

# 放射性同位素和辐射技术在工业中的应用

## 关于某些不大为人所知但已广泛采用的工业应用的报告

Jacques Guizerix, Vitomir Markovic 和 Peter Airey

工业辐射加工的基础是把辐射用作能源，使被加工的物质引起特定的化学、物理和生物变化。另一方面，同位素在工业中的应用，或作密封源或作示踪剂，其基础都是测量反映人们所关心性质的物理信号。

工业应用的例子很多：例如，造纸工业和钢铁工业使用了成千上万台核子仪表，通过连续监测纸张的单位面积重量或钢板的厚度，使产品质量和生产效率最优化。数以万计的料位计常常可在恶劣的环境中（如在腐蚀性介质中）进行测量，或提供优于使用非放射性设备而且简单、可靠和经济的解决办法。无损检验已在世界范围内得到推广，而 $\gamma$ 照相法已与非核的其他方法一起，成为专门从事无损检验的所有现代化实验室中的经典方法。

密封源（其放射性活度有低有高，低的为几毫居里，\* 高的达几居里）的许多工业应用，已为公众所熟知。本文着重介绍也许不大为人所知，但已在工业中广泛采用的辐射加工和示踪剂的某些应用。

### 辐射的工业应用

在工业应用方面，辐射效应的产生速度可与用其他工业技术生产产品的速度相比较。因此，辐射能量和辐射功率起着很重要的作用，前者确保按需要穿透产品，后者确保有适当的生产量。工业应用的其他重要因素是：运行可靠性（利用率通常不小于90%），过程可控性、效率和安全性。

若干类型的辐射源能满足全部这些要求。可以肯

定地说，现今的辐射源技术和工程几乎能满足任何工业要求。最主要的辐射源是：放射性同位素钴-60  $\gamma$  辐射源和高能电子束加速器（能量从0.15至10兆电子伏（MeV））。

**$\gamma$  辐射源和技术。**钴-60几乎一直独占着 $\gamma$ 辐射源市场。这种形势可能会持续下去，因为一度被看作替代物的另一种同位素铯-137，不可能获得能满足工业生产应用所需要的数量。虽然美国最近安装了一台铯-137商用辐照装置，但在今后10年内不可能会有许多这类装置投产。

钴-60的 $\gamma$ 辐射能穿入到被辐照材料的深部，这对处理带包装的大体积产品是很方便的。它主要用于一次性医疗用品的工业消毒，其次用于药物、香料和其他产品的灭菌。

目前在世界范围（大约40个国家）内商业应用的工业辐照装置大约有140台。这些装置的总安装活度约为 $3 \times 10^{18}$ 贝可勒尔（Bq），或80兆居里（MCi）。典型的工业辐照装置的安装活度为 $3.7 \times 10^{16}$  Bq（1MCi），其辐射功率相当于15千瓦（kW）。它能够消毒（吸收剂量为2兆拉德时）约25 000—30 000立方米材料每年。目前运行中的工业辐照装置的总安装活度为 $2.2 \times 10^{17}$  Bq（6MCi或90kW）。

其他的应用包括食品辐照（现有若干台商用辐照装置和许多小型示范装置）；污泥消毒（在德意志联邦共和国有一台商用辐照装置和若干台中间试验辐照装置）；以及其他一些小规模的或特殊的应用，例如木材—聚合物的复合、聚合、蓄电池隔膜的辐射接枝、生物医学应用，以及橡胶乳液的硫化。

**电子束辐射源和技术。**电子束（EB）的工业应用始于50年代，开始时用于聚乙烯薄膜的交联（生产包装用热收缩薄膜）和电线绝缘材料的交联。这些应

Guizerix 先生是物理和化学处工业应用与化学科科长，Markovic 先生是该科的工作人员，Airey 先生是机构技术援助和合作处的成员。

\* 居里是同位素衰变率的单位。1居里等于 $37 \times 10^9$ 次衰变每秒或37吉贝可勒尔（37 GBq）。

用一直在稳定地发展。目前，用于各种商业应用的EB加速器有数百台。已研制成两类不同的加速器，它们的应用范围也不尽相同。

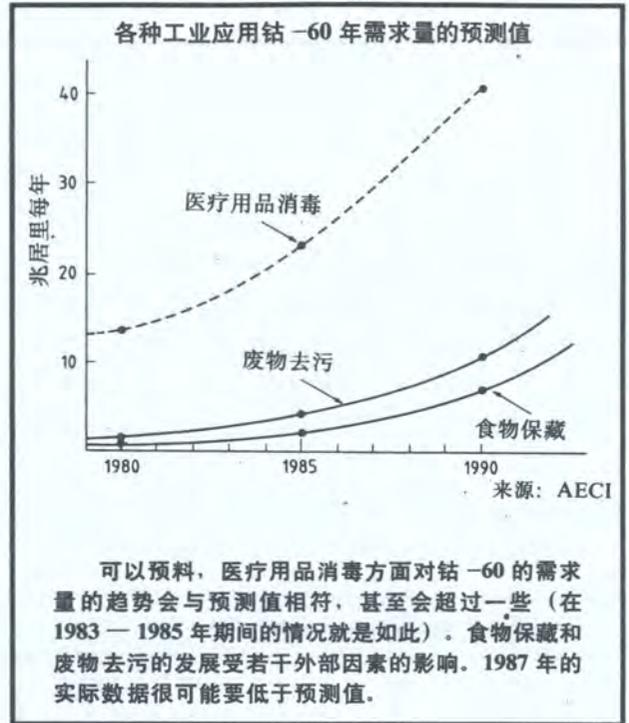
• 低能电子束加速器。这类加速器的能量范围为0.15—0.5 MeV，产品加工区完全屏蔽，屏蔽物是加速器的组成部分。这类加速器体积较小，所需空间不大，可以比较容易比较方便地安装在任何工作区或现有生产线里。这种能区的电子束的有效射程很小（不到1mm），其用途限于对表面层进行辐照。典型的应用有：塑料薄膜的交联，电线薄绝缘层的交联；纸张、木板、塑料、金属等表面涂层的固化；纸张和薄膜上硅防粘涂层的固化；印刷油墨的固化；以及层压粘合剂的固化。

对于利用颜料涂层或需要极高生产速度的场合，现在往往利用辐射固化技术代替紫外线技术。在许多应用中，例如利用保护表层的同时固化技术，即使木板和箔/纸贴面之间的层压粘合剂固化的辐射固化技术，是任何其他方法所不能代替的。目前已有能量范围最高达0.3MeV的大功率（300—500kW）电子束加速器出售。利用商用电子束加速器很容易达到1000米每分钟量级的生产能力（吸收剂量为10千戈瑞时）。这些加速器已成功地进行过处理烟道气的试验，以便供环境保护用。（参看本期第25页有关这一主题的文章。）

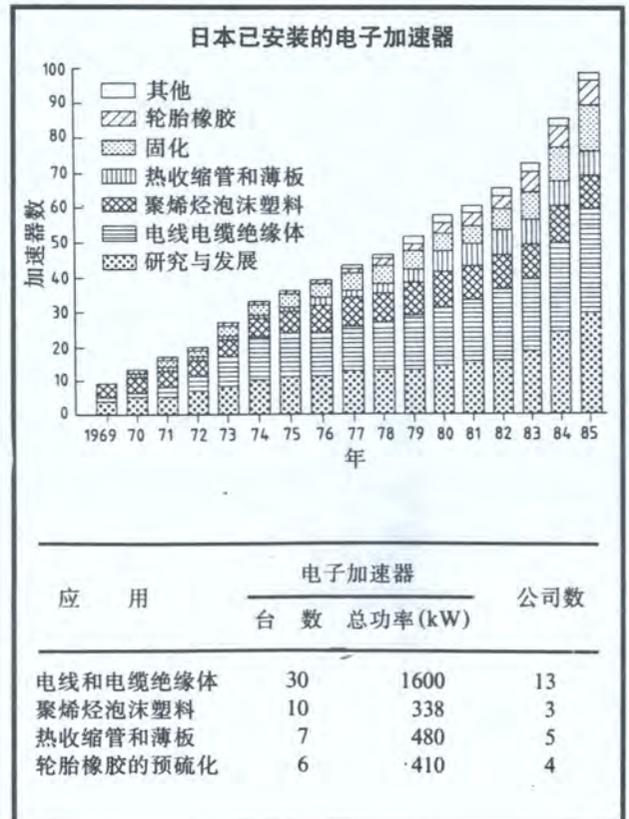
• 能量范围为0.5—10MeV的电子束加速器。目前已有功率额定值最高约200kW的这种加速器出售。辐射区周围用厚1.5—2米的混凝土墙作屏蔽。这类加速器目前已被许多大型工业部门采用，包括塑料工业、汽车制造业、橡胶产品制造业、石油化学工业以及电线电缆工业等。主要的应用有：塑料（电线与电缆的绝缘层、热收缩材料、热水聚乙烯管材、泡沫塑料等等）的辐射交联；橡胶的辐射硫化作用；以及散装聚合物的改性处理（可控降解）。

供这些用途使用的加速器，其能量范围大多为0.5—4MeV。有些加速器用于食物辐照（苏联用于谷物杀菌和以色列用于动物饲料去污）。加速器用于污泥去污的尝试至今尚未十分成功，但还没有得出明确否定的结论。能量范围为600—800kV的加速器，看来在环境保护应用方面，即用于处理烟道气，有很大的潜力。

若干电子直线加速器（LINAC）已商业化地用于医疗用品消毒（例如在联合王国、美国、法国、丹麦和波兰等国）。然而，这类加速器没有象低能直流



加速器那样得到广泛的利用，主要是由于它价格高，功率水平低。电子束应用日益增多的趋势可用日本的情况来清楚地说明。（参看下图）。



## 发展中国家的辐射加工技术

目前, 辐射技术正在向发展中国家转移, 其成功的程度与技术类别、国家、现有基础设施以及其他许多外部因素有关。辐射消毒在商业化程度上已发展到非常先进的水平。现在, 约有 20 个国家在医疗用品消毒方面使用着约 25 台商用钴-60  $\gamma$  装置。

其他领域的工业辐射应用, 总的来说还没有得到很好的发展, 几乎还没有一台商用工业辐照装置。

机构正继续通过各种活动为促进和转移辐射技术给予积极的支助。最有效的方法之一是通过区域性项目。联合国开发计划署 (UNDP) 和原子能机构在区域合作协定 (RCA) 名下在亚洲和太平洋地区设立的一个项目, 就是一个例子。在过去的 5 年间, 大约

140 人在辐射技术的不同课题方面接受了培训。仅 1986 年一年, 有关辐射消毒和辐射固化的国家级行政管理研讨会就召开了 8 次。1987—1991 年期间还要举行更多的研讨会和培训班。其结果, 在该区域已确定并开始实施若干工业项目。

## 示踪剂的工业应用

在解决材料输运问题时, 工程师们常常碰到测量“散料流量 (bulk flow)”的绝对值这样一类问题。由于这种数据通常不能直接得到, 所以要添加一种能被测量且添加量精确已知的物质, 即“示踪剂”, 由这种物质组成辅助物流, 通过测量示踪剂发出的信号求得散料流量。当然, 首先必须建立示踪剂流信息和需求得的散料流量之间的关系。

示踪剂流信息是通过某种信号 (它可能是电信号, 例如某种探测器的输出信号), 或通过如放射自显影法中所用核乳胶黑度的变化表示出来的。(有关示踪剂所提供信息的类型见附图表。)

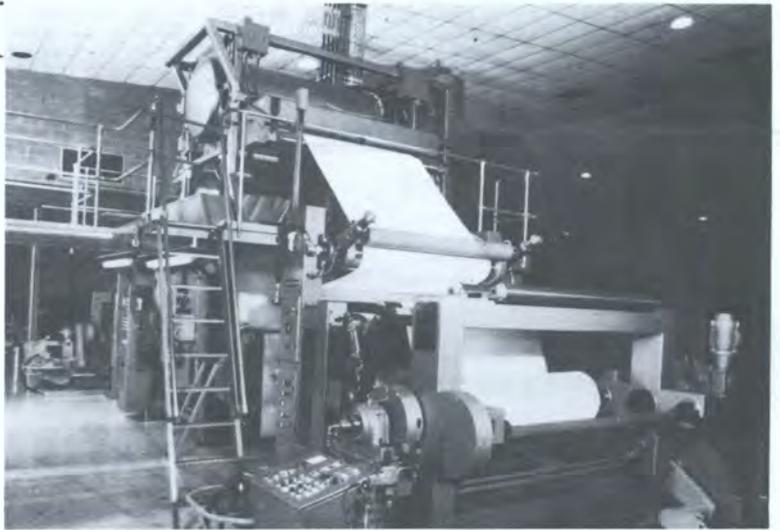
作为一个例子, 我们来考察一下如何查出热交换器泄漏这个问题。人们可能会提出一个简单的问题: “热交换器两个回路中的液流是否存在着关联?” 回答是有或无, 当在第二回路里检测到注入第一回路里的示踪剂时, 则证明有泄漏存在。

比较高级的示踪剂应用要借助于“系统分析”。这种方法的基础是在所研究系统的入口处施加一个“刺激”, 然后观察这个系统的反应。设想化工厂内某个混合器里的水流是固定不变的, 该系统入口处的某种物质的浓度则是变化的。现在在入口处脉动式地注入一些这种物质的示踪剂, 然后在出口处测量其浓度。这个浓度函数就是这种物质的传输时间分布 (TTD), 我们就能得到最好的“质量传递模型”。这样, 如果知道了系统入口处的浓度变化, 就可利用这种模型计算出系统出口处的浓度变化。

利用示踪剂技术可以非常成功地获得系统的 TTD。这种函数的重要性是显而易见的, 它使得人们在分析问题中能综合考虑滞留时间和弥散现象。人们可以作出选择: 或者在工业中 (例如混合器中) 利用这些现象, 或者使它们减至最小 (例如, 在一根管线中一批接一批地输送多种油类时)。

放射性示踪技术有这样一些优点: 第一, 它们的浓度可以用位于管道或容器外的探测器测量。第二, 对取自液流的样品的测量比较简单, 并且与样品的母体无关。第三, 放射性示踪剂是能够标记特定元素或

示踪剂所提供信息的类型			
“是否”型		证明两种物质流之间是否存在关联	
模拟型		确定两种物质流之间的定量关系	
问题	信号	时间相关性	例子
有无关联?		无	• 检查泄漏
有无关联? 哪里?		无	• 放射自显象
有无关联? 哪里? 多大?		无	• 放射自显象 + 密度测量
多大?		无	稀释法 • 称量电解槽中的汞
多大? 何时?		$f(t)$	• 流量测定
多大? 何时?		$f(t)$	系统分析 • 质量通量函数 • 传输时间分布
有无关联? 哪里? 多大? 何时?		$f(x, y)$	• 测绘污染物扩散情况



辐射固化用的电子束处理机。(来源: 能源科学公司)

特定化学物质的唯一的一种物质。例如,用于研究合金钢热腐蚀的硫可以用硫-32来标记,尔后用放射自显影在晶粒边界处显示出来。在费用一定的情况下,从放射性示踪剂获得的信息,通常要比使用非放射性示踪剂获得的信息多得多。

放射性示踪剂的应用一般受相应的国家机构管理。平常所用的示踪剂,浓度极低,半衰期短,这就有可能使动用的放射性水平比法规中规定的最大值低得多。

### 示踪剂工业应用的现状

正如原子能机构目前正在编写的一本参考手册所表明的那样,示踪剂对大多数工业都会带来好处(参见方框)。该书正在由来自11个国家的20名作者编写。这些国家是:捷克斯洛伐克、芬兰、法国、德意志联邦共和国、德意志民主共和国、印度、以色列、荷兰、波兰、联合王国和美利坚合众国。其他一些国家也正在大量应用示踪剂。从参考手册论述的范围可见,实际上所有的工业都能从示踪剂的应用中获益——该手册内容中,有68%涉及到化学工程,其余部分主要涉及冶金学、矿产勘查以及环境与卫生工程。

在实验室里,常常应用示踪剂来研究动态的和化学的反应机制,而在工厂里,常用它来查找故障(泄漏、管道堵塞等),确定回路特性(流量、死容积、分支比、旁路),以及使流程最优化和供过程控制用。示踪剂也用于实验室的研究工作,或被一些国营或私营机构用于提供商业服务。这些商业机构包括联合王国卜内门化学工业有限公司(ICI)的物理学和放射性同位素服务部,法国原子能委员会,印度一家只负责盘存汞量的私营公司,以及芬兰一家专门从事流量测定的私营公司。根据供求法则,这些企业的成

功是示踪剂应用能带来经济利益的明证。

在发展中国家中,示踪剂工业应用的发展是很不平衡的。一些国家在这个领域已名列前茅,例如智利、印度和波兰,而有些国家也象某些工业化国家那样,仍然受一般规律的支配,即一项新技术的应用总是需要有一段15—20年的“时间差”。由于经济的原因或者缺少情报资料,延迟的时间或许还要更长些。尽管如此,示踪剂的应用已取得很大的成绩。(关于亚洲和太平洋地区的示踪剂应用见下页表格)。

### 放射性同位素示踪剂在工业中应用的指南

原子能机构目前正在编写一本关于放射性同位素示踪剂在工业中应用的综合性参考手册,涉及的范围从示踪剂方法学到许多具体工业部门的实例分析。主要章节有:

- 示踪剂的概念
- 一般示踪剂技术
- 示踪剂方法学(示踪剂和系统分析;建立基本物流模型,示踪剂信息用于建立较大系统的模型;示踪剂信息用于解决复杂问题;流量和容积可变的工艺过程)
  - 已推广的应用(物流模型的利用;参数值;流量;质量平衡;固态示踪剂的特性和利用;混合效率;查找故障;扩散;渗透;粒度分布;腐蚀和表面现象;同位素在机械学和动态研究中的应用;二相流;过程控制;动态参数)
  - 实例分析(化学工业;造纸和纤维纸浆工业;石油工业;水泥工业;冶金工业;能源工业;电子工业;机械工业;环境与卫生工程;矿产工业)
  - 发展和应用方面当今的趋势。

有关该参考手册的详细资料可向原子能机构工业应用和化学科索取。

### 亚洲和太平洋地区放射性同位素的若干工业应用

工业	应用	同位素	国家	注解
石油	注水井中吸水剖面	钷-131 (微球)	中国	到1985年年中,已测了3095口井,估计1990年以前,将达到10000口井
石油	140千米长的维兰加姆科亚利原油输送管道检漏	溴-82	印度	5居里/千米;加压24小时后再进行探漏,准确度小于1米
石油	检漏		斯里兰卡	
石油	测量地下井的泄漏	铯-124 (三苯基铯) 碘-131-碘苯	中国	自1968年以来,作过5次现场试验
天然气	腐蚀抑制剂在管道中的分布	氟化水	中国	
石油化学	测定管道堵塞部位	钴-60	印度	用3毫居里源测定特朗贝炼油厂到新孟买NOCIL联合企业的重油管的堵塞部位
机械工程	内燃机磨损测定研究	中子活化 (薄层活化)	印度	涉及活塞环、轴承、燃料注入设备和阀门磨损的一项范围广泛的计划
机械工程	油耗测量		印度	研究了额定负载和速度、制动、马力对油耗的影响
机械工程	运动机件最高工作温度和温度分布	氦-85 (离子注入)	中国	
发电	再注入水(地热)的迁移动力学		菲律宾	
发电	水轮机效率的测定	溴-82 氟化水	印度	在孟买附近的水电站,用示踪剂稀释法及其他方法测定大流量,准确度达到±1%
发电	核电厂蒸汽发生器的夹带试验	钠-24	大韩民国	
钢铁	盛钢桶衬里对钢质的影响	钙-45	中国	研究了钢中夹杂盛钢桶衬里腐蚀产物的情况,估计节省的衬里材料价值130万元人民币
钢铁	在浇铸铝脱氧钢时钙对出钢口堵塞物的影响	钙-45	中国	估计每年节省5.2万元人民币
钢铁	某些合金的热腐蚀特性(镍基铁合金;镍基含钨合金)	硫-35 (硫酸钠)	中国	
钢铁	测定高炉耐熔炉衬的侵蚀情况;调查耐熔夹杂物的来源;测定金属液中炉渣夹带		印度	5家大钢厂应用放射性示踪剂;贾姆谢普尔(TISCO);鲁尔克拉;杜加普尔;比莱;波卡罗(SAIL)
海岸工程	为开发海港和航道研究近海沙(石)和沉积物	铀-192 (玻璃砂)	印度尼西亚	广泛应用
海岸工程	研究底沙运动情况以便拟订疏浚方案和帮助设计航道	钪-46 金-198(沙)	印度	例如,在科钦和莫穆冈港进行的研究
海岸工程	沙移动研究	钴-60 (玻璃砂)	大韩民国	在墨湖港、三千浦港和迎日湾进行过研究
化工	盘存电解槽中的汞量	汞-197	印度	已提供商业服务
化工	盘存电解槽中的汞量	汞-197	中国	
化工	测定各种工艺参数和装置运行特性		印度	例如,在世纪人造丝公司测定滞留时间分布、稀释和流量
化工	尿素反应器的混合特性	二氧化碳-14	大韩民国	忠州化肥厂
水利工程	现场测绘佩杜坝坝基渗漏略图	金-198 氟化水	马来西亚	已找出主要渗漏区和渗漏路线
水利工程	测定基洪水库的主要渗漏点	钠-24	大韩民国	
水利工程	测定下水道流量		菲律宾	
水利工程	测量河流和灌溉渠的排水量	铟-99m	马来西亚	为灌溉和排水部在兰加特河、塞门伊河和卢伊河开展过工作,为吉兰丹州的克穆林农业开发局(KADA)测量过一些灌溉渠
电子学	半导体漏气	氦-85	中国	
电子学	半导体漏气	氦-85	泰国	

此表介绍了放射性同位素在参加亚洲太平洋区域性合作计划的原子能机构发展中成员国中的若干工业应用。本介绍是不完全的,不包括该计划的两个捐助国澳大利亚和日本,不包括“密封源”的应用,(例如射线照相法、核仪表测量以及测井等)。