

多能复合谱电子束与X射线能量沉积剖面的等效性

刘学 冉宪文 徐志宏 汤文辉

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

Liu Xue Ran Xian-Wen Xu Zhi-Hong Tang Wen-Hui

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, **66**, 025202 (2017) DOI: 10.7498/aps.66.025202

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.025202>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2017/V66/I2>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

强流电子束入射角二维分布测量方法

[A method of measuring the incidence angle of intense electron beam](#)

物理学报.2015, 64(24): 245203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.245203>

强脉冲离子束辐照薄金属靶的热力学过程研究

[Distribution and evolution of thermal field induced by intense pulsed ion beam on thin metal target](#)

物理学报.2015, 64(17): 175204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.175204>

脉冲激光辐照液滴锡靶等离子体极紫外辐射的实验研究

[Experimental study on laser produced tin droplet plasma extreme ultraviolet light source](#)

物理学报.2015, 64(7): 075202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.075202>

Kinoform 单透镜的硬X射线聚焦性能

[Focusing performance of hard X-ray single Kinoform lens](#)

物理学报.2015, 64(16): 164104 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.164104>

基于X射线塔尔博特效应的纳米光栅制作模拟研究

[Simulation of nano-grating patterning based on X-ray Talbot effect](#)

物理学报.2015, 64(11): 114102 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.114102>

# 多能复合谱电子束与X射线能量沉积剖面的等效性\*

刘学<sup>1)</sup> 冉宪文<sup>1)2)</sup> 徐志宏<sup>1)</sup> 汤文辉<sup>1)†</sup>

1)(国防科学技术大学理学院, 长沙 410073)

2)(长沙理工大学, 近地空间电磁环境监测与建模湖南省普通高校重点实验室, 长沙 410015)

(2016年5月13日收到; 2016年10月17日收到修改稿)

以模拟等效核爆X射线热-力学效应为目标, 从能量沉积剖面着手, 对给定多能复合谱电子束的入射角度进行了设计计算. 给出了不同靶材、不同温度黑体谱X射线的等效设计计算结果. 对比表明, 该设计方法适用于多种靶材、多种目标X射线的等效设计, 并且设计后的电子束能够提高模拟目标X射线的热-力学效应的逼真度.

**关键词:** 脉冲电子束, X射线, 等效性, 入射角

**PACS:** 52.59.-f, 41.50.+h, 07.77.Ka, 02.60.Pn

**DOI:** 10.7498/aps.66.025202

## 1 引言

高空核爆产生的X射线主要以软X射线为主, 具有能注量大, 持续时间短(约100 ns量级)等特点<sup>[1]</sup>. 在核爆X射线辐照下, 迎光面光学厚度内的材料将会迅速熔化、汽化甚至部分离解为等离子体, 并以很高的速度逆光喷射, 所产生的喷射冲量可引起结构的屈曲变形, 从而导致结构的整体振动失稳; 同时, 由于X射线能量沉积的非均匀性, 在材料内部会产生热击波, 热击波的传播及反射可造成材料的拉伸损伤并可导致材料出现层裂破坏<sup>[2,3]</sup>. 核爆X射线辐照所引起的这些问题统称为热-力学效应问题, 因此研究强脉冲X射线的热-力学效应对评估航天器的生存能力和导弹的突防能力以及检验抗核加固措施的有效性等方面具有十分重要的意义.

通常, 强脉冲X射线、电子束以及激光束都可以引起材料和结构的热-力学效应. 但是高能激光器的波长通常处于红外段, 其波长远大于X射线,

对于不透明介质来说其光学厚度通常接近于零, 因此在研究激光硬破坏时通常把激光作为热流边界条件处理. 与激光相比, 核爆X射线和电子束在材料中则具有相对较大的光学厚度(约为mm量级), 它们所产生的热-力学效应主要决定于光学厚度内的能量沉积剖面峰值以及剖面的梯度. 当前, 实验室内尚没有建立起可用于模拟高空核爆的软X射线源, 因此研究核爆X射线的热-力学效应主要通过低能强流脉冲电子加速器来间接完成<sup>[4]</sup>. 然而, 与核爆X射线相比, 电子束的光学厚度相对较大, 能量沉积剖面的峰值和梯度相对较小, 因此有必要从电子束的能谱和辐照方式等方面对电子束与核爆X射线的等效性进行深入研究. 对于单能电子束, 杨海亮等<sup>[5]</sup>通过研究三种单能电子束在不同入射角条件下在Al材料中的能量沉积剖面, 得出较低能量的电子束以较大角度入射靶材料能够较好地模拟核爆X射线的辐照效应. 然而对于具有多能复合谱结构的电子束, 以何种入射方式能够获得与核爆X射线相同的辐照效果, 尚缺乏针对性的研究.

\* 武器装备预研项目(批准号: 51311020201)和长沙理工大学近地空间电磁环境监测与建模湖南省普通高校重点实验室开放基金(批准号: 20150104)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: 18175121477@163.com

最近, 胡杨等<sup>[6]</sup>的研究结果表明, 在多能复合谱电子束热-力学效应打靶试验中, 阳极靶面光斑范围内电子束存在入射角度的分布. 该入射角度的分布必然对多能谱电子束在靶材料内的能量沉积剖面产生较大的影响. 本文将从多能复合谱电子束入射角度分布概率出发, 探讨多能复合谱电子束与核爆 X 射线热-力学效应方面等效的可能性.

## 2 多能复合谱电子束入射角度分布方案

### 2.1 多能复合谱电子束与 X 射线能量沉积的差异

X 射线与物质相互作用主要有光电效应、散射效应和电子对效应, 而电子与物质相互作用机理则主要为弹性碰撞和非弹性碰撞. 因此, 高能注量的 X 射线与电子束在材料中的能量沉积剖面存在

明显差异. 图 1(a) 给出了垂直入射和能注量均为  $200 \text{ J/cm}^2$  条件下, 采用 MCNP 计算得到的某电子束复合谱和等效黑体温度为  $kT = 3 \text{ keV}$  ( $k$  为玻尔兹曼常量,  $T$  为温度) 的 X 射线在金属 Al 中的能量沉积剖面, 图 1(b) 给出了相应的电子束复合能谱.

对比可以看出, 尽管两者能注量相同, 但两者在靶材料内部的能量沉积剖面却存在明显差异: X 射线绝大部分能量沉积在  $0\text{--}400 \mu\text{m}$  厚度范围的迎光面, 能量沉积峰值约为  $7.25 \text{ kJ/g}$ , 单位质量沉积的能量随着入射深度的增加急剧下降; 而电子束的大部分能量则沉积在  $0\text{--}800 \mu\text{m}$  厚度范围的迎光面表层厚度内, 能量沉积峰值仅为  $1.38 \text{ kJ/g}$ , 单位质量沉积的能量随着入射深度的增加而缓慢地下降. 显然, 如果在电子加速器上采用该复合谱电子束模拟等效黑体温度  $kT = 3 \text{ keV}$  的 X 射线在金属 Al 内部的热-力学效应, 必然会导致金属 Al 中热击波压力和汽化反冲比冲量低于 X 射线辐照下的相应数值, 进而导致评估和检验结论出现偏差.

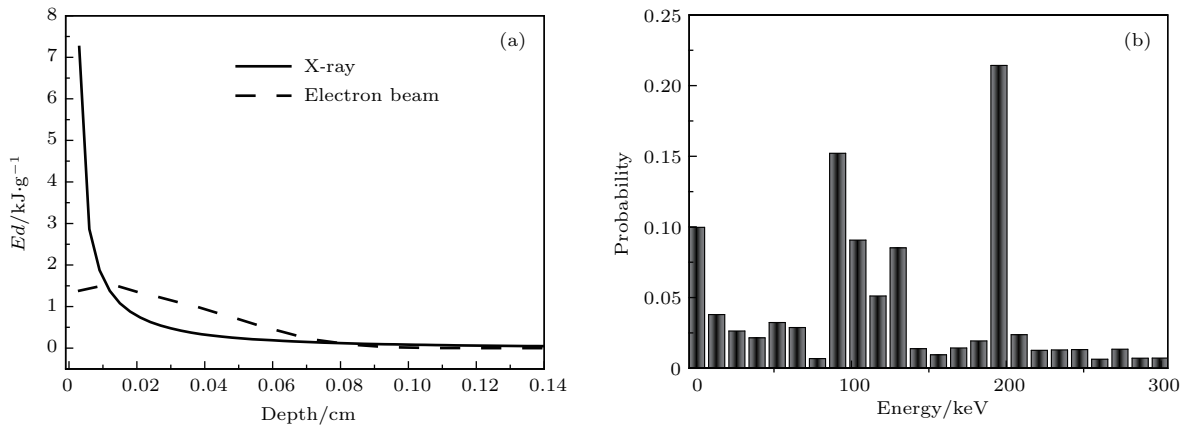


图 1 电子束与 X 射线在 Al 材料内部的能量沉积 (a) 电子束与 X 射线能量沉积剖面对比; (b) 多能复合谱电子束  
Fig. 1. Energy deposition of electron beam and X-ray in Al: (a) Comparison about energy deposition of electron beam and X-ray in material Al; (b) multi-energy composite spectrum electron beam.

### 2.2 多能复合谱电子束能量沉积剖面随入射角的变化规律

电子束入射角是指电子束与靶材料相互作用时电子的入射方向与靶材料迎光面法向方向间的夹角. 杨海亮等<sup>[5]</sup>的研究表明入射角对单能电子束的能量沉积剖面有较大影响. 鉴于此, 有必要考察入射角对多能复合谱电子束在材料中能量沉积剖面的影响. 图 2 给出了图 1(b) 所示的多能复合谱电子束在能注量  $200 \text{ J/cm}^2$  条件下, 以多个不同角度入射金属铝时产生的能量沉积剖面. 可以看

出, 随着入射角度的增加, 能量沉积峰值逐渐变大并且越来越靠近迎光面, 整个能量沉积剖面变得更为陡峭. 其整体变化趋势与单能电子束随入射角度的变化趋势相同. 然而, 当电子束入射角增大到  $80^\circ$  时, 尽管其能量沉积峰值接近  $3.2 \text{ kJ/g}$ , 但仍小于 X 射线(等效黑体温度为  $kT = 3 \text{ keV}$ ) 能量沉积峰值的二分之一, 这说明采用多能复合谱电子束不能简单地通过增加入射角度来模拟核爆 X 射线的热-力学效应. 但是, 理论计算表明可以通过提升电子束的能注量来提高电子束在靶材料迎光面的能量沉积峰值, 以使电子束打靶试验的能量沉积峰值

接近核爆 X 射线的能量沉积峰值. 这就需要对打靶电子束的能谱结构进行优化.

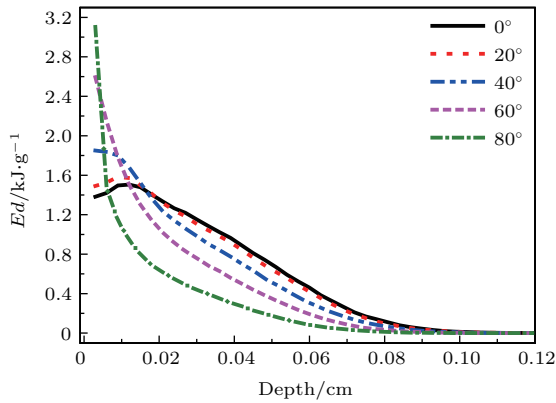


图2 电子束以不同入射角在 Al 内部的能量沉积  
Fig. 2. Energy deposition of electron beam with different incident angles in Al.

### 2.3 多能复合谱电子束多角度入射的方案设计

如前所述, 多能复合谱电子束打靶时存在角度分布. 若能调整电子束以多角度的方式入射靶材, 就有可能提升多能复合谱电子束与核爆 X 射线对靶材热-力学效应的等效性. 研究表明, 该方案存在可行性, 并可用于指导电子束打靶热-力学效应试验. 其具体方案如下.

将材料均分为  $n$  层网格 (见图 3), 电子束和 X 射线的能注量分别为  $\Phi_e$  和  $\Phi_p$ , 在第  $j$  层网格材料内部形成的能量沉积值分别为  $E_j^e$  和  $E_j^p$ . 电子束入射角度范围为  $0^\circ-80^\circ$ , 平均离散为  $m$  组. 电子束以  $\theta_i$  角度入射, 在第  $j$  层网格材料产生的能量沉积值为  $E_{ij}$ , 且以  $\theta_i$  角度入射的概率为  $p_i$ . 这样电子束按照某种角度概率分布入射时, 在第  $j$  层网格材料产生的总能量沉积值为

$$E_j^e = \sum_{i=1}^m E_{ij} p_i \quad (j = 1, 2, 3 \cdots n). \quad (1)$$

假定能注量对能量沉积的影响近似满足正相关性, 则可将  $\Phi_e$  和  $\Phi_p$  统一起来, 用变量  $\alpha$  表示两者的比值, 则

$$\alpha = \Phi_e / \Phi_p. \quad (2)$$

若电子束与 X 射线在材料中产生的能量沉积剖面相同, 则应有

$$\alpha E_j^e = E_j^p \quad (j = 1, 2, 3 \cdots n). \quad (3)$$

这样, 优化目标即为求出同时满足 (1) 式和 (3) 式的  $p_i (i = 1, 2, 3, \cdots, m)$ . 另外, 由于  $p_i$  为概率, 本身

需要满足约束条件:

$$0 \leq p_i \leq 1 \quad (i = 1, 2, 3, \cdots, m), \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^m p_i = 1. \quad (5)$$

令

$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} E_{1,1} & E_{1,2} & \cdots & E_{1,n} \\ E_{2,1} & E_{2,2} & \cdots & E_{2,n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ E_{m,1} & E_{m,2} & \cdots & E_{m,n} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ \vdots \\ p_m \end{bmatrix}, \quad \mathbf{d} = \begin{bmatrix} E_1^p \\ E_2^p \\ \vdots \\ E_n^p \end{bmatrix}. \quad (6)$$

(1) 式和 (3) 式可表示为

$$\alpha \mathbf{E}^T \mathbf{X} = \mathbf{d}. \quad (7)$$

其约束条件为 (4) 式和 (5) 式. 因此, 问题转化为求解 (7) 式满足约束条件 (4) 式和 (5) 式的解.

一般情况下, 线性约束条件下的非线性优化问题不存在理论上的精确解, 但可通过模拟退火算法 [7] 使得近似解满足  $\|\alpha \mathbf{E}^T \mathbf{X} - \mathbf{d}\|_{\min}^2$ , 从而找出满足约束条件的最优解.

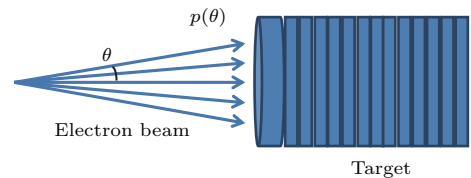


图3 电子束入射角度概率分布示意图  
Fig. 3. A diagram about incident angle probability distribution of electron beam.

### 3 具体算例

利用多能复合谱电子束多角度入射设计方案, 借助于 MCNP 和 Matlab 软件, 对 Al, Cu 和 Ta 三种材料作为靶材时的等效电子束进行了设计. 设计目标是能注量  $\Phi_p = 200 \text{ J/cm}^2$ , 等效温度分别为  $kT = 3$  和  $5 \text{ keV}$  的黑体 X 射线. 实际计算中, 材料划分为 100 层网格 (即  $n = 100$ ), 入射角度每隔  $5^\circ$  离散为一组, 共计 17 组 (即  $m = 17$ ).

图 4—图 9 给出了相应的电子束角度分布谱及相应的能量沉积剖面, 其中 X 射线能量沉积计算方法可参考文献 [8].

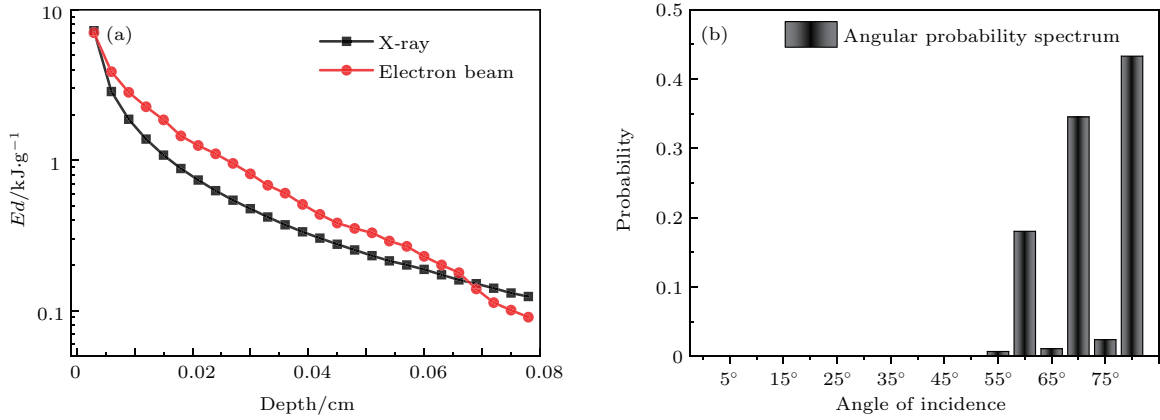


图4 电子束在Al材料内的能量沉积剖面优化结果, X射线  $kT = 3 \text{ keV}$ ,  $\Phi_p = 200 \text{ J/cm}^2$  (a) 电子束与X射线能量沉积剖面对比, 电子束能注量  $\Phi_e = 470 \text{ J/cm}^2$ ; (b) 电子束入射角度概率谱  
 Fig. 4. Energy deposition of electron beam in Al, X-ray with  $kT = 3 \text{ keV}$ ,  $\Phi_p = 200 \text{ J/cm}^2$ : (a) Comparison about energy deposition of electron beam and X-ray, energy density of electron beam  $\Phi_e = 470 \text{ J/cm}^2$ ; (b) incident angle probability spectrum of electron beam.

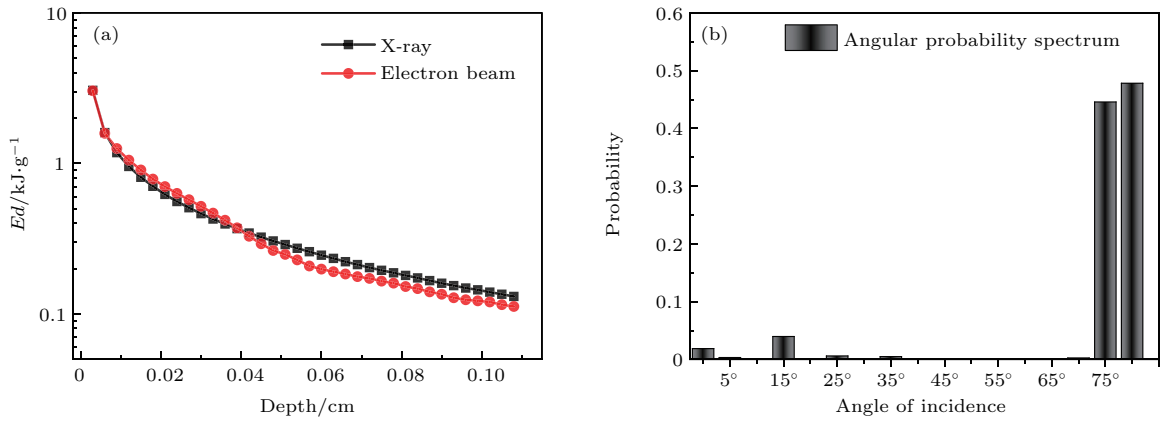


图5 电子束在Al材料内的能量沉积剖面优化结果, X射线  $kT = 5 \text{ keV}$ ,  $\Phi_p = 200 \text{ J/cm}^2$  (a) 电子束与X射线能量沉积剖面对比, 电子束能注量  $\Phi_e = 200 \text{ J/cm}^2$ ; (b) 电子束入射角度概率谱  
 Fig. 5. Energy deposition of electron beam in Al, X-ray with  $kT = 5 \text{ keV}$ ,  $\Phi_p = 200 \text{ J/cm}^2$ : (a) Comparison about energy deposition of electron beam and X-ray, energy density of electron beam  $\Phi_e = 200 \text{ J/cm}^2$ ; (b) incident angle probability spectrum of electron beam.

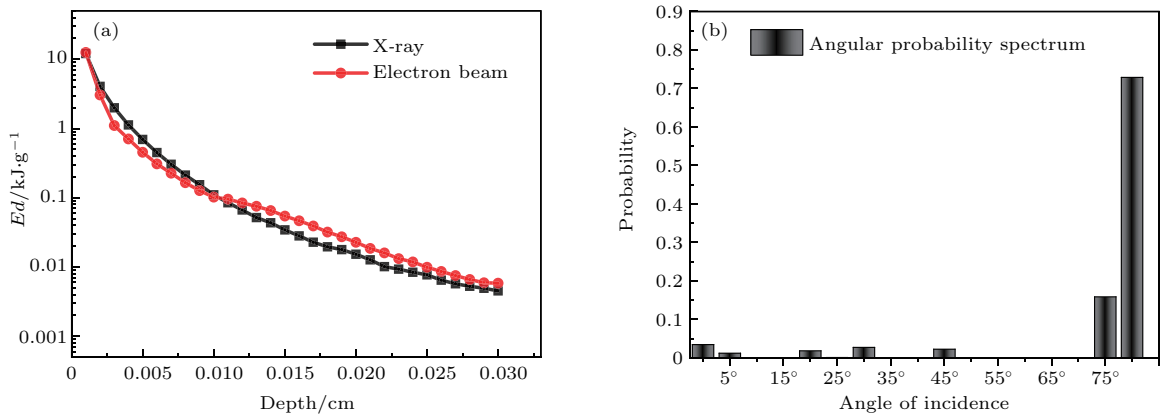


图6 电子束在Cu材料内的能量沉积剖面优化结果, X射线  $kT = 3 \text{ keV}$ ,  $\Phi_p = 200 \text{ J/cm}^2$  (a) 电子束与X射线能量沉积剖面对比, 电子束能注量  $\Phi_e = 422 \text{ J/cm}^2$ ; (b) 电子束入射角度概率谱  
 Fig. 6. Energy deposition of electron beam in Cu, X-ray with  $kT = 3 \text{ keV}$ ,  $\Phi_p = 200 \text{ J/cm}^2$ : (a) Comparison about energy deposition of electron beam and X-ray, energy density of electron beam  $\Phi_e = 422 \text{ J/cm}^2$ ; (b) incident angle probability spectrum of electron beam.

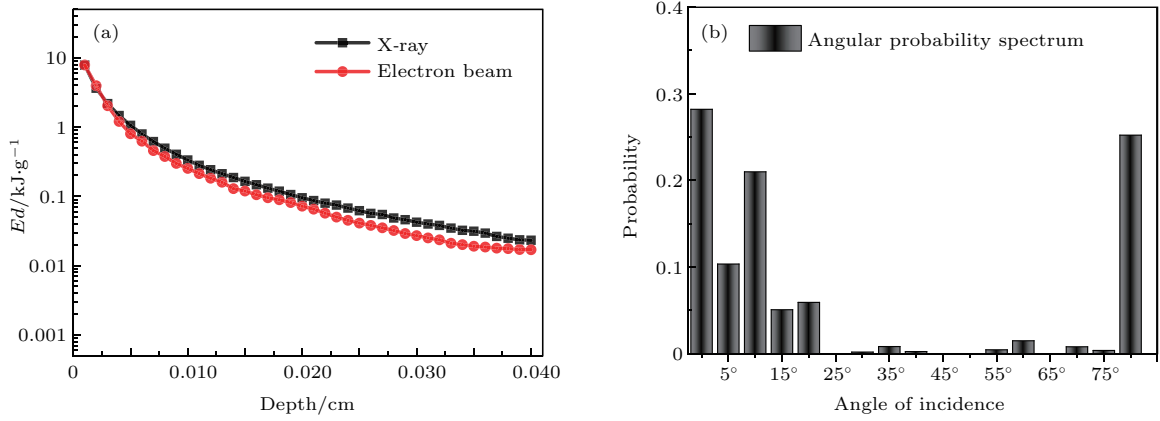


图7 电子束在Cu材料内的能量沉积剖面优化结果, X射线  $kT = 5 \text{ keV}$ ,  $\Phi_p = 200 \text{ J/cm}^2$  (a) 电子束与X射线能量沉积剖面对比, 电子束能注量  $\Phi_e = 200 \text{ J/cm}^2$ ; (b) 电子束入射角度概率谱

Fig. 7. Energy deposition of electron beam in Cu, X-ray with  $kT = 5 \text{ keV}$ ,  $\Phi_p = 200 \text{ J/cm}^2$ : (a) Comparison about energy deposition of electron beam and X-ray, energy density of electron beam  $\Phi_e = 200 \text{ J/cm}^2$ ; (b) incident angle probability spectrum of electron beam.

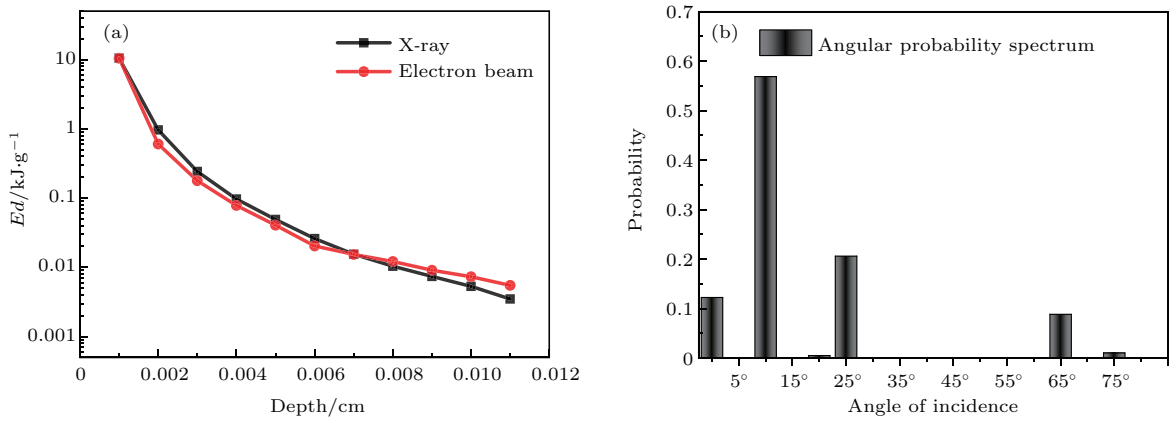


图8 电子束在Ta材料内的能量沉积剖面优化结果, X射线  $kT = 3 \text{ keV}$ ,  $\Phi_p = 200 \text{ J/cm}^2$  (a) 电子束与X射线能量沉积剖面对比, 电子束能注量  $\Phi_e = 495 \text{ J/cm}^2$ ; (b) 电子束入射角度概率谱

Fig. 8. Energy deposition of electron beam in Ta, X-ray with  $kT = 3 \text{ keV}$ ,  $\Phi_p = 200 \text{ J/cm}^2$ : (a) Comparison about energy deposition of electron beam and X-ray, energy density of electron beam  $\Phi_e = 495 \text{ J/cm}^2$ ; (b) incident angle probability spectrum of electron beam..

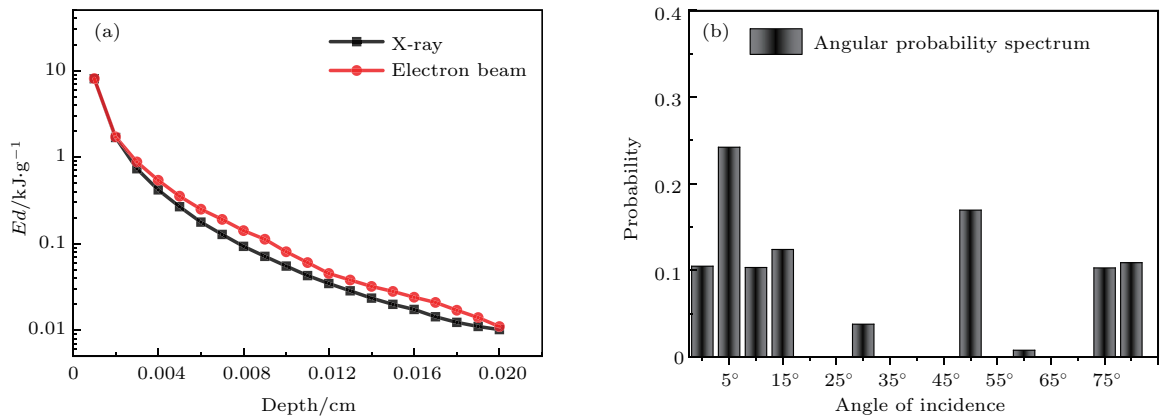


图9 电子束在Ta材料内的能量沉积剖面优化结果, X射线  $kT = 5 \text{ keV}$ ,  $\Phi_p = 200 \text{ J/cm}^2$  (a) 电子束与X射线能量沉积剖面对比, 电子束能注量  $\Phi_e = 320 \text{ J/cm}^2$ ; (b) 电子束入射角度概率谱

Fig. 9. Energy deposition of electron beam in Ta, X-ray with  $kT = 5 \text{ keV}$ ,  $\Phi_p = 200 \text{ J/cm}^2$ : (a) Comparison about energy deposition of electron beam and X-ray, energy density of electron beam  $\Phi_e = 320 \text{ J/cm}^2$ ; (b) incident angle probability spectrum of electron beam.

对比图 4—图 9 中的能量沉积剖面可知, 采用等效设计后的多角度入射电子束谱能够有效地提高模拟 X 射线热-力学效应的逼真度. 无论是低原子序数的 Al、中原子序数的 Cu 还是高原子序数的 Ta, 在能量沉积峰值和变化梯度方面均有较好的一致性. 然而, 一致性的实现是以提高打靶电子束的能注量为代价的, 表 1 给出了模拟不同 X 射线的电子束等效入射角和能注量. 这说明, 对于高能注量核爆 X 射线辐照的热-力学响应实验室模拟评估, 必须采用能注量更高的打靶电子束.

表 1 不同黑体 X 射线 (能注量  $\Phi_p = 200 \text{ J/cm}^2$ ) 条件下优化后的电子束对于不同材料的等效入射角度和能注量

Table 1. Under the condition of different X-rays (energy density  $200 \text{ J/cm}^2$ ), the equivalent incident angle and energy density about different materials of electron beam after optimization.

	$kT = 3 \text{ keV X-ray}$		$kT = 5 \text{ keV X-ray}$	
	等效入射角	$\Phi_e/\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$	等效入射角	$\Phi_e/\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$
Al	72.5°	470	72.9°	200
Cu	68.1°	422	27.1°	200
Ta	29.9°	495	30.6°	320

## 4 结 论

以等效模拟核爆 X 射线热-力学效应为目标, 从能量沉积剖面着手, 对多能复合谱电子束的入射角度分布进行了设计. 该设计方法具有较好的适用性, 可适用于多种原子序数、多种温度的黑体 X 射

线等效电子束的设计. 并且设计后的电子束与目标 X 射线在能量沉积峰值、变化梯度等方面具有较好的一致性, 能够提高电子束模拟目标 X 射线在靶材料中所产生热-力学效应的逼真度.

## 参考文献

- [1] Qiao D J 2012 *Pulsed X-ray Thermal-mechanical Effects and Fundament of Nuclear Hardening Techniques* (Beijing: National Defense Industry Press) p1 (in Chinese) [乔登江 2012 脉冲 X 射线热力学效应及加固技术基础 (北京: 国防工业出版社) 第 1 页]
- [2] Tang W H, Zhang R Q 1997 *J. Phys.* **C3** 623
- [3] Tang W H, Zhang R Q 1997 *High Power Laser and Particle Beams* **9** 618 (in Chinese) [汤文辉, 张若棋 1997 强激光与粒子束 **9** 618]
- [4] Qiu A C 2000 *Eng. Sci.* **2** 24 (in Chinese) [邱爱慈 2000 中国工程科学 **2** 24]
- [5] Yang H L, Qiu A C, Zhang J S, Huang J J, Sun J F 2002 *High Power Laser and Particle Beams* **14** 778 (in Chinese) [杨海亮, 邱爱慈, 张嘉生, 黄建军, 孙剑锋 2002 强激光与粒子束 **14** 778]
- [6] Hu Y, Yang H L, Sun J F, Sun J, Zhang P F 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 245203 (in Chinese) [胡杨, 杨海亮, 孙剑锋, 孙江, 张鹏飞 2015 物理学报 **64** 245203]
- [7] Gan Y A, Tian F, Li W Z, Li M S, Chen B Z, Zhen D B, Hu Y Q, Gu J F, Guo Y H, Qian S D, Xue H C 1999 *Operational Research* (Beijing: Tsinghua University Press) p174 (in Chinese) [甘应爱, 田丰, 李维铮, 李梅生, 陈秉正, 郑大本, 胡运权, 顾基发, 郭耀煌, 钱颂迪, 薛华成 1999 运筹学 (北京: 清华大学出版社) 第 174 页]
- [8] Tang W H, Zhang R Q, Zhao G M 1995 *Chinese J. High Pressure Physics* **9** 107 (in Chinese) [汤文辉, 张若棋, 赵国民 1995 高压物理学报 **9** 107]

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

Liu Xue<sup>1)</sup> Ran Xian-Wen<sup>1)2)</sup> Xu Zhi-Hong<sup>1)</sup> Tang Wen-Hui<sup>1)†</sup>

1) (College of Science, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

2) (Monitoring and Modeling of Electromagnetic Environment in Near Space Key Laboratory of General Universities of Hunan Province, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410015, China)

( Received 13 May 2016; revised manuscript received 17 October 2016 )

## Abstract

It has great significance to study the thermal-mechanical effects of X-ray in assessing the viability of space-crafts, the penetration ability of missiles and testing the effectiveness of the anti-nuclear reinforcement measures. However, it is rather difficult to construct a suitable X-ray source in laboratory. During recent decades, pulsed electron beam with multi-energy composite spectrum has become a most important simulation source of X-ray to study its thermal-mechanical effects. And energy deposition profile in target material is the basis for studying the thermo-mechanical effects. However, under the same incident conditions, the energy deposition profile of pulsed electron beam with multi-energy composite spectrum in target material is extremely different from X-ray's, and the equivalence between the two beams is quite low. Thus, it is very important to adjust the energy spectrum and the incident mode of pulsed electron beam so as to improve their equivalence. In this paper, we use the energy deposition profiles of electron beam and X-ray in different kinds of material. MCNP is used to calculate their energy deposition profiles in target materials. Two kinds of blackbody X-rays with the equivalent temperatures of 3 and 5 keV and energy density of 200 J/cm<sup>2</sup> are chosen for an optimization target. Aluminum, copper and titanium are chosen as the target materials. Based on the change law of electron beam's energy deposition profile when the electron beam hits the target material at different incident angles, a theoretical model is established. Then, taking advantage of simulated annealing algorithm, we use the MATLAB to carry out numerical calculation and finally the numerical optimization results about the incident angle spectrum and energy density of electron beam are obtained. After optimization, the energy deposition of pulsed electron beam with multi-energy composite spectrum is well adjusted. The peak energy deposition and change of gradient of electron beam are of wonderful consistency with X-ray's. The equivalence of pulsed electron beam with multi-energy composite spectrum in simulating X-ray is also effectively improved. However, the energy density of adjusted pulsed electron beam should be much higher than 200 J/cm<sup>2</sup>. Electron beam designed by this paper can be used to better simulate the thermal-mechanical effects of X-ray in different kinds of materials.

**Keywords:** pulsed electron beam, X-ray, equivalence, angle of incidence

**PACS:** 52.59.-f, 41.50.+h, 07.77.Ka, 02.60.Pn

**DOI:** 10.7498/aps.66.025202

\* Project supported by the Chinese Defense Advance Research Program of Science and Technology, China (Grant No. 51311020201) and Monitoring and Modeling of Electromagnetic Environment in Near Space of Institutes of Technology of Changsha Open Foundation of Key Laboratory of General Colleges and Universities of Hunan Province, China (Grant No. 20150104).

† Corresponding author. E-mail: [18175121477@163.com](mailto:18175121477@163.com)