

# 腔靶产生的平面辐射场特性的数值模拟\*

许 琰 赖东显 冯庭桂

(北京应用物理与计算数学研究所, 北京8009信箱, 100088)

**摘 要** 计算了不同腔靶构型参数对靶板能量效率和辐照均匀度的影响, 由此给出有较大能量效率和辐照均匀度的腔靶构型。合适的平面靶与腔壁的面积比既使平面靶的能量利用效率趋近理想又使得平面靶不太大以满足均匀度要求。

**关键词** 腔靶 平面辐射场 能量利用效率

中图分类号 TL 639.1

为了研究腔靶均匀辐射加热平面靶的可行性和效率, 或者说研究腔靶能否提供具有较高能量效率和较好辐照均匀度的平面辐射场, 以满足校验一维程序的需要。需要通过模拟计算来选择合适的腔靶构型和光斑配置。这里所说的能量利用效率是指平面靶所获得的能量与激光转换出的 X 光总能量之比。在保证平面靶辐照均匀度的情况下, 利用三维蒙特卡罗辐射输运程序(RT3D 程序)<sup>[1]</sup>, 不考虑等离子体影响, 计算出能提供较大能量效率和辐照均匀度的腔靶构型。

按照平面靶板在腔靶中的位置, 将腔靶分为两大类型: 中心置靶构型和端置靶构型。中心置靶构型是指将靶板置于柱形腔壁上。端置靶构型是指将靶板置于柱形腔靶的一端。按照激光束入射的位置, 又可将腔靶分为端入射构型和侧入射构型及端置箔构型。端入射是指激光束从腔靶两端开口射入, 侧入射是指其中一群激光束从腔靶侧面开口射入。端置箔构型是指腔靶一端罩有一金箔, 激光束照射金箔加热腔靶。

## 1 腔靶构型特性的数值模拟

### 1.1 中心置靶构型

首先研究平面靶置于柱形腔壁上的构型, 在一个两端开口的柱形腔靶中部锉一个平面, 上面罩一块金板, 其构型如图1所示。

腔靶两端分别入射四束激光, 光斑均匀分布, 柱形腔靶长  $L = 1400\mu\text{m}$ , 半径  $R = 350\mu\text{m}$ 。文中柱形腔靶都采用此尺寸。平板为  $181.2\mu\text{m} \times 200\mu\text{m}$ 。

由于 RT3D 程序所能计算的分块数有限, 只能分别研究平板温度沿  $z$  向和  $\varphi$  向的变化。为研究平板温度沿  $z$  向变化, 将平板沿  $z$  向分为 14 个小块, 沿  $\varphi$  向分为 1 小块, 由边缘与中心点的平均温度随时间的变化可知, 平板基本

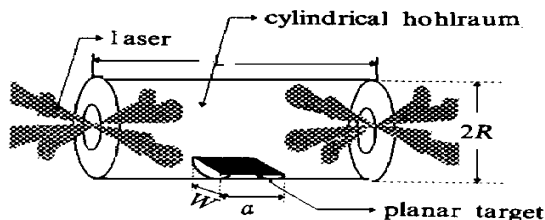


Fig 1 Central planar target

图 1 中心置靶构型示意图

\* 国家863惯性约束聚变领域青年科学基金资助项目  
1997年10月14日收到原稿, 1998年5月14日收到修改稿。  
许琰, 1964年12月出生, 博士, 副研究员

上能够获得  $z$  向均匀的辐射场, 边缘与中心的温度差不超过中心温度的7%。在研究平板温度沿  $\varphi$  向的变化时, 将平板沿  $z$  向分为6小域, 沿  $\varphi$  向分为3小域, 每束激光转换出的 X 光能量为150J。辐射脉宽为1.2ns, 如下文中没有特别说明, 此 X 光脉冲数据就是所用数据。表1为在  $t = 1.4\text{ns}$  时平板温度不均匀度分布。温度不均匀度定义为区域温度与整体平均温度之差与平均温度之比。从表1可以看出, 在1.4ns时刻,  $\varphi$  向最大不均匀度为6.49%。上述计算结果表明在中心置靶构型中平面靶的辐照不均匀度可以保持在较低的水平。

对1400 $\mu\text{m}$  长的腔靶, 由于平面靶靶板必须与光斑右边缘保持一定距离来保证能得到一个好的均匀辐射场, 宽为200 $\mu\text{m}$  的靶板基本上是可以放置的最大靶板了, 因而, 所计算的0.81% 是这种中心置靶构型的最大能量效率。

## 1.2 柱端置靶构型

### 1.2.1 端入射

端入射柱端置靶的构型为一端开有激光入射口的柱形腔靶, 在其另一端伸出一个通道圆柱空腔, 它的另一端上罩有一块圆形金板靶(图2), 从入射端分别以不同角度入射两群激光束, 每群四束激光, 光斑均匀分布。

对长为200 $\mu\text{m}$ 、半径为200 $\mu\text{m}$  的通道圆柱计算出柱端靶在  $\varphi = 0$  处中心与边缘的温度不均匀度在0.8ns之前, 超过8%, 其余时刻低于6%。柱端靶各径向点在1.4ns时,  $\varphi = 0$  与  $\varphi = 72$  处的温度不均匀度, 径向场低于6%, 角向各点低于3%。

改变构型诸参数进行计算, 如表2所示, 其中  $\theta$  和  $\Theta$  分别指左右群激光入射角,  $R_i$  和  $L_i$  分别指通道柱的半径和长度,  $\sigma_{\text{max}}$ 、 $\sigma_{\text{int}}$  和  $\sigma_{1.4\text{ns}}$  分指最大、初始时刻和1.4ns时刻的不均匀度。在其它参数不变, 仅改变通道柱长度  $L_i$  时, 能量效率随通道柱长度的增大而减小, 不均匀度先减小后增大; 在仅改变通道柱半径  $R_i$  时, 能量效率随通道柱半径的增大而增大, 不均匀度反而随通道半径的增大而减; 改变激光束入射角  $\theta$ , 可以看到激光光斑越靠近靶区, 能量效率越高, 不均匀度越大, 反之亦然。

通道柱有一定的长度, 使得靶板距光斑有一定的距离, 可以保证一定表面粗糙度, 减少

表2 端入射腔靶参数与辐照不均匀度的关系

Table 2 Energy efficiency vs parameters of hohlraum with end entrances

$\theta$	$\Theta$	$R_i/\mu\text{m}$	$L_i/\mu\text{m}$	$\sigma_{\text{max}}/\%$	$\sigma_{\text{int}}/\%$	$\sigma_{1.4\text{ns}}/\%$
65	25	200	200	2.23	15.4	5.77
65	25	200	400	1.53	9.56	2.70
65	25	200	600	1.17	10.96	2.68
65	25	200	800	0.755	28.4	5.69
65	25	250	200	3.60	12.18	5.17
65	25	300	200	5.23	13.55	4.47
65	25	230	200	6.27	13.09	4.03
70	25	200	200	2.19	15.59	4.71
55	25	200	200	2.33	13.53	5.81
60	25	200	200	2.28	16.2	5.28
60	30	200	200	2.37	10.53	4.05

靶内等离子体的影响。由于右群激光光斑的右边缘不得超出腔靶的长度，使得右群激光的入射角不得低于 $25^\circ$ 。另外由于限制左群光斑不得与右群光斑重合，因而在固定通道柱半径 $200\mu\text{m}$ 时，得到这种腔靶构型的最大能量效率为 $2.23\%$ 。

在固定激光入射角( $45^\circ$ )时，一个折衷方案是在端入射柱端置靶上采用一群激光束入射。每群四束激光光斑均匀分布，柱形腔靶长 $L = 550\mu\text{m}$ 。在对长 $200\mu\text{m}$ 半径 $200\mu\text{m}$ 的通道圆柱计算时的能量效率为 $1.47\%$ 。因激光光斑的右边缘离入射端为 $513\mu\text{m}$ ，因而此构型的长度不能再短了， $1.47\%$ 基本上是该构型所能提供的最大能量效率。

### 1.2.2 侧入射(柱结构)

在固定激光入射角( $45^\circ$ )时，另一种折衷方案就是右群激光光束得从侧面开两个口入射，每个口入射两束激光束，同侧伸出一个通道圆柱空腔，另一端面罩上一块圆形金板靶，其构型如图3所示。每群四束激光，柱形腔靶长为 $L$ ，矩形侧入射孔 $380\mu\text{m} \times 268\mu\text{m}$ ，限制左右群光斑的光心线在同一圆上。

右群激光束为侧入射，光斑距聚焦点远，右群激光束的光斑比左群激光束的光斑大，由于右群激光束光斑的边缘不得落入侧开口区，因而右群激光束光斑的边缘限定了柱形腔靶的最小长度。

改变柱形腔靶的诸参数进行计算，见表3，可以通过减小柱形腔靶 $Z_R$ 长度的方法来提高能量效率，由于右群激光束的入射位置为 $994\mu\text{m}$ ，加上洞的半宽为 $190\mu\text{m}$ ，因而 $1200\mu\text{m}$ 长的柱形腔靶基本上是最短柱形腔靶。其最大能量效率为 $1.43\%$ 。

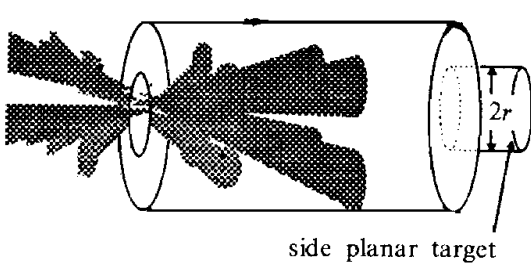


Fig 2 Side planar target  
图2 端入射结构

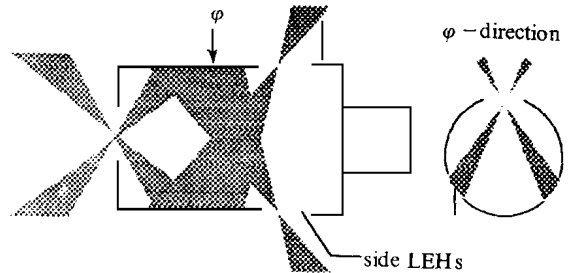


Fig 3 Configuration with side LEHs  
图3 侧入射板结构

造成能量利用效率较低的主要原因在于光斑位置集中在腔的一端，离靶过远，只有改变右群激光束的入射角或改变激光束入射点才能进一步的缩短柱形腔靶的长度，提高能量效率。

### 1.2.3 侧入射(右锥面结构)

在上面的计算中已经发现右群激光束的入射点影响着腔靶的长度，因而也就影响着腔靶的能量效率，为了研究它的影响，将连接通道柱的部分柱面改为锥面，两个侧入射口均开在锥面上(图4)。这种结构可以缩短光斑到聚焦点的距离，从而减小光斑。侧入射孔开在右斜坡上，长为 $380\mu\text{m}$ 。左右群光斑的光心线在同一圆上。

表3中 $L_{\text{cone}}$ 和 $Z_{\text{cone}}$ 分指锥面的长度和 $z$ 向高度，与柱结构相比，能量效率有所提高，腔靶长度 $L$ ，越短，能量效率越高，同样地，腔靶的最短长度是由最大光斑右边缘所决定的。欲进一步提高能量利用效率得减小最大光斑右边缘，固定通道柱半径 $200\mu\text{m}$ 时这种腔靶最大能量利用效率为 $1.8\%$ 。

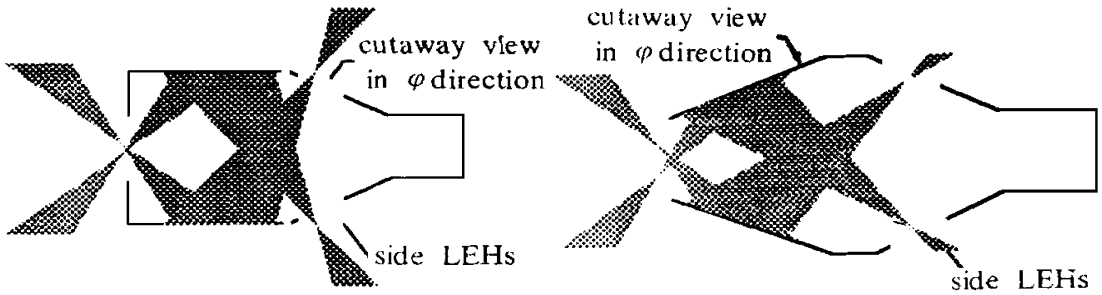


Fig 4 Configuration with side LEHs in right cone Fig 5 Configuration with two cones on each sides

图4 右侧入射锥面结构

图5 左右锥面构型

表3 右斜结构下腔参数与能量利用效率  $\eta$  间的关系

Table 3 Energy efficiency vs parameters of hohlraum with right cone

$L$	$Z_r$	$L_{\text{cone}}$	$Z_{\text{cone}}$	$R_{\text{spot}}$	$L_{\text{act}}$	$\eta/\%$	$\sigma_{\text{max}}/\%$	$\sigma_{1.4\text{ns}}/\%$
1400	925	700	350	529.5	716.3	1.34	12.75	14.41
1300	925	700	350	529.5	616.3	1.46	17.42	5.57
1300	925	600	300	529.5	719.1	1.52	17.43	6.3
1200	925	600	300	529.5	619.1	1.62	15.01	5.98
1200	925	500	250	529.5	723.7	1.70	14.48	5.898
1150	925	600	300	529.5	569.1	1.7	15.6	5.35
1150	913.5	600	250	625.5	569.1	1.71	15.47	5.67
1100	911.2	550	220	525.8	570.8	1.80	13.14	5.42

Note: A micrometre ( $\mu\text{m}$ ) is a measure of  $L \sim L_{\text{act}}$

#### 1.2.4 侧入射(左右锥面)

为了进一步地缩小右群激光束光斑右边缘,将柱形腔靶的左边部分也改变锥面,但这时左群激光束的光斑会变大,其中最大的光斑不能与激光入射口有重叠之处。见图5,侧入射孔开在右斜坡上,长为 $380\mu\text{m}$ ,但其入射口所对应的圆心角为 $45^\circ$ 。左右群光斑的中心线在不同一圆上。

由计算可知,尽管缩短了腔靶的长度,但是腔靶的能量效率与右锥面结构相比并未明显的增加。其可能的原因是右锥面构型的激光入射口所对应的圆心角为 $30^\circ$ ;相比之下,左右锥面的激光入射口开口较大,使能量效率没能有较大提高。

#### 1.2.5 端置箔

端入射柱端置靶的构型为一端罩有金箔的柱形腔靶,另一端伸出一个通道圆柱空腔。八束激光光束照射金箔,柱形腔靶长 $L = 400\mu\text{m}$ 。激光束加热金箔透过的X光能量为 $150\text{J}$ 。其构型如图6所示。计算结果表明,此构型的能量利用效率为 $0.99\%$ 。初始时刻的最大不均匀度为 $6.37\%$ ,在 $1.4\text{ns}$ 时刻为 $4.23\%$ 。与上面计算各腔靶构型的结果比较,此构型的均匀性最好。

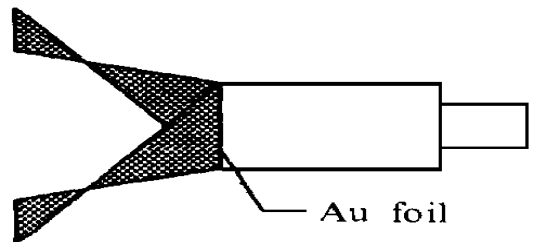


Fig 6 Configuration with side Au foil on it

图6 端置金箔构型

## 2 分析与总结

在固定腔靶入射角为45°时,端置靶比中心置靶能提供更高的能量利用效率。但就单位靶面积的能量利用效率而言,中心置靶比端置靶能量利用效率更高。在同样的腔靶长度下,中心置靶所提供的靶板的最大面积受到光斑间距的限制,不能像端置靶提供那么大的靶板。而且所计算的中心置靶没加入通道圆筒,加入后能量利用效率会有所降低。另外,端置箔和中心置靶构型比端置靶能提供更好的辐照均匀度。右锥面和左右锥面比柱形能量利用效率更高。所有靶型的辐照均匀度在最高温度时刻均能小于7%。不限制激光束的入射角比入射角限制在45°时能提供更高的能量利用效率。

从计算结果可以看出,腔靶长度越短,能量利用效率越高;激光光斑距靶越远,能量利用效率越低。但洁净度越好。在平面靶的不均匀度很小时,Rosen等人<sup>[2]</sup>已给出自相似近似处理方法,将经过时间 $\tau$ 的板的X光吸收表为 $E_w = A T^{3/3} t^{0.38} A_p$ ,这里 $A$ 为常数, $A_p$ 为平面靶的面积, $T$ 为平面靶的辐射温度。

因此,平面靶能量利用效率可以写为 $\eta = A T^{3/3} t^{0.38} A_p / n E_x$ , $E_x$ 为每束激光转换出的X光的能量, $n$ 为激光光束数。 $T$ 与腔靶激光入射孔的面积、腔壁的面积、激光光斑的面积、平面靶的位置等因素有关,必须由数值模拟得出。当忽略激光入射孔的影响腔壁达到等温时平面靶的能量利用效率达到其极限值 $\eta = A_p / A_w$ ,这里 $A_w$ 为腔壁的面积。对于端入射的构型,当固定激光光斑的数目、位置和大小,可以给出当选择合适的 $A_p / A_w$ 时,可以既满足使平面靶的能量利用效率尽可能的趋近理想能量利用效率又使得 $A_p$ 不太大以满足均匀度的要求。

本文仅对各种腔靶进行了数值模拟,由于计算条件的限制,加上各种靶型的几何因素变化较多,没能对其做更深的规律性分析。我们将在以后的工作中对典型腔靶做规律性分析。

## 参考文献

- 1 冯庭桂,赖东显.中国科学(英文版)E辑,1996,39(5)
- 2 John Lindl. *Phys Plasmas*, 1995, (2): 3933~ 4042

# PROPERTIES OF PLANAR RADIATION FIELD PRODUCED BY HOHLRAUM

Xu Yan, Lai Dongxian, Feng Tinggui

*Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100088, P. R. China*

**ABSTRACT** The energy efficiency and radiation non-uniformity of planar radiation field provided by several kinds of hohlraum are calculated. For hohlraum with fixed laser entrance holes and fixed laser beams an adequate ratio of planar target area to hohlraum wall area can satisfy the requirement of both higher energy efficiency and lower radiation non-uniformity of target.

**KEY WORDS** hohlraum, planar radiation field, energy efficiency