

# 旋转飞行靶激光辐照参数解析求解

张东来<sup>1</sup> 李小将<sup>1,2</sup> 杨业伟<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 中国人民解放军装备学院航天装备系, 北京 101416  
<sup>2</sup> 中国人民解放军装备学院激光推进及其应用国家重点实验室, 北京 101416)

**摘要** 激光辐照参数是研究激光对飞行靶目标毁伤效应的基础, 主要包括辐照中心点位置、辐照面域和功率密度分布。以激光辐照水平匀速运动和抛物线运动的旋转圆柱体靶为背景, 假定激光辐照飞行靶交汇场景, 给出交汇目标参数, 建立激光辐照交汇模型; 推导出辐照中心点位置、辐照面域和功率密度分布等辐照参数的解析表达式。仿真结果表明: 辐照参数是随靶目标飞行不断变化的量; 激光功率密度分布为参数不断变化的三维椭圆形高斯函数; 靶目标旋转会引起辐照中心点位置和辐照面域的变化, 进而对温度场分布和激光毁伤效应产生一定的影响。解析求解结果为研究激光对飞行靶的辐照效应奠定了参数基础。

**关键词** 激光技术; 激光辐照; 辐照参数; 功率密度分布; 温度场; 毁伤效应

**中图分类号** TN249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0703007

## Analytic Solution of Laser Irradiation Parameters for the Rolling Flying Target

Zhang Donglai<sup>1</sup> Li Xiaojang<sup>1,2</sup> Yang Yewei<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Department of Space Equipment, Equipment Academy of the People's Liberation Army, Beijing 101416, China  
<sup>2</sup> State Key Laboratory of Laser Propulsion and Application, Equipment Academy of the People's Liberation Army, Beijing 101416, China)

**Abstract** The irradiation parameters are the foundation to study damage effect of flying target by laser, which include the location of irradiation center point, irradiation area and power density distribution. Taking the laser irradiating horizontal uniform moving target and parabolic moving target as the background respectively, the assumed encounter scene and parameters are given. Then, the analytical calculation models of the location of irradiation center point, irradiation area and power density distribution are derived. The simulation results show that the irradiation parameters vary with the rolling and flying of target. The power density distribution in irradiation area is a varying three-dimensional elliptic Gaussian function. The rolling of target results in varying of location of irradiation center point and irradiation area, and influences temperature field of target and damage effect by laser. The analytical solutions are foundations for analyzing the effect of laser irradiating flying target.

**Key words** laser technique; laser irradiating; irradiation parameters; power density distribution; temperature field; damage effect

**OCIS codes** 140.3295; 140.3440; 140.6810

## 1 引言

国内外对激光辐照圆柱体靶进行了一系列的理论和实验研究。美国劳伦斯·利弗莫尔国家实验室

(LLNL)的 Boley 等<sup>[1-2]</sup>建立了激光辐照圆柱形炮弹的作用模型; 国防科学技术大学焦路光等<sup>[3-4]</sup>进行了激光辐照下圆柱形金属/炸药层合结构温度变

**收稿日期**: 2013-11-04; **收到修改稿日期**: 2013-12-25

**基金项目**: 激光推进及其应用国家重点实验室基础研究项目

**作者简介**: 张东来(1987—), 男, 博士研究生, 主要从事激光与物质相互作用等方面的研究。

E-mail: zdl871128@163.com

**导师简介**: 李小将(1973—), 男, 博士, 教授, 主要从事武器系统运用与分析等方面的研究。E-mail: lij\_ftp@163.com

化以及炸药起爆阈值的研究。

上述实验室环境下的理论模型无法准确描述激光辐照实际飞行条件下的圆柱体靶的作用效应。激光辐照实际飞行条件下靶目标的作用效应,应该考虑大气传输、目标旋转等因素,以及辐照面域和功率密度分布随靶目标飞行的变化。文献[5-6]对激光辐照运动圆柱体的几何学进行了研究,导出了激光对抛射圆柱体表面加热时的圆柱表面热加载功率密度分布公式。然而,文献中并没有考虑目标旋转的影响,并且未求解激光辐照面域随目标飞行的变化,已经建立的激光辐照作用效应模型尚不完善。

假定靶目标的运动过程分为水平匀速运动和抛物线运动两个阶段,同时圆柱体靶沿自身轴线匀速旋转。解析求解地基激光辐照旋转飞行圆柱体靶交汇参数,确定辐照中心点、辐照面域和功率密度分布随靶目标旋转和飞行而变化的解析式。通过仿真分析,求解辐照参数和温度场分布,并分析旋转速率对温度场分布和激光毁伤效应的影响。

## 2 激光辐照交汇场景

### 2.1 激光辐照水平匀速运动靶

激光辐照水平匀速运动靶交汇场景如图 1 所示。

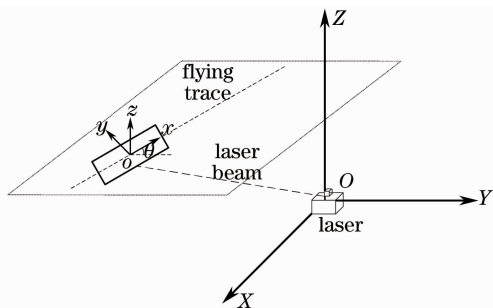


图 1 激光辐照水平匀速运动靶交汇场景

Fig. 1 Encounter scene of laser irradiating horizontal uniform moving target

针对激光辐照水平匀速运动靶交汇场景,进一步做出如下设定:

- 1) 大地为无限大的参考平面;
- 2) 建立全局坐标系为地球直角坐标系  $O-XYZ$ , 局部坐标系为与靶目标关联的直角坐标系  $\sigma-xyz$  和圆柱坐标系  $\sigma-r\eta x$ ;
- 3) 激光器位于  $O-XYZ$  坐标系原点, 飞行靶运动轨迹位于距离地面高度为  $H(H>0)$  的平面上, 飞行方向在  $X-OY$  平面上的投影与  $Y$  轴的逆时针方向夹角为  $\theta(0<\theta<2\pi)$ ;
- 4) 设定激光初始辐照时刻, 靶目标中心点的坐

标为  $(X_0, Y_0, H)$ , 靶目标水平匀速飞行, 飞行速率为  $V_0$ , 轴线与轨道重合, 靶目标绕自身轴线匀速逆时针旋转, 旋转速率为  $\omega_0$ ;

5) 激光辐照位置为圆柱体的圆柱面, 辐照中心点位于激光器对圆柱面可视部分的中心。

### 2.2 激光辐照抛物线运动靶

激光辐照抛物线运动靶交汇场景如图 2 所示。

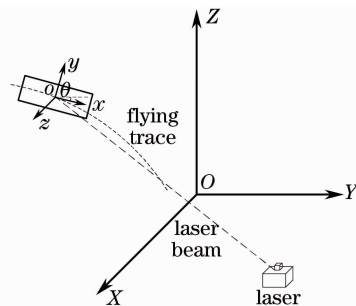


图 2 激光辐照抛物线运动靶交汇场景

Fig. 2 Encounter scene of laser irradiating parabolic moving target

针对激光辐照抛物线运动靶交汇场景,进一步做出如下设定:

- 1) 大地为无限大的参考平面;
- 2) 建立全局坐标系为地球直角坐标系  $O-XYZ$ , 局部坐标系为与靶目标关联的直角坐标系  $\sigma-xyz$  和圆柱坐标系  $\sigma-r\eta x$ ;
- 3) 激光器位于  $X-OY$  平面, 坐标为  $(X_L, Y_L, 0)$ ;
- 4) 飞行靶运动轨迹位于  $X-OZ$  平面, 初始位置为  $(X_F, 0, Z_F)$ , 初始飞行速率为  $V_0$ , 方向平行于  $X$  轴, 假定任意时刻圆柱体靶轴线与速度方向重合, 飞行方向与  $X$  轴的夹角为  $\theta(0<\theta<\pi/2)$ , 重力加速度为  $g$ ;
- 5) 靶目标绕自身轴线匀速逆时针旋转, 旋转速率为  $\omega_0$ ;
- 6) 激光辐照位置为圆柱体的圆柱面, 辐照中心点位于激光器对圆柱面可视部分的中心。

通过交汇场景的建立可以得出, 激光对旋转飞行靶的辐照过程具有如下特点: 激光器与靶目标的距离随靶目标飞行而变化; 激光器对靶目标的可视部分随靶目标飞行和旋转而变化; 激光辐照中心点和辐照面域也是不断变化的量。

## 3 辐照参数解析求解

求解激光辐照过程中激光能量在靶目标表面的分布, 是进一步分析激光对飞行靶作用效应的基础。

辐照中心点确定了激光束与靶目标的相对位置；辐照面域确定了激光束对靶目标的作用范围；平均功率密度确定了单位时间内激光作用在靶目标的能量密度。通过确定辐照中心点、辐照面域以及平均功率密度，可以求解任意时刻靶目标辐照面域的激光功率密度分布。

### 3.1 水平匀速运动靶辐照参数求解

在 2.1 节描述的激光辐照水平匀速运动靶场景下，解析求解激光辐照参数。

在  $O-XYZ$  坐标系下，任意时刻  $t$  时飞行靶中心点坐标  $(X_F, Y_F, Z_F)$  为

$$\begin{cases} X_F = X_0 - V_0 t \sin \theta \\ Y_F = Y_0 + V_0 t \cos \theta, \\ Z_F = H \end{cases} \quad (1)$$

目标飞行方向的单位矢量可以表示为

$$\mathbf{e}_n = \frac{(-V_0 \sin \theta, V_0 \cos \theta, 0)}{V_0}. \quad (2)$$

激光器指向飞行靶可视部分中心点的单位矢量，可以近似地表示为激光器指向飞行靶中心点的单位矢量，即

$$\mathbf{e}_L = \frac{(X_F, Y_F, Z_F)}{\sqrt{X_F^2 + Y_F^2 + Z_F^2}}. \quad (3)$$

由于假定飞行靶中心轴线的方向与飞行方向重合，则激光束与圆柱体靶中心轴线的夹角  $\alpha (0 < \alpha < \pi)$  可以求得

$$\cos \alpha = \mathbf{e}_L \cdot \mathbf{e}_n. \quad (4)$$

由激光特性可知，光束扩散半径  $a_0$  为

$$a_0 = L\Phi, \quad (5)$$

式中  $L$  为激光传输距离， $L = \sqrt{X_F^2 + Y_F^2 + Z_F^2}$ ； $\Phi$  为光束发散角，由激光器参数确定。

由于夹角  $\alpha$  的存在，激光辐照光斑的投影为椭圆形，其短半轴为  $a$ 、长半轴为  $a/\sin \alpha$ 。当  $\alpha = \pi/2$  时，即激光束垂直辐照飞行靶的情形，激光辐照光斑的投影为圆形。

假定辐照中心点为激光器对靶目标可视部分的中心点，在靶目标关联坐标系  $\sigma-xyz$  下求解可视中心点的坐标。由  $O-XYZ$  坐标系变换到  $\sigma-xyz$  坐标系下的转换矩阵为

$$\mathbf{M}(\theta) = \begin{bmatrix} \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

设定靶目标中心点与可视中心点的连线与  $y$  轴的夹角为  $\phi$ ，则  $\phi$  可以描述为

$$\phi = \arccos \left\{ \frac{[1, 0, 0]^* \times ([1, 0, 0]^* \times \mathbf{e}_L^*)}{\| [1, 0, 0]^* \times ([1, 0, 0]^* \times \mathbf{e}_L^*) \|} \cdot [0, 1, 0]^* \right\}, \quad (7)$$

式中  $\mathbf{e}_L^*$  为  $\mathbf{e}_L$  在  $\sigma-xyz$  坐标系中的表示， $\mathbf{e}_L^* = \mathbf{M}(\theta)\mathbf{e}_L$ ； $\phi$  的取值范围为  $0 \sim \pi$ 。

光斑中心点在  $\sigma-xyz$  坐标系中的位置为  $(0, R \cos \phi, -R \sin \phi)$ ， $R$  为圆柱体靶目标底面半径。

设定激光光束光强为高斯分布，则光束横截面上的光强分布为

$$I(r) = I_0 \exp(-2r^2/r_0^2), \quad (8)$$

式中  $I_0$  为激光束光斑中心的热源强度， $r$  为光斑区域内任意一点到光斑中心的距离， $r_0$  为激光束的光斑半径。

则短半轴为  $a$ 、长半轴为  $a/\sin \alpha$  的椭圆形光束截面的光强分布为

$$I(r_1, r_2) = I_0 \exp \left\{ -2 \left[ \frac{r_1^2}{a^2} + \frac{r_2^2}{(a/\sin \alpha)^2} \right] \right\}, \quad (9)$$

式中  $r_1$  和  $r_2$  分别为光斑区域内任意一点到光斑中心距离的短半轴分量和长半轴分量。

激光光斑中心的热源强度  $I_0$  可由平均功率密度  $q$  积分求出，而  $q$  可由激光功率  $P$  除以光束横截

面面积求出，此处不再赘述。

至此，通过确定激光辐照中心点的位置、激光辐照面域以及激光光斑中心的热源强度，可以确定激光辐照水平匀速运动靶的功率密度分布。

### 3.2 抛物线运动靶辐照参数求解

在 2.2 节描述的激光辐照抛物线运动靶场景下，解析求解激光辐照参数。

在  $O-XYZ$  坐标系下，任意时刻  $t$  时飞行靶中心点坐标  $(X_F, Y_F, Z_F)$  为

$$\begin{cases} X_F = X_0 - V_0 t \\ Y_F = 0 \\ Z_F = Z_0 - \frac{1}{2} g t^2 \end{cases}. \quad (10)$$

由于假定飞行靶中心轴线的方向与速度方向重合，在  $O-XYZ$  坐标系下，目标速度方向的单位矢量可以表示为

$$\mathbf{e}_n = \frac{(-V_0, 0, -gt)}{\sqrt{V_0^2 + g^2 t^2}}. \quad (11)$$

在  $O\text{-}XYZ$  坐标系下,激光器指向可视部分中心点的单位矢量  $e_L$  为

$$e_L = \frac{(X_F - X_L, -Y_L, Z_F)}{\sqrt{(X_F - X_L)^2 + Y_L^2 + Z_F^2}}, \quad (12)$$

同样,由(4)式求得激光束与圆柱体靶中心轴线的夹角  $\alpha (0 < \alpha < \pi)$ ,激光辐照光斑的投影是短半轴为  $a$ 、长半轴为  $a/\sin \alpha$  的椭圆形。

在  $t$  时刻,飞行方向与  $X$  轴的夹角,即圆柱体靶轴线与  $X$  轴的夹角  $\theta$  满足

$$\tan \theta = \frac{gt}{v_0}, \quad (13)$$

$$\phi = \arccos\left(\frac{[1,0,0]^* \times ([1,0,0]^* \times e_L^*)}{\|[1,0,0]^* \times ([1,0,0]^* \times e_L^*)\|} \cdot [0,0,1]^*\right), \quad (15)$$

式中  $e_L^*$  为  $e_L$  在  $\sigma\text{-}xyz$  坐标系中的表示, $\phi$  的取值范围为  $0 \sim \pi$ 。

光斑中心点在  $\sigma\text{-}xyz$  坐标系中的位置为  $(0, R\cos \phi, -R\sin \phi)$ ,  $R$  为圆柱体靶目标底面半径。

同样,在辐照激光光束光强分布为高斯函数的情形下,短半轴为  $a$ 、长半轴为  $a/\sin \alpha$  的椭圆形光束截面的光强分布,具有和(9)式同样的形式。

至此,通过确定激光辐照中心点的位置、激光辐照面域以及激光光斑中心的热源强度,可以确定激光辐照抛物线运动靶的功率密度分布。

### 3.3 靶目标旋转对辐照参数的影响

飞行靶目标绕自身轴线匀速旋转,激光辐照中心点坐标和辐照面域随之变化。相同条件下的激光辐照情形,激光辐照横截面的长半轴和短半轴、辐照面域以及激光功率密度不变。

激光辐照旋转靶的情形下,设定靶目标中心点与激光辐照中心点的连线与  $y$  轴的夹角为  $\phi'$ ,则

$$\phi' = \phi - \omega_0 t. \quad (16)$$

不同场景下的  $\phi$  由(7)式和(15)式分别求出。辐照中心点在  $\sigma\text{-}xyz$  坐标系中的位置为  $(0, R\cos \phi', -R\sin \phi')$ 。可以看出,对于旋转靶目标,随着辐照中心点坐标的变化,辐照面域也在变化。

至此,在两种不同情形的激光辐照飞行靶场景下,得出了辐照中心点位置、辐照面域和功率密度的解析表达式,确定激光辐照下靶目标圆柱面的激光功率密度分布。总结分析激光辐照参数与靶目标参数和激光器参数的相关关系:

1) 辐照中心点由激光器和靶目标相对位置确定,影响参数包括目标初始位置、飞行速度和激光器

此时,由  $O\text{-}XYZ$  坐标系变换到  $\sigma\text{-}xyz$  坐标系下的转换矩阵为

$$M(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix}. \quad (14)$$

在靶目标关联坐标系  $\sigma\text{-}xyz$  下,设定靶目标中心点与激光辐照中心点的连线与  $z$  轴的夹角为  $\phi$ ,则  $\phi$  可以描述为

位置,考虑目标旋转的情形,辐照中心点同时受到旋转速率的影响。

2) 辐照面域由辐照中心点和光斑尺寸确定,其中影响光斑尺寸的参数包括激光器光束发散角、目标初始位置、飞行速度和激光器位置。

3) 功率密度分布由辐照面域和平均功率密度确定,其中影响平均功率密度的参数包括激光器发射功率、目标初始位置、飞行速度和激光器位置。

## 4 目标旋转速率影响分析

在激光辐照水平匀速运动靶交汇场景下,设定仿真参数,解析求解激光辐照参数,进而数值求解靶目标温度场分布,设定目标毁伤阈值,分析目标旋转对激光毁伤效应的影响。

### 4.1 辐照参数

仿真环境设定:

1) 靶目标为金属/炸药结构,底面半径设定为  $0.5 \text{ m}$ ,长度为  $1 \text{ m}$ ;表面金属层材料为  $30\text{CrMnSiA}$  钢,厚度为  $0.1 \text{ m}$ ,内层为  $\text{TNT}$  炸药,厚度为  $0.4 \text{ m}$ ;

2) 激光器发射功率为  $2 \times 10^5 \text{ W}$ ,光束发散角为  $3.27 \times 10^{-5} \text{ rad}$ ,大气传输过程中能量衰减系数为  $0.2$ ;

3) 激光辐照水平匀速运动靶场景,靶目标的初始坐标为  $(1000, -2000, 1000)$ (单位:  $\text{m}$ ),飞行速度为  $(-100, 250, 0)$ (单位:  $\text{m/s}$ ),激光辐照时间设定为  $10 \text{ s}$ 。

靶目标不旋转的情形,在直角坐标系  $\sigma\text{-}xyz$  中,靶目标中心点与激光辐照中心点的连线与  $y$  轴的夹角  $\phi$  随时间的变化如图 3 所示。

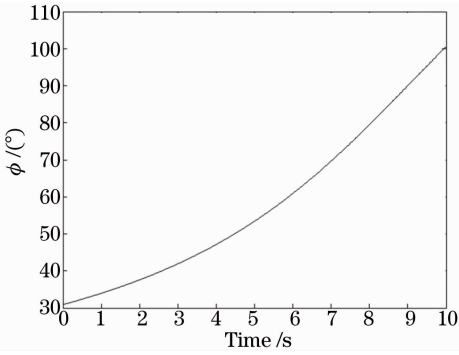


图 3  $\phi$  随时间的变化

Fig. 3  $\phi$  versus time

由夹角  $\phi$  可以确定激光辐照中心点的位置。激光辐照水平匀速运动靶的情景下,随着靶目标的飞行,夹角  $\phi$  逐渐增加,辐照中心点逐渐移向靶目标底部。辐照时间内,辐照中心点运动轨迹对应的圆心角为  $68.2^\circ$ 。

椭圆形光束截面的长半轴  $a/\sin \alpha$  和短半轴  $a$  随时间的变化如图 4 所示。

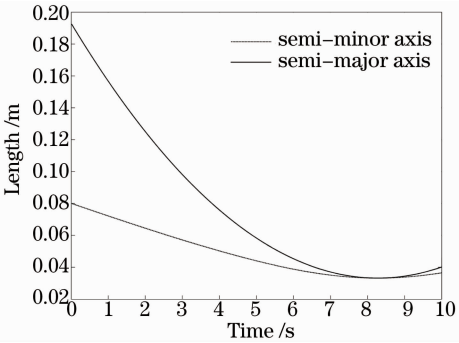


图 4 长半轴和短半轴随时间的变化

Fig. 4 Values of semi-major axis and semi-minor axis versus time

由椭圆形光束截面的长半轴和短半轴可以确定激光辐照面域。当  $t < 8.28$  s 时,随着辐照时间的增加,椭圆形光束截面的长半轴和短半轴逐渐减小;当  $t = 8.28$  s 时,夹角  $\alpha = 90^\circ$ ,激光束垂直辐照飞行靶,激光辐照光斑的投影为圆形,辐照半径为 3.3 cm;当  $t > 8.28$  s 时,随着辐照时间的增加,椭圆形光束截面的长半轴和短半轴逐渐增加。

光斑中心强度  $I_0$  随时间的变化如图 5 所示。至此,得到任意时刻激光辐照靶目标表面的功率密度分布。给出激光垂直辐照时靶目标表面的功率密度分布:当  $t = 8.28$  s 时,激光辐照中心点坐标为  $(0, 0.067, -0.496)$ (单位:m),激光辐照靶目标平均功率密度  $q = 4.68 \times 10^3$  W/cm<sup>2</sup>,光斑中心热源强度为  $I_0 = 1.06 \times 10^4$  W/cm<sup>2</sup>,圆形高斯光束半径为

3.3 cm。则圆柱面上辐照面域功率密度分布如图 6 所示。

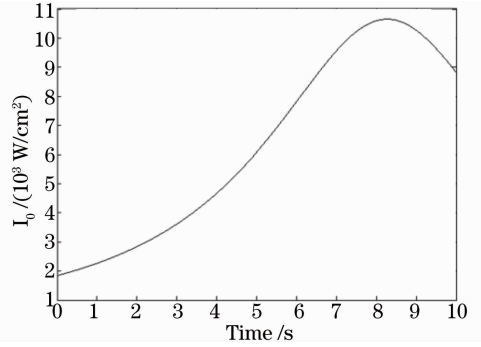


图 5 光斑中心热源强度随时间的变化

Fig. 5 Heating source intensity of laser spot center versus time

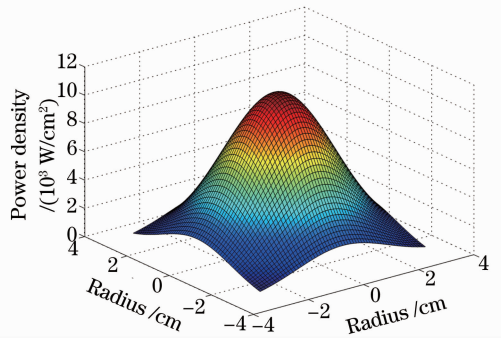


图 6 辐照面域功率密度分布 ( $t = 8.28$  s)

Fig. 6 Power density distribution ( $t = 8.28$  s)

#### 4.2 温度场分布

在辐照参数的基础上,基于傅里叶热传导定律,建立三维瞬态热传导方程,并给出初始条件和边界条件。在热传导方程的基础上,求解温度场分布,主要包括解析法<sup>[7]</sup>和数值法<sup>[8]</sup>。数值法能够方便地求解复杂边界条件下的热传导方程,包括有限单元法、有限差分法和有限容积法等。有限容积法的离散方程具有守恒性,且物理意义明确,因此选择有限容积法求解靶目标温度场分布。

在圆柱坐标系  $or\eta x$  下,求解得出不同时刻靶目标金属层外表面温度场分布如图 7 所示。激光辐照过程中,随着辐照参数的变化,温度场分布也相应变化:金属层外表面温度最高点与激光辐照中心点位置重合;某一时刻的温升区域受该时刻激光辐照面域的影响;金属层外表面温度最高值与光斑中心热源强度成正比。

在圆柱坐标系  $or\eta x$  下,求解得出不同时刻靶目标炸药外表面温度场分布如图 8 所示。

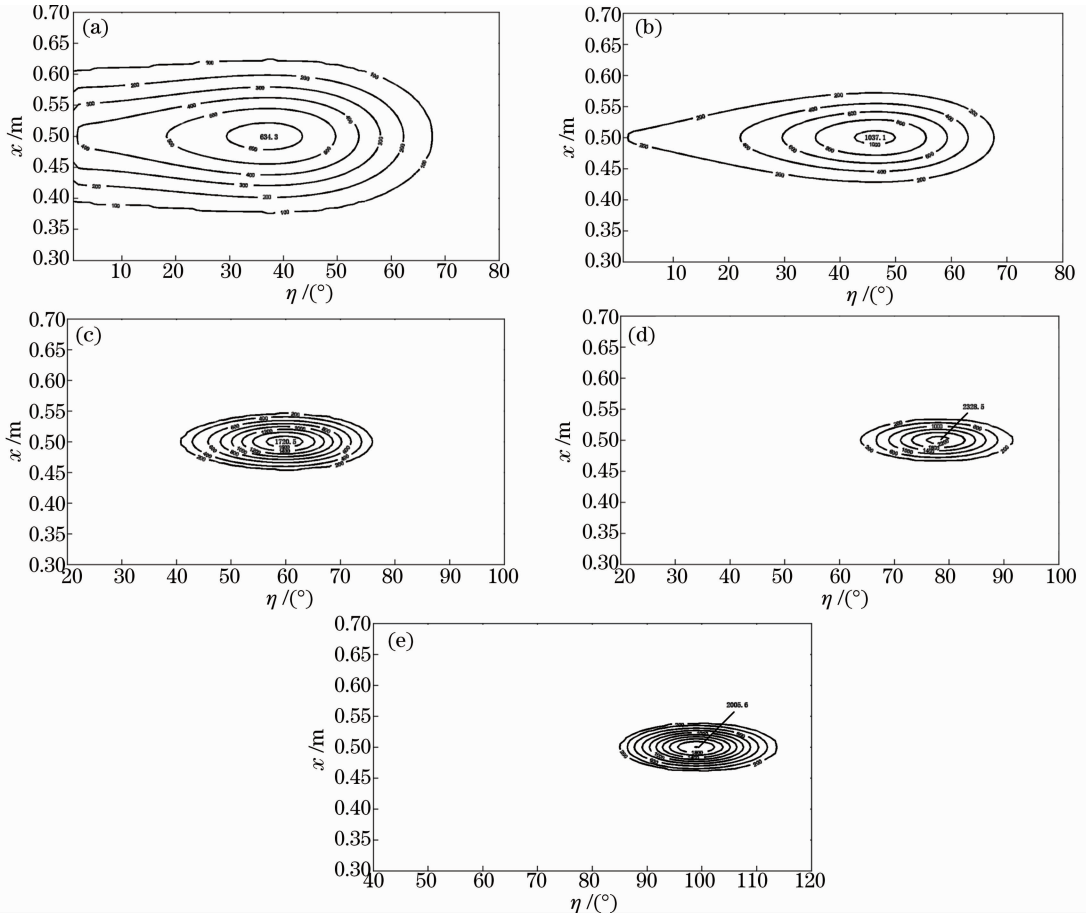


图 7 不同时刻金属层外表面温度分布(单位:  $^{\circ}\text{C}$ )。 (a)  $t=2\text{ s}$ ; (b)  $t=4\text{ s}$ ; (c)  $t=6\text{ s}$ ; (d)  $t=8\text{ s}$ ; (e)  $t=10\text{ s}$   
 Fig. 7 Temperature distribution of outer metal surface at different time (unit:  $^{\circ}\text{C}$ ). (a)  $t=2\text{ s}$ ; (b)  $t=4\text{ s}$ ;  
 (c)  $t=6\text{ s}$ ; (d)  $t=8\text{ s}$ ; (e)  $t=10\text{ s}$

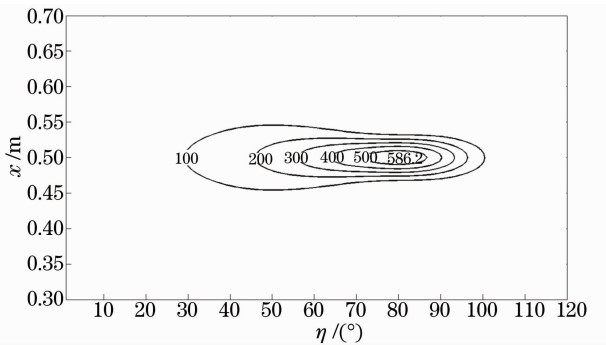


图 8 炸药外表面温度分布( $t=10\text{ s}$ , 单位:  $^{\circ}\text{C}$ )  
 Fig. 8 Temperature distribution of outer explosive surface ( $t=10\text{ s}$ , unit:  $^{\circ}\text{C}$ )

### 4.3 旋转速率影响分析

在激光辐照水平匀速运动靶交汇场景下,考虑靶目标绕自身轴线的旋转,分析旋转速率对温度场分布和毁伤效应的影响。

分别分析靶目标逆时针和顺时针旋转(观察点位于  $x$  轴正方向)情形,不同旋转速率靶目标金属层外表面和炸药外表面的最高温度值( $t=10\text{ s}$ ),如

图 9 所示。

由图 9 可知,逆时针旋转情形下,随着旋转速率增加,靶目标金属层外表面最高温度值( $t=10\text{ s}$ )略有下降,炸药外表面最高温度值不断降低;顺时针旋转情形下,随着旋转速率增加,靶目标金属层外表面最高温度值( $t=10\text{ s}$ )略有上升,炸药外表面最高温度值不断升高。分析产生的原因:由于飞行过程中夹角  $\phi$  不断增加,辐照中心点逆时针运动,靶目标绕自身轴线逆时针旋转,有利于能量的集中;靶目标绕自身轴线顺时针旋转,不利于能量的集中。

假定靶目标受激光辐照毁伤的阈值条件为炸药外表面最高温度达到爆点温度。所谓爆点是指炸药在一定条件下指定时间内由于加热而发生爆炸反应的最低环境温度,如 5 min 爆点、5 s 爆点等。对于 TNT 而言,其 5 s 爆点约为  $475\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。分别分析靶目标逆时针和顺时针旋转情形下不同旋转速率靶目标的毁伤时间,如图 10 所示。

由图 10 可知,逆时针旋转情形下,由于靶目标能



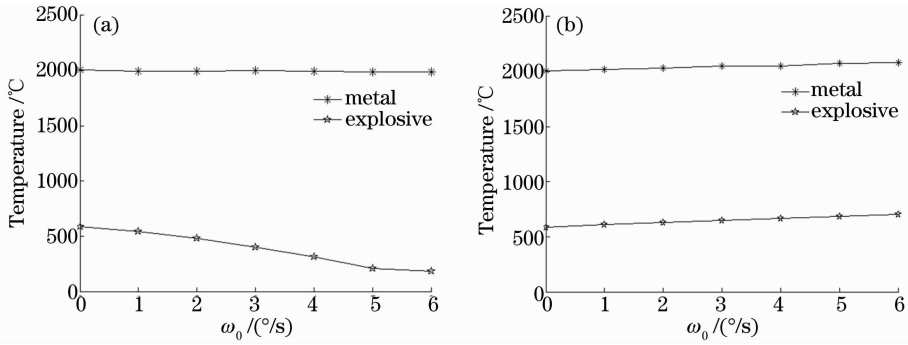


图9 不同旋转速率对应的最高温度值( $t=10$  s)。(a) 逆时针旋转；(b) 顺时针旋转

Fig. 9 Highest temperature versus rotation velocity ( $t=10$  s). (a) Counter clockwise rotation; (b) clockwise rotation

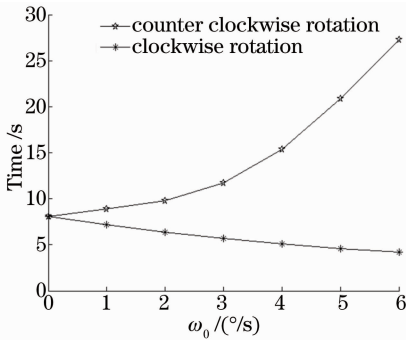


图10 不同旋转速率对应的毁伤时间

Fig. 10 Damage time versus rotation velocity

量不容易集中,随着旋转速率增加,激光辐照靶目标达到毁伤阈值的时间呈指数形式增长;顺时针旋转情形下,由于靶目标能量容易集中,随着旋转速率增加,激光辐照靶目标达到毁伤阈值的时间不断减小。

## 5 结 论

1) 辐照中心点由激光器和靶目标相对位置确定,随靶目标的飞行而变化。辐照中心点轨迹位于坐标  $x=0$  的圆柱面上,随靶目标飞行逐渐向底部移动。

2) 辐照面域由辐照中心点和光斑尺寸确定。辐照时间内,随靶目标的飞行,椭圆长半轴和短半轴的变化规律为:长半轴和短半轴逐渐减小;长半轴和短半轴在最小值时相等,此时激光垂直辐照飞行靶,辐照面域的投影为圆形;长半轴和短半轴逐渐增加。

3) 功率密度分布由辐照面域和平均功率密度确定。辐照面域功率密度分布为椭圆形高斯分布,平均功率密度、光斑中心热源强度、长短半轴随着靶目标的飞行而变化;激光垂直辐照飞行靶,辐照面域功率密度分布为圆形高斯分布,平均功率密度和光斑中心热源强度达到极值。

4) 飞行靶目标绕自身轴线匀速旋转,激光辐照

中心点坐标和辐照面域随之变化。相同条件下的激光辐照情形,激光辐照横截面的长半轴和短半轴、辐照面域以及激光功率密度不变。

5) 靶目标旋转对温度场分布和毁伤效应的影响:金属外层最高温度值变化不大;若旋转方向和激光束运动方向一致,有利于能量在靶目标内部的集中,旋转速率越大,炸药外层最高温度越高,毁伤时间越短;若旋转方向和激光束运动方向不一致,不利于能量在靶目标内部的集中,旋转速率越大,炸药外表面最高温度越低,毁伤时间越长。

在建立交汇场景的过程中,设定了理想化的条件,没有考虑大气阻力的影响以及激光的大气传输效应,需要在以后的研究中加以细化。

## 参 考 文 献

- 1 C D Boley, A M Rubenchik. Modeling antimortar lethality by a solid-state heat-capacity laser [C]. 2<sup>nd</sup> Annual High Energy Lethality Conference, 2005.
- 2 C D Boley, S Fochs, M Rotter, *et al.*. A directed energy system for defeat of improvised explosive devices and landmines[C]. 7<sup>th</sup> International Symposium on Technology and the Mine Problem, 2006.
- 3 Jiao Lugang. Effects of Laser Irradiation to Metal/Explosive[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2008. 1-2.  
焦路光. 激光对金属/炸药结构的辐照模型[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2008. 1-2.
- 4 Jiao Luguang, Zhao Guomin. Numerical simulation of three-dimensional temperature field of metal/explosive irradiated by high energy laser[J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(9): 1715-1719.  
焦路光, 赵国民. 激光辐照下金属/炸药结构三维温度场的数值模拟[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(9): 1715-1719.
- 5 Ma Like, Lu Qisheng, Zhao Guomin, *et al.*. Geometrical aspects of laser heating the flying cylinder[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2004, 16(12): 1518-1522.  
马厉克, 陆启生, 赵国民, 等. 激光对运动圆柱体加热的几何学研究[J]. 强激光与粒子束, 2004, 16(12): 1518-1522.
- 6 Ma Like, Lu Qisheng, Zhao Guomin, *et al.*. Effect of laser setup position relative to trajectory on dynamic heating[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2005, 17(9): 1318-1322.

马厉克, 陆启生, 赵国民, 等. 激光器与轨道的相对位置对动态加热的影响[J]. 强激光与粒子束, 2005, 17(9): 1318—1322.

7 Zhang Yingcong, Shen Hua, Zhu Rihong. Three-dimensional temperature field of material irradiated by continuous wave laser [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(8): 0806002.

张英聪, 沈 华, 朱日宏. 连续激光辐照材料的三维温度场[J]. 中国激光, 2013, 40(8): 0806002.

8 Xiao Jing, He Hengxiang, Xia Huijun, *et al.*. Temperature field

simulation on aluminum alloy irradiated by long pulsed laser and continuous wave laser [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(11): 1103002.

肖 婧, 何衡湘, 夏惠军, 等. 长脉冲与连续激光联合辐照铝合金的温度场仿真[J]. 中国激光, 2012, 39(11): 1103002.

栏目编辑: 宋梅梅