

地 质 矿 产 部

地球物理地球化学 勘查研究所刊

第 1 号

地 质 出 版 社

地 质 矿 产 部

地 球 物 理 地 球 化 学

勘 查 研 究 所 所 刊

第 1 号



地 质 出 版 社

内 容 简 介

本刊为地质矿产部地球物理地球化学勘查研究所建所二十八年第一次正式创办的所刊。它将不定期报道和交流本所最新科研成果和学术论文。本期为所刊第一号,选入的十七篇文章集中反映最近一个时期物化探科研工作新进展、新课题、新方法、新资料。其主要内容有:充电法确定油井压裂,有别于传统电法的系统电法,古地磁,西藏高原构造均衡,化探找金伯利岩,以及平面马尔柯夫过程及地质图形,地球化学标准样测值处理,地热物探方法调研等。本所刊可供从事地球物理地球化学勘查和有关地质、仪器等生产、科研、教学的科技人员,以及地质院校师生使用和学习参考。

地质矿产部 地球物理地球化学 勘查研究所所刊

第 1 号

*

责任编辑:傅学信

地质出版社出版

(北京西四)

地质出版社印刷厂印刷

(北京海淀区学院路29号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

*

开本: 787×1092¹/₁₆ 印张: 19 插页: 4 个 字数: 450,000

1986年3月北京第一版·1986年3月北京第一次印刷

印数: 1—1,590册 定价: 4.15元

统一书号: 13038·新202

目 录

发刊词..... (1)

〔物探方法研究〕

用充电法确定钻井压裂裂缝方位.....吴汉荣 何裕盛 丁庆年 (3)
利用地震波动力学特征提高薄层分辨率的可能性的研究.....唐文榜 (21)
系统电法的基础理论和解释推断方法原理研究.....朱百成 (35)
偶极脉冲瞬变系统归一读数法.....蒋邦远 吴凤翔 (63)
简单实用的三维重磁场的“曲化平”方法.....王忠敏 张喜丰 谢玉清 赵敬洗 (79)

〔深部地球物理研究〕

利用古地磁资料初探中国大陆的形成.....周姚秀 (105)
西藏高原地壳构造及其均衡问题.....刘行义 王 式 郝文俭 (121)
地震测深资料研究西藏高原地壳结构.....王 式 (143)

〔化探方法研究〕

勘查金伯利岩的地球化学方法.....邵 跃 刘吉敏 (153)
八个GSD水系沉积物标准参考样定值数据处理的初步研究.....耶明才 (169)
堆中子活化分析在首批 GSD1-8 化探标样研制中的重要作用.....张玉君 李昌国 (187)
理论 α 系数的计算及其在X射线荧光分析中的应用.....李国会 (199)
塞曼效应无火焰原子吸收法测定地质试料中痕量银.....卢荫庥 (207)

〔资料处理新技术的研究〕

平面马尔柯夫过程及地质图形的模拟.....林存山 (215)

〔引进新仪器的研究〕

澳大利亚 SIROTEM II 瞬变电磁系统的剖析.....吕广平 夏淑华 (237)

〔专题情报调研〕

地热资源调查中的地球物理方法.....陈德志 (265)
磁异常解释的发展和其中的某些问题.....王忠敏 张喜丰 (289)

BULLETIN OF THE INSTITUTE OF GEOPHYSICAL & GEOCHEMICAL EXPLORATION, MINISTRY OF GEOLOGY AND MINERAL RESOURCES No.1

CONTENTS

Foreword to the Periodical.....	(1)
Studies of geophysical methods	
A charging method for the determination of cracking bearings of drillhole fracture.....	<i>Wu Hanrong, He Yusheng and Ding Qingnian</i> (3)
The Probability of applying the dynamic characteristics of seismic wave to increase thin layer resolution.....	<i>Tang Wenbang</i> (21)
Basic theory and interpretation for systematic electrical survey—two measuring equivalent problems in electrical survey and its applied research report.....	<i>Zhu Baicheng</i> (35)
Dipole-dipole pulse transient EM system using normalized reading technique.....	<i>Jiang Bangyuan and Wu Fengxiang</i> (63)
A practical and simple method to reduce a three-dimensional gravi- tational or magnetic fields to the plane	<i>Wang Zhongmin, Zhang Xifeng, Xie Yuying and Zhao Jingxi</i> (79)
Studies of deep geophysics	
Preliminary study on the formation of Chinese Continent using paleo- magnetic data.....	<i>Zhou Yaoxiu</i> (105)
Crustal structure and isostasy in the Tibetan plateau	<i>Liu Xingyi, Wang Shi and Hao Wenjian</i> (121)
A study of the crustal structure in the Tibetan Plateau from seismic sounding data.....	<i>Wang Shi</i> (143)
Studies of geochemical methods	
Geochemical exploration for kimberlites.....	<i>Shao Yao and Liu Jimin</i> (153)
The method for deriving best estimates and recommended values from the analytical data the 8 GSD samples.....	<i>Yan Mingcai</i> (169)
The important function of NAA in preparing and analysis of geoche- mical standard samples GSD 1-8.....	<i>Zhang Yujun and Li Changguo</i> (187)
The calculation of theory α -coefficient and its application in X-ray fluorescence analysis.....	<i>Li Guohui</i> (199)
Zeeman effect nonflame atomic absorption for measuring trace Ag in geologic sample.....	<i>Lu Yinxiu</i> (207)
Studies of new techniques in data processing	
Planar Markov processes and simulation of geologic patterns	<i>Lin Cunshan</i> (215)
Studies of new instruments imported from abroad	
The Analysis on Australian SIROTEM II TEM System	<i>Lu Guangping and Xia Shuhua</i> (237)
Investigation on information of a special subject	
Report on geothermal investigation with geophysical method	<i>Chen Dezhi</i> (265)
Advances in magnetic interpretation and some problems	<i>Wang Zhongmin and Zhang Xifeng</i> (289)

发 刊 词

中共中央关于经济体制及科学技术体制改革的决定相继发表, 全国科技工作面临新的形势和新的任务。我们庆幸, 地质矿产部《地球物理地球化学勘查研究所所刊》在这样一个具有重大历史意义的时刻和读者见面。

地质矿产部地球物理地球化学勘查研究所1957年在北京诞生。至今28年来, 它走过了“下放、合并”“一迁、再迁”的曲折道路, 经历了十年浩劫的严重挫折, 身受重灾。但是, 它仍然为发展我国物化探科学技术提供了许多有重要意义的科研成果, 在我国物化探科学技术不同发展阶段的一些重要领域中发挥了先行和推动作用。它有16项科技成果获得1978年全国科学大会表彰, 18项科技成果获得地质矿产部科技成果奖。

今天, 地质矿产部地球物理地球化学勘查研究所在河北省廊坊市的第一期建设工程已基本结束, 一个面向全国的综合物化探科研基地已初具规模, 并将沿着改革的方向获得新的发展。

地质矿产部地球物理地球化学勘查研究所已经由过去以金属矿物化探勘查方法技术研究为主, 扩大到区域地质和深部构造调查、各种能源矿产资源勘查、各种金属非金属矿产勘查、水文和工程地质勘查, 以及其它包括环境地质乃至考古等特殊专题的地球物理、地球化学研究, 形成了它在应用领域方面具有广泛综合性的特色。

地质矿产部地球物理地球化学勘查研究所的研究课题遍及航空、地面和地下的重、磁、电、震、放、热等各种地球物理勘查, 以及岩石、土壤、水、气体、生物等各种地球化学勘查方法, 保持和发展了它在学科方面具有广泛综合性的特色。

地质矿产部地球物理地球化学勘查研究所的研究内容包括方法应用理论基础、野外勘查方法技术、信息采集存贮与整理处理成图解释方法技术, 以及若干系列仪器的研制, 保持和发展了它在工作环节方面具有广泛综合性的特色。

地质矿产部地球物理地球化学勘查研究所致力于现代的数字化、自动化、智能化技术在物化探勘查中的应用。

远不能说我所在各方面已经具有先进水平, 但走在全国物化探科学技术的前列应是它努力的目标。

地球物理地球化学勘查是应用科学, 我所主要从事应用研究和开发研究。它的科研课题主要来自我国经济建设和物化探生产、科研的实际需要。它的科研成果应迅速地用于我国物化探工作的实践(当然也不应忽视为技术储备和新方法开拓所需的某些中长期的、基础性的工作), 及时推广应用其科研成果, 开展多种形式的技术服务, 是我所的重要任务。

创办所刊, 就是为了贯彻科学技术面向经济建设的方针, 促进我所科研工作的迅速发展, 更好地为全国物化探生产、科研服务, 为四化建设服务。

本刊是我所科研成果的正式出版物, 是常年性的科研和学术论文选集。

它将广泛报道和交流我所各学科新近的研究成果；

它将选登我所科技人员撰写的具有理论或实用价值的学术论文；

它将选登我所情报调研的专题报告，报道国内外最新物化探科技成就、动态和趋势；

它也将组织某些技术专题或科研管理专题的讨论。

它将坚持科研工作为经济建设服务的方向；

它将坚持“百花齐放，百家争鸣”的方针；

它将坚持支持新生力量新生事物的原则；

它将坚持以提高为主、兼顾普及的宗旨；

它将坚持科研道德和发扬优良文风。

一个刊物的诞生固然不易，要把它坚持下去，越办越好，受到欢迎，作出贡献，更非易事。本所广大科技人员是本刊赖以扎根的土壤和雨水，全国广大物化探工作者是本刊赖以生长的空气和阳光。我们希望在各方面支持下，本刊得以根深日深，叶日茂，茁壮成长。

用充电法确定钻井压裂裂缝方位

吴汉荣 何裕盛 丁庆年

提 要

文中介绍了用充电法确定油田钻井压裂裂缝方位和注水水流方向的研究结果。包括理论研究、模型实验及野外工作方法等方面的成果。所述内容对水文地质中确定地下水流速、流向,地震地质中确定地应力方向,以及对干地热区地热开采设计,核废物地下库容测定等方面都是适用的。文中还提出了设计专用电位测定仪的技术要求。

应用地球物理勘查方法研究和确定钻井压裂裂缝方位是近年来开始引起人们注意的问题。特别是电法勘查中的充电法,在这方面的应用越来越广泛。最早人们是用充电法确定地下水的流速和流向。在观测井或地下水露头处投入大量食盐,使水的电阻率明显降低,然后在地表观测不同时间低电阻水体形成的电场,以此确定出地下水的流速和流向。

近年来,在油田开采过程中,对低产油井进行大型压裂,用强大压力向油井内注液和加砂,使油层出现裂缝。同样,在注液和加砂时加入食盐或有关盐类,使裂缝形成充满导电液体的低电阻体。用充电法确定具有低电阻特性的裂缝方向,然后在垂直裂缝的方向上选择注水井和确定注水方向,以压迫石油向裂缝汇聚,从而提高油井的石油产量。对于注水井的水流方向也可用充电法加以勘测,以保证注水的效益。

在地质地质中用充电法确定井下水压裂方向,以查明岩石中最大应力方向,为地震地质研究提供有益资料。在干地热区开发地热资源时,可在地热区先打一口井,然后对井孔进行大型压裂,用充电法确定裂缝方位。再在裂缝末端打一口井。最后,在一口井注水,在另一口井抽出被加热了的水,达到地热开采的目的。

确定压裂裂缝方位在水文地质、工程地质、煤田地质以及核废物地下处理中也均有实用价值。

本文介绍充电法在解决确定压裂方向课题所进行的理论研究、模型实验及野外应用中的工作方法等方面的成果,内容都是新颖的。所介绍的理论和方法对上述诸方面都是适用的。文中理论基础部分由何裕盛撰写,方法技术、实例和新仪器要求部分由吴汉荣、丁庆年撰写。参加工作的还有夏治平、陈寿椿、张金成、夏万芳等人。

一、方法的理论基础

(一) 数学模型

用数学模型分析钻井压裂裂缝电场是比较方便的。假定在地下导电介质中存在压裂井

A (供电电极), 汇流井B (另一供电电极) 和良导电裂隙 ($C_1 + C_2$)。向A井和B井供电, 在地下建立电场。假定它们都是由线形导体组成, 则在地表上沿以A井井口为圆心, 以矢径 r 和 $Y + \Delta$ 为半径的圆周 (Δ 为测量电极 M 和 N 间的距离) 进行对 MN 的电位差 ΔU 观测 (图 1), 则有关系式:

$$\Delta U = \Delta U_B + (1-n)\Delta U_A + n\Delta U_c. \quad (1)$$

式中 n 为导电液体中的电流与总电流之百分比。将地下人工良导电液体在地表 MN 间引起的电位差称为纯异常 ΔU_c 。将压裂后 (即投盐压裂后) 充电时地表 MN 间的电位差 ΔU 减去压裂前的电位差 ΔU_q 称为视纯异常 ΔU_s :

$$\Delta U_s = \Delta U - \Delta U_q. \quad (2)$$

压裂前的电位差 ΔU_q (正常场电位差) 应为

$$\Delta U_q = \Delta U_A + \Delta U_B. \quad (3)$$

式中 ΔU_B ——B 极引起的电位差;

ΔU_A ——研究井 (压裂井) 引起的电位差。

将 (1)、(3) 式代入 (2) 式便得视纯异常的另一个式子

$$\Delta U_s = n(\Delta U_c - \Delta U_A). \quad (4)$$

压裂后供电时, 电流分为两部分。一部分电流 $(1-n)$ 从套管流入介质, 而另一部分电流 (n) 则从导电水体流入介质。

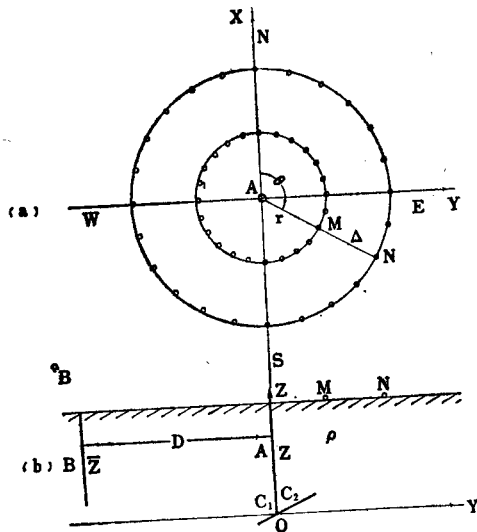


图 1 用充电法确定油井压裂裂缝方向工作布置图

(a)——平面图; (b)——截面图; A——压裂井; B——汇流井; r ——AM; Δ ——MN; ($C_1 + C_2$)——裂缝长度; θ ——矢径 r 与 x 轴夹角; s ——压裂井 A 的长度; $\bar{s}$ ——汇流井 B 的长度; ρ ——围岩电阻率

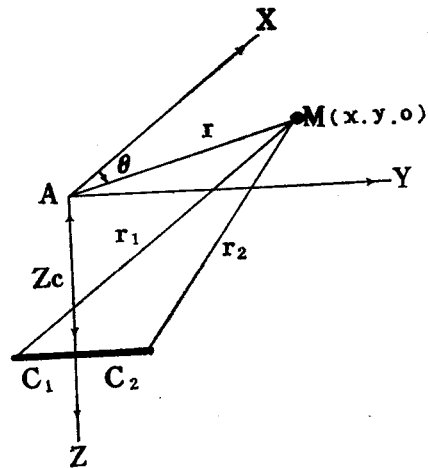


图 2 坐标关系图

由 (4) 式和图 3 可见, 视纯异常 ΔU_s 与纯异常 ΔU_c 呈线性关系。系数 n 决定 ΔU_s 的幅度, 不改变曲线形态。由于采用环形排列进行测量, 因而 ΔU_A 也为常数, 它仅使曲线沿纵向平移, 不会改变曲线形态。因此, ΔU_s 与 ΔU_c 是等效的。在工作中, 提高 n 的数值是有

利的。

水平线形充电体在地表M点处引起的电位表达式^[1]：

$$U_M = \frac{\rho I_c}{2\pi(C_1 + C_2)} \ln \frac{y + C_1 + r_1}{y - C_2 + r_2} \quad (5)$$

式中 I_c 为水平线形导体 ($C_1 + C_2$) 流入介质的电流强度； r_1 —M点到 C_1 端点的距离； r_2 —M点到 C_2 端点的距离。由(5)式出发可导出沿 y 方向分布的水平线形导体在地表环形测量法中MN两点间的电位差公式，即纯异常公式（坐标关系见图2）：

$$\Delta U_c = \frac{\rho I_c}{2\pi(C_1 + C_2)} \ln \left[\frac{r \sin \theta + C_1 + \sqrt{r^2 + 2C_1 r \sin \theta + C_1^2 + Z^2}}{r \sin \theta - C_2 + \sqrt{r^2 - 2C_2 r \sin \theta + C_2^2 + Z^2}} \cdot \frac{(r + \Delta) \sin \theta - C_2 + \sqrt{(r + \Delta)^2 - 2C_2(r + \Delta) \sin \theta + C_2^2 + Z^2}}{(r + \Delta) \sin \theta + C_1 + \sqrt{(r + \Delta)^2 + 2C_1(r + \Delta) \sin \theta + C_1^2 + Z^2}} \right] \quad (6)$$

式中 Z ——水平线形导体的深度。

由(5)式可写出：

$$\Delta U_A = \frac{\rho I_A}{2\pi Z_A} \ln \frac{(r + \Delta)(Z_A + \sqrt{r^2 + Z_A^2})}{r(Z_A + \sqrt{(r + \Delta)^2 + Z_A^2})} \quad (7)$$

我们顺便说明，压裂前供电孔中的电源为点源（没有金属套管），压裂后地下出现导电裂缝的情况。在水文地质中求地下水流速、流向和地震地质中求地应力方向时会遇到这种情况。压裂前MN电位差在形式上同(3)式，压裂后MN电位差则为

$$\Delta U = \Delta U_s + \Delta U_c \quad (8)$$

视纯异常 $\Delta U_s = \Delta U - \Delta U_c$ 为

$$\Delta U_s = \Delta U_c - \Delta U_A \quad (9)$$

由此可见，视纯异常 ΔU_s 与纯异常 ΔU_c 形状和幅度相同。对于环形排列， ΔU_A 是常数，仅使纯异常 ΔU_c 沿纵坐标发生位移。再者，从 ΔU_s 推导中，电极B的影响已消掉。该数学模型没有给出讨论B电极形状和位置对电场影响的机会。

综上所述， ΔU_s 与 ΔU_c ，不论是套管充电，或是点源充电，都是等效的。这就是我们用 ΔU_c 解释 ΔU_s 的依据。

(二) 异常分析

从理论上研究 ΔU_c 较容易，在野外工作中测量 ΔU_s 较容易。二者存在着线性关系和等效性（图3），故下面重点讨论纯异常 ΔU_c 。在实际工作中可利用 ΔU_c 的理论研究结果对实测的 ΔU_s 进行解释。

对计算结果用两种方式作图。第一种是常用的直角坐标法。横坐标表示测点（或角度），纵轴表示电位差 ΔU_c 或 ΔU_s 。第二种是将直角坐标的横轴弯曲成圆形，使其首尾相接，称作环形图。前者可突出曲线特征，后者更为形象。二者兼用有助于推断解释。

1. 充电不对称裂缝形成的异常

图4和图5示出了不对称裂缝 $C_1 = 0, C_2 = 0.2$ （以A井 Z_A 为长度单位，即 $Z_A = 1$ ）在测量环上MN处引起的异常 ΔU_c 典型曲线。这里 $I_c = I = 1$ ，即钻井A将电流全部提供给裂缝并流入裂缝。对于矢径 r 为0至0.2所有 ΔU_c 曲线均有异常反映。环形曲线均呈偏心

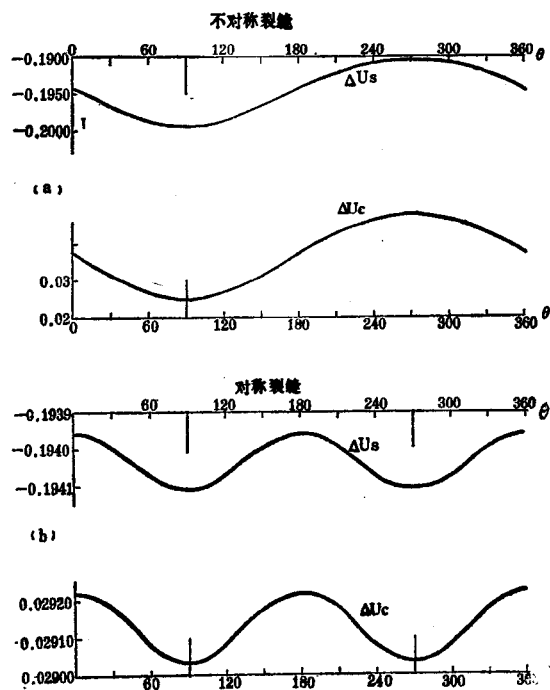


图 3① 视纯异常 ΔU_s 与纯异常 ΔU_c 的等效性

$\frac{\rho}{2\pi} = 1$; $l_c = 1$; $l_a = 0.2$; $l_c = 0.8$ (在 ΔU_s 中); $r = 0.3$; $\Delta = 0.1$, (a) — 不对称裂缝, $C_1 = 0$, $C_2 = 0.2$; (b) — 对称裂缝 $C_1 = C_2 = 0.1$. 图中纵线段表示裂缝方位, 图 3 是从公式 (4)、(6) 和 (7) 算出的

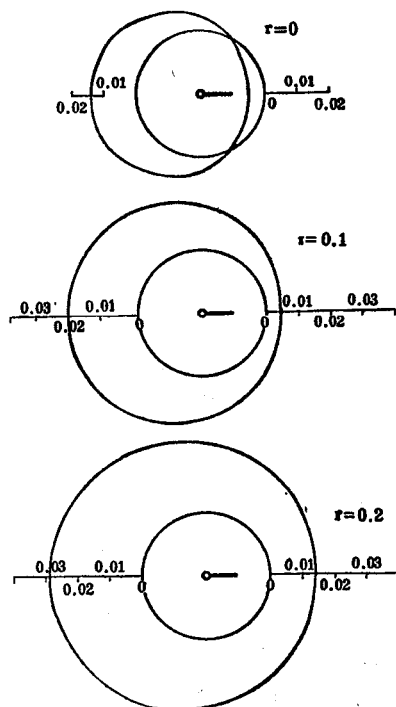


图 4 不对称裂缝纯异常 ΔU_c 典型环形图

$\frac{\rho}{2\pi} = 1$; $l_c = 1$; $Z = 1$; $\Delta = 0.1$; $C_1 = 0$; $C_2 = 0.2$

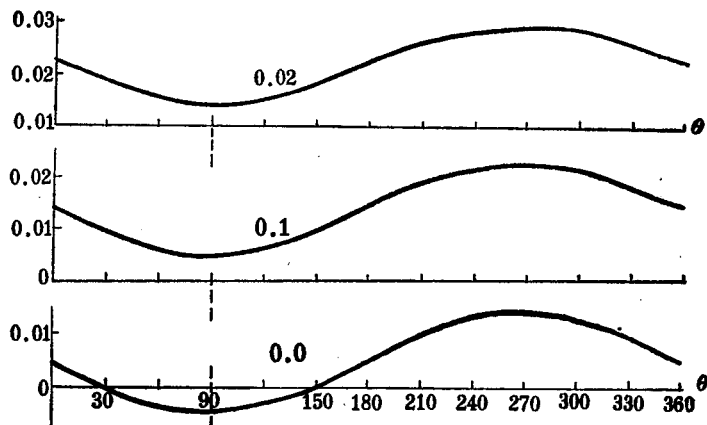


图 5 不对称裂缝电场纯异常 ΔU_c 典型曲线图

条件同图 4, 图中 90 处对应裂缝方向

① 图 3—10 都是从公式 (6) 以 Z 作为单位值算出的, 所以纵坐标是无量纲的。

圆状。 r 小时异常更明显。

不对称裂缝异常的特点和方向判定准则是，在环形图上呈现一偏心圆，其矢径的极小值对应了裂缝的方向；在直角坐标图上（ θ 为 0° — 360° 范围内）曲线出现一个周期，其极小值对应了裂缝方向。

2. 充电对称裂缝形成的异常

图6和图7示出了对称裂缝 $C_1=C_2=0.1$ 在测量环上引起的 ΔU_c 曲线。其特点和方向判定准则是，在环形图上，曲线表现为似椭圆状，短轴方向对应了裂缝方向。 r 大时，异常幅值也大，以 $r=0.3-0.4$ 时异常幅值为最大，之后又趋减少。在直角坐标图中曲线在 $0^\circ-360^\circ$ 范围内出现两个周期，极小值对应了裂缝的方向。

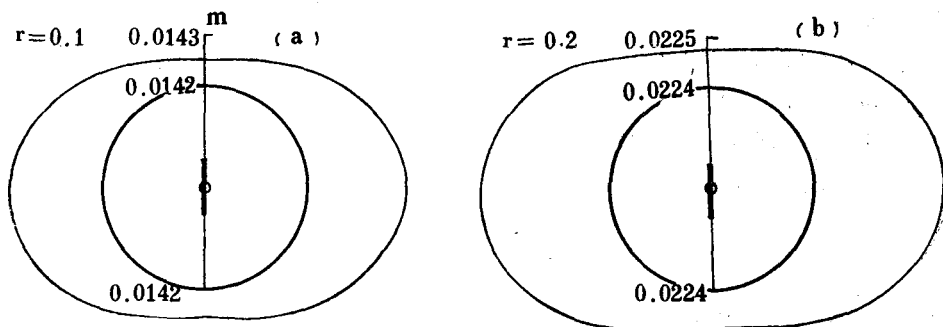


图6 对称裂缝电场纯异常 ΔU_c 典型环形图

$$\frac{\rho}{2\pi} = 1; l_c = 1; Z = 1; \Delta = 0.1; C_1 = C_2 = 0.1$$

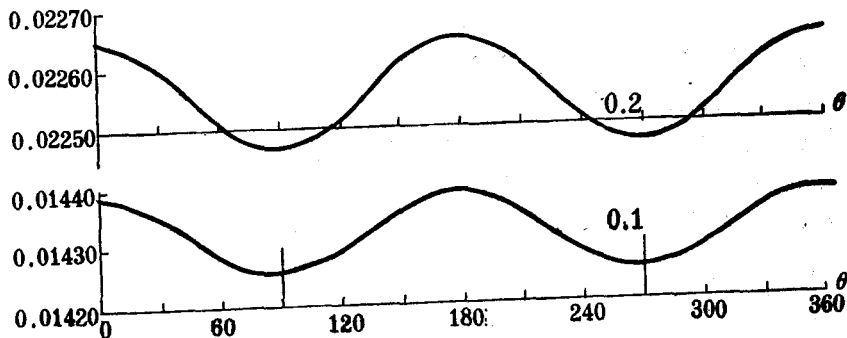


图7 对称裂缝电场纯异常 ΔU_c 典型曲线图

条件同图6

应当指出，视纯异常 ΔU_s 的定义是由(2)式给出的，即压裂后测得的电位差 ΔU 减去压裂前测得的电位差 ΔU_q 。由此得出了上述异常解释推断准则。如果反过来相减，即按

$$\Delta U_s = \Delta U_q - \Delta U \quad (10)$$

定义，则上述解释推断准则也就相反了——环形图上矢径的极大值和直角坐标图上曲线的极大值对应了裂缝的方向。

3. 对异常数量级的估计

纯异常 ΔU_c 的量纲

这里应当指出, 求算 ΔU_c 的(10)式中, 其对数后面部分的分子分母都表示为长度, 所以不论长度取什么单位, 对数的数值不变, 并且是无量纲的。(10)式的量纲仅取决于对数以前的系数部分的量纲。通常我们取 ρ 为 $\Omega \cdot m$, I 为A, 即 V/Ω , $(C_1 + C_2)$ 为m, 则(10)式的量纲应为V。

异常幅度 $\bar{\lambda}$

我们来讨论能测得裂缝电场的最小异常幅度是多少。通常取曲线极大值和极小值的差($\bar{\lambda} = \Delta U_{c^{\max}} - \Delta U_{c^{\min}}$) (指绝对值) $\bar{\lambda}$ 表示异常幅度 (有时也用 $\bar{\lambda} = \Delta U_{c^0} - \Delta U_{c^{90}}$)。

异常的数量级

对于完全不对称裂缝, 如设 $Z=1(1000m)$, $C_1=0$, $C_2=0.1(100m)$, $r=0.1(100m)$, $\Delta=0.1(100m)$ 。从公式(10)算得对数部分极大值为0.00187, 极小值为0.00098, 其差值为0.0009。再做接近实际的假设: $\rho=8\pi\Omega \cdot m$, $I_c=5A$, $C_1=0$, $C_2=100m$ 。(10)式对数以前系数部分等于

$$\frac{\rho I}{2\pi(C_1 + C_2)} = 0.2V.$$

用它乘以对数部分的差值0.0009, 则得异常幅值 $\bar{\lambda} = 0.2V \times 0.0009 = 180\mu V$ 。即在上述条件下可反映出几百 μV 级的异常。

对于常见的不对称裂缝, 如设 $C_1=0.03(30m)$, $C_2=0.07(70m)$, 其他条件不变, 算得对数部分极大值为0.00162, 极小值为0.00126, 其差值为0.00036。按上述方法可算出异常幅值 $\bar{\lambda}=72\mu V$, 即在上述条件下, 可反映出几十 μV 的异常。

对于对称裂缝, 如设 $C_1=C_2=0.05(50m)$, 其它条件不变, 算得对数部分极大值为0.0014439, 极小值为0.0014406, 其差值为0.0000033。按上述方法可算出异常幅值 $\bar{\lambda}=0.66\mu V$, 即在上述条件下, 仅反映出零点几 μV 的异常。

由此可以得出结论, 对于不对称裂缝, 其异常数量级为几十到几百 μV , 在一般野外条件下可以观测到这样小的异常电位差; 对于对称裂缝, 其异常数量级仅为零点几 μV , 在野外测量这样小的异常电位差是困难的, 甚至是无能为力的。在野外条件下工作, 应尽量增大供电电流强度, 以提高测量精度。

4. 充电裂缝不对称程度对电场的影响

充电裂缝不对称程度对纯异常 ΔU_c 幅值的衰减和曲线的周期有着明显的影响。从图8可以看出, 异常的 $\bar{\lambda}$ 值的衰减程度比起裂缝趋于对称的程度来要快得多。他们的异常幅值相差达两个数量级。

从图9可以看出, 曲线形状在 $0^\circ-360^\circ$ 范围内, 裂缝由不对称逐步过渡到对称过程中, 曲线由出现一个周期很快过渡为两个周期。图中曲线3的比例尺比曲线1和2大10倍。

5. 裂缝长度 $(C_1 + C_2)$ 对异常幅值 $\bar{\lambda}$ 的影响

从图10可以看出, 裂缝越长, 异常幅值也越大。当裂缝长度 $(C_1 + C_2)$ 在1以内时

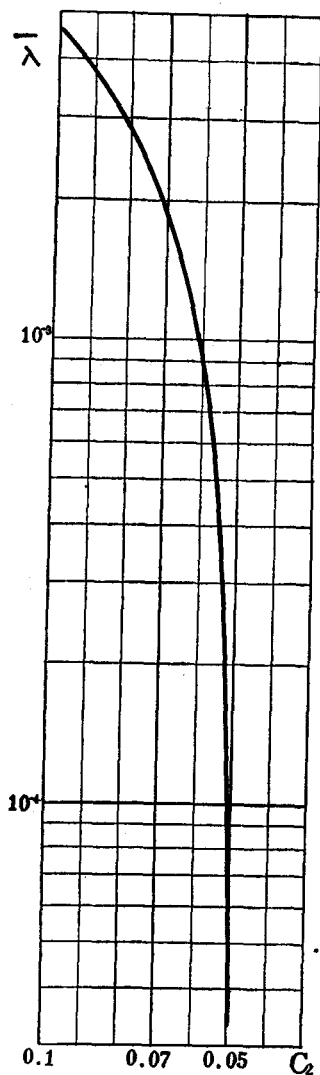


图 8 异常幅值 $\bar{\lambda} = \Delta U_c^0 - \Delta U_c^{90}$ 随裂缝趋于对称时的衰减

$\frac{\rho}{2\pi} = 1; l_c = 1; Z = 1; r = 0.1;$
 $\Delta = 0.1; (C_1 + C_2) = 0.1;$ 图中
 横坐标表示 C_2

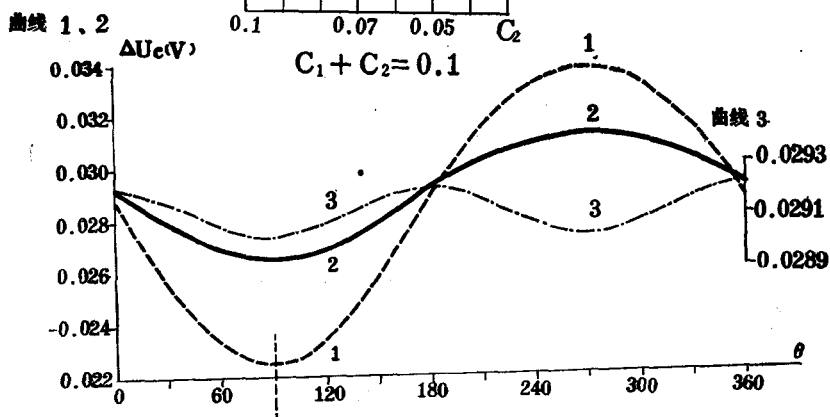


图 9 充电裂缝的不对称程度对异常幅值和曲线周期的影响

$\frac{\rho}{2\pi} = 1; l_c = 1; Z = 1; r = 0.1; \Delta = 0.1; 1 - C_1 = 0, C_2 = 0.1; 2 - C_1 = 0.03, C_2 = 0.07; 3 - C_1 = C_2 = 0.05.$

曲线 1 和 2 对应左纵坐标, 曲线 3 对应右纵坐标

(设 $Z=1$)，几乎与异常幅值 $\bar{\lambda}$ 成正比。当 (C_1+C_2) 大于 2 时， $\bar{\lambda}$ 值增长大为减慢(对称裂缝)，甚至降低(不对称裂缝)。还可以看出，不同裂缝长度所形成的异常幅值 $\bar{\lambda}$ 的数量级是不同的。当裂缝长度小于约 $0.06Z$ 时，不对称裂缝比对称裂缝的异常幅值几乎大三个数量级；当裂缝长度约在 $0.06-0.6Z$ 时，可大两个数量级；当裂缝长度约大于 $0.6Z$ 时，仅大一个数量级。总之，在实际工作中，总是希望裂缝长些、不对称些好。

在油田井下压裂工作中，裂缝长度仅为埋深 Z 的 $0.1-0.2$ ，甚至更小，其异常幅值也就很小了。为了能取得可靠的异常数据，必须采取许多重要措施(后面有所介绍)，其中包括增大供电电流强度和降低裂缝溶液的电阻率。但在确定地下水流向和地应力压裂方向工作中，裂缝深度一般较浅，而其长度相对较大。用一般方法而不必增加特殊措施便可以得到明显的异常。利用图10可以进行因裂缝长度不同而形成的异常幅值变化的估计。

6. MN距离 Δ 与纯异常 ΔU_c 的关系

图11示出了 $r=0.2$ 时 $\Delta=0.1, 0.2$ 和 0.3 时MN处纯异常 ΔU_c 曲线。可以看出，在所讨论的范围内，适当增大 MN 距离 Δ 可使异常增大，并且不会改变异常形态。因此，在实

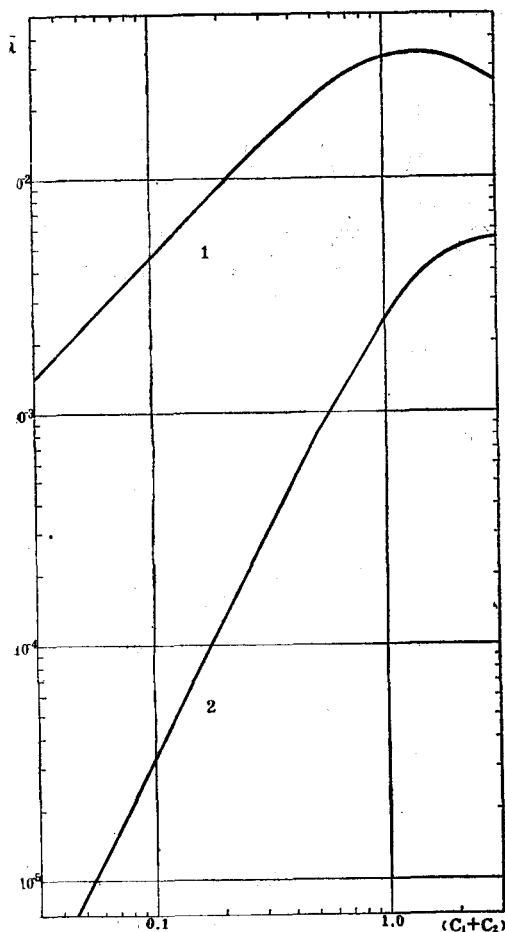


图 10 裂缝长度 (C_1+C_2) 对异常幅值 $\bar{\lambda} = \Delta U_c^\theta - \Delta U_c^{90}$ 的影响

$$\frac{\rho}{2\pi} = 1; l_c = 1; Z = 1; r = 0.2; C_1 = 0; C_2 = 0.1$$

$$0.1; \Delta = 0.1$$

1—不对称裂缝, $C_1 = 0$;

2—对称裂缝, $C_1 = C_2$

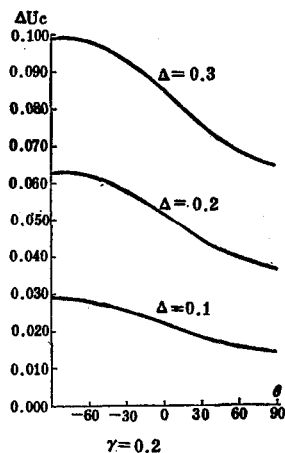


图 11 MN距离 Δ 的选择

际工作中,适当增大MN是必要的。但这会使干扰讯号增大。应视具体情况来确定 Δ 。一般 Δ 选在0.1—0.3间为好。

(三) 模型实验验证

我们对上述数学模型和异常分析结果通过模型实验进行验证。可以认为,仅需验证从上述分析得出的裂缝方向判定准则就够了。

1. 水槽模型实验

水槽高80cm,宽80cm,长150cm。水槽壁用塑料板拼焊而成。24对测量电极固定在一块圆形塑料板上。电极是黄铜材料制成的。用波段开关控制电极转换。用外径6mm的黄铜管模拟测量井A和汇流井B的套管。用一条厚1mm的铜片模拟压裂裂缝。水槽中水的电阻率为 $6\Omega\cdot\text{m}$ 。

观测时先测不装模拟裂缝的正常场,然后将模拟裂缝(铜片)安装的测量井A的底部某一方向上,其一端与井A下端接触,测总场。用公式(2)计算视纯异常并绘制曲线。根据测量数据绘出的直角坐标系曲线示于图12。

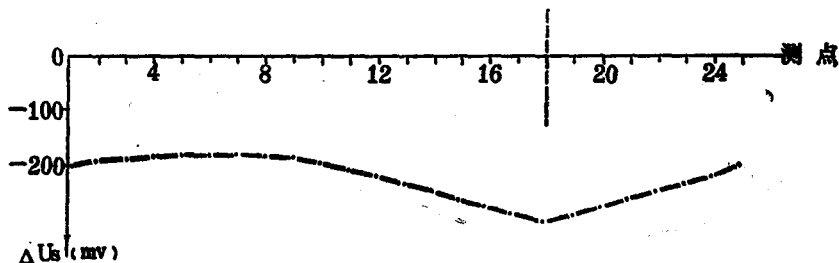


图12 水槽模型实验结果 ΔU_s 曲线图

$Z_A = 74\text{cm}$; $Z_B = 74\text{cm}$; $AB = 110\text{cm}$; $C_1 + C_2 = 15\text{cm}$; $I = 40\text{mA}$; $f = 3\text{Hz}$; $MN = 10\text{cm}$;
B在13号测点方向; $C_1 + C_2$ 在18号测点方向

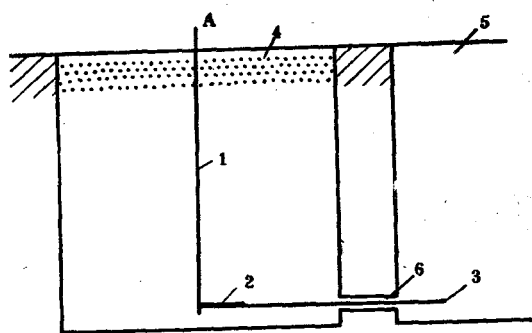


图13 土槽装置

1—紫铜管,模拟套管A; 2—细铜棍,模拟裂缝;
3—绝缘棒; 4—土槽; 5—土沟; 6—小孔

从图12中可以看出 ΔU_s 曲线在 360° 范围内出现一个周期,电位极小值对应了 $(C_1 + C_2)$ 裂缝的设置方向——18号测点。这与上述理论分布结果是一致的。该点 $\Delta U_s = 1.505\text{mV/mA}$, $\Delta U = 1.240\text{mV/mA}$ 。检查后者值 $\Delta U = 1.210\text{mV/mA}$ 。

2. 土槽模型实验

在土槽模型实验中,也获得了较好的数据。在室外设置一个 $100\text{cm} \times 100\text{cm} \times 100\text{cm}$ 的土槽4,在槽的一个侧面隔30cm挖一条土沟5,在沟的底面开一个小孔6与土槽连通(图13)。

首先在土沟6中用一根较长的绝缘棒3系上一条长20cm的细铜棍2,然后从小孔中将系好细铜棍的绝缘棒送到土槽中心部位,细铜棍模拟为裂缝。再将模拟套管的紫铜管1

从土槽中心置入, 并使其下端与模拟裂缝 2 接触。将一铜棒模拟为 B 极, 打入距 A 极一定距离的土中。土槽中填入细砂并淋以水, 使其具有一定的湿度。地表面盖好固定 24 对测量电极的测量板, 然后进行测量。此时测得的值是总场 ΔU 。从土沟中将模拟裂缝抽出, 从而可测得 ΔU_0 。这样做可以保证得到较高精度的数据。

从观测数据得知, 重复误差为 1%, 视纯异常为重复误差的 5—8 倍。图 14 为土槽实验结果。可以看出, 异常反映是明显的, 与上述理论分析结果是一致的。还可以看出, 汇流电极 B 无论在什么方向上 (图 14(a) 的 4 号点方向, 图 14(b) 的 14 号点方向和图 14(c) 的 5 号点方向) 均没有使异常发生畸变, 表征裂缝方向的曲线极小值均位于 7 号点方向上。

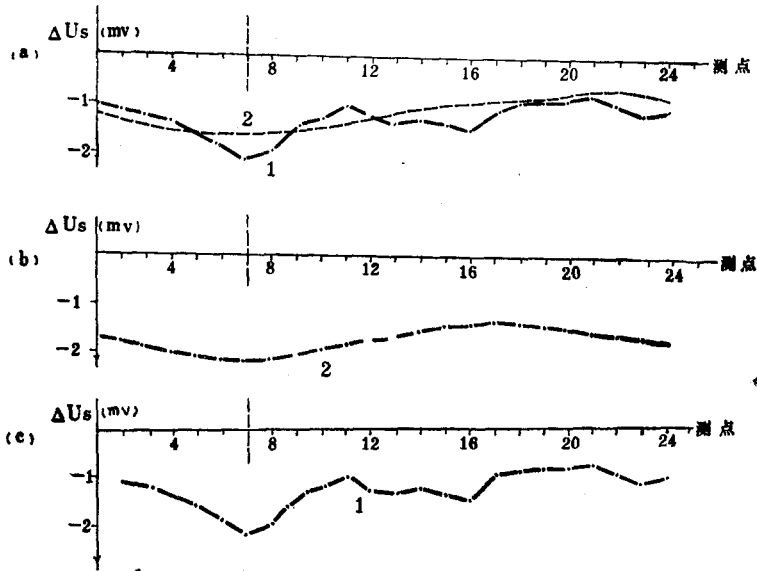


图 14 土槽实验结果 ΔU_s 曲线图

1—实验曲线; 2—数据处理 (平滑) 后的曲线; $Z_A = 70\text{cm}$, $Z_B = 120\text{cm}$, $AB = 500\text{cm}$, $I = 26\text{mA}$, $f = 3\text{Hz}$; $C_1 + C_2$ 在测量环 7 号点方向; (a)—B 在测量环 4 号点方向, $C_1 + C_2 = 20\text{cm}$; (b)—B 在测量环 14 号点方向, $C_1 + C_2 = 20\text{cm}$; (c)—B 在测量环 5 号点方向, $C_1 + C_2 = 15\text{cm}$

图 14(a) 和 (b) 的裂缝长度为 20cm, 图 14(c) 减小为 15cm, 可以看出, 裂缝的大小也没有使异常发生畸变。

二、工作方法和技术

(一) 测量精度的保证

理论计算与模型实验的结果表明, 视纯异常幅度为几十 μV 至几百 μV 。为此, 对测量仪器和供电设备必须有严格的要求, 同时要有一套严格的工作方法。只有在这两方面得到保证的前提下, 才能取得微弱的可靠数据。

对测量仪器, 要求输入阻抗在 $10\text{M}\Omega$ 以上, 噪声及漂移在 $10\mu\text{V}$ 以内, 具有较好的抑制各种干扰的能力, 电位分辨率为 $10\mu\text{V}$ 。供电装置要求具有输出功率大及输出电流稳定的