

文章编号 1004-924X(2011)02-0463-07

# 脉冲紫外激光和 X 射线辐照 Al 靶冲量耦合的异同性

王玉恒<sup>1,2</sup>, 赵学庆<sup>1,2</sup>, 谭晓莉<sup>1</sup>, 刘 峰<sup>1,2</sup>, 丁 升<sup>1,2</sup>

(1. 西北核技术研究所, 陕西 西安 710024; 2. 激光与物质相互作用国家重点实验室, 陕西 西安 710024)

**摘要:** 为了探索不同脉冲束辐照热-力学效应的相似性关系, 同时为实验室开展激光模拟 X 射线热力学效应研究提供参考, 分析了脉冲紫外激光(0.308  $\mu\text{m}$ )和 X 射线辐照 Al 靶喷射冲量的异同性。首先, 对二者辐照热-力学效应机理的异同性进行了比较; 其次, 理论和实验研究了两种脉冲束辐照 Al 靶引起的喷射冲量, 对较低能注量(小于  $100 \text{ J/cm}^2$ )条件下两种脉冲束产生喷射冲量的大小进行了对比。研究表明, 在低能量密度条件下(小于  $100 \text{ J/cm}^2$ )由于没有等离子体屏蔽现象, 两种脉冲束辐照靶材产生喷射冲量的机理近似。相同能注量条件下, 激光与 X 射线辐照 Al 靶产生的喷射冲量具有相同的数量级, 均小于  $10^2$ 。两种脉冲束在一定范围内具有一定的可比性。

**关键词:** 脉冲紫外激光; X 射线; 铝靶; 热-力学效应; 喷射冲量; 异同性

**中图分类号:** TN249 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20111902.0463

## Similarity and distinction between impulse coupling with aluminum by pulsed ultraviolet laser and by X-ray

WANG Yu-heng<sup>1,2</sup>, ZHAO Xue-qing<sup>1,2</sup>, TAN Xiao-li<sup>1</sup>, LIU Feng<sup>1,2</sup>, DING Sheng<sup>1</sup>

(1. Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China;

2. State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, Xi'an 710024, China)

**Abstract:** To investigate the similarity on thermo-mechanical effects induced by different pulsed beams, and also to give a reference for the experimental research of thermal and mechanical effects under X-ray radiation using simulation method of laser irradiation, the similarity and distinction between impulse coupling with an aluminum target by the pulsed ultraviolet laser(0.308  $\mu\text{m}$ ) and X-ray were analyzed. Firstly, the contrast of the mechanism of thermo-mechanical effects between two pulsed beams was compared. Then, a comparative analysis for the quantity of blow-off impulse induced by two pulsed beams coupling with Al materials was performed in lower energy flux ( $<100 \text{ J/cm}^2$ ) by means of theory and experimental methods. The results show that the generation mechanisms of blow-off impulse are similar in lower energy flux ( $<100 \text{ J/cm}^2$ ) for the pulsed ultraviolet laser and X-ray, because there are not a phenomenon of plasma shield. The quantity of impulse by these two pulsed beam irradiation has the same order of magnitude of impulse ( $<10^2$ ) in same energy flux. Therefore,

收稿日期: 2010-10-08; 修订日期: 2010-10-30.

基金项目: 国防预研基金资助项目(No. 9140A11020207KG21)

the two pulsed beam effects are comparable within a certain range.

**Key words:** pulsed ultraviolet laser; X-ray; Al target; thermo-mechanical effect; blow-off impulse; similarity and distinction

## 1 引言

一般地,相似性问题分为整体相似和局部相似。整体相似就是不同的脉冲束在材料与结构中产生的各种力学效应(包括冲量、层裂、热激波幅值和波形等)是相同或相似的。显然,这样的相似性无论从工程应用还是从物理意义上来说都很难满足。因此,局部相似是脉冲束辐照效应等效性研究中讨论的重点,即两种脉冲束产生的一种或几种热-力学效应是相同或相似的,例如,对于脉冲束辐照引起的喷射冲量和热激波,从宏观力学现象上来说,如果喷射冲量和热激波相似就足以确保层裂和结构响应也是相似的,因而整体相似<sup>[1]</sup>。

研究脉冲紫外激光和 X 射线辐照热-力学效应相似性的前提是对两种脉冲束进行异同性分析,对二者的差异进行比较,从可比较的宏观力学效应入手,找到建立二者相似性关系的基础。本文针对脉冲紫外激光(0.308  $\mu\text{m}$ )和 X 射线,首先对二者辐照热-力学效应机理的异同性进行了比较;其次,针对两种脉冲束辐照 Al 靶引起的喷射冲量开展理论和实验研究,对较低能注量(小于  $100 \text{ J/cm}^2$ )条件下两种脉冲束产生喷射冲量的大小进行对比。本文研究结果可为进一步探讨脉冲紫外激光和 X 射线辐照热-力学效应的相似性关系提供基础,同时为实验室开展激光模拟 X 射线热力学效应研究提供参考,而对于较高能注量(大于  $100 \text{ J/cm}^2$ )条件下两种脉冲束的相似性研究,将在另文中讨论。

## 2 两种脉冲束辐照热-力学效应机理的异同性概述

### 2.1 相似点

激光和 X 射线辐照靶材时产生的热效应和力学效应有相似之处,如材料的温升、熔融和汽

化、冲量、热激波、层裂、结构响应诸方面,这里从以下几个方面说明二者的相似性。

#### 2.1.1 热效应<sup>[1,3-4]</sup>

材料的温升由脉冲束辐照的能量沉积引起。两种脉冲束辐照到靶材会在材料内部产生能量沉积,能量沉积首先表现为材料的温度上升。

温度进一步上升会引起材料的熔融和汽化。沉积的能量一部分转化为材料膨胀做功的动能,一部分使材料的内能增加。当其比内能超过材料的熔化热和汽化热时,材料表现为熔融和汽化。

#### 2.1.2 力学效应<sup>[3-4]</sup>

喷射冲量的产生机理相同。两种脉冲束在一定能注量条件下辐照材料表面引起熔融和汽化,辐照表层的熔融和汽化物质向外高速喷射,对材料表面产生反冲冲量。

能量沉积和材料温升的不均匀性会引起一系列热激波、层裂和结构响应等力学效应,这些力学效应均具有相同的特点。

## 2.2 相异点

激光和 X 射线辐照靶材时的热-力学效应也有各自的特点,这些特点对产生喷射冲量大小有显著的影响,可从以下几方面说明两者在机理上的差异。

#### 2.2.1 能量沉积方式

材料对两种脉冲束的表面反射特性有较大差异。X 射线在材料表面的反射极小,在材料内部具有一定的穿透深度。激光在材料表面具有较大的反射,且存在等离子体屏蔽现象,反射及屏蔽使入射能量密度减小。

能量沉积的范围可出现量级上的差异。对于 X 射线辐照,其能量沉积深度远大于热传导深度,该深度可取为光子的平均自由程。对于激光,能量仅沉积在材料表面一个薄层内,该层厚度远小于热传导深度。

#### 2.2.2 与物质相互作用机制

激光与物质相互作用的机制与 X 射线相比有一定差异,也较复杂。主要包括韧致吸收、光电

离、多光子吸收、空穴吸收以及杂质吸收等多种类型。例如,金属材料对普通波长激光的吸收主要是自由电子的逆韧致吸收,而对短波长的X射线激光主要是光电离。与X射线相比,激光在宏观热-力学效应上的特点主要表现为:

### (1) 等离子体屏蔽

对于高功率密度激光辐照,在激光作用过程中会产生等离子体,等离子体的屏蔽作用不容忽视。

### (2) 激光支持吸收波

非真空环境下,激光辐照使材料前方气体电离,形成激光支持吸收波。这种波可分为激光支持爆轰波(LSD)和激光支持燃烧波(LSC)。由于激光支持波的屏蔽作用,激光与物质相互作用的过程也是一个耦合-失耦-再耦合的振荡过程。

### (3) 等离子体辐射

激光辐照材料表面出现的等离子体层可视为黑体,它吸收了激光辐射能量,并将约一半的能量作为紫外辐射和X射线辐射,对材料、结构本身产生效应。

## 3 脉冲紫外激光辐照Al靶喷射冲量的理论和实验研究

从以上分析可以知道,由于激光和X射线与材料相互作用机制的差异,二者所引起喷射冲量大小也有差异。在激光与靶材作用过程中,引起的喷射冲量存在明显的与入射光强度相关的阈值<sup>[3]</sup>,这个阈值与等离子体的产生密切相关。在与X射线辐照喷射冲量对比过程中,首先研究低能注量范围内两者的异同,在低能注量范围内,激光引起的喷射冲量受到等离子体影响较小,此时与X射线喷射冲量的产生机制相似。在该范围内,主要采用实验和数值模拟的方法对两者的喷射冲量大小进行对比。对高能注量范围内的喷射冲量将在另文中讨论。

### 3.1 激光冲量耦合的理论模拟

高功率脉冲激光辐照到靶材上,随着温度升高,会发生汽化效应。汽化物质高速喷出会形成对材料的反冲压力,该压力对时间和空间的积分就是喷射冲量,就是激光辐照的冲量耦合效应。

假定气化表面在产生喷射冲量过程中暂时未受到喷射气体的屏蔽,即透明蒸气模型。当激光入射强度低于等离子击穿阈值时,可用透明蒸气模型。对于紫外脉冲激光,根据计算可以知道,等离子点火阈值约为 $10^9 \text{ W/cm}^2$ 。当靶面蒸气压力和动量迅速增大达到最大值时,蒸气和环境空气很快发生电离,形成等离子体,在这以后靶面压力将缓慢下降。C. R. Phipps 和 A. N. Pirri 通过对大量实验的总结和对比分析,给出了更高强度激光辐照下冲量耦合的定标关系<sup>[5-7]</sup>。

这里讨论透明蒸气对靶表面的压力和冲量。由透明蒸气流动理论计算定常蒸气压力 $p$ ,就得出相应的一维条件下的冲量或冲量耦合系数。设激光束和靶板都是轴对称的, $r$ 是靶表面上离开光斑中心的距离, $p_0$ 是环境气体的压力, $p(r, t)$ 是靶表面的压力分布, $r_a(t)$ 是 $t$ 时刻压力 $p = p_0$ 处的半径, $t_a$ 是光斑中心压力降为 $p_0$ 的时刻,冲量定义为

$$I = \int_0^{t_a} \int_0^{r_a(t)} [p(r, t) - p_0] r dr dt, \quad (1)$$

通过靶材汽化后烧蚀压力随时间的变化,可进行冲量耦合计算。通常用冲量耦合系数 $C_m$ 来衡量冲量效应的大小,该参数定义为反冲冲量 $I$ 与入射激光能量 $E_L$ 之比,即:

$$C_m = I/E_L = \iint p dr dt / \iint I_L dr dt. \quad (2)$$

在稳态汽化时,反冲压力 $p$ 不随时间变化,对矩形脉冲激光,若假定压力分布均匀,上式可按下式估算:

$$C_m = p/I_L.$$

针对处于真空中( $10^{-2} \text{ Pa}$ )的LY12-Al,利用式(1)、(2)可以计算冲量及冲量耦合系数随入射激光功率密度的变化,并可对不同脉宽和不同波长的情况进行比较。计算时,时间积分考虑了汽化阈值因素;根据文献,取反冲压力为烧蚀压力的 $1/2$ <sup>[8]</sup>。

### 3.2 冲量耦合实验研究

为了对理论模型进行验证,开展了真空和大气条件下XeCl激光( $0.308 \mu\text{m}$ )对LY1-2Al的冲量耦合实验研究<sup>[4]</sup>。实验中,真空度为 $2 \times 10^{-2} \text{ Pa}$ 左右,激光功率密度在 $1 \times 10^7 \sim 2 \times 10^9 \text{ W/cm}^2$ 之间变化。实验测量结果如图1所示,利用不同模型对冲量耦合系数的相关计算结果一并示

于图中,图中还示出了 D. I. Rosen 利用脉宽为  $0.5 \mu\text{s}$  的 XeF 激光( $351 \text{ nm}$ )对真空中 Al 靶的冲量耦合实验数据<sup>[8]</sup>。

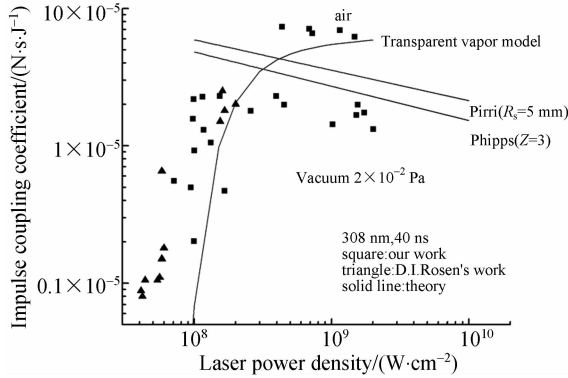


图 1 冲量耦合随激光功率密度变化

Fig. 1 Impulse coupling coefficient vs. power intensity of laser

由图 1 可见,真空条件下,在激光对 LY12-Al 的冲量耦合与靶上激光功率密度的变化关系中,存在一个快速上升阶段,在约  $2 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$  时,达到最大值  $2.3 \times 10^{-5} \text{ N} \cdot \text{s/J}$ ,之后缓慢下降。通过比较发现,在到达最大值前与利用非定常透明蒸汽模型的计算结果基本相符;之后与 C. R. Phipps 和 A. N. Pirri 定标模型预测的变化趋势一致。冲量耦合系数随靶上激光功率密度增加下降,主要是由于等离子体对激光吸收增强而产生的屏蔽效应,进而影响到靶上能量沉积。在大气环境下测量得到的冲量耦合系数较高,是由于此时形成了激光支持的燃烧波(LSC)或爆轰波(LSD)<sup>[9-10]</sup>,不再仅仅是烧蚀汽化导致蒸发波的贡献,这不在本文讨论的范围。

由于等离子体的影响,对激光烧蚀产生的冲量耦合需要用不同的模型来预测其行为。由图 1 可见,用透明蒸汽模型和定标模型可较好地得到激光与靶材冲量耦合系数随功率密度的变化规律,为实验设计提供参考。但实验和理论值存在一定差异,这与计算中假设激光光场时空均匀,靶材物性参数随温度的变化简化处理,未考虑靶面粗糙度和表面缺陷的影响和简化了等离子体图像等有关,更精确的预测需要更为精细、复杂的计算。

## 4 X 射线辐照 Al 靶喷射冲量的理论模拟

对于一维平板辐照,在忽略热传导效应的前提下,材料的热力学响应满足如下一维应变弹塑性流体力学方程组

$$\frac{\partial u}{\partial r} = \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{V}{V_0} \right), \quad (3)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -V_0 \frac{\partial (\sigma + Q)}{\partial r}, \quad (4)$$

$$\frac{\partial E}{\partial t} + (\sigma + Q) \frac{\partial V}{\partial t} = E_x, \quad (5)$$

$$p = p(V, E), \quad (6)$$

$$\sigma = p + S, \quad (7)$$

式中, $u$  为质点速度, $V$  为比容, $\sigma$  为应力, $Q$  为人工黏性, $E$  为比内能, $p$  为流体静压, $S$  为应力偏差, $r$  为拉格朗日坐标, $t$  为时间, $E_x$  为 X 射线能量沉积产生的外能源项。

应力偏差  $S$  满足下列解析形式的本构方程

$$S = \begin{cases} 0 & E \geq E_1 \\ \frac{4}{3} G \left( 1 - \frac{V}{V_0} \right) & |S| \leq \frac{2}{3} Y_0', E > E_1 \\ \frac{2}{3} Y_0' & S > \frac{2}{3} Y_0', E < E_1 \\ -\frac{2}{3} Y_0' & S < -\frac{2}{3} Y_0', E < E_1 \end{cases} \quad (8)$$

式中, $a, b$  为粘性系数, $\rho$  为密度, $E_1$  为材料的熔化能, $G$  为剪切模量, $Y_0'$  为屈服强度。

采用如下形式的状态方程,在  $V \leq V_0$  的压缩状态,有

$$p = \frac{K_0}{K_0'} \left[ \left( \frac{V_0}{V} \right)^{K_0'} - 1 \right] + \frac{\Gamma_0}{V_0} \left\{ E - \frac{K_0}{K_0'} \left[ \frac{V}{K_0' - 1} \left( \frac{V_0}{V} \right)^{K_0'} + V \right] - \frac{K_0}{1 - K_0'} V_0 \right\}, \quad (9)$$

在  $V > V_0$  的膨胀状态,有

$$p = \frac{1}{V} \left[ H + (\Gamma_0 - H) \sqrt{\frac{V}{V_0}} \right] \left\{ E - E_s \left( 1 - \exp \left[ -N \frac{V}{V_0} \left( \frac{V}{V_0} - 1 \right) \right] \right) \right\}, \quad (10)$$

式中, $K_0$  为体压缩模量, $\Gamma_0$  为 Grüneisen 系数, $E_s$  为汽化能, $K_0', H, N$  为材料常数。

X 射线辐照过程中的喷射冲量是由辐照产生的熔化、汽化物质对靶材的反冲所致,因此冲量  $I$  为

$$I = \int_0^\delta \rho_0 u dR \quad E \geq E_m, \quad (11)$$

烧蚀质量  $\Delta m$  为

$$\Delta m = \int_0^\delta \rho_0 dR \quad E \geq E_m, \quad (12)$$

式中,  $\delta$  为材料的烧蚀厚度,  $E_m$  为材料的熔化能或汽化能,  $R$  为欧拉坐标。

图 2~4 分别给出了不同能注量、不同黑体谱温度和不同脉宽的 X 射线辐照靶材时喷射冲量的变化。从图中可以看到,对于软 X 射线,冲量近似于线性依赖能量密度,而对硬 X 射线,则基本上是非线性关系。在一定的脉宽范围内,冲量与脉宽关系不大,尤其对软 X 射线更是如此。

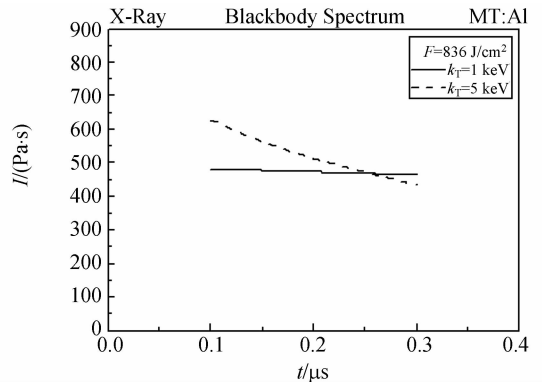


图 4 冲量随脉宽的变化

Fig. 4 Impulse vs. pulsewidth of X-ray

### 5 较低能量密度条件下两种脉冲束辐照 Al 靶喷射冲量的比较

前面指出,在低能量密度条件下,由于没有等离子体屏蔽现象,脉冲紫外激光与 X 射线辐照靶材产生喷射冲量的机理近似。根据激光辐照喷射冲量的理论,对于紫外脉冲激光,其等离子体点火阈值大约在  $10^9 \text{ W/cm}^2$  附近,在低于这个功率密度范围内,透明蒸气模型计算结果与实验值基本符合。表 1 给出了脉冲紫外激光与 X 射线在小于  $100 \text{ J/cm}^2$  范围内喷射冲量的比较,激光喷射冲量采用本文的实验数据,X 射线喷射冲量在低能量密度范围内没有实验数据,采用计算数据,通过对比,可以看出在低能量密度范围内,相同能注量条件下,激光与 X 射线辐照 Al 靶产生的喷射冲量在小于  $10^2$  数量级范围内,在较高黑体温度时,X 射线与激光的喷射冲量较为接近,但两种脉冲束的规律有所不同。对于  $\lambda=0.308 \mu\text{m}, \tau=40 \text{ ns}$  的紫外脉冲激光,根据实测结果,其产生喷射冲量的最大能量阈值  $I_{\text{max}}=2 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$ ,在大于该能量阈值时,由于产生等离子体,对激光入射产生了屏蔽,喷射冲量随功率密度呈下降趋势。对于 X 射线,在该能量密度范围内,喷射冲量随能量密度呈上升趋势。

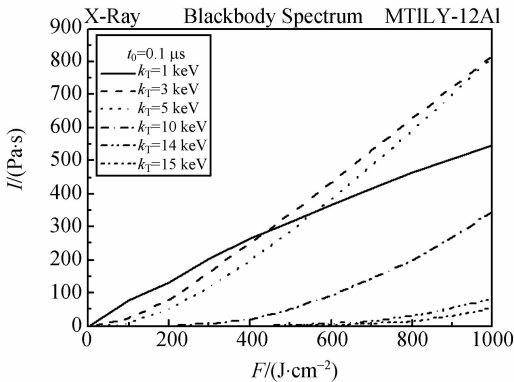


图 2 冲量随能量密度的变化

Fig. 2 Impulse vs. energy intensity of X-ray

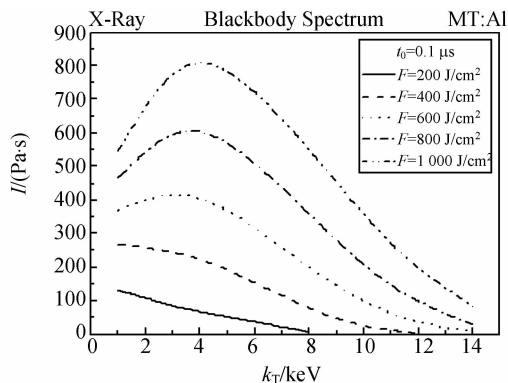


图 3 冲量随黑体温度的变化

Fig. 3 Impulse vs. black-body temperature of X-ray

表 1 强激光和 X 射线辐照靶产生喷射冲量比较

Tab. 1 Impulse coupling with materials by pulsed XeCl excimer laser and X-ray

激光(实测结果)			X 射线(计算结果)			
$\lambda=0.308 \mu\text{m}$ $\tau=40 \text{ ns}$			$k_T=1.0 \text{ keV}$		$k_T=3.0 \text{ keV}$	
功率密度	能注量	冲量	能注量	冲量	能注量	冲量
$/(10^9 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2})$	$/(J \cdot \text{cm}^{-2})$	$/(Pa \cdot s)$	$/(J \cdot \text{cm}^{-2})$	$/(Pa \cdot s)$	$/(J \cdot \text{cm}^{-2})$	$/(Pa \cdot s)$
1.559	62	12.11	60	34	60	6
1.739	70	10.60	70	49	70	10
2.02	81	8.63	80	60	80	14

## 6 结 论

本文对脉冲紫外激光(0.308  $\mu\text{m}$ )和 X 射线的辐照-力学效应机理的异同性进行了比较,结果表明,脉冲紫外激光和 X 射线辐照靶材时产生的热-力学效应在材料的温升、熔融和汽化、喷射冲量、热激波、层裂、结构响应诸方面有相似的机理

和特点,在能量沉积方式和与物质相互作用机制方面存在较大的差异。在低能量密度条件下(小于  $100 \text{ J/cm}^2$ ),由于没有等离子体屏蔽现象,脉冲紫外激光与 X 射线辐照靶材产生喷射冲量的机理近似。相同能注量条件下,激光与 X 射线辐照 Al 靶产生的喷射冲量具有相同的数量级,均在小于  $10^2$  数量级范围内,该规律对实验设计具有一定指导意义。

## 参考文献:

- [1] 周南,乔登江. 脉冲束辐照材料动力学[M]. 北京:国防工业出版社,2002.  
ZHOU N, QIAO D J. *Materials Dynamics Under Pulse Beam Radiation* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002. (in Chinese)
- [2] 彭常贤. 脉冲 X 光与其它模拟源的结构响应等效性分析[J]. 高压物理学报,2002,16(2):105-110.  
PENG C X. Analysis of equivalence for structural response induced by pulsed X-ray with other analogue sources[J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2002,16(2):105-110. (in Chinese)
- [3] 刘峰. 强激光与铝靶材的耦合效应研究[D]. 西安:西北核技术研究所,1991.  
LIU F. *Study of intense laser coupling with Al materials*[D]. Xi'an: Northwest Institute of Nuclear Technology, 1991. (in Chinese)
- [4] 赵学庆. 脉冲紫外 XeCl 准分子激光与靶材冲量耦合研究[D]. 长沙:国防科技大学,2005.  
ZHAO X Q. *Study of impulse coupling with materials by pulsed XeCl excimer laser* [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2005. (in Chinese)
- [5] PHIPPS C R, TURNER T P, HARRISON R F, et al. . Impulse coupling to targets in vacuum by KrF, HF, and CO<sub>2</sub> Single-Pulse Lasers [J]. *J. Appl. Phys.*, 1988,64(3):1083-1096.
- [6] PIRRI A N. Theory for laser simulation of hypervelocity impact[J]. *Phys. Fluids*, 1977,20(2):221-228.
- [7] PHIPPS C R, LUKE J R, MCDUFF G G, et al. . Laser ablation powered mini-turuster [J]. *SPIE*, 2002,4760:833-842.
- [8] ROSEN D I, MITTELDORF J, KOTHANDARAMAN G, et al. . Coupling of pulsed 0.35 $\mu\text{m}$  laser radiation to aluminum[J]. *J. Appl. Phys.*, 1982, 53:3190-3200.
- [9] 陆建,倪晓武,贺安之. 激光与材料相互作用物理学[M]. 北京:机械工业出版社,1996:75-131.

LU J, NI X W, HE A ZH. *Physics of the Interaction of Laser and Materials* [M]. Beijing : China Machine Press , 1996:75-131.

[10] ANDREW V P, LIN J, TAN R Q. Air pressure

effect on propulsion with transversely excited atmospheric CO<sub>2</sub> laser[J]. *AIAA J.* , 2006, 44(1): 136-141.

#### 作者简介:

**王玉恒**(1977—),男,河南方城人,博士研究生,副研究员,1999年于西北工业大学获学士学位,2002年于西北核技术研究所获硕士学位,主要从事激光、脉冲束与物质相互作用方面的研究。E-mail: imtree@126.com

**赵学庆**(1966—),男,河北阜城人,研究员级高级工程师,1989年于哈尔滨工业大学获学士学位,2005年于国防科技大学获硕士学位,主要从事高功率激光及应用方面的研究。E-mail: zxq. hb@163.com

**谭晓莉**(1977—),女,陕西合阳人,博士,2006年于国防科技大学获博士学位,主要从事脉冲束辐射效应方面的研究。

**刘峰**(1962—),男,陕西榆林人,博士,研究员,2007年于西安电子科技大学获博士学位,主要研究方向为激光技术。liufeng-laser@163.com



**丁升**(1966—),男,山东沂水人,博士研究生,副研究员,2000年于国防科技大学获硕士学位,主要从事脉冲束辐射效应方面的研究。E-mail: nintding@163.com