

辐射加工剂量体系的研究进展

林敏, 叶宏生, 李华芝, 陈克胜, 徐利军, 武昌平

(中国原子能科学研究院 放射性计量测试部, 北京 102413)

摘要: 辐射加工作为一种高效益、低能耗、对环境无污染的新工艺、新技术, 已在世界范围内得到很大发展, 而辐射加工剂量学是对辐射加工唯一通用而有效的质量控制手段。本文就辐射加工剂量学中涉及的量热法、电离法和化学法的研究进展分别进行了回顾, 并着重介绍了几种重要的剂量体系。

关键词: 辐射加工; 剂量学; 剂量体系; 量热法; 实时剂量计; 化学法

中图分类号: TL818.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-6931(2009)S0-0184-07

Development of Dosimetry Systems for Radiation Processing

LIN Min, YE Hong-sheng, LI Hua-zhi, CHEN Ke-sheng, XU Li-jun, WU Chang-ping
(China Institute of Atomic Energy, P. O. Box 275-20, Beijing 102413, China)

Abstract: Radiation processing is a new technology with high effect, low energy-consumption and no pollution to the environment. It keeps being developed very quickly throughout the world, in which radiation dosimetry is the only one universal and effective method for the quality assurance. This paper reviews calorimetry, ionometry and chemical methods that are related to the dosimetry for radiation processing. It also puts some emphasis upon several important dosimetry systems used in radiation processing field.

Key words: radiation processing; dosimetry; dosimetry system; calorimetry; real-time dosimeter; chemical dosimetry

20世纪80年代以来, 辐射加工作为一种高效益、低能耗、无污染的新工艺、新技术, 越来越受到世界各国的重视, 并在世界范围内取得了很大发展。辐射加工是光子(X和 γ 射线)和电子束辐射源在工业上的应用, 主要是利用电离辐射在物质中引起的化学效应、物理效应或生物效应来达到对物质进行加工的目的, 如医疗用品的辐射消毒和灭菌、食品的辐射保鲜或贮存、谷物的辐射杀虫、高分子材料的辐射改性、半导体的改性或抗辐射加固以及“三废”的

辐射治理等。

辐射加工随受照对象和辐照工艺的不同, 覆盖了很宽的剂量(约6个量级)、剂量率(约12个量级)和能量(大于2个量级)范围^[1]。由于辐射效应与单位物质中沉积的能量——吸收剂量具有直接的对应关系: 辐照剂量过低, 不能产生所需的辐射效应; 而辐照剂量过高, 可能会使物质受到破坏。因此, 辐照剂量是辐射加工中进行辐照质量控制的一个关键因素, 必须通过剂量学方法进行测量(或通过特性参数进行

计算),以保证受照物质中的吸收剂量在剂量要求范围之内^[2]。

辐射加工剂量学就是对辐射加工中受照物质获得的吸收剂量进行研究的剂量学方法。由于辐射剂量学中主要涉及量热法、电离法和化学法,因此,本文就这3个方面对辐射加工剂量学的研究进展分别进行介绍。

1 量热法

量热法是测量吸收剂量的一种最直接、最基本的方法,是一种测量吸收剂量的绝对方法,它以受照物质将吸收的辐射能全部转变为热能(不转换成化学能和其他形式的能)为基础,通过测量1块隔热良好的受照物质的温升给出吸收剂量。根据吸收体材料的不同,量热计可分为石墨量热计、聚苯乙烯量热计和水量热计等。

量热法的优点在于无需对吸收过程作任何假设,无需各种转换因子,也不依赖于物质的几何条件、原子序数、密度、剂量率和辐射能谱等因素,测量准确度高,因而被广泛作为一种测量吸收剂量的国家基准。而量热法的局限性在于设备结构较为复杂,体积较大,一旦建成将不便于搬动。

1.1 石墨量热计和聚苯乙烯量热计

因水中存在显著的热亏损问题(由于放热或吸热化学反应引起)而在早期难以解决,而石墨受照时不产生放射化学反应;另外,水的比热容较大,相当于石墨的6倍,故石墨量热计的剂量测量灵敏度较高,因此,早期研制的主要是石墨量热计。石墨量热计的测量原理简单,测量精度高,目前已被各国国家标准实验室广泛作为 γ 射线和电子束吸收剂量测量的国家基准。

因辐射加工用钴源的剂量率较低,因此,石墨量热计并非直接应用于辐射加工水平剂量的测量,而是利用辐射治疗水平 γ 射线源辐照并给出参考点处的吸收剂量率,而其他辐射加工用参考标准剂量体系的剂量响应则在同样辐照条件下进行校准,确定校准因子后再应用于辐射加工水平的剂量测量。而对于辐射治疗剂量水平,人们关注的重点在于如何获得最低的剂量测量不确定度,因此,在结构设计上较为复杂,这种石墨量热计采用带有真空系统的多部件结构设计以降低热损,控温系统则采用直流或交流惠斯通电桥对每一部件的温度进行测

量,校准操作也较为复杂,但其测量准确度高,如测量1 Gy石墨吸收剂量时的合成标准不确定度仅为0.3%^[3]。

随着电子束辐射加工技术的快速发展,各国国家标准实验室也相继研制了用于电子束吸收剂量测量的石墨量热计和聚苯乙烯量热计。这两种量热计在结构设计上基本相同,只是因石墨的密度较高而主要用于中、高能电子束辐照,而聚苯乙烯则主要用于中、低能电子束辐照。

辐射加工电子束石墨量热计的关注点与辐射治疗水平所用量热计不同,此时,人们更关注量热计的强度和操作的便利性,并不追求过低的测量不确定度。这种量热计的吸收体为1个嵌入了珠状热敏电阻的石墨圆盘,该圆盘放于聚苯乙烯保温材料中与外界绝缘,采用手持式数字多用表测量温度变化,结构设计和操作均相对简单,主要用作2 MeV以上电子束吸收剂量测量标准。

对于辐射加工电子束聚苯乙烯量热计,国外研究比较全面而深入的是丹麦RISO实验室的Miller和Helt-Hansen等^[4-6],他们研制了几种不同结构设计的聚苯乙烯量热计,主要用于4 MeV以下中、低能电子束辐照。值得一提的是,随着能量约100 keV的低能电子束辐照加工的广泛应用,此能量范围电子束吸收剂量的绝对测量成为当代电子束辐照加工剂量学的1个难点。因该电子束射程很短,量热计表面又无法用常规聚苯乙烯泡沫塑料进行保温,因此,辐照后温度变化显著。为研究80~120 keV低能电子束辐照后量热计表面空气加热对量热计测量准确度的影响,Helt-Hansen等^[6]设计了3种聚苯乙烯量热计:第1种是用于动态辐照的置于传送带上的量热计;第2种是用于静态辐照但外设强制吹风装置的量热计;第3种是用于静态辐照的真空室量热计。研究结果表明,这3种量热计均可用于80~120 keV电子束辐照时绝对吸收剂量的测量,从而解决了低能电子束辐照加工吸收剂量的计量标准问题;另外,通过与真空室量热计比较,进一步证明了只要采用正确的剂量测量方式,即使量热计在空气中辐照,也可准确给出吸收剂量,这为校准薄膜剂量计带来了便利,从而解决了低能电子束辐照时薄膜剂量计的校准难题。

自 20 世纪 80 年代以来,我国的一些大学和研究所也相继开展了用于电子束剂量测量的石墨量热计和聚苯乙烯量热计的研究。对于石墨量热计,用于 2~14 MeV 电子束剂量测量的扩展不确定度约为 1%~3% ($k=2$)^[7-10];而对于聚苯乙烯量热计,用于 3~5 MeV 电子束剂量测量的总不确定度约为 4% (未给出包含因子)^[11]。另外,陈克胜等^[10]还报道了用于测量不同能量电子束剂量深度分布的多层石墨量热计,可测量 4~14 MeV 电子束剂量深度分布曲线。

1.2 水量热计

尽管石墨量热计体积较小,使用方便,测量精度高,但石墨量热计测量得到的是石墨中的吸收剂量,需根据石墨与水的质量能量吸收系数或碰撞阻止本领的比值进行转换,才能得到人们所关心的水中吸收剂量,而这种转换势必导致剂量测量不确定度的增加。

随着科学技术的发展和研究工作的不断深入,水量热计已成为当代辐射剂量学领域的 1 个重要发展方向。20 世纪 70 年代,原美国国家标准计量局(NBS,现为美国国家标准技术研究院,NIST)的 Domen^[12]率先开展了水量热计的研究,他对水量热计的测量原理、结构设计、剂量学性能以及影响水量热计测量准确度的热亏损问题和对流问题等进行了系统而深入的研究,还研究了饱和了 N₂、H₂ 以及 H₂ 与 O₂ 混合气体的不同溶液体系对降低热亏损的作用,成功研制了世界上第 1 套水量热计装置,大大推动了水量热计的发展。

此后,各国国家计量实验室相继开展水量热计的研究。科研人员在 Domen 研究成果的基础上,进一步改进了水量热计中量热计芯的结构设计,研究了量热计芯和热敏电阻等非水材料的影响、水量热计的工作温度以及饱和其它气体的溶液体系对降低热亏损的作用等^[31-38]。目前已建水量热计吸收剂量标准装置的实验室有加拿大 NRC、荷兰 NMI、瑞士 METAS、美国 NIST、德国 PTB 及英国 NPL 等,合成标准不确定度为 0.2%~1%。值得注意的是,这些已被作为国家初级标准的水量热计亦并非直接用于辐射加工水平剂量测量,而是作为辐射治疗剂量水平标准用于 X 射线、 γ 射线等贯穿辐射,然后通过适当的传递标准剂量计如丙氨酸、重铬酸盐剂量计等

应用到辐射加工方面。

我国于 20 世纪 80 年代开展了盒式水量热计的研制^[13],主要用作 4~14 MeV 电子束吸收剂量测量标准。这种量热计结构简单,吸收体为充满 4 次蒸馏水并嵌入珠状热敏电阻的聚苯乙烯圆盘,以聚苯乙烯泡沫塑料与外界绝缘,其测量电子束吸收剂量的扩展不确定度约为 4% ($k=2$)。

1.3 其他量热计

随着航天和军事应用中半导体材料抗辐射加固研究的发展,针对小剂量脉冲 X 射线在抗辐射加固研究中的应用,为了给出硅材料的吸收剂量,巴维真等^[14]研制了 1 种以薄片硅为吸收体的真空绝热式硅量热计。该量热计被应用于 600 kV 脉冲加速器产生的“闪光”X 射线吸收剂量的测量。此外,安金霞等^[15]对硅量热计做了进一步改进,研制了 1 种高真空、多层绝热的新型硅量热计。该量热计已被应用于⁶⁰Co γ 辐射场中硅吸收剂量率分布的测量。这些工作为我国半导体材料抗辐射加固研究中硅吸收剂量的绝对测量打下了基础。

2 电离法

电离法以空腔理论为基础,是一种通用的测量吸收剂量的绝对方法,主要通过测量受照后电离室中产生的电离电流给出照射量、空气比释动能或吸收剂量。

电离法的优越性在于设备结构简单、易操作,测量精度高,是当今辐射剂量学领域的一种基础方法。电离法的局限性在于吸收剂量需转换,剂量率上限受离子一般复合影响的限制(初始复合与剂量率无关)^[2]等。

根据射线种类的不同,电离室在结构设计上也不相同,如用于测量 X 射线的自由空气电离室、用于测量 γ 射线的空腔电离室、用于测量 β 射线和电子束的外推电离室等。不过,电离法在辐射加工方面的直接应用很少,电离法由于受到剂量率的限制,石墨空腔电离室一般作为国家基准用于 γ 射线辐射加工剂量水平吸收剂量的溯源。

尽管如此,为了获得辐射加工实时的剂量率,英国 NPL 的 Sharpe 等^[16]于 2000 年研制了一种实时剂量计(RTD),用于 2~250 kGy·h⁻¹

范围的辐射加工用钴源的实时剂量率测量,辐照累积剂量可高达 5 MGy。这种 RTD 主要由微型热离子管和半导体器件组成,剂量率由 1 个密封的、内充氮气的电离室进行测量。尽管一些半导体元件不能耐受 5 MGy 的剂量,但这些元件易于获得,必要时便于更换。2002 年, Sephton 等^[17]对一些电离室进行了研究,发现 1 种以钢/陶瓷为结构材料、内充氮气的 LND 52138 密封型圆柱电离室性能最好。目前,该系统已被用于 480 TBq 钴源辐照,剂量率范围 14~166 kGy·h⁻¹,其测量累积剂量约 10 kGy 的扩展不确定度为 5%($k=2$)。

3 化学法

相对于量热法和电离法等物理学方法,化学法则以能够定量测量的化学反应为基础(通常以辐射化学产额 G 值来衡量),利用受照物质中产生的化学变化来测量吸收剂量。

当代辐射剂量学研究中,化学剂量体系的发展非常突出。化学法的优点是易复制、可制成各种形状、易操作、无源、体积小、组织等效性较好,已被广泛用于辐射加工剂量监测。

化学剂量体系主要分为液体和固体两类。

3.1 液体化学剂量体系

1) 硫酸亚铁剂量计

硫酸亚铁剂量计^[18](也称 Fricke 剂量计)是 20 世纪 20 年代末期发展起来的一种液体化学剂量体系,以充以空气的硫酸亚铁溶液中的氧化反应为基础,目前已被广泛用作初级标准或传递标准剂量计。由于其辐射化学产额经过长时间多家计量实验室的实际测量而确定下来,因此,目前也被作为一种测量辐射加工水平吸收剂量的绝对方法,一般剂量测量范围为 40~400 Gy。因 $G(\text{Fe}^{3+})$ 与剂量计溶液中的溶解氧有关,一般准确测量剂量的范围为 50~200 Gy。由于普通硫酸亚铁剂量计的剂量测量范围有限,为了拓宽其应用范围,人们通过添加 CNS^- 、二甲酚橙或苯甲酸,通过改变其线性摩尔吸收系数或提高其辐射化学产额 $G(\text{Fe}^{3+})$ 等方法,将剂量下限降低至几 Gy 以下;也可通过加入 Cu^{2+} 来降低 $G(\text{Fe}^{3+})$,或通过向剂量计溶液中鼓入 O_2 或高纯 N_2 等方法,将剂量上限提高至 10^4 Gy 以上。

2) 重铬酸盐剂量计和硫酸铈剂量计

液体化学剂量体系除硫酸亚铁剂量计外,研究较为广泛的还有重铬酸盐剂量计和硫酸铈剂量计。这两种剂量计均为 20 世纪 70、80 年代发展起来的,Matthews、Sharpe 等^[19-20]通过在重铬酸盐剂量体系中加入 Ag^+ 改善了重铬酸盐剂量计对剂量率的依赖性和辐照温度响应,而 Matthews^[19]也通过在硫酸铈剂量体系中加入 Ce^{3+} 脱敏剂有效改善了硫酸铈剂量计对有机物和其他杂质的敏感性。

重铬酸盐剂量计和硫酸铈剂量计以剂量计溶液的还原反应为基础,将剂量测量上限提高到几十 kGy。这两种剂量计虽均需用量热计或硫酸亚铁剂量计等进行校准,但由于其复现性好,对剂量率依赖性小,测量准确度较高,也被一些国家标准实验室或次级标准实验室作为传递标准剂量计,用于辐射加工水平 γ 射线吸收剂量的测量。此外,林敏等^[21]和张彦立等^[22]采用适当的扁平容器,将这两种剂量计用于高能电子束辐照。

3) 其他液体化学剂量计

除上述液体化学剂量体系外,国际上对其他体系,如乙醇-氯苯溶液的分光光度法、高频示波法、电导率法,含隐色染料的极性酸性溶液的光波导法,各种糖溶液的光电偏振光法,聚合物溶液的红外光谱法以及聚合物溶液的粘度法等进行了研究。由于液体化学剂量计用作工作剂量计存在一定的不便,且硫酸亚铁、重铬酸盐和硫酸铈等 3 种液体化学剂量计基本覆盖了辐射加工剂量范围,因此,其他液体化学剂量体系并未得到广泛应用。

3.2 固体化学剂量体系

相对液体化学剂量计而言,固体化学剂量计可根据需要被制备成各种形状,具有一定强度,使用方便,因此得到广泛研究和应用。尽管如此,固体化学剂量计作为一种相对方法,使用前需用标准剂量计进行校准。

1) 自由基剂量计

自由基剂量计包括丙氨酸剂量计和晶溶发光剂量计。

(1) 丙氨酸剂量计

丙氨酸剂量计是当前国际上研究最为深入的 1 种自由基型剂量计,其测量原理在于丙氨

酸中因辐射诱发产生的自由基总量可定量地用电子自旋共振(ESR)谱仪进行测量。丙氨酸剂量计发展于20世纪70年代末,首先由德国辐射与环境研究中心(GSF)的Regulla等^[23]对丙氨酸/ESR剂量系统进行了详细而深入的研究。因其剂量测量范围宽($1\sim 10^5$ Gy)、体积小、非破坏性测量,且对能量、剂量率和环境影响不敏感,测量精度高,因此,被世界各国广泛用作辐射加工剂量水平的传递标准剂量计,为辐射加工用钴源的剂量保证提供服务。丙氨酸剂量计是当代辐射加工剂量学领域传递标准的1个重要发展方向。目前,该剂量计已被制备成各种形状(如药片状、柱状、薄膜状和线缆状),既可作为传递标准剂量计,也可作为工作剂量计,用于辐射加工剂量水平电子束和 γ 射线吸收剂量的测量。不过,由于丙氨酸剂量计所需ESR谱仪价格昂贵,一般只有少数辐射加工单位将其作为工作剂量计用于剂量监测。

(2) 晶溶发光剂量计

晶溶发光剂量计的测量原理是:某些固体物质受到电离辐射照射后产生自由基,当其在一定溶剂中溶解时可形成过氧基,该过氧基发生自身氧化反应生成可发光的单线态氧分子对,利用晶溶发光测量装置(如荧光分析或光波导分析)测量发光产额或强度,该产额或强度与吸收剂量成一定比例关系。晶溶发光剂量计于20世纪70年代初被应用于辐射剂量学领域^[24],我国在20世纪80年代对氨基酸、糖类有机化合物及其测量装置等进行了研究^[25]。晶溶发光剂量计的特点在于量程范围较宽,便于邮寄等,曾在辐射加工剂量测量中得到应用,但目前已被其他剂量测量方法所取代。

2) 薄膜剂量计

由于低能电子束射程短,为对低能电子束辐射加工进行质量控制,自20世纪80年代末开始,世界各国广泛开展了对各种类型薄膜剂量计的研究。薄膜剂量计的优点在于空间分辨率好,尤其适用于测量电子束辐射场吸收剂量分布和电子束剂量-深度分布。薄膜剂量计主要分为无染料和有染料,一般以分光光度法测量辐照前后吸光度的变化。

无染料薄膜剂量计以日本富士公司生产的FTR-125三醋酸纤维(CTA)剂量计为代表^[26],

我国也相继生产了同类型薄膜剂量计用于电子束辐照^[27]。这种剂量计对光照和储存温湿度不敏感,使用方便,但测量灵敏度较低(探测下限为几十kGy),精度不高,适于作为电子束工作剂量计用于较高电子束吸收剂量的测量。

对于添加了染料的辐射变色薄膜剂量计,美国NIST的McLaughlin^[28]曾于20世纪70年代进行过系统而深入研究,从而大大推动了液体和固体辐射变色剂量计的发展。我国于20世纪80年代开始研究辐射变色薄膜剂量计^[29-31]。到目前为止,国际上报道的辐射变色薄膜剂量计种类较多,这些剂量计主要以纸、尼龙或聚乙烯醇为基材,灵敏成分为辐射显色的隐色染料,常用三苯甲烷衍生物染料氧化物,这种染料未受照时无色,受照后,CN基断裂,发生内分子转换,由无色苯式结构转换为着色的醌式结构色团,根据受照剂量高低显现不同深度的颜色。目前,国际上广泛使用的辐射变色薄膜剂量计有美国ISP公司生产的Gafchromic($0.1\sim 40$ kGy)、美国远西公司生产的FWT-60($0.5\sim 100$ kGy)、丹麦RISO实验室研制的B3($5\sim 300$ kGy)薄膜剂量计等。由于辐射变色剂量计具有可测剂量范围宽、辐照前后稳定、操作简单、受照后颜色随剂量不同变化直观等优点而成为当代辐射加工剂量学领域的1个重要发展方向。辐射变色薄膜剂量计相对无染料的CTA剂量计灵敏度高,照后稳定性和测量精度好,除可用作工作剂量计外,也可作为传递标准剂量计。尽管如此,该剂量计也存在一些缺点,如受光照、辐照温度和储存温湿度影响较大,需对剂量计厚度进行修正等。

3) PMMA 剂量计

在固体化学剂量计中,PMMA剂量计也是1种重要而实用的剂量计。PMMA剂量计经校准后,利用辐照前后吸光度的变化和剂量的对应关系即可给出吸收剂量。该剂量计使用方便,对环境影响不敏感,但剂量测量准确度稍低,一般作为辐射加工工作剂量计。目前已广泛使用的PMMA剂量计有Gammachrome($0.1\sim 3$ kGy)、Amber Perspex($1\sim 30$ kGy)、Red perspex($5\sim 50$ kGy)和Radix($5\sim 50$ kGy)剂量计等^[32]。

固体化学剂量体系经过几十年的发展从未

间断过,到目前为止,人们仍在研究一些成本低廉、较为实用的玻璃剂量计,有的玻璃剂量计退火后还可重复使用。例如,Ranjbar 等^[33]研究了将无色熔融石英(CFQ)作为10 MeV电子束工作剂量计的剂量学性能和应用,该剂量计辐照后经 800 °C退火仍可重复使用,但辐照灵敏度相对初始值在第 1 次退火后降低 37%,第 2 次退火后降低 41%。

4 结论

辐射加工剂量体系自 20 世纪发展至今已较为成熟。作为绝对剂量测量方法,量热法的发展重点在于两个方面:对于⁶⁰Co γ 射线辐射加工,初级标准计量体系已从石墨量热计研究转向水量热计的研究,测量不确定度有待进一步降低;而对于电子束辐射加工,聚苯乙烯量热计成为低能电子束剂量测量标准的一个重要发展方向。对于电离法,一种与电离室配套的实时剂量计的研究获得成功,突破了电离法对于较高剂量率的测量限制,可作为工作剂量计得到辐射加工实时的剂量率。对于化学法,液体化学剂量计的发展已基本定型,而对固体化学剂量计的研究从未间断,尤其是对辐照前后颜色变化直观的辐射变色薄膜剂量计的研究,始终是辐射加工剂量体系的一个研究热点,而成本低、可靠性好的工作剂量计也是辐射加工剂量体系的一个重要发展方向。

参考文献:

- [1] MCLANGHLIN W L, DESROSIERS M F. Dosimetry systems for radiation processing[J]. Radiat Phys Chem, 1995, 46: 1 163-1 174.
- [2] 阿蒂克斯 罗奇. 辐射剂量学[M]. 施学明,陈常茂,于耀明,等译. 北京:原子能出版社,1981.
- [3] BURNS D T, MORRIS W T. A graphite calorimeter for electron beam dosimetry: High dose dosimetry for radiation processing, IAEA-SM-314/33[R]. Vienna: IAEA, 1991.
- [4] MILLER A. Polystyrene calorimeter for electron beam dose measurements[J]. Radiat Phys Chem, 1995, 46: 1 283-1 286.
- [5] MILLER A, KOVACS A, KUNTZ F. Development of polystyrene calorimeter for application at electron energies down to 1.5 MeV[J]. Radiat Phys Chem, 2002, 63: 739-744.
- [6] HELT-HANSEN J, MILLER A, DAUNE S, et al. Calorimetry for dose measurement at electron accelerators in the 80-120 keV energy range[J]. Radiat Phys Chem, 2005, 74: 354-371.
- [7] 牛明忠,武全德. 吸收剂量石墨量热计[J]. 计量学报,1987,8(3):187-193.
NIU Mingzhong, WU Quande. An absorbed dose graphite calorimeter[J]. Acta Metrologica Sinica, 1987, 8(3): 187-193(in Chinese).
- [8] 史克勤,李忠英,陈大华,等. 辐射加工用电子束吸收剂量量热计[J]. 实用测试技术,1995,5:2-7.
SHI Keqin, LI Zhongying, CHEN Dahua, et al. Calorimeter used for electron beam dosimetry for radiation processing[J]. Practical Measurement Technology, 1995, 5: 2-7(in Chinese).
- [9] 李忠英,文德智,陈大华,等. 辐射加工级电子束吸收剂量量热计的研制[J]. 原子能科学技术, 2000,34(1):41-48.
LI Zhongying, WEN Dezhi, CHEN Dahua, et al. The development and application of calorimeter for electron beam absorbed dose at radiation processing level[J]. At Energy Sci Technol, 2000, 34(1): 41-48 (in Chinese).
- [10] 陈克胜,林敏,徐利军,等. 电子束吸收剂量量热计[J]. 原子能科学技术,2009,43(2):113-116.
CHEN Kesheng, LIN Min, XU Lijun, et al. Graphite calorimeter for measurement of absorbed dose of electron beam[J]. At Energy Sci Technol, 2009, 43(2): 113-116(in Chinese).
- [11] 王海燕,谢立青,宋红兵. 聚苯乙烯量热计的研制及其应用[J]. 北京师范大学学报:自然科学版,1998,34:58-60.
WANG Haiyan, XIE Liqing, SONG Hongbin. Development of a polystyrene calorimeter and its application[J]. Journal of Beijing Normal University: Natural Science, 1998, 34: 58-60 (in Chinese).
- [12] DOMEN S R. Absorbed dose water calorimeter[J]. Med Phys, 1980, 7: 157-159.
- [13] 史克勤. 电子束吸收剂量盒式水量热计[J]. 计量技术,1991,6:11-13.
SHI Keqin. Box-type water calorimeter for measuring electron beam absorbed doses[J]. Metrology Techniques, 1991, 6: 11-13(in Chinese).
- [14] 巴维真,吾勤之,何承发,等. 脉冲 X 射线辐射剂量的量热法测量[J]. 核技术,1995,18:247-250.

- BA Weizhen, WU Qinzhi, HE Chengfa, et al. Calorimetry measurements of flash X-ray radiation doses[J]. Nucl Tech, 1995, 18: 247-250(in Chinese).
- [15] 安金霞,巴维真,吾勤之,等. 新型硅吸收剂量量热计的应用[J]. 原子能科学技术,2000,34(1):36-40.
AN Jinxia, BA Weizhen, WU Qinzhi, et al. Application of a new style silicon absorbed dose calorimeter[J]. At Energy Sci Technol, 2000, 34(1): 36-40(in Chinese).
- [16] SHARPE P H G, SEPHTON J P, CHU R D. Real time dosimetry measurements at an industrial irradiation plant[J]. Radiat Phys Chem, 2000, 57: 687-690.
- [17] SEPHTON J P, SHARPE P H G, CHU R D. The use of ionisation chambers for dose rate measurements at industrial irradiation plants[J]. Radiat Phys Chem, 2002, 63: 789-792.
- [18] FRICKE H, MORSE S. The actions of X-rays on ferrous sulfate solutions[J]. Phil Mag, 1929, 7: 129.
- [19] MATTHEWS R W. Effect of silver ions in dichromate dosimetry[J]. Int J Appl Radiat Isot, 1981, 32: 861.
- [20] SHARPE P H G, BARRETT J H, BEIKLEY A M. Dichromate solution as a reference dosimeter for use in industrial irradiation plants[J]. Int J Appl Radiat Isot, 1985, 36: 647.
- [21] 林敏,叶宏生,林京文,等. 液体化学剂量计测定电子束吸收剂量[J]. 原子能科学技术,1998,32(6):510-516.
LIN Min, YE Hongsheng, LIN Jingwen, et al. Dose measurement with liquid chemical dosimeters for electron beams[J]. At Energy Sci Technol, 1998, 32(6): 510-516(in Chinese).
- [22] 张彦立,刘智绵,夏渲,等. 电子束吸收剂量标准液体化学剂量测量系统的研究[J]. 现代计量测试,2002,1:12-17.
- [23] REGULLA D F, DEFFNER U. Dosimetry by ESR spectroscopy of alanine[J]. Int J Appl Radiat Isot, 1982, 33: 1101-1114.
- [24] ETTINGER K V, FPRESTER A R, MALLARD J R. Biomedical dosimetry: Physical aspects, instrumentation, calibration[R]. Vienna: IAEA, 1981.
- [25] 郎淑玉,张仲伦. 适用于辐射加工的谷氨酸胺晶溶发光剂量计及其 BPLL 型测量装置[J]. 辐射研究与辐射工艺学报,1986,4:35-41.
LANG Shuyu, ZHANG Zhonglun. The glutamine lyoluminescence dosimeter applicable to radiation processing and model BPLL readout equipment[J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 1986, 4: 35-41 (in Chinese).
- [26] TAMURA N, TANAKA R, MITOMO S, et al. Properties of cellulose tri-acetate dosimeter[J]. Radiat Phys Chem, 1998, 18: 947-956.
- [27] 林京文,隆绍贤,叶宏生,等. FJL-01 型三醋酸纤维素薄膜剂量计剂量学性能研究[J]. 原子能科学技术,1998,32(6):524-529.
LIN Jingwen, LONG Shaoxian, YE Hongsheng, et al. Research on the dosimetry of FJL-01 CTA film dosimeter [J]. At Energy Sci Technol, 1998, 32(6): 524-529(in Chinese).
- [28] MCLAUGHLIN W L. Manual on radiation dosimetry[R]. [S. l.]: Marcel Dekker Inc., 1970.
- [29] 温祝堂,王永其,骆日佑,等. GF-型辐射显色尼龙薄膜剂量计的研制[J]. 计量学报,1988,9: 304-308.
WEN Zhutang, WANG Yongqi, LUO Riyou, et al. A GF-type radiochromic dye films dosimeter [J]. Acta Metrologica Sinica, 1988, 9: 304-308 (in Chinese).
- [30] 包华影,赵世民. PVT 辐射致色剂量计[J]. 同位素,1989,2(3):149-159,171.
BAO Huaying, ZHAO Shimin. PVT radiochromic film dosimeter [J]. Journal of Isotopes, 1989, 2(3): 149-159, 171(in Chinese).
- [31] 李华芝,肖振红,林敏,等. 辐射变色薄膜剂量计的研制[J]. 原子能科学技术,2008,42(3):253-257.
LI Huazhi, XIAO Zhenhong, LIN Min, et al. Development of radiochromic film dosimeter[J]. At Energy Sci Technol, 2008, 42(3): 253-257 (in Chinese).
- [32] MIYAHARA M, ITO H, UENO K, et al. Evaluation of several dosimeters for identification of irradiated foods using a 5 MeV electron beam [J]. J Health Sci, 2002, 48: 37-41.
- [33] RANJBAR A H, ALIABADI R, AMRAEI R. ESR response of bulk samples of clear fused quartz (CFQ) material to high doses from 10 MeV electrons: Its possible application for radiation processing and medicals sterilization [J]. Appl Radiat Isot, 2009, 67: 1023-1026.