



## 高能质子在散裂靶中的能量沉积计算与实验验证

周斌 于全芝 胡志良 陈亮 张雪莹 梁天骄

### Calculation and verification for energetic proton energy deposition in spallation target

Zhou Bin Yu Quan-Zhi Hu Zhi-Liang Chen Liang Zhang Xue-Ying Liang Tian-Jiao

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 052401 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20201504

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201504>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

烧蚀对强脉冲离子束在聚合物材料中能量沉积的影响

Influence of ablation on energy deposition in polymer material under irradiation of intense pulsed ion beam

物理学报. 2020, 69(11): 115202 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200212>

利用质子能损检测气体靶区有效靶原子密度的实验研究

Experimental investigation on diagnosing effective atomic density in gas-type target by using proton energy loss

物理学报. 2018, 67(4): 044101 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172028>

质子照相中基于能量损失的密度重建

Density reconstruction based on energy loss in proton radiography

物理学报. 2018, 67(20): 206101 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20181039>

100 keV质子与低高能质子在绝缘微孔中输运特性的对比分析

Simulation analyses of 100-keV as well as low and high energy protons through insulating nanocapillary

物理学报. 2018, 67(1): 013401 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20171701>

质子在碳化硅中不同深度的非电离能量损失

Non-ionization energy loss of proton in different regions in SiC

物理学报. 2018, 67(18): 182401 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20181095>

多能复合谱电子束与X射线能量沉积剖面的等效性

Equivalence of energy deposition profile in target between electron beam of multi-energy composite spectrum and X-ray

物理学报. 2017, 66(2): 025202 <https://doi.org/10.7498/aps.66.025202>

## 高能质子在散裂靶中的能量沉积计算与实验验证\*

周斌<sup>1)</sup> 于全芝<sup>2)†</sup> 胡志良<sup>1)</sup> 陈亮<sup>3)</sup> 张雪荧<sup>3)</sup> 梁天骄<sup>1)</sup>

1) (散裂中子源科学中心, 东莞 523803)

2) (中国科学院物理研究所, 北京 100190)

3) (中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000)

(2020年9月9日收到; 2020年10月27日收到修改稿)

高能质子在散裂靶中的能量沉积是散裂靶中子学研究的重要内容之一, 准确掌握高能质子在散裂靶中引起的能量沉积分布与瞬态变化是开展散裂靶热工流体设计的重要前提. 本文采用 MCNPX, PHITS 与 FLUKA 三种蒙特卡罗模拟程序, 计算并比较了高能质子入射重金属铅靶、钨靶的能量沉积分布及不同粒子对总能量沉积的占比贡献; 针对高能质子入射金属钨靶的能量沉积实验数据空白, 采用热释光探测器阵列测量了 250 MeV 质子束入射厚钨靶的能量沉积分布, 实验结果表明蒙特卡罗模拟程序在散裂靶中能量沉积的计算结果具有较高的可靠性.

**关键词:** 能量沉积, 高能质子, 散裂靶, 蒙特卡罗程序

**PACS:** 24.10.Lx, 25.40.Sc, 34.50.Bw

**DOI:** 10.7498/aps.70.20201504

## 1 引言

近年来, 我国先后启动了我国散裂中子源 (China Spallation Neutron Source, CSNS) 项目<sup>[1]</sup>, 以及未来先进核裂变能-加速器驱动次临界系统 (accelerator driven sub-critical system, ADS) 项目<sup>[2]</sup>. CSNS 项目采用 1.6 GeV 的高能质子束流轰击钨包钨靶<sup>[3]</sup>, 在靶上发生散裂反应并产生大量中子, 为中子散射及相关领域提供科学研究与实验平台; 在 ADS 项目中, 高能质子轰击重金属靶, 为 ADS 次临界反应堆提供持续中子外源. 在散裂靶中, 高能质子主要通过靶原子的激发电离过程, 以及与靶核发生散裂反应过程损失能量. 掌握高能质子在散裂靶中能量沉积的产生机制, 分析热量沉积的空间分布与瞬态变化, 是开展散裂靶热工流体设计的重要前提.

目前, 高能质子束在散裂靶中的能量沉积数据

主要通过 MCNPX<sup>[4]</sup>, PHITS<sup>[5]</sup>, FLUKA<sup>[6]</sup> 等蒙特卡罗粒子输运程序计算获得, 模拟计算的准确度依赖于程序中物理模型对各个能量沉积途径的处理及采用的计算方法. MCNPX 程序中的核子级联模型包括 BERTINI, ISABEL, CEM2K 和 INCL4, 各个模型的主要区别在于对级联相互作用过程与对核密度等的近似处理; PHITS 采用 JAM 模型作为强子级联模型, 在低能端采用 JENDL 核数据; FLUKA 采用 PEANUT 模型与 ENDF 核数据进行相关计算.

受实验条件如束流能量、束流时间等的限制, 高能质子在散裂靶中的能量沉积测量数据非常有限. 国际上采用量热法进行靶内能量沉积测量<sup>[7-12]</sup>, 即通过测量靶内各处由于能量沉积导致的温度变化而获得能量沉积分布, 但是只有束流较强时才能使靶体温度上升到可准确测量的范围. 文献<sup>[13]</sup>表明在较低束流强度条件下, 在散裂靶内布置热释光探测器 (thermoluminescence detector, TLD), 通过

\* 国家自然科学基金 (批准号: 91226107, 11575289) 和中国科学院关键技术人才项目资助的课题.

† 通信作者. E-mail: qzhyu@iphy.ac.cn

测量 TLD 的剂量分布可以分析散裂靶内的能量沉积. 本文采用 MCNPX, PHITS 与 FLUKA 三种蒙特卡罗程序, 首先计算了不同能量高能质子入射重金属铅靶、钨靶的总能量沉积及其在入射深度的分布, 并通过与已有的测量数据进行比较, 评估不同级联模型的计算结果; 其后计算了不同能量的质子在散裂靶中产生的不同类型粒子, 并获得各种粒子对总能量沉积的占比贡献; 最后利用兰州重离子加速器 [14] 提供的 250 MeV 质子束流, 采用 TLD 阵列测量 250 MeV 质子束入射钨靶的能量沉积分布, 测量结果验证了蒙特卡罗程序计算质子入射散裂靶能量沉积的可靠性.

## 2 能量沉积模拟计算

### 2.1 计算方法

高能质子在散裂靶中的能量沉积计算分别采用 MCNPX, PHITS 和 FLUKA 三种粒子输运程序开展. 在采用 MCNPX 程序进行计算时, 分别采用了 BERTINI 模型、ISABEL 模型、CEM2K 模型与 INCL4 模型作为级联模型. 在采用 PHITS 程序和 FLUKA 程序进行计算时, 则分别采用了 JAM 级联模型与 PEANUT 模型. 计算所选用的散裂靶模型为直径为 20 cm, 长度为 50 cm 的圆柱体. 铅的密度为 11.3 g/cm<sup>3</sup>, 同位素 <sup>204</sup>Pb, <sup>206</sup>Pb, <sup>207</sup>Pb 和 <sup>208</sup>Pb 的质量丰度分别为 1.4%, 24.1%, 22.1% 和 52.4%; 钨的密度为 19.0 g/cm<sup>3</sup>, 同位素 <sup>180</sup>W, <sup>182</sup>W, <sup>183</sup>W, <sup>184</sup>W 和 <sup>186</sup>W 的质量丰度分别为 0.12%, 26.5%, 14.31%, 30.64% 和 28.43%. 为了对比于国际上已有的实验数据, 验证模拟计算方法的可靠性, 质子能量分别为 800, 1000, 1200 MeV, 从圆柱体靶端面垂直入射, 质子在入射横截面上的抽样概率服从二维高斯分布, 半高宽均为 2.4 cm.

### 2.2 质子入射铅靶的能量沉积计算结果

图 1(a) 给出了 MCNPX, PHITS 与 FLUKA 三种粒子输运程序对入射能量为 800, 1000, 1200 MeV 的质子入射铅靶的总能量沉积. 同时, 图 1(a) 还给出了 Belyakov-Bodin 等 [7] 采用热电偶法在铅靶中测量到的能量沉积实验值. 可以看出, 三种粒子输运程序的计算结果相对于实验值整体偏大; 与 MCNPX 相比, PHITS 与 FLUKA 的计算结果更大; 即使采用 MCNPX 程序进行计算, 不同的级联模

型所对应的模拟结果也各不相同: 采用 ISABEL 模型的计算值较大, INCL4 与 BERTINI 模型次之, CEM2K 模型的计算结果最小. 对 1000 MeV 的质子入射能量而言, PHITS 的模拟值比测量值高约 16.1%, FLUKA 的模拟值比测量值高 15.6%, MCNPX-CEM2K 的模拟值比测量值高约 9%, 采用 CEM2K 级联模型获得的能量沉积值最接近实验测量值, 计算结果的统计误差可忽略不计.

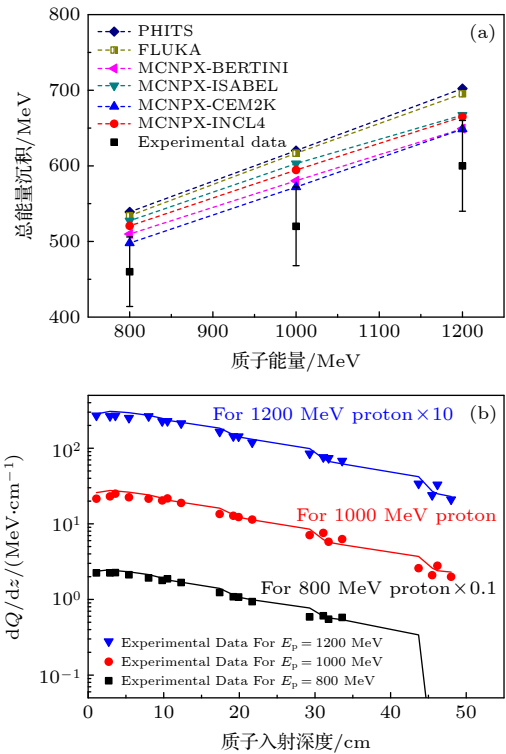


图 1 (a) 不同模拟程序对铅靶总能量沉积计算的对比; (b) 铅靶中能量沉积线性密度的轴向分布  
Fig. 1. (a) Comparison of total energy deposition in lead target calculated by different Monte Carlo codes; (b) axial distribution of linear density of energy deposition in lead target.

散裂靶单位长度中的能量沉积值被称为能量沉积线性密度. 图 1(b) 给出了采用 MCNPX-CEM2K 模型计算出的能量沉积线性密度在铅靶中的分布. 通过与文献 [7] 中的测量数据进行比较, 可以看出, 高能质子在铅靶长度方向的能量沉积线性密度计算结果与测量结果在整体上能较好符合; 随着质子入射深度的增加, 能量沉积线性密度计算值的偏差略有增大.

另外, 我们采用 MCNPX 程序中的 CEM2K 级联模型计算得到了不同能量质子入射铅靶时, 不同粒子对总能量沉积值的占比贡献, 如表 1 所示.

表 1 CEM2K 级联模型计算质子入射铅靶产生的不同粒子对总能量沉积的占比贡献

Table 1. The calculated contribution of different particles to the total energy deposition in lead target by CEM2K-Cascade-Mode.

粒子	800 MeV		1000 MeV		1200 MeV	
	沉积能量/MeV	对总能量沉积值的占比/%	沉积能量/MeV	对总能量沉积值的占比/%	沉积能量/MeV	对总能量沉积值的占比/%
全部粒子	497.9	100	572.0	100	648.7	100
质子	413.9	83.13	435.6	76.15	455.0	70.15
光子	47.5	9.54	74.8	13.08	104.0	16.03
$\pi_0$	0.2	0.04	0.4	0.06	0.5	0.08
带电 $\pi$ 介子( $\pm \pi$ )	6.6	1.33	13.7	2.39	21.9	3.37
氘	13.7	2.75	21.2	3.71	29.0	4.47
氚	5.0	1.01	8.5	1.48	12.3	1.90
氦-3	2.8	0.57	5.1	0.90	8.0	1.23
$\alpha$ 粒子	6.1	1.23	10.1	1.77	14.6	2.26
中子	2.0	0.40	2.7	0.47	3.3	0.51
初级质子电离作用	268.8	52.73	247.9	48.63	233.1	45.72

计算数据表明, 质子作为入射粒子, 通过与靶核外电子的电离、激发过程及与靶核的散裂反应过程损失能量, 对总能量沉积的贡献最大; 铅是原子序数较高的材料, 对光子的阻止本领很强, 这导致了质子与散裂靶相互作用产生的光子在靶中的能量沉积较大; 随着入射质子能量的增大, 散裂反应产生的次级带电粒子增多, 预平衡与蒸发过程的剩余核会达到更高的自旋和激发态, 这导致了质子对总能量沉积的占比逐渐减小, 轻带电粒子与光子的占比贡献逐步增大.

为了对比不同级联模型的次级粒子计算结果, 我们还采用 MCNPX 中的 BERTINI, ISABEL, INCL4 级联模型分别对 1000 MeV 质子进行了模拟, 计算结果如表 2. 从表 2 可以看出, 4 种级联模型对初级质子电离作用的能量沉积计算结果几乎相等, 这是因为初级质子的电离作用仅受到入射粒子和散裂靶的影响, 与级联过程无关; 相对其他两种级联模型, CEM2K 对次级质子沉积能量计算值最小, 对光子、氘、氚、氦-3 的能量沉积计算值最大, 这是因为 CEM2K 融合了 DUBNA 级联模型、Exciton 激子模型、GEM 蒸发模型、RAL 裂变模型、Fermi-breakup 模型及光核反应模型等, 在计算剩余核、裂变产物、轻核产生及碰撞-反弹过程时更为准确<sup>[15]</sup>.

### 2.3 质子入射钨靶的能量沉积计算结果

同样, 对不同能量的质子入射钨靶产生的能量

沉积进行计算, 图 2(a) 为采用不同计算模型获得的总能量沉积随入射质子能量的变化. 与铅靶的情况类似, PHITS 与 FLUKA 的计算结果相对于 MCNPX 各个级联模型偏大. 图 2(b) 为采用 MCNPX-CEM2K 模型计算的能量沉积线性密度分布. 在现阶段, CSNS 项目采用了钨包钨作为散裂靶, ADS 项目则采用钨镍合金靶, 然而, 由于国内外尚无高能质子入射钨靶产生的能量沉积实验数据, CSNS 与 ADS 的热工流体设计只能根据计算数据开展. 对于中高能质子入射钨靶的能量沉积计算亟需实验数据验证和可靠程度评估.

## 3 质子在钨靶中能量沉积的实验验证

### 3.1 实验

目前, 国内仅有兰州重离子加速器国家实验室的高能质子实验平台可提供能量为 250 MeV 的质子束流, 流强约为  $10^7$  proton/s. 由于束流强度偏低, 我们采用 TLD<sup>[13,16]</sup> 的测量方法, 通过测量钨靶中 TLD 的剂量分布, 从而获得能量沉积数据, 并与模拟计算的结果进行对比.

质子在钨靶中的能量沉积的验证实验示意图如图 3 所示. 整个钨靶厚度为 4 cm, 由厚度分别为 1.0, 1.0, 0.5, 0.5, 0.5, 0.5 cm 的几个靶块组成. 实验使用的 TLD 是由防化研究院生产的 GR100 系列, 其主要成分是 LiF(Mg, Ti). 在钨靶的质子入射端面放置了一层 TLD, 用于分析质子束流强度



表 2 BERTINI, ISABEL, CEM2K 与 INCL4 级联模型计算 1000 MeV 质子入射铅靶产生的不同粒子对总能量沉积值的占比贡献

Table 2. The calculated contribution of different particles to the total energy deposition in lead target by 1000 MeV protons with BERTINI, ISABEL, CEM2K, and INCL4 cascade mode.

粒子	BERTINI		ISABEL		CEM2 K		INCL4	
	沉积能量/MeV	对总能量沉积值的占比/%	沉积能量/MeV	对总能量沉积值的占比/%	沉积能量/MeV	对总能量沉积值的占比/%	沉积能量/MeV	对总能量沉积值的占比/%
全部粒子	580.3	100	603.0	100	572.0	100.00	594.5	100
质子	474.0	81.67	493.0	81.76	435.6	76.15	500.6	84.20
光子	63.7	10.98	76.2	12.64	74.8	13.08	60.7	10.21
$\pi_0$	0.3	0.05	0.3	0.05	0.3	0.06	0.3	0.04
带电 $\pi$ 介子( $\pm\pi$ )	14.9	2.56	13.9	2.31	13.7	2.39	15.5	2.60
氘	6.4	1.10	3.7	0.62	21.2	3.71	4.0	0.67
氚	3.0	0.52	1.9	0.32	8.5	1.48	1.8	0.30
氦-3	0.4	0.06	0.1	0.02	5.1	0.90	0.2	0.03
$\alpha$ 粒子	14.8	2.56	11.8	1.96	10.1	1.77	9.1	1.53
中子	2.9	0.49	1.9	0.32	2.7	0.47	2.5	0.42
初级质子电离作用	245.1	48.06	243.6	47.79	247.9	48.63	245.0	48.06

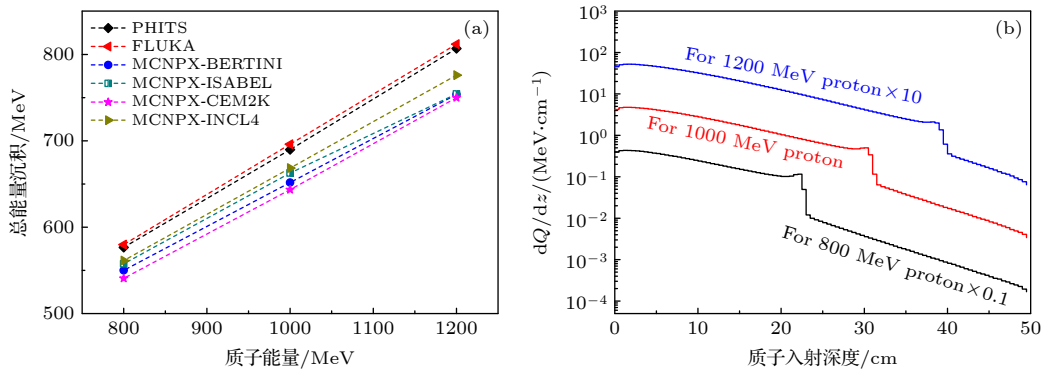


图 2 (a) 不同模拟程序对钨靶总能量沉积计算的对比; (b) 钨靶中能量沉积线性密度分布

Fig. 2. (a) Comparison of total energy deposition in tungsten target calculated by different Monte Carlo code; (b) axial distribution of linear density of energy deposition in tungsten target.

与分布. 在钨靶靶块之间布置了若干 TLD, 用于分析钨靶不同深度处的能量沉积分布. 为了固定 TLD 的位置, 加工制作了 1 mm 厚的硬铝支架, 2 个 TLD 的间距是 3 mm. 置于钨靶内部的 TLD 大多数采用“十”字分布. 为了降低加速器输出质子脉冲稳定性和重复性影响, 实验仅接受了 1 个质子脉冲束团的辐照, 这也能确保所有 TLD 都能工作在剂量线性响应区域.

经过辐照的 TLD 采用 RGD6 型热释光仪 [17] 进行数据读出. RGD6 型热释光仪通过测量 TLD 的积分光产额并与标准  $^{60}\text{Co}$  伽玛源剂量的标定光产额进行对比, 其输出量的单位是  $\mu\text{Gy}$ . 第一层 TLD 的剂量读出结果如图 4 所示. 可以看出, 在钨靶

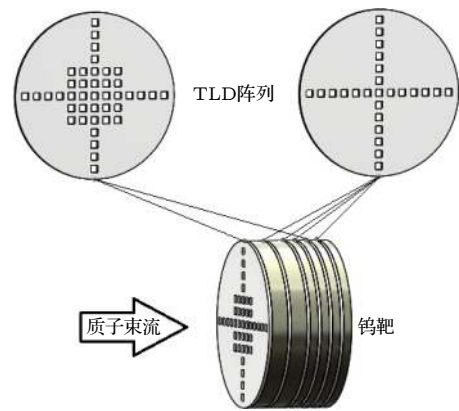


图 3 质子在钨靶中的能量沉积测量示意图

Fig. 3. Schematic of the energy deposition measurement in a tungsten target incident by protons.

几何中心水平面偏左下方区域的 TLD 剂量读数值较大, 这个区域对应着加速器输出质子束流的直接照射位置. 根据第一层 TLD 测得的质子直射区域, 结合图 3 的实验布置, 可以看出仅有 (0, -1) 位置的 TLD 在质子入射深度的各层对应位置有测量点. 我们采用 MCNPX 对单个能量为 250 MeV 的质子直射 TLD 时的总能量沉积开展了模拟计算. 具有不同线性能量转移值 (linear energy transfer, LET) 的带电粒子对 TLD 照射相同剂量后, 相对于同等剂量的  $^{60}\text{Co}$  伽玛源射线照射, TLD 的积分发光量会发生变化, 这被称为 TLD 的相对发光效率 [18]. 第一层 TLD 被能量为 250 MeV 的质子直接入射, 对应相对发光效率值 [19] 约为 1.02. TLD 测量值的单位是  $\mu\text{Gy}$ , 计算值的单位是  $\text{MeV/g}$ , 通过单位转换与发光效率修正, 对比得到在本次实验中单个质子脉冲辐照钨靶时, 到达 (0, -1) 位置 TLD 有效面积上的质子数目约为  $4.74 \times 10^6$  个.

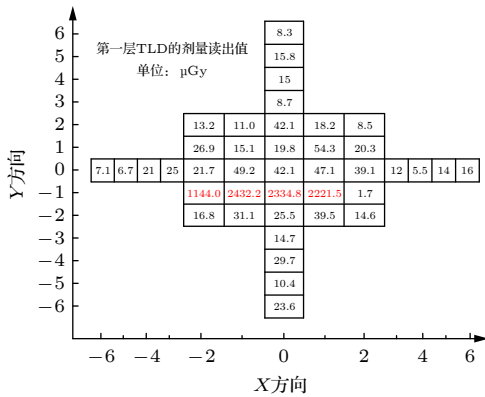


图 4 第一层 TLD 的剂量读数值  
Fig. 4. TLD dose readouts at the first layer.

### 3.2 实验结果分析

为了获得不同深度位置 TLD 的相对发光效率值, 利用 SRIM [20] 程序计算了质子在穿透不同厚度的钨靶后的剩余能量, 并转换为等效水 LET 值如图 5 所示. 根据文献 [19], 当入射粒子的等效水 LET 值在  $0.4\text{--}1.2 \text{ keV}/\mu\text{m}$  范围时, LiF(Mg, Ti) 相对发光效率约为 1.02.

由于质子是重金属钨靶中能量沉积的主要贡献者, 结合 TLD 有效面积接受的入射质子数目与相对发光效率, 可以将 TLD 剂量测量值  $\mu\text{Gy}$  进行单位转换, 得到单个质子在 TLD 中引起的能量沉积值, 即  $\text{MeV}/(\text{g}\cdot\text{proton})$ .

我们选用 MCNPX-CEM2K 级联模型对 (0, -1)

位置不同质子入射深度的 TLD 进行了模拟计算. 首先, 根据图 3 中测量实验布置的几何条件建立计算模型; 然后, 利用程序中的能量沉积记录卡对分布在钨靶内部不同质子入射深度的 TLD 中总能量沉积进行了记录. TLD 能量沉积模拟计算值与实验测量值, 以及其二者的比较如图 6 所示.

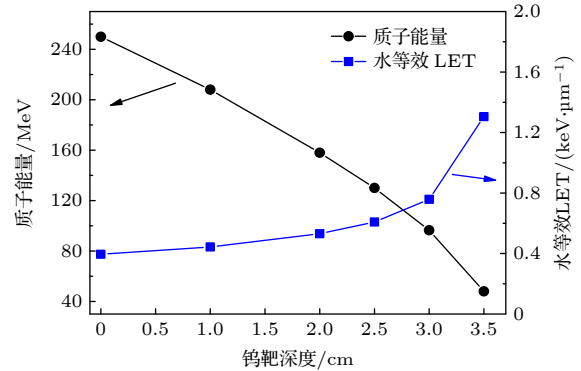


图 5 不同深度的钨靶中质子的平均能量与水等效 LET 值  
Fig. 5. Average proton energy in the tungsten target and equivalent LET in water.

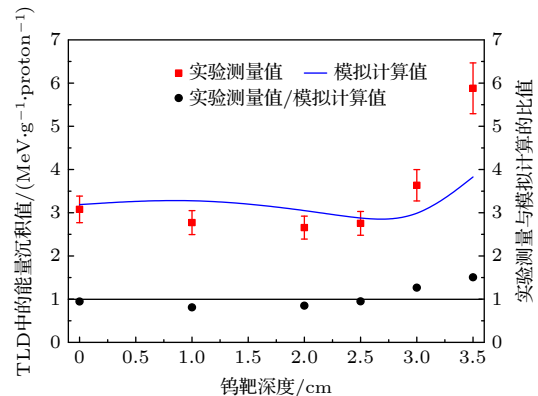


图 6 钨靶中 TLD 的能量沉积测量值与计算值  
Fig. 6. Energy deposition comparison between measurement and calculation of TLD in tungsten target.

可以看出, 总的说来, MCNPX-CEM2K 模型能够较好地模拟钨靶中热量沉积的结果. 通过细致地对比可以发现, 在钨靶较浅位置, 实验测量值比模拟计算值略小; 随着钨靶深度的增加, 测量值与模拟值的偏差逐步增大; 在质子射程末端位置, 二者相差最大. 出现较大差别的原因有以下几点: 首先, TLD 的有效面积较小, 入射质子束细微的非垂直入射会对较深钨靶位置的测量值带来较大影响; 第二, 随着钨靶深度的增加, 较高 LET 的次级带电粒子对总能量沉积的占比贡献增大, 质子对总能量沉积的贡献份额减小, 这就需要对 TLD 的相

对发光效率进行更细致的修正. 实验测量数据的误差为 10%, 主要来源于质子束斑的不规则、同批次 TLD 出厂性能的差异、剂量读出设备的系统误差等.

## 4 总 结

本文分别采用 MCNPX, PHITS 和 FLUKA 三种蒙特卡罗粒子输运程序计算了高能质子在金属散裂靶中的能量沉积分布, 通过与已有实验测量结果的比较, 表明这三种蒙特卡罗程序能够对铅靶的能量沉积进行较准确的模拟计算, 相对于实验测量值, 模拟计算的结果高约 10%—15%, 即蒙特卡罗程序的模拟计算结果能够比较保守地估计铅靶中的热量沉积. 对 3 个不同模拟程序及同一模拟程序的不同级联模型的计算结果进行比较, 表明 MCNPX 程序中的 CEM2K 级联模型的计算结果最接近实验测量值. 由于迄今国内外尚无高能质子在钨靶中的能量沉积测量数据, 我们利用热释光探测器 LiF(Mg, Ti), 测量了能量为 250 MeV 的质子束在钨靶中的能量沉积分布, 结果表明除了在质子射程末端有较大的差异外, 能量沉积的实验测量结果与 MCNPX 的计算值有较好的吻合. 通过与实验数据的比较, 验证了蒙特卡罗模拟程序对能量沉积计算具有较高的可靠性.

## 参考文献

- [1] Wang F W, Liang T J, Yin W, Yu Q Z, He L H, Tao J Z, Zhu T, Jia X J, Zhang S Y 2013 *Sci. China Phys. Mech. Astron.* **56** 2410
- [2] Zhan W L, Xu H S 2012 *Bul. Ch. Acad. Sci.* **27** 375 (in Chinese) [詹文龙, 徐珊珊 2012 中国科学院院刊 **27** 375]
- [3] Yu Q Z, Yin W, Liang T J 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 052501 (in Chinese) [于全芝, 殷雯, 梁天骄 2011 物理学报 **60** 052501]
- [4] Pelowitz D B 2005 *MCNPX User's Manual version 2.5.0* (Los Alamos: Los Alamos National Laboratory)
- [5] Tatsuhiko S, Koji N, Norihiro M, Shintaro H, Yosuke I, Shusaku N, Tatsuhiko O, Hiroshi I, Hiroshi N, Tokio F, Keisuke O, Tetsuya K, Satoshi C 2013 *J. Nucl. Sci. Technol.* **50** 913
- [6] Alfredo F, Paola R S, Alberto F, Johannes R *FLUKA: A Multi-particle Transport Code* (Italian National Institute for Nuclear Physics (INFN) and European Organization for Nuclear Research (CERN))
- [7] Belyakov-Bodin V I, Kazaritsky V D, Povarov A L, Chuvilo I V, Sherstnev V A 1990 *Nucl. Instr. Meth. A* **295** 140
- [8] Belyakov-Bodin V I, Andreev A M, Dubinsky V D, Kazaritsky V D, Povarov A L, Chuvilo I V, Sherstnev V A 1992 *Nucl. Instr. Meth. A* **314** 508
- [9] Belyakov-Bodin V I, Andreev A M, Dubinsky V D, Chuvilo I V, Sherstnev V A 1993 *Nucl. Instr. Meth. A* **335** 30
- [10] Belyakov-Bodin V I, Azhgirey I L, Degtyarev I I 2007 *Nucl. Instr. Meth. A* **572** 935
- [11] Bauer G S, Spitzer H, Holzen G V, Ni L, Hastings J 1998 *14th Meeting of the Int. Collaboration on Advanced Neutron Sources*, Uitica I L USA, June 14—19, 1998 p229
- [12] Filges D, Neef R D, Schaal H 1998 *Proc. of the Fourth Workshop on Simulating Accelerator Radiation Environments*, Konxville TN USA, September 14—16, 1998 p221
- [13] Tietze A 2001 *Ph. D. Dissertation* (Wuppertal: University of Wuppertal)
- [14] Xia J W, Zhan W L, Wei B W, Yuan Y J, Song M T, Zhang W Z, Yang X D, Yuan P, Gao D Q, Zhao H W, Yang X T, Xiao G Q, Man K T, Dang J R, Cai X H, Wang Y F, Tang J Y, Qiao W M, Rao Y N, He Y, Mao L Z, Zhou Z Z 2002 *Nucl. Instr. Meth. A* **488** 11
- [15] Detlef F, Frank G 2009 *Handbook of Spallation Research: Theory, Experiments and Applications* (Weinheim: WILEY-VCH)
- [16] Oberhofer M, Scharmann A (translated by Zhang T) 1988 *The Applied Thermoluminescence Dosimetry* (Beijing: China Metrology Press)(in Chinese) [奥伯霍弗, 沙尔曼著 (张彤译) 1988 应用热释光剂量学(北京: 中国计量出版社)]
- [17] Zhao J X, Wang F, Tang K Y, Li H J, Liu D H, Xiao W Y, Cui H 2011 *J. Nucl. Tech.* **34** 103 (in Chinese) [赵建兴, 王峰, 唐开勇, 李海俊, 刘大海, 肖无云, 崔辉 2011 核技术 **34** 103]
- [18] Massillon-JL G, Gamboa-deBuen I, Brandan M E 2007 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **40** 2584
- [19] Bilski P, Berger T, Hajek M, Reitz G 2011 *Radi Meas.* **46** 1728
- [20] James F Z, <http://www.srim.org> [2009]

# Calculation and verification for energetic proton energy deposition in spallation target\*

Zhou Bin<sup>1)</sup> Yu Quan-Zhi<sup>2)†</sup> Hu Zhi-Liang<sup>1)</sup> Chen Liang<sup>3)</sup>  
Zhang Xue-Ying<sup>3)</sup> Liang Tian-Jiao<sup>1)</sup>

1) (*Spallation Neutron Source Science Center, Dongguan 523803, China*)

2) (*Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*)

3) (*Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China*)

( Received 9 September 2020; revised manuscript received 27 October 2020 )

## Abstract

Energy deposition in spallation target induced by energetic protons is the foundation and the premise of the spallation target research. In this paper, several intra-nuclear cascade models including BERTINI, ISABEL, CEM2K and INCL4 contained in MCNPX package, together with FLUKA and PHITS Monte Carlo codes are used to calculate the energy deposition in lead (Pb) and tungsten (W) spallation target impinged by 800, 1000, and 1200 MeV protons. The contributions of different particles to the total energy deposition in the Pb target are obtained and compared with each other as well. The energy deposition distribution caused by 250 MeV protons in the W target is measured with thermoluminescence detectors (TLDs). The results indicate that the calculations from the MCNPX accord with experimental data, verifying that the Monte Carlo code has a high reliability for energy deposition simulation.

**Keywords:** energy deposition, high energy proton, spallation target, Monte Carlo simulation

**PACS:** 24.10.Lx, 25.40.Sc, 34.50.Bw

**DOI:** [10.7498/aps.70.20201504](https://doi.org/10.7498/aps.70.20201504)

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 91226107, 11575289) and the Chinese Academy of Sciences Key Technology Talent Program.

† Corresponding author. E-mail: [qzhyu@iphy.ac.cn](mailto:qzhyu@iphy.ac.cn)