

切向气流对激光辐照效应影响的研究进展

张文杰 蒙文 李云霞 梁路阳

空军工程大学信息与导航学院, 陕西 西安 710077

摘要 切向气流作为一种环境因素会对激光辐照效应产生重要影响,近年来国内外学者对切向气流作用于激光辐照效应进行了广泛研究,主要集中在不同性质的气流环境、不同强度的切向气流对激光辐照效应的影响,其影响因素主要包括促进氧化反应、增大换热系数、空气动力学等,分析了各因素在不同条件下影响激光辐照效应的相互耦合作用。但对切向气流影响激光辐照效应的材料研究还不够广泛,对空气动力学引起靶材融化前破裂现象的分析不够清晰,这些都有待进一步研究完善。

关键词 激光光学;激光辐照;切向气流;氧化烧蚀;融化前破裂;气动加热

中图分类号 TN246 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP53.041403

Research Progress of Tangential Airflow Impacting on Laser Irradiation

Zhang Wenjie Meng Wen Li Yunxia Liang Luyang

School of Information and Navigation, Air Force Engineering University China, Xi'an, Shaanxi 710077, China

Abstract Tangential airflow as a kind of environmental factors can impact on the laser irradiation. In recent years, the tangential airflow effects on laser irradiation are extensively studied by some scholars at home and abroad, including the influence of different natures of the airflow environment, different intensities of tangential airflow on laser irradiation. Its influence factors mainly include oxidation reaction promotion, convective heat transfer coefficient increase and aerodynamics. The couple interaction between the factors is analyzed. But the material research of tangential airflow laser irradiation effect is not enough, and the analysis of fracture before melting is not clear, which need further research for improvements.

Key words laser optics; laser irradiation; tangential airflow; oxidation ablation; fracture before melting; aerodynamic heating

OCIS codes 140.6810; 140.3330; 140.3390

1 引言

激光作为一种新型技术已经广泛应用于激光加工、激光热处理、激光武器等领域,激光辐照效应的相关研究是一个重要课题。在实际的激光辐照过程中,切向气流具有不可忽视的作用,它主要通过增大对流换热系数、影响激光透射率、增强氧化反应以及气动加热等对激光的辐照效应产生影响。目前对于切向气流影响激光辐照效应的研究,所选取的实验材料主要分为金属和非金属两类。金属材料的典型代表为钢板、铝板等;非金属材料的典型代表是碳纤维、环氧树脂等材料。碳纤维材料具有比强度高、比模量高、密度小、结构尺寸稳定、耐低温以及材料性能可设计等优点,已经成为空间制品的首选材料^[1]。钢板、铝板等金属材料是现代工业制品广泛使用的材料,研究钢板、铝板切向气流下激光辐照模型对激光的工业加工等有重要意义。

美国劳伦斯利弗莫尔国家实验室对切向气流条件下的激光辐照效应做了大量的实验研究以及理论分析,Boley等^[2-5]分析了局部受热金属板在气流条件下的力学破坏效应,并通过实验验证了流动空气条件下激光辐照烧蚀材料过程中温度的变化。国内吴小翠等^[6]研究了不同风速条件下切向气流对激光辐照效应的气

收稿日期: 2015-10-16; 收到修改稿日期: 2015-11-19; 网络出版日期: 2016-02-26

基金项目: 国家自然科学基金(61471387)、陕西省科技计划项目(2013K07-17)

作者简介: 张文杰(1992—),男,硕士研究生,主要从事激光与物质相互作用方面的研究。E-mail: kdyzjw2015@163.com

导师简介: 蒙文(1966—),男,硕士,副教授,硕士生导师,主要从事激光信息网络技术方面的研究。

E-mail: meng-wen_mw@126.com

动加热和冷却作用;贺佳等^[7]研究认为,亚音速气流有利于碳纤维材料在激光辐照下的破坏,且马赫数越大越有利;焦路光等^[8]研究了激光辐照典型金属靶切向气流加速氧化烧蚀速率并造成金属靶在融化之前破裂的现象;李君神等^[9]重点分析了低功率密度激光下切向气流对激光辐照效应的影响,认为它主要起冷却作用;郑艳丽等^[10]的研究结果表明,在气流为氮气和氧气条件下激光辐照氧化放热占据了钢板沉积能量的三分之二;张健等^[11]认为,激光辐照时在切向气流来流方向辐照区域前后两端应力分布不均匀;胡鹏等^[12]研究了气流对激光辐照区域的摩擦生热与换热系数增大之间的竞争关系;彭国良等^[13]提出了在气流环境中激光辐照碳纤维复合材料的羽烟透射率模型。总体来说,国内外学者在切向气流影响激光辐照效应方面已经取得了一定的成果,但是还需要进一步深入研究。

本文简述了目前国内外对于切向气流影响激光辐照效应的研究进展,详细总结了切向气流影响激光辐照效应的基本原理及相关实验方法,分析了目前在此研究领域还存在的主要问题,指出了切向气流作用于激光辐照效应时还需继续深入研究的方向。

2 切向气流影响激光辐照效应的机理

入射激光能量在强激光辐照靶材料表面趋肤深度内通过逆韧致过程部分被吸收,并在亚纳秒时间内转化为靶材内能,在激光辐照下,靶材出现升温,产生热膨胀、热扩散和热应力,可使脆性材料发生破碎。温升和热应力是激光武器干扰和损伤目标的主要作用方式^[14]。激光辐照效应的研究范围广泛、综合性强并且与具体应用结合紧密,主要建立在力学、物理、材料科学和应用光电子学等学科基础之上。

切向气流对于激光辐照效应的影响主要是通过以下几种方式:1)对烧蚀区域产生的氧化产物进行移除,靶材质量发生损失,气流起到清洁作用^[15];2)增加了靶材的对流换热系数^[8],从而增加了辐照时间内靶材表面与气流的热量交换^[16],减缓了温升;3)气流带走了激光辐照过程中靶材烧蚀产生的烟雾^[17],增大了激光的透射率,从而增加了到达辐照区域的激光功率密度;4)切向气流可以带走热分解产生的气体,为靶材的氧化反应提供充足的氧气^[18-19],促进烧蚀区域的氧化反应产生更多的烧蚀热量从而加快温升;5)由于空气动力学以及热应力,可能导致较薄的靶材在融化前发生破裂,从而加速激光的毁伤效应;6)切向气流在来流方向上因对流换热系数不同导致温升不均匀,从而产生局部热应力,加速靶材的激光毁伤;7)在切向气流流速较快,尤其是达到超声速条件下,会产生明显的气动生热,加快激光对靶材的毁伤速度^[20]。以上7点便是切向气流对于激光辐照影响靶材温升以及毁伤效率的作用机理。在激光应用过程中,切向气流对激光辐照效果产生了重要的影响,是不容忽视的。研究切向气流对激光辐照效应的影响,对于掌握控制激光作用过程、及时根据气流的大小调整激光参数、从而取得更加理想的作用效果具有重要的现实意义。

2.1 不同性质气流对激光辐照靶材的影响

不同性质的气流环境主要是氮气、氧气以及空气。通过具体实验研究了金属靶材在氮气、氧气以及空气作为切向气流条件下激光烧蚀的过程^[4],观察并记录了辐照区域的温升效应以及烧蚀融化进程,建立了有限元模型,对于金属材料在3种气体环境下辐照过程进行了较为科学合理的数值模拟。在有限元分析过程中,主要是通过将靶材对象离散为若干小单元,模拟靶材的温度场分布,利用生死单元技术模拟靶材的融化过程^[21]。

实验发现,在没有切向气流以及吹氮气切向气流的条件下,靶材的温升速度较慢,如图1所示^[21]。吹氮

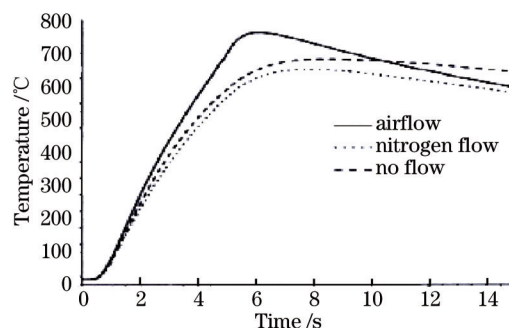


图1 不同气流环境下钢靶后表面辐照区域中心的温升曲线

Fig.1 Temperature variation with time at rear center of steel target under different airflow environments

气增加了对流换热,温度略低于无切向气流的情况,但在吹空气条件下,靶材在4.5 s时间内就发生了融穿。研究表明,在空气流条件下靶材进行了充分的氧化反应,氧化反应的速度与氧气的浓度有直接的关系,切向的空气流将氧化反应产生的气体带走,使更多的氧气能够到达烧蚀面,从而充分的氧化反应释放了大量的热,加速了板材的温升。

将靶材的温升看作瞬态的热传导过程,其瞬态温度场的热传导函数是时间域和空间域的函数,瞬态热传导的有限元方程为

$$CT + KT = P, \quad (1)$$

式中 C 为热容矩阵, K 为热传导矩阵, P 为热流和热载荷列阵, T 为结点温度对时间的导数列阵^[22]。采用 Galerkin 方法,选择权函数,通过加权余量法获得瞬态温度场的一般有限元格式,然后将空间域离散为有限个单元体,根据对应的单元矩阵元素组装成方程组的热容矩阵和热传导矩阵。矩阵 P 也可由以上方法得到。确定适当的时间步长和离散时间域,采用直接积分的两点循环公式求解常微分方程就得到了单元的结点温度。通过编制 2D/3D 有限元程序(CFS),用等效热容法处理熔化现象。气流吹过时,采用生死单元技术进行处理,即去除平均温度超过熔点的单元。通过计算在吹空气和吹氮气条件下融化的单元个数,可以确定氧化放热产生的热量约占氧化条件下激光辐照靶材吸收总能量的 34.6%^[10],说明切向气流性质不同引起的氧化放热产生的热量在整个激光辐照效应中占有相当的比重。

对于玻璃纤维复合材料,陈敏孙等^[18]实验研究这 3 种不同气流条件下的激光辐照效应发现,当激光功率密度较低时,样品发生轻微烧蚀,热分解产物屏蔽作用较弱,气流主要起冷却作用,因此氧气和氮气条件下烧蚀状况相似,且相对无气流质量损失少;当激光功率密度较高时,发生严重热分解,无气流时热分解产物对激光产生屏蔽作用,气流可减弱分解产物的屏蔽作用,且相对无气流、氮气流,氧气流有助于燃烧,烧蚀效果更加明显。

2.2 不同强度的气流对激光辐照材料的影响

对于不同强度的切向气流,主要是通过不同风速马赫数(Ma)对于激光辐照效应的影响进行分析。根据风速的不同,可以分为亚音速和超音速切向气流。亚音速条件下,实验主要选取了有代表性的碳纤维复合材料,实验模型如图 2 所示^[7]。在风洞中取 0.4 Ma、0.5 Ma、0.6 Ma 共 3 个风速,在相同激光功率密度以及总能量条件下,对碳纤维复合材料进行激光辐照,并观察记录其温升及烧蚀表面的状况,如图 3^[7]所示。对比亚音速条件下激光辐照过程,随着实验采用的风速不断增大,烧蚀速率及温升速度也不断加快,较强风速下的靶材料首先发生融穿,这表示亚音速条件下激光作用于碳纤维复合材料过程中,切向气流有利于材料的融穿,而且马赫数越大越有利^[7]。在不同强度(马赫数)的切向气流作用过程中,气流将烧蚀产生的分解产物带走并对碳纤维材料裸露的基体进行了冲刷和剥离,加速了激光烧蚀。当气流速度低于某一阈值时,则无法将熔融产物吹离熔池^[22]。在发生熔融之前,主要表现为冷却效应;熔融之后,由于一定强度气流可带走熔融产物,加速了融穿过程^[23]。

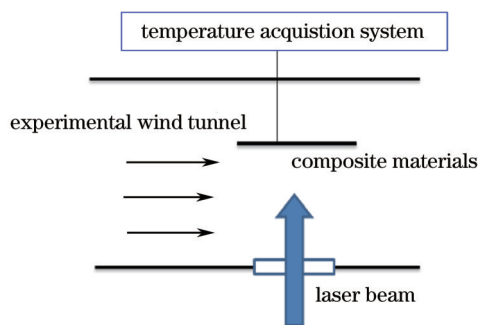


图2 实验装置示意图

Fig.2 Sketch of experimental setup

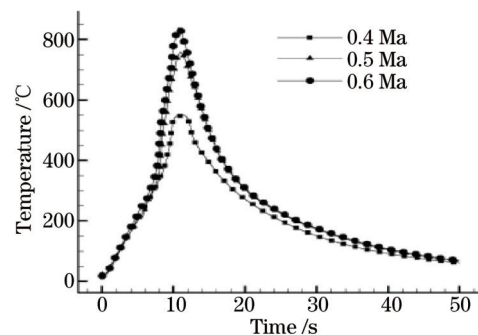


图3 不同风速中心位置温升比较

Fig.3 Temperature curves of centre point in different Mach numbers

超声速气流条件下,靶材处于高速来流中,由于空气粘性作用,高速来流气体附着在靶材表面,气流的动能转变为热能,使靶材温度升高,即气动生热^[11]。吴小翠等^[6]结合计算流体力学和有限元分析方法,对超

声速切向气流条件下激光辐照平板进行了热流固耦合分析,采用的物理模型如图4所示^[6]。辐照的平板由3种材料粘接组成,分为上、中、下3层,材料的物性参数如表1所示^[6],激光功率密度取 300 W/cm^2 。采用基于流体力学(CFD)与有限元流固耦合的方法,其中结构求解主要利用了ANSYS仿真软件中SOLID70的8节点结构单元类型^[24],贴壁流动速度与换热系数可通过从流场进行耦合求解得到,并同时SOLID70单元结点上施加激光产生的能量。随着攻角的增大,通过平板的气流质量、流量也增大,带走了更多的热量,冷却效果增强。研究发现,超声速气流对辐照效应的影响主要与来流速度以及攻角相关,当气流速度在 6 Ma 以下时,主要表现为冷却效应;反之主要表现为气动加热效应,即来流速度越高,材料的损伤阈值越低,并给出了激光辐照效应在超声速流场中的耦合作用规律。

表1 材料物性参数

Table 1 Physical property parameters of materials

	Density $/(10^3/\text{m}^3)$	Heat capacity $/[J/(\text{kg}\cdot\text{K})]$	Thermal conductivity coefficient $/[W\cdot(\text{m}\cdot\text{K})]$
Bottom	8440	440 to 629	10.1 to 24.7
Middle	7000	440 to 629	10.1 to 24.7
Top	5730	467	2

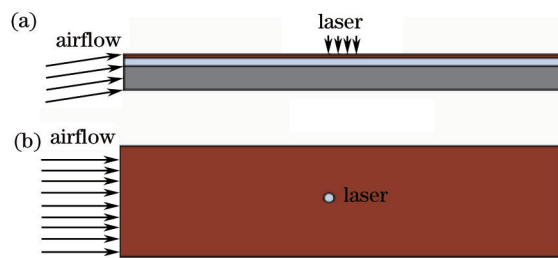


图4 实验物理模型。(a)侧视图;(b)上视图

Fig.4 Simplified physical model. (a) Side view; (b) top view

2.3 气流对激光辐照平板各区域温升的影响

通过对激光辐照下钛合金靶材不同区域温度变化观察发现^[23],当靶材处于自然对流环境中时,距离光斑中心相等距离的对称点温度变化曲线基本重合,而在超声速切向气流环境中,沿来流方向距离光斑中心相等距离的对称点,温度变化曲线出现差异,具体表现为:在光斑范围内,对称点温度无明显差异;但在激光辐照光斑范围之外,对称点温度差异明显,可以发现来流下游温度明显高于来流上游温度。分析认为:在激光辐照下,钛合金表面温度迅速升高,气流通过辐照区域时被加热,使得在气流通过下游时温度较高,上下游对流换热能力减弱,进而影响下游区域的冷却效应,使来流方向的上游和下游出现明显温差。但在激光辐照区域内,对流换热速度远小于激光对靶材的加热效应,因此对流换热引起的冷却效应影响较小,使得辐照区域内对称点温度差异不明显。热传导效应致使激光辐照区域外相比激光辐照区域内温升较慢,在激光辐照过程中,超声速切向气流冷却效应影响较大,导致自然对流环境下材料温度场对称分布,超音速条件下材料温升呈非对称状态。

与钛合金等热传导特性较差的材料不同,一些热传导特性良好的材料在超音速气流环境下激光辐照区域外温升呈现对称状态,如铝合金材料较钛合金热传导速率高一个数量级,较高的热扩散效率导致辐照区域以外的地方温升较快,使得气流的冷却效应不再明显,从而辐照区域外部也呈现对称的状态。

2.4 空气动力学引起靶材在融化前破裂

研究发现,在切向气流下激光辐照材质较薄的铝板在熔融前易发生破裂。焦路光等^[8]在激光辐照铝合金靶过程中发现,辐照进行 1.67 s 后,辐照区域温度不断升高,靶材的力学性能也随之下落^[25],切向气流通过靶材表面会降低靶材表面的气压,从而造成靶材前后表面产生压差,使靶材产生变形,如铝合金薄板会产生凸起,如图5^[26]所示,进而影响气流的状态;并认为穿孔不在光斑中心而在气流的下游位置,如图6^[8]所示,由于气流遇到形变的靶材会形成气流漩涡,增加局部压力,进而形成较大剪切力,造成穿孔的可能。刘峰等^[26]在Boley的研究基础^[1-2]上利用金属薄板的弹性弯曲理论,推导出了不同光斑(圆形和方形)形状下弯曲度和应力表达式,并根据Mises理论推导出融化前穿孔的破坏依据^[26],在方形光斑辐照下靶材的损伤阈值要低

于圆形光斑。目前有关空气动力学影响靶材破裂或穿孔的研究还较少,而空气动力学造成的影响、尤其是超音速条件下气流对靶材毁伤效果是显著的,有待于继续深入研究。

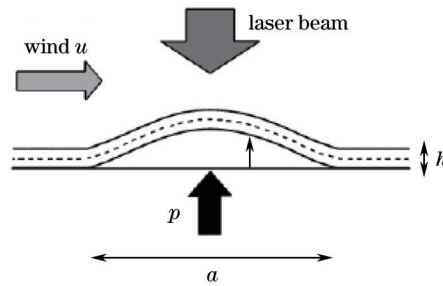


图5 金属板弹性鼓包示意图

Fig.5 Geometry diagram of elastic bulging on a plate

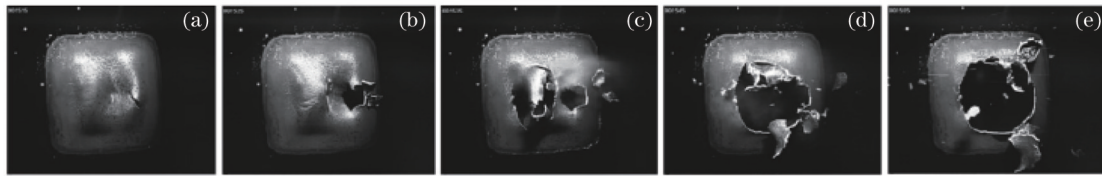


图6 铝合金靶破裂过程

Fig.6 Successive stages in burn-through of an aluminum target

3 结束语

切向气流在激光辐照效应作用的过程中产生了重要影响,主要是通过影响对流换热系数、移除分解产物、空气动力学及气动加热等作用于激光烧蚀过程,切向气流对激光辐照过程的影响效果是以上几个因素互相竞争、共同作用的结果,要根据具体的激光强度、风速及靶材材质等参数来进行分析判断。

切向气流对激光辐照效应的影响研究需要通过大量的具体实验以及数值模拟仿真来实现,目前国际国内对此方向的研究已经日趋成熟,但是对于具体的目标材料在不同激光强度下的研究还不够充分,尤其是在切向气流整个作用过程中还需要全面、具体、分阶段地去认识。在激光辐照烧蚀的不同阶段,切向气流的作用效果是不同的。在热力学对激光辐照靶材产生融穿前穿孔效应方面,对于靶板尺寸、激光强度、气流强度以及靶材厚度等几个影响因素间的关系研究还不够透彻。目前此领域的研究主要局限于碳纤维复合材料、树脂、钢板、铝板等几种有限的靶材,今后要对更多的材料开展相关研究,使对切向气流影响激光辐照效应的研究更加有代表性和广泛性;在空气动力学影响辐照效应方面,所提出的空气动力学造成板材破裂或者穿孔的具体原理也是比较模糊的,有待于进一步明确;此外,当前对于切向气流影响激光辐照效应的研究主要局限于辐照平板模型,而实际激光辐照区域往往不是平板模型,因此对于其他形状靶材的研究也需要加强。

参考文献

- 1 Shi Weibo, Li Sixin, Xiao Yu, *et al.*. Laser lethality of hypersonic vehicles under aero-heating[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2010, 22(6): 1215-1218.
石卫波, 李四新, 肖雨, 等. 气动加热对高超声速飞行器激光毁伤效应影响[J]. 强激光与粒子束, 2010, 22(6): 1215-1218.
- 2 Boley C D, Rubenchik A M. Modeling of high-energy pulsed laser interactions with coupons, UCRL-ID-151857[R]. US Department of Energy, 2003.
- 3 Boley C D, Fochs S N, Rubenchik A M. Large-spot material interactions with a high-power solid-state laser beam, UCRL JRNL-406423[R]. Journal of Directed Energy, 2008.
- 4 Boley C D, Fochs S N, Rubenchik A M. Lethality effects of a high-power solid-state laser[J]. Journal of Directed Energy, 2007, 3(1): 15-24.
- 5 Boley C D, Cutter K P, Fochs S N, *et al.*. Study of laser interaction with thin targets, CA, LLNL-PROC-411215[R]. Sixth Annual High Energy Laser Lethality Conference Monterey, 2009.
- 6 Wu Xiaocui, Wang Yiwei, Cheng Xinxin, *et al.*. Numerical simulation on coupling effect of laser irradiation in supersonic

- flow[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2014, 26(9): 091010.
- 吴小翠, 王一伟, 程欣欣, 等. 超声速流场条件下激光辐照耦合效应数值模拟[J]. *强激光与粒子束*, 2014, 26(9): 091010.
- 7 He Jia, Zhang Li, Zhang Yongqiang, *et al.*. The test of laser ablation of carbon fiber composites materials in airflow environment[J]. *Applied Laser*, 2014, 34(2): 118-121.
- 贺佳, 张黎, 张永强, 等. 表面气流环境下激光辐照碳纤维复合材料实验研究[J]. *应用激光*, 2014, 34(2): 118-121.
- 8 Jiao Luguang, Zhao Guomin, Jiang Houman. Irradiation effects of laser on typical metal targets under tangential airflow[J]. *Chinese Optics*, 2015, 42(2): 0206004.
- 焦路光, 赵国民, 江厚满. 切向气流作用下激光对典型金属靶的辐照效应[J]. *中国光学*, 2015, 42(2): 0206004.
- 9 Li Junshen, Zhao Guomin, Jiao Luguang, *et al.*. Preliminary study aluminum on effects of laser irradiation on thin aluminum alloy sheet in tangential flow[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(11): 2962-2966.
- 李君神, 赵国民, 焦路光, 等. 切向气流作用下激光对薄铝板辐照效应的初步研究[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(11): 2962-2966.
- 10 Zheng Yanli, Du Taijiao, Shu Qingbang, *et al.*. Numerical simulation of thermal effect on metal irradiated by high-power laser beam in different airflow[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, 22(11): 2531-2534.
- 郑艳丽, 杜太焦, 束庆邦, 等. 不同气流环境下激光辐照金属材料升温的数值模拟[J]. *强激光与粒子束*, 2010, 22(11): 2531-2534.
- 11 Zhang Jian, Huang Chenguang. Numerical simulation of airflow effect on moving body under laser irradiation[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, 19(11): 1817-1821.
- 张健, 黄晨光. 外部流场对激光加热运动目标影响的数值模拟[J]. *强激光与粒子束*, 2007, 19(11): 1817-1821.
- 12 Hu Peng, Chen Faliang. Numerical simulation of plane target in airflow under laser irradiation[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, 23(7): 1935-1939.
- 胡鹏, 陈发良. 高速气流中激光加热平板数值模拟与分析[J]. *强激光与粒子束*, 2011, 23(7): 1935-1939.
- 13 Peng Guoliang, Zhang Xianghua, Gao Yinjun, *et al.*. Influence of error from plume on transmittivity during laser irradiating carbon/epoxy composites in gas flow[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(2): 0206004.
- 彭国良, 张相华, 高银军, 等. 气流环境中碳纤维/环氧树脂复合材料烧蚀羽烟对激光透射率的影响[J]. *中国激光*, 2015, 42(2): 0206004.
- 14 Sun Chengwei, Lu Qisheng, Fan Zhengxiu, *et al.*. The effect of laser radiation[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002: 28-31.
- 孙承伟, 陆启生, 范正修, 等. 激光辐照效应[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002: 28-31.
- 15 Zhang Jianmin, Ma Zhiliang, Feng Guobin, *et al.*. Influence of tangential airflows velocity on ablation heat of laser irradiated glass fiber reinforced resin composites[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(3): 0306004.
- 张检民, 马志亮, 冯国斌, 等. 切向空气流速对玻璃纤维增强树脂基复合材料激光烧蚀热的影响[J]. *中国激光*, 2015, 42(3): 0306004.
- 16 Du Taijiao, Shu Qingbang, Chen Zhihua, *et al.*. Study on the simulation of heating effects of high speed target laser[J]. *Computer Simulation*, 2010, 27(4): 271-274.
- 杜太焦, 束庆邦, 陈志华, 等. 高速目标激光辐照温升效应仿真研究[J]. *计算机仿真*, 2010, 27(4): 271-274.
- 17 Chen Minsun, Jiang Houman, Liu Zejin, *et al.*. Effect of tangential airflow on resin composite irradiated by laser[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, 22(12): 2848-2852.
- 陈敏孙, 江厚满, 刘泽金, 等. 切向气流对激光辐照树脂基复合材料的影响[J]. *强激光与粒子束*, 2010, 22(12): 2848-2852.
- 18 Chen Minsun, Jiang Houman, Jiao Luguang, *et al.*. Laser irradiation effects on glass fiber composite subjected to tangential gas flow[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, 25(5): 1075-1080.
- 陈敏孙, 江厚满, 焦路光, 等. 切向气流作用下玻璃纤维复合材料的激光辐照效应[J]. *强激光与粒子束*, 2013, 25(5): 1075-1080.
- 19 Chen Minsun, Jiang Houman, Liu Zejin, *et al.*. Influence of tangential airflow on laser irradiating carbon-fiber composite [J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2011, 33(2): 23-27.
- 陈敏孙, 江厚满, 刘泽金, 等. 切向空气气流对激光辐照碳纤维复合材料的影响[J]. *国防科技大学学报*, 2011, 33(2): 23-27.
- 20 Huang Yihui, Song Hongwei, Huang Chenguang, *et al.*. Numerical simulation of failure of target irradiated by high-power laser subjected to supersonic airflow[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, 25(9): 2229-2234.
- 黄亿辉, 宋宏伟, 黄晨光. 超声速气流下强激光辐照靶体失效数值模拟[J]. *强激光与粒子束*, 2013, 25(9): 2229-2234.
- 21 Yuan Chun, Jiang Houman, Zhao Guomin. 45° steel interaction with DF laser beam in different gas flow[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2015, 27(4): 041011.
- 袁春, 江厚满, 赵国民. 不同气流环境下氟化氘激光对45°钢靶的辐照效应[J]. *强激光与粒子束*, 2015, 27(4): 041011.

- 22 Zhang Li, Li Mu, Tan Fuli, *et al.*. Numerical simulation of metal plates under laser irradiation in high speed air[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2015, 27(6): 061016.
张黎, 李牧, 谭福利, 等. 高速气流作用下激光加热金属平板数值模拟[J]. 强激光与粒子束, 2015, 27(6): 061016.
- 23 Zhang Yongqiang, Tao Yanhui, Zhang Li, *et al.*. Thermal response of TA15 titanium alloy and LY12 aluminium alloy irradiated by laser under supersonic tangential flow[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2014, 26(8): 081005.
张永强, 陶彦辉, 张黎, 等. 激光辐照超音速气流下TA15钛合金和LY12铝合金的热响应[J]. 强激光与粒子束, 2014, 26(8): 081005.
- 24 Zhang Donglai, Li Xiaojiang, Huang Yong, *et al.*. Numerical simulation of temperature field irradiated by laser under tangential airflow[J]. Journal of Academy of Equipment, 2013, 24(5): 131-135.
张东来, 李小将, 黄勇, 等. 切向气流下激光辐照温度场数值模拟[J]. 装备学院学报, 2013, 24(5): 131-135.
- 25 Peng Guoliang, Zhang Xianghua, Gao Yinjun, *et al.*. Research to mechanics erosion effect of laser irradiating glass/epoxy composites[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(1): 0106001.
彭国良, 张相华, 高银军, 等. 激光辐照玻璃纤维/环氧树脂复合材料的力学剥蚀研究[J]. 中国激光, 2015, 42(1): 0106001.
- 26 Liu Feng, Peng Guoliang, Du Taijiao, *et al.*. Influence of tangential airflows on burn-through effect with no-melting of metal heated by laser[J]. Chinese Optics, 2013, 6(3): 332-342.
刘峰, 彭国良, 杜太焦, 等. 切向气流对激光加热金属板非熔化穿孔效应的影响[J]. 中国光学, 2013, 6(3): 332-342.

栏目编辑: 史敏