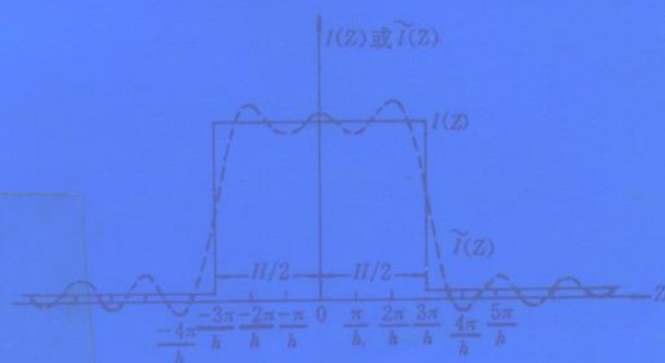
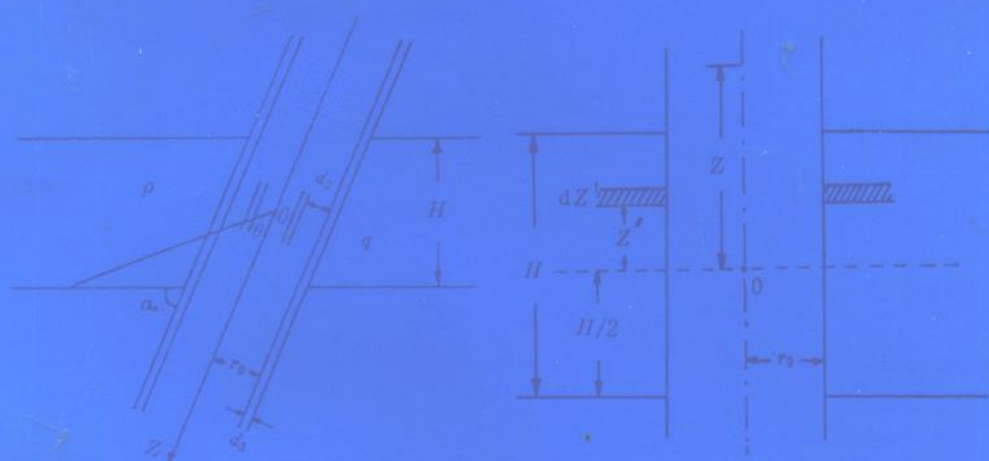


γ 测井分层解释法

汤 彬 编著

赵廷业 审

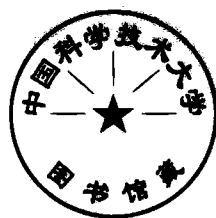


原子能出版社

γ 测井分层解释法

汤 彬 编著

赵廷业 审



原子能出版社

(京)新登字 077 号

内容提要

本书从定量铀含量计算的角度,系统地阐述了 γ 测井分层解释理论、方法和参数确定技术。其中包括: 钻孔 γ 场计算,地质脉冲函数和形态系数等基础理论;分层解释正演方程,分层解释方法(反褶积法、迭代法、数字信号法、逆矩阵法和分解法等)和实测 γ 测井曲线分层解释参数的确定。本书提供了 BASIC 和 FORTRAN 语言的分层解释计算机程序,并给出了计算实例。此外,还简要介绍了 γ 能谱测井的分层解释方法;附录中列出了模型 γ 测井的标准数据及钻孔 γ 场计算的公式推导过程。

本书可作为高等院校有关专业高年级学生或研究生的学习参考书,也适合于铀矿地质和勘查地球物理专业的工程技术人员阅读;本书又是一本供从事核测井工作的技术人员用的分层解释技术手册。

Prospectus

The book states systematically the subdivision interpretaion theory, method and technique of ditermining the parameters for calculating uranium content, including calculation of γ ray field for boreholes, geologic impulse response function, shape coefficient, the original equations of subdivision interpretation, the method of subdivision interpretation (deconvolution method, iterative method, digital-signal method, inverse-matrix method and resolution-matrix method, etc.), the technique of determining parameters of subdivision interpretation from γ ray curve of logs and other theories. The book gives BASIC and FORTRAN source programmms of subdivision interpretation and examples of computation, and also briefly introduces the subdivision interpretation methods of γ ray spectrum logging. The standard data from γ ray logging in models and the procedures of deducting calculation formulas for γ radiation field in drill-hole have been listed in appendixes.

The book can be used as a reference book for undergraduate and graduate students in universities and colleges, is suitable for engineers and technicians engaged in exploration geophysics to read, and is a technical handbook of subdivision interpretation for the engineers and technicians engaged in nuclear logging.

γ 测井分层解释法

汤 彬 编著

赵廷业 审

责任编辑 袁祖伟

原子能出版社出版

(北京 2108 信箱 100037)

平谷县大北印刷厂印刷

新华书店总店科技发行所发行·新华书店经售

☆

开本 787×1092 1/16 ·印张 13.5 ·字数 400 千字

1993 年 4 月北京第一版·1993 年 4 月北京第一次印刷

印数 1—1300

ISBN7-5022-0869-0

TL·562 定价:13.00 元

序 言

《 γ 测井分层解释法》一书是依据国内外专家、学者和从事实际 γ 测井工作者的有关论述,尤其是国内80年代以来对分层解释方法的基础理论与应用技术研究的最成果,并结合著者本人对 γ 测井分层解释方法长期研究的成果编著的。

国内多年的研究与实践,不仅提出了改进的反褶积法、逐次迭代法、逆矩阵法和矩阵分解法,还提出了数字信号法(离散反褶积法);斜孔 γ 测井的基础理论和分层解释技术等,取得了突破性进展,并在铀矿 γ 测井分层解释实践中得到了验证与广泛运用。“铀矿 γ 测井分层解释方法研究”项目,已于1990年通过部级鉴定,并获1991年度部级科技进步二等奖。这些研究成果已被列入新的《 γ 测井规范》(中华人民共和国核工业标准,EJ/T-611-91号)中推行使用。为执行新的《 γ 测井规范》,经专家建议,中国核工业总公司地质局决定,由华东地质学院汤彬副教授汇集国内外最新研究成果,综合编著成《 γ 测井分层解释法》一书,供从事 γ 测井工作者及技术管理人员使用。该书作为《 γ 测井规范》的配套读物,并作为分层解释技术的手册性出版物,其结构和内容是经专家多次研讨确定的。该书结构严谨,内容全面,系统性强,理论与实践紧密结合,具有实用性和可操作性。它不仅是 γ 测井工作者必备的工具书,而且可作为大专院校勘查地球物理专业的教师和高年级学生的参考书,还可供其它应用地球物理专业的工程技术人员参考。

赵廷业

1993年2月20日

前 言

γ 测井是放射性勘探的主要手段之一,人们通过对 γ 测井曲线的分析,能实现对矿体的定量解释。它不仅划分岩(矿)层界线,更重要的是寻找放射性矿床,确定其放射性元素(铀、钍或钾)含量。

早在40年前,铀矿物探工作者对 γ 测井(取样)曲线的定量解释就做了一定的研究工作,最早提出的定量解释方法是平均含量法。60年代初,美国学者Scott提出了逐次迭代的分层解释方法,并编制了GAMLOG计算机程序。70年代,逆矩阵法也被人提出,但没有得到广泛的应用。70年代末,反滤波技术开始应用到 γ 测井曲线的定量解释中,加拿大学者Conaway在前苏联学者Davydov的研究基础上,提出了三点式反褶积分层解释方法。

我国自50年代开始从事铀矿地质研究工作,在解释 γ 测井资料时,一直采用平均含量法。该方法的主要缺点是无法显示出矿层内铀、钍含量的变化形态,也无法区分矿层群中的非矿夹层;同时,矿层边界的确定带有较大的人为误差,且作图和计算异常面积的工作量较大;另外,由于矿体形态复杂,矿层边界的确定方法($\frac{1}{2} I_{max}$ 法, $\frac{4}{5} I_{max}$ 法或给定含量法)也较难掌握,因此,该法的计算机程序更难以实现。

70年代末,我国开始引入分层解释技术,首先介绍了逐次迭代法和逆矩阵法,并提出了矩阵分解法。80年代初,在我国铀矿物探界广泛开展了分层解释方法的研究工作,先后提出了多种改进型的反褶积法;对逐次迭代法、逆矩阵法和矩阵分解法也作了大量的研究工作,并提出了数字信号法(离散反褶积法);同时对分层解释的基础理论和应用技术也作了系统研究,其成果达到了国际先进水平;尤其是在斜孔 γ 测井的理论和分层解释技术等方面取得了重大突破,并在生产实践中得到了广泛的应用。

各类分层解释方法与传统的平均含量法相比,它们能够详细提供矿层内铀、钍含量的变化形态,有效地区分非矿夹层,能方便地实现计算机程序,人为误差小,不用作图和计算异常面积,是先进的定量确定放射性元素(铀、钍或钾)含量的方法。大量事实表明,我国学者在 γ 测井分层解释的研究中,取得了较突出的成绩,为分层解释的全面推广和应用创造了条件。

1990年由中国核工业总公司地质局组织的“铀矿 γ 测井分层解释方法研究”项目通过了部级鉴定,并获1991年度部级科技进步二等奖;1989年由编著者承担的子课题“ γ 测井分层解释理论、技术与软件系统”先期通过了部级鉴定,这些研究成果对改变我国铀矿 γ 测井工作的现状起了重要作用。为此,1991年对原《 γ 测井规范》进行了修订,建立了中华人民共和国行业标准——《 γ 测井规范》,推行了分层解释方法与技术。为顺利执行新的《 γ 测井规范》,经有关专家提议和多次会议讨论,中国核工业总公司地质局决定编写本书,供从事 γ 测井的广大技术人员使用。

本书分上下两篇共7章,另有4个附录。上篇分3章,主要介绍 γ 测井分层解释的理论基础和反褶积运算的数学基础。第1章介绍了钻孔 γ 场的理论计算公式,详细推导过程在附录A中介绍。第2章介绍了 γ 测井分层解释的理论基础——地质脉冲函数和形态系数的概念与性质。第3章介绍了反褶积运算的数学基础及数字信号处理技术。下篇分4章,主要介绍分层解释方法、参数选择技术和一些生产应用问题,并配有相应的计算机程序。第4章介绍了反褶积法原理、特征参数 α 的确定技术和反褶积法解释的BASIC程序。第5章介绍了迭代法的计算步骤、形态系数计算中的参数确定技术和迭代法解释的FORTRAN程序。第6章介绍了数字信号法、反褶积-差值迭代法、单一系数分解法、逆矩阵法等其它分层解释方法的原理与相关的技术问题。第7章介绍了 γ 能谱测井分层解释原理,它采用了剥谱与解释同步进行的方法,较传统方法解释精度更高、理论更严密。本书上下两篇各有侧重,上篇以理论为主,下篇以方法、技术为主。本书主要作为 γ 测井分层解释的技术手册,可供广大核地球物理工作者、大专院校勘查地球物理专业的教师和高年级学生参考,也可作为其它应用地球物理专业的工程技术人员参考。

《 γ 测井分层解释法》一书是在“铀矿 γ 测井分层解释方法研究”和“ γ 测井分层解释理论、技术与软件系统”等科研报告的基础上综合编写而成的,它包含了秦积庚、赵廷业、傅祥麟、狄觉斋、刘清鉴和黄健民等高级工程师的研究成果;编著者所在课题组的段波和陆玲两位同志也为本书提供了大量素材,陆玲讲师还绘制或描绘了书中的绝大部分图件。在本书的编写过程中,中国核工业总公司地质局领导和华东地质学院物探系部分教师给予了热情帮助和细心指导;赵廷业、傅祥麟、狄觉斋和刘清鉴等高级工程师多次审阅了本书,并提出了很多宝贵意见;原子能出版社袁祖伟副编审对本书的出版付出了辛勤的劳动,在此一并表示感谢!由于编著者水平有限,缺点和错误难免,请各位读者批评指正。

汤彬

1992年12月修订于江西抚州市

目 录

前言	(1)
上篇 γ 测井分层解释理论基础	(1)
1 钻孔 γ 场	(5)
1.1 钻孔 γ 场理论计算	(5)
1.1.1 直孔 γ 场	(5)
1.1.1.1 点状探测器	(6)
1.1.1.2 线状探测器	(7)
1.1.2 斜孔 γ 场	(7)
1.1.2.1 点状探测器	(8)
1.1.2.2 线状探测器	(8)
1.1.3 斜孔 γ 场的近似计算	(9)
1.1.3.1 点状探测器	(9)
1.1.3.2 线状探测器	(9)
1.2 描述钻孔 γ 场的两个基本方程	(9)
2 地质脉冲函数与形态系数	(12)
2.1 地质脉冲函数的概念及其计算公式	(12)
2.1.1 地质脉冲函数的概念及其计算通式	(12)
2.1.2 γ 场地质脉冲函数的计算公式	(14)
2.1.2.1 点状探测器直孔 γ 场地质脉冲函数	(14)
2.1.2.2 线状探测器直孔 γ 场地质脉冲函数	(14)
2.1.2.3 点状探测器斜孔 γ 场地质脉冲函数	(15)
2.1.2.4 线状探测器斜孔 γ 场地质脉冲函数	(15)
2.1.2.5 斜孔 γ 场地质脉冲函数的近似计算	(16)
2.2 形态系数的概念及其计算公式	(17)
2.2.1 形态系数的传统定义法	(17)
2.2.2 形态系数的地质脉冲函数定义法	(18)
2.2.3 γ 场形态系数的计算	(19)
2.3 近似地质脉冲函数与近似形态系数	(19)
2.3.1 近似地质脉冲函数	(20)
2.3.1.1 近似地质脉冲函数的来源	(20)
2.3.1.2 近似地质脉冲函数的直接求法	(21)
2.3.1.3 近似地质脉冲函数的误差与含量计算中的负值	(22)
2.3.2 近似形态系数	(26)
2.3.2.1 近似形态系数的定义	(26)
2.3.2.2 近似形态系数的误差	(27)
2.4 特征参数 α 的性质	(28)
2.4.1 视特征参数 α	(28)

2.4.2	影响特征参数 α 的若干因素	(28)
2.4.2.1	探测器长度的影响	(29)
2.4.2.2	岩(矿)层密度的影响	(30)
2.4.2.3	井径的影响	(31)
2.4.2.4	套管、泥浆及仪器外壳附加吸收的影响	(31)
2.4.2.5	矿层厚度的影响	(31)
2.4.3	特征参数 α 对矿层线储量的影响	(33)
2.4.4	特征参数 α 对分层能力的影响	(33)
3	数字信号处理与反褶积的数学基础	(35)
3.1	连续函数反褶积运算的数学基础	(35)
3.1.1	傅立叶变换与频谱分析	(35)
3.1.2	信号滤波	(35)
3.1.3	滤波的空间域表达式与褶积定理	(36)
3.2	连续信号的离散化与取样定理	(36)
3.2.1	连续信号的离散化	(36)
3.2.2	取样定理一	(37)
3.2.3	取样定理二	(37)
3.3	离散信号恢复成连续信号的方法及其误差的估计	(38)
3.3.1	离散信号恢复成连续信号的方法	(38)
3.3.2	γ 测井曲线(或含量曲线)离散取样产生的误差	(39)
3.4	数字信号反褶积运算的数学基础	(40)
3.4.1	数字信号的频谱分析	(40)
3.4.2	连续函数褶积运算的离散取样与离散褶积运算	(40)
3.4.3	数字信号滤波与离散褶积定理	(40)
下篇	γ 测井分层解释法	(43)
4	反褶积法	(46)
4.1	反褶积法的含量计算公式	(46)
4.1.1	反地质脉冲函数及其含量计算	(46)
4.1.2	近似反地质脉冲函数(近似反滤波器)	(47)
4.1.3	反褶积法含量计算公式	(47)
4.1.3.1	三点式反褶积法含量计算公式	(47)
4.1.3.2	多点式反褶积法含量计算公式	(48)
4.1.4	反褶积法的误差分析	(50)
4.1.4.1	三点式含量计算公式的误差估计	(51)
4.1.4.2	特征参数 α 偏小产生的负值	(52)
4.2	特征参数 α 的现场测定方法	(52)
4.2.1	计算特征参数 α 的判别因子法	(53)
4.2.1.1	判别因子 E 法	(53)
4.2.1.2	判别因子 B 法	(53)
4.2.1.3	相对判别因子法	(54)
4.2.1.4	判别因子公式法	(54)
4.2.2	斜率法	(56)
4.2.2.1	两点斜率法	(56)

4.2.2.2	多点斜率法	(56)
4.2.2.3	作图法	(56)
4.3	反褶积法的计算机程序与框图	(57)
4.3.1	本底处理	(57)
4.3.2	含量计算	(57)
4.3.2.1	三点式反褶积法	(57)
4.3.2.2	五点式反褶积法	(58)
4.3.3	特征参数 α 的计算	(58)
4.3.3.1	判别因子 E 法	(59)
4.3.3.2	判别因子 B 法	(61)
4.3.3.3	相对判别因子法	(62)
4.3.4	负值处理	(64)
4.3.5	主程序及程序操作	(64)
4.3.5.1	主程序	(65)
4.3.5.2	程序操作	(68)
4.4	反褶积法计算实例	(69)
4.4.1	对于薄矿层的解释	(69)
4.4.2	对于薄矿夹层的解释	(70)
4.4.3	对于倾斜薄矿层的解释	(70)
5	迭代法	(72)
5.1	形态系数型分层解释法	(72)
5.1.1	形态系数型分层解释法正演问题	(72)
5.1.2	形态系数型分层解释法误差分析	(74)
5.2	迭代法的含量计算方法	(74)
5.2.1	差值迭代法和比值迭代法	(74)
5.2.2	高斯迭代法	(76)
5.2.2.1	解 n 元线性方程组的迭代法	(76)
5.2.2.2	γ 测井分层解释高斯-塞德尔迭代法(简称高斯迭代法)	(77)
5.2.2.3	γ 测井高斯迭代法的最优松弛因子的选取	(77)
5.3	形态系数的计算及相应参数的确定	(78)
5.3.1	形态系数的计算	(78)
5.3.2	形态系数计算中相应参数的确定	(78)
5.3.2.1	钻井条件的确定	(78)
5.3.2.2	线吸收系数 μ 值的确定	(79)
5.3.2.3	矿层与钻孔相遇角 α_0 、探测器长度 L 的确定	(79)
5.4	迭代法的计算机程序与框图	(81)
5.4.1	形态系数的计算	(81)
5.4.1.1	计算重积分的函数子程序	(81)
5.4.1.2	计算形态系数子程序	(84)
5.4.1.3	计算形态系数公式中被积函数的函数子程序	(86)
5.4.1.4	计算形态系数公式中积分上限函数的函数子程序	(86)
5.4.1.5	计算形态系数公式中积分下限函数的函数子程序	(87)
5.4.1.6	主程序	(88)

5.4.2	迭代法计算	(89)
5.4.2.1	本底处理	(89)
5.4.2.2	迭代过程	(90)
5.4.2.3	形态系数的选择	(91)
5.4.2.4	负值处理	(93)
5.4.2.5	主程序	(94)
5.4.3	程序操作	(97)
5.4.3.1	形态系数计算程序	(97)
5.4.3.2	迭代法含量计算程序	(97)
5.5	迭代法计算实例	(98)
5.5.1	形态系数计算实例	(98)
5.5.2	形态系数常用理论计算表	(99)
5.5.3	迭代法分层解释实例	(99)
6	其它分层解释法	(105)
6.1	数字信号法	(105)
6.1.1	离散反滤波器 a_n^* 的计算及其含量计算通式	(105)
6.1.2	数字信号法常用计算公式	(106)
6.1.3	数字信号法在分层解释中的一些技术问题	(107)
6.1.3.1	精确三点式反褶积算子	(107)
6.1.3.2	算子长度不够时的离散反滤波函数与近似离散反滤波函数	(107)
6.1.3.3	算子长度对数字信号分层解释法的影响	(108)
6.2	反褶积-差值迭代法	(109)
6.3	逆矩阵法	(110)
6.3.1	求解线性方程组的逆矩阵法及其在分层解释中的应用	(111)
6.3.2	逆矩阵特点及其组合逆矩阵系数法	(111)
6.3.3	常用的逆矩阵法——逆矩阵系数法	(112)
6.4	单一系数分解法	(114)
6.4.1	对称正定带型矩阵的乔累斯基分解法	(114)
6.4.2	γ 测井分层解释单一系数分解法	(115)
6.5	分层解释实例	(118)
6.5.1	数字信号法计算实例	(118)
6.5.2	迭代法计算实例	(119)
6.5.3	分解法计算实例	(121)
6.5.4	逆矩阵法计算实例	(122)
7	γ 能谱测井分层解释简介	(123)
7.1	γ 能谱测井基本原理	(123)
7.2	γ 能谱测井曲线的分离解释	(124)
7.2.1	常规的 γ 能谱测井曲线的分离方法	(124)
7.2.2	分离 γ 能谱曲线的分层解释法简介	(124)
7.2.2.1	单元层的分层解释法	(125)
7.2.2.2	反褶积分层解释法	(125)
附录 A	钻孔 γ 场理论表达式的推导	(127)
A.1	γ 场球坐标积分表达通式	(127)

A.2 直孔 γ 场	(128)
A.2.1 矿层边界 γ 射线照射量率的计算	(128)
A.2.2 矿层中心点 γ 射线照射量率的计算	(129)
A.2.3 井轴上任一点 γ 射线照射量率的计算	(130)
A.2.4 线状探测器中心点 γ 射线照射量率的计算	(130)
A.3 斜孔 γ 场	(133)
A.3.1 命题一与它的推论	(134)
A.3.1.1 命题一	(134)
A.3.1.2 推论	(136)
A.3.2 命题二	(136)
A.3.3 α_φ 与 φ 的关系式	(138)
A.3.4 斜孔 γ 场矿层边界 γ 射线照射量率计算公式	(138)
A.3.5 斜孔 γ 场矿层中心 γ 射线照射量率计算公式	(140)
附录 B 积分运算的 Simpson(辛普森)算法	(141)
B.1 Simpson 求积公式	(141)
B.2 变步长 Simpson 求积公式	(142)
B.3 自适应步长 Simpson 算法	(144)
B.4 重积分的计算	(148)
附录 C 分层解释法源程序清单	(151)
C.1 五点式反褶积法	(151)
C.2 反褶积-差值迭代法	(153)
C.3 逆矩阵系数法	(156)
C.4 单一系数分解法	(159)
C.5 数字信号法	(161)
C.6 比值迭代法	(166)
C.7 三点式反褶积法	(169)
C.8 几个公用程序	(170)
附录 D 石家庄模型站 γ 测井标准数据	(174)
参考文献	(201)

上篇

γ 测井分层解释理论基础

钻孔 γ 场的理论主要建立在一次 γ 辐射场基础上,比较成熟的是直孔一次 γ 场(如果不特别声明,后文所指 γ 场均为一次 γ 场)。为便于对 γ 测井分层解释基础理论及方法、技术有比较深入的了解,上篇主要介绍钻孔 γ 场理论计算、地质脉冲函数、形态系数、特征参数 α 等 γ 测井分层解释的一些理论基础,也介绍了反褶积法与数字信号法中的一些数字信号技术。为了解分层解释法和平均含量法各自的特点,以及与后者相比分层解释法所具有的优越性,首先对平均含量法作一简单介绍。

平均含量法是传统的 γ 测井定量解释方法。通常,用平均含量法确定矿体厚度的方法有以下三种:

$\frac{1}{2}I_{\max}$ 法

当均匀矿层的厚度 H 足够大(趋于无穷)时,矿层边界($Z=H/2$)的 γ 射线照射量率可以近似表示为

$$I(H/2) = \frac{I_{\max}(2\frac{H}{2} + H) + I_{\max}(2\frac{H}{2} - H)}{2} = \frac{1}{2}I_{\max}(2H) \approx \frac{1}{2}I_{\max}(H)$$

也就是说,厚度 H 足够大时,矿体的边界点的 γ 射线照射量率正好是该矿体中心点 γ 射线照射量率的一半($1/2$)。因此,我们可以通过寻找 $\frac{1}{2}I_{\max}(H)$ γ 射线照射量率点划分矿体边界,进而利用半极值宽度确定矿体厚度。

$\frac{4}{5}I_{\max}$ 法

当矿体厚度 H 不是足够大($H\rho < 50-80\text{g/cm}^2$)时,一般不宜采用 $\frac{1}{2}I_{\max}$ 法,而是采用 $\frac{4}{5}I_{\max}$ 法。也就是寻找 $\frac{4}{5}I_{\max}$ γ 射线照射量率点,确定异常宽度 $Z_{4/5}$,然后查找事先已制作好的 $Z_{4/5}-H$ 量板,最后确定矿体厚度 H 。

$Z_{4/5}-H$ 量板一般在直孔模型上实测,有时也采用直孔一次 γ 场作理论计算。因为

$$I(Z_{4/5}/2) = \frac{4}{5}I_{\max}(H)$$

而

$$I(Z_{4/5}/2) = \begin{cases} \frac{I_{\max}(Z_{4/5} + H) + I_{\max}(H - Z_{4/5})}{2} & Z_{4/5} \leq H \\ \frac{I_{\max}(Z_{4/5} + H) - I_{\max}(Z_{4/5} - H)}{2} & Z_{4/5} > H \end{cases}$$

所以

$$1.6I_{\max}(H) = \begin{cases} I_{\max}(Z_{4/5} + H) + I_{\max}(H - Z_{4/5}) & Z_{4/5} \leq H \\ I_{\max}(Z_{4/5} + H) - I_{\max}(Z_{4/5} - H) & Z_{4/5} > H \end{cases}$$

解上述积分方程,可以得到 $Z_{4/5}-H$ 量板。

给定含量法

当矿体分布不均匀,矿体边界不清时,前面介绍的 $\frac{1}{2}I_{\max}$ 法与 $\frac{4}{5}I_{\max}$ 法均不适用。若矿层到围岩是渐变过渡的,我们可以采用给定含量法。也就是含量大于 $q_{\text{给}}$ 时划入矿层内,否则划入围岩中,这时候矿体边界就是 γ 射线照射量率 $I_{\text{给}}$ 处:

$$I_{\text{给}} = K \cdot q_{\text{给}} \frac{C(1-\eta)}{C_1 \cdot C_2}$$

式中:

K 称为测井换算系数,其值等于含量为 0.01% 的无限均匀矿层的中心点产生的 γ 射线照射量率;

C_1, C_2 分别为套管和井液对 γ 射线的吸收校正系数;

C 为放射性平衡系数(铀镭平衡系数);

η 为有效射气系数。

通常,我们令

$$K_0 = \frac{4\pi A\rho}{\mu} u(0, p, 0) C(1-\eta) = Ku(0, p, 0) C(1-\eta) \approx K \frac{C(1-\eta)}{C_1 \cdot C_2}$$

为作过钻井条件修正的换算系数。显然,采用给定含量法确定矿体边界后,我们可以求得矿体的厚度。

通常,平均含量法均采用放射性测井曲线下的异常面积 S 确定矿层放射性元素(铀、钍或钾)的含量,也就是

$$\begin{aligned} S &= \int_{-\infty}^{\infty} I(Z) dZ \\ &= 2 \int_0^{H/2} \frac{I_{\max}(2Z+H) + I_{\max}(H-2Z)}{2} dZ + 2 \int_{H/2}^{\infty} \frac{I_{\max}(2Z+H) - I_{\max}(2Z-H)}{2} dZ \\ &= 2 \int_0^{H/2} I_{\max}(\infty + Z) dZ = HI_{\max}(\infty) \end{aligned}$$

而

$$I_{\max}(\infty) = \frac{4\pi Aq\rho}{\mu} u(0, p, 0) = K_0 q$$

则矿层含量 q 可通过下式求得:

$$q = \frac{S}{K_0 H}$$

1 钻孔 γ 场

钻孔 γ 场是分层解释的基础,钻孔 γ 场的理论计算是比较成熟的地球物理正演问题。本章重点介绍钻孔 γ 场的理论计算公式,并为分层解释建立起钻孔 γ 场的两个基本方程。

1.1 钻孔 γ 场理论计算

这里,我们首先给出直孔 γ 场的计算公式,然后再给出斜孔 γ 场的计算公式,关于它们的详细推导过程请读者参阅附录 A。

1.1.1 直孔 γ 场

如图 1.1 所示,设井轴为 Z 轴,矿层中心点为球坐标系的原点,矿体含量分布均匀,当矿层厚度为 H ,含量为 q 时,对于矿层与钻孔垂直相交(通常称为“直孔”)的情况,可以得到并

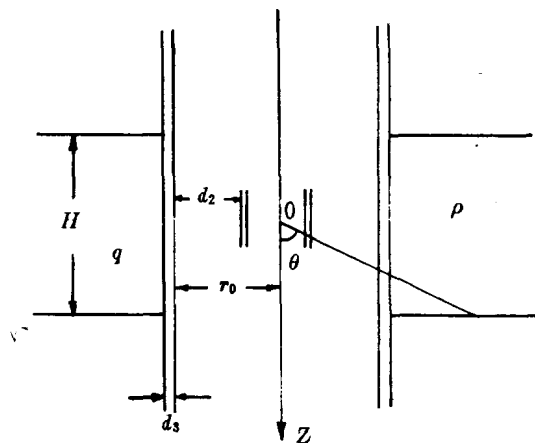


图 1.1 直孔 γ 场计算示意图

轴任意点的 γ 射线照射量率 $I(Z)$ 的表达式如下:

$$I(Z) = \begin{cases} \frac{I_{\max}(2Z + H) + I_{\max}(H - 2Z)}{2} & |Z| \leq H/2 \\ \frac{I_{\max}(2Z + H) - I_{\max}(2Z - H)}{2} & |Z| > H/2 \end{cases} \quad (1.1)$$

式中, $I_{\max}(H)$ 是一个函数,它表示厚度为 H 的矿层,其中心点产生的 γ 射线照射量率。我们

首先计算厚度分别为: $2Z+H$, $H-2Z$ 或 $2Z-H$ 的矿层中心点 γ 射线照射量率: $I_{\max}(2Z+H)$, $I_{\max}(H-2Z)$ 或 $I_{\max}(2Z-H)$, 就可按(1.1)式计算出厚度为 H 的矿层在井轴任意点产生的 γ 射线照射量率 $I(Z)$ 。下面分不同情况介绍函数 $I_{\max}(H)$ 的计算公式。

1.1.1.1 点状探测器

$$\begin{aligned} I_{\max}(H) &= \frac{4\pi Aq\rho}{\mu} \int_{\theta_0}^{\frac{\pi}{2}} \left[e^{-\mu r \csc \theta} - e^{-\frac{\mu H}{2} \sec \theta - (p - \mu r_0) \csc \theta} \right] \sin \theta d\theta \\ &= I_{\infty} \int_{\theta_0}^{\frac{\pi}{2}} \left[e^{-\mu r \csc \theta} - e^{-\frac{\mu H}{2} \sec \theta - (p - \mu r_0) \csc \theta} \right] \sin \theta d\theta \end{aligned} \quad (1.2)$$

用 G 函数或 U 函数表示时:

$$I_{\max}(H) = I_{\infty} G\left(\frac{\mu H}{2}, \mu r_0, p - \mu r_0\right) = I_{\infty} \left[U(0, p, \theta_0) - U\left(\frac{\mu H}{2}, p - \mu r_0, \theta_0\right) \right]$$

式中:

A 为 γ 常数, 其值等于 1g 的点状 γ 源在 1cm 远处产生的 γ 射线照射量率 [γ 射线照射量率曾用单位为 $\mu R/h$, 即 $\gamma; 1\mu R/h = 0.258 nC/(kg \cdot h)$]; 对于铀、镭、钍和钾 γ 源, 分别有

$$A_U = 7.380 \times 10^2 nC \cdot cm^2/(kg \cdot h \cdot g);$$

$$A_{Ra} = 2.131 \times 10^3 nC \cdot cm^2/(kg \cdot h \cdot g);$$

$$A_{Th} = 3.175 \times 10^2 nC \cdot cm^2/(kg \cdot h \cdot g);$$

$$A_K = 1.847 \times 10^{-1} nC \cdot cm^2/(kg \cdot h \cdot g);$$

q 为矿层中的放射性元素含量(%);

ρ 为岩(矿)石密度(g/cm^3);

μ 为线吸收系数(cm^{-1});

r_0 为钻孔半径(mm);

H 为矿层的厚度(cm);

$p = \mu_2 d_2 + \mu_3 d_3$ 为 γ 射线穿透井液和套管的附加吸收百分数 (μ_2, μ_3 分别为井液和套管的有效线吸收系数, d_2, d_3 分别为它们相应的厚度。这里考虑用体源标定仪器, 探测器外壳的附加吸收可忽略不计);

$\theta_0 = \arctg\left(\frac{2r_0}{H}\right)$ 为中间变量。

饱和矿层中心点 γ 射线照射量率为

$$I_{\infty} = \frac{4\pi Aq\rho}{\mu} \quad (1.3)$$

另外, G 函数和 U 函数的定义如下:

$$\begin{aligned} G(x, y, u) &= \int_y^{\infty} \int_0^{\frac{x}{t}} \frac{e^{(\mu-\zeta)\sqrt{1+t^2}}}{1+t^2} dt d\zeta \\ U(x, y, \theta_0) &= \int_{\theta_0}^{\frac{\pi}{2}} e^{-x \sec \theta - y \csc \theta} \sin \theta d\theta \end{aligned}$$

这两个函数之间的关系为