

# 沉积变质型铁矿的磁各向异性及其 在磁异常解释中的应用

### 李学义 陈磊光 李万有

本文研究了斜磁化条件下磁各向异性体 磁荷的分布及其对异常场的影响,总结了沉 积变质型铁矿向斜状矿体基本构造模式的磁 场特征,为解释向斜状矿体磁异常提供了理 论依据,为计算磁各向异性体(二度)的异 常场利用了分块试凑法,并给出了在某矿区 应用该方法取得地质效果的实例。

### 沉积变质铁矿的磁各向异性

根据铁磁学和岩石磁学理论,含铁磁性 矿物的岩石的磁各向异性有三种:①结晶的 各向异性,②形状的各向异性,③结构构造 的各向异性。

沉积岩、喷出岩、侵入岩由于磁性矿物 结晶的各向异性以及磁性矿物定向排列不明 显,所以磁各向异性不大。一般变质岩和深 成岩磁各向异性比较明显。当铁磁性矿物具 有条带状结构时,磁各向异性表现最强烈。

本文讨论的沉积变质型铁矿的磁各向异 性系指矿石结构构造的各向异性,即磁铁矿 成层定向排列与硅质类矿物相间叠合成条带 状结构。在现代地磁场作用下,平行于层理 方向的磁化率(к<sub>n</sub>)大于垂直层理方向的磁 化率( $\kappa_{\perp}$ ),即 $\kappa_{\parallel}$ /> $\kappa_{\perp}$ ,一般要大2~3 倍,表现出强烈的各向异性。这是由于由若 干磁铁矿薄片构成的矿石在垂直于层理方向 上比平行于层理方向上的退磁作用强。 $\kappa_{\parallel}$ /  $\kappa_{\perp}称为岩石磁化率各向异性系数。显然,若$  $<math>\kappa_{\parallel} = \kappa_{\perp} = \kappa$ ,则表示岩石磁化率各向同性。

我们对晋北几个沉积变质型铁矿矿区的 矿石标本进行了磁各向异性测定,发现磁各 向异性的现象十分强烈(见附表)。

我国其他地区的沉积变质铁矿的磁各向 异性现象也十分明显,如迁安水厂矿区κ<sub>π</sub>/ κ<sub>1</sub>=1.9;弓长岭铁矿二矿区κ<sub>π</sub>/κ<sub>1</sub>=1.8。

### 磁各向异性体的磁荷分布

### 及其对异常场的影响

在磁各向异性体中,磁荷不仅分布在表 面(面磁荷),也可能存在于物体的内部。 现在引入磁化率张量来描述磁各向异性<sup>[3]</sup>, 感应磁化强度和磁化场分量的关系在任意座 标系统中可利用磁化率张量来确定:

 Ik = кk1T1
 k, l=1,2,3
 (1)

 式中约定省略和的符号, кk1-磁化 率张量。

8) <u>(</u>	n×10⁻⁺CGSM			$Jr \times 10^{-1} CGSM$		- 8
	кЛ	КТ -	к <i>Ц</i> /кТ	1//	14	- 11, 11 <u>-</u>
Jш	111891	38863	2,83	22598	6790	3.32
НGш	242592	41431	3.2	338385	24979	13.5
B 峪	18765	11077	1.7	3682	1024	3.6
SY坪	57580	24230	2.37	11980	1590	6.13
SP	91458	35839	2.55	20459	4902	4.17

1

在磁各向异性体表面的面磁荷密度  $\sigma$ 分布,  $\sigma = \vec{l} \cdot \vec{n}$ , **n** 为磁性体表面外法线的单位 向量, 显然:

$$\sigma = n \cdot lcos(n, l)$$
 (2)  
悠(1)式代人(2)式 计发程应的期标: 1展开得。

$$\sigma = (\kappa_{11}T_1 + \kappa_{12}T_2 + \kappa_{13}T_3)n_1 + (\kappa_{21}T_1 + \kappa_{22}T_2 + \kappa_{23}T_3)n_2$$
  
+  $(\kappa_{31}T_1 + \kappa_{32}T_2 + \kappa_{33}T_3)n_3$  (3)  
在磁各向异性体中的体磁荷密度 $\rho$ , 用 $y_k$ (k=1, 2, 3)表示磁性体的点座标,则

$$\rho = -\operatorname{div} \overrightarrow{\mathbf{I}} = -\frac{\delta \mathbf{I}_{k}}{\delta \mathbf{y}_{k}} = -\frac{\delta \kappa_{k1}}{\delta \mathbf{y}_{k}} \mathbf{T}_{1} - \kappa_{k1} \frac{\delta \mathbf{T}_{1}}{\delta \mathbf{y}_{k}}$$

由于地磁场是均匀的, 故dT<sub>1</sub>/d $y_k = 0$ ,

$$\rho = -\frac{\delta \kappa_{k1}}{\delta y_k} T_1 - \frac{\delta \kappa_{k2}}{\delta y_k} T_2 - \frac{\delta \kappa_{k3}}{\delta y_k} T_3$$
(4)

式中:

2

$$\frac{\delta \kappa_{k1}}{\delta y_{k}} = -\Delta \kappa \left[ \left( 2 \frac{\delta \alpha_{1}}{\delta y_{1}} + \frac{\delta \alpha_{2}}{\delta y_{2}} + \frac{\delta \alpha_{3}}{\delta y_{3}} \right) \alpha_{1} + \frac{\delta \alpha_{1}}{\delta y_{2}} \alpha_{2} + \frac{\delta \alpha_{1}}{\delta y_{3}} \alpha_{3} \right] \\ \frac{\delta \kappa_{k2}}{\delta y_{k}} = -\Delta \kappa \left[ \frac{\delta \alpha_{2}}{\delta y_{1}} \alpha_{1} + \left( \frac{\delta \alpha_{1}}{\delta y_{1}} + 2 \frac{\delta \alpha_{2}}{\delta y_{2}} + \frac{\delta \alpha_{3}}{\delta y_{3}} \right) \alpha_{2} + \frac{\delta \alpha_{2}}{\delta y_{3}} \alpha_{3} \right] \\ \frac{\delta \kappa_{k3}}{\delta y_{k}} = -\Delta \kappa \left[ \frac{\delta \alpha_{3}}{\delta y_{1}} \alpha_{1} + \frac{\delta \alpha_{3}}{\delta y_{2}} \alpha_{2} + \left( \frac{\delta \alpha_{1}}{\delta y_{1}} + \frac{\delta \alpha_{2}}{\delta y_{2}} + 2 \frac{\delta \alpha_{3}}{\delta y_{3}} \right) \right]$$
(5)

在二度情形下,  $y_1$ 轴平行磁各向异性体的走向时,  $\alpha_1 = 0$ ;  $\alpha_2 = -\sin J$ ;  $\alpha_3 = \cos J$ ; J为层理倾角。于是,可以导出:

$$\rho = \Delta \kappa \left[ \left( -2\cos J \frac{\delta J}{\delta y_2} - \sin J \frac{\delta J}{\delta y_3} \right) \cdot (-\sin J) - \cos^2 J \frac{\delta J}{\delta y_3} \right] \cdot T_2 + \Delta \kappa \left\{ \sin^2 J \frac{\delta J}{\delta y_2} + \left[ (-\cos J) \frac{\delta J}{\delta y_2} - 2\sin J \frac{\delta J}{\delta y_3} \right] \cdot \cos J \right\} \cdot T_s$$
(6)

上式是在斜磁化条件下任意截面的磁各向异性二度体体磁荷密度的公式。

### 1.斜磁化条件下理论模型计算结果分析

理论模型设计十分简单(见图1文字说明)。实际上以半圆柱体模型为例加以分析就够 了。

在平缓向斜层理的半圆柱体中, P( $y_2, y_3$ )为体内任意一点,该点的切线与 $y_2$ 轴正向的 夹角为层理的倾角(图2),其函数表达式: J(P) =  $tg^{-1} \frac{y_3}{y_2} \pm \frac{\pi}{2}$ ,对J(P)求微分:

 $\frac{\delta J}{\delta y_2} = -\frac{y_3}{r^2}, \qquad \frac{\delta J}{\delta y_3} = \frac{y_2}{r^2},$   $\mathbb{K} \oplus r^2 = y_2^2 + y_3^2$   $\mathbb{K} \Delta \mathbb{K} (6) = \frac{y_2}{r^2}, \qquad \frac{y_3}{r^2} = \frac{1}{r^2},$   $f = \Delta \kappa - \frac{y_2}{y_2^2 + y_3^2}, \qquad \frac{y_3}{r^2} = \frac{1}{r^2}, \qquad \frac{y_3}{y_2^2 + y_3^2},$  $= \Delta \kappa - \frac{1}{r^2} (y_3 T_3 + y_3 T_3)$ 

(7)



垂直分量 Za 的影响 a-1, b-1: 单斜层理的三角柱体; a-2, b-2: 向斜层理的三角柱体; a-3, b-8, 向斜层理的半圆柱体; a-4, b-4: 背斜层理的半圆柱体; ----各向同性Za曲线; ——各向异性Za曲线; 磁化场:垂直磁化一1 奥斯特, 斜磁化-io=55°,0.54奥斯特; 各向同性: к#=кi=0.02CGSM; 各向异性: ки=0.1, к」= 0.02CGSM

磁各向异性对异常场

图 1





磁化场:  $i_0 = 0$ °,  $H_0 = 1 奥斯特$ 

2

ŕ





图 5 向(背)斜层理半圆柱体磁荷密度(ρ) 分布示意图

讨论: (1)当90°<J<180°时,因tgio= T<sub>3</sub>/T<sub>2</sub>, T<sub>3</sub>=T<sub>2</sub>tgio, (7)式可写为:

$$\rho = \Delta \kappa \cdot \frac{1}{r^2} (y_2 + y_3 tgi_0) T_2$$

式中各项均大于零, 故 $\rho > 0$ 。 (2)当 $0^{\circ} < J < 90^{\circ}$ 时, 同样  $\rho = \Delta \kappa \frac{1}{r_{2}} (y_{2} + y_{3} tgi_{0})$ 

式中 $y_2$ 定义为负,若- $y_2$ + $y_3$ tgi<sub>0</sub>>0, 由tg $\varphi$ = $y_3/y_2$ ,得出:

当i<sub>0</sub> = 55°时:在55°<J<90°的区间内 ρ<0;在55°>J>0°的区间内则ρ>0。

当 $J=55^\circ=i_0$ 时,由于dJ/dyk=0,  $\rho$ =0。

J=145°时, ρ>0而且值最大。

因此,在图 1 a-3 的 模 型 中,由于 体磁荷的不均匀分布与面磁 荷 的 共 同作用 下,使得异常场Za曲线受到了严重的畸变, 在ρ>0部份对应的曲线上Za大幅度 降低, 形成十分明显的不对称的Za曲线,并且"双 峰"异常间的负值部份向北移动。

在水平磁化的极端情况下,  $T_3 = 0, T_2$  $\neq 0$ , 根据公式(7):  $\rho = \Delta \kappa \frac{y_2}{r^2} T_2$ 。仍

然分两个区间讨论

(1)当180°>J>90°时,y₂为正向, 故ρ处处大于零。

(2)当90°>J>0°时,y₂为负向,故
 ρ处处小于零。

(3)当J=180°或0°时,即i₀=J又dJ /dy⊾=0,故在向斜轴线上ρ=0,无体磁 荷存在。

因此,在ρ>0对应的上方出现负异常, 而在ρ<0的上方出现正异常。理论 模型计 算结果证实了以上分析的正确性(图3)。

对于平缓背斜层理的倒半圆柱体模型 (图4)仿照上面的讨论,此时,定义y<sub>3</sub> 为负。

$$\rho = \Delta \kappa \frac{1}{r^2} (y_2 T_2 - y_3 T_3)$$

 $= \Delta \kappa (y_2 - y_3 tgi_0) T_2$ 

在180°>J>90°和0°<J<55°的区间内 $\rho$ <0,在55°<J<90°的区间内 $\rho$ >0,当J =  $i_0$ =55°时, $\rho$ =0。因此,由于体磁荷的不均匀分布在与面磁荷的共同作用下造成了Za曲线极大值南移,其Za曲线形态与各向同性时的Za曲线相似,只是强度相应地降低。图5是向(背)斜层理半圆柱体磁荷密度( $\rho$ )分布示意图。

2.磁各向异性系数(κ<sub>1</sub>/κ<sub>1</sub>)与Za异
 常场的关系

同样在上述模型条件下,改变κ<sub>#</sub>/κ<sub>1</sub>的 值,如κ<sub>#</sub>/κ<sub>1</sub>=2,3,5。由图6可见, 各向异性系数愈大对异常场Za的影响愈大。 因此,各向异性系数的变化并不改变各向异 性对异常场影响的基本特征。显然,各向异 性系数愈小就愈接近于各向同性的异常场的 特征。

分析上述理论模型的计算结果可以得出 以下几点认识:

①沉积变质型铁矿呈条带状结构,因而 决定它有磁各向异性的机理。在地磁场作用



下产生非均匀磁化。磁各向异性层理产状弯曲时,体内产生体磁荷,它的分布也是不均匀的,其分布状态取决于层理的变化和相对于地磁场的位置。因而对异常场产生十分重要的影响,特别是对向斜状矿体的影响最大。

②对于向斜状矿体在向斜轴线附近上方 的异常场Za出现相对低值:紧密 向斜 为鞍 状异常,平缓向斜出现"双峰"异常间的负 值区。在斜磁化条件下向斜与地磁 场(T) 交角大的一翼,其异常场Za大幅 度降 低, 甚至异常不明显。这就是说,在向斜轴部矿 体的厚大部位对应的是Za曲线的相 对 低 值 或负值。这就为我们正确解释向斜状矿体的 磁异常提供了理论依据。

③过去在解释沉积变质型铁矿的磁异常 时,常常笼统地当作各向同性来处理,忽略 了磁各向异性在地磁场作用下产生非均匀磁 化的影响,尤其是对向斜状矿体,往往导致 解释上的错误。实际上,磁各向异性体的有 数磁化强度在各个部份其大小和方向都是不 相同的。

### 3.磁各向异性与退磁效应

从磁各向异性的观点来看,退磁效应属 于形状的各向异性,即与物体形状和磁化场 相对位置所引起的磁场强度的变异有关。与 上面所论述的由于结构构造的各向异性引起 的非均匀磁化是两种不同的原因。为了证明 这一点,计算一个向斜层理的三角棱柱体在 斜磁化条件下经退磁改正后的Za曲线,与同 样几何模型的各向同性经退磁改正的Za曲 线进行比较(退磁方法见参考文献6)如图 7 所示。

从图 7 可见,各向同性体和各向异性体 在磁化场的作用下,所引起的非均匀磁化是 不同的。因此对于磁各向异性体的磁场不仅 取决于物体的形状和与磁化场的相对位置, 而且也取决于物体本身的磁性分布状态(即 物体本身的磁性结构)。同样也证明磁各向 异性和退磁效应是两种不同的因素,后者对 于各向同性体和异性体都是客观存在的、普 遍的,两者是又相联系而又相互区别的。

为了避免概念上的混淆,形状的各向异 性仍称为退磁效应,结构构造的磁各向异性 则简称为磁各向异性。



# 沉积变质型铁矿向斜状矿体 的磁场特征

利用几个已经详细勘探过的向斜状矿体 的实际材料,结合理论模型计算结果,提出 向斜状矿体构造模式的基本磁场特征。

1.几种向斜状矿体构造模式的磁场特征

(1)半封闭型向斜状矿体(即保存了一 个封闭端的向斜)

①平面磁场特征:在大比例尺地面磁测 平面等值线图上,高值异常带呈任意方向的 "U"或"V"字型,即呈喇叭状,一端张 开,另一端收敛。在高值异常带所包围的范 围内为宽缓的正值或不太强的负值。高值异 常带周围为负等值线圈所封闭。高值异常带 的收敛端(即向斜的封闭端)之北侧伴生有 强烈的负异常,向斜底部界面埋藏愈浅,负 异常的强度愈大。

②剖面磁场特征:通过高值异常带张开 处的剖面,Za曲线具有鞍状异常的特征。向 斜愈开阔,鞍状特征愈明显,甚至出现负值。 通过封闭端附近的剖面,鞍状异常趋于消 失,而出现单峰值异常。

(2)全封闭型的向斜状矿体(即封闭端 保存完整的向斜状矿体)

磁场特征基本上与①相**似,只是在平面** 等值线图上高值异常带迂回封 闭,两端收 敛。

山西吕梁地区某向斜异常 可 作 为 实例 (图8),来说明上述两种矿体的磁场特征。

(3)复杂型向斜状矿体
 由于连续紧密褶皱形成两个或多个封闭

 图7 磁谷向异性与各向 同性体退磁
 ー・ー・一谷向同性、
 κ<sub>A</sub> = κ<sub>L</sub> = 0.1 CGSM(用有 限元法退磁);
 一各向异性、κ<sub>A</sub> = 0.1,
 κ<sub>L</sub> = 0.2 CGSM(未退磁);
 ー - 各向异性、κ<sub>A</sub> = 0.1,
 κ<sub>L</sub> = 0.02 CGSM(用有限元 法退磁);
 磁化场、T<sub>Z</sub> = 0.446奥斯特;
 T<sub>1</sub> = 0.305奥斯特

或半封闭、斜歪向斜叠加,在平面上呈"S"型,在剖面上呈"W"字型产出。高值异常带迂回反转,平面磁场特征十分复杂,其局部特征与上述的①、②两种模式的磁场特征 相似。例如,山西五台地区某复杂向斜异常 就属此类(图9)。

### 2. 判别向斜状矿体应注意的几个问题

1.考虑到沉积变质型铁矿的磁各向异 性,可从大比例尺地磁图上识别向斜状矿 体的存在。理论和实践证明关键在于研究磁 场的高值异常带,鞍状异常或双峰异常之间 负值区等的变化情况。理论模型计算结果表 明,向斜状矿体和背斜状矿体所引起的异常 场的差别是很明显的(图10)。

2.必须指出, 在我国斜磁场化条件下, 向斜状矿体的磁场特征十分复杂。向斜状矿 体的北翼(北西翼或北东翼)由于受磁各向 异性和退磁效应的影响, 使该翼上的场强大 幅度降底, 有时甚至很不明显。在进行磁异 常解释时, 对此应特别注意。

3. 沉积变质型铁矿向斜状矿体的产生总 是和褶皱构造相联系的,受前寒武纪基岩构 造的控制,因此在判别向斜状矿体的存在 时,应当充分利用地质资料。

# 计算磁各向异性体(二度)异

常场Za的分块试凑法

#### 1.方法原理

当已知磁各向异性二度体的**截面形状和** 层理位置及 κ<sub>μ</sub>, κ<sub>⊥</sub>, 根据层理倾角**J**的变



图8 山西吕梁地区某向斜异常的平面图(上图)和剖面图(下图)



图 9 山西五台地区某复杂向船异常 4 线剖面图

化分块计算每一块磁性体的有效磁化强度的 大小和方向,然后对每块分别进行近似退磁 改正,最后利用每块的计算结果进行场的计 算。

(1)分块计算有效磁化强度[s及倾角j'

在直角座标系中, x轴与磁各向异性体 的走向平行, 层理的倾角为J。 假定沿层理 的磁化率( $\kappa_{\mu}$ )和垂直于层理 平 面的磁化 率( $\kappa_{\perp}$ )是 不 变 的 , 且  $\kappa_{\mu} > \kappa_{\perp}$  ,  $\Delta \kappa = \kappa_{\mu}$ -  $\kappa_{\perp}$  , 则可以得到如下的表达式:

$$\begin{pmatrix} l_x \\ I_y \\ I_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \kappa_{''} & 0 \\ 0 & (\kappa_{''} - \Delta_{\kappa} \sin^2 J) \\ 0 & (\Delta_{\kappa} \cos^2 J) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{pmatrix}$$
(8)  
( $\kappa_{''} - \Delta_{\kappa} \cos^2 J$ ) · (8)  
( $\kappa_{''} - \Delta_{\kappa} \cos^2 J$ ) · (8)  
( $\kappa_{''} - \Delta_{\kappa} \cos^2 J$ ) · (8)  
( $\kappa_{''} - \Delta_{\kappa} \cos^2 J$ ) Ty  
+ $\Delta_{\kappa} \cos J \sin J T_z$   
I<sub>1</sub> =  $\Delta_{\kappa} \cos J \sin J T_y + (\kappa_{''} - \Delta_{\kappa} \cos^2 J) T_z$   
即: I<sub>2</sub> =  $(\kappa_{''} - \Delta_{\kappa} \sin^2 J)$   
+ $\Delta_{\kappa} \cos J \sin J t g_{i_0} T_y$   
I<sub>2</sub> =  $(\Delta_{\kappa} \cos J \sin J + (\kappa_{''} - \Delta_{\kappa} \cos^2 J))$   
tgj\_0 Ty  
式中, tgi\_0 =  $T_z/T_y$ , i\_0 为地磁场倾角。  
于是:

 $J_{s} = \sqrt{\frac{1}{I_{v}^{2} + I_{z}^{2}}}$  (9)

 $tgj' = \frac{\Delta_{\kappa} \cos J \sin J + (\kappa_{\prime\prime} - \Delta_{\kappa} \cos^{2} J) tgi_{0}}{(\kappa_{\prime\prime} - \Delta_{\kappa} \sin^{2} J) + \Delta_{\kappa} \cos J \sin J tgi_{0}}$ (10)

当磁各向异性体走向与x轴存在一夹角 A(磁方位角)时,可以导出相应的公式, 此处不再赘述。

(2)分块退磁的近似处理

遗憾的是, 目前难于给出规则磁各向异 性体的退磁系数。为解决这一困难, 我们采 取了相应的分块退磁的方法, 将各块近似地 用均匀磁化规则形体(如圆 柱 体 、椭 圆柱 体……)的退磁系数去代替。显然, 这样近 似处理会带来一定误差, 降低计算的精度。 为此, 对二度槽形向斜的磁各向异性体用分 块试凑法计算, 并与有限元法的计算结果进 行比较(图11), 相对误差约为17%。

### 2.具体步骤

7

1.按层理倾角J的变化分块;

2.计算各块的Is和j';

3.对每一块进行近似退磁改正;

4.最终确定每块的Is, j'的值;

5.应用二度体、似二度体正演公式或者 量板计算 Za 场。修改矿体用试凑法来拟合 实测曲线。

分块的原则主要是根据层理倾角J的变化近似分块,分块的数量愈多,近似程度就

愈高,反之,误差就愈大。

现用--半圆环柱体分成 8 块 为 例 来 说 明,所得Za曲线的极大值与相应的精确值相 比,误差为 2 % 左右(见图12),为了较精 确计算磁各向异性体的异常场,数量不多的 块就足够了。

步骤5的实现可以利用现有二度体正演 程序在电子计算机上实现。实际上在野外条 件下也可以利用米可夫量板用手算来实现。

方法的缺点是当矿体截面形状复杂时误 差较大,精度较低。但是,在目前非均匀磁 化的退磁问题还没有完全解决的条件下,仍 不失为一种方便实用的方法。

3.实例

将磁各向异性特征及其磁异常解释方法 应用于晋北沉积变质型铁矿区,取得了明显 的地质效果。已证实了三个向斜的存在。

该区虽作过部份勘探工作,但一直认为 矿区是由一个近于东西走向的向斜状矿体和



并而 切 Za ш 改
→ 各向周性, - - - 各向异性, 磁化场参数与图 3 相同



图13 钻孔验证结果剖面图

一个北西走向的单斜状矿体所组成。

根据1:10000地面磁测结果和有关地 质资料,应用沉积变质型铁矿向斜状矿体 的磁场特征重新进行磁异常的推断解释,认 为该矿区是由三个向斜状矿体组成,并用分 块试凑法进行初步定量计算。与地质队共同 设计验证钻孔,验证结果在ZK8004孔于199 米深处见矿,厚度(斜厚)110米,在ZK8815 孔23米深处见矿(斜厚)17.5米,证实我们 所作的推断(图13)基本上是正确的。

## 结 语

沉积变质型铁矿向斜状矿 体 磁 场 特征 和计算方法的研究是复杂磁异常解释的内容 之一。由于考虑了沉积变质型铁矿的磁各向 异性特征,并在此基础上建立磁异常解释方 法,其结果必然更接近于实际,从而可提高 找矿效果。过去把沉积变质型铁矿与其他类 型的磁铁矿床(如接触交代型,玢岩型等) 等同看待,不考虑前者的磁各向异性特征是 不合理的。

对于沉积变质型铁矿的磁各向异性及其 磁异常的解释我们所作的工作还只是初步 的。对下列问题作深入研究,可能会开辟更 好的解释异常的途径。

1.磁各向异性的实验室研究,磁模拟实 验。

2.沉积变质型铁矿向斜状矿体剩余磁化 强度Jr分布规律的研究。

3.磁各向异性体退磁改正问题。

4.磁各向异性体(三度)异常场计算方法的研究。