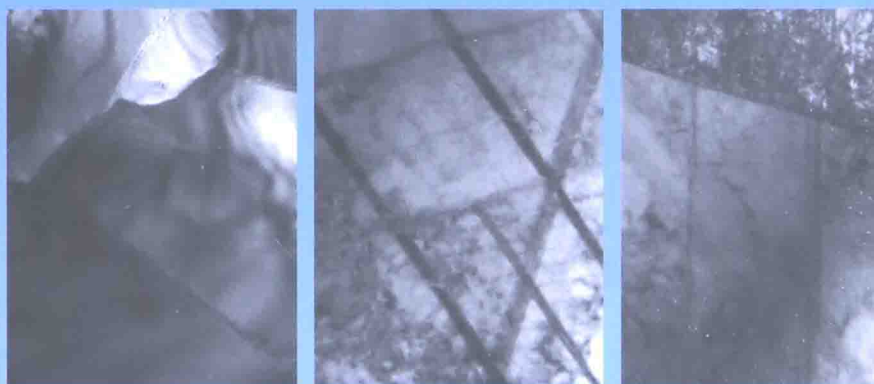


激光冲击波 强化技术及微观塑性 变形机制



Strengthening Technology and
Plastic Deformation Micromechanism
of Laser Shock Wave

鲁金忠 等 著
罗开玉



科学出版社

江苏大学专著出版基金资助出版

激光冲击波强化技术及微观 塑性变形机制

Strengthening Technology and Plastic
Deformation Micromechanism of Laser Shock Wave

鲁金忠 罗开玉 等 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书阐述了激光冲击波强化理论、技术和应用发展现状以及未来发展趋势,总结了江苏大学在激光冲击波强化理论、工艺和设备各方面的最新研究成果及实际应用经验,以航空关键零部件材料 LY2 铝合金、AISI304 奥氏体不锈钢和 AISI8620 低碳钢为研究对象,从激光冲击波强化诱导金属材料的表面完整性、摩擦磨损性能、拉伸疲劳性能、微观组织演变、晶粒细化机制等方面系统阐述了现代激光冲击波强化技术的重要进展和典型应用,通过深入总结和提炼科研成果,形成一本学术性强、实用性强的专著。研究成果面向国防、航空航天和汽车等行业关键零部件表面强化延寿需求,为各行业技术人员和研究人员提供了翔实的参考资料。

本书可供航空航天和汽车及机械行业的技术人员、研究人员参考,也可作为材料加工工程学科研究生和高年级本科生等的学习用书。

图书在版编目(CIP)数据

激光冲击波强化技术及微观塑性变形机制 = Strengthening Technology and Plastic Deformation Micromechanism of Laser Shock Wave / 鲁金忠等著. —北京:科学出版社,2015. 1

ISBN 978-7-03-043074-8

I. ①激… II. ①鲁… III. ①激光-冲击波-强化-技术-应用-金属-塑性变形 IV. ①TG111.7 ②TN209

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 013780 号

责任编辑:耿建业 陈构洪 罗 娟 / 责任校对:郭瑞芝

责任印制:徐晓晨 / 封面设计:耕者设计工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京厚诚则铭印刷科技有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015 年 1 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2015 年 1 月第一次印刷 印张:14 1/4

字数:277 000

定价:88.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

激光冲击波强化具有高压(吉帕至太帕)、高能(脉冲能量达到几十焦耳,峰值功率达到 $1 \times 10^9 \text{ W/cm}^2$)、超快(几十纳秒)、超高应变率($10^7 \sim 10^8/\text{s}$, 比爆炸成形高出 100 倍)等显著特点,具有常规加工方法无可比拟的优点和显著的技术优势。在装备重要零部件的强化制造方面发挥重要的作用,在某些场合具有不可替代性。1998 年该技术被美国研发杂志评为全美 100 项最重要的先进技术之一。美国在 20 世纪 90 年代后期开始的航空发动机高频疲劳研究计划中,将激光冲击波强化技术列为工艺技术措施首位。2005 年,研制激光冲击波强化系统的美国金属改性公司(Metal Improvement Company)获美国国防制造最高成就奖。美国将该技术列为第四代战斗机发动机关键技术之一,具有重大工程应用价值。

激光冲击波强化技术目前我国发展迅猛,江苏大学、中国航空工业集团公司北京航空制造工程研究所、上海交通大学、空军工程大学、中国科学院力学研究所、中国科学院沈阳自动化所等高校和科研院所对激光冲击波强化理论、技术和工程应用开展了卓有成效的研究,取得了较大的进展。目前研究多集中在激光冲击波强化诱导的宏观力学性能提升和工程化应用上,然而对于金属材料表层激光冲击细化晶粒的微观结构演变、性能结构关系尚缺乏系统的研究,尤其是对超高应变率下严重塑性变形导致的晶粒细化机制和微观强化机理,现在仍然缺乏统一的认识和深入的理解。

本书是作者所在研究团队长期从事激光冲击波强化理论研究和实践应用工作成果的总结与提炼,汇聚了作者研究团队的长期理论与实践经验,其研究成果主要来源于研究团队 2007 年以后发表的学术论文和研究生学位论文。本书注重理论与试验相结合,以航空关键零部件材料 LY2 硬铝合金、AISI304 奥氏体不锈钢和 AISI8620 低碳钢为研究对象,从激光冲击波强化诱导的金属表面完整性、摩擦磨损性能、拉伸疲劳性能、微观组织演变、晶粒细化机制等方面系统阐述了现代激光冲击波强化技术的重要进展和典型应用,通过深入总结和提炼科研成果,形成一本具有实用性、学术性和系统性的学术专著。

本书内容新颖,在阐述激光冲击波强化技术国内外研究现状和未来发展趋势的基础上,通过大量的理论和试验研究图表,以不同金属材料体系为研究对象,以激光冲击波强化工艺参数—金属材料宏观性能—微观结构演变过程为研究主线,系统阐述了激光冲击波强化作用下三种不同体系金属材料晶粒细化机制。本书内容主要包含四个部分。第一部分(第 1 章)简述了激光冲击波强化的原理、内涵、技

术优势和作用,以及激光冲击波强化技术的国内外研究现状和发展趋势;第二部分(第2~5章)以LY2铝合金为研究对象,开展了不同工艺参数下铝合金试样的表面完整性、疲劳寿命、不同应变速率下的拉伸性能,多次激光冲击铝合金晶粒细化机制和微观强化机理,激光冲击铝合金表面凹坑深度推导和理论计算等方面的研究,深入系统地揭示了激光冲击铝合金晶粒细化机制,建立了激光冲击超高应变率下以材料黏性系数、应变率、冲击波压力为特征参数的铝合金表面微凹坑深度的解析表达式;第三部分(第6~10章)以AISI304奥氏体不锈钢为研究对象,对激光冲击波强化不锈钢表面完整性、微观结构演变和晶粒细化机制、抗应力腐蚀性能等进行了若干基础研究和探索,揭示了以多方向机械孪晶细化表层原始粗晶为主的激光冲击强化低层错能金属晶粒细化机制,获得了残余压应力和晶粒细化共同作用的激光冲击不锈钢抗应力腐蚀的作用过程;第四部分(第11~12章)以AISI8620低碳钢为研究对象,系统研究了激光冲击AISI8620低碳钢表面力学性能(包括残余应力、表层微观硬度、表面粗糙度等)、表面分阶段磨损过程和摩擦磨损性能,揭示了激光冲击作用下AISI8620低碳钢的不同阶段在不同区域的多种磨损机制,以及晶粒细化过程中碳原子扩散强化的微观过程。

在本书写作过程中,作者几易其稿,获得了不同材料激光冲击波强化工艺准则,并采用不同的金属材料体系的激光冲击波强化力学效应分类解释超高应变速率下金属材料微观塑性变形机制,兼有学术研究专著和技术参考书的特点,可供激光加工、航空航天、机械工程和材料工程行业的技术人员和试验研究人员,以及高等院校和研究院所有关专业的本科生、研究生和教师学习参考。

本书成果是作者所在研究团队多年来共同努力的结晶,全书由鲁金忠教授、罗开玉博士等著。研究团队周建忠教授、罗新民教授、张磊博士、戴峰泽博士、钟俊伟硕士、钟金杉硕士、王庆伟硕士等参加了部分内容的撰写和讨论,在编写过程中,也引用了部分国内外同行的专著、学术论文、学位论文、研究报告及网络信息等,在此一并表示衷心的感谢。

激光冲击波强化是近年发展起来的一种新颖的表面强化技术,目前尚未形成系统完整的理论体系,作者仅从科学研究角度试图为有志进入本领域开拓的科学工作者、教师、学生和广大技术人员提供参考。由于作者水平有限、时间仓促,书中难免有不足之处,敬请广大读者予以批评指正。

著 者

2014年9月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 激光冲击波强化装备的研究概况	3
1.3 激光冲击波强化技术研究现状和应用	6
1.3.1 激光冲击波强化理论研究	6
1.3.2 激光冲击波强化关键工艺和宏观性能	8
1.3.3 金属材料激光冲击波强化的微观机理	11
1.4 典型激光冲击波强化的工业应用	13
1.5 激光冲击波强化结构金属的研究意义	17
参考文献	18
第 2 章 激光冲击铝合金的表面完整性	22
2.1 试验材料及方法	22
2.2 试验和测量设备	23
2.2.1 激光冲击波强化系统	23
2.2.2 纳米压痕测试系统	29
2.2.3 残余应力测试设备及方法	32
2.2.4 表面轮廓和粗糙度测试	33
2.3 激光冲击波强化铝合金表面完整性研究	34
2.3.1 单次冲击铝合金不同区域的纳米硬度和弹性模量	34
2.3.2 单次冲击铝合金表面轮廓和粗糙度	37
2.3.3 多次冲击铝合金叶片残余应力和微观硬度变化	39
2.4 椭圆光斑激光冲击铝合金的残余应力分布	44
2.5 本章结论	51
参考文献	52
第 3 章 激光冲击铝合金的拉伸性能和疲劳性能	54
3.1 试验方法和测量设备	54
3.2 不同应变速率下激光冲击铝合金的拉伸性能	56
3.2.1 应变速率对激光冲击前后铝合金应力-应变曲线的影响	56
3.2.2 应变速率对激光冲击后铝合金断口形貌的影响	59

3.3	不同冲击方式下铝合金的疲劳性能·····	61
3.4	本章结论·····	64
	参考文献·····	64
第4章	激光冲击铝合金微观组织演化及晶粒细化机制·····	67
4.1	试验材料和方法·····	67
4.2	试验设备和测试方法·····	68
4.3	单次激光冲击铝合金微观组织变化·····	69
4.3.1	深度方向的腐蚀性能和成分变化·····	69
4.3.2	深度方向的微观组织结构·····	71
4.3.3	单次激光冲击铝合金的强化机制·····	72
4.4	多次激光冲击铝合金微观组织变化·····	74
4.4.1	多次冲击下塑性变形层不同区域深度及晶粒形貌·····	74
4.4.2	多次冲击下塑性变形层不同区域的微观结构·····	77
4.4.3	多次激光冲击铝合金的增强机制·····	79
4.4.4	激光冲击波力学效应晶粒细化中的动态再结晶过程·····	83
4.5	激光冲击铝合金空位簇结构缺陷及形成机制·····	84
4.5.1	激光冲击铝合金空位簇缺陷·····	86
4.5.2	激光冲击铝合金空位簇缺陷的形成机制·····	87
4.6	本章结论·····	89
	参考文献·····	89
第5章	激光冲击铝合金塑性变形的理论模型及计算·····	94
5.1	数学模型的建立·····	95
5.1.1	条件假设·····	95
5.1.2	板料表面凹坑深度·····	97
5.2	激光冲击波强化铝合金塑性变形的理论计算·····	104
5.3	本章结论·····	109
	参考文献·····	109
第6章	激光冲击奥氏体不锈钢的表面完整性·····	111
6.1	试验设备·····	112
6.2	试验材料和方法·····	113
6.3	不同载荷下激光冲击奥氏体不锈钢的纳米硬度和弹性模量变化·····	113
6.4	激光冲击奥氏体不锈钢残余应力变化·····	116
6.5	激光冲击奥氏体不锈钢表面形貌研究·····	117
6.5.1	表面波纹度的变化·····	119
6.5.2	表面粗糙度的变化·····	120

6.5.3 加工纹理和方向	122
6.5.4 表面结构的复合特征	123
6.5.5 复合结构特征的形成机理	124
6.6 激光冲击对奥氏体不锈钢摩擦磨损性能的影响	125
6.7 本章结论	129
参考文献	129
第7章 不同应变速率下激光冲击不锈钢的拉伸性能和断口形貌	131
7.1 试验设备、材料和方法	132
7.2 激光冲击奥氏体不锈钢试验	134
7.3 激光冲击波强化后试样的拉伸试验	134
7.4 激光冲击次数对试样抗拉强度的影响	134
7.5 应变速率对激光冲击试样抗拉强度和流动应力的影响	136
7.6 应变速率和激光冲击次数对试样断口形貌的影响	139
7.7 本章结论	143
参考文献	144
第8章 激光冲击奥氏体不锈钢微观组织演化及晶粒细化机制	146
8.1 试验设备	146
8.2 试验材料和测试方法	147
8.3 单次激光冲击奥氏体不锈钢微观组织变化	147
8.3.1 深度方向的金相组织变化	147
8.3.2 冲击区域的典型微观组织结构变化	147
8.4 多次激光冲击奥氏体不锈钢深度方向微观组织演变	149
8.5 激光冲击次数对奥氏体不锈钢表面微观形貌的影响	152
8.6 激光冲击奥氏体不锈钢空位簇结构	156
8.7 本章结论	157
参考文献	158
第9章 激光冲击奥氏体不锈钢的抗应力腐蚀性能	160
9.1 试验材料和激光冲击参数	161
9.2 应力腐蚀加速试验	162
9.3 应力腐蚀开裂时间比较及对应的裂纹形貌	164
9.4 三种 U 形试样外表面应力分布状态	165
9.5 激光冲击提高奥氏体不锈钢抗腐蚀行为的作用机理	167
9.6 本章结论	171
参考文献	172

第 10 章 激光冲击不锈钢焊接件和微织构的力学性能	173
10.1 激光冲击不锈钢焊接件后力学性能和断口分析	173
10.1.1 试样材料和试验方法	174
10.1.2 激光冲击对激光焊接处力学性能的影响	175
10.1.3 激光冲击对激光焊接处断口形貌的影响	178
10.1.4 多次激光冲击焊接件的韧窝形成机制	179
10.2 激光冲击不锈钢微织构制备高性能非光滑表面	181
10.2.1 试样材料和试验方法	182
10.2.2 激光冲击波强化对激光微织构表面的力学性能的影响	183
10.3 本章结论	186
参考文献	186
第 11 章 激光冲击低碳钢的表面力学性能	189
11.1 试验设备、材料和方法	189
11.2 激光冲击对低碳钢表面和深度残余应力的影响	192
11.3 激光冲击对低碳钢表层微观硬度的影响	194
11.4 激光冲击对低碳钢表面粗糙度的影响	194
11.5 本章结论	197
参考文献	198
第 12 章 激光冲击低碳钢的微观强化机理	199
12.1 试样制备和试验方法	200
12.2 微观结构演变及晶粒细化机制	200
12.2.1 多次激光冲击低碳钢微观组织结构演变	200
12.2.2 多次激光冲击低碳钢深度方向微观组织的演变	202
12.2.3 多次激光冲击低碳钢的强化机理	205
12.3 激光冲击低碳钢的摩擦学性能	207
12.3.1 试验材料和试验方法	207
12.3.2 不同激光能量对低碳钢摩擦学性能影响	207
12.3.3 不同激光冲击次数对低碳钢摩擦学性能的影响	210
12.3.4 激光冲击低碳钢的磨损机理分析	212
12.4 本章结论	218
参考文献	218

第 1 章 绪 论

1.1 引 言

实现长寿命航空关键件抗疲劳制造是我国的战略举措和紧迫需求,是使我国从机械制造大国迈向机械制造强国的必由之路。航空发动机零部件再制造是高投入、高附加值、高层次政策下的高技术产业,是一项军民通用技术。其巨大的经济利益吸引了许多国家和地区纷纷涉足此领域。从整体来看,中国航空维修业与国际上先进的航空维修企业相比有一定的差距,大量高级别的航空器部件维修只能送往国外。我国喷气发动机部件尤其是叶片再制造,无论在军用还是民用飞机上都是亟待解决的关键问题。

金属材料宏观性能与其微观结构密切相关,合金和金属的某些失效方式对其表面状态非常敏感,如材料的摩擦磨损、疲劳和腐蚀等性能,其失效大多源于表面,因此合金和金属的表面完整性以及微观结构状态直接影响其使用寿命。晶粒细化是唯一能够同时提高金属强度和韧性的方法^[1]。目前,严重塑性变形导致的晶粒细化得到越来越多科技人员的关注,主要通过超声喷丸(ultra-sonic shot peening, USP)、机械球磨法(mechanical milling, MM)、压力扭转(torsion straining, TS)、等通道角挤压(equal-channel angle pressing, ECAP)、表面机械研磨(surface mechanical attrition treatment, SMAT)和激光冲击波强化(laser shock processing/laser shock peening, LSP)等方法来实现。在这些方法中,激光冲击波强化(又叫激光喷丸)是一种全新的晶粒细化技术,它利用强激光束产生的等离子冲击波,提高金属材料的抗疲劳、耐磨损和抗腐蚀能力。当短脉冲(几十纳秒内)的高峰值功率密度的激光辐射金属表面时,金属表面吸收层(涂覆层)吸收激光能量发生爆炸性汽化蒸发,产生高压等离子体,该等离子体受到约束层的约束爆炸时产生高压冲击波,作用于金属表面并向内部传播。在材料表层形成密集、稳定位错结构的同时,使材料表层产生应变硬化,残留高幅压应力,显著提高材料的抗疲劳和抗应力腐蚀等性能。

激光冲击波强化的原理图如图 1.1 所示,为了提高对激光能量的吸收并保护金属材料表面不受激光的热损伤,一般在工件表面冲击区域涂覆能量吸收层(如黑漆、金属箔等),然后覆盖透明约束层(如玻璃和水等)。当强激光束穿过约束层冲击金属靶材表面的能量吸收层时,能量吸收层充分吸收激光能量,在极短的时间内

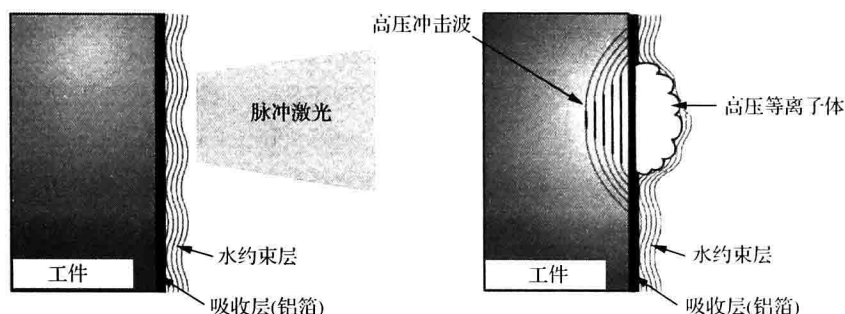


图 1.1 激光冲击波强化原理图

汽化电离形成高温、高压等离子体层,该等离子体层迅速向外喷射,由于约束层的存在,等离子体的膨胀受到约束限制,导致等离子体压力迅速升高,强加给工件靶面一个冲击载荷,在极短时间内($60 \sim 100 \text{ ns}$)产生向金属内部传播的强冲击波。这种冲击波压力高达数吉帕($1 \times 10^9 \text{ Pa}$),远远大于材料的动态屈服强度,从而使材料产生屈服和塑性变形,在塑性变形区域产生残余压应力,改善了工件的疲劳、磨损、耐腐蚀等性能。在此过程中,能量吸收层主要用来吸收激光能量防止工件表面被高能激光损伤,工件表面仅仅受到等离子体爆炸产生的冲击力,因此激光冲击波强化可以归为冷加工工艺^[2],约束层则大大提高了激光冲击波的压力和作用时间,这可以提高激光冲击波强化效果,增加强化层的深度并提高残余压应力。

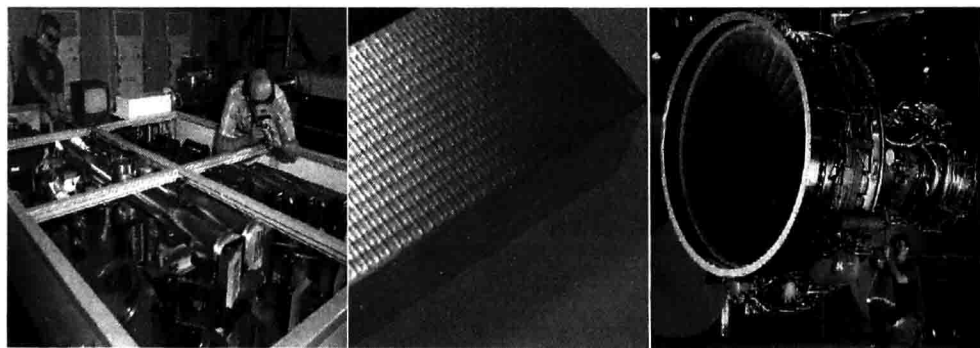
激光冲击波强化技术与其他表面强化技术相比,具有如下几个鲜明特点。①**高压**:冲击波的峰值压力达到数吉帕,乃至太帕($1 \times 10^{12} \text{ Pa}$)量级,这是常规的机械加工难以达到的。例如,机械冲压最大压力通常在几十兆帕($1 \times 10^6 \text{ Pa}$)至几百兆帕之间。在激光冲击波高压作用下,试样或工件表面形成高幅值残余压应力,残余压应力层深是机械喷丸的5~10倍以上,这极大地提高了抗疲劳性能。②**高能**:激光束单脉冲能量达到几十焦耳,峰值功率达到吉瓦($1 \times 10^9 \text{ W}$)量级,在极短时间($15 \sim 30 \text{ ns}$)内将光能转换成机械能,实现了能量的高效转换和利用。由于激光器的重复频率低,仅几赫兹,而整个激光冲击系统的负荷大约30 kW,所以激光冲击波强化是低能耗的加工方式。③**超快**:冲击波作用时间是脉宽的3~4倍,持续仅几十到一百纳秒,可控性强。④**超高应变率**:由于冲击波作用时间短,应变率达到 $10^7/\text{s}$,这比机械冲压高出10 000倍,比爆炸成形高出100倍,这是极端条件下的极端制造方法之一^[2,3]。

除了上述的明显特点,激光冲击波强化技术还具有以下优点:①与机械喷丸相比,能够维持或降低金属工件的表面粗糙度;②是激光诱导强冲击波力学作用的结果;③激光束易于控制和调整、柔性程度高,能够加工机械零件的圆角、耳状物等常规方法不能够加工的局部细小部位。

激光冲击波由于具备上述鲜明特点和常规加工方法无可比拟的优点,所以具有显著的技术优势,在关键装备零部件的强化制造方面发挥重要作用,在某些场合具有不可替代性。同时围绕“超快、超强”激光产生的极端条件下的“极端制造科学”,也被“国家中长期科学和技术发展规划纲要”列入先进制造技术中三个重点领域之一。在制造科学、新材料、高能武器等高新技术领域有广阔的应用前景,是国际科技竞争热点之一。采用激光冲击力学效应提高结构金属材料的宏观力学性能以及微观强化机理一直受到科研和工程人员的重视和关注。

1.2 激光冲击波强化装备的研究概况

早在 20 世纪 60 年代,美国 Battelle 研究所的 Clauer 就发现用脉冲激光作用在材料表面可以在固体中产生强冲击波,但由于激光冲击波强化需要每平方厘米高达吉瓦级的光强,激光设备严重限制了激光冲击波强化技术的应用和发展。进入 21 世纪,随着激光器件的发展,激光冲击波强化走向应用领域^[4]。1996 年美国劳伦斯·利弗莫尔国家实验室(Lawrence Livermore National Laboratory)成功研制第一台激光冲击波强化装备(图 1.2),激光冲击波强化技术才正式作为新颖强化手段在航空航天领域逐步替代机械喷丸^[6]。



(a) 第一台激光冲击波强化装备 (b) 激光冲击在金属表面诱导的表面微凹坑阵列和高幅残余应力 (c) 激光冲击波强化后的涡轮发动机

图 1.2 美国利弗莫尔国家实验室激光冲击波强化设备及典型实例

2002 年,美国金属改性公司(MIC)委托 ManTech 公司成功开发了用于 F119 整体叶盘激光冲击波强化的机器人技术的激光处理单元(图 1.3(a))和高效的激光处理装备(图 1.3(b)),大大提高了激光冲击波强化的效率^[6]。通用电气航空发动机(General Electric Aircraft Engines, GEAE)公司一直致力于激光冲击波强化技术和冲击装备的研究,并且在提高生产效率以及降低成本的前提下,研制出低能量高重复频率商业激光器系统(10J @ 30ns @ 10Hz)的激光冲击波强化装备

Gen IV^[7](图 1.4(a)), Gen IV 可以实现钛合金叶片的强化加工, 被应用于处理 F101-GE-102 发动机的第一级风扇叶片。图 1.4(b) 为 Dublin 的 LSP 公司研制的用于处理涡轮发动机叶片的带有 Rapid Coater System 的激光冲击设备^[8]。



图 1.3 美国金属改性公司激光冲击波装备^[6]

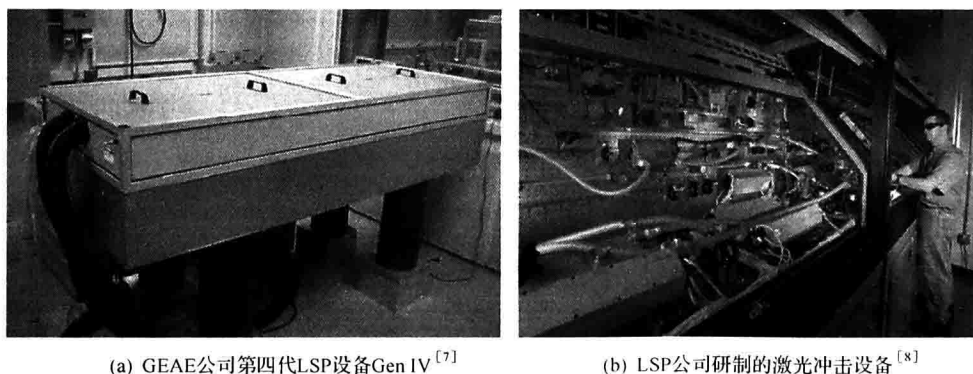


图 1.4 美国典型的激光冲击波装备

2005 年, 美国金属改性公司报道^[9], 激光喷丸(laser peening)技术的时代已经来临。该公司于 2003 年 2 月被联邦航空管理局(FAA)批准为指定的激光喷丸技术维修服务站、同年 11 月被联合航空管理局(JAA)批准为指定的激光喷丸技术维修服务站。2004 年 8 月颁布激光冲击波强化技术规范 AMS2546, 随之应用到波音 777 民用飞机的叶片处理。2005 年又逐步推广到大型汽轮机、水轮机的叶片处理, 以及汽车关键零部件的减量化和延寿。

国内激光冲击波强化设备的研究和引进比较滞后, 主要集中在江苏大学、北京

航空制造研究所、空军工程大学三家单位。20 世纪 90 年代末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设备(图 1.5),对铝合金 7050 铆接试件的铆钉孔进行激光冲击波强化试验,能稳定提高铆接结构疲劳寿命 80%以上^[10]。

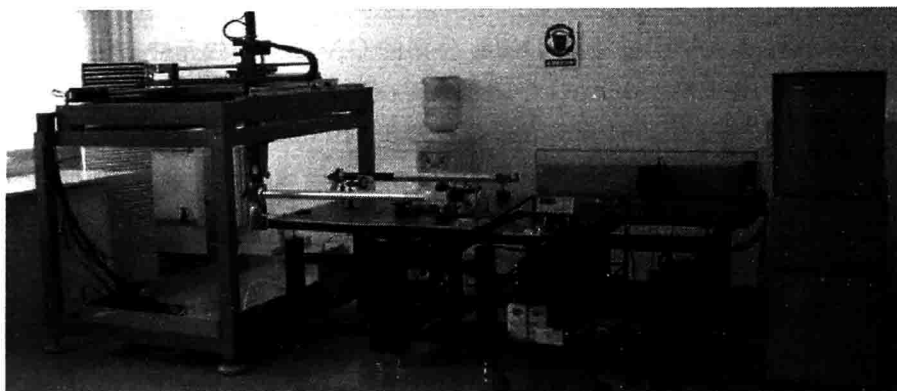


图 1.5 北京航空制造研究所引进的激光冲击波强化设备

1997 年开始江苏理工大学激光加工与检测科研团队从激光冲击波强化成形机理、涂层约束层应用、强化工艺试验以及激光冲击波强化集成装备等方面进行了研究^[11~17],并与中国科技大学合作研制了国内具有自主知识产权的重复频率钕玻璃激光器,如图 1.6 所示。在激光冲击成形、激光冲击波强化和激光冲击超高应变率再制造等方面取得了系列化的成果,部分成果在国际上处于前列^[18]。

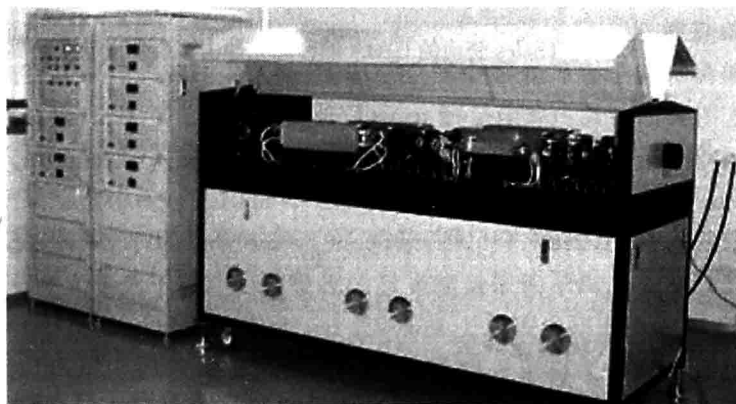


图 1.6 江苏大学等研制的激光冲击波强化成形集成系统

针对重大的工程应用需求,2010 年空军工程大学与西安天瑞达光电技术有限公司、江苏大学、西安蓝鹰电器设备公司和镭宝光电公司等多家单位合作,对激光

冲击波强化的关键技术和成套设备以及在航空发动机上的应用工艺进行了大量研究,现已研制出适合强化高温合金、钛合金等高强度材料用的 HGN-1、HGN-2 型高能脉冲激光器,以及脉冲能量为 25 J,重复频率达到 1Hz 的 YAG 激光器及其强化生产成套设备,可单路和分光后双路使用,如图 1.6 所示。并在西安蓝鹰电器设备公司建立激光冲击波强化示范生产线,为该技术在航空工业上的应用奠定了基础。

2010 年江苏大学引进法国 Thales 公司的 GAIA 纳秒激光冲击波强化设备,如图 1.7 所示,钕玻璃 Nd:YAG 介质,重复频率为 1~5 Hz,激光脉宽小于 15 ns,能量大于 12 J,波长为 1064 nm,光斑直径为 3~10 mm,平顶(top hat)光强分布,聚焦后可以实现单脉冲单点冲击试验与研究,为我国激光冲击波强化应用提供了良好的装备保证。



图 1.7 Thales 公司的 GAIA 纳秒激光冲击波强化设备

1.3 激光冲击波强化技术研究现状和应用

国内外主要从强化理论和机理、关键工艺、典型材料的强化性能等方面对激光冲击波强化技术进行研究。

1.3.1 激光冲击波强化理论研究

法国科学家 Fabbro 等^[19,20]以激光冲击波一维传播的假设为前提,建立了约束模式下激光束、约束层和靶材之间的相互作用模型,提出了冲击波峰值压力大小的估算式,定量说明了约束模式下,激光诱导的冲击波峰压与功率密度、靶和约束层的折合阻抗之间的相互关系。Ballard 和 Dubouchet 推导出激光冲击弹塑性材料的塑性变形深度公式和表面残余应力数值计算公式^[21]。

$$L = \frac{C_{el}C_{pl}\tau}{C_{el} - C_{pl}} \left[\frac{P - (\sigma_y - \sigma_0) \left(1 + \frac{\lambda}{2\mu}\right)}{2 \left(1 + \frac{\lambda}{2\mu}\right) (\sigma_y - \sigma_0)} \right] \quad (1.1)$$

式中, P 为激光波压力; τ 为脉冲激光的脉宽; σ_y 为材料的弯曲强度; σ_0 为表面平均初始应力, C_{el} 、 C_{pl} 分别为塑性波和弹性波在材料中的传播速度; λ 、 μ 分别为拉梅常量和剪切模量。

根据影响层深度 L , 深度方向的残余应力 σ_{depth} 可以用式(1.2)表示:

$$\sigma_{depth} = \sigma_0 - \left(\mu \epsilon^p \frac{1+v}{1-v} + \sigma_0 \right) \left[1 - \frac{4\sqrt{2}}{\pi} (1+v) \frac{L}{r_0 \sqrt{2}} \right] \quad (1.2)$$

式中, ϵ^p 为表面塑性应变; v 为常数; L 为塑性影响层深度; r_0 为无限体半径。

Thorslund 等^[22]推导出激光冲击过程中温度压力和应力之间的关系模型, Senecha^[23]、Ding^[24,25]等研究了有限元模拟激光冲击波的传播过程和多次冲击对 35CD4 残余应力的影响。Yilbas 和 Arif^[26]对无吸收层下激光冲击铝合金表面烧蚀产生凹坑的深度进行数值计算,并且和试验研究结果一致。2009 年 Morales 等^[27]对激光冲击过程中激光诱导的等离子体动力学进行有限元分析和研究。为提高激光诱导冲击波峰值压力和延长冲击波脉冲宽度,在激光冲击成形中普遍使用约束层技术。文献[28]~[33]研究了各种约束层对激光诱导冲击波性能的不同影响,通过试验对约束层的材料进行优化选择,探讨约束层的厚度、刚性、声阻抗和密度与冲击波峰值压力之间的关系。

国内有关冲击波方面理论研究起步较晚。1979 年,李鸿志等^[34]也对变能量冲击波问题进行了研究,其工作主要集中于武器膛口的变能量冲击波,并提出了膛口能量补充机理的定性分析说明。2000~2002 年卞保民等^[35,36]根据球形对称冲击波在自由空间中传播的约束条件,提出了空气中激光等离子体冲击波波前在中远场的传播方程,证明了著名的点爆炸 Taylor 解是该冲击波波前传播方程在中场的近似形式,并将该冲击波运动方程与强爆炸空气冲击波的试验进行比较,计算结果与试验结果符合得很好。2002 年, Li 等^[37]基于修正的 Sedov-Taylor 关系式,从理论上研究了脉冲激光烧蚀靶材产生的等离子体冲击波传播特性,并指出在激光烧蚀过程中,激光等离子体冲击波吸收的激光能量依赖于时间变化。江苏大学张永康于 2006 年在 *Journal of Applied Physics* 上首先提出光力效应的概念,即激光(光能)-热(热能)-力(机械能)的转换过程,并建立了有柔性贴膜条件下的高能激光与材料相互作用的理论模型和冲击波峰值压力估算式,直观地反映了冲击波峰值压力和约束层、能量吸收层、靶材特性以及激光参数之间的关系^[13,38],首次建立了根据冲击区表面质量特征定性判断激光冲击波强化效果的直观检验方法,并成功地实现了叠加补充处理,效果显著,解决了工程应用无损检测的关键问题^[39]。

这些理论研究和数值模拟对激光冲击波强化试验提供了理论依据和指导。

1.3.2 激光冲击波强化关键工艺和宏观性能

激光冲击结构金属,能够使金属表面和亚表面的力学性能明显改变。在激光冲击过程中,工艺参数(约束层、吸收层、激光冲击光斑、脉冲能量、搭接率、冲击次数)对金属表面的残余应力、微观硬度、表面粗糙度、磨损性能和疲劳性能都有直接影响。

激光冲击过程中约束层和吸收层的有无和约束层的材料特性对激光冲击效果都有直接影响。2003年 Thorslund 等^[22]对激光直接冲击金属表面、激光冲击表面附有吸收层的结构金属、激光冲击表面覆盖约束层和吸收层的结构金属三种情况下金属表面的温度场、压力场和热应力分布进行分析和理论推导,从理论上证明约束层和吸收层对激光冲击结构金属产生残余压应力是必不可少的工艺条件。2006年张永康、顾永玉根据约束层材料特性,将约束层分为刚性约束层、液体约束层和柔性约束层三类,从激光诱导冲击波的过程、汽化物的压力衰减和约束层对冲击波反射的角度,系统分析了不同约束层对激光诱导冲击波强度与脉冲宽度的影响机制^[13,39,40]。

激光冲击能够使结构金属表层产生高幅残余压应力和较高的微观硬度,从而提高金属构件的疲劳寿命,因此研究冲击过程中工艺参数对残余应力的影响至关重要。1996年 Pevre 等对激光冲击波强化 7075-T7351 和 A356-T6 铝合金进行试验、模拟研究和理论计算,对单次、多次冲击铝合金产生的残余应力和微观硬度进行测试和分析,并且与机械喷丸处理铝合金所产生的残余应力的数值和深度进行对比,研究结果显示:与机械喷丸相比,激光冲击能够产生深 1 mm 的残余压应力层,硬度能够提高 10%^[21]。2005 年和 2006 年 Rubio-González 等^[42]研究了吸收层对激光冲击 6061-T6 铝合金产生的残余应力场的影响(图 1.8),并对不同尺寸

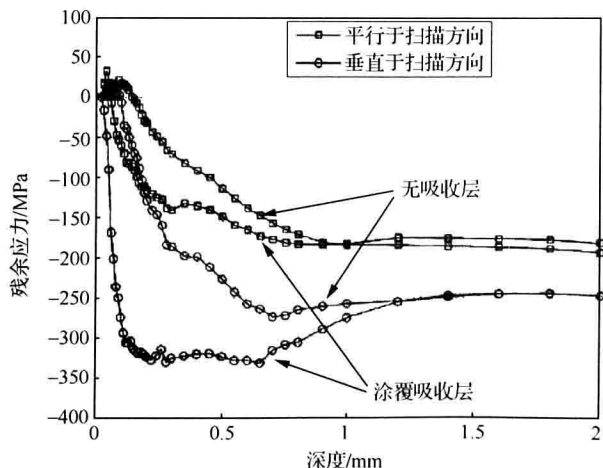


图 1.8 有无吸收层状态下的激光冲击 6061-T6 铝合金深度方向的残余应力分布^[42]