

飞秒激光烧蚀典型金属表面产生冲击波膨胀研究

魏 健¹, 张 彬¹, 刘 晖², 张 航³

(1. 四川大学电子信息学院, 四川 成都 610065;

2. 西安工程大学机电工程学院, 陕西 西安 710048;

3. 中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川 绵阳 621999)

摘要: 利用时间分辨阴影成像技术进行飞秒激光烧蚀金属表面研究可以直观获取飞秒激光烧蚀金属表面产生冲击波膨胀过程的图像。通过对比飞秒激光烧蚀金属铝、铜、铁靶表面的冲击波膨胀形式发现: 金属铜、铁表面的冲击波均以球面波形式传播; 由于受到烧蚀物质喷溅的影响, 铝靶表面垂直方向的冲击波传播形式由球面波转化为柱面波。

关键词: 飞秒激光; 冲击波; 超快阴影成像; 金属烧蚀

中图分类号: O347.5

文献标识码: A

激光技术是 20 世纪的重大发明之一, 以激光技术为基础的相关产业随之蓬勃发展起来, 为工业制造、生物医学、航空航天以及国防科技等重要领域注入新的活力。激光加工是国家可持续发展战略相关产业的重要支撑技术之一, 涉及新材料开发、新工艺研制、智能制造等。利用激光的高强度能量, 可以实现多种材料的熔覆、焊接、切割和表面改性。飞秒激光因具有超快时间特性和超强峰值功率的特点, 在激光加工技术领域凸显出独特的优势, 例如局部聚焦特性、多光子非线性和超精细加工。

飞秒激光烧蚀金属是激光加工技术领域的一个重要研究方向, 因其涉及等离子体形成、冲击波演化以及双温度模型等机理, 成为国内外多个研究团队的关注热点, 特别是对多种在线观测技术的发展和直接获取飞秒激光烧蚀金属的超快过程的研究, 极大促进了飞秒激光烧蚀金属技术的进一步发展。1996 年, 英国埃塞克斯大学 Evans 等^[1]进行了飞秒激光烧蚀金属铝驱动冲击波研究, 测得约 10^{14} W/cm² 激光能量下的冲击压力。2000 年, 美国洛斯阿拉莫斯国家实验室的 Gahagan 等^[2]利用飞秒激光烧蚀金属薄膜, 并结合频域测速技术, 获得了自由面粒子速度和冲击波速度。基于飞秒激光泵浦探测原理发展的时间分辨阴影成像技术具有同步性好、时间分辨率高和操作简易等优点, 成为国内外激光烧蚀领域研究飞秒激光烧蚀金属超快动力学过程的强有力工具。2014 年, Connell 等^[3]利用时间分辨阴影成像技术观察飞秒激光烧蚀金膜产生等离子体膨胀和原子气快速蒸发的过程。美国普渡大学 Zhao 等^[4]开展了金属铜靶的飞秒激光烧蚀实验, 观测到铜靶表面随时间延迟变化的等离子体羽辉。南开大学 Zhang 等^[5-6]研究了飞秒激光烧蚀铝靶的超快过程, 利用相爆原理进行飞秒激光作用于金属铝的物理机制解释, 并进行了不同大气压力下飞秒激光烧蚀金属铝靶的实验研究, 验证了烧蚀冲击波产生与周围气压的关系。不仅如此, 2013 年该团队还提出了飞秒激光烧蚀金属铝、铜靶的冲击温度研究模型^[7]。2014 年, 上海交通大学 Li 等^[8]研究飞秒激光作用于铝靶表面时的瞬态强电场, 提出了“三层”模型, 为超快电子衍射技术奠定了基础。金属材料在飞秒激光作用下的多种理论研究模型也被提出, 包括电子输运性质^[9]、表面热特性^[10]等。作为典型金属材料的代表, 铝靶的飞秒激光烧蚀研究已经比较充分, 而常见的金属材料, 如铜、铁的飞秒激光烧蚀研究相对较少。

* 收稿日期: 2019-03-08; 修回日期: 2019-03-31

基金项目: 国家自然科学基金(11872058); 超光滑表面无损检测安徽省重点实验室开放课题(CGHBWJSJC06)

作者简介: 魏 健(1986—), 男, 硕士研究生, 主要从事超快激光诊断技术研究. E-mail: wj_skx@126.com

通信作者: 张 彬(1969—), 女, 博士, 教授, 主要从事高功率激光技术、非线性光学等研究。

E-mail: zhangbinff@sohu.com

本研究通过建立时间分辨阴影成像平台,获得飞秒激光烧蚀金属铝、铜、铁3种金属表面产生的冲击波、物质喷溅等物理图像,结合冲击波传播模型分析3种金属表面的冲击波传播方式,解释冲击波传播方式存在差异的原因,并获得不同能量密度的飞秒激光烧蚀下铝靶表面的冲击波膨胀、物质喷溅图像,掌握飞秒激光烧蚀铝靶的能量密度调控规律。

1 实验装置

基于飞秒激光抽运-探测原理的超快阴影成像系统原理如图1所示。飞秒激光器(型号: Legend Elite, Coherent)出射的飞秒激光(脉宽 130 fs, 中心波长 800 nm, 重复频率 1 kHz)由分束镜(1:1)分成两束。其中一束作为泵浦光,通过延迟线后引入显微镜系统,并由 10 倍物镜(NA=0.25)聚焦。实验中,调整样品台高度,使抽运光(烧蚀光)的几何焦点进入金属表面以下约 0.5 mm 处;另一束飞秒激光作为探测光(照明光),通过一块厚度为 1 mm 的倍频晶体将波长倍频至 400 nm,从侧面照射泵浦光烧蚀石英玻璃区域。增强电荷耦合相机(ICCD, 型号: Dicom Pro, PCO)的最短曝光时间为 2 ns,因此采集的图像具有极高的信噪比。实验中将 ICCD 的曝光时间控制为 0.999 ms,一方面可以使每次 ICCD 打开后只拍摄一幅飞秒激光脉冲作用的图像,另一方面可以增大采集到图像的机率。利用延时触发器(DG535)连接飞秒激光器和 ICCD,对飞秒激光脉冲输出和图像采集进行同步性控制。每触发一次 DG535,飞秒激光器即发射一个飞秒脉冲,ICCD 就获得一幅阴影成像图;然后通过放置样品的三维移动台,更换新的烧蚀位置;再根据实验要求,延长或缩短时间延迟线,即设定烧蚀激光脉冲与照明激光脉冲之间的时间延迟;最后再次操作 DG535 触发飞秒激光器发射一个飞秒激光脉冲,同时通过 ICCD 拍摄图像。如此重复,通过将 ICCD 获得的阴影成像图按时间延迟顺序从短至长排列,即可以获得飞秒激光烧蚀材料的连续过程。如果设置时间延迟为纳秒时间尺度,且时间分辨率优于皮秒量级,那么通过这些阴影成像图组成的过程将是飞秒激光烧蚀材料的超快成像过程。实验中,固定烧蚀飞秒激光功率为 5 mW,对应的烧蚀能量密度约 1.6 J/cm^2 。该超快成像系统的时间分辨率取决于飞秒激光脉宽和延迟线的精度,优于 0.3 ps。实验选择 Al、Cu 和 Fe 共 3 种金属样品,尺寸均为 $20 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ (对应图1中 x 、 y 、 z 方向),激光烧蚀表面平行于 xy 平面。

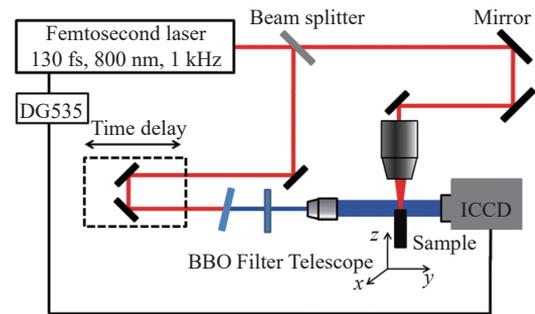


图1 时间分辨阴影成像系统实验装置
Fig. 1 Experimental setup of time-resolved shadowgraph imaging system

2 飞秒激光烧蚀金属表面冲击波膨胀研究

2.1 飞秒激光烧蚀金属铝表面冲击波膨胀过程

以金属铝为实验样品,在飞秒激光烧蚀金属铝表面获得的冲击波演化图像如图2所示。通过图2可以看出,在烧蚀的初始阶段(0~0.3 ns),金属铝表面产生黑色稠密等离子体团,随着时间延迟的增加逐渐膨胀。与飞秒激光烧蚀其他固体材料^[11-12]类似,首先由金属中的自由电子吸收飞秒激光能量产生高频振动,振动产生的能量通过声子弛豫传递给晶格,进一步产生相爆和等离子云团。稠密等离子体在 ICCD 中呈黑色阴影的主要原因是稠密等离子体内包含大量的电子、原子、离子等粒子对照明光形成吸收和散射。当时间延迟逐渐增加至 0.5 ns,稠密等离子团逐渐变得稀疏、透明,说明稠密等离子体在这个时间尺度开始慢慢弛豫,向外挤压周围空气,形成半圆冲击波轮廓,向内稠密等离子膨胀挤压 Al 晶格,并将能量传输至晶格中。时间延迟为 0.7~1.5 ns 阶段,半圆形冲击波继续向外膨胀。冲击波轮廓分两层:内层呈黑色,外层呈高度透明。说明冲击波内层可能含有电子、离子等,密度高;外层与周围空气进行充分的能量交换,从而逐渐冷却,密度降低。在此阶段,向内挤压晶格的等离子体膨胀过

程达到极限,无法进一步向铝靶内部传输,而铝靶内部开始逐渐出现反作用力,方向与激光传输方向相反。时间延迟 2.5 ns 后,冲击波继续向外膨胀,此时铝表面开始出现喷射物,并随着时间延迟增加,喷射物逐渐增多,说明铝靶内部晶格的反作用力正推动烧蚀点的物质向外喷出。由于时间延迟较短,烧蚀点区域的能量还来不及向周围传递,因此喷溅物的温度依然较高,且包含铝碎屑、铝原子、铝离子及电子等物质。时间延迟为 3.5 ns 时,可以在喷溅物的表面呈现另一个冲击波轮廓,该冲击波主要是由于喷溅物的温度较高,喷射时再次挤压周围空气所致。初步观察,第一个冲击波呈现半圆形,而由喷溅物所致的冲击波轮廓呈现椭圆形,沿激光传输方向的半径略大。

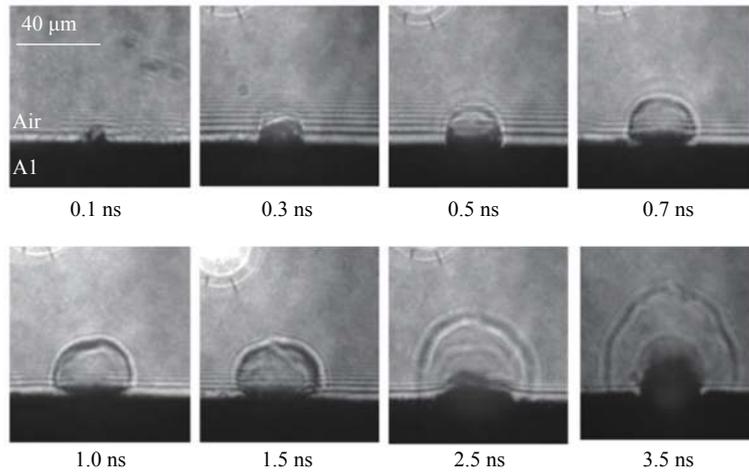


图2 飞秒激光烧蚀金属 Al 表面产生冲击波膨胀成像

Fig. 2 Time-resolved shadowgraph imaging of ultrafast shockwave evolution induced by femtosecond laser ablation on Al target

2.2 飞秒激光烧蚀金属铜、铁表面冲击波膨胀过程

与飞秒激光烧蚀金属铝的实验条件相同,将铝样品更换为铜样品,观察铜靶烧蚀的冲击波,结果如图3所示。烧蚀前两阶段的现象与铝一致:在烧蚀的初始阶段(0~0.3 ns),在铜表面观察到半圆形黑色稠密等离子团;时间延迟 0.5~1.5 ns 阶段,同样包含半圆形冲击波的膨胀与表面附近的等离子体扩散。不同的是在 2.5 ns 以后,金属铜表面几乎观测不到碎屑飞溅,所以也未观测到二次冲击波的产生。

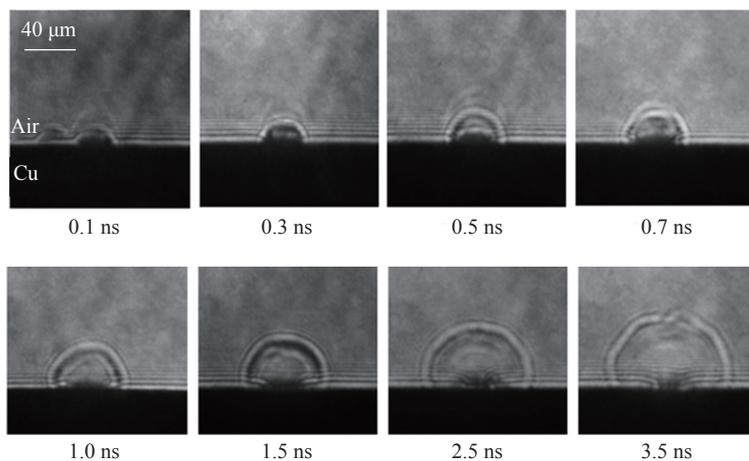


图3 飞秒激光烧蚀金属 Cu 表面冲击波膨胀成像

Fig. 3 Time-resolved shadowgraph imaging of ultrafast shockwave evolution induced by femtosecond laser ablation on Cu target

图4所示为飞秒激光烧蚀金属铁的表面冲击波演化图像。金属铁靶表面冲击波与金属铜表面冲击波演化现象极为相似:可以分为表面稠密等离子体膨胀、冲击波膨胀等阶段,但也未观测到碎屑飞溅过程。

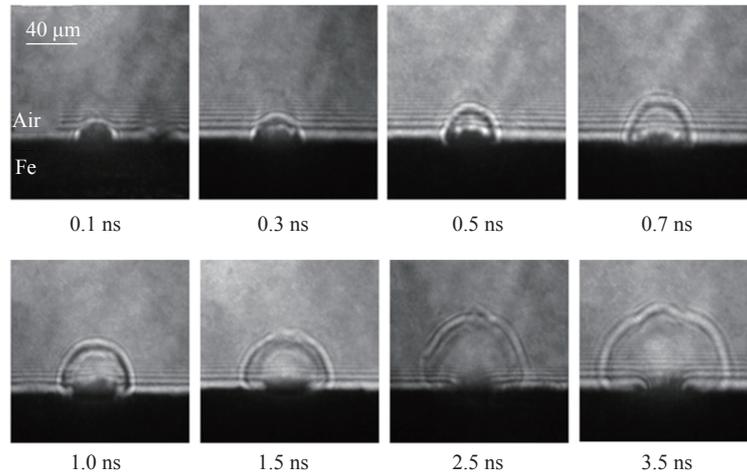


图 4 飞秒激光烧蚀金属 Fe 表面冲击波膨胀成像

Fig. 4 Time-resolved shadowgraph imaging of ultrafast shockwave evolution induced by femtosecond laser ablation on Fe target

2.3 飞秒激光烧蚀金属表面冲击波膨胀动力学分析

飞秒激光烧蚀 3 种金属产生冲击波的动力学分析主要依据 Sedov-Taylor 理论^[13]

$$R = \lambda \left(\frac{E}{\rho} \right)^{1/(2+\beta)} t^{2/(2+\beta)} \quad (1)$$

式中： R 为冲击波传播距离； λ 为常数，近似为 1； E 为冲击波释放能量； ρ 为空气密度； t 为时间延迟； $\beta=3$ 时冲击波为球面波传播， $\beta=2$ 时冲击波为柱面波传播， $\beta=1$ 时冲击波为平面波传播。通过(1)式对冲击波轮廓随时间变化数据进行拟合，可以对照 Sedov-Taylor 理论辨别冲击波的类型。

图 5 所示为金属铝、铜、铁在水平(R)和竖直(L)方向的冲击波传播距离随时间延迟的动力学过程。在实验延时 0.3~3.5 ns 内，金属铝、铜、铁在 R 方向的冲击波平均传播速度分别为 15.8、13.4 和 14.2 km/s；金属铝、铜、铁在 L 方向上的冲击波平均传播速度分别为 23.1、15.3 和 15.0 km/s。由图 5(a) 可见，铝、铜、铁 3 种金属 R 方向上冲击波数据拟合斜率分别为 0.38、0.36 和 0.38，接近 0.4，对应 Sedov-Taylor 理论中的 $\beta=3$ ，因此在 R 方向冲击波为球面波传输；而在 L 方向，铝、铜、铁 3 种金属的冲击波数据拟合斜率分别为 0.46、0.41 和 0.42，分别对应 Sedov-Taylor 理论中的 $\beta=2$ 、 $\beta=3$ 和 $\beta=3$ ，如图 5(b) 所示。3 种金属表面冲击波传播数据在 L 方向拟合的斜率均大于 R 方向，说明 L 方向的传输动力学过程与 R 方向存在差异。其中，铝表面 L 方向的冲击波传播形式逐渐接近柱面波，这主要是因为当飞秒激光烧蚀铝表面时，后续阶段有稠密等离子体飞溅出来，形成对冲击波内沿的二次挤压，即喷溅物质对冲击波内沿挤

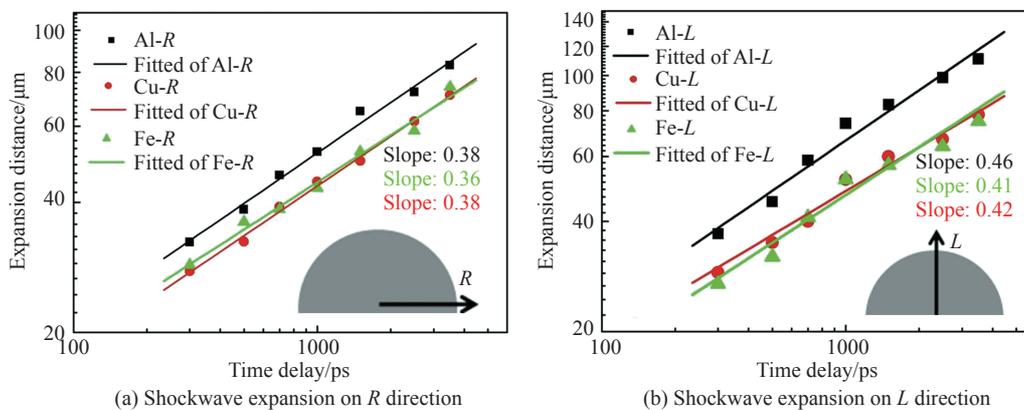


图 5 飞秒激光烧蚀 Al、Cu 和 Fe 金属表面冲击波膨胀动力学分析

Fig. 5 Ultrafast dynamics of shockwave induced by femtosecond laser ablation on metal surface of Al, Cu and Fe

压过程中,将能量传递至冲击波前沿,加速了冲击波前沿的传输。而在铜和铁中,由于物质喷射较少,因此对冲击波内沿挤压较小,冲击波传播不受物质喷射的影响,依然以球面波形式传播,物质的喷射量可以通过比较图2和图3中3.5 ns对应图像看出。由于物质喷射主要在垂直于金属表面的方向,因此R方向的冲击波传播特性不受物质喷射过程的影响。

3 飞秒激光能量密度对金属烧蚀现象的影响

为研究不同烧蚀能量密度下冲击波的膨胀过程,选择铝作为实验对象,将烧蚀飞秒激光的能量密度分别调整为1.2、1.6和2.3 J/cm²,得到不同烧蚀能量密度下的冲击波演化,如图6所示。虽然烧蚀能量密度大小有差异,但烧蚀过程中的变化趋势保持一致:初始阶段为稠密等离子体膨胀,中期为冲击波膨胀,几纳秒后发生碎屑飞溅。但是,在相同时间延迟下,不同烧蚀能量密度的具体烧蚀现象不同。0.2 ns延迟时:烧蚀能量密度为1.2 J/cm²时,只能在铝表面观察到稠密等离子体的微微凸起;烧蚀能量密度增长到1.6 J/cm²后,烧蚀区域增大,稠密等离子体表面产生冲击波;在2.3 J/cm²烧蚀能量密度下,烧蚀区域进一步增大,稠密等离子体与冲击波分离距离更大。这说明:较高的烧蚀能量密度对冲击波的产生有推动作用;随着时间延迟的延长,高能量密度下的冲击波轮廓明显大于低能量密度下的冲击波轮廓;在3.5 ns后,高能量密度烧蚀下的碎屑飞溅程度明显高于低能量密度下的碎屑飞溅程度,说明在高能量密度下,金属铝中的电子获得激光的能量较多,形成等离子体的浓度高,并且对铝晶格的挤压强度大,从而产生了大量的碎屑飞溅。

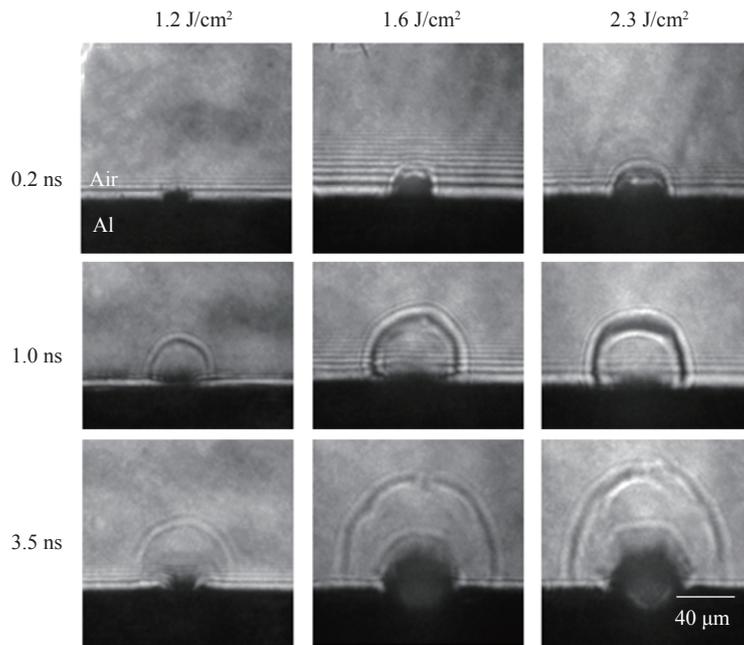


图6 不同能量密度飞秒激光烧蚀Al表面的冲击波膨胀成像

Fig. 6 Ultrafast shock wave expansion on Al surface under femtosecond ablating with different pulse energy

4 结 论

(1)建立了时间分辨阴影成像系统,通过该系统直观获取飞秒激光烧蚀金属铝、铜、铁表面的冲击波膨胀和物质喷射过程图像,掌握了飞秒激光烧蚀加工材料的原位观察和诊断能力。

(2)在1.6 J/cm²能量密度下,飞秒激光烧蚀金属铝、铜、铁3种金属表面冲击波传输速度可达10⁴ m/s量级。通过Sedov-Taylor理论分析3种金属表面冲击波的传输形式发现,在铜、铁表面的冲击波以球面波形式传播,而在铝表面垂直方向上冲击波接近柱面波形式传播。分析认为,导致不同金属表面冲击波传播形式差异的主要原因是铝表面垂直方向上有大量物质喷射。

(3) 研究不同能量密度飞秒激光烧蚀铝的图像发现, 高能量密度的飞秒激光烧蚀可以大幅推动冲击波的膨胀过程。

参考文献:

- [1] EVANS R, BADGER A D, FALLIÈS F, et al. Time- and space resolved optical probing of femtosecond-laser-driven shock waves in aluminum [J]. *Physical Review Letters*, 1996, 77(16): 3359–3362.
- [2] GAHAGAN K T, MOORE D S, FUNK DAVID J, et al. Measurement of shock wave rise times in metal thin films [J]. *Physical Review Letters*, 2000, 85(15): 3205–3208.
- [3] CONNELL G O, DONNELLY T, LUNNEY J G. Nanoparticle plume dynamics in femtosecond laser ablation of gold [J]. *Applied Physics A*, 2014, 117(1): 289–293.
- [4] ZHAO X, SHIN Y C. A two-dimensional comprehensive hydrodynamic model for femtosecond laser pulse interaction with metals [J]. *Journal of Physical D: Applied Physics*, 2002, 45(10): 105201.
- [5] ZHANG N, ZHU X, YANG J, et al. Time-resolved shadowgraphs of material ejection in intense femtosecond laser ablation of aluminum [J]. *Physical Review Letters*, 2007, 99(16): 167602.
- [6] WU Z, ZHU X, ZHANG N. Time-resolved shadowgraphic study of femtosecond laser ablation of aluminum under different ambient air pressure [J]. *Journal of Applied Physics*, 2011, 109(5): 053113.
- [7] 王文婷, 张楠, 王明伟, 等. 飞秒激光烧蚀金属靶的冲击温度 [J]. *物理学报*, 2013, 62(21): 210601.
WANG W T, ZHANG N, WANG M W, et al. Shock temperature of femtosecond laser ablation of solid target [J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(21): 210601.
- [8] LI R Z, ZHU P, CHEN L, et al. Investigation of transient surface electric field induced by femtosecond laser irradiation of aluminum [J]. *New Journal of Physics*, 2014, 16(10): 103013.
- [9] 许孝芳, 李晓良, 王庆伟, 等. 三束飞秒激光辐照下铜膜内电子非平衡热输运 [J]. *红外与激光工程*, 2019, 48(2): 0206001.
XU X F, LI X L, WANG Q W, et al. Non-equilibrium heat transport of electron in Cu films irradiated by three femtosecond laser beams [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(2): 0206001.
- [10] 倪晓昌, 王清月, 梁建国. 飞秒脉冲参量影响金属表面热特性的研究 [J]. *光子学报*, 2006, 35(1): 1–4.
NI X C, WANG Q Y, LIANG J G. The thermal character analysis of the femtosecond laser pulse parameters' effect on metal surface [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, 35(1): 1–4.
- [11] 刘国栋, 罗福, 王贵兵. 飞秒激光辐照下硅薄膜的飞傅里叶能量输运研究 [J]. *高压物理学报*, 2007, 21(2): 183–187.
LIU G D, LUO F, WANG G B. Non-Fourier energy transport in silicon thin films during femtosecond laser heating [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2007, 21(2): 183–187.
- [12] FEINAEUGLE M, ALLONCLE A P, DELAPORTE P, et al. Time-resolved shadowgraph imaging of femtosecond laser-induced forward transfer of solid materials [J]. *Applied Surface Science*, 2012, 258(22): 8475–8483.
- [13] SEDOV L I. Similarity and dimensional methods in mechanics [M]. Boca Raton, FL: CRC Press, 1993.

Shockwave Expansion on Typical Metal Surface Ablated by Femtosecond Laser

WEI Jian¹, ZHANG Bin¹, LIU Hui², ZHANG Hang³

(1. College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. School of Mechanical and Electrical Engineering, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China;

3. Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang 621999, China)

Abstract: Shadowgraphs of shockwave expansion could be directly obtained by time-resolved shadowgraph imaging system when femtosecond ablating metal surface. The shock wave expansion on Cu and Fe surface obeys spherical propagation compared with that on Al target. Due to the influence of material ejection, the shockwave expansion on Al surface changes from spherical propagation to cylindrical propagation.

Keywords: femtosecond laser; shock wave; ultrafast shadowgraph imaging; metal ablation