规格化问题。N 值测定方法比较简单, 将要研究的矿石标本加工成粉末 (120 网目 $\pm$), 装在标准球壳内, 测得 κ' 球, 并已知其 $N_{\text{球}} = 4\pi/3$; 同样的粉末装在常用的标本模型 (如柱体、立方体等) 中, 测得 $\kappa'_{\text{标}}$ (非等轴状标本应测三个轴向)。由于球及标本模型装的是同一种矿粉, κ 值相同, 故

有

$$\frac{\kappa'_{\text{球}}}{1 - N_{\text{球}} \kappa_{\text{球}}} = \frac{\kappa'_{\text{标}}}{1 - N_{\text{标}} \kappa_{\text{标}}},$$

由此得

$$N_{\text{标}} = \frac{4\pi}{3} + \frac{1}{\kappa_{\text{标}}} - \frac{1}{\kappa_{\text{球}}}$$

式中之 κ' 值应用高精度仪器测定。

“负” κ' 问题

前面已指出, κ 或 κ' 都不应是负值。关于参数测定中常碰到的“负” κ' 问题,也是令人费解的。我们认为,在参数测定中有时遇到“负” κ' 值,是错误的数据,产生“负” κ' 值的原因,概括起来有以下几点:

1. 标本 κ' 很小,在磁秤法绝对误差范围内(通常指0.0005CGSM以下),这时“负” κ' 是误差造成的。特点是数值较小,对此须换用高精度仪器重新来测定。

2. 使用极端位置,操作不严格,所取R值偏小,是很容易造成“负” κ' 值的另一原因。对此只需采用正确位置,严格操作技术,也是可以解决的。

3. J_r 过大的影响,如前所述,对此采用前面介绍的先测 J_r ,再测 κ' 的方法,即可解决“负” κ' 问题。

4. 标本磁性矿物分布极不均匀,造成标本的几何中心与磁中心严重地不一致。这时重复观测误差往往无法满足要求。对此,可采用粉末标本测定 κ' 。表4的例子是有说服力的。

表 4

标本号	观测次数	岩 心				粉 末			
		x	y	z	平 均	x	y	z	平 均
2921	1	-1375	-815	-589	-926	1040	1100	1070	1070
	2	1915	-402	522	678	985	1075	1070	1043
	3	529	-94	135	188	1050	1020	1070	1046
2894	1	254	2130	-188	732	1300	1260	1100	1220
	2	-70	3490	-3140	-532	1285	1255	1110	1216
	3	-614	2240	-5380	-1251	1010	795	1185	996
	4	2290	-5	845	1029	1050	1020	1070	1046

总之,铁磁性标本的“负” κ' ,并不是客观存在的,而是由于不满足均匀磁化条件和测量的方法技术不当造成的一种假象。因此,实际工作中如遇到“负” κ' 问题应分别情况妥善处理。