

Technical Reports Series No. 316

放射性同位素工业示踪指南

Guidebook on Radioisotope Tracers in Industry

卢玉楷 等译 吕延晓 校



国际原子能机构第 316 号技术报告

放射性同位素工业示踪指南

卢玉楷	刁国平	译
仪明光	林长材	
吕延晓		校

原子能出版社

北 京

(京)新登字 077 号

内 容 简 介

本书系由国际原子能机构组织各国不同科学技术领域的专家编写的一本内容最新、最全面的放射性同位素工业示踪指南。它不仅对示踪的基本概念、理论模型作了简明扼要的阐述,而且介绍了放射性同位素示踪技术在各种工业生产过程中的典型应用例子。

本书还汇集了各种放射性示踪方法及其至今在工业上所取得的应用经验,综述了示踪方法的现状,讨论了放射性示踪方法的发展趋势,并对未来可能的应用作了探讨。

本书是从事开发与应用示踪技术的单位、研究人员、工厂管理人员、工程师、大学教师、研究生以及有关科技人员有用的参考书。

© IAEA, 1990

TECHNICAL REPORTS SERIES No. 316

Guidebook on Radioisotope Tracers
in Industry

©

国际原子能机构第 316 号技术报告

放射性同位素工业示踪指南

卢玉楷等译 吕延晓校

责任编辑 潘金娣
出版发行 原子能出版社(北京市海淀区阜成路 43 号)
通讯处:北京市 2108 信箱,100037(邮编)
印 刷 三河永旺印刷厂
经 销 新华书店总店北京发行所发行·新华书店经销
开本 787×1092mm 1/16 印张 15 字数 374 千字
1995 年 10 月北京第 1 版 1995 年 10 月北京第 1 次印刷
印数 1 600

ISBN 7-5022-1067-9/TL·690

定价:39.00 元

中译本前言

目前,放射性同位素在医学诊断与生命科学研究中的示踪应用已取得令人瞩目的成就。这是众所皆知的事实。然而放射性同位素在工业中的示踪应用,统观世界各国的发展却是不平衡的。有些国家示踪技术发展得相当成熟,甚至组建了专门的经营服务机构为工业界提供放射性同位素示踪应用的社会化服务。这些服务机构按市场供求规律发展自己的业务。例如英国卜内门化学工业有限公司(ICI)的物理和放射性同位素服务部,法国原子能委员会下属的放射性元素应用服务中心,印度一家私人公司(只开展盘存汞量方面的业务),芬兰一家私营公司(专门从事流量测定),经过多年的努力在开拓放射性同位素工业示踪应用的市场方面都取得了可喜的成就。很多潜在的用户开始熟悉这一技术,有的甚至主动申请,并迫切要求在其企业内开展放射性同位素示踪应用。然而有些国家,特别是发展中国家,由于多方面的原因,目前放射性同位素的现场和野外示踪应用开展得还不甚理想。

有鉴于此,国际原子能机构(IAEA)为了向其成员国推广这项技术,组织了来自 11 个国家 22 名作者(见底页)的班子共同编写,并于 1990 年出版了《放射性同位素工业示踪指南》这本书。《指南》将长期积累的经验与各种先进的技术和方法介绍给读者,以求推动各成员国示踪技术的发展,促进其工业应用,并从中取得明显的技术与经济效益。本书的作者分别来自英国、印度、前德意志民主共和国、前德意志联邦共和国、美国、以色列、芬兰、法国、波兰、丹麦、前捷克斯洛伐克。

我国放射性同位素工业示踪应用起始于 1957 年。当时,我国科学工作者第一次采用铟-65 作为示踪剂在玉门油田开展注水井吸水剖面的测定工作。这一工作发展至今,目前国产钋-131 微球示踪剂,已成为我国各大油田示踪测井重要手段,每年测井数达 9000 井次,为我国石油年产量过亿吨作出了宝贵的贡献。在石油工业中放射性同位素示踪应用还包括采用锡-113-铟-113m 发生器开展油井产液剖面的测定,采用碘-125,硫-35,氟等开展油田井间示踪,采用金-198,溴-82,钠-24,铈-124 等开展地下井泄漏检测,以及采用碘-131 开展地下输油管线示踪检漏等。放射性同位素示踪技术在冶金工业中用于观察合金材料的热腐蚀(例如采用硫-35 研究镍基铁合金与镍基铌合金等),研究稀土金属在钢铁中的分布与行为,开展提高钢铁产量与质量的研究,并进行生产过程监测(如采用钙-45 研究盛钢桶内衬材料对钢质的影响,以及钙在硅铁中对铝镇静钢水口结瘤的影响等)。在机械工业中主要用于开展机械磨损研究,运动部件表面最高温度测定(离子注入氮-85)。在化学工业中用于碱厂电解槽汞量盘存(汞-197)。在电子工业中用于半导体器件检漏(氮-85)。在水利水电工程方面,钷-46 与铟-113m 用于海湾泥沙运动和沉积的观测,碘-131 用于水库渗漏观测与地下水资源评价(见 IAEA Bulletin, 2, 1987, p. 24)。由此可见,我国放射性同位素示踪技术在工业中的应用几十年来已取得了多方面的成果,并且在某些方面还具有自己的特色,然而这些成果并没有在《指南》中体现出来。这说明我们的工作尚未与国际“接轨”,国外的同行对我国的技术发展现状还缺乏了解。另一方面这也说明我国的放射性同位素工业示踪应用在整体上还未形成气候,真正成为一种社会化的服务手段,实现技术成果向生产力的转化。由此可见,我国工业示踪应用似乎与世界工业发达

国家一样,也都遵循着新技术发展与应用的一般规律,即存在一段 15~20 年的“时间差”。因此学习与借鉴国外成功的经验,跟踪国外技术发展动态,进一步加强国际合作与交流,是十分必要的。《指南》中译本的问世,无疑有助于我国更多的读者扩大眼界,取长补短,从而推进我国放射性同位素工业示踪应用的持续发展。《指南》所涉及的内容几乎覆盖了所有的工业部门,然而化学工业所占比重很大,高达 68%。其原因主要在于对现代化学工业中大型装置的故障诊断与工艺改进,放射性同位素示踪具有独特的优势。化工装置的任何停工中断就意味着大量财富的损失,而流程效率的微小改善却意味着带来滚滚财源。这里值得注意的是,我国放射性同位素在化学工业中示踪应用的潜力远未发挥。为了克服困扰我国放射性同位素示踪技术发展与应用的一些限制因素,除了解决一般的技术问题外,看来当前面临的主要任务是:

- 完善技术应用法规,实现管理制度化。在我国当前开展一项放射性同位素工业示踪应用往往要涉及到很多管理部门,例如环保、卫生、交通、公安、科委……。因此法规的配套与管理的协调,是技术健康发展与有效应用的基本保证。
- 扩大信息的传播与交流。许多潜在的用户对于应用放射性同位素示踪剂存在诸多疑虑,例如应用的安全性,技术的尖端性,人才与设备的配置,费用的承受能力,等等。因而在工业部门中积极开展示范、培训与交流等活动有助于信息的传播与技术的推广应用。
- 增强市场观念,建立“专业户”。放射性同位素工业示踪应用内容的多样性决定了技术服务的分散性。显然建立专业服务机构(持有营业执照),并形成社会化的服务网络,有利于改善工业企业对放射性同位素示踪技术的接受性。“专业户”可根据用户特殊的需求迅速作出反应,并以周到的服务、合理的价格为用户排忧解难,从而免去了各用户为满足操作安全、法规制度、人员培训、设备购置等条件而产生的诸多不便。当然,“专业户”如从现有为工业企业的示踪“诊断”,而发展到综合非核技术的全方位“治疗”,提供所谓“交钥匙”的一揽子服务,那将是一种高水平的突破。

本书共分七章,六个附录。第一至四章由卢玉楷译,第五章 5.1 节至 5.12 节由仪明光译,第五章 5.13 节至第六章 6.7 节由林长材译,第六章 6.8 节至附录 VI 由刁国平译,全部书稿经卢玉楷统稿。全书由吕延晓校。虽然各章节的译者都是长年从事放射性同位素方面工作的人员,然而同位素工业示踪应用涉及的领域十分广阔,中译本难以十分贴切地表达原书的内容,译得不妥甚至错误之处望广大读者批评指正。最后值得一提的是,我深切期待,通过我国核科技工作者的共同努力,今后原书再版或组织类似新书编写时,能够看到包含有我国的成果与经验,甚至编写人员,为促进全球核能和平利用作出我们应有的贡献。

中国同位素与辐射行业协会

吕延晓

1994.5. 于北京

英文版前言

本指南专为发展中国家和工业化国家中示踪技术的应用者和开发者,以及工厂管理人员、工艺工程师等而编写。本书也可作为其他研究人员或教师的有用参考书。

国际原子能机构(IAEA)感谢所有对本书作出贡献的人,特别要感谢芬兰、法国和波兰等国政府承办各次咨询小组会议,使本指南作者们得以相聚。

目 录

中译本前言	(13)
英文版前言	(15)
第一章 绪论	(1)
第二章 示踪剂概念	(3)
2.1 群体概念	(3)
2.2 信息概念	(3)
2.3 系统概念	(3)
2.4 示踪剂概念——示踪剂定义	(4)
参考文献	(5)
第三章 通用示踪技术	(6)
3.1 试验设计	(6)
3.1.1 问题分析和示踪技术的选择	(6)
3.1.2 示踪剂的选择	(7)
3.1.2.1 化学型与物理型放射性示踪剂:载体	(7)
3.1.2.2 可活化示踪剂和化学示踪剂	(8)
3.1.3 注入、测量、数据获取和评价技术的选择	(8)
3.1.4 活度的估算与最优化	(8)
3.1.5 辐射安全考虑	(9)
3.2 示踪试验的实施	(11)
3.2.1 放射性示踪剂的制备	(11)
3.2.1.1 固体示踪剂	(11)
3.2.1.2 水溶液系统	(12)
3.2.1.3 有机材料	(12)
3.2.1.4 气体材料	(13)
3.2.1.5 同位素发生器	(13)
3.2.1.6 可活化示踪剂	(14)
3.2.2 放射性示踪剂处理系统、注入和取样	(15)
3.2.2.1 放射性示踪剂处理设备	(15)
3.2.2.2 瞬间注入装置	(16)
3.2.2.3 连续注入装置	(17)
3.2.2.4 取样装置	(17)
3.2.3 辐射探测及测量	(17)
3.2.3.1 辐射探测器	(17)

3.2.3.2	辐射测量用电子学装置	(19)
3.2.3.3	γ 能谱法	(20)
3.2.3.4	实际系统的测量效率	(21)
3.2.3.5	辐射测量的统计学	(22)
3.3	数据评价	(23)
	参考文献	(23)
第四章	示踪方法学	(26)
4.1	示踪剂和系统分析	(26)
4.1.1	系统概述	(26)
4.1.1.1	标量系统和向量系统	(26)
4.1.1.2	线性系统和非线性系统	(26)
4.1.2	系统分析概述	(27)
4.1.2.1	频率分析	(27)
4.1.2.2	脉冲分析	(28)
4.1.2.3	采用相关法的系统分析	(29)
4.1.3	示踪分析和系统分析中的质量传递	(29)
4.1.3.1	质量传递样品	(29)
4.1.3.2	示踪法鉴定质量传递样品	(30)
4.1.3.3	示踪剂流的系统分析	(31)
4.1.4	示踪剂作为信息源	(34)
4.1.4.1	滞留时间分布(RTD)	(35)
4.1.4.2	内年龄分布和阶梯函数响应	(35)
4.1.4.3	流动特性和滞留时间分布一阶矩之间的重要关系	(36)
4.1.4.4	函数 $E(t)$ 和 $F(t)$ 的实验测定	(36)
4.2	基本流动模型	(38)
4.2.1	基本模型	(38)
4.2.1.1	柱塞流	(38)
4.2.1.2	完全混合器	(38)
4.2.2	串联的完全混合器	(39)
4.2.3	分散模型	(39)
4.2.4	适用于滞止区交换的流动模型	(41)
4.3	示踪剂信息用于更大系统模型的建立	(41)
4.3.1	串联的子系统	(41)
4.3.2	并联的子系统	(42)
4.3.3	再循环系统	(42)
4.4	示踪剂信息解决复杂问题	(43)
4.4.1	复杂装置	(43)
4.4.2	过程模型	(44)
4.4.3	复合模型的应用	(45)

4.5 可变流和可变体积过程.....	(45)
4.5.1 引言.....	(45)
4.5.2 不同稳态下的滞留时间分布.....	(45)
4.5.3 可变流过程.....	(46)
4.5.4 可变流条件下的滞留时间分布.....	(47)
4.5.4.1 基本流动模型.....	(47)
4.5.4.2 高斯模型和分散模型.....	(47)
4.5.4.3 任意形式的滞留时间分布.....	(49)
4.5.5 可变流情况下已知滞留时间分布的应用.....	(49)
4.5.5.1 方法应用小结.....	(50)
4.5.6 可变体积情况下的滞留时间分布.....	(50)
4.5.6.1 完全混合器.....	(50)
4.5.6.2 容器内流型的特征.....	(51)
4.5.6.3 方法的推广.....	(54)
4.5.7 示踪剂试验和时间变量过程 RTD 应用的结论	(54)
第四章附录 连续流动系统的状态空间模型	(55)
参考文献	(56)
第五章 一般应用	(57)
5.1 引言.....	(57)
5.2 流动模型的应用;参数值	(57)
5.2.1 引言.....	(57)
5.2.2 问题.....	(57)
5.2.3 通过示踪研究得到脉冲响应函数.....	(58)
5.2.4 流动模型的选择.....	(58)
5.2.4.1 RTD 函数的一般应用	(58)
5.2.4.2 模型的选择.....	(58)
5.2.5 参数估算方法.....	(59)
5.2.5.1 基本模型.....	(59)
5.2.5.2 分散模型.....	(59)
5.2.5.3 复杂模型.....	(60)
5.2.6 通用非专用实例.....	(60)
5.2.6.1 实验数据.....	(60)
5.2.6.2 基本模型.....	(60)
5.2.6.3 分散模型.....	(61)
5.2.6.4 伴有交换的轴向分散模型.....	(61)
5.3 流率.....	(62)
5.3.1 概述.....	(62)
5.3.2 各种测量方法.....	(62)
5.3.2.1 通过时间法.....	(62)

5.3.2.2	连续稀释法	(64)
5.3.2.3	瞬间注射法	(65)
5.4	物料平衡	(66)
5.4.1	问题	(66)
5.4.1.1	稀释原理	(66)
5.4.1.2	平均滞留时间原理	(67)
5.4.1.3	估算	(67)
5.4.2	实验方法	(67)
5.4.2.1	同位素稀释法	(67)
5.4.2.2	脉冲积分法	(68)
5.4.2.3	激励响应法(SRM)	(70)
5.4.3	实例:汞存量	(71)
5.5	固体示踪剂的特性和应用	(72)
5.5.1	颗粒状固体及其示踪剂	(72)
5.5.2	示踪剂制备和试验	(72)
5.5.3	试验、测量和结果解释	(74)
5.5.4	单个颗粒的观察	(74)
5.6	混合效率	(75)
5.6.1	引言	(75)
5.6.2	混合问题	(76)
5.6.2.1	分批混合	(76)
5.6.2.2	连续混合	(76)
5.6.3	RTT 法	(76)
5.6.4	测量分析	(77)
5.6.4.1	分批混合	(77)
5.6.4.2	连续混合	(77)
5.6.5	一般例子:固体颗粒分批混合	(78)
5.7	故障排除	(79)
5.7.1	引言	(79)
5.7.2	泄漏检测和泄漏定位	(79)
5.7.2.1	埋设管线的泄漏定位	(80)
5.7.2.2	工业系统中的泄漏探测	(81)
5.7.3	堵塞定位	(82)
5.7.3.1	管道堵塞定位	(82)
5.7.3.2	硝酸塔	(82)
5.7.4	耐火内衬磨蚀	(82)
5.7.5	油井中漏水区的定位	(83)
5.7.6	物料平衡和滞留时间分布的应用	(84)
5.7.6.1	滞留时间分布	(84)

5.8 渗透和扩散	(86)
5.8.1 引言	(86)
5.8.2 非均质装置:水密性测量	(86)
5.8.2.1 目的	(86)
5.8.2.2 方法	(87)
5.8.2.3 结果	(87)
5.8.3 均质材料	(87)
5.8.3.1 目的	(87)
5.8.3.2 方法和公式	(87)
5.8.3.3 应用和结果	(89)
5.9 粒度分布	(90)
5.9.1 引言	(90)
5.9.2 基于沉积和 Stokes 定律的粒度分布	(90)
5.9.3 采用放射自显影的 PSD 直接测定法	(91)
5.10 腐蚀和表面现象	(91)
5.10.1 引言	(91)
5.10.2 RTT 的应用	(93)
5.10.2.1 材料的抗腐蚀试验	(93)
5.10.2.2 表面现象及其对金属腐蚀影响的研究	(94)
5.10.2.3 涂层保护性质的研究	(95)
5.10.2.4 工业耐火内衬腐蚀的研究	(95)
5.10.2.5 金属高温腐蚀机理的研究	(95)
5.11 同位素在机械学和动力学研究中的应用	(97)
5.11.1 化学示踪剂	(97)
5.11.2 标记化合物的生产和技术规格	(98)
5.11.2.1 生产	(98)
5.11.2.2 技术规格	(98)
5.11.3 物理示踪剂的置换——物料平衡研究	(100)
5.11.3.1 实例记载	(100)
5.11.4 动力学中的同位素	(101)
5.11.4.1 慢反应动力学	(102)
5.11.4.2 平衡动力学	(102)
5.11.4.3 动力学同位素效应	(103)
5.11.5 机理研究	(104)
5.11.5.1 机理研究的途径	(104)
5.11.5.2 中间体的检测	(105)
5.12 两相流	(106)
5.12.1 引言	(106)
5.12.2 流动机理	(107)

5.12.3	水力输运·····	(108)
5.12.4	放射性测量方法的作用·····	(108)
5.12.5	放射性示踪法测量滑移速度·····	(108)
5.12.6	矿山回填装置中的放射性示踪实验·····	(109)
5.12.7	数据获取和处理系统·····	(111)
5.12.8	放射性示踪技术与辐射测量相关法测量速度的比较·····	(111)
5.12.9	放射性示踪法在多相流研究中的其它例子·····	(113)
5.13	示踪数据用于过程控制·····	(113)
5.13.1	引言·····	(113)
5.13.2	根据示踪数据实现前馈控制·····	(114)
5.13.3	反馈控制·····	(115)
5.13.4	其它控制方法·····	(115)
5.13.4.1	可变流动过程的前馈控制·····	(116)
5.13.4.2	可变流动过程的反馈控制;其它方法·····	(116)
5.13.5	用增广模型的控制·····	(117)
5.13.6	最佳稳态的模拟控制·····	(117)
5.14	动力学过程·····	(118)
5.14.1	引言·····	(118)
5.14.2	任意级动力学·····	(118)
5.14.3	一级动力学系统·····	(119)
5.14.4	实例:矿物加工动力学·····	(120)
5.14.4.1	研磨研究中的示踪剂·····	(120)
5.14.4.2	研磨动态模型·····	(120)
5.14.4.3	利用动力学活泼示踪剂开展研磨分析·····	(121)
5.14.4.4	在研磨分析中常规数据和示踪数据的结合·····	(121)
5.14.4.5	浮选动力学的示踪研究·····	(121)
5.14.5	快速动力学可逆化学反应的情况·····	(122)
	参考文献·····	(123)
第六章	实例研究·····	(129)
6.1	引言·····	(129)
6.2	化学工业·····	(129)
6.2.1	引言·····	(129)
6.2.2	某些典型的实例研究·····	(130)
6.2.3	实例研究:采用放射性同位素示踪技术研究水自蒸馏装置向产品泄漏 ·····	(133)
6.2.3.1	引言·····	(133)
6.2.3.2	问题的确定·····	(133)
6.2.3.3	试验设计·····	(133)
6.2.3.4	试验与结果·····	(135)

6.2.3.5	结果解释	(137)
6.2.3.6	效益	(137)
6.2.3.7	辐射安全	(137)
6.3	造纸和纤维素纸浆工业	(138)
6.3.1	概述	(138)
6.3.2	应用范围	(138)
6.3.2.1	缺陷探测	(138)
6.3.2.2	混合	(138)
6.3.2.3	过程自动化所需的数据	(139)
6.3.3	示踪剂	(139)
6.3.4	纸浆箱研究	(139)
6.4	石油工业	(140)
6.4.1	引言	(140)
6.4.2	在石油工业某些领域中的应用	(141)
6.4.2.1	油田生产	(141)
6.4.2.2	管线输送	(142)
6.4.2.3	工艺过程和产品研究及试验	(142)
6.4.3	精炼应用中的实例研究	(142)
6.4.3.1	流率	(142)
6.4.3.2	进入非正常渠道的流动	(143)
6.4.3.3	流动分布和流型	(143)
6.4.3.4	催化剂磨损	(143)
6.4.3.5	其它精炼研究	(144)
6.4.4	详细说明的实例研究	(144)
6.4.4.1	油田注水	(144)
6.4.4.2	炼油厂放空燃烧装置排气管内的流率	(145)
6.5	水泥工业	(147)
6.5.1	引言	(147)
6.5.2	某些典型的示踪应用	(147)
6.5.3	实例研究 1:生料仓	(147)
6.5.3.1	目的	(147)
6.5.3.2	装置说明	(148)
6.5.3.3	方法学和示踪剂	(148)
6.5.3.4	结果和模拟	(149)
6.5.4	实例研究 2:旋流热交换器	(149)
6.5.4.1	目的	(149)
6.5.4.2	试验和装置说明	(149)
6.5.4.3	方法学和示踪剂	(150)
6.5.4.4	结果	(150)

6.6	冶金工业	(150)
6.6.1	引言	(150)
6.6.2	放射性示踪法在冶金工业中应用的典型实例	(152)
6.6.3	详细说明的实例研究	(152)
6.6.3.1	沉降槽中炉身熔渣除铜(shaft slag decoppering)的研究	(155)
6.6.3.2	推荐的定量测定钢中外源性氧化物夹杂的放射性示踪方法	(158)
6.7	能源工业	(160)
6.7.1	引言	(160)
6.7.1.1	概述	(160)
6.7.1.2	某些典型的放射性示踪应用	(161)
6.7.2	实例研究	(161)
6.7.2.1	使用 RTT 优化煤砖厂	(161)
6.7.2.2	燃煤火力电厂的放射性示踪试验	(163)
6.8	电子工业	(165)
6.8.1	引言	(165)
6.8.1.1	概述	(165)
6.8.1.2	某些典型的示踪应用	(166)
6.8.2	实例研究:测定湿法化学刻蚀多晶硅薄层过程中的银离子吸附.....	(166)
6.8.2.1	问题的性质	(166)
6.8.2.2	示踪方法	(166)
6.8.2.3	实验	(166)
6.8.2.4	数据处理和结果解释	(168)
6.8.2.5	去污与废物处理	(170)
6.8.2.6	工作效益	(170)
6.9	汽车制造业	(170)
6.9.1	磨损测量	(170)
6.9.1.1	活化和活化控制	(170)
6.9.1.2	探测方法	(171)
6.9.2	气蚀测量	(173)
6.9.3	油耗测量	(173)
6.9.3.1	测量方式	(173)
6.9.3.2	氚示踪技术基础	(173)
6.9.3.3	连续通氚法	(174)
6.9.3.4	间歇通氚法	(174)
6.9.3.5	示踪技术较之其它方法的优点	(174)
6.9.4	活塞环的旋转运动	(174)
6.10	环境和市政卫生工程.....	(175)
6.10.1	引言.....	(175)
6.10.2	典型应用.....	(175)

6.10.3	实例研究:厌氧污泥蒸煮器中的滞留时间分布	(175)
6.10.3.1	概述	(175)
6.10.3.2	试验系统	(175)
6.10.3.3	示踪研究	(175)
6.10.3.4	结果	(177)
6.10.3.5	简单流动模型	(177)
6.11	矿业	(178)
6.11.1	引言	(178)
6.11.2	作为示踪试验课题的矿物加工过程	(180)
6.11.3	矿业开放过程回路的示踪试验	(181)
6.11.3.1	矿石的粗磨	(181)
6.11.3.2	矿石分级	(182)
6.11.4	矿业中密闭加工回路的示踪试验	(184)
6.11.4.1	密闭回路碾磨	(184)
6.11.4.2	浮选装置中再循环示踪	(185)
6.11.5	浮选分配动力学试验	(185)
	参考文献	(186)
第七章	目前的发展与应用趋势	(193)
7.1	引言	(193)
7.2	示踪方法学的发展趋势	(193)
7.2.1	非稳态和非线性系统	(193)
7.2.2	相关法的应用	(193)
7.2.3	随机模型的建立	(194)
7.2.4	马尔可夫过程	(194)
7.3	示踪技术的发展趋势	(194)
7.3.1	工业示踪剂	(194)
7.3.1.1	放射性同位素发生器	(194)
7.3.1.2	加速器生产的同位素	(194)
7.3.1.3	利用 γ 谱的放射性示踪实验	(195)
7.3.2	辐射探测器	(195)
7.3.3	数据获取和处理系统	(195)
7.4	示踪应用趋势	(195)
7.4.1	一般应用	(195)
7.4.2	应用领域	(196)
7.4.2.1	生物技术	(196)
7.4.2.2	微电子学	(196)
7.4.2.3	材料工艺学	(196)
7.4.2.4	工业装置的危害性评价	(196)
7.5	结束语	(197)

参考文献	(197)
附录 I 与示踪方法有关的密封源应用的理论和原理	(198)
1.1 引言	(198)
1.2 工业应用中实用的密封源技术	(198)
1.3 γ 射线吸收技术	(199)
1.3.1 原理	(199)
1.3.2 常用的 γ 射线源	(199)
1.3.3 探测装置	(200)
1.4 γ 射线散射技术	(200)
1.4.1 原理	(200)
1.4.2 源和设备	(201)
1.5 中子慢化技术	(201)
1.5.1 原理	(201)
1.5.2 源和设备	(202)
参考文献	(202)
附录 II 放射性同位素生产的一般原理	(204)
I.1 引言	(204)
I.2 活化公式	(204)
I.3 活化过程	(204)
I.3.1 中子活化	(204)
I.3.1.1 (n, γ) 反应	(205)
I.3.1.2 $(n, p), (n, \alpha)$ 反应	(205)
I.3.1.3 裂变	(206)
I.3.2 带电粒子活化	(206)
I.4 放射性同位素发生器	(206)
I.5 放射性活化的若干考虑	(207)
I.5.1 靶子选择	(207)
I.5.2 辐照靶的密封	(207)
I.5.3 辐照后的处理	(207)
参考文献	(207)
附录 III 非扩散系统的体积、流率和 RTD 一阶矩之间的关系	(209)
附录 IV 重叠合法与再循环的算法	(210)
IV.1 问题:滞留时间分布的鉴别	(210)
IV.2 直接法	(211)
IV.2.1 归一化	(211)
IV.2.2 RTD 的测定	(211)
IV.2.2.1 傅里叶分析	(211)
IV.2.2.2 拉格朗日函数分析	(212)
IV.3 稳定化重叠合法	(213)

IV.4 用指数输入函数对重叠合法简单求解·····	(213)
IV.4.1 根据 $C_{out}(t)$ 进行 $h(t)$ 的几何测定 ·····	(213)
参考文献·····	(213)
附录 V 恒等脉冲响应的性质·····	(215)
V.1 良好混合·····	(215)
V.2 恒等的脉冲响应·····	(217)
参考文献·····	(218)
附录 VI 拉普拉斯变换的某些性质·····	(219)
VI.1 拉普拉斯变换·····	(219)
VI.2 拉普拉斯变换的某些性质·····	(219)
VI.3 Duhamel 定理 ·····	(220)
初稿和综述作者 ·····	(221)
筹划指导委员会成员 ·····	(221)