

激光冲击强化对加力燃烧室火焰探测器焊缝的影响

田增^{1,2}, 王亚洲², 罗思海¹, 李国杰²

(1. 空军工程大学 航空工程学院, 西安 710038; 2. 西安天瑞达光电技术股份有限公司, 西安 710077)

摘要: 为了研究激光冲击强化(LSP)后加力燃烧室火焰探测器焊缝位置异常开裂原因, 采用X射线衍射方法和金相方法对激光冲击强化效果进行分析, 并利用扫描电子显微镜对断口进行了观察。在Abaqus有限元分析软件中建立了与观察到的焊缝缺陷相似的有限元模型, 对焊缝缺陷的LSP处理及冲击波传播过程进行了模拟分析。试验结果表明: 具有较好材料完整性的区域经LSP处理后, 表面会预置较大残余压应力, 同时表面金属晶粒得到细化, 疲劳裂纹会在焊缝缺陷位置萌生和扩展。有限元分析结果表明: 存在分层缺陷的焊缝经LSP强化后, 冲击波会在分层缺陷处产生反射, 造成分层位置发生开裂, 形成裂纹源造成疲劳开裂。根据试验和仿真分析结果, 为提升火焰探测器焊缝激光冲击抗疲劳效果, 建议优化焊接工艺, 提高焊接质量。

关键词: 复火焰探测器; 激光冲击强化; 疲劳开裂; 有限元仿真; 加力燃烧室; 航空发动机

中图分类号: V241.06

文献标识码: A

doi: 10.13477/j.cnki.aeroengine.2022.01.015

Impact of Laser Shock Peening on Welding Seam of Flame Detector in Afterburner

TIAN Zeng^{1,2}, WANG Ya-zhou², LUO Si-hai¹, LI Guo-jie²

(1. School of Aeronautical Engineering, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China;

2. Xi'an Tyrida Optical Electric Technology Co., Ltd, Xi'an 710077, China)

Abstract: In order to study the causes of welding seam abnormal cracking of afterburner flame detector after laser shock peening (LSP), X-ray diffraction and metallographic methods were used to analyze the effect of laser shock peening, and the fracture was observed by scanning electron microscope. A finite element model similar to the observed weld seam defects was established in Abaqus finite element analysis software, and the LSP treatment and shock wave propagation process of weld seam defects were simulated and analyzed. The test results show that the area with good material integrity treated by LSP will be reserved with large residual compressive stress on the surface, and the surface metal grains will be refined, and the fatigue cracks initiation and propagation will occurred at the weld seam defect location. The finite element analysis results also show that after the weld seam with delamination defect is strengthened by LSP, the shock wave will reflect at the delamination defect, resulting in cracking at the delamination position, forming crack source and fatigue cracking. According to the test and simulation analysis results, in order to improve the fatigue resistance of flame detector weld seam by laser shock, it is suggested to improve welding process and welding quality.

Key words: flame detector; laser shock peening; fatigue cracking; finite element simulation; afterburner; aeroengine

0 引言

某型涡扇发动机加力燃烧室火焰探测器自2015年至今共发生11起裂纹故障, 裂纹均出现在中心电极窗口处, 在2017年开始采用激光冲击强化(Laser Shock Peening, LSP)工艺对中心电极窗口位置进行处理, 窗口处裂纹问题得以根本解决。同时, 为消除

焊接拉应力, 对火焰探测器焊缝及热影响区进行了激光冲击强化处理。但在2019年底的外场测试中, 1个经激光冲击强化处理后的火焰探测器因焊缝位置产生裂纹而导致发动机停车。针对火焰探测器中心电极窗口位置和焊缝位置材料完整性特征, 并结合激光冲击强化特点, 对此次火焰探测器焊缝处开裂原因进行了分析。

收稿日期: 2020-07-21 基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFB1102600)、国家自然科学基金(52005508)、国家重大科技专项(J2019-IV-0014-0082)资助

作者简介: 田增(1985), 男, 在读博士研究生, 高级工程师, 主要研究方向为表面工程及抗疲劳制造与评价; E-mail: 526811882@qq.com。

引用格式: 田增, 王亚洲, 罗思海, 等. 激光冲击强化对加力燃烧室火焰探测器焊缝的影响[J]. 航空发动机, 2022, 48(1): 97-102. TIAN Zeng, WANG Yazhou, LUO Sihai, et al. Impact of laser shock peening on welding seam of flame detector in afterburner [J]. Aeroengine, 2022, 48(1): 97-102.

孙慧等^[1]、刘建翔等^[2]对火焰探测器功用做了较为详细介绍,作为发动机加力点火控制系统的组成部分,其中心电极通过氩弧焊的方式与探管焊接成为一体,用以感受发动机加力燃烧室火焰的点燃和熄灭。由于中心电极窗口位于焊接接头热影响区范围内,加之火焰探测器将承受包括发动机振动和加力气流激振,窗口位置易造成疲劳开裂^[3]。激光冲击强化技术是近些年应用广泛的1项较先进的表面强化技术,采用短脉冲高能激光在金属表面诱导产生高达10 GPa的冲击波,可以在金属表层预置1.5 mm以上的残余压应力层。Dorman等^[4]、李启鹏等^[5]的大量研究表明,激光冲击强化技术可以有效提升含缺陷铝合金部件、航空发动机叶片及众多金属零部件的疲劳寿命;随着航空发动机性能不断提升,为消除零部件焊接接头拉应力可能引起的连接件开裂问题^[6],周磊等^[7]、苏纯等^[8]、黄潇等^[9]、陈风国等^[10]将激光冲击强化技术应用于焊接接头的处理,均取得良好的效果;唐凯等^[11]、罗学昆等^[12]、CHOI等^[13]研究表明,对于具有组织和结构完整性的材料,激光冲击强化处理后抗疲劳效果均显著提升。

本文针对完整性较好材料,采用X射线衍射方法和金相方法分别测试了LSP强化后残余应力和金相组织,对强化效果进行分析;采用扫描电子显微镜对开裂的断口进行观察;在Abaqus有限元分析软件中建立与焊缝分层结构相似的有限元模型,对LSP冲击波传播过程进行了模拟仿真。结合试验与有限元的研究成果,对激光冲击强化后燃烧室离子火焰探测器开裂原因进行分析。

1 研究对象和试验方法

1.1 研究对象

某型火焰探测器的中心电极材料为GH3044,探管材料为GH2747,通过氩弧焊的方式将二者焊接在一起,焊缝裂纹形貌如图1所示。装机不到5 h,焊缝位置出现裂纹,以窗口为起点逆时针方向进一步观察,发现裂纹在焊缝位置已扩展至近3/4圆周。

激光冲击强化区域如图2所示。从图中可见,窗口处强化整个内侧截面,2排光斑,均要求过边,且窗口外圈1周1.5 mm进行强化;焊缝区域处理包含焊缝在内,一侧至窗口边缘,另一侧以焊缝边缘向外延伸5 mm的整个周向区域均进行激光冲击强化处理。

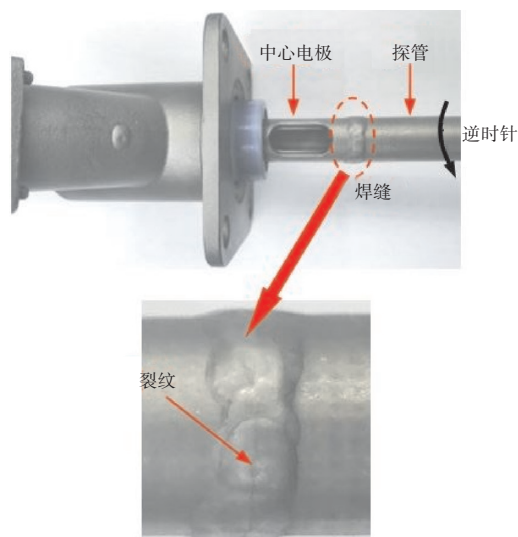


图1 火焰探测器焊缝裂纹形貌

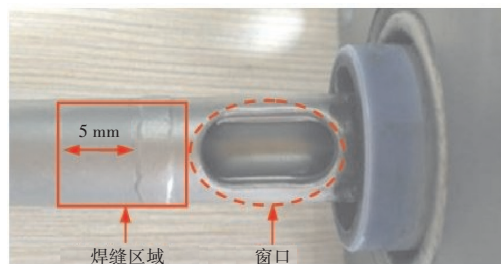


图2 激光冲击强化区域

采用西安天瑞达光电技术股份有限公司的YD60-M165激光冲击强化设备对图2区域进行激光冲击强化处理。根据Fabbor等^[14]提出的激光功率密度经验公式,并结合GH3044合金和GH2747合金的Hugoniot弹性极限,激光冲击能量为5 J,光斑直径为2.2 mm,无吸收保护层,强化3次。

1.2 试验方法

切取含裂纹的焊缝位置,对截面采用800#、1200#、1500#砂纸和金相抛光布进行磨抛处理,采用OLYMPUS SZ61低倍显微镜对截面宏观形貌进行观察。采用LEICA DMI 3000 M金相显微镜对含裂纹截面及强化前后的金相组织进行观察。

在中心电极一端铣出15 mm×15 mm平面,采用爱思特X射线应力测定仪对激光冲击强化前后残余应力进行测试。测试方法为

侧倾固定 ψ 角,定峰方法为交相关法,使用Cr(K α)辐射,起始角为134°,终止角为124°, ψ 角分别为0°、24.2°、35.3°和45°。

采用机械方法打开裂纹,打开过程中尽量不接触断口,避免断口二次损伤,采用ZEISS EVO MA25扫

描电子显微镜对整个断口进行观察。

2 试验结果

2.1 断口形貌

2.1.1 焊缝纵向形貌

焊缝纵向形貌如图 3 所示。从图中可见,焊缝处探管与中心电极焊后中间存在间隙。焊前贴合面可由未熔化中心电极凸台边缘确定,在裂纹传播过程中穿过焊前贴合面扩展至焊缝外表面,裂纹底部位于探管一侧靠近焊缝贴合面。

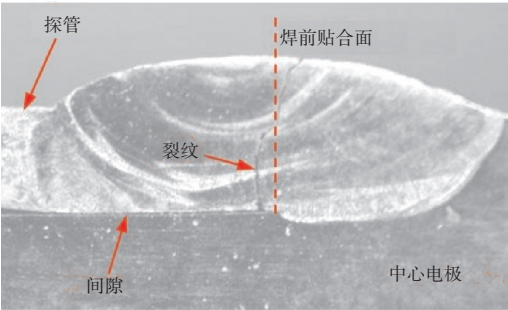
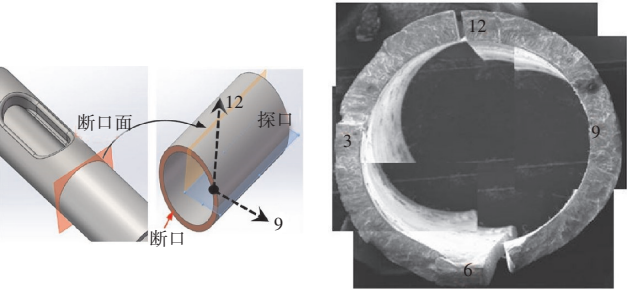


图3 焊缝纵向形貌

2.1.2 断口宏观形貌

断口取样位置如图 4(a)所示。定义火焰探测器窗口位置为 12 点,其余位置逆时针沿焊缝 1 周而确定,沿裂纹将断口打开后,观察探管一侧断口,则 3 点和 9 点位置恰好相反。整个探管一侧断口宏观形貌及位向关系如图 4(b)所示。从宏观上看,沿断口一周的内壁上分布有多个裂纹源,呈放射状向外壁扩展。



(a) 取样位置 (b) 宏观形貌(10倍)

图4 断口形貌

2.1.3 断口微观形貌

在 5 点钟到 6 点钟位置,靠近内壁出现了厚度约为 100 μm 的组织缺欠,如图 5(a)所示。对组织缺欠位置放大至 500 倍(如图 5(b)所示),可见在组织缺欠处形成了近乎垂直走向的 2 种形貌,并可见在相邻条

带的谷底已经萌生出二次裂纹,确定其延伸至组织缺欠处的位置为裂纹源。

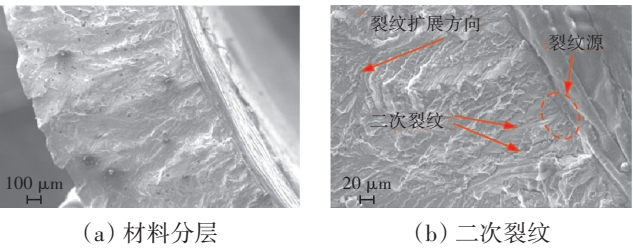


图5 组织缺欠

2.2 结构完整性材料强化效果

2.2.1 残余应力

中心电极残余应力测试结果见表 1。从表中可见,经激光冲击强化处理后,残余压应力提升了 1.93 倍。

表 1 中心电极残余应力测试结果

测试位置	残余应力/MPa	误差/MPa	平均值/MPa
未强化区	-178.5	±10	-176.4
	-187.3	±7	
	-167.2	±18	
	-172.5	±1	
强化区	-526.6	±32	-518.6
	-463.1	±9	
	-524.3	±32	
	-560.4	±9	

2.2.2 金相组织

在金相显微镜下,观察火焰探测器探管材料在激光冲击强化处理区和未强化区的金相组织(放大 200 倍),如图 6 所示。参照 GB/T 6394-2002《金属平均晶粒度测定方法》中方法及晶粒数统计规则,不同处理状态金相组织中随机放置 2 个直径相同虚线圆,对相同面积圆内的晶粒数 N 进行统计

$$N=N_i+\frac{N_c}{2}-1 \tag{1}$$

式中: N 为晶粒总数; N_i 为虚线圆内部晶粒数; N_c 为与虚线圆相交晶粒数。

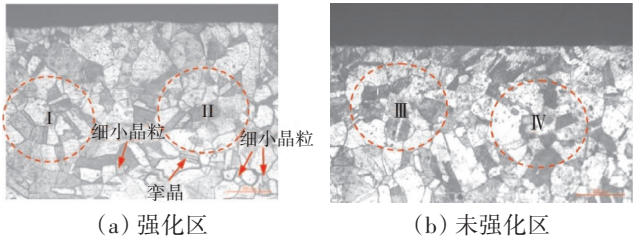


图6 金相组织(200倍)

激光冲击强化区和未强化区的晶粒数的统计结果见表2。从表中可见,在相同面积内,激光冲击强化区域晶粒总数高于未强化区的。

表2 晶粒数统计结果

观测位置	统计区域	内部晶粒数	相交晶粒数	晶粒总数	平均值
激光冲击强化区	I	14	10	18	22.5
	II	19	18	27	
未强化区	III	9	12	14	12.5
	IV	7	10	11	

3 焊缝异常开裂原因分析

由于中心电极具有材料完整性特征,经激光冲击强化处理后,表面残余压应力增大且晶粒得到细化。表面残余压应力的增大可以有效平衡工件承受的拉应力,对裂纹萌生有较好的抑制作用;晶粒得到细化后使晶界面积增加,对裂纹萌生和扩展的抑制作用更加明显^[15-16]。

探管和中心电极之间存在间隙(图3)。火焰探测器在工作状态下的振动,会使探管产生径向位移。根据剖面图建立2维有限元模型,将探测器左侧固定,并在探管末端设置0.1 mm的位移,分析其在振动环境中的受力状态。中心电极和探管的材料均为高温合金,弹性模量为203 GPa,泊松比为0.29。最小网格尺寸为0.03 mm,网格数量为4125,单元类型为CPS4R和CPS3,划分后的有限元模型如图7所示。

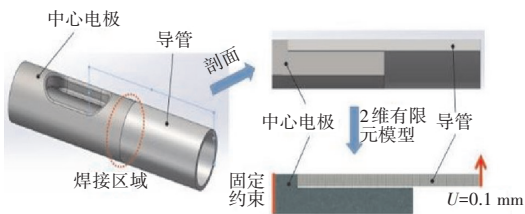


图7 有限元模型

火焰探测器受力状态有限元模拟结果如图8所示。从图中可见,在火焰探测器振动条件下,中心电极与探管在靠近焊接位置为应力集中区域,易产生疲劳破坏。

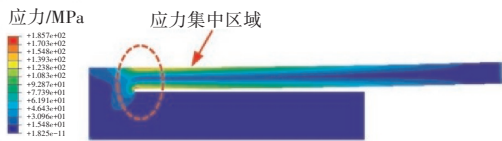


图8 火焰探测器受力状态有限元模拟结果

在Abaqus有限元软件中建立与图5断口观察的缺欠相似的3维分层结构1/4有限元模型,如图9所示。焊缝层1厚度为0.9 mm,焊缝层2厚度为0.1 mm,二者之间的黏合剪切强度和黏合抗拉强度均设置为1000 MPa,材料均为高温合金。激光冲击光斑直径为2.2 mm,由于所建立的为1/4模型,因此激光冲击压力区域为模型顶面的1/4扇形,半径为1.1 mm。最小网格尺寸为0.05 mm,单元类型为C3D8R,网格数量为16万。

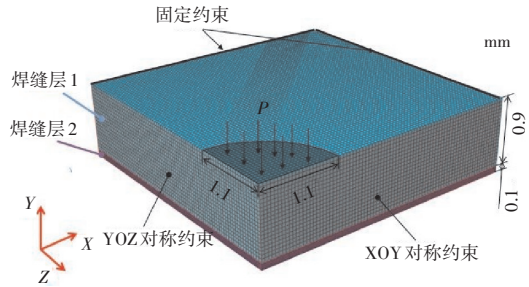


图9 3维分层结构1/4有限元模型

苟磊等^[17]、刘子昂等^[18]对激光冲击波压力加载模型做了大量研究,很好地模拟了冲击波压力在材料中的作用效果。

分层结构激光冲击强化仿真结果如图10所示。从图中可见,在第 25×10^{-9} s时,冲击波作用于材料表面并向内部传播;在第 175×10^{-9} s时,冲击波前沿到达材料分层界面处,由于冲击波前沿的压力相对较小,其产生的应力未超过分层结构的黏合强度,此时分层界面并未开裂;在第 250×10^{-9} s时,冲击波峰值到达材料分层界面处,产生的应力超过分层结构的黏合强度,分层界面开裂;在第 326×10^{-9} s时,在冲击波的影响下,分层界面开裂程度进一步提高。

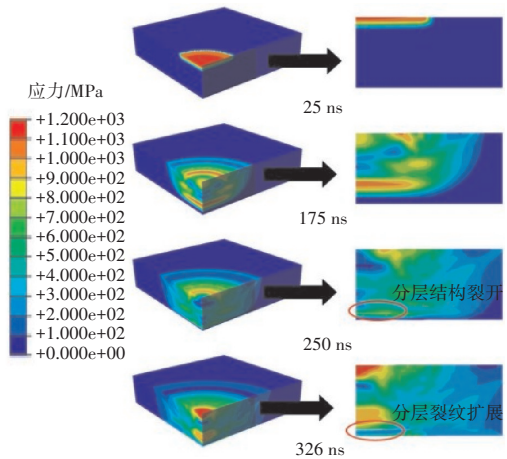


图10 分层结构激光冲击强化仿真结果

火焰探测器开裂过程如图11所示。由于存在焊接缺陷,在火焰探测器焊缝区有分层结构,在激光冲击强化过程中,GPa级的冲击波使得分层结构过早开裂,并萌生裂纹。在振动工作状态下,在靠近焊合面处产生应力集中,在振动载荷作用下,裂纹进一步扩展至整个厚度区域,造成火焰探测器在焊缝区开裂。

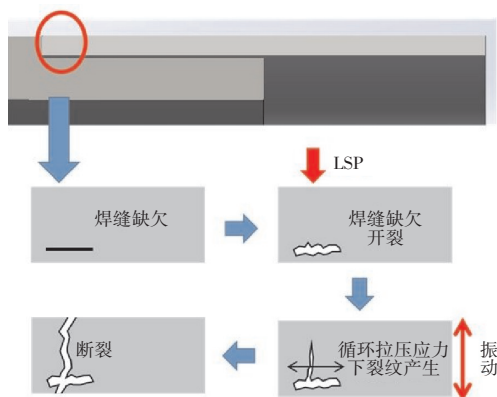


图11 火焰探测器开裂过程

4 结论

(1) 中心电极具有材料完整性较好的区域,经激光冲击强化后,可以在表层预置较大残余压应力,并且使强化区晶粒细化;

(2) 火焰探测器焊缝位置存在材料分层缺陷,裂纹在材料分层处萌生;

(3) 激光冲击强化过程中冲击波作用于材料分层位置,使分层位置处加速开裂并萌生裂纹,在振动载荷作用下进一步扩展,最终贯穿整个焊缝。

建议优化焊接工艺,提高焊接质量,以降低在激光冲击强化过程中的缺陷敏感性。

参考文献:

- [1] 孙慧,韦成余,李红.航空发动机加力点火控制系统故障与分析[J].中国新技术新产品,2012,23:106.
SUN Hui, WEI Chengyu, LI Hong. Failure and analysis of aero-engine afterburner control system[J]. New Technology and New Products in China, 2012, 23: 106. (in Chinese)
- [2] 刘健翔.浅谈火焰探测器种类和原理及发展方向[J].科技创新与应用,2013,21:16-17.
LIU Jianxiang. A brief discussion on the types, principles and development direction of flame detectors[J]. Scientific and Technological Innovation and Application, 2013, 21: 16-17. (in Chinese)
- [3] Gurrala S R, Andavan S. Computational analysis of reacting flows in afterburner[J]. Heat Transfer Engineering, 2020, 41(6-7): 47-55.
- [4] Dorman M, Toparli M B, Smyth N, et al. Effect of laser shock peening on residual stress and fatigue life of clad, 2024 aluminium sheet containing scribe defects[J]. Materials Science and Engineering A, 2012, 48(5): 142-151.
- [5] 李启鹏,何卫锋,全崇楼,等.航空发动机叶片的激光冲击强化研究[J].航空精密制造技术,2008,44(4):37-39.
LI Qipeng, HE Weifeng, TONG Chonglou, et al. Study of laser shock processing used in aeroengine blades[J]. Aviation Precision Manufacturing, 2008, 44(4): 37-39. (in Chinese)
- [6] Montross C S, WEI T, YE L, et al. Laser shock processing and its effects on microstructure and properties of metal alloys: a review[J]. Fatigue, 2002, 24(10): 1021-1036.
- [7] 周磊,汪诚,周留成,等.激光冲击表面强化对焊接接头力学性能的影响[J].中国表面工程,2010,23(5):41-44.
ZHOU Lei, WANG Chen, ZHOU Liucheng, et al. The effect of laser shock surface processing on mechanical properties of welded joints[J]. China Surface Engineering, 2010, 23(5): 41-44. (in Chinese)
- [8] 苏纯,周建忠,黄舒,等.激光冲击强化对6061-T6铝合金TIG焊接接头疲劳性能的影响[J].激光与光电子学进展,2015,52(6):159-165.
SU Chun, ZHOU Jianzhong, HUANG Shu, et al. Effect of laser impact strengthening on fatigue performance of 6061-T6 Aluminum alloy TIG Welded joint[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(6): 159-165. (in Chinese)
- [9] 黄潇,曹子文,常明,等.激光冲击强化对TC4钛合金单面修饰激光焊接接头疲劳性能的影响[J].中国机械工程,2018,29(1):104-109.
HUANG Xiao, CAO Ziwen, CHANG Ming, et al. Effects of laser shock processing on fatigue performances of TC4 titanium alloy single-side laser modification welding joints[J]. China Mechanical Engineering, 2018, 29(1): 104-109. (in Chinese)
- [10] 陈风国,吕豫文,庄绪华,等.激光冲击强化对异型材焊接接头性能的影响[J].热加工工艺,2016,45(1):192-194.
CHEN Fengguo, LYU Yuwen, ZHUANG Xuhua, et al. Effects of laser shock strengthening on performance of dissimilar metal welded joint [J]. Hot Working Technology, 2016, 45(1): 192-194. (in Chinese)
- [11] 唐凯,周留成,何卫锋,等.激光冲击强化对LZ50车轴钢疲劳性能影响试验研究[J].中国机械工程,2020,31(3):267-273.
TANG Kai, ZHOU Liucheng, HE Weifeng, et al. Experimental study on influences of laser shock processing on fatigue performance of LZ50 axle steels[J]. China Mechanical Engineering, 2020, 31(3): 267-273. (in Chinese)
- [12] 罗学昆,吴小燕,王科昌,等.表面完整性对于FGH95合金高温疲劳性能的影响[J].航空材料学报,2020,40(2):53-60.
LUO Xuekun, WU Xiaoyan, WANG Kechang, et al. Effect of surface integrity evolution on high-temperature fatigue property of FG95 alloy [J]. Journal of Aeronautical Materials, 2020, 40(2): 53-60. (in Chinese)
- [13] CHOI Y. A study on the effects of machining-induced residual stress on rolling contact fatigue[J]. International Journal of Fatigue, 2009, 31

- (10):1517-1523.
- [14] Fabbro R, Peyre P, Berthe L, et al. Physics and applications of laser-shock processing[J]. Laser applications, 1998, 10(6): 155-164.
- [15] 徐士东, 任旭东, 周王凡, 等. GH2036 合金激光冲击胞-晶细化与位错强化机理研究[J]. 中国激光, 2016, 43(1): 46-51.
- XU Shidong, REN Xudong, ZHOU Wangfan, et al. Research of cell-grain refinement and dislocation strengthening of laser shock processing on GH2036 alloy[J]. Chinese Journal of Laser, 2016, 43(1): 46-51. (in Chinese)
- [16] 黄晶晶. AZ91D 镁合金激光冲击纳米强化机理及其性能研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2016.
- HUANG Jingjing. Nanostructure formation mechanism and properties of AZ91D magnesium alloy by laser shock processing[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2016. (in Chinese)
- [17] 苟磊, 马玉娥, 杜永. 多点连续动态激光冲击强化应力场数值分析[J]. 航空动力学报, 2019, 34(12): 2738-2744.
- GOU Lei, MA Yu'e, DU Yong. Continuous dynamic numerical analysis of residual stress field under multi-point laser shock peening[J]. Journal of Aerospace Power, 2019, 34(12): 2738-2744. (in Chinese)
- [18] 刘子昂, 石伟, 汪诚. 激光冲击强化残余应力的数值模拟研究[J]. 激光技术, 2017, 41(1): 1-5.
- LIU Ziang, SHI Wei, WANG Cheng. Study on numerical simulation of residual stresses induced by laser shock processing[J]. Laser Technology, 2017, 41(1): 1-5. (in Chinese)

(编辑: 刘 亮)