

同位素 示踪测井

TONGWEI SU
SHI ZONG
CE JING



刘光尧
陈建生
著

江苏科学技术出版社

P631 / 43

同位素 示踪 测井

刘光尧 陈建生 著

江苏科学技术出版社

TONGWEISU
SHIZONG
CEJING

图书在版编目(CIP)数据

同位素示踪测井/刘光尧,陈建生著. - 南京:江苏科学技术出版社,1999

ISBN 7-5345-2822-4

I. 同… II. ①刘… ②陈… III. 同位素示踪技术-应用-测井 IV. P631.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 18516 号

同位素示踪测井

著 者	刘光尧 陈建生
责任编辑	左玉梅
装帧设计	温克信

出版发行	江苏科学技术出版社 (南京市中央路 165 号,邮编: 210009)
------	--

经 销	江苏省新华书店
照 排	南京展望照排印刷有限公司
印 刷	丹阳教育印刷厂

开 本	850mm × 1168mm 1/32
印 张	9.5
插 页	4
字 数	224 000
版 次	1999 年 10 月第 1 版
印 次	1999 年 10 月第 1 次印刷
印 数	1—2 000 册

标准书号	ISBN 7—5345—2822—4/TV·2
定 价	22.00 元(精)

图书如有印装质量问题,可随时向我社出版科调换。

内容 简介

本书为我国第一本关于同位素示踪测井方面的专著,该书对国内外采用放射性同位素示踪方法在孔中测定地下水含水层参数的发展及其对水文地质工作的影响作了较为深刻的论述。书中引用的工程实例都是作者的科研成果,既有作者翔实的理论推导,又有经验的总结。

本书共分十章,一至四章介绍了同位素示踪测井的基本原理、发展史、用途与方法;第五章论述了多含水层稳定流非干扰孔井流理论;第六章针对稀释测速法与抽水试验进行对比分析讨论;第七、八章详细讨论了管井水头损失问题;第九章讨论了单孔 $Q-S$ 曲线和干涉系数;第十章论述了流场畸变校正系数 α 值的确定。

读者对象:水文地质、水利、地下水勘察、岩土工程技术人员,大学生及研究生。

序

XII

我非常高兴地读到《同位素示踪测井》的样稿,两位作者历经数年完成的杰作终于出版了,这是值得庆贺的事。我是在 1991 年与作者之一陈建生教授相识的,从那时起了解到他所从事的同位素示踪技术探测渗流场的方法与理论。1994 年底我作为主鉴对他所主持的项目“坝基渗流场条件下多含水层稳定流非干扰井流理论与综合示踪方法研究”进行了鉴定评审,对他们所从事的研究工作有了更深入的了解,这项科研成果最终获得了 1996 年国家科技进步二等奖。

《同位素示踪测井》是由两位造诣较深的教授撰写而成。刘光尧教授曾任中国地质学会水文地质专业委员会副主任委员。60 年代从事的“钻孔渗流试验和参数计算”研究工作取得的成果达到了当时的国际水平;80 年代承担的“放射性同位素测速法及其水文地质应用”课题,获得冶金部重大科技成果三等奖。陈建生教授在 1983 年起从事同位素示踪测井方法与井流理论方面的研究,他主持研制的“单井同位素示踪地下水流向流速仪”曾获得 1988 年江苏省科技进步一等奖,1989 年国家科技进步三等奖;陈建生教

授作为访问学者应邀对德国慕尼黑的国际放射性环境研究中心 (GSF) 和奥地利维也纳国际原子能机构 (IAEA) 进行了科学访问, 国际著名同位素地下水示踪专家 Drost、Klotz 和 Plata 等对他研制的示踪仪以及由他提出的非干扰多孔井流理论给予了高度的评价。他所完成的同位素示踪测井总深度超过了 10000m, 完成的工程项目 40 多个。

由于同位素示踪测井已成功地应用于测定绕坝渗流场分布, 尤其是应用在一些水文地质条件极为复杂的坝基渗流场, 查清坝基或坝肩的渗流场分布和集中渗漏通道, 这些对于坝体的稳定是非常重要的, 对大坝的安全运行起着极为重要的作用。近十几年来, 同位素综合示踪方法在坝基渗流场的探测中发挥了重要的作用, 据我所知仅陈建生教授领导的科研小组已在龙羊峡、刘家峡、盐锅峡、八盘峡、新安江、碧口、广东抽水蓄能电站等十几座水库大坝或坝址上进行了成功的探测, 查出了许多隐患, 解决了不少工程难题。最近他们又将这种方法应用到北江大堤石角段的管涌探测之中, 探测出该地段强管涌产生的原因及渗漏部位。

两位作者根据他们多年的科研工作积累著成的《同位素示踪测井》是理论与工程实际结合得较为紧密的一部著作。该书的两位作者分别在不同的领域从事同位素示踪测井理论与技术方面的研究。他们合作完成的这部著作中,既有严谨的数学物理模型,又有大量的国内外工程实例,内容翔实,基本反映了同位素示踪测井方法的发展历史与最新的研究进展情况。

用抽水试验测定水文地质参数是传统的方法。经过 100 多年大量水文地质勘察的实践,发现该方法用于计算参数时往往不准,耗时长、花钱多、劳动强度大。采用盐液作为示踪剂的稀释测井方法,由于盐液等示踪剂投入井孔后存在密度对流,不能正确示踪地下水的真实运动行为,达不到定量的精度要求。进入 80 年代,本书的两位作者和其他一些科研单位和高校的有识之士,陆续从国外引进了同位素示踪测井方法,并在同位素示踪测井仪器设备和方法上有了新的发展和突破,并将该技术成功地应用于水利工程、冶金、煤田测井、环保、核废物处理、石油、水资源等领域中,取得了令人可喜的成就。

我相信《同位素示踪测井》一书的问世,将会推动我国的水文地质勘察工作,书中所介绍的很多方法正是工程中所需要的,因而它具有较强生命力。我认为把这种先进的方法带入 21 世纪,是有发展前途的。随着同位素示踪测井技术在生产中的推广和成熟,对改变水文地质勘察面貌将起到积极的作用。虽然同位素示踪测井方法还不能像抽水试验那样成熟并被广泛应用,但我相信在《同位素示踪测井》出版发行的推动下,在水文地质、水利勘察领域中同位素示踪测井方法与技术将会在生产实践中得到更进一步的发展。

中国工程院院士 吴中如

1999. 3. 24

用水井抽水法确定含水层的渗透系数的稳定流抽水试验理论是由裘布依(Dupuit)1863年提出,非稳定流理论则是在1932年由泰斯(Theis)提出,采用抽水试验确定渗透系数的方法一直沿用至今。由于抽水试验耗时、费工、费用高,多年以来各国的地质科学家始终在努力研究出一种操作简便、省时、省钱的探测含水层渗透性的新技术。自从Fox(1952)发表他的早期文献《用放射性同位素示踪地下水运动》以后,Moser(1957)提出放射性同位素单孔稀释法测定渗透流速,经Drost等(1968)和Klotz等(1971)比较系统的实验工作,将同位素示踪方法发展成为可以实际应用的孔中测量技术。

放射性同位素示踪剂探测灵敏度高、测量方便、单孔流向测定准确可靠,它的优势是不可能被其他示踪剂所取代的。正是由于同位素示踪测井有其独到之处,可以解决工程方面的许多技术难题,而受到各国专家的高度重视。

同位素示踪测井是一门年轻的边缘学科,过去20多年间,同位素示踪测井已从实验室走向生产实践,世界上许多国家如德国、法

国、波兰、匈牙利、日本、加拿大以及西班牙、哥伦比亚、新西兰、津巴布韦等都已成功地用这种方法解决了各种水文地质问题，解决了许多生产中的疑难问题。

在我国，同位素示踪测井经过 20 多年的发展已取得了举世瞩目的成就。为了减少测速法受到的垂向流的干扰，我们发展了在单孔及多孔中测定渗透系数、水力坡度、静水头、实际流向、 $Q-S$ 曲线等参数的多含水层稳定流非干扰混合井流理论与综合示踪测井方法 (1994)，研究了弥散系数、干涉系数、管井水头损失问题与流场畸变系数 α 值，并成功地将这一技术应用到坝基渗漏探测、煤田涌水预测、供水、水源地勘察、地下水污染物运移、海水入侵、核废物库选址等领域之中。

本书是第一本专门论述同位素示踪测井方面的专著。第一、二章分别介绍了测速法的发展历史及放射性防护的基础知识；第三章讨论了单孔中测定地下水流速流向的原理和方法；第四章介绍了多孔示踪测速法以及测定弥散系数的方法；第五章论述了多含水层稳定流非干扰多孔混合井流理论及测井方法；第六章讨论

了稀释测速法的实际应用；第七、八、九、十章分别讨论了井管的水头损失，经验参数推求 $Q-S$ 曲线，以及流场畸变因子 α 值的确定方法。书中引用的成果大多数都是作者的科研成果。例如由陈建生主持的“单井同位素示踪地下水流向流速仪”曾获 1989 年国家科技进步三等奖；由陈建生主持的另一项科研成果“坝基渗流场条件下多含水层稳定流非干扰混合井流理论及综合示踪方法研究”获得国家科技进步二等奖。

本书在编写过程中得到了江苏科学技术出版社的大力帮助与支持，左玉梅等认真审阅了全稿，并提出了许多修改意见。本书在编写出版过程中得到了金陵科技著作出版基金的帮助。在此，一并表示衷心的感谢。

刘光尧 陈建生

1999 年 3 月

致 读 者

社会主义的根本任务是发展生产力，而社会生产力的发展必须依靠科学技术。当今世界已进入新科技革命的时代，科学技术的进步不仅是世界经济发展、社会进步和国家富强的决定因素，也是实现我国社会主义现代化的关键。

科技出版工作肩负着促进科技进步，推动科学技术转化为生产力的历史使命。为了更好地贯彻党中央提出的“把经济建设转到依靠科技进步和提高劳动者素质的轨道上来”的战略决策，进一步落实中共江苏省委、江苏省人民政府作出的“科技兴省”的决定，江苏科学技术出版社于1988年倡议筹建江苏省科技著作出版基金。在江苏省人民政府、省委宣传部、省科委、省新闻出版局负责同志和有关单位的大力支持下，经省政府批准，由省科学技术委员会、省出版总社和江苏科学技术出版社共同筹集，于1990年正式建立了“江苏省金陵科技著作出版基金”，用作支持自然科学范围内的符合条件的优秀科技著作的出版补助。

我们希望江苏省金陵科技著作出版基金的建立，能为优秀科技著作在江苏省及时出版创造条件，以通过出版工作这一“中

介”，充分发挥科学技术作为第一生产力的作用，更好地为我国社会主义现代化建设和“科技兴省”服务；并能带动我省科技图书提高质量，促进科技出版事业的发展和繁荣。

建立出版基金是社会主义出版工作在改革中出现的新生事物，期待得到各方面给予热情扶持，在实践中不断总结经验，使它逐步壮大和完善。更希望通过多种途径扩大这一基金，以支持更多的优秀科技著作的出版。

这次获得江苏省金陵科技著作出版基金补助出版的科技著作的顺利问世，还得到江苏联合信托投资公司的赞助和参加评审工作的教授、专家的大力支持，特此表示衷心感谢！

江苏省金陵科技著作出版基金管理委员会

第一章 放射性同位素测速法可行性研究	1
一、放射性同位素测速法	1
(一) 概念	1
(二) 种类和测定的参数	1
二、水文地质测试技术的发展简史	2
三、关于达西-裘布依公式和抽水法	5
(一) 裘布依水井公式的推出	5
(二) 实践中裘布依公式的合理内核和缺陷	6
(三) 对抽水法的讨论	6
四、放射性同位素测速法达到的水平及其应用	7
五、结束语	10
第二章 放射性同位素和放射性防护基本知识	12
一、放射性同位素	12
(一) 放射性同位素概念	12
(二) 核素和同位素	14
(三) 天然和人工放射性辐射	14
(四) 放射性度量单位	16
二、参数测试常用同位素选择	19
(一) 示踪剂的发展	20
(二) 同位素示踪剂选择	21
三、放射性防护原理与辐射防护	24
(一) 放射性射线的性质及其危害	25
(二) 放射性对人体的影响	28
(三) 辐射防护的基本原则与标准	31
(四) 外照射防护与内照射防护	33
四、放射性同位素示踪测井中的防护	35
(一) 测井中的外照射防护	35
(二) 测井中的内照射防护	37

(三) 个人防护和个人卫生	38
(四) 防护措施	38
五、人工放射性同位素使用管理	39
(一) 同位素购买和运输	39
(二) 试样包装	39
(三) 废液处理	39
第三章 单孔中测定流速流向的原理和方法	41
一、单孔稀释法测定渗透流速的原理和方法	43
(一) 放射性示踪剂稀释法的基本原理	43
(二) 影响滤水管中示踪剂浓度稀释的因素	44
(三) 单孔稀释法测定渗透流速的探头	51
(四) 在单孔中测定渗透流速的方法	56
(五) 对单孔稀释法存在问题的述评	60
二、地下水流向的测定	61
(一) 在单孔中测定地下水流向的原理	61
(二) 测定地下水流向的装置	62
(三) 流向资料整理	67
三、单孔中垂向流速的测定	68
(一) 峰值法和累计法	68
(二) 示踪测井法	70
第四章 多孔示踪测速法	73
一、天然流场多孔示踪测速法	73
(一) 多孔示踪测速法的原理和应用	73
(二) 水库渗漏区示踪探查法	74
(三) 多孔示踪试验的野外测定	83
(四) 多孔示踪观测资料的整理	88
(五) 工程实例	94
二、人工流场多孔示踪测定含水层有效孔隙度	95

(一) 均质单一含水层有效孔隙度的测定	95
(二) 多层结构含水层有效孔隙度的测定	100
三、多孔示踪法测定弥散系数	104
(一) 天然流场多孔瞬时投源弥散系数的测定	104
(二) 人工流场多孔径向汇聚辐射流弥散系数的测定	107
第五章 多含水层稳定流非干扰多孔混合井流理论及测井方法	111
一、概论	111
二、多含水层稳定流非干扰多孔混合井流理论	112
(一) 多含水层系统中的涌水与吸水现象	112
(二) 双井模型	113
(三) 多井模型	115
(四) 单井模型	117
三、流量与降深之间的关系($Q-S$ 曲线)	118
四、测量技术	120
(一) 含水层吸水量或涌水量测定	120
(二) 含水层的渗透流速 V_f 与渗流方向测定	120
五、现场试验	122
(一) 湖南镇水库大坝右坝绕坝渗流同位素示踪探测	122
(二) 新安江水库大坝右坝绕坝渗流同位素示踪探测	123
(三) 汾河左岸抽水井试验	123
(四) 漳村矿煤田勘测孔测定	128
六、结束语	132
第六章 单孔稀释法确定渗透系数和天然径流量	134
一、同位素测试方法和抽水试验方法对比的现状述评	134

(一) 问题的提出	134
(二) 地下径流量计算结果的比较	135
(三) 工程应用得到的几点体会	147
二、渗透系数计算结果的比较	148
三、两种渗透系数对比时存在的问题	153
(一) 来自抽水试验方面的主要因素	153
(二) 来自单孔稀释法方面的几个问题	155
四、为提高渗透系数测试精度应采取的措施	161
(一) 用多孔抽水试验确定渗透系数	161
(二) 单孔稀释法测定渗透系数需注意事项	162
第七章 管井水头损失	164
一、管井水头损失概述	164
二、管井水平流水头损失	165
(一) 含水层和滤层间接触界面的水头损失	165
(二) 滤层和滤管间接触界面的水头损失	170
(三) 滤层的水头损失	176
三、管井垂向流水头损失	180
(一) 滤管内水质点碰撞的动量水头损失	180
(二) 管壁摩阻水头损失	183
四、关于管井水头损失的讨论	184
第八章 广义管井水头损失	188
一、广义管井水头损失概念	188
二、广义管井水头损失种类	189
(一) 过滤器水头损失	189
(二) 泥浆壁水头损失	189
(三) 细颗粒运移、堆积、堵塞造成的水头损失	192
(四) 腐蚀和结垢堵塞造成的水头损失	193
三、入井渗透流速和入管实际流速	195