

石油科学进展 43

# 油田示踪技术

〔美〕B. Zemel 著

赵培华 张培信 赵智勇 里 群 冯宝俊 译



石油工业出版社

石油科学进展 43

# 油田示踪技术

[美] B. Zemel 著

赵培华 张培信 赵智勇 里 群 冯宝俊 译

石油工业出版社

## 内 容 提 要

本书全面、系统地介绍了油田水驱和气驱过程中,井间示踪技术的应用,从示踪剂的选择、制备、分析、示踪测试设计,到资料的录取、解释和矿场应用实例。其中不乏有许多新颖的用法和观点及在应用过程中应注意的细节。

本书的翻译出版,为广大油田开发工作者提供了系统学习和借鉴国外先进井间示踪技术的机会,适应了我国当前油田开发应用井间示踪技术的需要。

本书可供油田开发工程技术人员学习和工作参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

油田示踪技术/[美]泽梅尔(Zemel, B.)著;赵培华等译.

北京:石油工业出版社,2005.12.

(石油科学进展:43)

书名原文:Tracers in the Oil Field

ISBN 7-5021-5299-7

I. 油…

II. ①泽…②赵…

III. 油气测井

IV. TE151

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 133885 号

1995 Elsevier Science B.V. All rights reserved.

This edition of Tracers in the Oil Field by Dr. Bernard Zemel is published by arrangement with Elsevier Science B.V., Copyright & Permissions Department P.O. Box 521, 1000 AM Amsterdam, The Netherlands.

本书经 Elsevier Science B.V. 授权翻译出版,中文版权归石油工业出版社所有,侵权必究。

版权登记号:图字 01-2005-2840

书名 油田示踪技术

作者:Bernard Zemel

出版发行:石油工业出版社

(北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011)

网 址:www.petropub.com.cn

总 机:(010)64262233 发行部:(010)64210392

经 销:全国新华书店

印 刷:石油工业出版社印刷厂

2005 年 12 月第 1 版 2005 年 12 月第 1 次印刷

787 毫米×1092 毫米 开本:1/16 印张:19.25

字数:489 千字

定价:58.00 元

(如出现印装质量问题,我社发行部负责调换)

版权所有,翻印必究

## 序 言

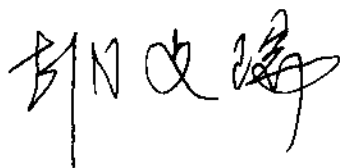
水驱油田的油层动用状况和剩余油如何分布是人们在整个开发过程中始终关注的重要课题,特别是在油田进入高含水期后显得尤为重要和迫切。油藏的非均质性使这一问题更加复杂化,油层平面和纵向上的非均质特征决定了注入水在平面上和纵向上的分布不均匀性,这种不均匀性对油田水驱开发效果产生了不良的影响。但从另一个角度看,它也为我们留下了今后调整挖潜的余地,可以说注入水波及效果差的油层或区域就是我们今后调整挖潜的主攻方向。

目前油田广泛应用的测井技术为我们认识油层纵向上的动用状况提供了一定的依据,但在认识油层平面上的动用状况方面仍有很大的局限性。井间示踪技术弥补了这方面的不足,在井间示踪中,由于示踪剂是同注入水一起运动的,它跟踪了注入水的运动轨迹,它是注入水在平面和纵向上的分布状况及波及体积的直接度量。因此我们可以通过研究示踪剂的开采动态及其在各生产井上的分布状况研究注入水的分布状况和油层非均质特征,评价井间开发效果,并据此提出采取相应的调整措施。

我国各油田自 20 世纪 80 年代以来,伴随着三次采油技术在油田中的应用和调整挖潜的需要,井间示踪技术也得到了广泛的应用,并取得了良好的效果。但仍有许多问题需要进一步深入学习和研究,令人遗憾的是除 SPE 发表了一些应用性文章之外,国内还没有系统全面介绍油田示踪方面的专著。

《油田示踪技术》一书是一本论述油田示踪技术的专著,它系统、全面地介绍了油田水驱和气驱过程中井间示踪技术的应用,从示踪剂的选择、制备、分析及示踪测试设计,到资料的解释和矿场应用实例。其中不乏有许多新颖的用法、观点和在应用过程中应注意的细节。纵观全书不难看出,井间示踪技术是多学科的综合,它涉及油藏工程、采油工程、测井技术、化学、物理、核物理等诸多方面的知识,因而需要我们从本油田实际出发,认真地研究和应用这项技术。

《油田示踪技术》一书为广大油田开发工作者提供了系统学习井间示踪技术、借鉴国外先进经验的机会,适应了我们当前应用井间示踪技术的需要。衷心希望通过这本书的翻译出版,能够大幅度地提高我们对井间示踪技术基本理论的理解和应用水平,在学习借鉴国外先进经验的基础上,能够发展这一技术,拓宽井间示踪技术的应用领域,在指导油田开发实践,认识油藏的非均质性和三次采油提高采收率机理以及提高原油产量等方面闯出一条自己的路,为油田的调整挖潜,提高油田的最终采收率,做出更大的贡献。



## 作者前言

在过去的40年中,示踪技术已在油田得到大量应用。在这期间,我有幸成为这项技术应用的积极参与者,并目睹了多项示踪新技术的开发应用过程。遗憾的是,也许是由于行业竞争激烈的原因,很多工作没有很好地记录下来,公开发表的文献很少。而且,现有的文献相当分散,加之为此项技术提供很多支持的小的服务公司正在退出市场。使得这项工作的大量知识,只能通过口头传递,而且提供者越来越少。本书目的是填补这项空白,使目前的油田用户能够更多地了解这项技术。

最初油田示踪技术主要使用放射性示踪剂,其中很大原因是在第二次世界大战后推广和平利用原子能计划的结果,并出现了许多从事这项技术服务的小公司。在此期间,随着分析化学的发展,非放射性示踪剂在生物医学和其他领域得到推广应用,但在油田上应用得很少,主要原因是油田人员对这方面知识了解的很少。在这本书中,介绍了这两种类型示踪剂的大量背景资料,使矿场工程师能够针对油田实际正确选择应用。

近年来计算机技术的迅猛发展大大促进了示踪技术进步,示踪剂响应曲线的数学建模和计算机模拟受到更大的重视。但是由于油田示踪设计和实际操作人员与模拟示踪测试结果的人员之间几乎没有什么沟通,结果导致测试设计效果不好,模拟者搞不明白他们模拟的矿场数据的意义,而现场操作者只关心测试的定性方面。本书主要涉及矿场和实验室试验方法,但也包含了文献中介绍的矿场示踪测试的计算机模拟实例。示踪测试的矿场操作和资料分析都应得到重视,我预计在未来大多数示踪测试设计和数据分析将由计算机完成。

示踪技术已被广泛用于油田诸多领域中,在本书中不可能囊括它们的全部内容,也不可能对选择出的所有内容都进行详细地研究。除少部分选题带有个人主观性外,本书中大部分内容是由于它们适用于现代矿场用途,以及它们能够提供大量的定量信息而选择的。本书是一本介绍示踪技术油田应用的书,所有的应用实例尽可能是通过公开发表文献中报导的矿场测试资料,或得到资料来源公司许可发表的矿场资料说明。

在书中我自主地选编了一些对油田示踪应用有借鉴价值的其他学科中示踪应用方法,但不包括油井测井内容,对应用示踪技术的油井测井内容,将其放在其他油田示踪方法章节中。书中介绍了放射源辐射法监测流体在管道中的流量以及测定流体饱和度,这些方法与油田示踪测量密切相关。书中还介绍了生物医学领域使用的2种示踪用法,笔者认为在油田可以有很好的应用:一是应用井下同位素发生器中产生的短寿命放射性示踪剂方法监测井筒附近的示踪剂分布;二是使用聚集测量仪对经放射性标记的井筒内部成像。

目前的油田示踪应用方法是在借鉴了示踪技术在水文学地下水、化学反应器工程、土木工程、卫生、环境等学科中应用研究基础上发展起来的,反过来,油田示踪中的许多方法也可以应用到这些学科中。例如,Dr. Gary Pope和他的合作者把使用分配示踪剂测定油层中残余油饱和度方法用于探查和排除地面有毒非水物质。Austin的得克萨斯大学通过实验室试验和计算机模拟证实了这项技术在监测地表附近有非水流体的数量和位置的适用性。另外的例子是

借鉴油田三次采油方法(如表面活性剂技术)消除某些有毒物质。

以前的示踪测试设计常常是主观经验性成分很多,而采出资料也常常只用于定性分析。Brigham 和 Smith 于 1964 年提出了适用于水驱示踪设计和分析矿场示踪剂响应资料的一种解析方法,随后 Abbaszaden 和 Brigham 对这一方法做了改进。文献中已对这一方法做了描述,数学语言的繁冗限制了该方法的广泛应用。本书附录中给出由 Abbaszaden 博士编写的这部分内容,供读者借鉴该方法进行矿场示踪测试设计和对测试数据分析。

Bernard Zemel  
Austin Texas

## 鸣 谢

我衷心地感谢奥斯汀得克萨斯大学的石油和地质系统工程中心和石油与地质系统工程系,在我准备写这本书的时候,给予我访问学者的特殊待遇。如果没有系里在设备方面提供的帮助和许多教职员同我进行的多次讨论,准备我的这份照相手稿将会非常的困难。

我特别要对 Gary Pope 博士在我写作期间给予的鼓励和我进行多次讨论油田示踪问题表示感谢。我还要对 Pope 博士和他的学生 Vichai Maroongroge 所进行的示踪剂在油层中运动的计算机模拟研究表示感谢,这些工作澄清了我对示踪测试功能的理解。

我衷心地感谢花费时间阅读并对本书各章节提出宝贵意见的人们:怀俄明大学的 Harry Deans 博士、奥斯汀得克萨斯大学的 Krishan Malik、Dan Hill 博士、Henry Dunlap 博士、Larry Lake 博士、Augusto Podio 博士和 John C. Reis 博士。

感谢 Shell 研究公司和 BP 勘探公司允许在本书中分享他们未发表的研究成果,使我能够阐述一些有价值的、非常规的示踪剂应用方法。

我还要感谢很多油田工作人员,让我分享他们多年积累的油田应用示踪剂信息。我特别要向 True Tag 的 Larry Taylor、Haliburton 的 Larry Gadeken、示踪技术国际组织的 Wally Loder、示踪剂公司的 Roy Dobson 和 Dave Ferguson、Teledyne Isotopes 的 Andy Carmichael 和 Gordon Tinker。同等重要的是 Mike Prats 和 Philip Clossman,是他们决定了我写作这本书。

最后我还感谢我的编辑和图书的制图师, Pangloss Publishing 的 Jane Chamberlain,感谢他认真地修饰语言和花费了许多时间在从未打算用于此目的的苹果机程序中设计页面。

## 引用致谢

这是一本关于油田示踪应用的书籍,为描述油田示踪的应用状况,本书包含了许多插图和表格,其中许多内容是取自油田文献、辅导教科书、商业文献以及公开发表的拥有版权的素材和未发表的公司内部报告。在此对允许使用这些素材的版权人,以及允许使用未发表报告的赞助公司表示感激和致谢,并公布如下。这里没有列出取自官方文件和其他公共来源的插图,但在原文中做了标注,并在参考文献中列出了出处。

当插图和表格在正文中出现的时候,对这些插图和表格的来源做了标注,并在每章结尾的参考文献中列出它们的出处。下面按下列次序列出这些来源的致谢名单:(1)作为杂志和协会文献介绍的油田文献,或得到赞助公司允许使用的报告,(2)以示踪剂的性质或应用为基础的文章,(3)示踪测试中使用的材料供应商和服务商。

得到 SPE 的允许,复制了下述拥有版权的素材,它包括会议提供的预印件和 SPE 杂志上的文章。按引用出现的顺序,这些图是:3.2,4.1,4.2,4.3,4.6,4.7,4.11,4.12,4.13,4.15,4.16,4.17,4.18,5.2,5.11,5.14,5.15,5.16,5.18,5.19,5.20,5.21,6.1,6.7,6.8,6.12,6.13,6.14,7.1,7.2,7.3,7.5,7.6,7.7,7.14,7.15,7.16,7.19,7.20,7.21,7.23,7.25,7.26,7.30,7.31,7.33,8.6,8.7,8.8,8.16,8.17,8.18,8.19,8.20,8.21,8.22。

得到 CIM 石油协会的允许,复制了下列版权素材:表 5.2,图 5.10,6.2,6.3,6.4,6.5,6.9,6.10,6.11。

得到版权所有人的允许,从杂志或其他的简编中复制了下列图幅:

图 1.14 取自 *Geophysics*. © the Society of Exploration Geophysicists.

图 1.15 取自 *Nucleonics*, © McGraw Hill Publishing Co.

图 3.5 取自 *Journal of Chromatograph*, © Elsevier Science Ltd. Kidlington. UK. Pergamon Press.

图 3.6 取自 *Journal of Chromatography*, © Elsevier Science Ltd., Kidlington UK. Pergamon Press.

图 4.4 和图 4.5 取自 the International Energy Agency for permission to USI material © from the Symposium on Reservoir Engineering. Paris (1990).

图 4.8,图 4.9,图 4.10,图 4.14,和图 5.12 取自 The Journal of Petroleum Engineering Science, © Elsevier Science Publishers.

图 7.4 和图 7.17 取自 *The Analyst and SPWLA Symposia*, @ Society a Professional Well Logging Analysts.

图 2.17 取自 Instrument Manual, © Beckman Instruments, San Diego, California.

图 5.6,和图 5.8,取自 Determination of Residual Oil Saturation, © Interstate Oil Compact, Commission, Oklahoma City, Oklahoma.

图 7.10,图 7.12,图 7.24, © Schlumberger Logging Co, Houston, Texas.

图 7.13, © Haliburton Logging Co.

# 目 录

|                         |    |
|-------------------------|----|
| 第一章 放射性基础               | 1  |
| 第一节 引言                  | 1  |
| 第二节 放射性                 | 2  |
| 一、活度和半衰期                | 2  |
| 二、计数统计学                 | 3  |
| 三、递次放射性衰变               | 4  |
| 四、放射性平衡                 | 5  |
| 五、核衰变过程                 | 7  |
| 六、特征能量                  | 10 |
| 第三节 射线同物质间的相互作用         | 12 |
| 一、 $\alpha$ 粒子和其他带正电荷离子 | 12 |
| 二、 $\beta$ 粒子和正电子       | 12 |
| 三、伽马射线(和 X 射线)          | 13 |
| 四、伽马射线的衰减               | 14 |
| 五、中子同物质的相互作用            | 18 |
| 第四节 放射性物质的来源            | 21 |
| 一、原始时代存在的放射源            | 21 |
| 二、人工生产的材料               | 22 |
| 三、宇宙射线                  | 23 |
| 参考文献                    | 23 |
| 第二章 测量和应用               | 25 |
| 第一节 引言                  | 25 |
| 第二节 辐射的检测和测量方法          | 25 |
| 一、射线同物质的相互作用            | 25 |
| 二、检测效率和几何条件             | 25 |
| 三、信噪比                   | 26 |
| 第三节 气体计数器中电荷的收集         | 26 |
| 一、外加电压的影响               | 27 |
| 二、脉冲计数和电流计数             | 27 |
| 三、电离室                   | 28 |
| 四、正比计数器                 | 29 |
| 五、盖革—米勒计数器              | 30 |
| 六、计数器坪区同脉冲高度坪区的关系       | 30 |

|                            |           |
|----------------------------|-----------|
| 第四节 计数系统 .....             | 30        |
| 一、简单计数器 .....              | 31        |
| 二、计数器测量能量 .....            | 31        |
| 第五节 闪烁探测器 .....            | 32        |
| 一、光电倍增管 .....              | 33        |
| 二、NaI(Tl)探测器 .....         | 34        |
| 三、液体闪烁计数器 .....            | 36        |
| 第六节 固态电离探测器 .....          | 39        |
| 一、二极管探测器 .....             | 39        |
| 二、锗探测器 .....               | 39        |
| 三、热释光剂量计(TLD) .....        | 40        |
| 第七节 中子探测器 .....            | 40        |
| 第八节 计数率仪、多道分析器和多道定标器 ..... | 40        |
| 一、模拟式计数率仪 .....            | 40        |
| 二、多道分析器 .....              | 41        |
| 三、Marinelli 量杯 .....       | 43        |
| 第九节 放射性原子的计数 .....         | 43        |
| 一、加速器质谱测定法 .....           | 43        |
| 二、谐振离子谱 .....              | 43        |
| 第十节 常用的核方法 .....           | 44        |
| 一、同位素发生器 .....             | 44        |
| 二、同位素稀释法 .....             | 46        |
| 三、活化分析 .....               | 47        |
| 第十一节 剂量测定法 .....           | 48        |
| 一、剂量单位 .....               | 48        |
| 二、剂量计算 .....               | 49        |
| 第十二节 放射性材料的许可证和控制 .....    | 51        |
| 参考文献 .....                 | 53        |
| <b>第三章 井间水驱示踪剂 .....</b>   | <b>55</b> |
| 第一节 引言 .....               | 55        |
| 第二节 水驱示踪剂的功能 .....         | 55        |
| 一、历史和发展 .....              | 55        |
| 二、油藏约束 .....               | 56        |
| 三、放射性示踪剂和未标记的化学示踪剂 .....   | 57        |
| 第三节 水驱放射性标记的示踪剂 .....      | 58        |
| 一、用于矿场的放射性示踪剂 .....        | 58        |
| 二、示踪剂质量控制 .....            | 60        |
| 三、示踪剂的制备 .....             | 61        |

|                                |            |
|--------------------------------|------------|
| 四、矿场示踪剂设计 .....                | 63         |
| 五、分析对策 .....                   | 66         |
| 六、离子交换色谱 .....                 | 66         |
| 七、经典液相色谱法 .....                | 67         |
| 第四节 非放射性标记的水驱示踪剂 .....         | 70         |
| 一、可利用的化学示踪剂 .....              | 72         |
| 二、潜在的示踪剂 .....                 | 72         |
| 三、分析方法 .....                   | 73         |
| 第五节 矿场示踪剂采样和分析 .....           | 77         |
| 一、常规的矿场采样 .....                | 77         |
| 二、矿场示踪剂连续分析 .....              | 78         |
| 参考文献 .....                     | 81         |
| <b>第四章 矿场实例和资料分析 .....</b>     | <b>85</b>  |
| 第一节 引言 .....                   | 85         |
| 第二节 水驱示踪文献 .....               | 85         |
| 第三节 矿场示踪报告 .....               | 85         |
| 一、示踪剂资料同其他矿场测量的关系 .....        | 86         |
| 二、流动机理 .....                   | 87         |
| 三、示踪剂运动物理模型 .....              | 90         |
| 四、示踪剂脉冲模拟 .....                | 92         |
| 五、Maljamar 区块示踪剂的应用 .....      | 99         |
| 六、阳离子型油层 .....                 | 100        |
| 第四节 矿场示踪资料的体积分析 .....          | 100        |
| 一、基本假设 .....                   | 101        |
| 二、示踪剂响应曲线 .....                | 101        |
| 三、示踪剂响应的矩分析 .....              | 102        |
| 四、注入水在生产井之间的分布 .....           | 104        |
| 五、北西断块矿场结果 .....               | 108        |
| 六、计算方法 .....                   | 108        |
| 参考文献 .....                     | 113        |
| <b>第五章 非常规水驱示踪 .....</b>       | <b>117</b> |
| 第一节 引言 .....                   | 117        |
| 第二节 应用示踪剂测定残余油饱和度 .....        | 117        |
| 一、应用方法 .....                   | 117        |
| 二、分配示踪剂 .....                  | 118        |
| 三、示踪方法 .....                   | 118        |
| 四、单井示踪测试法确定残余油饱和度 .....        | 123        |
| 五、两口井示踪测试(TWTT)法确定残余油饱和度 ..... | 127        |

|                    |     |
|--------------------|-----|
| 第三节 观察井            | 131 |
| 一、优点和缺点            | 132 |
| 二、测井观察井            | 132 |
| 三、示踪测试测井观察井的设计     | 137 |
| 四、采样观察井            | 141 |
| 五、观察井示踪剂注入的监测      | 142 |
| 第四节 井间反应           | 143 |
| 第五节 裂缝中的流动         | 145 |
| 第六节 井下注入和采样        | 146 |
| 参考文献               | 146 |
| 第六章 井间气体示踪         | 149 |
| 第一节 引言             | 149 |
| 第二节 油田应用的气体示踪剂     | 149 |
| 一、化学和物理约束          | 149 |
| 二、历史和发展            | 149 |
| 第三节 气体示踪剂的非理想特征    | 151 |
| 一、气体示踪剂的分配和注入气体的速度 | 151 |
| 二、气体示踪方法           | 152 |
| 第四节 矿场过程           | 153 |
| 一、示踪过程和设计          | 153 |
| 二、采样和分析            | 154 |
| 第五节 矿场示踪测试         | 157 |
| 一、气体示踪和油藏描述        | 157 |
| 二、气顶中的残余油饱和度       | 158 |
| 三、追踪注入的溶剂(MI)      | 162 |
| 四、矿场测试结果           | 163 |
| 第六节 蒸汽驱示踪          | 169 |
| 一、蒸汽特性             | 170 |
| 二、蒸汽驱示踪的矿场应用       | 171 |
| 第七节 非常规储层中的气体示踪    | 175 |
| 参考文献               | 176 |
| 第七章 井筒示踪           | 181 |
| 第一节 引言             | 181 |
| 第二节 示踪剂快中子活化       | 182 |
| 一、套管后面的漏失          | 182 |
| 二、氧活化测井            | 182 |
| 三、其他快中子活化          | 188 |
| 第三节 测—注—测示踪方法      | 189 |

|                    |     |
|--------------------|-----|
| 一、中子活化盐水示踪剂测定残余油   | 189 |
| 二、中子活化硼示踪剂测定含水饱和度  | 190 |
| 第四节 用于井下措施的放射性示踪剂  | 191 |
| 一、伽马射线能谱分析         | 192 |
| 二、根据示踪剂资料确定措施的穿透深度 | 196 |
| 三、井下示踪方法           | 197 |
| 四、矿场实例             | 200 |
| 五、确定裂缝走向           | 201 |
| 六、额外的背景干扰:放射性水垢    | 203 |
| 第五节 其他伽马射线示踪方法     | 203 |
| 一、套管后面的胶结          | 204 |
| 二、井的示踪方法           | 205 |
| 第六节 生产测井           | 205 |
| 一、注水井测井            | 206 |
| 二、示踪剂稀释法测井         | 209 |
| 三、用同位素发生器的生产测井     | 214 |
| 四、蒸汽井注入测井          | 217 |
| 第七节 钻井过程示踪监测       | 220 |
| 一、钻井液水侵            | 220 |
| 二、钻头的磨损            | 221 |
| 参考文献               | 222 |
| 第八章 设备运行中的示踪       | 227 |
| 第一节 引言             | 227 |
| 第二节 流量测量           | 227 |
| 一、同位素稀释法           | 227 |
| 二、脉冲速度法            | 231 |
| 第三节 流量的应用          | 232 |
| 一、单相和多相流动          | 232 |
| 二、管道中的沉积物          | 233 |
| 三、管道流量的示踪测量        | 234 |
| 第四节 管道和集输管线中的流动状态  | 236 |
| 一、单能量伽马射线的透射       | 236 |
| 二、三相流中双能量伽马射线      | 237 |
| 三、三相流中双重检测器和双能量系统  | 239 |
| 四、伽马射线背散射          | 240 |
| 五、中子方法             | 241 |
| 六、综合方法             | 241 |
| 第五节 地下储气库          | 242 |

|                                 |     |
|---------------------------------|-----|
| 一、地下储存气的示踪 .....                | 242 |
| 二、使用氦-85 预检储气库的完整性 .....        | 242 |
| 三、监测地下储气库气体混合情况的氢示踪剂 .....      | 243 |
| 四、用示踪剂发现问题 .....                | 244 |
| 第六节 油、水、气分离器 .....              | 244 |
| 一、油水分离器 .....                   | 244 |
| 二、API 分离器的水力学特征 .....           | 245 |
| 三、油田分离器的水力学特征 .....             | 245 |
| 第七节 腐蚀和冲蚀 .....                 | 251 |
| 一、腐蚀和冲蚀的监测 .....                | 251 |
| 二、腐蚀的处理 .....                   | 252 |
| 第八节 结垢的监测和处理 .....              | 253 |
| 第九节 管道泄漏 .....                  | 254 |
| 第十节 环境监测 .....                  | 254 |
| 一、天然存在的放射性物质(NORM) .....        | 255 |
| 二、需要关注的其他环境问题 .....             | 255 |
| 参考文献 .....                      | 256 |
| 附录 A 应用解析流动模型设计和分析示踪剂脉冲测试 ..... | 262 |
| 第一节 引言 .....                    | 262 |
| 第二节 井网几何形状的平面稀释作用 .....         | 263 |
| 一、五点井网突破曲线 .....                | 263 |
| 二、通用井网突破曲线 .....                | 265 |
| 三、各种井网突破曲线的相互关系 .....           | 266 |
| 第三节 混合作用的平面稀释 .....             | 266 |
| 一、基本原理 .....                    | 266 |
| 二、线性系统中的混合 .....                | 267 |
| 三、流管内的混合 .....                  | 268 |
| 第四节 均匀井网中的示踪剂响应 .....           | 269 |
| 一、公式 .....                      | 269 |
| 二、示踪剂开采曲线的转换 .....              | 270 |
| 三、吸附和衰变 .....                   | 271 |
| 第五节 示踪剂在不规则和不封闭井网中的流动 .....     | 273 |
| 第六节 分层油藏中的示踪剂响应 .....           | 274 |
| 一、分层 .....                      | 274 |
| 二、多层非均质性定义 .....                | 275 |
| 第七节 拟合示踪剂突破资料 .....             | 278 |
| 一、非线性回归 .....                   | 278 |
| 二、Loco 矿场示踪测试的解释 .....          | 279 |

|                                           |     |
|-------------------------------------------|-----|
| 三、平面非均质性·····                             | 281 |
| 第八节 示踪测试设计·····                           | 282 |
| 一、以单层为基础的设计·····                          | 283 |
| 二、以分层为依据的设计·····                          | 283 |
| 三、根据 Dykstra-Parsons 系数 $V_{DP}$ 设计 ····· | 285 |
| 第九节 井网突破曲线的推导·····                        | 285 |
| 术语·····                                   | 286 |
| 符号·····                                   | 288 |
| 误差函数(美国国家标准局,1965) ·····                  | 288 |
| 参考文献·····                                 | 290 |
| 附录 B 本书所用英制单位换算关系 ·····                   | 292 |

# 第一章 放射性基础

## 第一节 引言

近代放射学和放射性示踪剂在工业和商业领域中的应用,大多源于同原子弹有关的核能研究以及第二次世界大战后美国和其他地区提出的“和平利用原子能”计划。其中核技术在医学和石油勘探领域中的成功应用特别引人注目。在此期间,核测井仪的应用和研究迅速地发展,放射性示踪剂也应用至油田开发的每一个阶段(从室内实验至矿场)。在此期间,从事提供各种类型放射性服务的一些小公司也得到了迅速发展。

示踪剂的研究仍在一定的范围中继续进行,其中大多数是在医学领域。示踪剂是否具有放射性特征当然不是示踪剂的必要条件。到目前为止,大多数提供有关示踪剂应用的公开讨论会,都是由国际原子能机构(IAEA)和美国核学会(ANS)等团体发起的。

本章涉及相关的放射性基础,以及放射性示踪剂油田应用的基本原理和定义。本书将不涉及有关的核结构问题,或是对油田应用放射性示踪剂没有多大关系的核物理和化学问题。目前有价值的参考资料很多,为便于读者检索这类主题更多的相关信息,在本章的结尾列出了其中几篇最有价值的参考文献。我们将强调同当前油田实际应用有关的放射性问题,其中包括了一些目前尚未应用,但已证明在这一领域中很有实用价值的内容。

下面讨论同位素和核结构问题。

所有物质都是由元素组成的,而元素是由原子组成的。原子则是由带正电荷的原子核和一些在其周围轨道上分布的、与其电荷相对称的带负电荷的电子组成。每种元素原子的区别在于它们的核性质。

既然我们不再讨论核结构,我们就可以将原子核看做是由中子和质子组成的。中子是一种不带电荷的重粒子;而质子是一种带有一个正电荷的重粒子。对于任一给定种类的原子或核素来说,都有一个由一定数量中子( $N$ )和质子( $P$ )组成的原子核。核素中质子的数量,就是该原子的原子序数( $Z$ ),它决定了该原子原子核外部的电子数,以及它的化学性质。原子核中的中子数和质子数之和( $N + P$ )等于原子的质量( $M$ )。

元素周期表是依据原子序数排列的。但对给定原子序数的每一种核素来说,中子的数量可能有所不同。具有相同原子序数,但原子核中中子数量不同的这些原子被称作“同位素”。

一种元素的同位素,具有相同的化学性质,并在元素周期表中占据同一位置,但它们的原子量不同。在元素周期表中列出的部分相对原子质量,是天然存在的那些同位素原子质量的加权平均值。表示某一同位素相对原子质量的常规缩写方式是 ${}^m_z\text{I}$ ,其中 $\text{I}$ 是该元素的通用名, $m$ 是原子质量,由于 $z$ 是定义了 $\text{I}$ 的通用名的原子序数,写出 $z$ 就是多余的了,通常情况下将其省略。因此把相对原子质量为3的氢写作 ${}^3\text{H}$ ,在本文中,我们也使用 $\text{H}-3$ ,或氢-3这样的标识符,它们都是等效的形式, $\text{H}-3$ 也包含了氚的通用名,并被缩写为 $\text{T}$ 。

爱因斯坦相对论的一个重要结果是给出了质量( $M$ )与能量( $E$ )的关系式:

$$E = MC^2 \quad (1-1)$$

式中的  $C$  是光速。原子质量单位( $u$ ),是以给定的碳同位素 $^{12}\text{C}$ 的质量为基准,它给出的精确值是 12。能量的 SI 单位是焦耳(J);但在核研究中,传统的、最广泛应用的单位是电子伏(eV),它是由 1 个电子在 1V 的电位差中加速时所获得的能量定义的。使用最频繁的单位是兆电子伏(MeV),它等于  $10^6\text{eV}$ 。以此为依据,获得如表 1—1 所示的质量单位换算关系。

表 1—1 质量单位换算

| 单位     | 缩写 | J                       | MeV       |
|--------|----|-------------------------|-----------|
| 电子伏    | eV | $1.602 \times 10^{-19}$ | $10^{-6}$ |
| 原子质量单位 | u  | $1.492 \times 10^{-10}$ | 931.5     |
| 电子静质量  | u  | $8.170 \times 10^{-14}$ | 0.51      |

应该特别注意到,测得的原子核质量,总是小于中子和质子质量之和;它们之差被称作质量亏损,其能量当量称作“结合能”,它是衡量原子核稳定性的尺度。核反应总会导致能量的放射或吸收,它是根据产物的质量和反应物的质量之差计算出来的。

## 第二节 放 射 性

质子和中子的某些结合,会产生不稳定的原子核。这类核素将随时间而经历自发衰变。伴随有核粒子发射或电磁辐射的这种衰变被称之为“放射性”。从原子核中放射出粒子后,如果新原子核中的质子数量确有明显改变,这种衰变的结果也会生成一种新核素。

从统计学上讲,某一种放射性原子核的衰变,是一种随机的、不可预测的事件,但是如果有足够数量的放射性核素,那么衰变速率( $dN/dt$ )同存在的核素数量( $N$ )成正比,放射性核素的数量愈多,愈接近于遵循这一规律。单位时间的衰变速率  $dN/dt$  是衡量存在的放射性大小( $A$ )的度量,亦是每秒钟事件次数的度量。下式给出的  $\lambda$  是被称作衰变常数的比例常数,每种同位素都有 1 个特定的常数:

$$A = \frac{dN}{dt} = \lambda N \tag{1—2}$$

### 一、活度和半衰期

近代名词汇编(SI)中,表示放射性大小的基本单位是贝克(Bq),它等于 1 次衰变每秒的衰变速率(dps)。工业中仍在广泛使用的老单位是居里(Ci),它等于  $3.7 \times 10^{10}\text{dps}$ ,通常会分别使用如表 1—2 所示的 Bq 和 Ci 这些单位的倍数和分倍数。

表 1—2 单位倍数

| 名 称          | 符 号   | 倍 数        | 示 例                    |
|--------------|-------|------------|------------------------|
| femto(飞[母托]) | f     | $10^{-15}$ | fJ—飞焦[耳]               |
| pico(皮[可])   | p     | $10^{-12}$ | pCi—皮居里                |
| nano(纳[诺])   | n     | $10^{-9}$  | nCi—纳居里                |
| micro(微)     | $\mu$ | $10^{-6}$  | $\mu\text{Sv}$ —微希[沃特] |
| milli(毫)     | m     | $10^{-3}$  | mGy—毫戈[瑞]              |