

# 两个冲击波相互碰撞的演化过程\*

张 翼<sup>1)</sup> 郑志远<sup>1,2)</sup> 李玉同<sup>1)</sup> 刘 峰<sup>1)</sup>  
李汉明<sup>1,3)</sup> 鲁 欣<sup>1)</sup> 张 杰<sup>1)†</sup>

1) 中国科学院物理研究所北京凝聚态物理国家实验室, 北京 100080)

2) 中国地质大学材料科学与工程学院, 北京 100080)

3) 中国矿业大学, 北京 100083)

(2007 年 1 月 4 日收到, 2007 年 1 月 31 日收到修改稿)

利用阴影成像诊断技术, 对激光约束烧蚀所产生的两个冲击波相互碰撞的演化过程进行了研究. 通过分析冲击波相互碰撞在时间上和空间上的演化过程发现, 当冲击波相互碰撞的时候, 两个冲击波本身并不发生相互作用, 而是冲击波与烧蚀等离子体之间发生相互作用.

关键词: 冲击波碰撞, 激光烧蚀, 阴影成像

PACC: 5235T

## 1. 引 言

近些年来, 激光与固体靶相互作用由于其在激光推进<sup>[1-4]</sup>、激光材料分析<sup>[5,6]</sup>及医学<sup>[7-9]</sup>等方面的实际应用而引起了广泛的关注. 当一束能量很高的激光聚焦在固体表面时, 可以在固体的表面产生等离子体, 等离子体的温度越高、持续时间越长则激光烧蚀的效率越高. 最新的研究结果表明, 通过在靶前加一透明的约束层可以提高激光烧蚀产生的等离子体的温度, 延长等离子体及其产生的冲击波的持续时间, 从而使得激光烧蚀的效率得到显著提高<sup>[10,11]</sup>, 这种烧蚀被称为约束烧蚀. 本文则是要研究约束烧蚀中相邻两个介面产生的两个冲击波的碰撞过程.

强激光与物质相互作用可以分为以下几个相互作用的阶段<sup>[12,13]</sup>: 在相互作用的初始阶段, 在各种光电效应和热效应的作用下, 固体内部的电子被电离, 从固体的表面喷射出来. 随着激光能量的不断增加, 当其达到固体表面的击穿阈值时, 激光与等离子体相互作用产生的大量高能电子将能量传递给物质的晶格, 使物质熔化蒸发, 在靶的表面形成一层烧蚀等离子体, 继续的吸收激光能量并向外扩散. 当烧蚀等离子体扩散离开靶面时, 其开始与周围的大气相互

作用, 将大气电离形成冲击波, 而冲击波在烧蚀等离子体的驱动下也不断的向外扩散. 本文主要研究激光聚焦在玻璃表面和铝靶表面上产生的两个冲击波碰撞的演化过程. 通过改变玻璃片和铝靶之间的距离和改变探针光和主激光之间的延迟时间两种途径, 我们观察到了两个不同的冲击波碰撞过程, 通过分析这两种情况下的不同之处, 可以得出结论: 当两个冲击波相互碰撞时, 两个冲击波波面并不发生相互作用, 而是一个冲击波与另一个冲击波内的烧蚀等离子体发生作用.

## 2. 实验布置

为了研究激光烧蚀玻璃片和铝靶产生的冲击波的碰撞情况, 我们用阴影成像的办法对其进行观察, 光路图如图 1 所示. 从调 Q 锁模放大 Nd:YAG 激光器中输出波长 532 nm、脉宽 7 ns、最大能量 1.4 J 的激光经 M1, M2 反射后, 由分束镜将其分成主激光和探针光两束光束. 占总能量 70% 的主激光经透镜 L1 后, 穿过 0.5 mm 厚的玻璃, 聚焦在铝靶上, 在铝靶和其前面的玻璃片上分别产生冲击波. 而探针光则经过 M4, M5, M6, M7 组成的延时光路后, 与主激光垂直穿过玻璃片和铝靶之间, 再通过透镜 L2 将玻璃片

\* 国家自然科学基金(批准号: 60478047, 10575129, 10675164, 60321003), 国家重点基础研究发展计划(973)项目(批准号: 2007CB815100)中国科学院知识创新工程重要方向项目(批准号: KJCX1-YW-01, KJCX2-YW-T01)资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: zhang@ahpy.iphy.ac.cn

和铝靶之间的冲击波成像到 CCD 上. 通过改变延时光路中 M5、M6 的位置, 可以使探针光和主激光之间的延时时间从 7 ns 到 100 ns 连续变化, 从而可以观察到冲击波碰撞的整个过程. 整个阴影图的时间分辨为 7 ns.

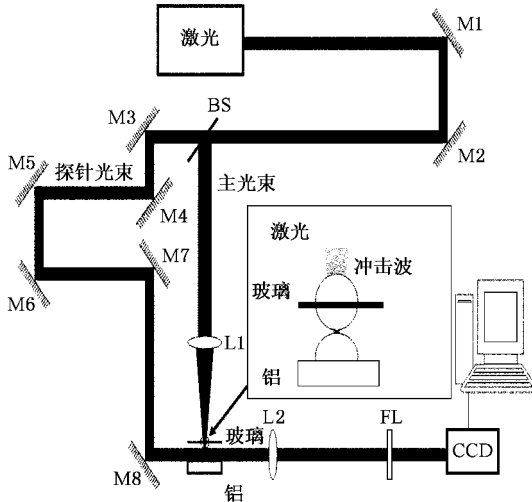


图1 冲击波对碰阴影成像装置图 其中 M 为反射镜, L 为透镜, FL 为滤光片, BS 为分束镜, 玻璃片厚度为 0.5 mm

### 3. 实验结果和讨论

图2为纳秒激光通过0.5 mm厚的玻璃片后聚焦到铝靶上产生冲击波的典型图像,其中探针光和主激光之间的延迟时间为22 ns. 激光从右向左入射,分别在玻璃的前表面、后表面和铝靶的表面形成了冲击波(沿激光传播方向,激光最先烧蚀的表面为玻璃前表面,透过玻璃后烧蚀的表面为玻璃后表面).在玻璃的前表面,由于激光未完全聚焦,烧蚀面积较大,所以产生的冲击波半径比较大.但是由于功率密度较低,并未看到明显的烧蚀等离子体喷出<sup>[14]</sup>,仅观察到一球状冲击波从玻璃前表面突出;在玻璃的后表面,由于激光进一步聚焦,使得激光的功率密度变大,再加上是透射式烧蚀,在玻璃后表面烧蚀等离子体的喷射不受等离子体背向压力的阻碍<sup>[15]</sup>,所以可以明显地看到被烧蚀的物质从玻璃表面喷出.最外面的冲击波层保持球状沿激光方向传播,在激光通过玻璃后,聚焦在铝靶的表面产生冲击波.由于激光在玻璃中损失了较多的能量,激光在铝的表面并未发生强烈的烧蚀,因此未观察到明显的烧蚀等离子体从铝靶表面喷出,仅有一个球状的冲

击波逆着激光的传播方向,与玻璃后表面产生的冲击波相对传播.

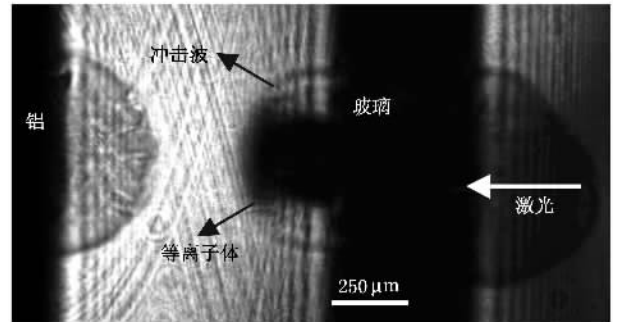


图2 激光透过玻璃后在铝表面产生冲击波的阴影图 图中激光从右面入射,玻璃厚度为0.5 mm

玻璃后表面产生的冲击波和铝靶表面产生的冲击波在时间和空间上的碰撞情况如图3、图4所示.

图3为在探针光和主激光之间的延迟时间为29.8 ns的情况下,通过改变玻璃片和铝靶之间的距离观察到的冲击波碰撞过程图(等延迟不同间距冲击波碰撞过程图).从图中可以看到在玻璃片和铝靶之间的距离为996 μm时(图3(a)),两个冲击波还未碰撞到一起,铝靶与玻璃片上观察到的冲击波和图2中看到的冲击波相同.当空间距离减小未为564 μm,两个冲击波刚好碰撞到了一起(图3(b)).我们可以清楚的观察到:玻璃后表面形成的冲击波依然保持球状,沿激光传播方向,向铝靶产生的冲击波内继续传播.而铝靶上产生的冲击波由于玻璃片后表面产生的烧蚀物质的遮挡,无法判断其冲击波的波前变化.此外还可以观察到玻璃后表面产生的烧蚀等离子体,其横向扩散比未碰撞的时候略微增大了.当玻璃片和铝靶之间的距离进一步减小到422 μm,两个冲击波完全碰撞到一起,如图3(c)所示,图中虚线为铝靶表面产生的冲击波原有轮廓,可以明显看到铝靶表面产生的冲击波的波前遇到玻璃表面冲击波后,发生畸变,波前变平.而玻璃后表面产生的冲击波依然保持球状在铝靶产生的冲击波内传播.烧蚀等离子体的横向扩散在图3(c)中比图3(b)远远增大.在图3(d),玻璃片和铝靶之间的距离减小到213 μm,铝靶中的冲击波已经完全被压回到铝靶表面.玻璃片中的冲击波也由于受到铝靶的阻挡,观察不到冲击波波前的轮廓.烧蚀物质的横向扩散也超过了冲击波界面的限制.

图4为在保持玻璃片和铝靶之间间距为600 μm不变的情况下,通过改变探针光和主激光之间的延

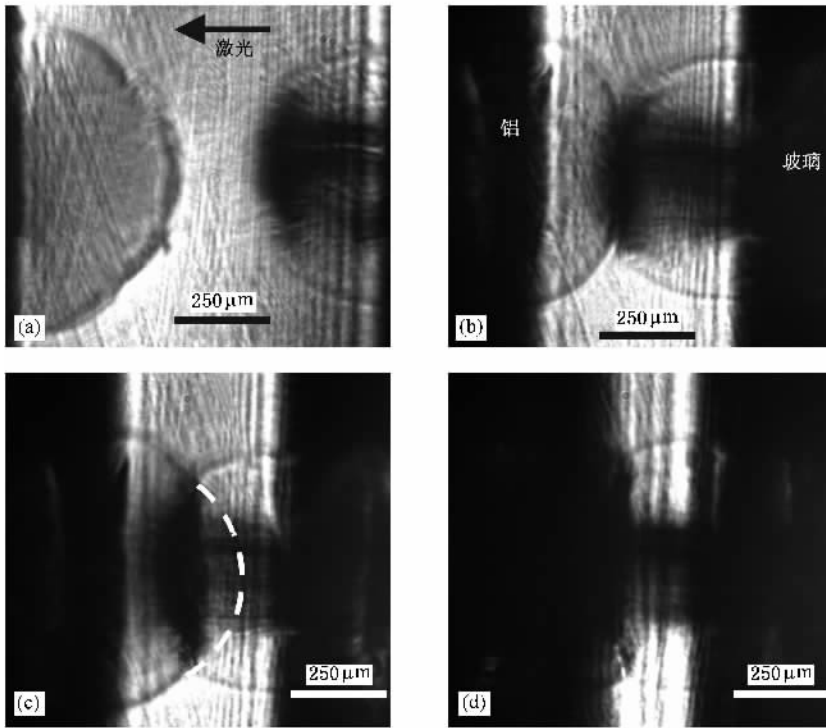


图3 在相同的延迟时间下,通过改变玻璃片和铝靶之间的距离观察到的冲击波碰撞过程( a)~( d)中,玻璃和铝靶之间的间距分别为 996、564、422 和 213  $\mu\text{m}$ ,激光从右向左入射,左面的冲击波是在铝靶表面形成的,右面的冲击波是在玻璃片的后表面形成的

延迟时间观察到的冲击波的碰撞过程(等间距不同延迟时间的冲击波碰撞过程图).在图 4(a)中主激光和探针光的延迟时间为 22 ns,两个冲击波还未碰撞到一起.玻璃后表面产生的冲击波中可以看到有烧蚀等离子体不断的喷出;当主激光和探针光之间的延迟时间为 29.8 ns 时,两个冲击波刚好碰到一起(如图 4(b)),两个冲击波的波前没有发生明显变化.玻璃后表面产生的烧蚀等离子体已经明显减少,并开始慢慢向靶面方向移动,发生固化,凝固在玻璃表面<sup>[14-16]</sup>.当主激光和探针光之间的延迟时间为 58.8 ns,两个冲击波碰撞到了一起.但与图 3(c)不同的是,在图 4(c),两个冲击波的波前基本保持不变进入另一个冲击波内.玻璃后表面的冲击波波前在铝靶产生的冲击波内依然保持球状.而铝靶产生的冲击波波前,在玻璃产生的冲击波中受到烧蚀等离子体的影响,波前变得略微平滑,但未发生明显凹陷.在图 4(d)中,主激光和探针光之间的延迟时间为 96.6 ns,这时在冲击波内传播的两个冲击波波前由于其传播环境的改变已经消失,而烧蚀等离子体在两个冲击波的碰撞处冷却凝结,形成了一个类似平面的分界面.

上面我们对等延迟不同间距和等间距不同延迟

的两个不同的冲击波碰撞过程进行了描述,为了进一步对这两个过程进行分析,采用 Sedov<sup>[17,18]</sup>理论对两个冲击波的能量进行估计.根据 Sedov 理论,高强度激光烧蚀固体产生的冲击波的半径可以用下式进行估计:

$$r_2 = \lambda_0 \left( \frac{E_0}{\rho_1} \right)^{1/(2+\xi)} t^{2/(2+\xi)}, \quad (1)$$

其中  $r_2$  是冲击波的半径,  $\lambda_0$  是一个无量纲常数,  $E_0$  是冲击波的能量,  $\rho_1$  是冲击波周围大气的密度,  $\xi$  是一个和维数有关的常数(当冲击波的传播面为球面时,  $\xi = 3$ ; 当冲击波的传播面为柱面时,  $\xi = 2$ ; 当冲击波传播面为平面时,  $\xi = 1$ ).在我们的实验中冲击波的传播面为球面,所以  $\xi = 3$ ,周围大气的密度为  $\rho_1 = 1.293 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3$ ,无量纲常数  $\lambda_0 = 1$ .而冲击波的半径  $r_2$  随时间  $t$  的演化关系可以从测到的阴影图中获得,因此通过拟合冲击波半径  $r_2$  随时间  $t$  变化得曲线可以估计冲击波的能量  $E_0$ .拟合曲线图如图 5 所示.

拟合上述曲线后,估算得到玻璃片后表面产生的冲击波的能量为  $E_{0\text{后}} \approx 216.5 \text{ mJ}$ ,铝靶前表面冲击波的能量约为  $E_{0\text{铝}} \approx 527.2 \text{ mJ}$ (激光的能量约为

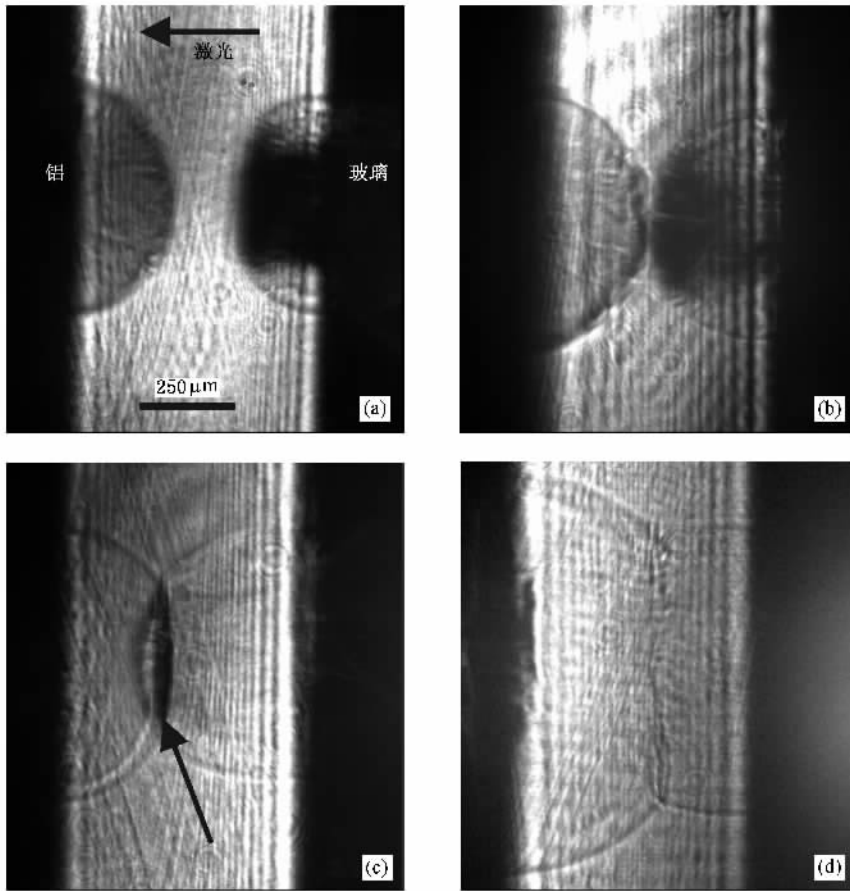


图 4 等间距不同延迟时间的冲击波碰撞过程图 玻璃片和铝靶之间的间距为  $600\ \mu\text{m}$ 。(a)–(d) 中 探针光和主激光之间的延迟分别为 22, 29.8, 58.8, 96.6 ns. 激光从右向左入射, 左面的冲击波是铝靶表面形成的, 右面的冲击波是在玻璃的后表面形成的

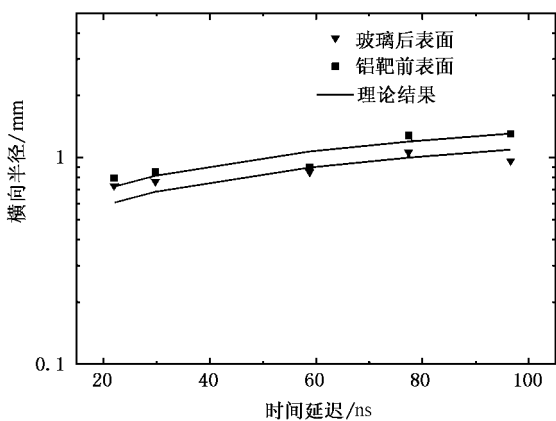


图 5 冲击波半径  $r_2$  随时间  $t$  变化的曲线关系

波边缘向内凹陷. 这说明在这一碰撞中, 冲击波的能量大小不是决定性因素. 在图 4 所示的等间距不同延迟的冲击波碰撞过程中, 两个冲击波碰撞时烧蚀物质已经基本消失, 两个冲击波波前均保持不变进入另一个冲击波内. 随着时间延迟的进一步增大, 两个冲击波波前破裂融合到一起, 并未发生冲击波波前畸变现象. 所以综上所述可以得出结论, 两个冲击波相碰时, 两个冲击波本身并不发生相互作用, 而是冲击波与烧蚀等离子体之间发生相互作用. 当冲击波与烧蚀等离子体相遇时, 由于受到烧蚀等离子体的阻拦, 波前沿烧蚀等离子体的轮廓发生畸变; 与此同时烧蚀物质由于受到冲击波的作用, 其横向扩散也进一步增加.

900 mJ),  $E_{0\text{铝}} > E_{0\text{后}}$ . 但是在图 3 所示的等延迟不同间距的冲击波碰撞过程中, 玻璃后表面所产生的冲击波波前在碰撞过程中并没有发生变化, 反而铝靶表面所产生的冲击波波前在遇到玻璃所产生的冲击波时发生了严重的畸变, 波前沿玻璃所产生的冲击

由于烧蚀等离子体产生于激光与靶面作用的初期, 在激光的作用下烧蚀等离子体从靶面高速喷出, 离子压缩周围的气体, 形成了冲击波. 随着时间的演化, 烧蚀等离子体的喷出速度逐渐减小到零, 然后开始慢慢向靶面移动, 发生再次固化, 并逐渐消失. 所

以如果约束层与靶面距离较小时,两个冲击波的碰撞发生的时间相对于激光与靶开始作用的时间延迟较短,这时烧蚀等离子体保持以较高的速度喷出靶面,与冲击波相互碰撞,使冲击波的波前发生畸变,对其起到约束作用.随着约束层与靶面的距离增加,两个冲击波碰撞的发生时间相对于激光与靶开始作用的时间延迟也越来越长,这时烧蚀等离子体的喷出速度已经开始慢慢减小,烧蚀等离子体也开始慢慢消失,两个冲击波的波前碰撞到一起时,几乎不发生相互作用,所以约束层的约束作用也就慢慢消失了.这样便可以解释在约束烧蚀的时候,约束层与烧蚀层距离越远约束作用越不明显的现象.

## 4. 结 论

本文利用阴影成像的办法,对激光约束烧蚀中两个冲击波的碰撞过程进行了研究.分别观察了等间距不同延迟时间和等延迟时间不同间距下的两个冲击波的碰撞过程.通过比较这两个过程的不同之处,得出结论:两个冲击波相互作用时,两个冲击波本身并不发生相互作用,而是冲击波与烧蚀等离子体之间发生相互作用.当冲击波与烧蚀等离子体相遇时,由于受到烧蚀等离子体的阻拦,波前延烧蚀等离子体的轮廓发生畸变;与此同时烧蚀等离子体由于受到冲击波的作用,其横向扩散也进一步增加.

- 
- [ 1 ] Bohn W L 2000 *Proc. SPIE C* **4065** 48
- [ 2 ] Myrabo L M, Messit D G, Mead F B 1998 *AIAA Paper* **98** 1001
- [ 3 ] Zheng Z Y, Zhang J, Hao Z Q, Yuan X H, Zhang Z, Lu X, Wang Z H, Wei Z Y 2006 *Chin. Phys.* **15** 580
- [ 4 ] Zheng Z Y, Lu X, Zhang J, Hao Z Q, Yuan X H, Wang Z H 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 259 ( in Chinese ) 郑志远、鲁 欣、张 杰、郝作强、远晓辉、王兆华 2005 *物理学报* **54** 259 ]
- [ 5 ] Lowndes D H, Geohegan D B, Puzosky A A, Norton D P, Rouleau C M 1996 *Science* **273** 898
- [ 6 ] Geohegan D B, Puzosky A A, Duscher G, Pennycook S J 1998 *Appl. Phys. Lett.* **72** 2987
- [ 7 ] Zysset B, Fujimoto J G, Deutsch T F 1989 *Appl. Phys. B* **48** 139
- [ 8 ] Vogel A, Busch S, Parlitz U 1996 *J. Acoust. Soc. Am.* **100** 143
- [ 9 ] Noack J, Vogel A 1998 *Appl. Optics* **37** 4092
- [ 10 ] Fabbro R, Fournier J, Ballard P, Devaux D, Virmont J 1990 *J. Appl. Phys.* **68** 775
- [ 11 ] Ho J R, Grigoropoulos C P, Humphrey J A C 1995 *J. Appl. Phys.* **78** 4696
- [ 12 ] Ready J F 1971 *Effects of High-Power Laser Radiation* ( New York : Academic )
- [ 13 ] Miller J C, Haglund R F 1998 *Laser Ablation and Desorption* ( New York : Academic )
- [ 14 ] Callies G, Berger P, Hugel H 1995 *J. Phys. D* **28** 794
- [ 15 ] Kelly R, Miotello A, Braren B, Otis C E 1992 *Appl. Phys. Lett.* **60** 2980
- [ 16 ] Salleo A, Genin F Y, Feit M D, Rubenchik A M, Sands T, Mao S S, Russo R E 2001 *Appl. Phys. Lett.* **78** 2840
- [ 17 ] Sedov L I 1959 *Similarity and Dimensional Methods in Mechanics* ( London : Cleaver Hume )
- [ 18 ] Li Y T, Zhang J, Teng H, Li K, Peng X Y, Jin Z, Lu X, Zheng Z Y, Yu Q Z 2003 *Phys. Rev. E* **67** 056403

# Collision process of two shockwaves<sup>\*</sup>

Zhang Yi<sup>1)</sup> Zheng Zhi-Yuan<sup>1 2)</sup> Li Yu-Tong<sup>1)</sup> Liu Feng<sup>1)</sup>

Li Han-Ming<sup>1 3)</sup> Lu Xin<sup>1)</sup> Zhang Jie<sup>1 †)</sup>

1 † Beijing National Laboratory for Condensed Matter Physics, Institute of Physics,  
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

2 † School of Materials Science and Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

3 † China University of Mining & Technology, Beijing 100083, China)

( Received 4 January 2007 ; revised manuscript received 31 January 2007 )

## Abstract

The collision of the two shockwaves induced by laser confined ablation is investigated by time-resolved shadowgraph. Through the observation of the temporal and spacial evolution of the two shockwaves, it is found that the shockwaves do not interact with each other but interact with the plasma induce by ablation in the collision.

**Keywords** : collision of shockwaves, laser ablation, shadowgraph

**PACC** : 5235T

<sup>\*</sup> Project supported by the National Nature Science Foundation of China ( Grant Nos. 60478047, 10575129, 10675164, 60321003 ), the National Basic Research Program of China ( 973 ) ( Grant No. 2007CB815100 ) and the Knowledge Innovation Program of Chinese Academy of Sciences ( Grant Nos. KJ CX1-YW-01, KJ CX2-YW-T01 ).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail : zhang@ahpy.iphy.ac.cn