

放射性同位素在工业领域的应用

高翔

(原子高科股份有限公司, 北京 102413)

摘要: 放射性同位素在工业领域的应用, 主要是利用其产生的射线和物质相互作用原理, 来检测物位、密度、厚度等物料信息, 分析物质成分和辐照加工等。放射性同位素在石油、化工、钢铁、煤炭、造纸、塑料、资源勘探、锂电新能源和航空航天等工业领域应用广泛, 主要应用形式为密封放射源和示踪剂, 其中放射源主要应用于工业过程检测、辐照加工、射线成像检测、放射性测井和仪器仪表校正等, 示踪剂主要应用于油井检测。通过概述放射性同位素工业应用的基本原理和各类型应用技术方法, 分析影响工业应用的因素及优化措施, 对于研究、设计、应用和优化工业应用技术, 具有重要意义。

关键词: 放射性同位素; 工业过程检测; 辐照加工; 放射源

中图分类号: TL99 文献标志码: A 文章编号: 1000-7512(2025)05-0443-11

doi: 10.7538/tws.2025.youxian.056

Industrial Application of Radioisotopes

GAO Xiang

(HTA Co., Ltd., Beijing 102413, China)

Abstract: The application of radioisotopes in the industrial field is mainly to use the rays and material interaction to detect the level, density, thickness and other material information, analyze the material composition and irradiation processing. Radioactive isotopes are widely used in industrial fields such as petroleum, chemical, steel, coal, paper making, plastics, resource exploration, lithium battery new energy and aerospace. The main application forms of radioisotopes in industrial applications are sealed radioactive sources and tracers, among which the radioactive sources are mainly used in industrial process detection, irradiation processing, radiation imaging detection, radioactive logging and instrumentation correction, and the tracers are mainly used in the tracer of oil field. By summarizing the basic principles and technical methods of industrial application of radioactive isotope application, analyzing the factors and optimization measures affecting industrial application, it is of great significance for the research, design, application and optimization of industrial application technology.

Key words: radioisotope; industrial process measurement; irradiation processing; radioactive source

放射性同位素已经广泛应用在工业领域各种场景中, 在料位、密度、厚度、成份等参数和设备内部缺陷的无损检测, 以及辐射加工和工业示踪等方面具有不可替代的重要作用, 并产

生了巨大的经济效益。工业应用种类很多, 其中含放射源的同位素仪器仪表, 因其射线穿透能力强, 能实现非接触测量, 特别适用于工业过程检测。 ^{60}Co 放射源具有辐照产额高、比活度

大、射线能量高、半衰期较长、可以长期连续生产和故障率低的特点,成为 γ 辐照装置辐射源的主要来源,用于辐照加工实现材料改性和消毒灭菌。利用射线成像技术检测物体内部结构、特性和工业过程动态研究,包括 γ 射线探伤、工业CT、中子成像检测、集装箱检测和违禁物品检测等应用类型,越来越成为工业质量和安全检测必不可少的工具。放射性测井,测量地下岩石的地质参数,研究和探测地质资料和矿产资源,在测井业中占有重要地位。放射性同位素示踪剂在油田矿产资源开发、工业过程设备工艺优化研究、故障诊断等方面应用广泛。本文概括性对各种类型的放射性同位素工业应用的技术原理、方法和用途进行简介,并分析主要影响因素和优化措施,对部分应用的前景进行展望,以为放射性同位素、核仪器设备和工业应用技术发展提供参考。

1 原理和方法

放射性同位素工业应用虽然种类很多,但其基本原理都是利用射线与物质的相互作用,采用射线检测方法检测密度、厚度、料位、成分、性状等物料信息,或改变物质的性状等实现辐照加工。放射性同位素衰变产生的射线主要有 α 、 β 、 γ 和中子等类型,不同类型和能量的射线与物质相互作用的机理不同。工业应用常见的 α 射线源有 ^{238}Pu 、 ^{241}Am 、 ^{244}Cm 和 ^{210}Po 等,与物质的相互作用主要是电离和激发^[1-3],用于离子感烟探测、测厚、毒剂检测等;工业应用常见的 β 放射源有 ^3H 、 ^{14}C 、 ^{63}Ni 、 ^{85}Kr 、 ^{90}Sr / ^{90}Y 、 ^{147}Pm 、 ^{204}Tl 等, β 射线与物质的相互作用主要包括电离和激发、散射和吸收、电磁辐射和正负电子湮灭, β 射线在物质中的强度随着厚度增加而指数规律衰减,利用 β 射线透射吸收测量薄膜厚度,利用 β 反散射测量金属薄膜或镀层的厚度,主要用途为电子捕获用电离源、纸张、塑料、薄层金属材料测厚等;工业应用常见的 γ 射线放射源有 ^{60}Co 、 ^{137}Cs 、 ^{192}Ir 和 ^{241}Am 等, γ 射线有很强的穿透性,在工业非接触检测中具有不可替代的能力, γ 射线与物质的相互作用主要体现在光电效应、康普顿散射和电子对效应等方式,强度随穿过物体的厚度呈指数规律衰减,主要用途为工业过程检测、成像检测和辐

照加工等^[4];工业应用常用的中子源有 $^{241}\text{Am-Be}$ 、 ^{252}Cf 、 $^{238}\text{Pu-Be}$ 等中子源等,中子与物质的相互作用方式主要有弹性散射、非弹性散射和中子俘获等,可通过测量非弹散射和中子俘获产生的特征 γ 射线进行元素成分分析,通过测量散射中子测量物质成分,主要用途是中子测井、水分测量和成分分析等。

从放射源或放射性示踪剂的应用类型、探测器与被测对象位置布局分类,放射性测量方式可分为透射法、散射法、激发特征射线检测、示踪剂检测、正电子示踪剂检测和天然放射性测量等^[5]。其中,透射应用有 γ 料位计和 β 厚度计等;散射应用有中子背散射检测、射线涂层测厚等;激发特征射线检测的主要应用有X射线荧光分析、瞬发 γ 中子活化分析等;示踪剂检测应用有油田示踪;正电子示踪剂检测可用于工业PET测量;天然放射性测量的应用有自然 γ 测井和煤灰料位测量等。

工业放射性同位素应用中存在各种因素造成的测量误差,除了仪器故障引起的误差外,必须考虑放射性同位素的衰变校正、死时间校正,经常进行仪器标定。各种射线探测器都有其使用范围和优缺点,在强度类测量仪器中,电离室因其稳定性好和灵敏度高而被广泛使用,电离室的结构、材料、饱和特性、绝缘性能、极间电容以及前放电路等因素影响电离室探测器的灵敏度和稳定性,闪烁探测器的闪烁晶体和光电倍增管的光阴极耦合性能、电子学噪声、能峰漂移和脉冲死时间等因素会影响测量结果,在实际在使用中要注意防潮、防光和避免磕碰。通常可采取的优化措施有:采用稳峰电路,减小能峰漂移的影响;选择合适的阈值,减少噪声信号;保持射线计数率在线性测量范围内;利用透射法测量物料厚度或密度时,设计透射强度比值范围使得测量误差最小^[6];采取准直屏蔽措施,减少环境本底和周围放射源对放射性测量系统的影响;采用保温措施来降低环境温度对测量的影响;在线检测时,可动态调整响应时间,提高系统响应速度和可靠性。

2 工业过程检测

放射源可以实现料位、厚度、密度、物料成份、流量等参数的在线检测和故障诊断,在现

代工业连续生产过程中,对于安全生产和质量控制至关重要。

核子料位计利用射线透射或反射方式,通过测量射线强度变化来检测物料的高度或判断物料有无。料位测量包括料位开关和连续料位测量等方式,一般为 ^{137}Cs 放射源和 ^{60}Co 放射源,放置在射线输出器中,不用时可以关闭射线输出, ^{137}Cs 放射源的半衰期较长,射线能量适中,易于防护和利用,被优先使用, ^{60}Co 放射源的射线穿透能力更强,适合应用厚度大、密度高的场景。核子料位计常用放射源有点源和棒源,探测器也有点状和棒状,根据具体场景情况灵活组合使用。核子料位计属于非接触测量,不受物料温度、压力、腐蚀性、粘性或有毒物料的影响,测量快速、准确和可靠。在石化行业,核子料位计用来对装置中的反应器、排料管、料斗等关键设备的料位进行参数测量及控制;在水泥厂核子料位计用来立窑卸料料位测控、混凝土料仓料位测控和原料、半成品等块状或粉状固体物料的料位测控^[7];在氧化铝生产中, γ 射线料位计适合对矿浆自蒸发器内料位进行检测^[8];在石油行业,中子或 γ 液位计可用来检

测气、油、水三相的界面和乳化带宽度^[9-10];另外,天然放射性核子料位计通过测量物料中的天然放射性来测定料位,但测量时间较长^[11]。

同位素测厚仪适合对板材、管材、纸张、塑料、橡胶、镀层、涂层等金属和非金属材料的厚度在线测量,可分为透射式测厚和反散射式测厚两种模式^[12-14]。根据使用放射源的种类不同,可分为 β 射线测厚和 γ 射线测厚,不同的放射源在透射式测厚中的测量范围列于表1。表1中的测量范围数据因被测物料的原子序数、射线强度和探测器测量条件的变化可能有较大差别。由于材料的密度差异很大,测厚结果通常使用面密度表示。工业常用的 γ 射线厚度测量源为 ^{241}Am 、 ^{137}Cs 和 ^{60}Co γ 源等。在超薄板(薄膜)测厚方面,多采用 β 射线源测厚,如 ^{85}Kr 、 ^{90}Sr 和 ^{147}Pm 测厚源等。 β 射线测厚更适合测量塑料、金属薄膜、纸张、纺织品、无纺布、涂层涂料、橡胶、复合材料、包装材料和电池涂层等,尤其是锂电池极片涂布和造纸行业纸张测厚用的 ^{85}Kr 测厚仪仍处于不可替代的地位^[15]。反散射测厚一般用来测量金属表面涂层(喷漆)或镀层的厚度。

表1 透射式测厚仪中各种放射源的测量范围

Table 1 Measurement ranges of thickness gauge using different radioactive sources

β 放射源	半衰期/a	测量范围/($\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}$)	γ 放射源	半衰期	测量范围/($\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}$)
^{14}C	5730	2~10	^{241}Am	432 a	200~5 000
^{147}Pm	2.62	4~27	^{170}Tm	128 d	500~10 000
^{85}Kr	10.74	10~200	^{133}Ba	10.5 a	6 000~20 000
^{204}Tl	3.78	15~170	^{192}Ir	73.8 d	8 000~30 000
^{90}Sr - ^{90}Y	28.78	30~600	^{137}Cs	30.07 a	10 000~70 000
			^{60}Co	5.27 a	20 000~100 000

同位素密度测量是一种方便可靠的非接触测量方法,该方法适合测量管道中的液体、矿浆、固体、固液混合物、悬浮液等物料的密度。同位素密度计通常安装在垂直管道上,管道中物料流向从下往上保证管道充满^[16]。同位素密度计通常使用 γ 射线源,而且主要使用 ^{137}Cs 放射源,较粗的管道也可以采用 ^{60}Co 放射源,而较细的管道则可以采用 ^{241}Am 放射源。其主要应用于铝业、煤炭、钢铁、石油、化工、金矿和煤化工等行业。另外, ^{14}C 放射源可用于空气质量

监测,通过测量滤膜上吸附的PM10或PM2.5颗粒物的平均面密度来计算环境空气中颗粒物的浓度^[17]。

工业物料的成分或物质的含量可以通过测量射线吸收、散射和激发特征射线等方式来测定。根据测量原理和对象的不同,主要有以下几种:中子水分测量,利用氢元素对快中子的慢化效应来测量物料中的含水量或湿度,适于连续测量水分的动态变化和较大体积物料含水量平均值,主要应用于中子土壤、地基检测、钢

铁、建筑、铸造、焦炭、玻璃、肥料和食品等自动化生产过程中的水分测量^[18-20]；瞬发 γ 中子活化分析(PGNAA)技术,是利用中子与物质中各元素的俘获反应或非弹性散射发射的特征瞬发 γ 射线来确定物质中元素含量的方法^[21],成为水泥、煤炭工业物料成分分析、地质勘探、爆炸物等危险品检测等工业应用的重要技术手段;放射性同位素 X 射线荧光分析技术(RI-XRF)^[22],利用放射性同位素产生的低能 γ 或 X 射线照射样品产生荧光,通过测量荧光能量和强度测定元素含量,在钢铁、地质、黄金、煤炭、水泥、矿石等物料成分分析和物质中微量重金属含量的分析中,表现出优秀的性能;双能量 γ 射线分析煤炭灰分,采用²⁴¹Am 和¹³⁷Cs 放射源的高低两种能量 γ 射线透射煤层,测量其强度衰减来计算出灰分,直接对输煤皮带上散煤实现在线测量,对被测煤的最大粒度要求较宽,目前被广泛应用^[23-24],由于不同产地煤炭的 Ca、Fe 含量差异对测量结果的影响,使其在火电厂的应用受到一定限制。

放射源可以用于在线流量测量,这些技术包括流量测量、核子秤、多相流测量、示踪法测量、密度互相关法测量多相流等。其中,管道中输送物质的输送量可以使用同位素密度计和物料速度传感器相结合测量,例如管道中的石油天然气两相流测量^[25];核子秤是一种非接触式的动态连续计量设备^[26],除了用于皮带输送机外,还可以用于传统电子皮带秤所无法应用的地方,如链斗式、履带式、刮板式和螺旋式等输送机,以及斗式提升机等多种物料运输机械,在工业生产计量自动化过程中起到重要作用;双能量 γ 射线测量三相流的原理是利用两种不同能量的 γ 射线,利用¹³⁷Cs 射出的 662 keV γ 射线和²⁴¹Am 发出的 59.5keV 低能量 γ 射线穿过油、气和水三相物料,通过测量这两种射线透射后的衰减可以计算得到三相物质的流量信息^[27-28],应用中应注意水相中的含盐量对测量的影响,为了避免影响,可采用三能量射线法测量多相流。

γ 射线扫描检测可以解决工业在线检测和故障诊断难题^[29]。 γ 射线塔扫描的基本原理是基于射线透射吸收效应,通常使用¹³⁷Cs 或⁶⁰Co γ 射线输出器和探测器移动扫描得到塔内介质

密度分布曲线图,从而诊断生产运行状况,优化生产工艺,保障安全高效运行,验证塔器设备设计改造效果,降本增效。其主要用途有:用于检测气、液、固分离罐的分离效果和各相分布状况;用于检测填料和板式蒸馏塔内构件的损坏、气液分布状况、液泛、漏液、结焦、雾沫夹带以及堵塞部位及严重程度等;用于检测管道内物料传输过程的异常现象,如管壁结垢、充气、堵塞状况等。

3 辐照加工

辐照加工主要包括消毒灭菌和材料改性,辐照源包括放射性同位素密封源(一般为⁶⁰Co)和电子加速器^[30-31]。其中⁶⁰Co 源具有辐照产额高、比活度大、射线能量高、半衰期较长、可以长期连续生产和故障率低的特点,成为 γ 辐照装置辐射源的主要来源。用于商业化生产的⁶⁰Co 辐照装置设计装源能力一般在 10^{16} Bq 以上,目前全球约有 300 座商业辐照装置。

同位素辐照消毒灭菌利用放射性同位素产生的 γ 射线辐照在物体上,当射线剂量足够高时,被照物品上的有害病菌、病毒和微生物等有害物体便可被全部杀死。辐照灭菌不需要加入添加物,是一种物理灭菌方法,属于冷处理技术。辐照消毒具有消毒成本低、灭菌彻底、无污染的特点,特别适合于热敏材料,如塑料制品、尼龙、化纤制品、生物制品等,能够适应现代生产提出的封装消毒、连续操作等要求。辐照消毒的应用范围和场景越来越多,例如,食品、医疗用品、中药材、无菌食品辐照加工等。

辐照材料改性使用射线照射材料,引发物理化学反应以改善材料的性能或生成新材料。在工业应用中,适当的电离辐照不仅能改进电线电缆与输油管道等高分子材料的性能,而且能改善半导体材料、功能陶瓷等无机材料和金属材料的性能。例如辐照交联可使低密度聚乙烯变得柔顺且富有弹性,其耐热性能、电性能、耐腐蚀性能、耐冲击性能等都有较大幅度提高。辐射交联的产品有聚乙烯电线电缆、聚乙烯热收缩管膜、聚乙烯泡沫塑料、木塑复合材料、水凝胶、橡胶辐射硫化、图层固化等。高聚物材料辐照裂解,其分子量下降,熔融温度也会下降,在溶剂中的溶解度会增加,例如聚四

氟乙烯经过辐照后,可裂解成为几微米的超细粉末,成为摩擦系数仅有 0.03~0.07 的性能优良的固体润滑剂。

辐照加工的应用还有很多,例如,皮革制品辐照防霉和改性,香烟原料和成品的辐射防霉处理,竹制品、草编织品、木雕品等工艺品的辐照杀虫防霉,对文物进行辐照杀虫灭菌防霉,图书档案的辐射杀虫防霉,化妆品的辐射灭菌,辐照降解处理有害有机物等,并随着技术发展应用会更多。

4 射线成像检测

射线成像检测是利用射线对不同成分、密度、厚度的物质透射吸收或散射,通过成像技术检测物体内部结构、尺寸、质量、特性等信息和工业过程动态研究。包括 γ 射线探伤、工业 CT、中子成像检测、集装箱检测和违禁物品检测等应用类型。

射线探伤在工业上用于检查金属材料或工件内部的缺陷,为无损检测方法之一。射线探伤一般采用 X 射线或 γ 射线探伤。 γ 射线探伤可用于检测较厚的物体,对气孔、夹渣、未焊透等体积型缺陷最敏感,适宜用于体积型缺陷探伤,不易发现细小裂纹。 γ 射线探伤的照相设备简单轻便,可在无电源和不能使用 X 射线机的条件下应用。常用的 γ 探伤源为 ^{192}Ir 、 ^{60}Co 、 ^{75}Se 和 ^{170}Tm 等。广泛应用于电力、化工、石油、机械、航天、核工业等行业的管道、容器、特种设备等的焊缝和内部各种缺陷探伤。目前射线探伤成像检测主要利用工业射线胶片,随着核探测器技术和计算机技术的发展,数字化成像技术和设备逐渐发展和应用,主要是低能量射线数字化成像设备,而适合中高能量 γ 射线照相的数字成像设备仍存在很多局限和问题^[32-33]。

工业 CT 的全称是工业计算机断层成像,利用射线扫描被检物体,通过图像重建得到物体二维断层图像和三维立体图像,直观、清晰、准确地显示物体内部结构、成分、密度信息^[34]。如同医学 CT 在医学领域的重要性,工业 CT 是工业领域最有潜力和前景的无损检测技术之一。目前,工业 CT 作为一种实用化的无损检测手段,已广泛应用于航天、航空、军事、核能、石油、电子、机械、新材料研究、海关等领域。

由于工业现场设备复杂、形状各异、直径大小不一,而通用型的工业 CT 设备价格高,体积重量大,很难在工业现场安装检测,影响了工业 CT 技术的应用推广。总体而言,工业 CT 相比医用 CT 更加复杂,检测技术和设备仍需要继续研究开发。

工业 ECT 成像是先将放射性示踪剂注入系统内,这些示踪剂混合均匀后参与系统内流体的运动,再对系统内放射性核素的浓度分布和运动过程进行 CT 成像。因此,利用工业 ECT 不仅可得到物体的结构图像,还可得到内部物料分布、运动情况,用来研究设备工艺优化和诊断工业故障。工业 ECT 成像技术包括单光子计算机断层成像(工业 SPECT)与正电子发射计算机断层扫描(工业 PET)。

中子照像检测^[35-36],对含氢类物质、轻元素和几种中子吸收截面高的特定元素敏感,可以检测重金属内部轻质材料的分布状态,弥补 γ 射线成像检测技术的不足。例如中子照相检测可以更清晰看到航空发动机涡轮叶片缺陷、炮弹内部结构和填充情况、发动机燃料填充、反应堆元件和其他物体内部不同物质成分的图像信息,美国已将中子照相作为航空发动机生产的必需检测流程之一。中子照相所用中子源一般为 ^{252}Cf 放射源和中子发生器。高质量的中子射线照片需要高活度的中子源,但是高活度紧凑中子源都非常昂贵,限制了中子照相的应用。

γ 射线数字成像检测技术是一种实时 γ 射线成像技术。该技术利用 γ 射线对被检物进行照射, γ 射线穿透物体后被探测器阵列接收,并以数字化数据形式存储。通过将这些数据处理,就可以生成图像,显示出物体内部的组织结构和密度分布。这种技术可用于工业检测和集装箱检查等领域,具有高分辨率和非接触快速成像的优点。 γ 射线数字成像检测可对能源、汽车、电子、石油、石化等行业的在运行设备进行在线检测,实时观测到产品的结构完整性和运行状态,也可以对金属和非金属型材、元器件、零件等物体进行离线检测。因检测对象不同, γ 射线数字成像检测设备的类型非常多。其中, ^{60}Co γ 射线成像系统用于集装箱、车辆等交通工具的快速成像检查,具有可移动、稳定可靠、图像质量好的特点,在绿通检测、集装箱

内部物品识别、打击走私和安全检查方面发挥越来越重要的作用^[37]。为了更清晰地显示出不同物体的图像,双能量 γ 射线数字成像检测技术被用于物体成像识别检查。如放射源采用 ^{60}Co 和 ^{137}Cs 两种不同能量的 γ 放射源,探测器分别检测两种能量的透射射线信号,并据此计算出不同位置物体的密度,利用密度信息结合图像来识别物体种类。

物流中需要对违禁物品快速检测,可利用瞬发 γ 中子活化分析炸药、毒品和常用日用品中C、N、O、H四种核素的比值不同,对被检查物质是炸药、毒品或是日用品的进行判断。但这种方法有时会受到货包内其他物品的影响,为弥补单一检测技术的不足,可采用 γ 成像联合检测,如利用 ^{60}Co γ 射线与氙-氟中子管的14 MeV中子同时照像,可以得到信息丰富的图像,更容易识别违禁物品。

5 放射性测井

放射性测井是通过测量地下岩石的地质参数,用来研究和探测地质资料、油气藏等矿产资源、矿井等工程的地球物理方法,在测井业中占有重要地位,是地质、石油、煤矿、铜矿、钾矿、稀土矿和铀矿勘探开发的有利工具。放射性测井可分为 γ 测井、中子测井和放射性示踪测井三大类^[38-42]。

γ 测井包括自然 γ 测井和散射 γ 能谱测井。自然 γ 测井可以测量 γ 射线的强度,也可以分析 γ 射线的能谱,通过测量 γ 射线强度和能谱分析,得到井眼周围地层中放射性元素的含量及其分布规律,然后根据已经建立的地层岩石特性和 γ 射线的对应关系,研究识别地层岩性、粘土矿物含量、水淹层和生油层,寻找铀、钍、钾等放射性矿物,监测环境污染;散射 γ 能谱测井利用 γ 射线探测器测量井眼周围散射 γ 射线的强度和能谱,早期的测井仪器只利用康普顿散射测定地层的密度,称为补偿密度测井,改进后的仪器同时利用光电效应和康普顿效应,测定地层的岩性和密度,称为岩性密度测井,然后又进一步发展到 γ 能谱岩性密度测井。

中子测井主要包括使用同位素中子源的中子测井和使用中子发生器的中子测井两大类。前一类中包括超热中子孔隙度测井、热中子孔

隙度测井和热中子活化测井;后一类中包括快中子非弹散射 γ 能谱测井、热中子寿命测井、脉冲中子孔隙度测井和脉冲中子活化测井。同位素中子源常用的有 $^{241}\text{Am-Be}$ 中子源、 $^{238}\text{Pu-Be}$ 中子源、 $^{210}\text{Po-Be}$ 中子源和 ^{252}Cf 自发裂变中子源。同位素中子源体积小,中子发射率稳定可靠,使用寿命长。中子发生器主要利用氘-氘中子管,发射的中子能量为14 MeV,中子管寿命一般为几百小时^[43]。热中子测井在井中测量热中子通量随深度的变化,其中补偿中子测井是一种成熟的常规测井方法,它是用同位素中子源在井眼中向地层发射快中子,在离源距离不同的两个热中子探测器测量经地层慢化并散射回井眼的热中子。阵列中子测井采用14 MeV脉冲中子源,有三组超热中子探测器,一组热中子探测器,可以同时测量得到热中子俘获截面、中子寿命和两种不同响应特性的超热中子比值孔隙度等参数,它可以对各种环境参数进行实时校正处理。热中子寿命测井也称热中子衰减时间测井,是最早投入市场的一种脉冲中子测井方法,主要由两个 γ 射线探测器、脉冲中子源、数据采集和控制系统组成,通过测量经地层慢化的热中子或俘获 γ 射线,根据计数率随时间的衰减规律,计算出地层热中子宏观俘获截面或寿命,进而计算出地层含水饱和度和含油饱和度的变化。碳氧比能谱测井利用脉冲中子源,通过时间门测量方法,测量非弹散射 γ 射线和俘获辐射 γ 射线,经过能谱分析求出碳氧比值,进而确定含油饱和度。瞬发 γ 中子活化分析(PGNAA)测井,利用同位素中子源或中子发生器发射的快中子,在地层中产生的俘获 γ 射线、非弹散射 γ 射线,通过能谱测量和数据处理,获取特征元素含量,可用于煤矿、铜矿、铁矿等金属矿产资源勘探和矿区品位测井,了解矿产资源的品位分布状况,提高资源利用率。

示踪测井是利用放射性示踪剂和测井技术的结合,用来测量油井吸水剖面、井筒内流体流速(层间流速)、压裂裂缝近井筒分布形态。其中,同位素吸水剖面测井^[44]的示踪剂采用 ^{131}Ba 微球或 $^{113}\text{Sn-}^{113\text{m}}\text{In}$ 发生器的子体 $^{113\text{m}}\text{InCl}$ 溶液吸附在活性炭颗粒上,形成放射性微球,在注水条件下将同位素微球注入井内,同位素滤积在注水层表面,用 γ 测井仪测取示踪曲线,曲线

上显示的放射性强度的差异代表注入量的大小,即反映该地层的吸水状况;利用放射性示踪剂测量井下井筒内的流体流速,通过测量井下示踪剂的通过时间测得流量;氧活化测井,用脉冲中子活化 ^{16}O 转变成 ^{16}N 放射性示踪剂,用来测量井筒内流体流量,确定层间流速、串槽和套管/分离器渗漏;水力压裂示踪测井^[45],采用 ^{46}Sc 、 ^{124}Sb 和 ^{192}Ir 等放射性示踪剂,在水力压裂过程中,将之随支撑剂一起泵入地层,然后通过自然 γ 能谱测井仪测量井眼周围的示踪剂强度,从而得到支撑剂的分布和裂缝形态情况,最终评价水力压裂效果。

6 仪器仪表校正

在工业过程检测、射线成像检测、放射性测井等工业应用中,所使用的核仪器仪表本身需要使用专用的放射性同位素进行校正、刻度,用来检查仪器的工作状态,以及保持仪器仪表的精度和可靠性。这些专用放射源被称为标准源或仪表刻度源,通常所用活度较低,多为豁免源。常用的 α 标准源有 ^{241}Am 、 ^{244}Cm 、 ^{238}Pu 等,用于 α 谱仪能量和射线强度校正测量;常用的 β 标准源有 ^3H 、 ^{14}C 、 ^{147}Pm 、 $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ 、 ^{204}Tl 、 ^{137}Cs 、 ^{60}Co 等,用于刻度 β 射线测量仪;常用的 γ 标准源有 ^{241}Am 、 ^{109}Cd 、 ^{57}Co 、 ^{133}Ba 、 ^{137}Cs 、 ^{134}Cs 、 ^{54}Mn 、 ^{152}Eu 、 ^{60}Co 、 ^{22}Na 、 ^{238}Pu 等,用于 γ 仪器仪表的能量和效率刻度。仪器仪表校正,通常采用半衰期较长的标准源,通过本底测量、标准源测量等步骤,记录读数,并与标准源的预期结果进行比较,如差异显著,则需要对仪器进行调整。

另外,非密封放射性标准物质也经常用于放射性检测仪器的刻度,通常是将一种或多种放射性核素混合在液体或固体中,封装在玻璃瓶、碘盒或测量盒中,模拟土壤、植物灰、水溶液等样品校正测量。如在液闪测量中,常使用 ^3H 、 ^{14}C 和本底标准溶液对液闪计数器进行校准刻度,进行活度测量之前,通常制作一系列不同探测效率、相同活度的标准样品对仪器进行效率刻度。在放射性测井中,要取得合格的放射性测井资料,井下仪器正确刻度至关重要。通过刻度,可以建立仪器读数和地层参数之间的响应关系,检查仪器的工作状态和测量精度。

7 工业示踪

放射性同位素示踪技术是利用放射性同位素示踪剂标记或跟踪被研究的对象,获得主体体的运动行为特征信息的一种信息获取技术,在工业领域应用广泛。放射性同位素示踪剂具有和被跟踪物质相同的物理化学性质,检测方便、灵敏度高。放射性工业示踪过程一般包括示踪设计、实施阶段和解释评价三个阶段。在设计过程中,放射性同位素示踪剂的选择既要确保可行性,又要满足安全环保要求,可选用的放射性同位素示踪剂列于表2。放射性示踪剂的选择通常需要考虑半衰期、辐射种类和能量、放射性活度、比活度和配伍性等因素。在实际的示踪实验中,找不到能同时满足所有要求的理想放射性示踪剂,需要平衡利弊,优化选择示踪剂和监测方案。核素发生器是一种比较方便的放射性同位素示踪剂来源,适合工业现场使用。可活化示踪剂如元素Eu、Dy等高活化截面的同位素示踪剂也偶有应用。

放射性示踪在石油、化工、冶金、能源、汽车、水泥、矿产、电子、水力水文和市政环保工程等工业领域应用广泛。油田井间示踪已经在油田实现常规化应用,通过由注入井向注入流体加入示踪剂,在周围采油井采样分析示踪剂的浓度,得到采出示踪剂浓度随时间的变化曲线,分析获得油藏地质状况和地下流体运动规律的信息。其中, ^3H 标记的示踪剂是一种比较理想的油田水驱示踪剂。部分醇类放射性示踪剂在水相和油相中都能溶解,可用作分配型示踪剂,检测井间剩余油饱和度^[46]。井间示踪测试用来评价注水效果和注采对应关系,优化油藏开发方案和提高最终采收率,已成为油藏评价工作中公认的最直接有效的手段之一。

在化工、冶金和选矿等工业过程中,可利用放射性同位素示踪剂进行过程示踪,研究多相物料流在设备中的混合、滞留和反应时间等工艺参数,了解物料流运行情况,优化工艺和设计,提升生产效率和产品质量。其中停留时间分布(RTD)示踪研究是一项重要内容,利用示踪剂可以方便地检测物料流中某一种物料的运动和分布状态。利用微颗粒放射性示踪剂可视化检测技术(RPT、工业PET、工业SPET),可以监测物料流运动轨迹、空间分布和停留时间,

表 2 工业示踪常用的放射性同位素
Table 2 Radioisotopes for industrial tracer

同位素	半衰期	辐射类型	主要能量/keV	物理化学形态	示踪对象状态
³ H	12.3 a	β	18.6	气态或氘水	水、气体、有机物
¹⁴ C	5 730 a	β	156	有机化合物	气体或有机物
²⁴ Na	15.0 h	γ	1 369 2 754	Na ₂ CO ₃	固体或液体
³⁵ S	87.4 d	β	166.8	H ₂ S或SO ₄ ²⁻	固体或液体
⁴¹ Ar	109 m	γ	1 294	气体	气体
⁴⁶ Sc	83.8 d	γ	889.3 1 121	Sc ₂ O ₃ 或Sc ²⁺	固体或液体
⁶⁸ Ga	67.6 m	γ	511	⁶⁸ Ge发生器洗脱液	液体
⁷⁶ As	1.08 d	γ	559.1	As ₂ O ₃ 或AsH ₃	液体或气体
⁸² Br	35.3 h	γ	554.3~ 1 475	NH ₄ Br	液体
⁸⁵ Kr	10.7 a	β	687.4	气体	气体
		γ	514		
^{99m} Tc	6.01 h	γ	140.5	⁹⁹ Mo发生器洗脱液 ^{99m} TcO ₄ ⁻	液体或固体
^{113m} In	99.5 m	γ	391.7	¹¹³ Sn发生器洗脱液	液体或固体
¹²⁴ Sb	60.2 d	γ	602.7 1 691	氧化锑	固体
¹³¹ I	8.02 d	γ	364.5	NaI溶液	液体或固体
¹³³ Xe	5.24 d	γ	81.0	气体	气体
¹³¹ Ba	11.5 d	γ	123~496	Ba盐	固体或液体
¹³⁷ Ba	2.55 m	γ	661.7	¹³⁷ Cs发生器洗脱液	液体
¹⁴⁰ La	1.68 d	γ	328.7 487 815.8 1 596	La ₂ O ₃	液体或固体
¹⁹² Ir	73.8 d	γ	296~468	氧化物	固体
¹⁹⁸ Au	2.70 d	γ	411.8	金属	固体
²⁰³ Hg	56.6 d	γ	279.2	Hg	Hg

结合 CFD 等数字模拟,能给出物料流在设备内部动态运动图像,得到包括空间密度分布、矢量速度等更加丰富的过程可视化检测结果。在机械工业中,运动部件可采用放射性同位素标记测量的方法监测机械磨损和腐蚀情况,用来研究提升机械使用寿命。在地下储气库监测中,利用气体放射性示踪剂监测库存量,利用⁸⁵Kr 预检地下储气库的完整性和泄漏情况。在水力输运管道中,利用放射性示踪剂可以测量管道内固液多相流的流速和流量^[47]。在石油化工厂,利用放射性示踪可发现管壳式换热器的管程和壳程之间的内部泄漏。利用示踪法检测地下管道的泄漏位置,在埋地管道较浅的情况下,地面检测可以发现泄漏,但在埋地深度 1 m 或以上的管道通常需要借助管道内部射线探测器来定位泄漏点位置^[48]。

8 其他工业应用

放射性同位素工业应用种类、范围和内容很多,除了上述之外,在火灾探测、中子发生器、微量电负性有机物检测、静电消除、核反应堆、同位素发光源、核仪器刻度、航天等领域也有应用。例如,²⁴¹Am 离子感烟型火灾报警器可以感知到很小的烟雾颗粒,用来探测早期火灾效果很好,曾经市场占有率很大,因电子感烟报警器的竞争,需求逐渐减少;⁶³Ni β 放射源可以用来检测微量电负性有机物,被用于气相色谱仪中的电子捕获检测器(ECD),对具有电负性物质(如含卤素、硫、磷、氟等的物质)的检测灵敏度最小检出限可达 10⁻¹⁴ g/mL,是目前分析痕量电负性有机物有效手段;放射性同位素发射的电离辐射能使空气电离,进而中和并消除气溶胶颗粒和其他物品表面的静电荷,常

用的静电消除源有 ^{85}Kr , ^{90}Sr - ^{90}Y , ^{147}Pm , ^{210}Po , ^{238}Pu 和 ^{241}Am 等,在纺织、印刷、造纸、胶片、塑料等行业中广泛应用;氦氟中子发生器核心器件多采用氟钛靶,普通的小型中子发生器的中子产额为 10^8 n/s量级,使用寿命1000 h不等,目前市场对紧凑型高产额中子源需求很大; ^{252}Cf 中子源可用于核反应堆启动, ^{123}Sb - Be 密封源可用于停堆后再启动;核反应堆运行中为了确保反应堆压力容器运行安全,需要利用内置 ^{237}Np 的辐照监督管对其辐照损伤注量进行监测与评价; ^3H 和 ^{85}Kr 可用来制备自发光光源,特别适合在矿井、隧道、机场、地下铁道、海洋和军事上的应用; ^{85}Kr 可用于改善金卤灯启动,投影仪用UHP灯使用 ^{85}Kr 启动剂后,灯的寿命也相应延长;在航天领域,可采用 γ 射线背散射技术来测定航天器距星表高度(伽马高度计),利用 γ 反散射来测量高度并及时发出指令打开反推发动机,保障返回舱软着陆,确保航天员的安全^[49-50]。

9 展望

放射性同位素在工业领域的应用广泛,并随着工业行业的需求变化和科技发展而不断发展。近年来,放射性同位素工业应用的技术创新和市场应用发展缓慢,但在许多传统工业应用领域,放射性同位素仍具有不可替代的作用。在工业过程检测方面,利用放射性同位素的厚度、料位和密度测量仪器工作稳定可靠,不受内外部环境的影响,一直是非核技术难于替代的,预计将来需求稳定,其中,石油、化工、钢铁、冶金、煤炭和锂电池等行业中放射源的应用占比较大,并在提高仪器设备的辐射安全、可靠性、测量准确度和可视化、智能化方面不断发展。在一些新型产业中,新的应用不断出现,也有一些因非核技术竞争而在萎缩。近几年来,随着新能源汽车和锂电储能行业的快速发展,利用 ^{85}Kr 测厚源在线测量锂电池极片涂布厚度市场需求增长较大,对 β 测厚源和仪器设备提出更高要求,未来需要在高比活度测厚源和提高射线输出利用率方面开展进一步研究开发。在放射性测井方面,核测井仪器设备向成像、小直径、高集成度、多参数、高探测效率和高能量分辨率方面发展。辐照加工市场规模

和需求将持续增长,所用放射源的总活度占比最大,辐照工艺和技术在不断研究改善,确保加工效果的一致性和稳定性。在射线成像检测方面,不断向自动化、数字化、可移动等方向发展, γ 射线探伤在无损伤领域应用广泛,其发展趋势是通过提高探伤源的比活度来提升成像效果;中子照相检测技术亟待发展,关键问题是高活度紧凑中子源,未来需求有望增长。

参考文献:

- [1] 吴治华. 原子核物理实验方法[M]. 3版(修订本). 北京:原子能出版社,1997.
- [2] 蒙大桥. 放射性测量及其应用[M]. 北京:国防工业出版社,2018.
- [3] 王建龙,何仕均. 辐射防护基础教程[M]. 北京:清华大学出版社,2012.
- [4] 罗志福,孙玉华,唐显,等. 放射源制备及应用技术[M]. 北京:北京理工大学出版社,2022.
- [5] International Atomic Energy Agency. Nuclear Data Services, Live Chart of Nuclides[EB/OL]. (2023-12) [2025-07-28].
- [6] 朱珠,孙卫星,华联成. 水泥厂常用料位计的原理和应用[J]. 水泥,2003(4):57-59.
Zhu Zhu, Sun Weixing, Hua Liancheng. Principle and application of conventional level meter in cement plant[J]. Cement, 2003(4): 57-59(in Chinese).
- [7] 常富明. 在线分析仪表在氧化铝生产中的应用[J]. 分析仪器,2002(3):24-25.
Chang Fuming. Applications of on-line analytical instruments in production of aluminium oxide[J]. Analytical Instrumentation, 2002(3): 24-25(in Chinese).
- [8] 高翔,张培信,郭宏利,等. 立罐油水界面中子测量仪的研制[J]. 同位素,2005,18(S1):26-28.
Gao Xiang, Zhang Peixin, Guo Hongli, et al. Development of neutron measuring instrument for oil-water interface of vertical tank[J]. Journal of Isotopes, 2005, 18(S1): 26-28(in Chinese).
- [9] 高翔,郭宏利,杨琪,等. 卧罐油水界面 γ 仪的研制[J]. 同位素,2005,18(S1):5-8.
Gao Xiang, Guo Hongli, Yang Qi, et al. Development of oil-water interface gamma gauge on vessel[J]. Journal of Isotopes, 2005, 18(S1): 5-8(in Chinese).
- [10] 高翔,郭宏利,杨琪,等. 卧罐油水界面 γ 仪的研制[J]. 同位素,2005,18(1):5-8.
Gao Xiang, Guo Hongli, Yang Qi, et al. Development of oil-water interface gamma gauge on vessel[J]. Journal of Isotopes, 2005, 18(1): 5-8(in Chinese).

- [11] 吴连军. 无源核子料位计在火电厂灰斗及仓泵上的应用[J]. 华东电力, 2012, 40(5): 908-910.
Wu Lianjun. Application of passive nuclear material level meter to ash hopper and silo-pump in thermal power plant[J]. East China Electric Power, 2012, 40(5): 908-910(in Chinese).
- [12] 杨陶利. γ 射线测厚仪的原理及在中厚板生产线中的应用[J]. 钢铁研究, 2010, 38(3): 33-35.
Yang Taoli. Theory and application of γ -ray measuring gauge in heavy plate plant[J]. Research on Iron and Steel, 2010, 38(3): 33-35(in Chinese).
- [13] 刘以思. β 测厚仪[J]. 核电子学与探测技术, 1995, 15(3): 161-166.
- [14] 辛登科, 张玉杰. 冷轧带钢生产用的 γ 射线在线测厚仪[J]. 仪表技术与传感器, 2004(6): 6-7.
Xin Dengke, Zhang Yujie. Online γ -ray gagemeter for cold roll band steel[J]. Instrument Technique and Sensor, 2004(6): 6-7(in Chinese).
- [15] 郑少荣. 放射性同位素 ^{85}Kr 在造纸中的运用[J]. 福建造纸, 2002(4): 12-15.
- [16] 邓忠祥. 同位素密度计在测量中的误差分析[J]. 化工自动化及仪表, 1994, 21(6): 43-45.
Deng Zhongxiang. Error analysis of isotope densitometer in measurement[J]. Control and Instruments in Chemical Industry, 1994, 21(6): 43-45 (in Chinese).
- [17] 生态环境部. 环境空气中颗粒物(PM₁₀和PM_{2.5}) β 射线法自动监测技术指南 HJ 1100-2020[S]. 北京: 中国环境出版集团, 2020.
- [18] 刘圣康. 我国中子计的进展[J]. 核技术, 1989, 12(S1): 546-548.
Liu Shengkang. Development of neutron gauges in China[J]. Nuclear Techniques, 1989, 12(S1): 546-548 (in Chinese).
- [19] 刘圣康, 周国清. 中子计测焦炭水分的可行性研究[J]. 江苏冶金, 2003(3): 1-2.
Liu Shengkang, Zhou Guoqing. Feasibility study on neutron measurement of coke moisture[J]. Jiangsu Metallurgy, 2003(3): 1-2 (in Chinese).
- [20] 郑浩东, 秦文元, 曹华. 玻璃原料在线测水仪的应用及安全防护[J]. 玻璃, 1997, 24(1): 26-28.
Zheng Haodong, Qin Wenyuan, Cao Hua. Application and safety protection of on-line water meter for glass raw materials[J]. Glass, 1997, 24(1): 26-28 (in Chinese).
- [21] 刘雨人, 景士伟. 中子感生瞬发 γ 射线在线分析技术的进展(1988—2002)[J]. 同位素, 2003, 16(2): 106-110.
Liu Yuren, Jing Shiwei. The progress of neutron induced prompt gamma analysis technique in 1988-2002[J]. Journal of Isotopes, 2003, 16(2): 106-110 (in Chinese).
- [22] 吉昂. X射线荧光光谱分析[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [23] 张志康. γ 辐射煤灰分仪[M]. 北京: 原子能出版社, 1999.
- [24] 衣宏昌, 梁漫春, 林谦. 基于辐射测量技术的几种煤灰分检测方法的比较[J]. 选煤技术, 2004, 32(2): 54-56.
Yi Hongchang, Liang Manchun, Lin Qian. Comparison of several ash monitoring methods relying on radiation measuring technology[J]. Coal Preparation Technology, 2004, 32(2): 54-56(in Chinese).
- [25] 魏伟胜, 赵志学, 鲍晓军. γ 射线衰减法测量混相密度[J]. 过程工程学报, 2003, 3(6): 512-517.
Wei Weisheng, Zhao Zhixue, Bao Xiaojun. Improvement of γ -ray attenuation technology in measuring density of multiphase flow[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2003, 3(6): 512-517 (in Chinese).
- [26] 周立业苗齐田. 核子秤[M]. 北京: 原子能出版社, 1994.
- [27] Ian Atkinson Bertrand Theuveny, 等. 多相流测量新技术[J]. 国外测井技术, 2005, 20(6): 12.
- [28] 景春国. 低能射线法油水气相含率测量研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2008.
- [29] 陈宝流, 张培信, 高翔, 等. γ 射线扫描技术在石油化工生产中的应用[J]. 同位素, 2005, 18(S1): 98-101.
Chen Baoliu, Zhang Peixin, Gao Xiang, et al. Application of γ -ray scanning technology in petrochemical production[J]. Journal of Isotopes, 2005, 18(S1): 98-101 (in Chinese).
- [30] 王传祯. γ 辐照装置及其应用[M]. 北京: 中国原子能出版社, 2013.
- [31] 赵文彦, 潘秀苗. 辐射加工技术及其应用: 高技术绿色加工产业[M]. 北京: 兵器工业出版社, 2003.
- [32] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. γ 射线探伤机: GB/T 14058—2023[S]. 北京: 中国标准出版社, 2023.
- [33] 戴勇. 射线探伤的应用与效果[J]. 中国新技术新产品, 2011(16): 11.
Dai Yong. Application and effect of radiographic inspection[J]. China new technologies and products, 2011(16): 11 (in Chinese).
- [34] 先武, 李时光, 王珏. 最佳无损检测手段——工业CT技术的发展[J]. 光电工程, 1995, 22(4): 51-58.
Xian Wu, Li Shiguang, Wang Jue. Development of the optimal nondestructive testing Approach—Industrial CT[J]. Opto-Electronic Engineering, 1995, 22(4): 51-58 (in Chinese).
- [35] Dangendorf V, Bar D, Bromberger B, et al. Multi-frame

- energy-selective imaging system for fast-neutron radiography[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1990, 56: 1135-1140.
- [36] Buffler A, Tickner J. Detecting contraband using neutrons: challenges and future directions[J]. *Radiation Measurements*, 2010, 45(10): 1186-1192.
- [37] 安继刚. 钴-60 数字辐射成像检测技术回顾与展望[J]. 同位素, 2015, 28(4): 193-200.
An Jigang. Review and prospect of cobalt-60 digital radiography inspection technology[J]. *Journal of Isotopes*, 2015, 28(4): 193-200 (in Chinese).
- [38] 黄隆基. 核测井原理: 光子——中子——核磁[M]. 东营: 石油大学出版社, 2000.
- [39] 中国石油天然气集团公司测井重点实验室. 测井新技术培训教材[M]. 北京: 石油工业出版社, 2004.
- [40] 宋延杰, 陈科贵, 王向公. 地球物理测井[M]. 北京: 石油工业出版社, 2011.
- [41] 冯启宁, 鞠晓东, 柯式镇, 等. 测井仪器原理[M]. 北京: 石油工业出版社, 2010.
- [42] 王敬农. 石油地球物理测井技术进展[M]. 北京: 石油工业出版社, 2006.
- [43] 郑世平, 秦爱玲, 赵舒平. 测井中子发生器[J]. 地球物理学进展, 2009, 24(4): 1521-1526.
Zheng Shiping, Qin Ailing, Zhao Shuping. Well logging neutron generator[J]. *Progress in Geophysics*, 2009, 24(4): 1521-1526(in Chinese).
- [44] 王中涛, 秦民君, 李文忠, 等. 示踪相关流量吸水剖面测井技术[J]. 工程地球物理学报, 2013, 10(1): 41-45.
Wang Zhongtao, Qin Minjun, Li Wenzhong, et al. The injection profile logging technology of tracer relative flow rate[J]. *Chinese Journal of Engineering Geophysics*, 2013, 10(1): 41-45(in Chinese).
- [45] 王路伟, 高翔, 崔海平. 油田水力压裂裂缝的放射性示踪实验研究[J]. 同位素, 2019, 32(5): 349-354.
Wang Luwei, Gao Xiang, Cui Haiping. Experimental study on radioactive tracer of hydraulic fracturing in oilfield[J]. *Journal of Isotopes*, 2019, 32(5): 349-354(in Chinese).
- [46] (美)B. Zemel, 赵培华. 油田示踪技术[M]. 北京: 石油工业出版社, 2005.
- [47] 高翔, 张培信, 张锦荣. 互相关技术在同位素示踪流量测量中的应用研究[J]. 同位素, 2005, 18(S1): 1-4.
Gao Xiang, Zhang Peixin, Zhang Jinrong. The application research on the isotopic tracing flow measurement using cross correlation technique[J]. *Journal of Isotopes*, 2005, 18(S1): 1-4(in Chinese).
- [48] 周树轩, 卢庆千, 唐永华, 等. 放射性示踪地下管道检漏技术及检漏仪器的研究[J]. 原子能科学技术, 1987, 21(2): 150-154.
Zhou Shuxuan, Lu Qingqian, Tang Yonghua, et al. Buried pipeline leak-detection technique and instruments using radioactive tracers[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 1987, 21(2): 150-154(in Chinese).
- [49] 孙占海, 罗克. “神舟八号”飞船 γ 源高度控制装置安装工具和方法的改进[J]. 航天器环境工程, 2011, 28(6): 650-651.
Sun Zhanhai, Luo Ke. Improvement of installation tools and methods of γ source height control device for Shenzhou-8 spacecraft[J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2011, 28(6): 650-651(in Chinese).
- [50] 张楠, 吴世通, 沈超. γ 源辐射角度对光子高度计性能的影响分析[J]. 航天返回与遥感, 2014, 35(6): 37-41.
Zhang Nan, Wu Shitong, Shen Chao. Analysis of effect of γ radiation angle on the photons altimeter[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2014, 35(6): 37-41 (in Chinese).