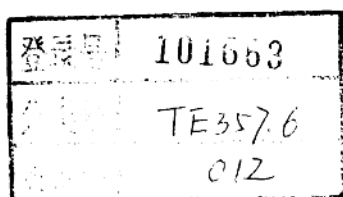


放射性同位素示踪注水剖面测井

姜文达 主编

石油

社



放射性同位素示踪注水剖面测井

姜文达 主编



石油工业出版社

内 容 提 要

本书较详细地叙述了放射性同位素示踪注水剖面测井的基本原理、测井仪器与辅助设施及资料解释方法。结合现场实际,阐述了测井工艺、安全操作规程和放射性防护的基本知识。书中还叙述了示踪注水剖面测井资料在编制和调整开发方案、堵水调剖、工程监测等方面的具体应用。

本书可供从事现场测井、采油、开发和地质的工程技术人员参考和上岗培训用书,也可作为大专院校相关专业的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

放射性同位素示踪注水剖面测井/姜文达主编.
北京:石油工业出版社,1997.5
ISBN 7-5021-2026-2

I. 放…

II. 姜…

III. 同位素示踪技术-应用-测井

IV. TE15

中国版本图书馆CIP数据核字(97)第06048号

石油工业出版社出版
(100011 北京安定门外安华里二区一号楼)
石油工业出版社印刷厂排版印刷
新华书店北京发行所发行

*

787×1092毫米 16开本 14 $\frac{3}{4}$ 印张 368千字 印1—2000
1997年5月北京第1版 1997年5月北京第1次印刷
ISBN 7-5021-2026-2/TE·1706
定价:25.00元

《放射性同位素示踪注水剖面测井》

编 委 会

主 任：潘兴国

副主任：姜文达 张宝群

委 员：(以姓氏笔划为序)：

王秀兰 李希文 罗大源

阎 锐 陶润深 符传复

主 编：姜文达

副主编：张宝群 李希文

《放射性同位素示踪注水剖面测井》

供稿人、编写人名单

	供稿人	编写人
概 论	石善勇 陶润深 王秀兰 许同林 王达夫	姜文达
第一章	陈士铎 陶润深	陈士铎
第二章	金山 陶润深 王秀兰 张振国 王达夫 阎锐	金山
第三章	周履康 金山 杨纲 冯录华 郝铮 丁贵山	赵宝成 杨纲
第四章	周履康 杨纲 牛世堂 李刚生 王秀兰 陈建生	赵宝成 杨纲
第五章	侯云福 张维平 朱文军 邵明东 董福印 王秀兰 张玉模 王达夫 吕亚芬	王秀兰 吕志强
第六章	陈晓华 邵明东 王秀兰 张玉模 王达夫	张玉模
第七章	金山 陶润深 李刚生 李山生 阎锐	杨俊英

序

我非常高兴为本书作序。祝贺中国首部《放射性同位素示踪注水剖面测井》专著的出版。

油田注水开发,保持地层压力,能够增加原油产量和提高采收率。因此,在水驱油田开发过程中,除了钻一批采油井(又称生产井)外,同时还要钻一批注水井。通过注水井给油层注水,维持油层压力,使采油井产量保持稳定。为了及时了解注水井中每个层位绝对注入量和相对注入量,必须进行注水剖面测井,由此产生了放射性同位素示踪注水剖面测井方法。

中国是世界上最早使用放射性同位素示踪注水剖面测井的国家之一。早在50年代,玉门油田用铀同位素进行示踪注水剖面测井,探测水驱油田注水剖面,获得了令人满意的效果。60年代,大庆油田先后用过铀、碘等8种同位素示踪剂,探测水驱油田示踪注水剖面,效果特别显著。随后,放射性同位素示踪注水剖面测井在胜利、大港、新疆、辽河、中原、吉林等油田得到了普遍推广应用,成为中国水驱油田注水剖面测井的主要监测手段。

“八五”期间,中国平均每年进行放射性同位素示踪注水剖面测井多达8600井次。放射性同位素示踪注水剖面测井在中国各油田应用之广泛,测井作业工作量最之巨大,名列世界前茅。

在中国,放射性同位素示踪注水剖面测井获得了许多成功的应用,在油田开发中发挥了重要的作用,主要表现在:(1)反映了每个注水层位内部注水量的变化,揭示了注水地层的非均质性;(2)能反映注水井各注水层位自然注水和配注后分小层的注水情况,暴露各个注水层位之间的矛盾;(3)还能有条件地反映注水井管外固井水泥窜槽和有关注水井的技术状况。此外,同位素示踪注水剖面测井与生产井产液剖面测井资料结合,还可以确定水驱油田剩余油分布,为油田合理开发与科学管理提供重要依据。例如,渗透性差的层位,注水效果不好,可以提出改造措施(压裂、酸化等),改善注水剖面和产出剖面质量,增加油井产量;又例如,渗透性好的层位,控制注水单层突进,扩大油层水驱波及体积,提高油井产量,降低产水量,从而达到控水稳油和提高采收率的目的。

最近,赵培华等人研究用生产测井测量的注水剖面和产液剖面资料解释水驱油田产层剩余油饱和度分布,取得了进展。这将对确定产层剩余油分布开辟了一个新途径。生产测井不是本书的内容,但在序中涉及这个问题,希望能引起石油工业界有关人士的关注。

中国放射性同位素示踪注水剖面测井技术达到世界先进水平,在全国各油田应用,见到了好的地质和工程效果,1987年曾获国家科技进步二等奖。为此,联合国国际原子能机构于1988年在大港油田举办了国际性的技术培训班。这一辉煌成就,为本书增添了光彩。

本书编委会组织全国陆上油田、科研院所从事放射性同位素示踪注水剖面测井的有关专家、教授和技术人员撰写本书,姜文达同志任主编,统筹安排,独立性与完整性结合,较好地解决了各章节之间的衔接问题,使本书构成一个整体。该书全面、系统和比较深入地论述了放射性同位素示踪注水剖面测井的理论、方法、实验、仪器、工艺、技术、解释与应用以及同位素的安全防护知识,基本上实现了理论与经验并重,应用与地质、工程结合,这是一部具有较高学术水平和实用价值的专著。本书的出版,必将进一步推进中国放射性同位素示踪注水剖面测井技术的发展,同时也指明了中国放射性同位素示踪注水剖面测井技术存在的

问题及未来发展方向。在这里，我向广大地球物理测井工作者、油田开发工程技术人员和有关大专院校师生推荐，该书是一部培训与教学两用的优秀专著，值得学习和参考，从中获取知识财富，为提高中国水驱油田开发效益和水平再做新奉献。

《放射性同位素示踪注水剖面测井》一书的出版，丰富了中国测井学科知识宝库新的内容。

谭廷栋

1997年4月

前 言

我国大部分油田是分层段注水开发的，因此认识注水井分层注水量即注水剖面是掌握油层水驱优劣，搞好油田注水开发的首要问题。

为了开展注水井的注水剖面测井，四十多年来，我国先后使用了井温测井、放射性同位素示踪测井、井下流量测井等测井方法。生产实践证明，在搞好放射性防护的前提下，放射性同位素示踪测井以易于测井施工、测井资料解释定量化、直观化等特点成为注水剖面测井的有效方法。“六五”到“八五”期间累计测井达七万多井次，“八五”期间年均测井达8600井次，是我国年测井井次最多的生产测井项目。

我国的测井工程技术人员和专家经过四十多年的努力，不仅逐年完成了放射性同位素示踪注水剖面测井工作量，而且使其技术不断完善和发展。为了系统地总结我国放射性同位素示踪注水剖面测井的理论、方法、仪器、设备、资料解释应用和防护技术的发展，我们组织了大庆油田生产测井研究所、吉林、辽河、大港、胜利和中原油田测井公司的工程技术人员和专家编写了《放射性同位素示踪注水剖面测井》一书，以指导和促进今后的注水剖面测井工作。

本书在编写过程中得到乔贺堂、李学文、王宝春、郭逢斌、徐金武和霍树义等同志的大力支持和帮助；得到孙懋怡、范深根等专家热忱指导，在此深表谢意！

由于参加编写的人员水平有限，加之时间仓促，书中尚存在的不妥之处，恳请读者不吝指出。

《放射性同位素示踪注水剖面测井》编委会

1996年5月

目 录

概论	(1)
第一章 放射性同位素示踪注水剖面测井方法原理	(5)
第一节 放射性同位素及射线探测基础知识	(5)
一、放射性同位素及伽马辐射体	(5)
二、射线与物质的作用	(9)
三、伽马射线的探测	(13)
四、放射性测量的统计误差	(17)
第二节 注水井内放射性同位素示踪过程	(21)
一、示踪剂与示踪作用	(21)
二、井内悬浮液的形成	(21)
三、注水井中各地层按比例注入放射性同位素示踪剂悬浮液	(22)
第三节 地层注水量与滤积于地层表面的示踪剂放射性活度的关系	(26)
一、地层注水量与滤积于注水地层表面的放射性示踪剂活度的关系	(26)
二、放射性曲线包络的面积与放射性活度、地层厚度的关系	(28)
第二章 放射性同位素载体与示踪剂	(33)
第一节 放射性同位素及载体的选择	(33)
一、放射性同位素的选择	(33)
二、放射性同位素载体的选择	(35)
三、室内试验情况及性能测试	(35)
第二节 ^{131}Ba -GTP 微球示踪剂的技术指标、颗粒直径及用量的选择	(39)
一、 ^{131}Ba -GTP 微球示踪剂的制备及其性能	(39)
二、 ^{131}Ba -GTP 微球示踪剂粒径的选择	(40)
三、 ^{131}Ba -GTP 微球示踪剂用量的计算	(41)
第三节 锡—铟 (^{113}Sn — $^{113\text{m}}\text{In}$) 同位素发生器	(44)
一、 ^{131}Sn — $^{113\text{m}}\text{In}$ 同位素发生器的结构、制备及其使用方法	(44)
二、 $^{113\text{m}}\text{In}$ 示踪剂的配制及有关性能	(46)
第三章 放射性同位素示踪剂注水剖面测井仪器与辅助设施	(49)
第一节 地面仪器综述	(49)
第二节 下井仪器	(49)
一、自然伽马测井仪	(49)
二、接箍定位器	(53)
三、放射性同位素示踪剂释放器	(54)
四、注水剖面组合测井仪及有线遥测短节 WTC	(55)
第三节 下井仪器的刻度	(59)
一、刻度原理	(59)

二、二级刻度	(60)
三、三级刻度	(61)
第四节 电缆选择与加重的配备	(62)
一、电缆选择	(62)
二、加重的配备	(62)
第五节 井口防喷装置	(63)
一、高压井口防喷装置	(63)
二、低压井口防喷装置	(66)
第六节 放射性同位素示踪剂的配制	(66)
一、配制室的结构	(66)
二、配制方法与分装工艺	(66)
三、 ^{131}Ba -GTP 微球示踪剂半自动分装器	(68)
四、 ^{131}Ba -GTP 微球示踪剂自动分装器	(68)
第四章 放射性同位素示踪注水剖面测井工艺	(72)
第一节 测井前的准备	(72)
一、施工条件准备	(72)
二、测井施工设计和测井通知单	(72)
三、注水管柱种类及放射性同位素示踪剂施工方法	(74)
四、沾污控制	(77)
第二节 施工步骤	(80)
一、现场调查	(80)
二、井场车辆摆放	(80)
三、安装井口及防喷装置	(80)
四、密闭施工工艺流程	(82)
五、井场放射性同位素示踪剂测井施工	(82)
六、测井曲线要求	(83)
第三节 五参数组合、示踪注水剖面测井	(85)
一、伽马曲线	(85)
二、井温曲线	(85)
三、流量曲线	(85)
四、磁定位曲线	(85)
五、井内释放同位素	(85)
第五章 放射性同位素示踪注水剖面测井资料解释	(86)
第一节 示踪注水剖面测井资料的收集	(86)
一、测井施工任务书	(86)
二、现场施工记录	(86)
三、注水井对应受益井情况	(87)
四、测井资料	(87)
第二节 示踪注水剖面测井资料预处理	(87)
一、示踪注水剖面测井曲线的选择	(87)

二、示踪注水剖面测井曲线的深度校正	(88)
第三节 示踪注水剖面测井资料的解释基础	(91)
一、分层注水强度	(91)
二、分层注水指数	(91)
第四节 RC 积分电路时间常数及测井速度对测井曲线的影响	(93)
一、积分电路的特性	(93)
二、测井速度 v 和积分电路时间常数 τ 对测井曲线的影响及校正	(94)
第五节 测井过程中放射性同位素衰减的校正	(96)
第六节 示踪注水剖面测井资料解释中示踪剂的沾污与消除	(98)
一、沾污类型及消除沾污的校正系数	(98)
二、沾污面积归位模型及计算方法	(100)
三、消除沾污校正的解释实例	(107)
第七节 示踪注水剖面测井资料解释	(108)
一、手工解释	(108)
二、计算机处理解释	(113)
第八节 示踪注水剖面测井资料综合解释	(120)
一、结合裸眼井测井解释资料综合分析	(120)
二、结合多次示踪注水剖面测井资料划分注水层	(122)
三、完善测井系列, 多条曲线综合分析	(122)
第六章 示踪注水剖面测井资料的应用	(130)
第一节 单井测井资料分析应用	(130)
一、确定注水剖面	(130)
二、检查分层配注效果	(132)
三、识别大孔道地层	(133)
四、监测注水动态	(136)
五、揭示层间、层内矛盾, 调整注水剖面	(136)
第二节 井组动态分析中的应用	(141)
一、采油井与注水井的动态对应关系	(141)
二、注采井组对应分析中的应用	(142)
第三节 开发区块动态分析中的应用	(149)
一、认识开发区块特点	(149)
二、为开发区块整体调剖挖潜提供依据	(149)
三、掌握区块注水动态, 分析储量动用情况	(149)
第四节 编制、调整开发方案中的应用	(150)
一、注水井调整	(150)
二、油井的调整	(150)
三、井组的调整	(151)
四、区块的调整	(151)
第五节 示踪注水剖面测井资料在工程监测中的应用	(153)
一、检查油、水井管外窜槽	(154)

二、评价套管技术状况·····	(157)
三、检查井下配注管柱技术状况·····	(159)
四、检查油、水井压裂改造效果·····	(164)
五、检查封堵效果·····	(164)
第七章 安全防护·····	(166)
第一节 放射性同位素及其辐射防护的基本知识·····	(166)
一、辐射防护的目的·····	(166)
二、辐射防护的原则·····	(167)
三、辐射防护的方法·····	(168)
第二节 放射性同位素辐射防护监测·····	(169)
一、辐射防护中常用的辐射量和单位·····	(170)
二、个人剂量监测·····	(172)
三、工作场所监测·····	(173)
第三节 示踪剂配制与分装的防护·····	(174)
一、放射性同位素实验室的选址与内部设施·····	(175)
二、示踪剂的配制分装与剂量监测·····	(175)
第四节 示踪注水剖面测井施工现场的安全防护·····	(177)
一、准备工作中的安全防护·····	(177)
二、测井施工中的安全防护·····	(178)
三、测井施工完毕后的安全防护·····	(179)
第五节 放射性同位素示踪剂的包装与运输·····	(179)
一、 γ 射线的屏蔽·····	(180)
二、放射性物质运输中的安全防护·····	(184)
第六节 放射性废物的管理及处理·····	(184)
第七节 放射性物质的保管与事故处理·····	(185)
一、放射性物质的管理·····	(185)
二、放射性事故的处理·····	(186)
三、辐射防护评价·····	(186)
附录一 常用放射性同位素伽马射线能谱、能量及绝对强度(丰度)·····	(189)
附录二 活性炭载体室内试验·····	(198)
附录三 放射性同位素示踪注水剖面测井沾污校正方法·····	(201)
附录四 放射性同位素与射线装置放射防护条例·····	(206)
附录五 油(气)田非密封型放射源测井放射卫生管理办法·····	(210)
附录六 油(气)田非密封型放射源测井放射卫生防护标准·····	(214)

概 论

石油开采是靠地下油层的能量(压力)将石油采出地面。这种能量,有的是地层自身潜在的,有的是外加的。随着油田开发时间的推移,油层压力逐渐下降,为了实现长期稳定的开发,需要给油层补充能量,保持油层的压力。目前我国绝大多数油田是采用分层注水来保持油层压力的。因此在开采一个油田时,除钻一批采油井(亦称生产井)之外,同时还要钻一批注水井。通过注水井给井下油层注水,维持油层压力使油井产量保持稳定,为了及时了解注水井和生产井的注入和产出状况,就需要进行生产测井,随时掌握注水井中每个层位绝对注入量(m^3/d)和相对注入量(%),以及生产井中每个油层的油、气、水产量,通常把前者称之为注水剖面[●],后者称之为产出剖面。在注水开发的油田中,及时了解油层中水驱油的情况,是油田开发的关键。油田开发生产动态表明在油层连通好的情况下注水井的注水剖面可以反映同一时期的产出剖面,因此,掌握注水剖面尤为重要。

在50~60年代,我国主要使用井温法定性测得注水剖面资料,后又推广应用井下流量计和放射性同位素[●]示踪法测井(以下简称示踪测井)测得注水剖面资料。经过三十多年实践,证明示踪测井是测取注水剖面资料的有效方法。此外,示踪测井还能监测油水井技术状况。

示踪注水剖面测井是在注水井正常注水的情况下将放射性同位素示踪剂注入到井内。随着注入水的流入,这些示踪剂将滤积在井中注水层的岩层表面上,然后用自然伽马测井仪测取示踪曲线。各注水层注水量的多少,在测井曲线上将显示出放射性活度(或称强度)的差异,通过对比注入示踪剂前后测得的自然伽马曲线,就可计算出各个注水层的注水量。

早在50年代,玉门油田就曾用锌(^{65}Zn)放射性同位素进行示踪测井,用前苏联的TK自然伽马测井仪(直径108mm)进行注水剖面测井和工程测井,如检查套管外窜通情况——窜槽和油层的压裂效果等)。60年代大庆油田先后曾用 ^{65}Zn 、 ^{110}Ag 等八种放射性同位素示踪剂(即放射性同位素吸附在活性碳载体上),用自制的直径为48mm的自然伽马测井仪测得注水剖面。这一技术很快在胜利、新疆、大港和辽河油田推广。以“防护先行,减少污染和搞好环保”为前提,依靠技术进步,从70年代到80年代,在全国各油田,示踪注水剖面测井得到了迅速发展。胜利油田率先使用半衰期为8.05d的放射性同位素碘(^{131}I)替代了沿用多年的半衰期为245d的 ^{65}Zn 。该项技术80年代初在各油田推广。进入90年代,吉林油田选用了半衰期为99.8min的放射性同位素铟($^{113\text{m}}\text{In}$)作为示踪剂,成功地测出了注水剖面资料。这项技术的使用减少了污染,特别是使得一些注水与地面水系连通的浅注水井中测注水剖面成为可能。该技术已在克拉玛依油田推广应用,克服了边远地区多次运送放射性同位素的困难。

● 注水剖面——通常亦称为“吸水剖面”。但是在一般情况下油层不能够吸水(倒灌的情况很少),只有给水加压才能注到油层里去,所以使用“注水剖面”这一术语更符合实际。

● “放射性同位素”一词是随着放射性同位素的发现而产生的,并被广泛应用。尽管现今已有更加严谨的词“放射性核素”,但出于习惯,“放射性同位素”至今仍被广泛应用。本书仍采用“放射性同位素”,但有些情况下也采用“核素”。

多年注水开发的油田，一般采用油井采出的污水回注到注水井中。这种矿化度较高的污水，容易冲洗掉吸附在活性炭表面的 ^{131}I 离子，使 ^{131}I 离子被注入水带到地层深处，产生“失踪”现象。在这种情况下，测得的示踪测井曲线异常幅度（活度）明显减少甚至消失，测井资料结果不能反映注水剖面的实际情况。为此，1984年大庆油田与中国原子能同位素所协作，研制成功 $^{131}\text{Ba}-\text{GTP}$ 微球示踪剂（粒径为 $100\sim 300\mu\text{m}$ ），解决了放射性同位素易从载体上“脱附”的问题。为了适应地层不同孔隙和裂缝，中原油田与河南省科学院同位素所协作，研制出粒径 $100\sim 2500\mu\text{m}$ 的 $^{131}\text{Ba}-\text{GTP}$ 微球示踪剂。为了改善 $^{131}\text{Ba}-\text{GTP}$ 微球示踪剂的分装与操作的防护水平，胜利油田与山东长岛光学材料研究所研制成半自动 $^{131}\text{Ba}-\text{GTP}$ 微球示踪剂分装器，该装置很快在各油田得到推广应用；大庆、胜利油田与有关单位协作正在研制全自动分装器。为了消除井场放射性同位素示踪剂在井口释放带来的污染，大庆、辽河、大港、华北等油田研制并推广了井下示踪剂释放器。

进行放射性同位素示踪注水剖面测井应用的地面仪器有模拟式（如JD581）、数字化仪器（如SD81）和数控仪（如DDL、AT⁺和CSU）。井下仪器也有较大的发展。仪器直径由48mm减少到26mm，不仅适应于在内径61mm油管内测井，也可以用于有较多级空心配水器管柱中测井；探测器也由盖革管发展为闪烁晶体；耐温耐压性能也有较大的提高（由 60°C 、20MPa上升到 170°C 、60MPa）。由于厚层细分开发的需要，大庆油田在测井软件中增加了加权数字滤波。建立了自然伽马仪的二、三级刻度装置。辽河油田与有关单位协作研制了自然伽马仪、流量计、井温仪、接箍定位器和井下释放器注水剖面综合测井仪，使测得的参数解释能够互补，提高了注水剖面测井的准确性。

示踪注水剖面测井工艺40年来有很大变化和发展。60年代在井场用水将吸附了放射性同位素的活性炭稀释并搅拌成悬浮液，用水泥车的高压泵将其注入注水井中。70年代使用同位素注入器，用注水管内的水稀释同位素后注入井内。到80年代发展成使用注水井的注水管线靠注水压力将悬浮液注入井中。向井筒注入放射性同位素示踪剂分为正施工（示踪剂由油管注入井中，再被分注到各个地层中）和反施工（示踪剂由油套管环形空间注入到井中，再被分注到各个地层中）。到90年代又推广应用了 $^{131}\text{Ba}-\text{GTP}$ 微球井下释放工艺。测井仪器可在笼统注水管柱或带封隔器、偏心配水器的配注管柱中进行测井。测井过程也由放溢流恢复压力发展到使用防喷装置，实现了不停注、不放喷、不溢流的密闭测井，使测得示踪曲线能正确地反映正常注水情况下的注水剖面。大庆等油田推广这一工艺技术见到了好的效果。

示踪注水剖面测井资料解释基于自然伽马测井曲线（基线）与示踪测井曲线叠合后所包围面积来计算相对注水量的。目前各油田已编出解释软件，使用计算机处理和绘图。

由于注水井井筒管柱和井下工具不洁以及 $^{131}\text{Ba}-\text{GTP}$ 微球示踪剂表面活性欠佳、密度较大，致使微球在注水井筒和管柱造成“沾污”和“下沉”，在示踪曲线上产生许多异常，给测井资料解释带来较大的误差，甚至无法解释。为了解决“沾污”问题，许多油田摸索出一些消除沾污的办法。90年代大港油田总结了兄弟油田的经验，利用物理模型和数学模型求出了消除各种沾污类型的校正系数，编制了沾污消除校正解释程序，相继在各油田推广。

放射性同位素防护技术的应用贯穿于示踪注水剖面测井发展的全过程。在放射性安全防护方面，除了对施工人员进行安全防护教育和培训外，还制定了一系列规章制度和法规。如《放射卫生防护基本标准 GB4792》、中华人民共和国国务院第44号令《放射性同位素与辐射装置防护条例》、卫生部、中国石油天然气总公司颁布的《油（气）田非密封型放射源测井

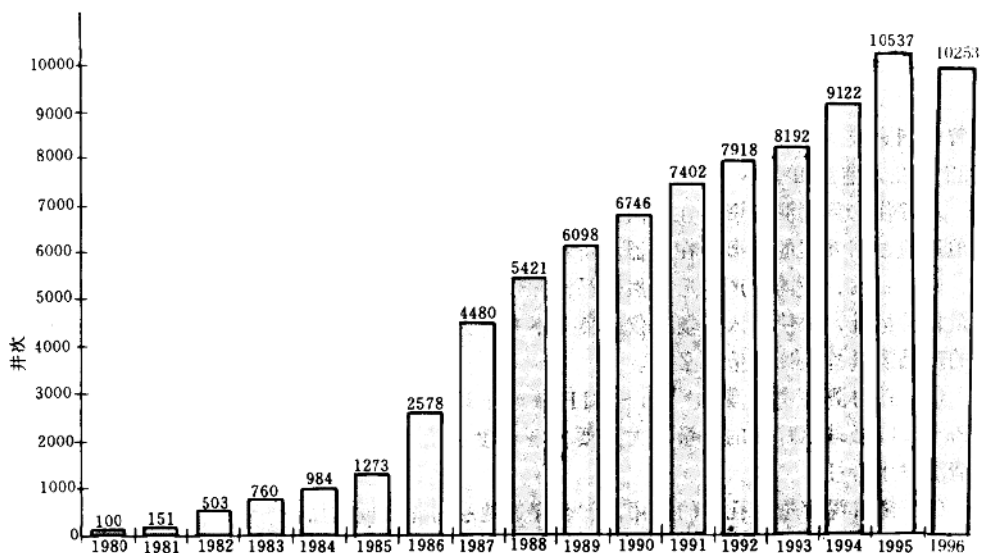


图 0-1 放射性同位素注水剖面测井数量增长示意图

放射卫生防护标准》和《油（气）田非密封型放射源测井放射卫生管理办法》。虽然测井中使用的放射性同位素强度较小，又有相应的防护措施，工作人员接受的剂量远远小于允许的数值，但是仍要谨防放射性同位素污染地面环境与水源，特别严防误入人体，产生内照射。在放射性同位素的选择上尽量选择毒性低、半衰期短的同位素。放射性同位素配制室的建立要符合规定，处置好废水、废物、废气；工作人员操作时都要穿带护具，佩带计量器，注意与放射性同位素源保持一定距离和设置屏障物，并通过机械手和手套箱来进行配制示踪剂。放射性同位素及其示踪剂运输要使用专用车辆，谨防遗撒和丢失。在井场施工时，设立防护标志，非施工人员禁止入内。同时对示踪测井施工人员每年进行体检，安排休假和增加营养等，确保施工人员身体健康。

80 年代以来，示踪注水剖面测井得到了迅速发展（见图 0-1）。现在示踪注水剖面测井已纳入油田正常生产计划，测得的资料在油田开发中得到了广泛的应用：

- （1）测井资料反映了注水井各注水层位自然注水情况和配注后分层段及分小层的注水情况，显示出各个注水层位之间的矛盾；
- （2）测井资料反映了每个注水层不同部位的注水情况，显示出同一注水层不同部位的矛盾，反映了地层的非均质性；
- （3）示踪测井资料还能有条件地反映油、水井套管外固井水泥环窜通（即外“窜槽”）以及其它有关油井的技术状况。

对生产井的产液剖面和注水井的注水剖面资料综合分析，可为油田开发提供重要依据：

（1）在油水井相应层位连通好的情况下，注水井的注水剖面可反映同期生产井的产液剖面。因此，对于注水效果不好的层位需要加强注水或采取改造措施（如压裂、酸化等），改善注水剖面，从而改善产出剖面，增加油井产量。

（2）对于渗透性好的注水层位，单层突进快，油层过快水淹，就要控制注水，进行配注

或封堵,使注水在各个层位、层内的各个部分均匀推进,扩大油层水驱的波及体积,提高生产井相应层位的原油产量,降低产水量,达到控水稳油、提高采收率的目的。

由于示踪注水剖面测井技术在国内各油田推广应用,见到了好的地质、工程效果,1987年曾获国家技术进步二等奖,并引起联合国国际原子能机构的重视,为此国际原子能机构1988年在大港油田举办了国际性的技术培训班。

示踪注水剖面测井资料在我国油田开发中发挥了重要作用,获得了成功的应用。为了更好地适应油田发展的需要,在仪器和资料解释方面需进一步的完善和提高:

(1) 目前,我国生产制造自然伽马测井仪的厂家比较多,由于对仪器缺乏标准化严格的质量检验标准,致使进入市场的仪器良莠不齐。因此,对各厂家生产的仪器标准化和制定严格的产品质量检验标准势在必行。

(2) 针对测井中出现的 $^{131}\text{Ba}-\text{GTP}$ 微球示踪剂“沾污”和“下沉”的问题,应提高 $^{131}\text{Ba}-\text{GTP}$ 微球示踪剂的质量(尤其要保证密度小于 $1.06\text{g}/\text{cm}^3$,表面活性要好),测井前应清洗注水管柱。

(3) 随着深穿透射孔弹的使用,射孔穿透地层的深度也在加大,示踪剂滤积在射孔孔眼的入口处与底部,可能为非均匀分布。若按一个筒状源来考虑对测井的贡献势必带来一定的误差,这也是有待深入研究解决的问题。

第一章 放射性同位素示踪注水剖面测井方法原理

第一节 放射性同位素及射线探测基础知识

一、放射性同位素及伽马辐射体

1. 物质的分子、原子和原子核

自然界存在的各种物质，都是以三种物理状态即固态（如矿物、岩石）、液态（如水、石油）和气态（如空气、天然气）存在的。而一切物质都是由已经发现的 100 多种化学元素所组成。粗略地说，物质中的单质与化合物都是由分子构成的。而分子则由原子组成。孤独的原子在物质中极为少见，只有少数几种单质如氮、氖等惰性气体的结构单元是单个原子。一种元素可构成一种物质，由两种或两种以上的化学元素按一定比例可结合成化合物。而构成化合物本身的则是基本的结构单元——原子，原子是在化学反应过程中保持元素化学性质的最小粒子。原子很小，它的直径只有 10^{-8}cm 左右，原子的质量也很小，氢原子质量为 $1.6733 \times 10^{-24}\text{g}$ ，铀原子的质量为 $3.951 \times 10^{-22}\text{g}$ 。

原子的中心有一个核，称为原子核，外围有一定数量的电子（称为束缚电子或轨道电子）围绕原子核运动。原子核的直径比原子的直径小得多，为 $10^{-13} \sim 10^{-12}\text{cm}$ ，但却集中了原子的绝大部分质量。原子核和绕行电子间，大部分空间是空的。以最简单的氢原子为例，它由氢原子核和一个束缚电子组成（见图 1-1）。电子的质量为 $9.1 \times 10^{-28}\text{g}$ 。氢核的质量为 $1.6733 \times 10^{-24}\text{g}$ ，两者的比值近似为 1/1840。对于复杂的原子，两者的比值还要小些。例如铀原子的 92 个电子总质量和铀核质量比为 1/4717。

原子核是由更小的粒子——质子和中子（两者统称为核子）组成。质子和中子都能以自由状态存在，因此可以研究它们各自的性质。质子带的电荷量和电子的电荷量相等，但符号相反。它们的质量为 $1.6726 \times 10^{-24}\text{g}$ ，是电子质量的 1840 倍。原子核所带的电荷数由质子的数目决定，原子序数 Z 就表明了原子核中质子的数目。中子不带电，质量为 $1.6749 \times 10^{-24}\text{g}$ ，比质子的质量稍重。中子一般束缚在原子核中，不能独立地稳定存在，只是在原子核受到外来粒子的轰击而引起变化的时候，才从核里释放出来。如以 N 表示中子数，以 A 表示核子数（通常称为质量数），显然， $A = Z + N$ 。中子和质子的数目构成了原子核的主要特征，通常用简单的符号表示原子核。如氢的原子核由一个质子组成，铀的原子核由 92 个质子和 146 个中子组成，可分别表示为



2. 核素、同位素、同中子异位素、同量异位素

核素是指原子核中具有一定数目质子和中子，并在同一能态上的同类原子，同一种核素