聚四氟乙烯固体自由基剂量计性能的研究

常靖峰[1] 张光华[1] 吴国忠[2] 沈蓉芳[2] 董凯丰[1] 郑康海[1]
[1]（上海金鹏源辐照技术有限公司 上海 201707）
[2]（中国科学院上海应用物理研究所 上海 201800）

摘要 聚四氟乙烯（PTFE）经电离辐射诱发能产生稳定自由基，本研究利用这一特点制备了一种PTFE固体剂量计片。实验数据和分析结果表明，该剂量计在较大剂量范围内（1~180 kGy）其自由基响应与吸收剂量保持正相关性，且受剂量率和能量依赖性的影响微小，同时辐照温度和辐照后存贮时间对PTFE固体剂量计片自由基衰退的影响呈现规律性。不同于目前行业使用的其他剂量计，该剂量计适用于高剂量范围测量与标定，量程范围在1~180 kGy，总不确定度小于5.02%，呈现优异的计量学性能。该研究对辐照加工聚合物材料或其他功能材料时的剂量精准调节和标定具有重要意义。

关键词 电离辐射，PTFE固体剂量计，自由基，高剂量范围，计量学性能
中图分类号 TL13
DOI: 10.11889/j.1000-3436.2024-0106
CSTR: 32195.14.j.JRRRP.1000-3436.2024-0106
引用该文：
常靖峰, 张光华, 吴国忠, 等. 聚四氟乙烯固体自由基剂量计性能的研究[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 2024, **42**(6): 060209. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2024-0106_郑康海.
CHANG Jingfeng, ZHANG Guanghua, WU Guozhong, *et al*. Investigating the performance of polytetrafluoroethylene solid free radical dosimeter[J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2024, **42**(6): 060209. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2024-0106_郑康海.

Investigating the performance of polytetrafluoroethylene solid free radical dosimeter

CHANG Jingfeng[1] ZHANG Guanghua[1] WU Guozhong[2] SHEN Rongfang[2]
DONG Kaifeng[1] ZHENG Kanghai[1]
[1](*Shanghai Jinpengyuan Irradiation Technology Co., Ltd., Shanghai 201707, China*)
[2](*Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China*)

ABSTRACT This study leverages the ability of polytetrafluoroethylene (PTFE) to generate stable free radicals under ionizing radiation to develop a solid PTFE dosimeter sheet. Experimental results indicate a strong positive correlation between free radical response and absorbed dose over a broad range (1–180 kGy). The performance of the dosimeter was minimally influenced by dose rate and energy dependence, while the effects of irradiation temperature and post-irradiation storage time on free-radical decay exhibited clear and consistent patterns. Unlike

第一作者：常靖峰，男，1977年5月出生，本科学历，上海金鹏源辐照技术有限公司总经理，主要从事电离辐射加工技术、质量和市场综合管理，中国同位素与辐射行业协会安全评估专家组成员
通信作者：郑康海，助理工程师，E-mail: zhengkh@jpy.com.cn
收稿日期：初稿 2024-11-19；修回 2024-12-19
First author: CHANG Jingfeng (male) was born in May 1977, bachelor's degree, general manager of Shanghai Jinpengyuan Irradiation Technology Co., Ltd., mainly engaged in ionizing radiation processing technology, quality and market comprehensive management, member of the safety assessment expert group of China Isotope and Radiation Industry Association
Corresponding author: ZHENG Kanghai, assistant engineer, E-mail: zhengkh@jpy.com.cn
Received 19 November 2024; accepted 19 December 2024

conventional dosimeters used in the industry, the PTFE dosimeter is suitable for high-dose measurements and calibrations, covering a range of 1 – 180 kGy with a total uncertainty of less than 5.02%, demonstrating high metrological reliability. This study provides valuable insights into precise dose control and calibration in the irradiation processing of polymers and other functional materials.

KEYWORDS Ionizing radiation, PTFE solid dosimeter, Free radicals, High-dose range, Metrological performance
CLC TL13

固体自由基剂量计的概念早在20世纪50年代由国际同行提出，其中，丙氨酸剂量计的研究在20世纪70年代末取得重要进展[1]。当时，随着对丙氨酸-ESR剂量测量系统研究的完善，使其逐步发展为一种高精度的标准剂量计。随后，丙氨酸-ESR剂量测量方法被国际原子能机构（IAEA）采纳，并1991年正式用于国际剂量保证服务（IDAS）并成为指定的标准剂量计[1−3]。我国于1996年发布首版测量标准方法，2008年发布了更新版（GB/T16639—2008使用丙氨酸-ESR剂量测量系统的标准方法）[4]。

目前，丙氨酸剂量计凭借其出色的测量精度、生物等效性和可追溯性，已成为国内外广泛认可的高性能剂量计。然而，随着辐照加工行业的快速发展，辐照技术在辐照交联（裂解）、辐照接枝和辐照灭菌等领域的应用需求逐步增加，剂量测量与标定变得更加复杂。在高剂量范围的测量中，对剂量计的性能要求也随之提高，包括适应更宽的高剂量范围、具备化学惰性、不易溶胀或分解以及耐高温等特性[5−6]。

聚四氟乙烯（PTFE）是一种人工合成的高分子材料，被誉为“塑料之王”，是全球应用最广泛的工程塑料之一。PTFE以其卓越的物理和化学性能著称，包括优异的耐腐蚀性、耐候性、电绝缘性，以及高润滑性、低摩擦性和不黏性。这些特性使其在国防、航空航天、机械制造、医疗设备、电子电气和石油化工等领域得到了广泛应用[7]。PTFE具有极强的化学惰性，C−C键和C−F键的断裂需要较高的能量。辐射改性利用X射线、γ射线等辐射源对PTFE进行照射，能够有效地断裂C−C键和C−F键，并产生自由基。通过射线照射，PTFE会发生一系列变化，如降解、交联、接枝等效应，这些效应可显著改变其物理化学性能，扩展其在不同领域的应用潜力[8−10]，如PTFE中嵌入含有Eu掺杂物的$BaSO_4$圆片可成功用作热释光剂量计。PTFE由于其较高的结晶度和熔点，使得其分子链排列规整，具有稳定的分子结构。此外，PTFE的高熔点确保其在辐照过程中不会因受热而熔解，能够在高温环境下保持原有物理外形结构。在辐照作用下，PTFE能够生成稳定的自由基，且这些自由基具有较长的半衰期[11−12]。因此，PTFE有望成为耐高温、耐化学腐蚀和高测量范围的辐射剂量计材料。

通过一定剂量范围辐照使PTFE中的分子链断裂生成一定产额的自由基，其浓度与吸收的辐射剂量成正比关系，从而实现精确的剂量测量。本研究利用γ射线辐照PTFE结合ESR剂量测量系统，发现PTFE具有辐射产生稳定自由基响应且与吸收剂量成正比线性关系；剂量测量范围达1~180 kGy，总不确定度小于5.02%，符合ISO/ASTM52628：2020[13]关于剂量测量系统不确定度小于6%的相关要求。PTFE固体剂量计片在高剂量辐射测量、辐照加工、辐射防护等领域中具有重要的应用价值。

1 材料与方法

1.1 原料与试剂

PTFE悬浮树脂（东岳氟硅科技集团有限公司），化学物质登录号（CAS）为9002-84-0，清洁度为一等，粒径为233 μm，熔点（327±5）℃，体积密度569 g/L。

1.2 PTFE剂量计制备

综合考虑ESR谱仪测量条件要求和剂量计在辐照场内的应用条件要求，优先设计了一种外形为圆柱形剂量计微片，其几何尺寸为直径（Φ）4.0 mm、厚度（H）2.4 mm，Φ和H公差小于0.05 mm；破碎压力大于20 N，重量均匀性小于1.1%。

按照设计要求，PTFE经模压、烧结和车削等特定自动化工艺，制备成尺寸精确、重量均匀、一致性好的PTFE剂量计微片。该批次制备剂量计总数量1 000片，经检测剂量计几何尺寸符合设计要求，Φ=（4.0±0.04）mm、H=（2.4±0.03）mm、重量（G）=（63.5±0.5）mg/片，破碎压力大于50 N；

抽样检测重量均匀性1.0%（n=10）。

1.3 测试与表征方法

1.3.1 ESR谱仪测量条件和方法

选用德国生产的型号BRUKER-ESR5000谱仪，参考物质为红宝石，谱仪预热时间为1 h。对辐照后的PTFE剂量计静止0.5 h后进行检测，检测室温23 ℃、湿度为50% RH，ESR5000谱仪的测量频率为X波段（9.257±0.001）GHz，测量参数：中心磁场330.1 Mt、扫描宽度3.00 mm、调制幅度1.000 mT、微波功率10 mW、扫描时间5 s、测量时间18 s、共振腔内温度为（32±0.5）℃。测量模具使用谱仪专用的直径4.2 mm的石英管，将剂量计微片水平放入垂直石英管底部，然后将石英管放置于谱仪共振腔内设计的固定位置，以保证剂量计微片处于谱仪共振腔的中心点位置，之后进行测量并读取数据。测试出的剂量计Hpp信号是波谱的峰值幅度。图1为不同剂量的峰值信号。

1.3.2 零剂量（本底）标定

对剂量计零剂量（本底）自由基浓度水平进行ESR谱仪检测，通过检测数据以评估其作为剂量计的适宜性、均匀性和灵敏性。取10片未辐照的空白PTFE剂量计样品，在23 ℃室温条件下按编号顺序分别进行重量检测后，再按编号逐个进行ESR谱仪测试，按照§1.3.1条款中的测量参数检测每片剂量计样品的自由基浓度本底水平及信噪比和本底剂量水平等数据（表1）。

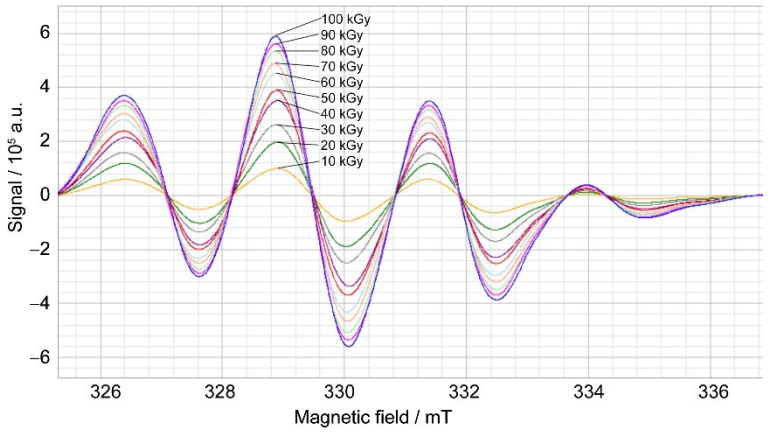

图1 不同剂量值的Hpp信号
Fig.1 Hpp signals of different dose values

表1 零剂量ESR响应测试数据表
Table 1 Zero dose ESR response test data

样品 Sample	重量/ mg Weight	标准物质信号 / a.u. Standard material signal	剂量计信号Hpp / a.u. Dosimeter signal	响应 / mg^{-1} Response	信噪比 / dB Signal-to-noise ratio	腔内温度 / ℃ Intra-cavity temperature
1	63.00	5 914.61	18.29	0.29	50.84	32.25
2	63.80	5 901.03	25.17	0.39	70.86	32.21
3	63.60	5 912.09	19.36	0.31	51.69	32.19
4	63.60	5 903.81	23.54	0.37	51.70	32.15
5	63.90	5 915.31	31.95	0.50	47.66	32.12
6	63.40	5 905.64	29.42	0.47	43.89	32.10
7	63.60	5 901.41	27.12	0.42	59.57	32.08
8	63.90	5 910.13	27.18	0.43	72.41	32.06
9	63.20	5 901.41	19.79	0.31	55.70	32.16
10	63.00	5 899.51	27.58	0.44	76.645	31.89
均值 Average	63.50	N/A	24.94	0.39	58.10	N/A

从表1数据可以看出，该批次剂量计重量均值63.5 mg、正负偏差小于0.05 mg、分散度小于1.0%，本底自由基浓度响应Hpp均值24.94，每毫克响应Hpp值0.39 /mg，说明自由基水平分布均匀稳定；信噪比为58.10 dB，大于25 dB谱仪设定最低值，呈现了较好的对ESR检测的适宜性；本底剂量响应均值0.024 kGy，说明该剂量计微片中自由基本底浓度响应起点低且灵敏度较好。

1.3.3 辐照场剂量与标定

辐照场能量与活度。辐照实验选取在某型号为BFT-I的全自动辊道步进式γ辐照装置中进行，其时^{60}Co活度为9.25×10^{6} Bq，γ射线剂量场剂量率分布为2.7~122.2 kGy/h，辐照室温度30.0~55.0 ℃。辐照方式为随辐照容器进入辐照室动态辐照，按照辐照装置剂量场参数和工艺参数实施设定的辐照主控时间进行预期剂量的辐照。

吸收剂量点位及标定。为了充分测试PTFE剂量计的剂量测量范围、确定性及可重复性，选取剂量点分别为1 kGy、2.5 kGy、5.0 kGy、10 kGy、20 kGy、30 kGy、40 kGy、50 kGy、65 kGy、75 kGy、85 kGy、130 kGy、180 kGy、250 kGy共14个剂量点位；按照每组3片共选取14组PTFE剂量计样品，对应14个吸收剂量点位；标定剂量选取经过国家计量院比对的丙氨酸剂量计进行赋值标定，以丙氨酸剂量计ESR检测得到的剂量值赋值予同点位的PTFE剂量计，由此完成PTFE剂量计的标定吸收剂量。

2 结果与讨论

2.1 吸收剂量与自由基响应

PTFE在不同吸收剂量辐照后会产生一定强度响应的自由基信号。图1是PTFE剂量计在不同剂量辐照后经过ESR检测得到的单位毫克样品对应的响应信号（扣除本底）。随着吸收剂量的增加，反映自由基浓度水平的每毫克PTFE剂量计中的Hpp值也对应增加。PTFE剂量计的吸收剂量（丙氨酸剂量片标定）与自由基响应之间具有显著的规律性关联特征（图2（a））。在吸收剂量1~182 kGy的范围内，剂量响应曲线表现出良好的数学关系（图2（b），拟合方程为$y_1=-0.001\ 8x_1^2+1.66x_1+4.42$，$R_1^2=0.998$，其中，$x_1$为吸收剂量，$y_1$为单位毫克PTFE样品响应强度）。然而，当吸收剂量从182 kGy增加到251 kGy时，对应的Hpp值从244迅速跃升至1 416，呈现出骤增的趋势。结合数据，本实验PTFE剂量计适用剂量低于182 kGy样品。同时，根据对剂量计的性能要求和实验数据，我们截取剂量计辐照自由基线性响应好且稳定的剂量区段作为本次研究的剂量计的测量范围（使用量程）进行综合分析，即在1~180 kGy剂量范围内进行后续计量学性能分析。

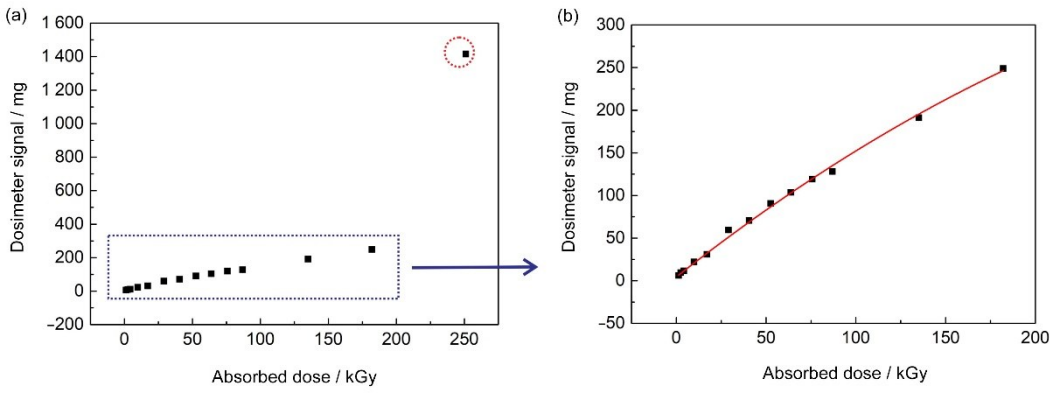

图2 PTFE固体剂量剂片响应（扣除本底）曲线（a）及局部放大图（b）

Fig.2 Response curve of PTFE solid dosimeter tablets (background subtracted) (a) and partial enlarged drawing (b)

图3是根据图2（b）中数据绘制的单位毫克PTFE剂量计自由基响应数值（横坐标）与吸收剂量（纵坐标）的剂量计ESR响应−吸收剂量曲线。多项式拟合：$y_2=7.05\times10^{-4}x_2^2+0.57x^2-2.68$，$R_2^2=0.999$；线性拟合：$y_3=0.70x_3-4.00$，$R_3^2=0.992$，其中，$x_2$和$x_3$为每毫克样品的ESR信号强度，$y_2$和$y_3$是两种拟合方式计算出的吸收剂量。由$R_2^2$和$R_3^2$可知，两种拟合数据都是可靠的，可根据实际应用进行选择。

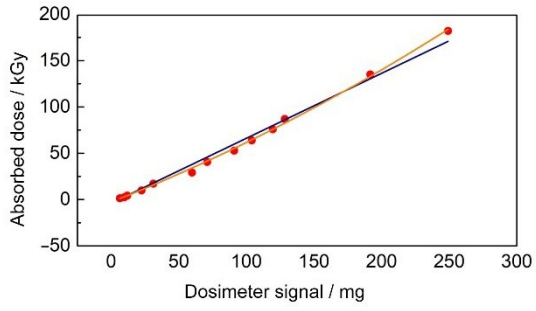

图3 PTFE剂量计ESR响应–吸收剂量曲线
Fig.3 ESR response *vs*. absorbed dose curves of PTFE dosimeter

2.2 不确定度影响测试分析

表2和表3是将PTFE固体剂量计片不同角度翻转（左右旋转和上下翻转）后利用ESR测量数据的A类不确定度评估[14]。表2对装载PTFE微片剂量计的石英管分布进行旋转角度，按照0°、90°、180°和270°左右旋转后分别进行ESR检测，以得到旋转测量对测量值的影响；每组数据使用4个相同吸收剂量的剂量片分别进行测量，以减少误差影响。根据数据计算得到旋转不确定度为0.06%，表明旋转角度对测量的影响不明显，也证明PTFE剂量计片内部成分构成分布均质。表3是PTFE剂量计片翻转不确定度的影响测试分析。抽取4组辐照后的剂量计片，每组2片上下翻转前后分别装入石英管进行ESR测试，计算其合并不确定度为0.12%。可以看出，翻转前后测量值对剂量测量结果影响甚微，同样说明剂量计内部成分构成分布是均质。

表2 PTFE剂量计翻转不确定度测试数据表
Table 2 PTFE dosimeter flipping uncertainty test data table

样品 Sample	旋转角度 Rotation angle	剂量计信号Hpp / a.u. Dosimeter signal	响应 / mg^{-1} Response	响应均值 $\bar{d}_i$ / mg^{-1} Average response intensity	标准偏差 SD_i Standard deviation
1	0°	25 457.52	382.41	381.98	0.38
	90°	25 441.99	381.69		
	180°	25 443.68	381.64		
	270°	25 448.05	382.18		
2	0°	26 143.66	392.68	392.68	0.67
	90°	26 115.58	392.24		
	180°	26 135.29	392.19		
	270°	26 233.71	393.62		
3	0°	26 415.28	396.42	397.05	1.16
	90°	26 435.03	396.57		
	180°	26 414.78	396.43		
	270°	26 532.23	398.78		
4	0°	26 090.45	391.44	392.34	0.97
	90°	26 100.86	391.75		
	180°	26 129.13	392.57		
	270°	26 194.38	393.61		
变异系数 Coefficient of variation[14]				0.06%	

$$CV\% = \left\{\left[\sum(n_i - 1)\left(SD^2/\bar{d}_i^{\,2}\right)\right]^{1/2} / \left[\sum(n_i - 1)\right]\right\} \times 100\%$$

表3 PTFE剂量计翻转不确定度测试数据表
Table 3 Uncertainty test data for PTFE dosimeter flip

样品 Sample	翻转前后 Flip top to bottom	剂量计信号Hpp / a.u. Dosimeter signal	响应 / mg^{-1} Response	响应均值 $\bar{d}_i$ / mg^{-1} Average response intensity	标准偏差 SD_i Standard deviation
1	之前 Before	26 539.26	398.94	398.05	1.25
	之后 After	26 481.60	397.17		
2	之前 Before	26 158.24	392.86	393.49	0.89
	之后 After	26 193.12	394.11		

续表

样品 Sample	翻转前后 Flip top to bottom	剂量计信号Hpp / a.u. Dosimeter signal	响应 / mg^{-1} Response	响应均值$\bar{d}_i$ / mg^{-1} Average response intensity	标准偏差SD_i Standard deviation
3	之前 Before	26 199.79	393.77	394.51	1.04
	之后 After	26 268.01	395.24		
4	之前 Before	25 441.96	382.15	382.29	0.20
	之后 After	25 447.03	382.44		
变异系数 Coefficient of variation[14]				0.12%	

$$CV\% = \left\{\left[\sum(n_i-1)(SD^2/\bar{d}_i^{\,2})\right]^{1/2}/\left[\sum(n_i-1)\right]\right\}\times 100\%$$

2.3 剂量率的影响

根据实验用γ辐照装置剂量率分布测试数据，绘制得出其辐照室剂量率分布等高线图。图4为该γ辐照室剂量率分布，呈现了从源板中心向四周逐渐由强转弱的动态分布。根据剂量场中剂量率的分布，进行不同辐照剂量率在相同吸收剂量下对PTFE剂量计进行的辐照；同时分别利用实验线机构定点静态辐照和利用生产线辐照容器传动动态辐照两种方式，每组方式选择4个不同位置不同剂量率下进行实验，静态辐照点位剂量率3~4 kGy/h，动态辐照点位剂量率2.7~122.2 kGy/h，每次实验确保理论吸收剂量相同。表4为ESR检测不同剂量率辐照样品的自由基响应数据对比。实验证明，不同剂量率下辐照相同剂量的剂量计剂量响应偏差为0.61%，即剂量率的大小对PTFE剂量计辐照响应的影响不明显。

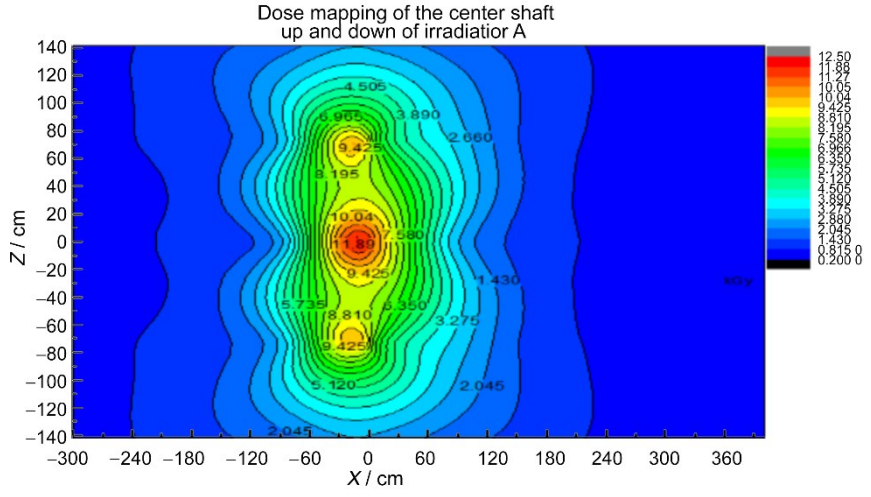

图4 γ辐照场剂量率分布图
Fig.4 Gamma irradiation field dose rate distribution map

表4 不同剂量率辐照响应对比
Table 4 Comparison of irradiation responses at different dose rates

辐照点位 Radiation point position	剂量计信号Hpp / a.u. Dosimeter signal	吸收剂量 / kGy Absorbed dose	平均剂量 / kGy Average dose	偏差[(*A*–*B*)/*B*] / % Deviation [(*A*–*B*)/*B*]
静态吸收剂量率范围3.0~4.0 kGy/h	10 053.15	14.00	A	0.61
Static absorbed dose rate range	10 043.55	13.96	13.94	
	9 929.96	13.59		
	10 124.68	14.22		
动态吸收剂量率范围2.7~122.2 kGy/h	10 106.37	14.10	B	
Dynamic absorbed dose rate range	10 047.35	13.93	13.86	
	10 001.67	13.81		
	9 936.78	13.59		

2.4 时间衰减影响测试分析

对于辐照后的剂量计其自由基浓度的变化及规律是剂量计记忆性和可追溯的一个体现，表5为一组4片PTFE剂量计一定剂量辐照后取出，在23 ℃的环境中分别静置0.5 h、2.0 h、4.0 h、6.0 h、8.0 h、24.0 h、48.0 h、96.0 h、7 d、14 d、21 d后进行ESR检测自由基响应。PTFE剂量计经过辐照后其ESR检测自由基响应Hpp值，根据公式换算出对应的时间-剂量值的关系。根据图4随放置时间的延长其自由基响应Hpp值逐渐衰减，而衰减速率也由快至慢逐渐减弱，可以看出，96.0 h后衰减速率趋于稳定。为便于衡量衰减过程，根据实验数据，将衰减过程分为三个梯段：第一梯段为衰减初期（0.5~8.0 h）；第二梯段为衰减中期（8.0~96.0 h）；第三梯段为衰减后期（96.0 h~21 d）。可以看出，衰减过程中，衰减速率不断减弱，从初期的0.620%·h^{-1}到中期的0.050%·h^{-1}到后期的0.008%·h^{-1}。图5中辐照后PTFE剂量计存放3 d的衰减变化约为10.4%，说明自由基在PTFE中稳定性高，适宜作为剂量计材料。

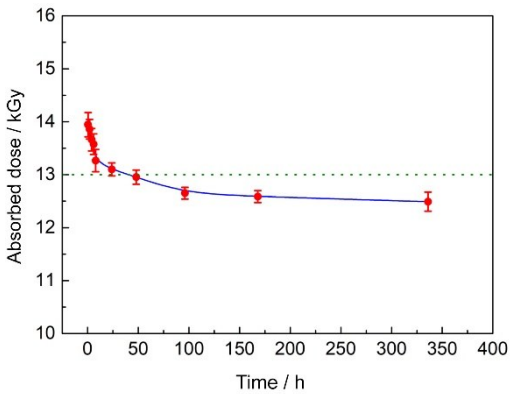

图5 辐照后不同测量时间与换算吸收剂量值的关系
Fig.5 Dose response at different measurement times after irradiation

2.5 不同射线（能量）依赖性的影响

针对电子束（EB）和γ射线两种不同能量的辐射，我们研究了PTFE剂量计是否存在不同的响应。将两组PTFE剂量计分别在10 MeV电子束和9.25×10^6 Bq ^{60}Co γ射线装置下辐照一定剂量范围，并利用ESR技术检测剂量计的响应数据，从而得到响应曲线，如图6所示。通过对比这两条响应曲线可以发现，其走向高度一致，几乎没有明显的差异。这表明，PTFE剂量计对电子束和γ射线这两种不同能量的辐射表现出几乎相同的响应，说明该剂量计对不同能量的辐射具有很强的适应性。这一结果证明了PTFE剂量计在辐射测量中的广泛适用性，尤其是在电子束和γ射线可以互换使用的场景下，显示了其优异的适应性和一致性。

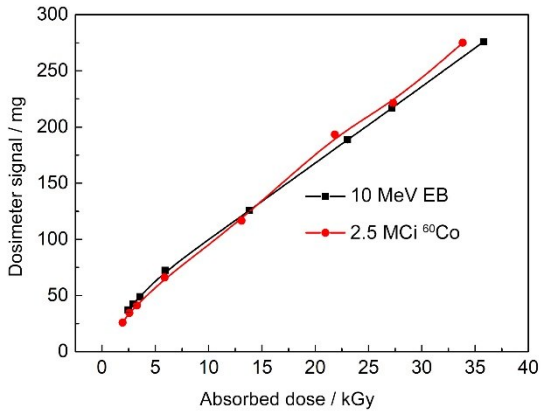

图6 PTFE不同射线的响应曲线图
Fig.6 Responses curves of PTFE to different rays

对PTFE微片剂量计的不确定度进行了详细分析（表5），其中曲线拟合分量为2.12%，剂量计重复性分量为0.20%，溯源不确定分量为1.15%，结果显示，其综合不确定度为5.02%。这一数值完全符合ISO/ASTM 52628：2020的要求，即剂量计测量系统的不确定度需小于6%（k=2）。这一结果表明，PTFE微片剂量计在辐射剂量测量中的可靠性和精确性得到了充分验证，符合国际标准的规定。较低的不确定度水平确保了PTFE剂量计能够提供稳定且准确的测量数据，这对于辐射加工及其他需要高精度剂量测量的领域尤为重要。

表5 PTFE剂量计的不确定度分析表
Table 5 Uncertainty analysis of PTFE dosimeter

不确定度分量Uncertainty components	*A* / %	*B* / %
校准曲线拟合Calibration curve fitting	2.12	
剂量计重复性PTFE dosimeter repeatability PTFE	0.20	
溯源不确定度Traceability uncertainty		1.15

续表

不确定度分量Uncertainty components	*A* / %	*B* / %
参考标准剂量计和校准剂量计在剂量上的差异 Dose difference between reference standard dosimeter and calibration dosimeter		0.34
红宝石信号修正Ruby signal correction		0.27
剂量计重量称量偏差Dosimeter weight measurement deviation		0.45
旋转影响Dosimeter weight measurement deviation	0.06	
翻转影响Flip effect	0.12	
开始温度修正Initial temperature correction		0.10
结束温度修正Final temperature correction		0.12
方和根法合并A类/B类不确定度 The square and root methods combine Class A/Class B uncertainty	2.13	1.32
合成不确定Combined uncertainty	2.51	
扩展不确定度(k=2) Expanded uncertainty	5.02	

3 结论

本研究探讨了PTFE作为固体辐射剂量计的性能及应用潜力，系统分析了其测量不确定性及适用性。研究表明，PTFE固体剂量计在1~182 kGy的剂量范围内，自由基响应与吸收剂量呈良好的正相关性，总不确定度小于5.02%，符合ISO/ASTM 52628：2020标准。通过翻转和旋转剂量计片进行测试，结果显示，剂量计内部成分分布的均匀性。此外，剂量率对剂量响应的影响不明显，偏差仅为0.61%；而自由基响应随时间逐渐衰减，96 h后趋于稳定；在电子束与γ射线辐照下表现出几乎一致的响应，展现了良好的适应性和一致性。PTFE固体剂量计具有高稳定性、广适用性和优异的计量学性能，为辐照加工行业提供了一种可靠的剂量计选择。

作者贡献声明 常靖峰和董凯丰设计了研究方案并撰写初稿；张光华、郑康海和沈蓉芳进行了实验；郑康海和沈蓉芳对实验数据进行了分析；常靖峰、董凯峰、郑康海和吴国忠进行了论文最后的审阅和定稿。所有作者均对稿件的最终版本给予了认可。

参考文献

1 高钧成, 杨元第, 张彦立. 国家剂量保证服务(NDAS)计划发展情况(一)[J]. 现代计量测试, 2001, 9(5): 9-10. DOI: 10.16428/j.cnki.cn11-4827/t.2001.05.002.
GAO Juncheng, YANG Yuandi, ZHANG Yanli. A project to development of NDAS[J]. Modern Measurement and Test, 2001, 9(5): 9-10. DOI: 10.16428/j.cnki.cn11-4827/t.2001.05.002.

2 Regulla D F, Deffner U. Dosimetry by ESR spectroscopy of alanine[J]. The International Journal of Applied Radiation and Isotopes, 1982, **33**, 1101-1114. DOI: 10.1016/0020-708X(82)90238-1.

3 Mosse D C. ESR/alanine dosimetry applied to radiation processing[J]. International Journal of Radiation Applications and Instrumentation Part C Radiation Physics and Chemistry. 1988, **31**, 413-417. DOI: 10.1016/1359-0197(88)90207-X.

4 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 使用丙氨酸-EPR剂量测量系统的标准方法: GB/T 16639—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
General Administration of Quality Supervision, National Standardization Administration. Standard method for use of an alanine - EPR dosimetry system: GB/T 16639—2008[S]. Beijing: Standards Press of China, 2009.

5 Desrosiers M F. Alanine-EPR high-dose radiation metrology[M]//Lund A, Shiotani M. Applications of EPR in radiation research. Cham: Springer International Publishing, 2014: 489-507. DOI: 10.1007/978-3-319-09216-4_13.

6 Nam J. Standardization of high doses in radiation processing[J]. IAEA bulletin, 1988, **30**: 41-43.

7 Dhanumalayan E, Joshi G M. Performance properties and applications of polytetrafluoroethylene (PTFE)—a review [J]. Advanced Composites and Hybrid Materials, 2018, **1** (2): 247-268. DOI: 10.1007/s42114-018-0023-8.

8 Shim H E, Lee B M, Lim D H, *et al*. A comparative study of gamma-ray irradiation-induced oxidation: polyethylene, poly (vinylidene fluoride), and polytetrafluoroethylene[J]. Polymers, 2022, **14**(21): 4570.

DOI: 10.3390/polym14214570.

9 Saidi-Amroun N, Mouaci S, Mezouar A, *et al*. Analysis of the gamma irradiation effect on PTFE films by FTIR and DSC[C]//2018 IEEE conference on electrical insulation and dielectric phenomena (CEIDP). Cancun, Mexico: IEEE, 2018: 430-433. DOI: 10.1109/CEIDP.2018.8544841.

10 Li R, Wu G Z, Hao Y, *et al*. Radiation degradation or modification of poly(tetrafluoroethylene) and natural polymers[M]//Radiation Technology for Advanced Materials. Amsterdam: Elsevier, 2019: 141-182. DOI: 10.1016/b978-0-12-814017-8.00005-6.

11 Dargaville T R, George G A, Hill D J T, *et al.* High energy radiation grafting of fluoropolymers[J]. Progress in Polymer Science, 2003, **28**(9): 1355-1376. DOI: 10.1016/S0079-6700(03)00047-9.

12 Vasenina I V, Savkin K P, Laput O A, *et al*. Effects of ion- and electron-beam treatment on surface physicochemical properties of polytetrafluoroethylene[J]. Surface and Coatings Technology, 2018, **334**: 134-141. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2017.11.035.

13 Standard practice for dosimetry in radiation processing: ISO/ASTM 52628: 2020(E) [S]. ISO/ASTM International, 2020.

14 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 辐射加工剂量测量不确定度评定导则: GB/T 16509—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
General Administration of Quality Supervision, National Standardization Administration. Standard guide for estimating uncertainties in dosimetry for radiation processing[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008.