



·脉冲功率技术·

## 压缩等离子体流脉冲能量密度修正方法<sup>\*</sup>

屈 苗<sup>1,2</sup>, 颜 莎<sup>2</sup>

(1. 中核战略规划研究总院有限公司 管理研究所, 北京 100048; 2. 北京大学 重离子物理研究所, 北京 100871)

**摘 要:** 介绍了压缩等离子体流能量密度诊断存在的问题, 基于能量的耗散走向分析及热传导计算模型, 针对汽化过程对诊断带来的误差, 给出了一种基于测量的质量损失, 通过表面退行的有限元计算反推损失相同质量所需输入能量的能量密度修正方法, 并对能量密度修正进行了评估, 通过此方法得到的修正能量密度与实验结果相吻合, 但要获得更准确的能量密度, 还需针对屏蔽等离子体、反冲应力波等因素进行能量密度修正, 或开发出更准确的能量密度诊断方法。

**关键词:** 压缩等离子体流; 脉冲能量密度诊断; 脉冲能量密度修正; 质量损失; 有限元

中图分类号: O536

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202335.220182

## Correction method for pulse energy density of compression plasma flows

Qu Miao<sup>1,2</sup>, Yan Sha<sup>2</sup>

(1. China Institute of Nuclear Industry Strategy, Beijing 100048, China;

2. Institute of Heavy Ion Physics, Peking University, Beijing 100871, China)

**Abstract:** The problems of energy density diagnosis of compression plasma flows are introduced in this paper. Based on the energy dissipation analysis and the heat conduction calculation model, aiming at the errors caused by vaporization, an energy density correction method based on measured mass loss is proposed, and the input energies required to lose the same mass are deduced through the finite element calculation of surface receding. The energy density correction is evaluated, and the corrected energy density obtained by this method is in good agreement with the experimental results. However, to obtain more accurate energy density, it is necessary to correct the energy density for shielded plasma and recoil stress wave or develop a more accurate energy density diagnosis method.

**Key words:** compression plasma flow, pulse energy density diagnosis, pulse energy density correction, mass loss, finite element method

在 ITER 实验堆及未来商业示范堆 (DEMO) 中, 偏滤器表面盔甲材料受到等离子体边缘局域模 (ELMs)<sup>[1]</sup> 产生的瞬态热流的辐照, 出现开裂、再结晶、熔融、烧蚀等多种脉冲损伤<sup>[2-4]</sup>。科学家们开发了脉冲等离子体、脉冲离子束、脉冲电子束、脉冲激光束等<sup>[5-7]</sup> 多种脉冲粒子束装置来进行瞬态热流下偏滤器材料的热响应研究。瞬态热流对材料造成的热响应, 主要由脉冲束流的能量沉积和材料特性决定。脉冲粒子束能量密度是决定脉冲束流的能量沉积情况的重要参数, 也是影响材料表面温升及材料响应的参数之一。因此, 在脉冲粒子束辐照测试实验中, 准确测量入射到靶表面的脉冲束流能量密度是非常有必要的。

脉冲束流能量密度的诊断方法主要分成两大类: 一类是电压电流积分法换算得到束流的脉冲能量密度, 如对脉冲电子束通常用此方法; 另一类是量热法测沉积的脉冲能量密度, 主要有量热器测量<sup>[8]</sup> 和红外诊断<sup>[9]</sup> 两种方式。对于脉冲等离子体或脉冲离子束, 输入电压电流积分法难以准确估计电压和电流之间的时间延迟, 这会影响到测量结果的准确性。目前通常的测量方法是使用量热法测量沉积在靶上的热量, 从而得到沉积的脉冲能量密度。对于测靶上沉积能量的方法, 若测试靶发生烧蚀汽化, 由于未计入汽化烧蚀等带走的能量, 所测的能量密度结果偏低, 需要进行修正。由于脉冲等离子体的脉宽时间较短、功率密度较高, 同时这类束流的流强也较大, 脉冲能量在

\* 收稿日期: 2022-06-01; 修订日期: 2022-08-26

基金项目: 国家磁约束核聚变研究计划专项 (2013GB109004)

联系方式: 屈 苗, qum@cinis.com.cn。

通信作者: 颜 莎, syan@pku.edu.cn。

很短的时间内沉积在靶表面,导致表面温度有可能超过测试靶材料的沸点,使得材料发生汽化或者烧蚀过程,因此需要对测量的结果进行修正。本文分析了压缩等离子体流脉冲能量密度的诊断及其存在的问题,通过分析建立脉冲辐照下能量密度的修正方法和建立热传导计算模型,针对汽化过程对压缩等离子体流脉冲能量密度进行了修正,并对当前的修正做了评估。

## 1 脉冲辐照实验及问题的提出

### 1.1 压缩等离子体流简介

压缩等离子体流(CPF)是类稳态等离子体加速器中的磁等离子体压缩机(MPC)产生的强脉冲低温等离子体,具有高速度、高能量密度、较长的放电时间和能使样品达到较高温度等特点。该装置位于白俄罗斯首都明斯克的国家科学院传热传质研究所,是白俄罗斯科学家根据稠密等离子体流的 Morozov 理论开发的<sup>[10]</sup>,可以通过改变电容器中的电压或电极与样品表面之间的距离来改变能量密度。加速器靶室的真空单元的直径为 0.3 m,长为 1 m。MPC 的结构主要包括阴极、阳极、绝缘层、封壳、气孔等<sup>[11]</sup>,中心椎体为阴极,其中心沿轴开孔,四周的 8 根铜棒为阳极(图 1(a))<sup>[12]</sup>。等离子体流压缩程度最大的位置在距离束流出口 6~10 cm 处,此时束流的直径约 1 cm,经过这个区域后,等离子体流开始发散,半角在 5~15°<sup>[13]</sup>。压缩等离子体流(CPF)辐照靶材料时,伴随着冲击压缩等离子体层(SCPL)的形成(图 1(b))<sup>[14]</sup>。产生等离子体的气体通常用氢气或者氮气(气体压强为 0.1~0.35 MPa)。压缩等离子体流的参数如下:脉宽时间约 0.1 ms,名义能量密度为 0.09~1.20 MJ/m<sup>2</sup>,电子浓度为 4×10<sup>17</sup>~7×10<sup>17</sup> cm<sup>-3</sup>,电子温度为 2~3 eV,氦离子能量约为 1.25 keV<sup>[15]</sup>,等离子体流的压强为 1.5 MPa。

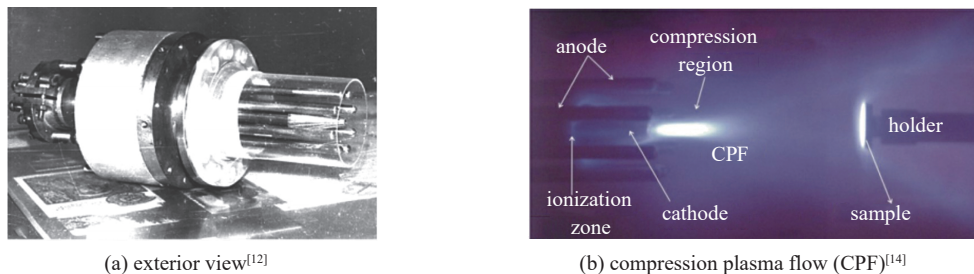


Fig. 1 Compact magnetoplasma compressor and compression plasma flow

图 1 紧凑型磁等离子体压缩机和产生的压缩等离子体流

### 1.2 辐照实验测试

本实验中将  $\phi 12 \text{ mm} \times 0.6 \text{ mm}$  钨样品经压缩氢等离子体流单次脉冲辐照,脉冲持续时间 0.1 ms,样品测试位置束流直径为 3~4 cm,以名义平均能量密度  $\epsilon_n$  为主要参数,分别设为 0.3、0.4、0.5、0.95、1.05、1.15、1.20 MJ/m<sup>2</sup>。实验中通过改变设备电极上的电压来改变输出束流的能量密度,然而对于材料科学,通常需要考虑材料吸收的能量密度,即束流沉积到样品表面层的全部能量,但要直接得到这个能量密度非常困难,本实验的脉冲能量密度是采用量热法测得。用面积 1 cm<sup>2</sup>、厚 2 mm 的铜样品作靶材料,在脉冲加载结束后,使用热电偶测量靶材背面的最高温升,计算出束流在靶上沉积的总能量,再换算得到平均能量密度即上文的名义平均能量密度。这个能量密度的测量结果没有包含汽化或烧蚀过程带走的部分能量,实际上测量的是靶上的剩余能量。

### 1.3 名义能量密度的问题

钨在名义能量密度 0.3 MJ/m<sup>2</sup>(脉宽 0.1 ms)的 CPF 单脉冲辐照下表面明显发生了熔融,表面分布的重凝液滴(图中红圈标注)表明有可能发生了烧蚀(图 2)。但是通过 Comsol Multiphysics 计算不同能量密度下的表面温升随时间的演化,可以看到输入能量密度在 0.3 MJ/m<sup>2</sup> 时,表面最高温度远小于钨熔融的所需温度。根据图 3 所示,输入能量密度超过 0.42 MJ/m<sup>2</sup> 时,表面温度达到熔点,输入能量密度超过 0.72 MJ/m<sup>2</sup> 时,表面温度达到沸点,表面材料可能发生汽化过程,此计算的温度结果与实验并不相符。计算用的材料热力学参数是理想化的,实际热力学参数可能与计算中设置的存在不同,但不足以有如此大的影响。对计算结果有重要影响的输入量是实验参数,即能量密度和脉冲时间宽度,脉宽时间测量的准确性较高,故计算结果与实验结果的差异是能量密度诊断导致的。在分析了 CPF 装置所在实验室的能量密度诊断方法后发现,在能量密度较高时,其诊断难度较大,能量沉积不能很好地用温升来衡量,还要考虑烧蚀汽化、应力波等能量耗散以及烧蚀汽化产物对入射等离子体的屏蔽。这些因素都将给实验测量的能量密度带来误差,要想获得准确的束流能量密度,需要对实验测量的名义能

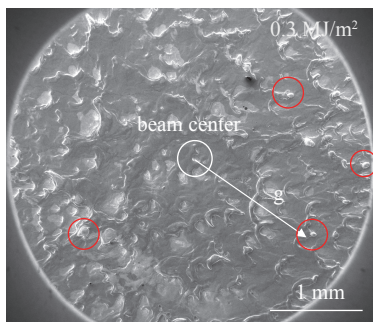


Fig. 2 Surface morphology of tungsten under CPF single pulse irradiation with nominal energy density of 0.3 MJ/m<sup>2</sup> (pulse width 0.1 ms)

图2 钨在名义能量密度0.3 MJ/m<sup>2</sup>(脉宽0.1 ms)的CPF单脉冲辐照下的表面形貌

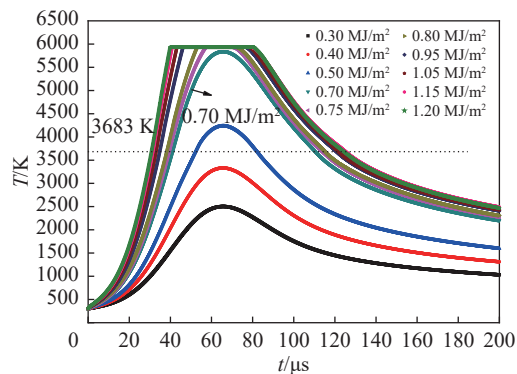


Fig. 3 Variation of surface temperature with time under different pulse energy densities (pulse width 0.1 ms) calculated by Comsol

图3 用Comsol计算出不同的脉冲能量密度(脉宽0.1 ms)下表面温度随时间的变化

量密度进行修正。

## 2 能量密度的修正方法及计算模型的建立

### 2.1 能量的耗散与修正

通过量热法测量能量密度的方法实际上测得的都是脉冲之后剩余在靶上的能量,但影响材料表面热响应的是最初脉冲加载过程沉积在靶表面的能量。如图4所示,在没有发生汽化和烧蚀的时候,表面沉积的能量主要通过热传导向材料深处传导,辐射散热会耗散一小部分能量,但基本可以忽略。当束流的能量密度比较高时,材料表面将发生汽化和烧蚀过程,脉冲沉积的能量耗散通道包括热传导、热辐射、汽化和烧蚀带走的能量(图5),同时质量损失也会对靶材料造成反冲,反馈一部分能量到靶材料上。在这种情况下,想要准确测量束流沉积在靶材料上的能量,需要对测量结果进行修正。

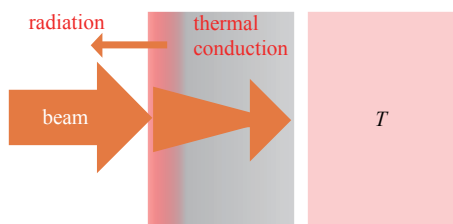


Fig. 4 Schematic diagram of energy input and dissipation without boiling and ablation

图4 无汽化和烧蚀的情况下能量输入与耗散示意图

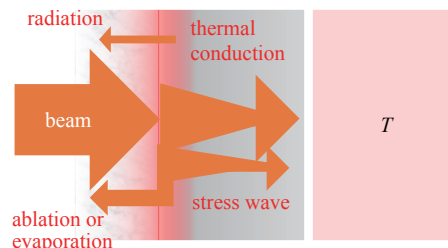


Fig. 5 Schematic diagram of energy input and dissipation with vaporization or ablation

图5 有汽化或者烧蚀的情况下能量输入与耗散示意图

当脉冲加载过程,材料表面温度达到沸点时,材料表面发生汽化,这时需要对汽化过程带走的能量进行修正。当材料表面有颗粒或液滴飞出,从而造成质量损失时,需要对烧蚀过程带走的能量进行修正。当从表面损失的质量对靶材造成反冲时,会在材料内部产生应力波,应力波最后会变成热量沉积在靶材料上,此时需要对应力波反馈的能量进行修正。根据能量的走向,对汽化和烧蚀的修正为一级修正,对应力波反馈能量的修正为二级修正。在未发生熔化情况下的材料剥落烧蚀和发生熔化情况下的液滴飞出都会造成质量损失,但是要形成较强的应力波,通常要求功率密度很高,式(1)给出了热膨胀、熔化、反冲应力波所需功率密度,在进行能量密度修正前需先判断脉冲辐照过程中发生的物理过程,再进行针对性的修正。

$$P_{\text{thermal expansion}} \ll P_{\text{melting}} \ll P_{\text{recoil}} \quad (1)$$

### 2.2 针对汽化过程的能量密度修正方法

根据能量的走向,名义能量密度的一级修正是针对由于温度达到沸点引起的汽化和碎屑或液滴喷出引起的烧蚀,二级修正是针对液滴等质量喷出后造成的反冲应力波。针对汽化过程的能量密度修正方法如图6所示,通过建立实验与计算的联系对名义能量密度 $\epsilon_n$ 进行修正。实验上可通过量热法诊断靶上的剩余能量密度,得到名义能



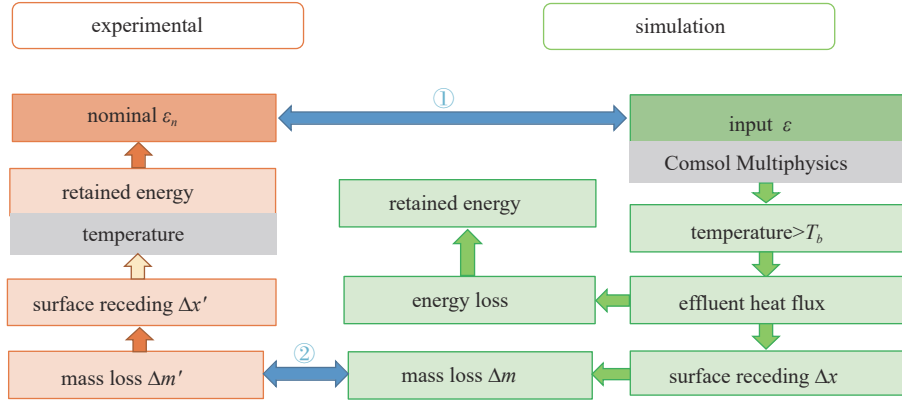


Fig. 6 Energy density correction method for vaporization process  
图 6 针对汽化过程的能量密度修正方法

量密度  $\varepsilon_n$ , 同时测量对应 CPF 脉冲辐照后样品的质量损失  $\Delta m'$ , 从而建立起名义能量密度  $\varepsilon_n$  与样品质量损失  $\Delta m'$  之间的关系。计算中利用 Comsol 模拟不同输入能量密度  $\varepsilon$  的 CPF 作用下钨的温升, 当表面温度  $T$  高于钨的沸点  $T_b$  时发生汽化过程, 流出热量导致能量损失, 表面退行  $\Delta x$  导致质量损失  $\Delta m$ , 从而建立起发生汽化的情况下输入能量密度  $\varepsilon$  与样品质量损失  $\Delta m$  之间的关系。将实验和计算过程中样品的质量损失建立联系(图中②), 从而建立起实验测得的名义能量密度  $\varepsilon_n$  和输入能量密度  $\varepsilon$  的联系(图中①)。

### 2.3 CPF 辐照下一维热传导计算模型的建立

为了进行测量能量密度的修正, 通过 Comsol Multiphysics 建立了有限元计算模型, 对脉冲加载的传热过程、汽化造成质量损失和能量损失的过程进行模拟。由于热源为较大束斑的面热源, 为便于计算, 故忽略径向热场分布。由于 CPF 的粒子注入深度小于 60 nm, 远小于脉冲加载结束的传热深度, 因而忽略热源的深度分布。根据傅里叶热传导定律<sup>[16]</sup> 和能量守恒定律, 建立一维深度方向的瞬态热传导模型。样品表面和背面考虑辐射散热, 在真空环境中不考虑对流散热, 由于脉冲结束时的热作用深度浅, 故不考虑样品背面和样品托之间的热传导散热。

CPF 加载到钨表面导致了两个相变过程, 固相到液相的过程通过相变传热实现, 液相到气相的过程需要在热传导模型的基础上附加两个边界条件: 一是热通量边界条件, 实现汽化过程的热量流出, 模拟能量损失过程; 二是变形几何边界, 通过网格法向位移实现表面退行, 模拟质量损失过程。

当  $T > T_b$  时, 引入一个附加的热边界条件, 表示汽化导致的热量流出。材料汽化带走热通量导致的能量损失  $q_e(T)$  为

$$q_e(T) = h(T)(T - T_b), \quad \text{If } T - T_b \ll T_b, \quad h(T) = \text{Const.} \quad (2)$$

式中:  $h(T)$  的常数取值表示汽化过程带走能量的传热系数, 其值的大小决定了热量流出的快慢。由于当表面温度达到沸点后, 再沉积的能量主要贡献于汽化过程, 故本文中取  $1 \times 10^{12}$ 。

在变形几何中, 用表面退行的方法表示熔化边界发生汽化的质量损失过程。用表面退行速率, 即网格法向位移速度, 来表示材料汽化的速度, 表达式如下

$$v_n = \left( \frac{dx}{dt} \right) \mathbf{e}_x \cdot \mathbf{n} = \frac{q_e}{\rho_L L_{L-G}} \quad (3)$$

式中:  $q_e$  为汽化带走的热通量,  $\mathbf{e}_x$  为束流方向,  $\mathbf{n}$  为表面的法线方向,  $x$  为网格位移距离,  $\rho_L$  为材料液态密度,  $L_{L-G}$  为材料液态到气态的相变潜热。

### 2.4 计算中所用参数

由于 CPF 的放电电流波形近似高斯分布, 故一维热传导模型中热源随时间的归一化概率分布函数采用高斯分布近似。本模型中采用的钨材料相关参数如表 1 和图 7 所示。

表 1 钨材料的参数

Table 1 Parameters of tungsten materials

parameter	value
specific heat capacity of solid state/(J·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	144
specific heat capacity of liquid state/(J·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	200
solid density/(kg·m <sup>-3</sup> )	19 350
liquid density/(kg·m <sup>-3</sup> )	17 600
thermal conductivity/(W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	variation with temperature
melting point $T_m$ /K	3 683.15
boiling point $T_b$ /K	5 933.15
latent Heat $L_{S-L}$ /(kJ·kg <sup>-1</sup> )	187
latent Heat $L_{L-G}$ /(kJ·kg <sup>-1</sup> )	4 009

### 3 CPF 脉冲能量密度的修正

#### 3.1 计算所得退行量与输入能量密度的关系

由模拟计算可知, 计算输入能量密度超过  $0.72 \text{ MJ/m}^2$  (脉宽  $0.1 \text{ ms}$ ), 表面温升超过沸点, 表面出现退行。出现表面退行后, 输入的能量一部分用于维持表面温度, 一部分则被汽化带走。直到表面输入能量不足以维持能量耗散, 表面温度开始下降, 表面退行停止。

图 8 显示了在输入能量密度为  $1.2 \text{ MJ/m}^2$  (脉宽  $0.1 \text{ ms}$ ) 时, 深度方向的温度分布随时间的演化, 可以看到脉冲加载开始后  $40 \mu\text{s}$  时, 表面上出现明显的表面退行, 在  $t=70 \mu\text{s}$  时, 表面退行结束, 此过程退行量为  $5 \mu\text{m}$ 。在名义能量密度  $1.2 \text{ MJ/m}^2$  脉冲下, 由质量损失换算得到的退行量为  $8 \mu\text{m}$ 。当计算输入  $1.2 \text{ MJ/m}^2$  时, 靶上剩余能量  $0.8 \text{ MJ/m}^2$  ( $t=200 \mu\text{s}$ ), 靶上剩余能量的比例约  $66\%$ 。从退行量和剩余能量的比例来看, 测得的名义能量密度确实是低估了。当能量密度足够高, 使得表面温度超过沸点, 汽化带走的能量不可忽略, 应对吸收能量密度进行修正。

如图 9 所示, 模拟计算所得的表面退行量  $\Delta x$  与输入能量密度  $\varepsilon$  的关系

$$\Delta x = 9.62\varepsilon - 7.10 \quad (4)$$

模拟计算得到的不同输入能量密度  $\varepsilon$  下的表面退行量  $\Delta x$  如表 2 所示。

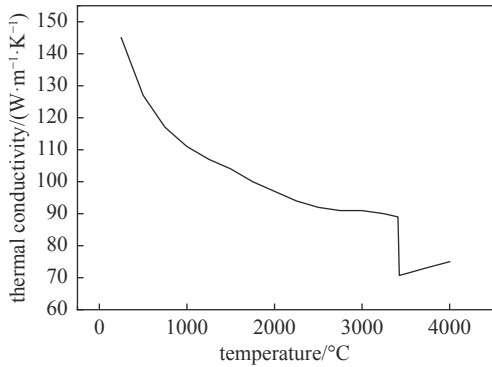


Fig. 7 Temperature dependence of thermal conductivity of W

图 7 钨的热导率随温度的变化<sup>[17]</sup>

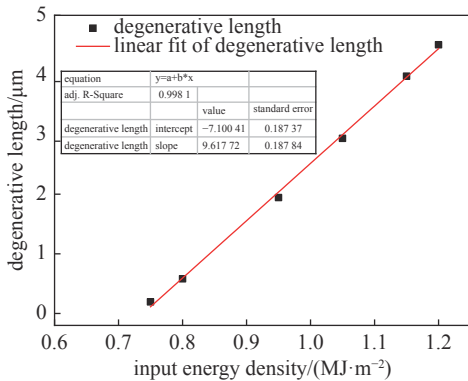


Fig. 9 Variation of the calculated surface degeneration with the input energy density

图 9 计算得到的表面退行量随计算输入能量密度的变化

#### 3.2 质量损失换算的退行量与名义能量密度的关系

CPF 实验测试中质量损失  $\Delta m$  随名义平均能量密度  $\varepsilon_n$  的变化如图 10 所示, 作线性拟合可得如下关系式

$$\Delta m = 16.52\varepsilon_n - 2.16 \quad (5)$$

由于实验所用为直径  $12 \text{ mm}$  的钨片, 密度为  $19.3 \text{ g/cm}^3 @ 20 \text{ }^\circ\text{C}$ , 通过上式可换算得到的实验情况下表面退行量  $\Delta x'$  与名义平均能量密度  $\varepsilon_n$  的关系

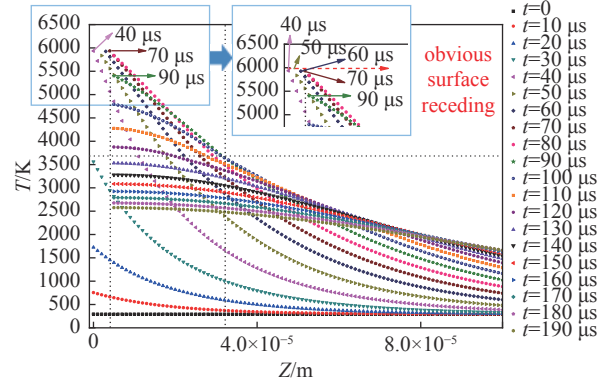


Fig. 8 Time dependence of temperature distribution in depth direction of tungsten irradiated by CPF single pulse (pulse width  $0.1 \text{ ms}$ ) with input energy density of  $1.2 \text{ MJ/m}^2$

图 8 钨在入射能量密度  $1.2 \text{ MJ/m}^2$  (脉宽  $0.1 \text{ ms}$ ) 的 CPF 单脉冲辐照下深度方向温度分布随时间的变化

表 2 计算模拟得到的不同输入能量密度下的表面退行量

Table 2 Calculated surface degeneration under different input energy densities

$\varepsilon/(\text{MJ/m}^2)$	$\Delta x/\mu\text{m}$
0.70	0.00
0.75	0.19
0.80	0.58
0.95	1.94
1.00	2.52
1.05	2.94
1.15	3.98
1.20	4.51

$$\Delta x' = 7.57\varepsilon_n - 0.99 \quad (6)$$

实验中质量损失 $\Delta m$ 所对应的表面退行量 $\Delta x'$ 如表3所示。图11展示了表2和表3中表面退行量随能量密度的变化,方形符号展示表2中计算所得退行量 $\Delta x$ 与输入能量密度 $\varepsilon$ 的关系,圆形符号展示表3中实验换算退行量 $\Delta x'$ 与名义能量密度 $\varepsilon_n$ 的关系。由图可知,相同的退行量,对应的输入能量密度 $\varepsilon$ 高于名义能量密度 $\varepsilon_n$ 。

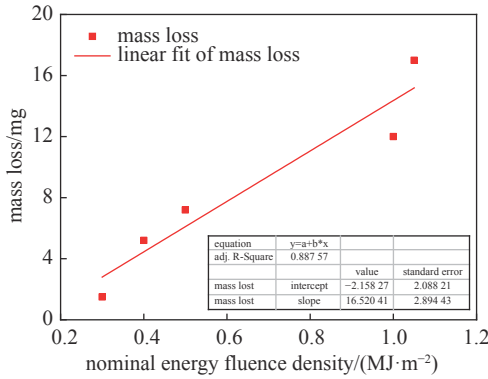


Fig. 10 Variation of mass loss with nominal energy density in experiment

图 10 实验中质量损失随名义能量密度的变化

表 3 实验中质量损失所对应的表面退行量

Table 3 Surface degeneration corresponding to mass loss in the experiment

$\varepsilon_n$ /(MJ/m <sup>2</sup> )	$\Delta m$ /mg	$\Delta x'$ /μm
0.30	2.80	1.28
0.40	4.45	2.04
0.50	6.10	2.80
0.95	13.54	6.20
1.00	14.36	6.58
1.05	15.19	6.96
1.15	16.84	7.72
1.20	17.67	8.10

### 3.3 能量密度的修正结果及评估

将式(4)与式(6)中的表面退行量取等号 $\Delta x = \Delta x'$ ,表示实验和计算有相同的质量损失,从而推导出名义平均能量密度 $\varepsilon_n$ 与对应所需输入能量密度 $\varepsilon$ 的关系,即名义平均能量密度 $\varepsilon_n$ 的修正关系式如下

$$\varepsilon = 0.79\varepsilon_n + 0.64 \quad \varepsilon > 0.72 \text{ MJ/m}^2 \Rightarrow \varepsilon_n > 0.11 \text{ MJ/m}^2 \quad (7)$$

表4比较了修正后平均能量密度 $\varepsilon$ 和名义平均能量密度 $\varepsilon_n$ 。由于烧蚀的过程很复杂,我们仅对汽化过程进行了修正。计算结果表明,当输入能量密度 $\varepsilon$ 高于0.72 MJ/m<sup>2</sup>时,材料表面会出现汽化。即使是最低的名义平均能量密度0.3 MJ/m<sup>2</sup>经过修正后,其修正值达到0.87 MJ/m<sup>2</sup>,样品表面会发生汽化,与实验结果吻合。

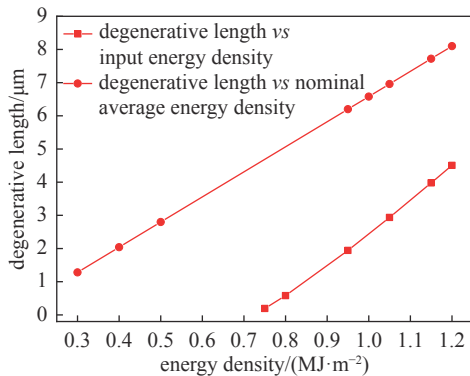


Fig. 11 Degenerative length under different energy densities from Table 2 and Table 3

图 11 表2和表3中表面退行量随能量密度的变化

表 4 名义平均能量密度的修正结果

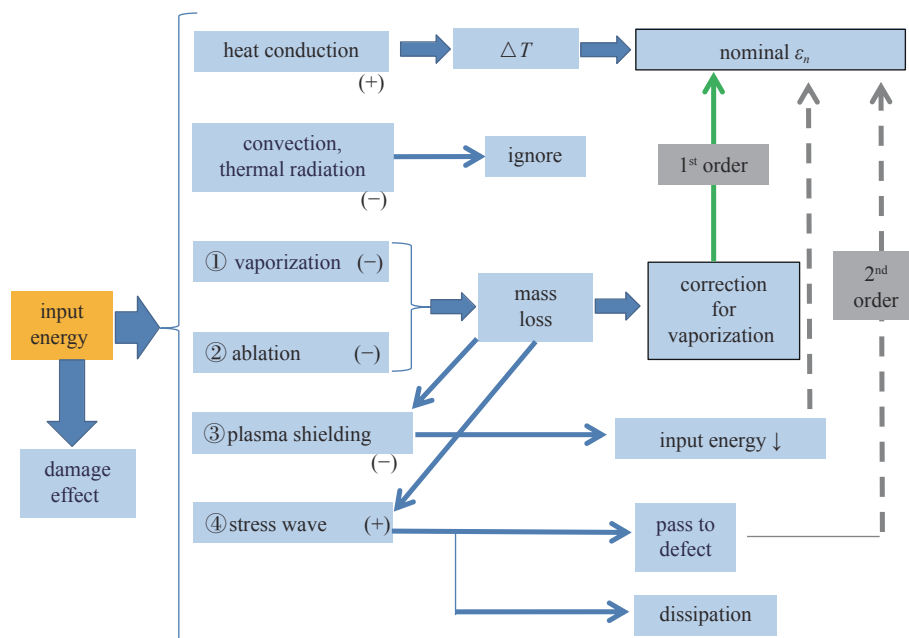
Table 4 Correction results of nominal average energy densities

$\varepsilon_n$ /(MJ/m <sup>2</sup> )	$\varepsilon$ /(MJ/m <sup>2</sup> )
0.3	0.87
0.4	0.95
0.5	1.03
0.95	1.39
1.05	1.46
1.15	1.54
1.20	1.58

如图12所示,将烧蚀和汽化过程导致的质量损失都考虑为汽化导致的,从而对名义能量密度进行了一级修正,但是汽化不等于烧蚀,烧蚀温度比沸腾汽化温度低,烧蚀不需要吸收所有的潜热,因此即使在低于沸点的温度下,烧蚀也会影响能量密度的测量结果。当烧蚀和汽化过程都存在时,烧蚀汽化产物对等离子体有屏蔽作用,使得入射到靶上的能量减少,同时烧蚀汽化产物会导致靶上形成反冲应力波,应力波的一部分能量将沉积在靶上,一部分将耗散。烧蚀汽化产物屏蔽等离子体、反冲应力波带走部分能量,这些都会带来能量密度诊断中的二级误差。综上,如果要得到更准确的能量密度,还需要进行针对烧蚀汽化产物屏蔽等离子体、反冲应力波的二级修正,或者开发出更准确的能量密度诊断方法。

## 4 结 论

由于 CPF 的能量密度诊断结果未计入烧蚀汽化等带走的能量,所测的结果偏低,本论文介绍了一种修正方法



(+)(-) indicates that the contribution to the deposited on the target is positive or negative

Fig. 12 Schematic diagram of result evaluation of energy density correction

图 12 能量密度修正的结果评估示意图

及其的评估,得到如下结论:(1)钨在 CPF 辐照下实验结果表明钨表面发生了烧蚀,实验测量的结果是名义平均能量密度。要获得准确的能量密度,需要考虑烧蚀汽化、应力波等能量耗散以及烧蚀汽化产物对入射等离子体的屏蔽等因素带来的误差,对测量结果进行修正;(2)本文针对汽化过程对 CPF 的能量密度诊断带来的误差,给出了一种基于测量的在不同名义平均能量密度下的质量损失,通过表面退行的有限元计算反推损失相同质量所需输入能量的能量密度修正方法,通过此方法得到的修正能量密度与实验结果相吻合;(3)本文对 CPF 能流密度的修正仅为一级修正,即简单地将质量损失全部考虑为汽化导致的。考虑到实际发生了烧蚀过程,并且烧蚀汽化产物对等离子体有屏蔽作用,反冲应力波也会带走一部分能量,这些都会带来能量密度诊断中的二级误差。如果要得到更准确的能量密度,还需要进行针对烧蚀汽化产物屏蔽等离子体、反冲应力波的二级修正,或者开发出更准确的能量密度诊断方法。

**致谢** 感谢白俄罗斯国立大学固体等离子体改性实验室的 Uglov Vladimir V.教授对 CPF 辐照实验给予的帮助,感谢北京航空航天大学物理学院喻晓博士对计算模型构建给予的帮助。

#### 参考文献:

- [1] Wilson H. Edge localized modes in tokamaks[J]. *Fusion Science and Technology*, 2010, 57(2T): 174-182.
- [2] Pintsuk G, Kühnlein W, Linke J, et al. Investigation of tungsten and beryllium behaviour under short transient events[J]. *Fusion Engineering and Design*, 2007, 82(15/24): 1720-1729.
- [3] Zhitlukhin A, Klimov N, Landman I, et al. Effects of ELMs on ITER divertor armour materials[J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2007, 363/365: 301-307.
- [4] Khimchenko L N, Gureev V M, Federici G, et al. Study of erosion products in experiments simulating ELMs and disruptions in ITER on plasma gun QSPA-facility[C]//Proc. 21 Fusion Energy Conf. 2006.
- [5] Hirai T, Ezato K, Majerus P. ITER relevant high heat flux testing on plasma facing surfaces[J]. *Materials Transactions*, 2005, 46(3): 412-424.
- [6] Linke J, Escourbiac F, Mazul I V, et al. High heat flux testing of plasma facing materials and components – Status and perspectives for ITER related activities[J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2007, 367/370: 1422-1431.
- [7] Kovalenko D V, Klimov N S, Podkovyrov V L, et al. Behavior of divertor and first wall armour materials at plasma heat fluxes relevant to ITER ELMs and disruptions[J]. *Nuclear Materials and Energy*, 2017, 12: 156-163.
- [8] 张博尧. 注He纯钨在瞬态热负载下的性能研究[D]. 北京: 北京大学, 2014. (Zhang Boyao. The performance research of helium irradiated tungsten under transient thermal load[D]. Beijing: Peking University, 2014)
- [9] 屈苗, 喻晓, 张洁, 等. 强流脉冲离子束能量密度分布的红外诊断[J]. *强激光与粒子束*, 2015, 27: 075002. (Qu Miao, Yu Xiao, Zhang Jie, et al. Infrared imaging diagnostics of the energy density distribution at the intense pulsed ion beam cross-section[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2015, 27: 075002)
- [10] Astashinskii V M, Bakanovich G I, Kuz'mitskii A M, et al. Choice of operating conditions and plasma parameters of a magnetoplasma compressor[J]. *Journal*

- of *Engineering Physics and Thermophysics*, 1992, 62(3): 281-284.
- [11] Uglov V V, Anishchik V M, Astashynski V V, et al. The effect of dense compression plasma flow on silicon surface morphology[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2002, 158/159: 273-276.
- [12] Sari A H, Astashynski V M, Kostyukevich E A, et al. Alloying of austenitic steel surface with zirconium using nitrogen compression plasma flow[J]. *Vacuum*, 2015, 115: 39-45.
- [13] Anishchik V M, Uglov V V, Astashynski V V, et al. Compressive plasma flows interaction with steel surface: structure and mechanical properties of modified layer[J]. *Vacuum*, 2003, 70(2/3): 269-274.
- [14] Vinogradova A K, Morozov A I. *Physics and application of plasma accelerators*[in Russian], Minsk (1974).
- [15] Dojčinović I P, Kuraica M M, Obradović B M, et al. Optimization of plasma flow parameters of the magnetoplasma compressor[J]. *Plasma Sources Science and Technology*, 2007, 16(1): 72-79.
- [16] Lienhard J H. *A heat transfer textbook*[M]. New Jersey: Prentice-Hall, 1981.
- [17] Federici G, Loarte A, Strohmayer G. Assessment of erosion of the ITER divertor targets during type I ELMs[J]. *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 2003, 45(9): 1523-1547.