

专题——2015年度国家自然科学基金项目研究进展

激光诱导冲击波应用技术研究现状

乔红超, 赵吉宾, 陆莹

(中国科学院沈阳自动化研究所, 沈阳 110016)

摘要: 激光等离子体冲击波应用技术以其节能、高效、可控性强等优点, 受到了众多研究者的广泛关注。综述了激光等离子体冲击波作用效应, 分析了靶表面等离子体和激光维持的爆轰波对靶冲量传递的影响, 重点介绍了利用激光等离子体冲击波效应的两项技术——激光冲击强化技术和激光推进技术。通过对比国内外技术的优势, 系统考察了激光冲击强化技术和激光推进技术的原理和应用研究现状, 并分析了未来应用研究的趋势。移动式短脉冲大能量激光器的研制将是未来的一个重要研究方向, 需从理论和试验两个方面研究激光参数、环境参数和靶材参量对激光与靶相互作用产生的激光等离子体冲击波效应和声波效应的影响, 探索激光等离子体声波和激光等离子体冲击波力学效应的关系。大能量激光器的体积大, 环境要求高, 稳定性差, 要想真正把激光等离子体冲击波效应应用于实际, 就需要开发稳定性好的短脉冲、大能量移动式激光器, 提高激光等离子体冲击波效应应用系统的机动性、方便性和可靠性。

关键词: 激光冲击强化; 激光推进; 等离子体; 冲击波; 激光器

中图分类号: TG165.99 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2016)01-0001-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2016.01.001

Current Status of Laser-induced Shock Wave Application Technology

QIAO Hong-chao, ZHAO Ji-bin, LU Ying

(Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China)

ABSTRACT: More and more researchers have shown great interest in laser plasma shock wave application technology for its advantages such as energy-saving, efficient and controllable. Laser plasma shock wave effects were reviewed, and the effects of the target surface plasma and laser sustaining detonation on target impulse transfer were analyzed. The two technologies using laser plasma shock wave were discussed in detail, namely, laser peening technology and laser propulsion technology. By comparing the advantages of domestic and foreign technologies, the principle and application status of laser peening technology and laser propulsion technology were systematically investigated, and the trend of application research development of laser plasma shock wave effects was also analyzed. The mobile short-pulse high-energy laser will be an important research direction in the future. The effects

收稿日期: 2015-09-21; 修订日期: 2015-10-20

Received: 2015-09-21; Revised: 2015-10-20

基金项目: 国家自然科学基金(51501219); 辽宁省自然科学基金(2015020115)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (51501219) and the Natural Science Foundation of Liaoning Province of China (2015020115)

作者简介: 乔红超(1982—), 男, 河南人, 副研究员, 主要研究方向为表面工程。

Biography: QIAO Hong-chao(1982—), Male, from Henan, Associate research fellow, Research focus: surface engineering.

of laser parameters, environment parameters and target material parameters on the laser plasma shock wave effects and acoustic effects generated by the interactions between laser and the target should be studied from the aspects of theory and experiment. And the relationship between laser plasma acoustic effects and laser plasma shock wave mechanical effects was explored. High-energy lasers have large volume, high environment requirements and low stability. In order to apply laser plasma shock wave effects in practice, short-pulse high-energy mobile lasers should be developed, to improve the mobility, convenience and reliability of laser plasma shock wave effects application systems.

KEY WORDS: laser peening; laser propulsion; plasma; shock wave; lasers

自1960年第一台激光器诞生以来,激光应用技术研究取得了飞跃发展,已广泛应用于材料加工、生物医疗、通讯存储、计量检测等众多领域。根据激光诱导冲击对靶材产生的热力学效应的区别,可将其分为两大类:一类为激光热加工,即激光对靶材产生热效应,达到去除、添加材料或者改善材料性能的目的,例如激光焊接、激光切割、激光熔覆和激光快速成形等;另一类为激光等离子体冲击波加工,即利用激光诱导冲击波对靶材产生热力学效应,达到靶材性能改善、靶材成分分析和靶材运动的目的,例如激光冲击强化、激光等离子体光谱分析和激光推进等。随着激光等离子体冲击波加工越来越多地被人们认知,激光等离子体冲击波的应用研究成为当前研究的一个热点。

高功率激光束辐照靶材,会引起靶中产生热应力、熔融、气化和烧蚀。靶材表面蒸气因吸收了激光的能量而温度升高,致使靶材蒸气分子发生电离,形成所谓的激光等离子体。在温度或者密度较高的区域,会发生激光能量完全被等离子体吸收的情况。温度急剧升高,等离子体会膨胀形成反向冲量、应力波和冲击波,可以用于激光冲击强化、激光制孔、激光成形。产生的以热传导或流体力学机制离开靶面并逆激光束方向传播的激光支持的燃烧波(亚声速)或爆轰波(超声速),可以用于激光推进和激光等离子体光谱分析。靶表面等离子体和激光维持的爆轰波对靶冲量传递的影响即为激光等离子体冲击波效应。文中在对激光等离子体冲击波效应进行分析的基础上,重点介绍了激光等离子体冲击波的两个重要应用——激光冲击强化技术和激光推进技术,对两种技术的原理和应用研究现状进行了分析,并分析了未来的应用研究趋势。

1 激光冲击强化技术

1.1 激光冲击强化原理

图1为激光冲击强化原理图。短脉冲(几十纳

秒)、高峰值功率密度($>10^9 \text{ W/cm}^2$)的强激光束穿透约束层,辐照在工件表面的吸收层表面。吸收层吸收激光能量发生气化,产生高温($>10\,000 \text{ K}$)、高压($>1 \text{ GPa}$)的等离子体。等离子体进一步吸收后续的激光能量,但是由于受到约束层的约束,会产生高强冲击波,当冲击波的峰值压力超过工件的动态屈服强度时,工件表面发生应变强化,形成残余压应力。在塑性变形的作用下,微观组织发生很大变化,材料表面耐磨损、抗腐蚀的能力得到有效提高,同时疲劳寿命大幅提升。

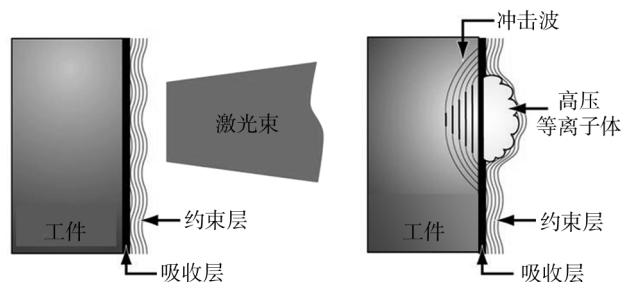


图1 激光冲击强化原理

Fig. 1 Schematic of laser peening

1.2 激光冲击强化技术国内外发展现状

1972年,美国巴特尔学院利用大功率脉冲激光形成的冲击波提高了铝合金的力学性能,并且铝合金表面显微组织发生了很大变化,研究表明,7075铝合金材料经激光冲击后,其屈服强度可提高30%,从此揭开了激光冲击强化应用研究的序幕^[1-3]。1978年,他们对高铁基合金及航空铝合金开展了激光冲击强化研究,发现利用激光诱导冲击波的作用可有效降低疲劳裂纹的扩展速率,大幅提高其疲劳寿命。

20世纪90年代初,美国利弗莫尔国家实验室联合GE和MIC等航空发动机制造公司,针对激光冲击强化基础理论、工艺研究与设备开发进行了深入地探索,开发了平均功率600 W、频率10 Hz的钕玻璃激光器,并将其运用到喷气式发动机的表面强化生产中,极大地推动了激光冲击强化技术的发展。目前,该钕

玻璃激光器正逐步向大型汽轮机叶片、水轮机叶片、核反应堆焊缝、石油管道焊缝和汽车发动机气门等不同领域推广,逐步实现了激光冲击强化的工业化生产应用^[2-5]。我国对激光冲击强化的研究开展较晚,主要针对激光冲击强化作用机理、涂层的选择与应用、约束层应用以及相关工艺实验等方面进行了系列研究。江苏大学联合中国科技大学研制了可单次冲击的钕玻璃激光器和激光冲击强化装置,标志着国内首台试验用激光冲击处理机的诞生^[6],随后还研究了自由约束层的厚度和吸收层对激光冲击强化的影响。北京航空制造工程研究所从俄罗斯引进了可进行单次冲击试验的激光器,并对铝合金铆钉件进行了激光冲击强化试验^[7-8],获得了良好的效果,工件疲劳寿命得到了大幅度提高。

21 世纪初期,江苏大学开展了激光功率和冲击次数对 TC4 钛合金表面硬度影响的研究,表面硬化层的显微硬度达 490HV,深度为 1 mm,并推导了激光冲击时涂层的气化速度、厚度与激光冲击强化效果的关系公式,研究了铝合金晶粒细化机制及微观强化机理^[9]。上海交通大学采用有限元分析软件建立了激光冲击强化处理的有限元模型,实现了激光冲击强化诱导残余应力场的模拟分析^[10]。与此同时,国外的激光冲击强化技术应用得到了长足发展。2001 年,激光冲击强化技术有限公司为罗·罗公司强化发动机叶片,成为首个在商用飞机上应用的案例^[11]。2002 年,美国 MIC 公司将激光冲击强化技术用于军用喷气发动机叶片,以改善其疲劳寿命^[12-18]。2003 年,美联邦航空局和日本亚细亚航空局将激光冲击强化作为飞机关键零部件的维修技术,主要应用于波音 777 飞机零部件的表面强化。美国 MIC 公司于 2005 年开发了激光冲击强化系统,获得美国国防制造最高成就奖^[19-21],并开始为波音 744-8 机翼进行激光冲击强化加工。

2008 年,我国西安空军工程大学与西安天瑞达光电技术有限公司开发了重复频率 1 Hz、单脉冲能量 25 J、脉宽 8 ~ 12 ns 的叶片激光冲击强化装置(如图 2 所示),标志着我国激光冲击强化技术研究取得了新的突破。他们采用该装置,对镍基高温合金、镁合金及钛合金等常用航空合金及零部件进行了大量的理论研究和工艺试验研究。GH742 镍基高温合金经激光冲击强化后,表面残余压应力提高至 1180 MPa; LY2 铝合金经激光冲击强化后,低周疲劳寿命提高了 2.5 倍。同时,他们还探索了激光冲击强化的工业化应用^[22-27]。



图2 叶片激光冲击强化装置

Fig. 2 Equipment of blade laser peening

从 2009 年到 2012 年,美国 MIC 公司先后在欧洲、非洲和澳大利亚建立了分公司,对外加工数万件零件,并开发了通用型激光冲击强化设备和移动式激光冲击强化设备。中国科学院沈阳自动化研究所的乔红超带领团队开发了国内首台自动化水平较高的航空发动机整体叶盘激光冲击强化设备^[28-32](如图 3 所示),实现了重复频率 0 ~ 5 Hz、脉宽 8 ~ 20 ns、单脉冲能量 3 ~ 26 J 连续可调。目前,该设备已应用于航空发动机整体叶盘的强化。整体叶盘经激光冲击强化后,寿命提高了 3 ~ 5 倍,标志着中国激光冲击强化技术向工程化应用迈出了重要的一步,激光冲击强化应用技术取得了重大突破。同时,中科院沈阳自动化研究所在直升机桨毂、运 20 飞机起落架轴承上开展了激光冲击强化工艺研究,其疲劳寿命和耐磨性均得到大幅度提高。



图3 航空发动机整体叶盘激光冲击强化设备

Fig. 3 Equipment of AVIC blisk laser peening

表 1 对比了国内外激光冲击强化技术应用研究的进程。可以看出,激光冲击强化技术应用研究在国外开始于 20 世纪 70 年代,我国直到 20 世纪 90 年代才开始。进入 21 世纪后,美国在国家疲劳计划等项

目的支持下,激光冲击强化技术得到了突飞猛进的发展。到目前,以美国 MIC 公司为代表的欧美技术已经相当成熟,开发出了移动式激光冲击强化设备并已成功应用于生产,创造了数亿元的经济效益,在世界各地发展了跨国子公司。我国的研究单位也逐渐多了起来,江苏大学的工艺研究进入了一个新的高度,中国科学院沈阳自动化研究所开发的航空发动机整体叶盘激光冲击强化装备投入到了工厂应用。但与国外相比,我国还存在不少差距,不仅要掌握工艺技术,还要进一步发展装备技术,特别是适合野外工作的移动式激光冲击强化装备和激光器。

表 1 国内外激光冲击强化技术应用研究对比^[33-34]

Tab. 1 Comparison of applied research on laser peening technology in China and foreign countries

时间	国外	国内
20 世纪 70 年代	巴特尔学院首次研究激光冲击强化	
20 世纪 90 年代	GE 和 MIC 开始研究激光冲击强化设备和工艺	江苏大学开发激光冲击装置;北京航空制造工程研究所开展工艺研究
近 5 年	MIC 公司工业化应用	中科院沈阳自动化研究所开发首台工业用激光冲击强化设备

2 激光推进技术

将远距离、短脉冲、高峰值功率密度的激光能量导入到光船尾部推进器中的推进剂内,推进剂吸收激光能量后,发生爆炸性气化蒸发,产生高温、高压的等离子体,等离子体进一步吸收激光能量而发生爆炸,产生强冲击波,冲击波受到推进器的限制,必须从推进器的喷管中喷射出去,从而给光船向前的推力,推动光船移动,即为激光推进技术(如图 4 所示)。通过控制等离子体的喷射方向,可以控制光船的运动方向^[35-36]。

表 2 对比了国内外激光推进技术应用研究的现状。可以看出,在 20 世纪 80 年代,我国几乎和国外同步开展了激光推进技术研究。到 20 世纪 90 年代,美国开始进行飞船模型的推进实验,我国主要集中在材料激光烧蚀特性方面的研究。进入到 21 世纪,俄罗斯开展了激光推进技术研究且发展较为迅猛,在将飞船推高 1.7 m 的情况下向前推进了 7 m。我国中科院物理所仅将模型推高了 3.05 m,与美国、俄罗斯等

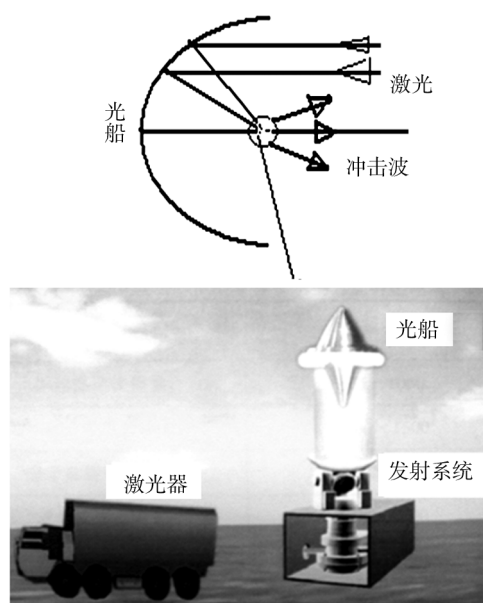


图 4 激光推进原理

Fig. 4 Principle of laser propulsion

表 2 国内外激光推进技术应用研究对比

Tab. 2 Comparison of applied research on laser propulsion technology in China and foreign countries

时间	国外	国内
20 世纪 80 年代	美国提出激光推进概念	华中科大开始基础研究
20 世纪 90 年代	NASA 开始空间推进研究	
2000 年左右	俄罗斯开展了推进实验,推进 7 m	中科院物理所推进飞机模型 3.05 m
近 5 年	美国将无人机续航时间延至 48 h	建立首个推进国家重点实验室

国相比都有非常大的差距。近 5 年来,美国开展了回收太空垃圾计划,发射了小卫星,并将无人机的飞行时间提高了 24 倍^[37-39]。2012 年 12 月,中国人民解放军装备学院成立了我国首个激光推进及其应用国家重点实验室,该实验室标志着我国激光推进技术研究迈出了坚实的一步^[40]。

3 发展趋势

1) 激光等离子体冲击波效应作用机理的研究。目前,对激光等离子体冲击波效应的认知还不深入,需从理论和试验两个方面研究激光参数、环境参数和靶材参量对激光与靶相互作用产生的激光等离子体冲击波效应和声波效应的影响,研究激光等离子体声波和激光等离子体冲击波力学效应的关系^[41-46]。只

有掌握了激光等离子体冲击波效应的作用机理,才能更好地利用激光等离子体冲击波效应。

2) 移动式短脉冲大能量激光器的研究。高功率的激光束辐照靶材,才能形成激光等离子体,所以需要开发短脉冲、大能量的激光器^[47—51]。目前,这种大能量激光器的体积大,对环境要求高,稳定性差,要想真正将激光等离子体冲击波效应应用于实际^[52],就需要开发稳定性好的短脉冲、大能量移动式激光器,提高激光等离子体冲击波效应应用系统的机动性、方便性和可靠性。

3) 自动跟踪引导、监测技术的研究。激光等离子体冲击波效应的应用离不开靶的跟踪和激光束的引导,所以要想精确控制太空中的飞行器和对工件进行精确加工,必须开展高精度的自动跟踪引导技术,同时还要对各个相关参数(例如等离子体冲击波大小、激光等离子体声波大小、激光参数和环境参数等)进行监测。

参考文献

- [1] WANG J T, ZHANG Y K, CHEN J F, et al. Effects of Laser Shock Peening on Stress Corrosion of 7075 Aluminum Alloy Laser Welded Joints[J]. Materials Science and Engineering A, 2015, 647: 7—14.
- [2] GOLDEN P J, HUTSON A, SUNDARAM V, et al. Effect of Surface Treatments on Fretting Fatigue of Ti-6Al-4V[J]. International Journal of Fatigue, 2007, 29(7): 1302—1310.
- [3] ZHANG Y K, LU J Z, REN X D, et al. Effect of Laser Shock Processing on the Mechanical Properties and Fatigue Lives of the Turbojet Engine Blades Manufactured by LY2 Aluminum Alloy[J]. Materials and Design, 2009, 30(5): 1697—1703.
- [4] CHU J P, RIGSBEE J M, BANAS G, et al. Laser Shock Processing Effects on Surface Microstructure and Mechanical Properties of Low Carbon Steel[J]. Material Science and Engineering A, 1999, 260(1/2): 260—268.
- [5] DING K, YE L. Simulation of Multiple Laser Shock Peening of a 35CD4 Steel Alloy[J]. Materials Processing Technology, 2006, 178(3): 162—169.
- [6] 花银群, 张永康, 杨继昌, 等. 激光冲击强化技术中自由约束层理论厚度的研究[J]. 中国激光, 2002, 29(8): 751—754.
HUA Yin-qun, ZHANG Yong-kang, YANG Ji-chang, et al. Study on Theoretical Thickness of Free Limiting Layer in Laser Shock Processing[J]. Chinese Journal of Lasers, 2002, 29(8): 751—754.
- [7] 张凌峰, 张永康, 冯爱新, 等. 激光冲击用柔性贴膜的研究[J]. 激光技术, 2007, 31(1): 65—67.
ZHANG Ling-feng, ZHANG Yong-kang, FENG Ai-xin, et al. Analysis of Flexible Coating for Laser Shock Processing[J]. Laser Technology, 2007, 31(1): 65—67.
- [8] 张永康, 陈菊芳, 许仁军, 等. AM50 镁合金激光冲击强化实验研究[J]. 中国激光, 2008, 35(7): 1068—1072.
ZHANG Yong-kang, CHEN Ju-fang, XU Ren-jun, et al. Experimental Research of Laser Shock Strengthening AM50 Magnesium Alloy[J]. Chinese Journal of Lasers, 2008, 35(7): 1068—1072.
- [9] SEE D W, DULANEY J L, CLAUSER A H, et al. The Air Force Manufacturing Technology Laser Peening Initiative[J]. Surf Eng, 2002, 18(1): 32—36.
- [10] KING A, STEUWER A, WOODWARD C, et al. Effects of Fatigue and Fretting on Residual Stresses Introduced by Laser Shock Peening[J]. Materials Science and Engineering A, 2006, 435(5): 12—18.
- [11] OCANA J L, MORALES M, GARCIA J J, et al. Laser Shock Microforming of Thin Metal Sheets[J]. Applied Surface Science, 2009, 255(10): 5633—5636.
- [12] 李伟, 李应红, 何卫锋, 等. 激光冲击强化的发展和应用[J]. 激光与光电子学进展, 2008, 45(12): 15—19.
LI Wei, LI Ying-hong, HE Wei-feng, et al. Development and Application of Laser Shock Processing[J]. Laser and Optoelectronics Progress, 2008, 45(12): 15—19.
- [13] 乔红超, 赵吉宾, 于彦凤. 整体叶盘激光冲击强化方法: 中国, 201210568051. 5[P]. 2012-12-24.
QIAO Hong-chao, ZHAO Ji-bin, YU Yan-feng. Laser Peening Method of Blisk: China, 201210568051. 5[P]. 2012-12-24.
- [14] 乔红超, 赵吉宾, 于彦凤. 整体叶盘激光冲击强化设备: 中国, 201210566152. 9[P]. 2012-12-24.
QIAO Hong-chao, ZHAO Ji-bin, YU Yan-feng. Laser Peening Device of Blisk: China, 201210566152. 9[P]. 2012-12-24.
- [15] 任旭东, 阮亮, 皇甫卓, 等. 中高温条件下 6061-T651 铝合金激光冲击强化研究[J]. 中国激光, 2012, 39(3): 108—111.
REN Xu-dong, RUAN Liang, HUANGPU Zhuo, et al. Experimental Research of Laser Shock Processing 6061-T651 Aluminum Alloy during Elevated Temperature[J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(3): 108—111.
- [16] 张凌峰, 熊毅, 张毅, 等. 高锰钢在激光冲击强化作用下的微观特征[J]. 中国激光, 2011, 38(6): 0603025.
ZHANG Ling-feng, XIONG Yi, ZHANG Yi, et al. Microstructure of High Manganese Steel by Laser Shock Processing

- sing[J]. Chinese Journal of Lasers, 2011, 38(6):0603025.
- [17] LIN D, ZHANG M Y, YE C, et al. Larger Scale, Highly Dense Nanoholes on Metal Surfaces by Underwater Laser Assisted Hydrogen Etching Near Nanocrystalline Boundary[J]. Applied Surface Science, 2012, 258(10):4254.
- [18] AMAR H, VIGNAL V, KRAWIEC H, et al. Influence of the Microstructure and Laser Shock Processing (LSP) on the Corrosion Behaviour of the AA2050-T8 Aluminium Alloy[J]. Corrosion Science, 2011, 53(10):3215—3221.
- [19] LUO K Y, LU J Z, ZHANG L F, et al. The Microstructural Mechanism for Mechanical Property of LY2 Aluminum Alloy after Laser Shock Processing[J]. Materials & Design, 2010, 31(5):2599—2603.
- [20] KISHORE N B, GANESH S, SUNDARA R, et al. Effect of Beam Oscillation on Fatigue Life of Ti-6Al-4V Electron Beam Weldments[J]. Material Science and Engineering, 2007(471):113—119.
- [21] LIU S H, PENG S D, XIANG F. A Study on Laser Lap Welding of Ti-6Al-4V Alloy[J]. Welding Machine, 2006, 36(6):24—29.
- [22] COUTURIER S, DE R M, HALLOUIN M, et al. Shock Profile Induced by Short Laser Pulses[J]. Journal of Applied Physics, 1996, 79(12):554—565.
- [23] CHU J P, RIGSBEE J M, BANAS G, et al. Laser-shock Processing Effects on Surface Microstructure and Mechanical Properties of Low Carbon Steel[J]. Materials Science and Engineering A, 1999, 260(1/2):260—268.
- [24] ZHANG Y K, LU J Z, REN X D, et al. The Effect of Laser Shock Processing on the Mechanical Properties and Fatigue Lives of the Turbojet Engine Blades Manufactured by LY2 Aluminum Alloy[J]. Materials and Design, 2009, 30(5):1697—1703.
- [25] LUO K Y, LU J Z, ZHANG Y K, et al. Effects of Laser Shock Processing on Mechanical Properties and Micro-structure of ANSI 304 Austenitic Stainless Steel[J]. Materials Science and Engineering A, 2011, 528(13/14):4783—4788.
- [26] THORSLUND T, KAHLEN F J, KAR A. Temperatures, Pressures and Stresses during Laser Shock Processing[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2003, 39(1):51—71.
- [27] MONTROSS Charles S, WEI Tao, YE Lin, et al. Laser Shock Processing and Its Effects on Microstructure and Properties of Metal Alloy: A Review[J]. International Journal of Fatigue, 2002, 24(10):1021—1036.
- [28] 聂贵锋, 冯爱新, 任旭东, 等. 激光冲击参数对 2024 铝合金冲击区域的主应力及其方向的影响[J]. 中国激光, 2012, 39(1):86—91.
- NIE Gui-feng, FENG Ai-xin, REN Xu-dong, et al. Effect of Laser Shock Processing Parameters on Residual Principal Stresses and Its Directions of 2024 Aluminum Alloy[J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(1):86—91.
- [29] 罗新民, 苑春智, 张静文, 等. 激光冲击及其对金属材料组织和性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2012, 27(1):7—23.
- LUO Xin-min, YUAN Chun-zhi, ZHANG Jing-wen, et al. Laser Shocking and Its Effects on Microstructure and Properties of Metallic Materials[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2012, 27(1):7—23.
- [30] ZHAO W Y, LIU Y Z, LIU L, et al. Surface Recrystallization of a Gamma-TiAl Alloy Induced by Shot Peening and Subsequent Annealing Treatments[J]. Applied Surface Science, 2013, 270:690—696.
- [31] 周建忠, 徐增闯, 黄舒, 等. 基于不同应力比下激光喷丸强化 6061-T6 铝合金的疲劳裂纹扩展性能研究[J]. 中国激光, 2011, 38(9):0903006.
- ZHOU Jian-zhong, XU Zeng-chuang, HUANG Shu, et al. Effect of Different Stress Ratios on Fatigue Crack Growth in Laser Shot Peened 6061-T6 Aluminum Alloy[J]. Chinese Journal of Lasers, 2011, 38(9):0903006.
- [32] 静永娟, 王欣英, 张继. 喷丸处理对 TiAl 合金拉伸性能的影响[J]. 稀有金属, 2009, 33(5):750—756.
- JING Yong-juan, WANG Xin-ying, ZHANG Ji. Effect of Shot Peening Treatment on Tensile Properties of TiAl Alloys[J]. Chinese Journal of Rare Metal, 2009, 33(5):750—756.
- [33] SHENG J, HUANG S, LU J Z, et al. Effect of Laser Peening with Different Energies on Fatigue Fracture Evolution of 6061-T6 Aluminum Alloy[J]. Optics and Laser Technology, 2016, 77:169—176.
- [34] BIRKAN M. Beamed Energy Propulsion: Research Status and Needs—Part 1[C]//AIP Conference Proceedings. [s. l.]: American Institute of Physics, 2008:3—16.
- [35] 张楠, 徐智君, 朱晓农, 等. 激光推进技术[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(6):1025—1037.
- ZHANG Nan, XU Zhi-jun, ZHU Xiao-nong, et al. Laser Propulsion Technology[J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(6):1025—1037.
- [36] JIAO L, CAI J, MA H H, et al. Research on Applications of Rectangular Beam in Micro Laser Propulsion[J]. Applied Surface Science, 2014, 301:481—487.
- [37] CHEN H, SHI L, MA L, et al. Numerical Simulation of Air-breathing Nanosecond Laser Propulsion Considering Subsonic Inflow and Multi-pulse[J]. Optik—International Journal for Light and Electron Optics, 2014, 125(14):3444—3448.
- [38] FELICETTI L, SANTONI F. Nanosatellite Swarm Missions in Low Earth Orbit Using Laser Propulsion[J]. Aerospace Science and Technology, 2013, 27(1):179—187.

- Progress of Diamond-like Carbon Films[J]. Heat Treatment of Metals, 2003, 28(11): 1—6.
- [9] TEER D G. New Solid Lubricant Coatings[J]. Wear, 2001, 251(1—12): 1068—1074.
- [10] 汪渊, 宋忠孝, 徐可为. 体心立方金属 W 薄膜晶体取向的膜厚尺寸效应及其表面映射[J]. 物理学报, 2007, 56(12): 7248—7254.
- WANG Yuan, SONG Zhong-xiao, XU Ke-wei. The Surface Mapping and Crystal Orientation of Body-centered Cubic Thin Metal Tungsten Films of Different Thickness[J]. Acta Physica Sinica, 2007, 56(12): 7248—7254.
- [11] 胡奈赛, 徐可为, 何家文. 涂、镀层的结合强度评定[J]. 中国表面工程, 1998, 11(1): 31—35.
- HU Nai-sai, XU Ke-wei, HE Jia-wen. Evaluation of Bonding Strength on Coating Layers[J]. China Surface Engineering, 1998, 11(1): 31—35.
- [12] 郑森林, 何家文, 张平余. 涂层膜基结合强度测定方法研究进展[J]. 薄膜科学与技术, 1993, 6(2): 85—91.
- ZHENG Sen-lin, HE Jia-wen, ZHANG Ping-yu. Progress Determination of Strength of the Coating Film and Substrate Binding[J]. Membrane Science and Technology, 1993, 6(2): 85—91.
- [13] BURNETT D J, RICKERBY D S. The Relationship between Hardness and Scratch Adhesion[J]. Thin Solid Films, 1987, 154: 403—416.
- [14] WANG C T, ANA E, TOMAS P, et al. Indentation and Scratch Testing of DLC-Zr Coatings on Ultrafine-grained Titanium Processed by High-pressure Torsion[J]. Wear, 2013, 306: 304—310.
- [15] HEINKE W, LEYLAND A, MATTHEWS A. Evaluation of PVD Nitride Coatings, Using Impact, Scratch and Rockwell-adhesion Test[J]. Thin Solid Films, 1995, 270: 431—438.
- [16] 易茂中, 胡奈赛, 何家文. 用涂层压入仪测定薄膜与基体结合强度的探讨[J]. 真空科学与技术, 1999(2): 89—96.
- YI Mao-zhong, HU Nai-sai, HE Jia-wen. Evaluation of Bonding Strength between Thin Film and Substrate by a New Indentation Tester[J]. Vacuum Science and Technology, 1999(2): 89—96.

(上接第 6 页)

- [39] ZHANG Y, LU X, ZHENG Z Y, et al. Transmitted Laser Propulsion in Confined Geometry Using Liquid Propellant[J]. Appl Phys A, 2008, 91(2): 357—360.
- [40] 程建中, 蔡建, 胡云, 等. 掺杂金属颗粒的高分子工质激光推进实验研究[J]. 强激光与粒子束, 2008, 20(7): 1190—1194.
- CHENG Jian-zhong, CAI Jian, HU Yun, et al. Experimental Study of Laser Propulsion by Using Polymer Propellant Doped with Metal Powders[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2008, 20(7): 1190—1194.
- [41] MATAR S F, ETOURNEAU J. Investigation of the Electronic Structure of Carbon-containing TiAl[J]. Journal of Alloys and Compounds, 1996, 233: 112—120.
- [42] ROULEAU B, PEYRE P, BREUILS J, et al. Characterization at a Local of a Laser-shock Peened Aluminum Alloy Surface[J]. Applied Surface Science, 2011, 257: 7195—7203.
- [43] GILL A, TELANG A, MANNAVA S R, et al. Comparison of Mechanisms of Advanced Mechanical Surface Treatments in Nickel-based Superalloy[J]. Materials Science and Engineering: A, 2013, 576: 346—355.
- [44] GAO Y K. Improvement of Fatigue Property in 7050-T7451 Aluminum Alloy by Laser Peening and Shot Peening[J]. Materials Science and Engineering: A, 2011, 528: 3823—3828.
- [45] ZHANG S Z, KONG F T, CHEN Y Y, et al. Phase Transformation and Microstructure Evolution of Differently Processed Ti-45Al-9Nb-Y Alloy[J]. Intermetallics, 2012, 31: 208—216.
- [46] KURUML T, OBRTLK K. Microstructure Degradation in High Temperature Fatigue of TiAl Alloy[J]. Fatigue of Metallic Materials—Mechanisms and Life Estimation, 2010, 65: 28—32.
- [47] TETSUI T. Development of a TiAl Turbocharger for Passenger Vehicles[J]. Materials Science and Engineering A, 2002, 329: 582—588.
- [48] APPEL F, WAGNER R. Microstructure and Deformation of Two-phase γ -Titanium Aluminides[J]. Materials Science and Engineering R, 1998, 22: 187—268.
- [49] MARKETZ W T, MARKETZ F D, FISCHER H C. Deformation Mechanisms in TiAl Intermetallics—experiments and Modeling[J]. International Journal of Plasticity, 2003, 19: 281—321.
- [50] KIM S, NA Y, YECOM S E, et al. An in-situ Transmission Electron Microscopy Study on Room Temperature Ductility of TiAl Alloys with Fully Lamellar Microstructure[J]. Materials Science and Engineering A, 2014, 589: 140—145.
- [51] FALLAHI A, ATAEE A. Effects of Crystal Orientation on Stress Distribution Near the Triple Junction in a Tricrystal γ -TiAl[J]. Materials Science and Engineering A, 2010, 527: 4576—4581.
- [52] MALOY S A, GRAY G T. High Strain Rate Deformation of Ti-48Al-2Nb-2Cr[J]. Acta Materialia, 1996, 44: 1741—1756.