

电法勘探用

激发极化法曲线册

下 册

地质部物探研究所编

電法勘探用

激发极化法曲线册

漸覺起凡汗出外即

[illegible][illegible]

下 册

$$\left\{ \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp \left(-\frac{1}{2} \left(\frac{t}{\sigma} \right)^2 \right) \right\}_{t \in \mathbb{R}} \quad \text{by setting } \sigma = \sqrt{2\pi} \text{ and } \mu = 0.$$

2000

三、理论观点与实证研究

14. *Chrysomelidae* (leaf beetles)

442 1980年 4月 25日

地质部物探研究所编

1982年

© 2000 Blackwell Science Ltd *Journal of Internal Medicine* 247: 395–401

内 容 提 要

本文集搜集了激发极化法勘探实验项目 20 项, 包括各种装置方法的大量曲线图册。每项图册前均有详细介绍或说明。文集是从事电法勘探技术人员必备之工具书, 供进行定性解释和半定量解释之用, 也可供大专院校和中等专业学校师生参考。

文集分上下两册出版。上册为梯度、偶极、联剖、充电等装置的曲线册, 下册为测深、井中激电和各种装置对比的曲线册。

电法勘探用
激发极化法曲线册 (下)
地质部物探研究所编

河北省遵化县印刷厂印刷
地质部物探研究所发行

1982年3月第1版
印数0001—4000

下 册 目 录

用激发极化测深估算激发体深度曲线册.....地质部物探研究所 (1)

激电测深模型实验曲线册.....地质部第二物探大队 (69)

几种装置典型矿体激电异常对比图册.....青海省地质局物探队 (129)

井中激发极化法模型实验图册.....内蒙地质局物探队 (153)
武汉地质学院物探系

用激发极化测深估算 激发体深度曲线册

地质部物探研究所 激电组

在金属矿床上用激发极化测深来确定矿体埋藏深度，目前还没有一套系统量板，而且理论公式的推导还未全部解决。因此，在各种地质地形情况下，如何利用实际的激发极化测深曲线来确定矿体的埋藏深度，是当前野外实际工作所期望的。本文讨论利用实际激发极化测深曲线大致估算矿体顶部埋藏深度的简单方法。本文仅讨论测深中心点位于矿体正上方的对称梯度垂向测深装置。讨论 $\eta_s = f(-\frac{1}{2}AB)$ 的测深曲线形状时，以单对数坐标绘制的曲线为准。

一 平地情况下的激发极化测深结果

根据模型实验结果，野外实例和球状矿体以及两层断面的少量理论曲线说明，矿体顶部（或顶板）的埋藏深度（H）与曲线前支转折点（段）1)附近的 $\frac{AB}{2}$ 距（I），及趋近 η_s 饱和值时的 $\frac{AB}{2}$ 距（L）有密切关系。当测深点位于矿体正上方时，在一定条件下，各种形状和产状矿体的H值都十分接近I。若以达到 η_s 饱和值90%以上的 $\frac{AB}{2}$ 距为L²⁾，则5—10倍的H值十分接近L，一般大致可表示为：

$$H \approx 0.52I \sim I \approx \frac{1}{5}L \sim \frac{1}{10}L \quad (1)$$

兹分别讨论如下：

1、板状矿体

在讨论板状矿体上激发极化测深曲线的结果前，先对面极化矿体模型（铜金属板）上的I和体极化矿体模型（石蜡掺炭粉和砂的人工模型和浸染矿石）上的I作了少量实

注1)：指斜率变化最剧烈的点（段），相当于

$$\frac{\partial^3 \eta_s}{\partial (IgAB)^3} = 0, \quad \frac{\partial^4 \eta_s}{\partial (IgAB)^4} < 0 \text{ 的点（段）}。$$

验对比, 前者 $\rho_1 \gg \rho_2$, (ρ_1, ρ_2 分别为介质和矿体模型的电阻率), 后者 $\rho_1/\rho_2 \approx 600$ 和 16, 图 1 是其结果。由图可见, 在所研究的条件下, 两类矿体模型上的 I 基本上是一致的。因此, 为简便实验工作, 在下面实验中所用的矿体模型, 皆以面极化的铜金属板代替, 其结果也将大致适用于一般面极化矿体模型。

对各种体积、~~在平面上的~~ ~~模型用不同布极方向(相对模型走向)~~ 进行了激发电极化测深的模型实验。介质为水, 水槽长 160 厘米, 宽 110 厘米, 高 70 厘米, $\frac{AB}{2}$ 距变化范围为 3 厘米至 100 厘米, 模型一般大小为 $30 \times 20 \times 0.4$ 立方厘米, $H = 5 \sim 15$ 厘米。测量时由于 AB 距变化不是连续的, 有一定间隔, 加上一定测量误差, 故实测的 I 是比较粗糙的, 但在 I 附近加密了点距, 并经重复检查核实, I 相对误差的绝对值大部份小于 8%, 少数小于 15%。

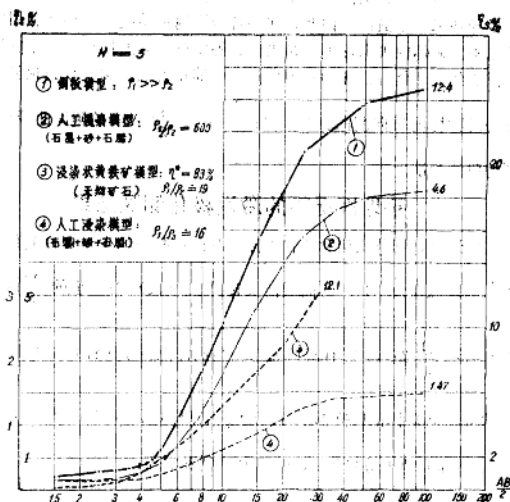


图 1

许多实验结果说明, 随着 H 增大, I 也增大, 当 H 不很大时, 在实验条件下, 不论模型倾角、埋藏深度、水平厚度、长度、垂向延伸、模型走向与布线方向夹角等等如何变化, 皆在 I 附近, 因此, 对均匀介质中的板状矿体, 皆大致可用,

$$H = 1 \sim 1.1/ \quad (2)$$

注2): 指 $\frac{\eta_s - \eta_1}{\eta_s(\max) - \eta_1} \approx 90\%$ 时, 对应于此 η_s 的 $\frac{AB}{2}$ 距, 这里 $\eta_s(\max)$

为渐近线值; 二层断面时 $\eta_{\max} = \eta_2$ 。

的关系来估算矿体顶部的埋藏深度。图2和图3是其中两个实例，明显地反映了上述特点，但随着H增大，异常减弱，转折点逐渐不明显，形成转折段（I段），并且此时， $I_{\text{段}}/H$ 略小于公式（2）中的关系值。

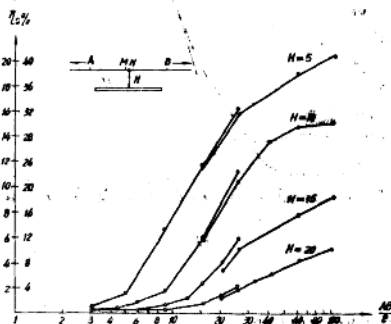


图 2

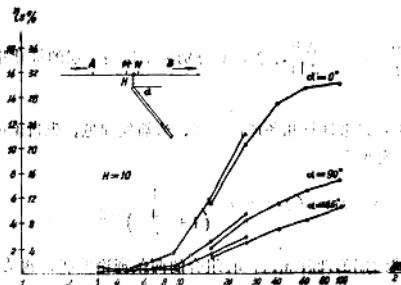


图 3

图2和图3的例子，由于受实验槽边界影响，尾迹畸变，不能用来讨论L与H之间的关系。但图4是没有边界影响的实例之一，（介质为边界足够大的黄土，模型为铁板），它表为：

$$H = \frac{1}{5} \sim \frac{1}{6} L \quad (3)$$

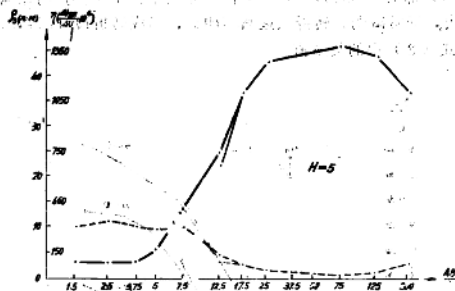


图 4

2、二层断面

有关文献中所提出的近似公式：

$$\eta_s = \eta_1 + (\eta_2 - \eta_1)(1 - K^2) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{nK^{n-1}}{\left(1 + \frac{4n^2}{\lambda^2}\right)^{3/2}} \left/ \left(1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K^n}{\left(1 + \frac{4n^2}{\lambda^2}\right)^{3/2}}\right) \right. \quad (4)$$

其中 $K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1}$, $\lambda = \frac{AB}{2H}$, η_1, η_2 分别为上层与下层的极化率, ρ_1 与 ρ_2 为上下层电阻率。

下面将用 (4) 式来计算几条理论曲线, 为简便起见, 先讨论 $\rho_1 = \rho_2$ 时的情况, 此时 $K = 0$, (4) 式变为:

$$\eta_s = \eta_1 + (\eta_2 - \eta_1) \frac{1}{\left(1 + \frac{4}{\lambda^2}\right)^{3/2}}, \quad (5)$$

根据 (5) 式绘制的两种 η_1, η_2 组合的两条理论曲线, 就是图 5 中 $K = 0$ 的两条曲线。

从

$$\frac{\partial^3 \eta_s}{\partial (\eta_2 \lambda)^3} = 0, \quad \frac{\partial^4 \eta_s}{\partial (\eta_2 \lambda)^4} < 0,$$

得出: $\lambda = 1.33$ 即 $H = 0.75l$ (6)

无论 $\eta_1 < \eta_2$ 或 $\eta_1 > \eta_2$, l 的位置与 η_1, η_2 值均无关, 假设第一种情况的上下层极化率分别为 η_1, η_2 , 第二种情况为 η_1', η_2' 。当 $\eta_1 = \eta_2', \eta_2 = \eta_1'$ 时, 则其中一条曲线正好是另一条曲线的倒像, 如图 5 中 $K = 0$ 的两条曲线。

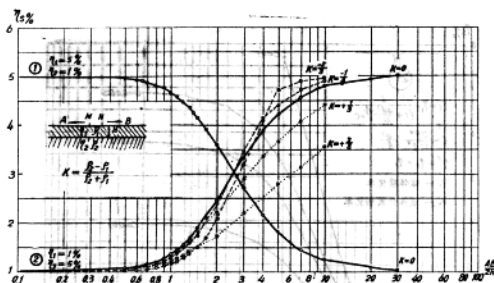


图 5

由图或令

$$\frac{\eta_s - \eta_1}{\eta_s + \eta_1} = \frac{1}{\left(1 + \frac{4}{\lambda^2}\right)^{3/2}} = 0.9$$

可得:

$$H \approx \frac{1}{7} L \quad (7)$$

3 球状矿体

此处仅讨论矿体与围岩电阻率没有差异情况下的测深曲线。此时，理论曲线可按公式 (1)：

$$\eta_s = \eta_1 + \frac{C}{\left(1 + \frac{1}{\lambda'^2}\right)^{3/2} + C} \quad (8)$$

算出，其中 $C = \frac{2}{3} \frac{\eta^*}{\eta_1} \left(\frac{a}{h}\right)^3$ ， $\lambda' = \frac{AB}{2h}$ ， $\eta^* = \eta_0 - \eta_1$ ， a 为球半径， h 为球中心埋藏深度， η_0 、 η_1 分别为球体和介质的极化率。

分析 (8) 式可知，此时 $\frac{\partial \eta_s}{\partial (lg \lambda')}$ 较为复杂， λ' 值与 C 有关。但考虑到实际情况与

勘探深度的限制，一般 η^* 取 $0.04 \sim 0.45$ ， $\frac{a}{h}$ 取 $\frac{1}{1.5} \sim \frac{1}{8}$ ，即取 C 为 $0.01 \sim 0.1$ ，

已完全能满足实际需要。在上述 C 的范围内，绘制了 8 条理论曲线（见图 6）。

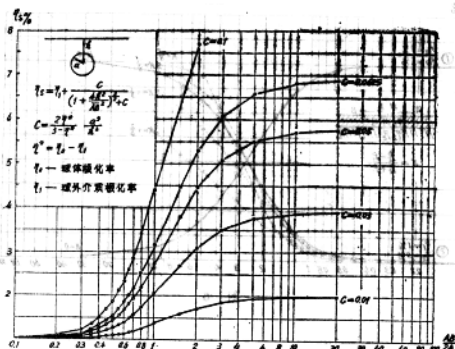


图 6

从

$$\frac{\partial^2 \eta}{\partial (3g\lambda')^2} = 0$$

$$\text{可得, } C^2 (9A^2 + 14A + 4) (1 + A)^{-3/2} - C (36A^2 + 8A - 8) + (709A^2 - 22A + 4) (1 + A)^{3/2} = 0$$

其中 $A = \lambda'^{-2}$ 若 $\frac{\partial^2 \eta}{\partial (3g\lambda')^2} < 0$

则当 $C = 0.1$ 时, $\lambda' \approx 0.66$

当 $C = 0.1$ 时, $\lambda' \approx 0.63$

因此, 当 $C \approx 0 \sim 0.1$ 时, l 仅在 $0.66h \sim 0.63h$ 内变化, 大致平均可取

$$l \approx 0.65h$$

即当: $\frac{a}{h} = \frac{1}{1.5} \sim \frac{1}{3}$ 时, $H \approx 0.53l \sim l$ (前者相当于 $\frac{a}{h} = \frac{1}{1.5}$, 后者相当于

$$\frac{a}{h} = \frac{1}{3})$$

此外, 由图 6 可得: $h \approx \frac{1}{3.5}L$, 当 $\frac{a}{h} = \frac{1}{1.5} \sim \frac{1}{3}$ 时, $H \approx \frac{1}{10} \sim \frac{1}{5}L$,

若一般地取 $\frac{a}{h} = \frac{1}{2}$, 则

$$H \approx 0.247L, H \approx \frac{21}{7}L$$

在以上的讨论中, 均未考虑上下层间或砂体与围岩间电阻率差异的影响, 应予以

ρ_1/ρ_2 比值的大小, 对 l 位置是有一定影响的。以二层断面为例, 从公式 (4) 可见, $K \left(K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \right)$ 值大小对曲线形状有一定影响。这里根据 (4) 式计算了

$K = \pm \frac{1}{3}, \pm \frac{2}{3}$ 四条理论曲线 (图 5)。另外, 赛吉尔 (seigel) 计算的曲线可作参考。但必须注意, 赛吉尔曲线的装置是温纳测深装置, 绘在双对数坐标上, 纵座标取的是 $\frac{m_2 - m_1}{m_2 + m_1}$ (m_2, m_1 相当于 η_2, η_1) 不能用来直接讨论这里的 l , 但可作参考。由图 5 可见, 除 $K = 0$ 外, 随 $|K|$ 增大, l, L 也增大。当 K 为正, 即 $\rho_1 < \rho_2$ 时, 随着 K 增大, 曲线上升得愈来愈缓慢; $K \geq \frac{2}{3}$ 后, 曲线趋近饱和更慢, 曲线上的 l 逐渐不明显, 且有消失的趋势; 当 K 为负, 即 $\rho_1 > \rho_2$ 时, 随着 $|K|$ 增大 l, L 虽也增大, 但增大得不多, 即曲线仍较快上升, 并趋近饱和; 但当 $-\frac{2}{3} \leq K \leq -\frac{1}{3}$

(相当于 $\rho_1/\rho_2 = 6 \sim \frac{1}{2}$) 时, η_2 曲线较为密集, 在图 5 中还大致表示了 $H \approx 0.77l \sim$

$0.67l$, 在 $-\frac{2}{3} \leq K \leq 0$ 时, $H \approx \frac{1}{5}L \sim \frac{1}{7}L$; 而在 $0 \leq K \leq \frac{1}{3}$ 时,

$H \approx \frac{1}{7}L \sim \frac{1}{10}L$ 。在金属矿床上大多数是 $\rho_1 > \rho_2$, ρ_1/ρ_2 最小取到 $\frac{1}{2}$ 就已足够。

另外, ρ_1/ρ_2 最大取到 6, 也还能满足不少实际情况, 特别是浸染型矿床, ρ_1 与 ρ_2 常常差异不大。因此, 在 $\rho_1/\rho_2 = 6 \sim \frac{1}{2}$ 内, 即在不少实际情况下, l 位置变化不大, 仍可用以下近似关系式来大致地估算 H :

$$H \approx 0.77l \sim 0.67l,$$

$$H \approx \frac{1}{5}L \sim \frac{1}{10}L,$$

$$\text{当 } \rho_1/\rho_2 = 6 \sim 1 \text{ 时 } H \approx \frac{1}{5}L \sim \frac{1}{7}L,$$

$$\rho_1/\rho_2 = 1 \sim \frac{1}{2} \text{ 时 } H \approx \frac{1}{7}L \sim \frac{1}{10}L,$$

对球状和板状矿体, 影响 l 值不大的 ρ_1/ρ_2 比值变化范围可以更大些。

综上所述, 在一般情况下, 中心点位于矿体正上方的对称梯度垂向测深装置, 对于周围介质均匀, ρ_1/ρ_2 变化范围不大的各种形状和产状的矿体, 皆可用测深曲线转折点

(段) 处及趋近饱和值处的 $\frac{AB}{2}$ 距 l 与 L 来大致估算矿体顶部 (顶板) 的埋藏深度。其

关系如下:

板状矿体

$$H = 1 \sim 1.1 l,$$

$$H = 1/5 \sim 1/6 L,$$

二层断面

$$H \approx 1/5 \sim 1/7 L \quad (\rho_1 \gg \rho_2)$$

$$H \approx 1/7 \sim 1/10 L \quad (\rho_1 \leq \rho_2),$$

球状矿体

$$H = 0.5a \sim 2a \text{ 时},$$

$$H \approx 0.53 \sim 1 l,$$

$$H \approx 1/10 \sim 1/5 L,$$

$$H = a \text{ 时},$$

$$H \approx 0.74 l$$

$$H \approx \frac{1}{7} L,$$

当测深点中心不在矿体正上方时,若AB连线垂直矿脉或通过球中心在地面的投影点,而测深点偏离矿体不很远,则仍可大致利用以上测深点位于矿体正上方时的关系式。若测线方向平行矿体走向或平行通过球中心投影点的直线,则 l 更接近测深点至矿体间的法向距离或最短距离。

必须指出,除板状矿体外,球状矿体和二层断面上的 l 在图上有时表现得不够明显,在图上找 l 会引起一定困难。但如果结合 L 与 H 的关系, l 的相对误差可保持在 $\pm 20\%$ 以下,矿体多近板状,一般地可取 $H \approx 1 \sim 1.1 l \approx 1/5 \sim \frac{1}{6} L$, (若矿体上复

盖有良导性盖层时,则 l 要大于 H), l 也反映得较为明显。

二、地形起伏情况下的激发极化测深结果

1、无矿或无矿化层等异常体

无异常物体,地形起伏的情况下不能形成异常。如均匀介质时,有

$$\Delta U_i = \frac{I}{4\pi\sigma(1-\eta)} G,$$

$$\Delta U_e = \frac{I}{4\pi\sigma} G,$$

其中 ΔU_i 和 ΔU_e 分别为极化场电压和一次场电压, σ 为介质导电率, G 为与电极位置及地面形状有关的几何因素。于是

$$\eta_s = \frac{\Delta U_1}{\Delta U_1} = \frac{\Delta U_1 - \Delta U_0}{\Delta U_1} = \eta$$

与几何因素G无关，即与电极位置和地面形状无关。测深曲线为一直线，与 $1/2$ AB坐标轴平行。

若介质的激发极化特性不均匀，此时测深曲线形状比起平地来会略有不同，但曲线上的最大 η_s 值不会超过最高 η 层的 η 值，一般非矿化岩层间 η 值差异很小，因此曲线仍平缓无异常，这点已被许多室内外的实例所证实。

2 有矿（或有异常体）

有矿和地形起伏时，由于矿体各点至地面各点的距离（ P_i ）及矿体与地面间夹角（ α ）有了变化，所以比起矿体顶部埋藏深度相同，其他条件也相同的平地情况来，异常值的大小及异常形态都有所变化。此时，理论计算也变得极为复杂，于是对几种基本地形情况下的板状矿体进行了初步模型实验。模型仍为铜金属板，介质改为黄土，为了便于了解测深结果，先看一下地形起伏对纵向中间梯度剖面装置结果的影响。

(1) 剖面装置

对地形不同而其它条件相同的剖面，其矿体顶部至其正上方地面间距离也相等。若 P_i 与 α 越小（矿体各点至地面各点的距离也越小），则异常就越宽越大。矿体与地面两边的夹角 α_1, α_2 不等时，即使在矿体铅直情况下，则曲线形状也不对称，其不对称情况与矿体在平地下倾斜情况相似。图7和图8为模型实验的两个例子。图7是矿体顶部埋藏深度相同，地面形状为对称的山脊、山谷、平地三种情况下的三条模型实验曲线。由于 $P_{\text{山脊}} < P_{\text{平地}} < P_{\text{山谷}}$ ， $\alpha_{\text{山脊}} < \alpha_{\text{平地}} < \alpha_{\text{山谷}}$

山谷，所以 $\eta_{\text{山脊}}^{\text{AH}} > \eta_{\text{平地}}^{\text{AH}} > \eta_{\text{山谷}}^{\text{AH}}$ ， $Q_{\text{山脊}}$

$> Q_{\text{平地}} > Q_{\text{山谷}}$ ，其中 η^{AH} 为异常值， Q 为异常宽度。相对平地而言，山脊与山谷坡度越大，则差异也越大，其差异情况与异常值随矿体埋藏深度而变化的规律有关。

图8是斜坡下直立矿体与平地下倾斜矿体上 η_s 曲线的对比。在两种情况下，矿体与地面的夹角 α 接近（前一种情况 $\alpha = 60^\circ$ ，后者 $\alpha = 45^\circ$ ），可见两曲线不对称形状相似，只是前者异常宽度狭一些。这主要是受坐标轴方位和 α 较大的影响。因此， η_s 曲线形状不对称，只与矿体和地面两边夹角不对称有关，斜坡下直立矿体犹如平地下倾斜矿体。

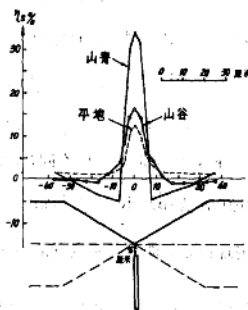


图 7

因此， η_s 曲线形状不对称，只与矿体和地面两边夹角不对称有关，斜坡下直立矿体犹如平地下倾斜矿体。

(2) 垂向测深装置

1) 垂直地形走向布线

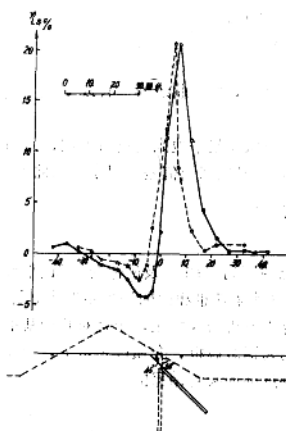


图 8

体顶端正上方的情况。

改变A、B位置时，若两极为标高 Y_1 、 Y_2 都随两极的水平距(X)增大而增大(矿体位于山谷下)，则 $H' > H$ ， $l > H$ ；若 Y_1 、 Y_2 随X增大而减小(矿体位于山脊下)，则 $H' < H$ ， $l < H$ 。若考虑矿体位于以下几种基本地形：山脊、山谷、阶脊、阶谷，则

可以预料，在H相同时，有可能： $l_{\text{山脊}} < l_{\text{阶脊}} < l_{\text{平地}} < l_{\text{阶谷}} < l_{\text{山谷}}$ ， $\eta_{\text{山脊}}^{\text{AH}} >$

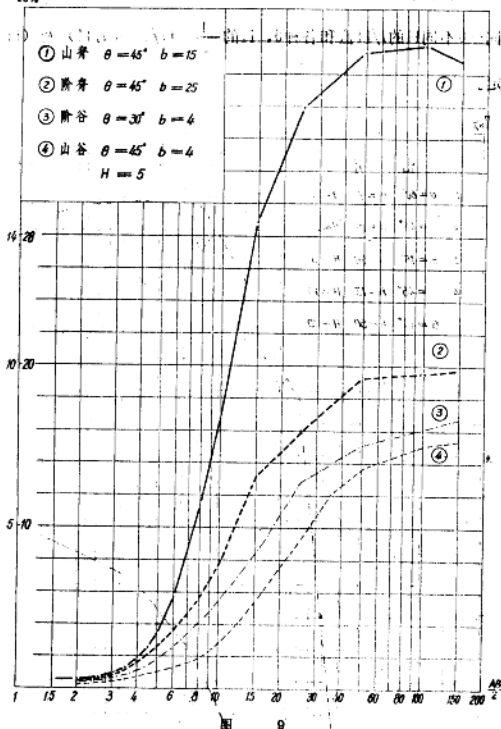
$\eta_{\text{阶脊}}^{\text{AH}} > \eta_{\text{平地}}^{\text{AH}} > \eta_{\text{阶谷}}^{\text{AH}} > \eta_{\text{山谷}}^{\text{AH}}$ ，模型实验结果基本上符合，但 $l_{\text{山脊}} \approx l_{\text{阶脊}}$ ， $l_{\text{阶谷}}$

$\approx l_{\text{平地}}$ 。图9表明了这一特点。同样在同种地形类型下，即使山形高度(D)或幅度(b)相同，随着地面坡度不同，l也将随之改变。如以 θ 表示坡面与水平面夹角，则山脊的l随 θ 增大而减小， η_s^{AH} 随 θ 增大而增大，山谷的情况则相反。这个特点在山脊情况下表现得尤其明显(见图10a、b)，对同种坡度的地形 $\eta_{\text{山脊}}^{\text{AH}}$ 随b增大而增大，

$\eta_{\text{山谷}}^{\text{AH}}$ 则相反，此外，在很多结果中发现，对同类地形，l与地形大小，也即b、D大小几乎无关，特别是在 $H' < b$ (J)情况下，只要 θ 相同，b(或D)变化在很大范围内，l都基本一致，如图10b，于是在 $H' < b$ (J)情况下，l只与地形和 θ 有关，这个重要特点为定量解释提供了线索。

若A、B极沿斜坡平面布线，斜坡相对AB距(l或H)足够大，正如前所述，这种情况相当于矿体的 α 角相同的平地情况，可采用平地下偶极规律。

若A、B极沿着地形起伏的剖面布线(不同A、B位置，AB连线不在同一平面内)，随着供电电极水平距离的改变，其相对矿体顶部的垂直距离也随时改变着，致使l与H十分接近，这里我们仅就 H' (或 l)和X来同时考虑与H、H'(l')、X间的关系。当矿体顶部至AB连线中心点的距离等于AB连线的半长时，相应的距离和长度分别称为 H' 和 l' ，X为AB连线长度等于2 l' 时AB水平距的一半。当AB连线为水平线时，则 $X = l' = H'$ ，其符号意义见图11，AO'B为地面。在大多数情况下，l界乎H与H'(或X)间。以下仅讨论测深点位于直立板状矿



(1) 矿体位于对称三角形山脊下 (图11a)

$$X = I' = H',$$

当 $H - D < b$,

$$X = H - O'M = H - X \tan \theta,$$

$$X = H' = \frac{H}{\tan \theta} \quad (10)$$

若 $H - D > b$, 则 $H' = X = H - D$, 其中 D 为三角形高。由于山脊那块介质的影响, 可以预料, 与平时不同, I 将大于 H' 。表1统计了不同 H , θ , 和 b (D) 对34条实测模型实验曲线的 I 与 H , H' , θ 等关系。

根据表1中34条曲线的统计, 提出了一些值得注意的现象。

1) 在相当大的 b 、 D 变化范围 ($b = 2 - 50$) 内, 甚至包括 $H' > b$ 的, 在我们的测量范围内, 同一 θ 不同 H 的 I/H 值和各种 θ , H 的 $\frac{1}{2} (I/H' + I/H)$ 及 $(H + H') / 2 I$ 值都比较稳定。

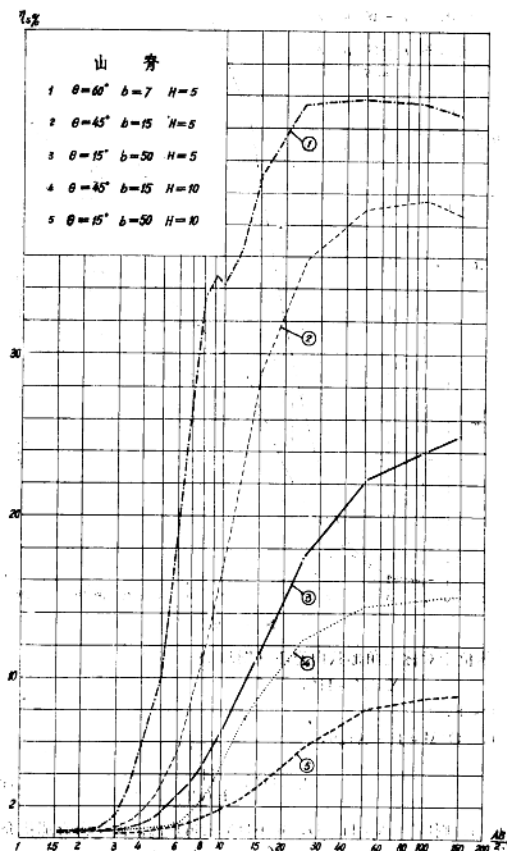


图 10a

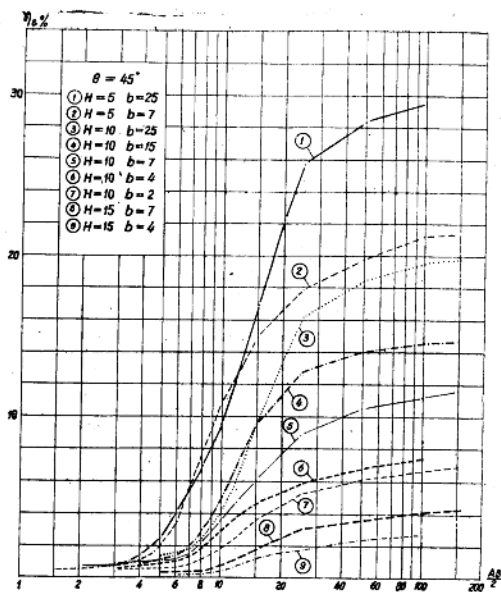


图 10b

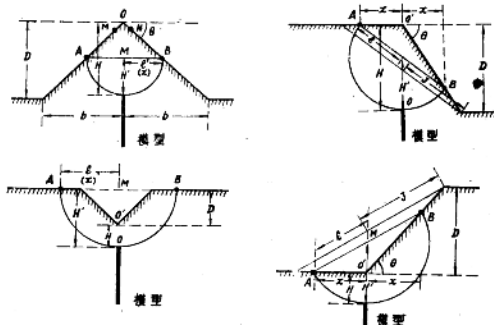


图 11

左上—11a, 左下—11b, 右上—11c, 右下—11d