激光微加工在航空发动机MRO中的应用

周锐^{1,2*}, 张姿^{2*}, 洪明辉^{3*}

1. 厦门大学航空航天学院, 厦门 361102;

2. 中国航空发动机集团有限公司, 北京 100097;

3. 新加坡国立大学电子与计算机工程系, 新加坡 117576

*联系人, 周锐, E-mail: rzhou2@xmu.edu.cn; 张姿, E-mail: zizh@vip.sina.com; 洪明辉, E-mail: elehmb@nus.edu.sg

收稿日期: 2019-06-17; 接受日期: 2019-07-10; 网络出版日期: 2019-10-15

国家自然科学基金(编号: 61605162)、教育部蓝火计划产学研联合创新资金(编号: CXZJHZ201738)和福建省自然科学基金(编号: 2017J05106)资助项目

摘要 作为一种精密制造技术, 激光微加工在航空发动机中复杂部件的维护、修理和全面翻修(Maintenance, Repair and Overhaul, MRO)中表现出明显的优势和巨大的潜力. 随着新一代航空发动机性能指标的不断提升, 其关键零部件将长期服役于更为苛刻的极限环境下, 如高温、高压以及高转速等, 工况环境对其耐热性、机械强度、表面摩擦系数、防结冰性等方面提出了很高的要求. 激光微加工作为一种非接触式的表面处理技术, 可以促进以上相关性能的实现. 本文将基于激光与航空材料相互作用机理及其应用, 介绍激光微加工技术在航空发动机MRO和生产制造中的广泛应用, 探究航空发动机先进制造过程中激光加工的具体工艺和特征. 由于航空发动机制造和维修的过程十分复杂, 研究人员将利用激光的单色性、高亮度、高方向性和相干性等特点, 基于光热过程和光化学过程两种机理, 探索激光与物质相互作用的物理机制和动态过程, 并讨论其在激光微纳制造、清洗、增材制造、冲击强化以及焊接切割等关键制造工艺中的合理应用. 本文对激光微加工领域在航空发动机行业中的技术进行了综述, 为航空发动机维修和服务保障体系建设中所需的工程技术支援和前沿研究技术联动提供了一种新模式, 有望能促进与之相关的保障装备得以快速发展.

关键词 激光微加工, 航空发动机, MRO

PACS: 52.38.Mf, 79.20.Ds, 42.62.Cf

1 引言

航空发动机的关键零部件长期服役于苛刻的极限环境下, 工况环境对其耐热性、机械强度、表面摩擦系数、防结冰性等方面提出了很高的要求. 高速运转

的航空发动机会产生大量的热能, 如不能及时地将这些热能排散, 则会对发动机叶片造成巨大的热应力损坏, 加速航空发动机老化^[1]. 为了提升航空发动机的推重比, 提高涡轮进气温度成为一种必要的手段, 因此涡轮叶片在工作时往往承受着较大的热负荷和机械负

引用格式: 周锐, 张姿, 洪明辉. 激光微加工在航空发动机MRO中的应用. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2020, 50: 034202

Zhou R, Zhang Z, Hong M H. Laser microprocessing for aeroengine MRO support (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2020, 50: 034202, doi: 10.1360/SSPMA-2019-0224

荷,特别是对高压涡轮叶片的耐高温和机械强度提出了很高的要求.目前,在涡轮叶片等航空发动机涡轮热端零部件表面涂覆热障涂层(Thermal Barrier Coatings, TBC)的技术较为成熟可靠,以应用最为广泛的陶瓷热障涂层为例,通常由陶瓷面层(工作层)和高温合金金属黏结层(底层)组成.当前最常用的热障涂层陶瓷面层材料是质量分数为6%–8%的氧化钇部分稳定的氧化锆,它具有很高的强度和韧性,黏接强度高,抗热疲劳性能好,使用温度可达1200°C,高于航空发动机涡轮叶片表面的平均工作温度.而高温合金金属黏结层的材料多采用MCrAlY(M可以是Ni或者Co),其主要作用一方面是改善陶瓷面层和基体合金之间的物理相容性,缓冲热应力,另一方面是提高基体材料的抗高温氧化腐蚀能力.然而,由于航空发动机长期工作在严苛的环境下,热障涂层会逐渐产生裂纹、剥落等不同程度的损伤,从而导致零部件的失效,引发发动机停车等灾难性的后果.因此,在航空发动机喷嘴导流叶片和涡轮叶片上加工微细的冷却孔成为实现更大推重比的重要补充手段.同时,转子叶片表面运转时在流体环境中所受到的摩擦力也对发动机的能耗有显著的影响.因此,在航空发动机的制造和维修中,需要一定工艺对涡轮叶片的表面进行处理,使其具备冷却、减阻等功能.此外,在严寒的环境下,涡轮叶片、机匣或者传感器表面结冰会导致航空发动机无法正常地工作,严重的情况下会导致不可挽回的灾难^[2,3].正常的除冰工艺也费时费力,受到荷叶表面的纹理使荷叶具有超强的疏水性的启发,制备出仿荷叶表面微纳结构的金属构件,可以使水滴能够轻易地在表面滚动并带走黏附在表面的污染物^[4].

研究表明,纹理的特征在实现以上功能上至关重要,如尺寸、形状、周期、深宽比、方向以及层次.生物学家们也发现,这种附着在动植物表面的纹理尺寸往往都非常微小,尺寸在微米和纳米级,这种尺度的优势在于隐秘性强,且不容易被破坏.随着仿生研究的深入,为了使得航空发动机材料的表面上获得所需的特种功能,航空材料表面形貌的微纳设计和制造逐渐得到重视.

与此同时,在航空制造业中经常涉及对各种零配件进行清洗,比如在维修航空发动机时,需要对各部位进行除锈、除杂和除污等.由于航空发动机关键零部件制造成本高昂,当其服役一定时间、热障涂层厚

度减小到低于临界尺寸,或者涂层出现裂纹、剥落等破损状况,导致防护作用逐渐降低时,需要对破损失效的涂层进行完全去除处理,并重新涂覆新的涂层,以实现零部件的修复和再制造.污染物是通过共价键、双偶极子、毛细作用、氢键、范德华力和静电力等作用力附着在基底材料上的,清洗的过程就是破坏作用力的过程,使污染物分解、气化,从而脱离基底材料以达到清洗的目的.传统的清洗方法有高压水柱清洗法、机械清洗法、化学清洗法以及超声波清洗法等,这些清洗方法在一定程度上能够去除锈迹、油脂等表面污染物,满足工业需求,但缺点是成本比较高,无法达到精度要求,特别是对于航空发动机这类高端装备的零部件来说有一定的应用局限性.除此之外,有一些亚微米粒子可以强有力(大概是自身重量的百万倍以上)地附在物体表面上,使用传统清洗方法去除这些污染物时不可能不损伤表面,无法满足精度要求.因此,非机械接触式、材料适应性广、可精确实现选择性去除、易于实现实时反馈和控制、效率高以及绿色无污染的清洗方法亟待开发,采用激光清洗技术对航空发动机关键零部件的失效热障涂层进行去除,在实现航空发动机热障涂层的选区、高效、精确去除的同时降低基底的损伤程度.该技术利用高能量密度的激光束辐照于待清洁表面,破坏去除目标物和基底之间的结合键和结合力,使表面的污染物、锈斑或涂层瞬间被烧蚀、气化或振动,从而脱离基底表面,达到清洗目的.

目前,国外已开展了激光清洗去除航空发动机涂层材料的初步理论和试验研究.英国曼彻斯特大学Marimuthu等人^[5]基于有限元法模拟分析了激光清洗航空发动机零部件热障涂层过程中的瞬态温度场、残余热应力以及材料去除率,预测了不同功率和光束扫描速度下的激光烧蚀深度,结果表明热障涂层的主要去除机理是温度升高导致材料气化分解,且基于纳秒脉冲激光的验证性实验与有限元仿真的结果一致.法国斯奈克玛公司发明了基于脉冲激光清洁涡轮轴发动机叶片涂层的方法,显著降低了对叶片高温合金基底的损伤.

此外,对涡轮叶片热障涂层的制造工艺已经越来越成熟,其中陶瓷面层的主要涂镀制造方法包括各种增材制造技术,如激光熔覆法、电子束物理气相沉积法、等离子喷涂法等.高温合金金属黏结层(MCrAlY

涂层)常采用电子束物理气相沉积、超声速火焰喷涂、真空电弧镀、复合电镀等涂镀方法,以提高涂层的黏结强度.

再者,为了提升航空发动机材料的抗疲劳性能,除了对其内部成分(如材料晶体、晶型等)进行强化以外,对材料表面进行强化加工也非常有价值.目前,传统的材料内部性能增强的研究正在不断的推进,但不免存在一定的局限性,受仿生技术的启发和纳米技术的发展,设计和构建功能性结构从而突破传统材料的局限性引起了航空制造专家的关注.

激光与物质相互作用的物理过程可以简要概括为物质对激光的吸收.当激光照射在物质表面时,由于物质的折射率大于空气的折射率,一部分光线被反射,而余下的另一部分光线进入材料,由于物质的吸收,激光的能量以指数方式递减.当将激光应用于微纳制造或其他生产制造手段时,激光在这些过程中与物质所发生的具体反应可以归纳为光化学过程和光热过程两个过程类别.其中光化学过程是由于光引起的化学反应,物质本身的化学键被破坏,引起化学元素或化学结构的变化,导致物质改性,主要应用于光刻等技术中.相比之下,光热过程应用更为广泛,其机理也需要更进一步的研究探索,总的来说,光热过程大致为激光照射在物质表面,物质中的电子吸收光子,使电子能量上升,温度升高.电子再把能量传递给晶格,这个过程耗时很短,大概在皮秒数量级的时间内就能完成.通过电子和晶格的相互作用,晶格获得能量,达到一定能量阈值,就使得物质升温熔化乃至气化^[6].

由此可见,光热过程是一个超短时间间隔内的复杂动态过程,既包括了能量的转移,也包括了如温度的变化甚至相变等过程.激光与物质的相互作用过程错综复杂,但将其研究透彻后,可为航空发动机MRO支持技术的发展带来诸多益处.并且正是由于这种特殊的相互作用原理,使得激光与其他作用方式相比,有着无可比拟的优势,如热影响区小(如图1所示)、加工精度高;激光设备无需和材料直接接触,是一种非接触式加工方式,灵活稳定;激光能够在空气、真空或者液体环境中实现高速加工;各态物质瞬间熔化、蒸发和形成等离子体.因此,激光微加工与高端装备制造的结合也越来越紧密,在精密工程中实现了广泛应用.

基于上述的物理理解,以激光加工航空发动机中冷却孔为例,用来钻孔的典型激光源主要是固态(Nd:

图1 (网络版彩图)激光热影响区域^[7]

Figure 1 (Color online) Laser heat affected zone [7].

YAG)和CO₂激光器.激光金属打孔的机理主要分为4个过程^[8]. (1) 表面加热: 聚焦后的激光光束聚焦于金属表面,在Fresnel吸收机理下与金属的电子相互作用,被激发的电子与晶格和其他电子相互碰撞,在~nm厚的表面薄层中能量被迅速转化为热量; (2) 表面熔化: 如果激光强度和相互作用时间充足,表面的薄层会被熔化,激光光束强度通常都很高,以至于表面熔化的时间非常短,显著的热量会被传导到材料中去; (3) 蒸发: 被辐照区域的表面温度通常高于材料的沸点,从而引发蒸发过程,当蒸发的材料自由地扩散到大气环境中,蒸气压显著高于常压,从而使得逃逸的蒸气加速; (4) 熔池溅射: 除蒸发以外,两种类型的液体熔化溅射也可能发生,第一种是蒸发所导致的反冲压力(Recoil Pressure)使得熔化层迅速地从光束路径中溅射,另一种是由于可探测存在的成核机制过程导致的爆沸(Violent Boiling).钻孔处的激光辐照强度和材料的热损失影响蒸发和熔化喷溅开始的时间.在初始的火山口形成后,激光辐照会被限制在结构里面,这样激光辐照的吸收速率会增加^[9].

针对以上复杂的航空发动机制造维修技术需求,本文主要以激光微加工技术为核心手段,介绍其在微纳结构制造、清洗、增材制造、表面冲击强化、焊接切割等诸多应用中的特点,显现激光微加工在航空发动机制造领域中的巨大潜力.

2 微纳构造

发动机作为航空飞行器的重要组成部分之一,对

其安全性、工艺性和耐用性的要求之高不言而喻. 航空器材所用材料必须具有强的可靠性以及质量轻等优点, 近几十年的实际应用表明, 虽然包括钛合金和铝合金在内的合金材料具备航空器材使用所需要的物性特征, 但仅仅靠材料本身的性质来提高航空发动机的使用可靠性显得越来越不够. 此时, 通过对材料的特殊加工处理来进一步增强其性能就表现得极其重要.

2.1 散热冷却孔加工

不断提高涡轮进气温度成为提升航空发动机推重比的一种必要手段, 涡轮叶片在工作时往往承受着较大的热负荷, 特别是对高压涡轮叶片的耐高温性能提出了很高的要求. Wang等人^[1]基于主动模式的热管理对航空发动机涡轮盘的失效风险控制进行了研究, 通过有效调节热载荷的分布来降低涡轮盘面失效的可能性. 由于涡轮叶片材料本身耐高温性能受到材料合成工艺的限制, 目前主要通过气膜冷却孔、叶片表面涂覆隔热涂层等方法来提高其涡轮叶片对进口工作温度的耐受能力. 微通道散热系统已经被广泛地应用于先进制造及装备领域, 如高性能计算机、数控加工主轴系统等. 再加上仿生结构的深入研究, 例如鳞翅目昆虫翅脉仿生流道等, 构成了新型的高效能冷却结构. 航空发动机的喷嘴导流叶片和涡轮叶片, 均需要精细的冷却孔来满足耐高温的需求, 从而实现更大的推重比, 因此气膜冷却孔的微细加工技术应运而生.

当前, 主要有两种不同的冷却机理. 一种是基于致密微孔壁发散冷却(Effusion Cooling), 燃烧室里成千上万的微小冷却孔可以通过引入未用来进行燃烧的空气来实现对火焰管的冷却. 另一种是, 涡轮叶片和导流叶片上成排的冷却孔利用来自发动机其他部分的空气进行冲击冷却(Impingement Cooling), 是双壁间隙中的热传导增强效应.

为提高涡轮叶片的机械强度, 并且能使其具备更佳的冷却效果, 一般来说要求气膜孔无重铸层、无微裂纹以及有较高的定位精度, 加工时应尽量对壁面无损伤. 然而, 在实际的制孔过程中, 常用的加工手段往往会产生多种缺陷, 如重铸层、溅射和热影响区等, 将极大地影响其应用. 例如, 电火花加工制孔的优点是成本低廉, 但加工后重铸层厚度有10–30 μm . 而电液束加工能做到无重铸层, 但加工效率相对较低且工艺的一致性较差. 电化学加工由于电解质的存在, 对环境有

着危害. 而相比于电火花加工, 激光微加工在工具的耐久性和耗材成本上更具有优势.

随着激光制造技术的迅猛发展, 长脉冲激光作为冷却孔加工的工艺首先得到关注, 其具有打孔效率高的特点优势, 同时还可以柔性调节气膜孔的尺寸大小, 但缺点是热影响区太大, 导致制孔重铸层可达60 μm . 制孔过程中, 当激光脉冲结束时, 熔化的表面材料在孔的进口和出口处经常发生溅射现象, 那些没有被及时完全排出孔外的熔化物重新冷却固化到孔壁上, 形成所谓的重铸层. 过度的重铸和溅射会堵塞气膜孔, 甚至还有可能剥离, 导致严重磨损, 对航空发动机造成致命的损害. 因此, 在激光制孔工艺中, 如何去消除热效应所产生的负面效应成为了技术攻关的焦点.

2.1.1 冷却孔的激光加工

激光打孔主要分为两种类型: percussion和trepanning. Percussion打孔是指集中于一点, 层层烧蚀剥离材料, 最终形成孔洞. 在这种情况下, 孔的极限尺寸主要取决于激光光斑的尺寸. 如果是制备更大尺寸的孔洞, trepanning则更有效, 通过移动光斑划出所需尺寸的孔洞. 值得一提的是, 激光微加工打孔可以不考虑材料的硬度和导电性.

航空发动机的涡轮叶片、导向叶片、喷射引擎、火焰管等关键零部件, 曾一度采用铝合金、镁合金、高强度钢和不锈钢等制造, 后来为适应增加发动机推力、提高飞机飞行速度的需求, 钛合金、高温合金(镍基合金)和复合材料(C/SiC)相继得到应用. 针对典型的航空发动机用材料, 由于不同材料对入射光的吸收率不同, 包括材料表面的反射率、本体材料的吸收系数等存在差异, 其本体性质对激光加工过程有很大的影响, 一般来说, 对金属材料的加工用短波长的激光可以最大化材料对辐照能量的吸收量. 同时, 材料的本体性质还会影响热流的运动, 例如热传导和热扩散, 从而影响材料的去除和溅射过程. 此外, 材料的去除过程是通过熔化还是蒸发, 将取决于材料本体的相变速率, 涉及的材料性能包括密度、比热和潜热等物性参数.

C/SiC复合材料因其极高的热稳定性、高模量、耐腐蚀性而被视为航空发动机应用里最有前景的热结构材料之一^[10,11]. 由于C/SiC复合材料导电性较差, 传统的电火花加工(Electro-Discharge Machining, EDM)

基本不可能适用. 因此, Wang研究团队^[12]基于超短脉冲激光加工, 在C/SiC复合材料上加工直径小于1 mm的高质量圆形孔和方形孔, 具有出色的可重复性, 且无需后加工或者特殊的加工气氛环境. 超短脉冲激光加工技术的脱颖而出为C/SiC复合材料叶片的高质量和高效率钻孔提供了可能, 该技术在加工过程中具有较低的热扩散速率和较高的峰值功率. 随着激光扫描速度的增加, 辐照点有效脉冲个数减少, 制孔所产生的碎片和颗粒逃逸到盲孔外的时间不足, 导致盲孔底部的碎片和颗粒较多地留下来, 降低了空气光裂解和等离子体形成的阈值, 从而产生更大体积的等离子团, 降低了所加工孔槽的深度. 与之相比, 孔洞入口处的碎片则比较容易扩散出来, 激光扫描速度对孔径的影响并不明显.

在镍基合金航空材料的加工中, Antar等人^[13]对电火花加工和激光加工进行了研究比较, 发现电火花加工以10–15 μm 的重铸层厚度优于激光加工的80 μm 厚度, 但对于航空发动机上至少需要加工 15×10^4 个孔的需求来说, 激光微加工在10 mm厚度的工件上表现出了完美的高效率.

Percussion模式下的激光打孔是利用一系列具有特定的能量和持续脉冲时间宽度的激光去加热、熔化和蒸发目标材料的加工工艺, 可以在各种各样的金属基材(例如IN100的尼莫耐热镍基铸造合金Nimocast PK24, 镍铬钛合金Nimonic PK33和263等合金)上高速加工出高宽深比的孔洞, IN100具有低密度的优势, 可用于涡轮的进气导流管, Nimonic PK33用于火焰管, Nimonic 263则是用于燃烧室环和机匣. 在加工过程中, 抗重铸复合涂层(Antispatter Composite Coating, ASCC)可有效降低重铸层的产生机率. 由于辐照在工件上的每个激光脉冲能量中, 一部分被用于蒸发涂层材料, 而另外剩余的能量则被亚表面的合金基材吸收致使基材熔化, 在脉冲持续时间内有部分亚表面熔化物被进一步蒸发而诱发反冲压力(Recoil Pressure), 使得溅射物在抗重铸复合涂层的孔洞中向上反射溢出, 有效减少了重铸层的形成^[14].

随着激光光源设计的不断进步, 超快激光(飞秒/皮秒)进入了发动机制造与维修行业的视线, 为航空发动机涡轮叶片冷却孔的制造提供了一种“冷”加工手段, 在其加工过程中尽可能最小化热量的产生. 不同于前面提到的长脉冲激光与材料作用时的热熔气化机

理, 超快激光与材料作用时是将材料中的自由电子激发去掉, 依靠带正电荷的材料分子之间的库仑斥力去除材料, 从而在这种机制下消除了热量的产生. 与此同时, 因超快激光的峰值功率最高可达帕瓦量级(千万瓦特), 且电场强度极高, 远大于原子内库仑场, 足以使任何材料发生电离, 实现作业区域内的材料以等离子体的形式被去除, 因此可利用超快激光对任何材料进行制孔、微米级刻蚀、切割等超精细冷加工, 达到气膜孔加工无重铸层的理想效果. 该方法在加工工件时无热应力、无重铸层、无微裂纹等现象, 且还可根据需要随时调节孔径尺寸和制孔锥度, 为单晶涡轮叶片气膜孔加工提供了新的途径.

2.1.2 调控优化加工质量的手段

虽然激光打孔技术为冷却孔的加工提供了一种既快又准的工具, 但面对航空发动机制造中对更复杂、更微小的孔槽的加工需求, 如何掌握并用好这把利器显得尤为重要. 除了越来越复杂和微小的孔穴, 现代发动机的很多零部件, 如旋转组件, 都有着复杂的形状, 例如喷嘴的空心导流叶片上冷却孔的加工要避免钻孔穿透冷却孔槽的背面也即盲孔的底部, 或者是穿透到零部件里相邻的其他部分的风险, 控制这些风险都需要精细的工艺调控. 激光钻孔的孔槽质量和几何形状往往存在着较多缺陷, 典型的包括尖锥(Taper)、滚磨(Barrelling)、重铸层以及微裂纹, 研究如何调控激光钻孔的加工参数来影响优化孔径加工质量显得尤为重要.

(1) 光路设计中透镜的焦距和聚焦位置

在激光微加工系统中, 激光光束到达工件表面以前, 都需要经过一系列的透镜聚焦, 从而能产生高强度光束, 当光束遇到微小的发散时, 在聚透镜的作用下, 将出现一段光束半径基本不变的距离, 这段距离就如形成了“小蛮腰”, 被称之为焦深. 光斑的最小半径 w (mm)由透镜的焦距 f (mm)和主光束的发散角 θ (rad)来决定, 光束发散代表了沿着光束的束径增大, 焦深 Δf (mm)可以大约估计为

$$\Delta f = \frac{2wf}{D} = \frac{2\theta f^2}{D},$$

式中, D 是光束半径(mm). 考虑到陡直度和孔槽深度, 为了加工成更好的孔形, 激光光束的束腰应该刚好被放置于工件表面的正下方, 由此可知, 更长的焦深可

以使得工件的摆放位置更加灵活, 并有益于深孔的获得.

(2) 强度或功率密度

有选择性地设置激光光束的强度或者功率密度, 可以有效排斥熔池和气化的物质离开孔槽, 以减少重铸层等负面效应的发生概率. 激光强度或者功率密度由脉冲能量、焦斑大小和脉冲宽度来决定, 因此, 可以通过对加工因素的调控来改变孔槽的质量和几何形状. 同时, 激光功率密度的选取也取决于材料的种类和厚度. 例如, Yeo团队^[15]研究发现对于航空材料的深孔加工(>6 mm), 采用短脉冲和高脉冲能量的组合可以防止熔化过程的发生, 从而降低重铸层产生和孔槽堵塞的概率, 提升了孔槽壁的加工质量和孔槽深度. 不过值得注意的是, 脉冲能量、脉冲宽度和脉冲重复频率3个因素之间是内在关联的, 其中任何一个参数的变化, 也会带来其他两个参数的变化, 需要在脉冲能量和脉冲宽度的选取上优化平衡, 才能制造出质量更好的孔槽.

(3) 谐振腔模式

激光谐振腔有横向和纵向两种显著不同的模式, 横向模式对应着光束的横截面, 而纵向模式是指不同频率和波长下沿着激光谐振腔轴向的共振. 光束质量在大多数情况下是由横向模式来控制, 低阶的横向模式可以最小化散射, 从而聚焦光束到最小化光斑, 提升加工的精度, 但高阶模式下因更大的空间散射体积而提升了光束的能量效率.

(4) 脉冲形状

Low等人^[16]曾报道了利用400 W的Nd:YAG光纤激光对Nimonic合金工件进行了打孔加工, 通过调制脉冲形状, 比较了SPDPC (Sequential Pulse Delivery Pattern Control)和NDP (Normal Delivery Pattern)两种模式下的孔槽加工质量, 在SPDPC模式下打孔, 观察到了向上溅射的材料在减少, 使得重铸层厚度从6.72 mm降至2.78 mm, 有效地减少了孔槽口重铸层的沉积和孔底的熔化层厚度, 还发现能通过调制脉冲形状来调节孔槽中向上和向下溅射的物质, 从而实现对物质移除过程的控制, 表明脉冲整形对材料的移除过程有着显著的影响. Roos^[17]早前通过将一段宽度为200 μs 的脉冲切分为周期为1 μs 、脉冲宽度为0.5 μs 的尖刺状连续脉冲, 由于材料在这种模式下是被逐步去除, 因此孔槽加工的质量得到了很好的提升, 并且打孔效率也

因为熔化物的减少和蒸汽羽的屏蔽效应减弱而得到进一步提升. 此外, 还可以基于单位脉冲激光能量的物质移除量, 利用数学模型预测了不同脉冲形状对打孔效率的影响.

(5) 双脉冲激光加工

目前基于时间序列的双脉冲激光, 通过选择不同的波长、能量和脉冲时间宽度的组成, 实现了双脉冲加工的增强效应, 这方面的研究相对比较丰富. 近年来, 本研究团队^[18]通过设计一种基于空间间隙调制的平行双光束脉冲激光加工系统, 可以显著提升其在基底材料上的加工成型质量和效率, 在航空发动机冷却孔加工领域拥有广阔的应用前景(图2).

该方法通过调控双光束脉冲激光的空间间隙和相互作用, 从而改变材料表面的激光能量分布, 引发温度场的重新分布来优化提升激光加工的成型效率和质量. 在研究实验中通过扫描电子显微镜、三维重构和二维轮廓观测的方法手段, 可以观察到空间间隙变化过程中成形行为的演化(图3). 这种空间双光束脉冲激光的成型增强效应可以满足实际工程应用需求的激光精密加工技术提供一种新的思路, 具有很好的应用前景.

(6) 辅助激光加工

以下提出的各种方法都是通过最小化重铸层和减少材料溅射量来获得更好的加工质量.

气体辅助加工. 通过喷嘴导流与激光光束同轴的气流到工件表面, 高压辅助气体可以防止基底材料溅射污染透镜. 与此同时, 辅助气体对熔池形成排斥力而成型, 并促进气化物逃逸到孔槽外, 还可以通过调

图2 (网络版彩图)空间相干的双光束脉冲激光加工系统^[18]
Figure 2 (Color online) Schematic diagram of the experimental setup for the spatial double-pulse laser ablation [18].

图 3 (网络版彩图)总功率10 W下不同间隔距离的分光双光束脉冲激光加工的样品扫描电子显微镜图、三维重构图和二维轮廓图^[18]. (a) 100 μm , (b) 80 μm , (c) 60 μm , (d) 0 μm , (e) 单束激光

Figure 3 (Color online) SEM images, 3D reconstructions and 2D profiles of craters created by the splitted double-pulse laser beams at different gaps of (a) 100 μm , (b) 80 μm , (c) 60 μm , (d) 0 μm , and (e) by single laser beam at a total laser power of 10 W ^[18].

节辅助气体的压力, 影响材料溅射的速率. 此外, 研究表明辅助气体的种类也会对孔槽的加工质量和几何形状造成影响, 不同类型的气体所形成的溅射物不同, 例如以氧气作为辅助气体时主要的溅射物是氧化物, 且对材料表面的黏结力比在惰性气体辅助下要弱得多^[19]. 从形态上看, 如果用氧气作为辅助气体, 主要是液态颗粒的材料溅射, 氧气可以在激光打孔过程中增

加其吸收量和蒸发量. 此外, 如果辅助气体作为冷却作用, 亦会带来在主体材料和熔化重铸层的界面上形成较大的热梯度, 导致微裂纹的增加^[20].

液体辅助加工. 在激光微加工过程中, 液体环境可以有效防止炭化层的产生, 减少重铸层厚度. Kruusing^[21,22]曾对水下激光加工的研究进行了综合阐述, 提出水环境的主要作用是避免碎片重新沉积、冷却材料

表面、增强等离子体压以及传导光束, 虽然这些效果用其他的中性液体介质也可以达到, 但水依然是最常见、经济以及安全的介质环境. 液体环境通过将部分的入射光能量转化为例如蒸汽和等离子体的机械推力, 从而促进材料表面的碎片和颗粒有效迁移, 并形成冲击波. 此外, 水分子还可以作为反应物参与到打孔工艺中. 伴随着液体辅助激光微加工, 气泡生长、等离子体诱导以及冲击波等物理过程的即时发生, 对微加工的品质都有着较大的影响^[23].

基底温控辅助加工. 激光微加工过程中, 重铸层和本体材料之间会产生较大的热梯度, 所产生的热剪切应力会形成较多的微裂纹, 因此需要有效的方法来减少热剪切应力. 通过在激光加工前后用高温炉调控基底材料的温度, 来减少热梯度剪切力所造成的微裂纹, 相比于在常温常压下的加工效果, 可以减少约50%的重铸层裂纹. 但是在这种常规高温炉下的加热, 还是会造成基底材料以及孔槽中产生较多微裂纹, 导致加工的失败. 因此Murray和Tyner^[24]研究了一种局域性的等离子体火焰加热法, 可进一步降低重铸层的微裂纹比例, 缩小热影响区的范围.

超声辅助加工. Lau等人^[25]开发了一种超声辅助激光打孔技术, 来解决孔槽深度受限、非柱体结构的孔形以及过厚的重铸层等问题, 并提出一种数学模型来描述加工孔槽的形状, 从而实现了对孔槽加工质量的提升.

化学辅助加工. 虽然水下辅助加工已经在防止炭化层和减少重铸沉积方面有所改善, 但重铸层和热影响区仍然存在, 且材料去除的速率比较慢, 为了更好地控制水下激光加工过程, 化学试剂的适当辅助提供了一种行之有效的途径. 当前, 主要有4种化学辅助的激光加工, 包括光化学反应(紫外激光束和模板), 两种热化反应分别是激光与酸液或者碱液相互作用, 以及盐液辅助的激光加工(LARM). 在LARM中, 盐溶液中的氯离子浓度在激光慢速扫描下对材料去除的数量有很大的影响, 在离子浓度接近饱和时, 过饱和的氯离子抑制了氢氧根离子的产生, 降低了反应速率, 从而导致材料去除效率的降低^[26].

(7) 混合加工

以上方法都有各自的特点, 也有效地减少了重铸层厚度和溅射材料的数量, 却仍无法完全消除重铸层和溅射所造成的负面影响, 因此, 混合加工方法被进

一步提出, 依托喷射液束电解加工辅助的激光加工(JECM-LD)来减少重铸和溅射. 该方法基于喷射电解质液体与激光光束的同轴设计, 使得激光光束在电解质液体中传播直达工件表面进行孔加工, 其中工件基底材料的去除由激光脉冲能量来完成, 而脉冲间隔时的电化学反应(阳极反应)可以减少重铸层和溅射物, 同时液体压力对激光与工件相互作用产生的等离子体压力有显著的增强效应, 从而产生更多的冲击波, 对重铸层的移除大有裨益. 喷射液束在加工过程中主要起到电化学反应、冷却以及传送碎片等作用, 由于水对绿光波段透明, 因此JECM-LD中常选用绿光激光器^[27].

2.2 热障涂层的激光加工

除了提升冷却膜孔槽质量, 为提高航空发动机的可靠性和服役寿命, 热障涂层也是在高温工况下用于保护基底材料和提高高温承载能力的重要手段. 热障涂层一般由导热系数很低的陶瓷层和高温合金黏结层构成. 燃烧室的热障涂层一般都是由金属材料的黏结层和陶瓷面层组成, 通过激光熔覆或者等离子喷涂等沉积法进行涂覆的. 航空发动机的设计中通常通过将热障涂层技术与激光加工冷却孔技术相结合来提升服役性能, 但值得注意的是, 由于激光加工本身具有热效应和热梯度, 容易造成在冷却孔附近区域发生涂层的剥落. Freborg等人^[28]利用有限元分析, 提出了一种在界面上诱发剥落及其生长的模型机制, 面层和黏结层的热膨胀不平衡对界面在垂直方向的应力形成有很大影响, 而在航空发动机冷却过程中, 应力被进一步拉伸, 开始诱发剥落, 且在面层和黏结层之间界面上的氧化物会进一步改变垂直方向的应力, 导致涂层在水平方向继续剥落撕裂. 同时, 由于航空发动机的效率提升对冷却孔的形状设计提出了新的要求, 为使得进入冷却孔位置的流动空气在界面的冷却效果达到最佳, 激光打孔的入射角度对加工过程中最小孔径和涂层的剥落也有很大影响^[29]. 以下部分主要讨论激光加工热障涂层微结构, 以及如何防止热障涂层的剥落, 并介绍其表面减阻功能.

航空发动机未来的先进制造技术, 与近几十年来科学家对生物表皮纹理的研究息息相关, 这些特殊的纹理可以让它们的宿主获得一些特殊的技能, 包括黏附、变色和吸引猎物、躲避天敌等, 以确保在变化多端的环境条件下生存和适应, 如Sun和Bhushan^[30]总结

的生物表面微纳结构, 鲨鱼皮表面的纹理沟槽具有减阻效果和防污特性, 使鲨鱼在水里可以快速游动捕杀猎物.

MCrAlY和PtAl涂层材料是在镍基合金材料(如航空发动机中常用的IN718和CMSX-4)上最常见的黏结层材料^[31]. 高速运动系统中的湍流将增加阻力, 在湍流体的黏性亚层的动量转移造成了壁面摩擦损耗, 如果在气流方向上的表面能被制造和呈现正确维度的肋骨结构, 壁面的剪切力将被显著减小. 由于在航空发动机的不同部位, 流动空气的速度、温度和压力都是在变化的, 需要用粗略的计算来估算肋骨尺寸, 可以通过壁面剪切力、介质流体的动态黏度来测算^[32]. 但肋骨结构并不是对气流或者液态流体中的每个目标都有作用, 因为其有效性取决于阻力的类别. 肋骨结构只对存在高比例的表面摩擦力的物体有作用, 因此, 肋骨结构在飞机、船舶或者管道中的应用比在汽车中更有意义. 受到鲨鱼皮结构的启发, IN718合金的表面通过电子束气相沉积(EB-PVD)来涂覆NiCoCrAlY, 表现出很好的耐高温性, 氧化得也很缓慢, Naraparaju等人^[33,34]用皮秒激光在该热障涂层上制备了肋骨结构, 通过制造出一定高度的肋骨结构并具有相应间距(如图4所示). 这种尺度对航空发动机的压缩机和涡轮都很合适, 保持着相应的深宽比, 来降低航空发动机零部件的表层摩擦阻力(skin friction drag), 并发现微结构在不同温度下(1000°C下氧化100 h)具有极好的氧化稳定性.

激光微加工孔槽的尺寸精度取决于基底材料、激光束的光斑大小以及光束质量. 当肋骨结构的间距变小, 以至于需要达到10 μm , NiCoCrAlY材料的肋骨结构很难以激光加工的方式做到均匀分布, 因此必须要用其他替代的手段来实现. 有研究表明, 具有较小宽

度的片层状结构可以有最高10%的剪切力降低. 相对容易加工一些的梯形结构在开口角度为30°时, 也能有8%的下降. 当肋骨结构平行于流体方向排列时具有最好的效果. 同时, 针对肋骨结构在零部件的吸气面(Suction Side)还是压力面(Pressure Side)对减阻的影响, 相关研究认为吸气面的肋骨结构更有效果^[33].

2.3 疏水抗冻

在严寒极端环境下, 航空发动机结构件表面结冰会带来潜在风险, 甚至导致停车无法正常工作的危险情况, 传统的除冰工艺如加热法、机械或者化学除冰法在实际操作过程中费时费力. 在抗冻理论研究方面, 美国NASA, Glenn Research Centre等机构开发了相应的3D抗结冰软件来模拟结冰过程. 航空发动机中的防冰通常是通过去冰液(Ethylene, Propylene Glycol)或者电加热的方式来完成. 虽然这些方法能在航空发动机MRO中一定程度上缓解结冰带来的风险, 但从能耗和时间效率等角度来看并不理想. 因此, 有效的防冰表面一方面需要减少冰的表面黏结力, 另一方面需要有较长的工作寿命, 这些都与表面化学组成、微结构和多相性有着密切的关系. 随着仿生学研究的深入, 科学家发现荷叶表面的纹理使荷叶具有超强的疏水性, 过去的多项实验研究也表明, 超疏水性质的物体表面水滴结冰所需要的时间比一般的表面要长很多, 在正常的光滑表面和超疏水表面均有一滴5 μL 的去离子水滴, 在-20°C的环境下, 正常的表面水滴经过18 s就完全结冰了, 而超疏水表面水滴经过了49.2 s才结冰, 延长到2倍多的时间^[35]. 其原理在于, 当水滴落在超疏水表面上时, 水滴与材料表面的接触面积较小, 导热率降低, 使得水滴在低温环境中更难散热, 所以可以更长时间维持液体状态, 并且在有一定角度的情况下, 水滴无法在超疏水表面停留, 这也使得超疏水表面结冰概率大大降低^[36,37]. 因此, 如何弱化冰水与基底材料表面的相互作用是获得航空发动机零部件表面防冰性能的一种重要途径. 事实上, 极化的结冰水分子与表面材料之间的强相互作用力主要来源于范德华力、氢键以及静电相互作用力, 其中静电作用往往成为主导因素. 如上面举例的实验结果, 超疏水表面可以显著降低水滴和冰分子与基底材料的相互作用力, 具有优良的水下减阻能力. 为了进一步厘清超疏水表面与抗冻性、防冰性之间的物理关系本质, 需要对接角、水滴和冰

图4 (网络版彩图)在热障涂层NiCoCrAlY表面的激光微加工^[33]

Figure 4 (Color online) Schematic representation of the laser structuring. The exact distance of the produced riblets is 40 μm and they are 20 μm high^[33].

在基底上的表面黏结力以及微结构的特征尺寸之间的相互关系进行热力学研究. 目前, 对材料表面抗冻性研究多集中在超疏水表面上.

当液滴处于固体表面上时, 会呈现冠状或球状, 当固/液/气三相处于平衡, 液滴不再扩张或收缩时, 液滴与固体表面的接触面是一个圆形. 在气、液、固三相交点处引出一条气/液界面切线, 此切线在液体一方的部分与固/液交界线之间的夹角称为水接触角. Young 等人认为接触角是由固/液表面张力、液体表面张力以及固体表面张力三者平衡共同决定. 根据力平衡的原理, 推导出了杨氏方程. 但是, 杨氏方程只适用于光滑均一的固体表面, 但事实上, 生活中的固体表面都不可能绝对的光滑, 由于表面上多少都会有一些凹凸不平的结构, 之后, Wenzel 在其中引入了粗糙因子, 即实际固液接触面积与表观固液接触面积的比值, 得出了相应的 Wenzel 方程. 在 Wenzel 模型中, 液滴是完全浸入固体表面的凹凸结构中的, 所以在模型中实际接触面积大于表观接触面积, 固体表面的粗糙因子大于 1, 这个模型满足现实中的部分润湿模型, 但是在某些固体表面, 由于其表面特殊的力学性质和化学性能使得液滴并不会完全填充凹槽, 不满足 Wenzel 模型. 因此, Baxter 和 Cassie 提出了 Cassie-Baxter 模型, 假设液体不能完全润湿粗糙的基底表面, 因此液滴在粗糙表面上的接触应该是液滴与由基底材料和空气构成的复合表面之间的复合接触. 在 Cassie-Baxter 模型中, 液滴在粗糙表面时, 液滴不会进入到表面的凹槽中, 而是由于空气存在于空隙中, 使液滴架在微结构表面的凹凸结构之上. 当材料表面水接触角大于 150° 并且滚动角小于 10° , 被称之为超疏水表面. 通过对超疏水表面机理的研究发现, 形成超疏水需要低表面能和表面微细结构两个必要条件.

表面能是创造物质表面时对分子间化学键破坏的度量, 另一种定义是, 材料表面相对于内部所多出的能量. 也可以这样理解, 由于表面层原子朝向外面的键能没有得到补偿, 使得表面质点比体内质点具有额外的势能, 称为表面能. 基体表面的粒子和内部粒子所处的环境不同, 因而所具有的能量不同. 例如, 在液体内部, 每个离子都均匀地被邻近粒子包围着, 使来自不同方向的吸引力相互抵消, 处于力平衡状态. 处于液体表面的粒子却不同, 液体的外部是气体, 气体的密度小于液体, 故表面离子受到来自气体分子的吸引力较小, 而

受到液体内部粒子吸引力较大, 使它在向内向外两个方向受到的力不平衡. 这样使表面分子受到一个指向液体内部的拉力, 因此, 液体表面有自动收缩到最小的趋势.

航空发动机材料中的金属或金属氧化物等高能表面常用来制备超亲水表面, 而超疏水表面的制备常需在表面覆盖氟碳链或硅烷链来降低表面能. 但是在光滑表面上仅采用化学方法来调节表面自由能, 通常只能使之成为疏水表面. 要达到超疏水表面, 就必须在基底材料表面设计加工微细结构, 这对表面润湿性起着至关重要的作用. 一般来说, 当一个基底材料表面平整光滑时呈疏水性质, 那么表面的细微结构会进一步增强表面疏水性, 使之变成超疏水性; 反之, 表面则会呈超亲水性. 所以, 表面微细结构就像一个材料表面润湿性的放大器一样, 机理就是基底材料表面的微细结构增加了单位空间内表面积, 放大了表面能量的密度, 使得表面能处于一个被放大的状态(疏水更疏, 亲水更亲).

激光微加工技术能够在航空工业应用的金属表面轻易地加工出尺寸极小的微米级结构, 通过进一步观察可以发现, 在这些微米级结构的表面也会因激光的高能烧蚀作用而产生纳米级的颗粒和小孔, 这两种尺寸组合在一起形成了微纳复合结构. 被激光烧蚀处理过的表面在初始状态下会因其表面吸收了大量的光束能量而具有较高的表面能, 呈现出超亲水状态, 再经过低表面能化处理之后, 基底材料表面即可呈现出超疏水性. 经过脉冲激光加工后的基底材料的机械性能也会得到进一步的增强, 其表面微纳结构的出现也增加了材料表面与空气的接触机会, 这有利于局部散热, 进一步提升发动机的使用寿命. 近年来, 有关激光制造功能性微结构表面来提升产品性能的研究非常丰富, 但是要制备大面积具有满足工程场景需要且有较好机械性能、较长使用寿命的防冰性表面, 在工艺和装备开发上都还存在较大的空间.

3 激光清洗

表面清洗是航空制造和再制造过程中的必要工序, 为质量控制提供了必要的保障, 对航空零部件, 如涡轮叶片、压缩机转鼓等在生产制造、服务保障以及再制造大修的过程必不可少. 航空发动机焊接修复前

需要对焊接区域进行清洗, 若焊接表面不干净可能会导致焊接时产生的高温与表面物质进行化学反应, 从而产生各种不可预料的后果. 又如维修环节中, 常需要去除发动机关键零部件失效热障涂层, 并且要求确保基底不受损伤. 工业中常用的清洗方法包括机械摩擦清洗、热清洗以及化学清洗, 但这些方法都会不可避免地对基底材料造成损伤, 且会危害环境安全. 激光清洗作为一种环境友好的技术被引入到航空发动机的制造与维修中. 航空发动机零部件基底材料及其表面的污染物具有不同的烧蚀阈值, 因此选择合适的激光加工参数, 才能在不损伤基底材料的前提下去除油脂、油漆、残余物或者氧化物. 激光清洗过程中的常见副作用包括表面熔化、应力诱导、相转变以及表面氧化, 因此需选用不同类型的激光器来清洗航空零部件, 要获得较高的清洗效率, 激光的波段应该能被表面污染物层吸收. 污染物的去除效率取决于其消融阈值通量, 这是由物质的反射率、吸收系数和升华焓来确定的, 当物质的吸收能力比较强(例如颜色较暗的物质吸收系数 $>10^5 \text{ cm}^{-1}$), 消融阈值通量通常会比较小. 金属表面的污染物比如灰尘、铁锈, 可以用激光去除, 清洗过程中需要对激光能量、功率以及脉冲宽度进行优化, 为了防止基底材料被打坏, 还可以采用实时监控手段, 例如LIBS (Laser-Induced Breakdown Spectroscopy)方法在激光烧蚀过程产生特征等离子体谱线形成反馈机制, 实时监控来避免表面基底材料受损情况^[38]. 同时, 表面损伤的评估标准亟待建立, 包括形貌和化学组分的变化, 缺陷形成以及材料变形. 激光清洗后, X射线分析因为只检测有限深度的信息, 如果显示峰值信号增强, 则是表面污染物已经被去除, 使得基底的晶体结构暴露在表面, 而如果信号急剧下降, 则是由于部分金属因为熔化产生了无定形.

目前, 激光去除表面污染物主要分为两种情形: 一种是去除颗粒, 另一种是去除污染物层. 在航空发动机制造过程中电子束焊工艺前, 需要用激光来去除表面的污染物. 除去表面的污染物颗粒, 主要是要克服颗粒与基底表面之间的黏结力, 而黏结力是由范德华力、毛细引力以及静电作用引发的. 因此, 黏结力的强度可以由污染物颗粒的大小、物化性质、基底材料和环境介质这几方面来决定. 清洗模型也可以根据范德华力、毛细引力等, 来预测清洗的阈值. Turner等人^[39]用不同的激光器例如 CO_2 , Nd:YAG和Excimer la-

sers, 对有机分子污染物以光化学反应方式去除, 对氧化物颗粒以光热过程方式去除. Guan等人^[40]用Nd:YAG脉冲激光(波长1064 nm, 脉宽43 ns, 重复频率6 kHz)来去除柴油发动机活塞中的炭沉积物. 由此可见, 激光清洗有如下特点: (1) 无机械接触: 传统的机械清洗方法会损伤加工材料的表面, 影响材料的性能, 而激光清洗作为一种无机械接触清洗方式, 可以克服该难点; (2) 实时控制和反馈: 通过CCD相机和探测光可以实时地判断清洗效果; (3) 精确定位: 把激光头放在三维平台, 通过计算机控制, 可以使定位更加准确; (4) 对清洗对象具有可选择性; (5) 对环境无污染, 对人安全.

3.1 不锈钢表面除漆

激光作为高取向性的光束, 在短脉冲持续时间下提供了高密度的光子, 取决于激光强度、脉冲宽度以及表面性质, 能够获得高达 10^{10} W/cm^2 的聚焦功率密度. 以不锈钢的光学和热机械性质为典型案例, 优化匹配激光辐照的加工参数, 如波长、能量密度和脉冲持续时间, 可以产生各种可能的效应, Tam等人^[41]用不同强度和脉宽的激光光束辐照固体(如不锈钢)表面时发现, 当激光能量强度减少1个数量级, 需要增加2个数量级的脉冲持续时间来产生同样的峰值温度. 当温度低于 10°C 时, 表面没有变化, 只有可逆的热弹性效应产生, 一般常用来对材料表面进行光热感应. 在更高的温度如 $10\text{--}1000^\circ\text{C}$, 在 $1\text{--}100 \text{ ns}$ 的脉冲持续时间, 才发生了清洗效应. 如果脉宽太短, 会造成表面的损伤, 对材料表面产生机械损伤、微破碎或者增加孔隙度, 而太长则没有清洗效果. 通过透镜聚焦后, 能在聚焦点产生数千摄氏度甚至数万摄氏度的温度, 使得材料表面迅速熔化, 更高的峰值温度会带来表面材料的熔化和烧蚀.

在先进制造业中, 去除钢材等金属表面的残余油漆是航空发动机全面检修前的必须步骤, 特别是对于精密度要求较高的航空发动机来说, 无损清洗的意义很重要, 激光清洗可以实现可控的油漆去除^[42]. 图5展示了不同功率密度下激光清洗不锈钢表面的光学显微结果, 在最低的激光功率下, 油漆只能被表面粗糙化, 无法被有效去除, 当增加激光功率时, 油漆去除效果开始变得明显, 图中黑色的碎片是残留的油漆, 还包含了由于激光热效应导致的油漆炭化所生成的无定形碳.

激光去除效率可以用被处理的材料表面轮廓进行

图5 (网络版彩图) 漆层厚度为25 μm , 调制不同功率密度的CO₂ slab激光去除钢材表面的油漆^[42]. (a) 11 kW/cm²; (b) 19 kW/cm²; (c) 23 kW/cm²; (d) 30 kW/cm²

Figure 5 (Color online) Paint removed from steel plates using CO₂ slab laser at different laser power densities of (a) 11 kW/cm², (b) 19 kW/cm², (c) 23 kW/cm², (d) 30 kW/cm². Paint film thickness is 25 μm [42].

评价, 在低功率激光作用下, 由于相当部分的目标面积没有得到充分处理, 表面粗糙度较大, 随着功率的增加, 工件表面开始变得平滑, 如图6所示, CO₂ slab激光相比Nd:YAG激光在这个应用场景下效果更好. 为了获得更加明显的去除效率评价, 如图7所示, 采用拉曼光谱对油漆的特征峰1350和1600 cm^{-1} 进行表征, 可以反映出表面油漆的残余量.

另外, 在激光清洗过程中, 研究发现相邻扫描线的重叠率也是影响表面清洗速率的一个重要因素, 通过调控扫描线的数量来控制处理的时间. 研究发现, 如图8所示, 最低的表面粗糙度是在重叠率达50%时得到, 此时功率密度是平顶状分布(Flat-Top Profile). 在其他的重叠率下, 由于相邻扫描线之间的激光功率密度不均匀, 导致产生了更多的碎片, 使得表面更粗糙.

在清洗过程中, 注意到油漆的厚度对表面处理的速率和质量有很重大的影响, 对于较厚的漆层(500 μm), 单次扫描不足以去除油漆, 激光产生的热量只能松化和粗糙油漆表面, 重复扫描可以提升清洗效果, 但也带了油漆炭化、处理时长等新问题, 有时需要用高功率激光去除大部分的油漆材料, 而接着用低功率激光继续去除残留物(如图9).

一般来说, 通过增加激光脉冲的数量和减少激光

图6 漆层厚度为25 μm , 功率密度与清洗效果的关系图^[42]

Figure 6 Power density effect on cleaning results. Paint film thickness is 25 μm [42].

图7 漆层厚度为25 μm , 不同功率密度下清洗的样品的拉曼位移^[42]

Figure 7 Raman shift results of samples processed at different power densities. Paint film thickness is 25 μm [42].

能量可以使激光烧蚀清洗过程更加精细, 或者在保持脉冲数量的情况下提升激光扫描速度也是一种有效的精细化方式. 此外, 通过对羽流温度的在线监测, 发现羽流对激光能量的吸收对能效损耗有很大的影响, 提升激光扫描的速度、缩短脉冲宽度以及增加脉宽间隔时间等方法可以一定程度上降低该效应所造成的负面影响^[43].

3.2 激光清洗中的短脉冲激光和超快激光

与短脉冲(纳秒)激光中离子化的表面层在热或者

图 8 漆层厚度为25 μm , 相邻扫描线的重叠率对清洗效果的影响^[42]

Figure 8 Effect of the overlapping ratio of neighboring scanning lines on cleaning results. Paint film thickness is 25 μm [42].

冲击波传递到下面一层之前就消失的过程不同, 超快(皮秒和飞秒)激光辐照下, 电子和晶格之间没有足够的时间来碰撞交换能量, 因此所吸收的激光能量集中在电子上, 导致电子温度快速上升至几百到几千摄氏度, 而晶格的温度并没有显著的变化. 在这种不平衡下, 受激发的电子可以进一步的离子化, 在激光辐照的表面产生一层薄层的自由基, 在作为屏蔽层的亚微米厚度的表面层中吸收所有的激光能量, 因此与前面纳秒脉冲激光的机理完全不同. 取决于短脉冲激光和超快激光的差异, 分为两种不同的烧蚀类型机理, 前者主要是光热烧蚀, 在激光辐照后, 光能被反射、吸收和穿透. 吸收多个光子后, 目标材料可能受激发, 需

要的激发能量取决于目标物质的光电性质. 在这个过程中, 电子吸收光子能量后碰撞, 将能量传递给晶格, 吸收的能量立刻转化给热而提升局域温度, 导致材料的相变. 结合相变的压缩力(Compressive Force)和表面材料因温升而产生的应力, 烧蚀材料能从表面溅射离开. 这个过程包括了3个阶段: (1) 光的吸收; (2) 热波(Thermal Wave); (3) 电子-晶格松弛. 热影响区的大小取决于目标材料的热性能和激光脉宽, 热烧蚀是一个动态过程, 其中由于温升、机械应力、缺陷产生的材料的物理性能变化会进一步影响材料的能量吸收行为. 而后者超快激光的机理是光化学烧蚀, 是由激光辐照的光子吸收能量打断目标材料的化学键, 从而产生物质随机溅射, 包括团簇、碎片、分子或者离子等物质形态.

3.3 激光清洗技术的分类

根据清洗过程中的介质环境不同, 激光清洗技术可以分为干法清洗、蒸汽法清洗、冲击波清洗. 由于各自机理不同, 如何提升清洗质量和效率都需要投入大量的研究工作.

(1) 干法激光清洗

在干法激光清洗过程中, 表面的污染物被激光辐照后气化溅射离开固体表面, 这个过程中大部分能量被吸收, 另一部分能量被反射. 干法激光清洗方式主要是由于激光诱发的声冲击、光化学和光热引发键断裂或表面烧蚀去除污染物. 污染物中的电子吸收入射激光的能量, 转化成热量, 从而瞬间提高了污染物和固体表面的温度, 短时间内的光热过程造成污染物颗粒和固体表面的快速热膨胀, 引发污染物的离子化从

图 9 (网络版彩图)漆层厚度为500 μm , 用 CO_2 slab激光去除钢板表面的厚油漆^[42]. (a) 单次扫描; (b) 重复扫描5次; (c) 优化的重复扫描3次, 由2次高功率密度扫描加1次低功率密度扫描

Figure 9 (Color online) Thick paint stripped from steel plates using a CO_2 slab laser. (a) Single scan; (b) repetitive scan at 5 times; (c) optimized repetitive scan at 3 times with blast-and-clear method: two high power density scans followed by a low power density scan. Paint film thickness is 500 μm [42].

而克服颗粒和固体表面之间的黏结力^[44]. 随着污染物的离子化, 产生了包含着高能物质的等离子体羽流, 快速膨胀的等离子体诱发了冲击波, 并沿着目标样品传递, 造成样品的振动, 从而将动能传递给碎片, 使得碎片以高速从表面溅射离开.

干法激光清洗的过程机制可以用两种模型来解释, 一种是1D模型, 另一种是3D模型. 1D模型假设物质不影响激光强度的分布, 提供了一种当污染物颗粒远大于入射光波长时对干法清洗过程的定性认识, 但是当污染物颗粒尺寸逐渐减小时, 该方法对机制过程的解释表现出很大的局限性, 一些改进型的1D模型还可以将弹性形变和脉冲形状等影响因素考虑在内^[45]. 1D模型的缺点是往往会和试验得出的清洗阈值产生1-2个数量级的误差. 当颗粒尺寸与波长处于同一数量级时, 入射光的散射会极大地改变激光强度的分布. 当颗粒尺寸远大于入射激光波长 λ 时, 入射光与颗粒相互作用后产生的聚光效应, 或者当颗粒尺寸小于入射光波长 λ 时的Mie散射理论, 都会对颗粒附近的电磁场分布产生很大的影响. 同时, 局域场强增强会造成局部温升, 导致局部的3D热膨胀, 相关的模型已经在有关文献中报道^[46,47].

在去除污染物层的情形下, 干法激光清洗可以传递衰减抑制能量(Dissipate Suppression Energy)到污染物层中, 从而引发热膨胀, 污染物的去除厚度由热传导的深度($l_T = 2\sqrt{D\tau}$, D 是热传导率, τ 是脉宽)和光穿透深度之中较大的决定. 由于脉冲激光烧蚀的局域热影响区优势, 在去除污染物时, 可以在亚微米水平准确地控制污染层的去除厚度. 大多数的情形下, 基底烧蚀的能量阈值一般大于清洗的能量阈值, 可以保障基底材料基本不受损. 通过进一步优化激光的加工参数, 尤其是激光的波长、脉宽等, 可以达到更好的清洗效果, 污染层的去除往往会造成基底表面的物理或者化学表面修饰. Maharja等人^[48]用飞秒激光对镍基合金的涡轮叶片表面污染层进行了去除. 有时为了降低基底受损概率, 也会采用离焦加工方法.

(2) 蒸汽激光清洗

蒸汽激光清洗是基于覆盖在基底表面的一层液体的辅助加工下开发的清洗技术. 在一层薄层液体(通常是与10%乙醇或异丙醇混合以增强润湿的水)的环境下, 激光诱导了固液界面的过热效应, 造成液体层的爆炸式蒸发, 从而引发了克服黏结力的剥离力, 这种模式

对于去除微米至亚微米范围内的微粒非常有效, 它也可以去除污染物膜. 在这种模式下, 物体表面迅速升温, 沉积在物体表面上的毫米厚液膜快速蒸发, 在固液分界面产生的强声压脉冲能够有效去除颗粒.

蒸汽激光清洗比较适用于基底表面容易被破坏, 或者污染物容易熔化, 或者与基底材料发生化学反应生成合金等情形. 其原理是在激光辐照下, 液体沸腾蒸发产生的动量被转移至污染物颗粒, 从而实现清洗. 一般说来, 液体膜的厚度在几个到几十个微米左右, 由水和10%-20%的酒精混合而成. 基于热扩散距离(Thermal Diffusion Length), 可以量化激光辐照的能量在基底材料和液体膜中的热扩散距离, 较长的热扩散距离会造成两者之间界面上能量积聚, 足以引发液体的过热和沸腾. 同时, 热扩散距离还和激光的脉冲宽度有关. 理论上, 更短的脉宽会造成更短的热扩散距离, 这意味着在热损耗范围里要产生液体蒸发所需的能量更少, 这表明同等条件下, 缩短脉冲宽度可以在界面上产生更强的过热效应, 从而带来更强的沸腾压力, 这可以进一步清洗效率的提升, 但同时也应该密切监测其对基底表面材料的损伤程度情况, 并非是一味地缩短脉宽. Park等人^[49]报道了在表面的压力一般是506625-1013250 Pa, 足以给微米级颗粒提供足够的加速度(10^{10} - 10^{11} m/s²), 克服基底材料和污染物颗粒的黏结力, 如图10所示, 根据不同激光波长波段的吸收情况, 有以下3种不同的情形.

界面沸腾(Interface Boiling): 如果用248 nm的紫外激光进行清洗, 水对其能量的吸收很少, 入射光能量主要被基底材料吸收, 热扩散距离由脉冲宽度和热扩散系数来决定, 考虑到对基底表面可能造成的损伤, 对脉冲宽度会设置一个下限, 而上限的存在则是考虑到了液体膜的过热效应情况.

液相表面沸腾(Liquid Surface Boiling): 如果使用1064 nm的红外激光时, 液体膜和基底均吸收了部分能量, 由于界面的激光能量密度较低, 这种情形往往需要很高的辐照能量去除颗粒.

全液体薄膜沸腾(Whole Liquid Film Boiling): 当使用波长为2.94 μ m的激光时, 液体温度容易升高至沸点, 实际上这种情况并不是很有利于激光清洗, 当全液体薄膜沸腾时, 峰值温度处于液体薄膜表面的最上方, 但是沸腾只会在温度达到临界点时才发生, 从而才产生较高的瞬时压力去剥离掉污染物颗粒. 相比之下,

图 10 (网络版彩图)蒸汽激光清洗的简化示意图^[50]. (a) 界面沸腾; (b) 液相表面沸腾; (c) 全液体薄膜沸腾

Figure 10 (Color online) Simplified schematic of steam laser cleaning. (a) Interface boiling; (b) liquid surface boiling; (c) whole liquid film boiling [50].

界面沸腾模式下的清洗更有效率.

Tam等人^[51]提供了一种预估蒸汽激光清洗中能量阈值的方法, 当温度升高到临界温度时, 会造成基底表面的损伤. 在蒸汽激光清洗中, 由于液体黏度所带来界面边界层会对其造成限制, 因此湿法激光清洗的开发结合了干法激光清洗和蒸汽激光清洗的优势, 与蒸汽浓缩不同, 该方法中的水膜可以由大气中的水蒸汽浓缩而成, 这通过冷却表面温度至露点(Dew Point)以下即可实现, 在湿法清洗中基底通常被浸没在RH>95%的环境中. 这种方法对界面沸腾的水膜与污染物颗粒质量相当的情形很有优势, 其清洗阈值也低于干法清洗.

(3) 冲击波激光清洗

与干法激光清洗不同, 冲击波激光清洗作为一种非接触式的清洗方式, 往往会伴随着空气和水的裂解现象发生. 聚焦的脉冲激光会造成快速的局部温升和空气的介电裂解, 高温高压的等离子体迅速衰减, 导致冲击波的产生, 并伴随着大量的空气旋涡(Air Cores). 强烈的冲击波造成了复杂的压力波场, 并与基底表面和污染物颗粒相互作用, 产生了克服表面基底上污染物与基底之间黏结作用的去除力^[52]. Lim和Kim^[53]通过光学检测技术对冲击波清洗过程进行了监测诊断, 使得等离子体羽流的快速膨胀和冲击波的产生得以清晰展示. 研究发现约65%的激光能量转化成了冲击波的动能, 一旦冲击波的速度可以量化, 压力、密度和温度就可以通过公式计算出来.

3.4 激光清洗效率的量化表征分析及优化

第一种方法用一种客制化设计的高分辨率显微系统, 加上先进的图像处理软件, 对清洗前后进行量化分析. 然而, 当激光参数, 如能量发生变化时, 这种方法只能表达出单脉冲激光去除表面一定范围污染物时的效果, 而无法体现出清洗的效果, 因此用清洗前后颗粒密

度百分比的变化与激光能量之间的关系来表达清洗效率, 在这种情形之下, 一个方形的ROI (Region of Interest)被特别指定, 由于清洗过程中反射和散射的原因, 污染物的密度和空间分布都会影响激光能量的吸收.

第二种方法是激光诱导等离子体光谱(Laser Induced Plasma Spectroscopy, LIPS)方法. 通过与SEM-EDX的结合, 可以实现实时监测, 避免清洗损伤的发生, 这种方法的原理主要是基于清洗烧蚀过程中产生溅射的等离子体的元素谱分析.

第三种方法是通过光散射法来测量表面颗粒的浓度. 由于基底表面的污染物主要由独立的颗粒组成, 且与形貌无关. 探测激光束对远小于清洗面积的100 μm 量级的范围进行扫描, 以确保监测范围是均一化的激光辐照区域, 同时辐照面积应该足以覆盖全范围浓度的大量颗粒, 来尽可能降低统计误差.

影响激光清洗效率的因素主要有激光能量、激光波长、污染物颗粒尺寸形貌和材料种类. 另外, 研究还发现激光清洗的能量阈值与污染物颗粒的尺寸和材料种类无直接关联.

此外, 在冲击波清洗中, 激光诱发等离子体的过程中(Laser-Induced Plasma Process, LIP)采用几何形状的限制, 例如平板墙、柱状筒灯, 可以进一步增强冲击波的强度^[54]. 在圆柱形的冲击波管中产生的LIP可以输出近平面冲击波, 而且在管道的出口处只有很少的衍射, 相比于球面冲击波的能量衰减降低, 导致强度显著增强的冲击波^[55]. 还有用液体薄膜覆盖的方式来进行冲击波清洗, 增强清洗效率^[56]. 此外, 用外电压施加在氧化的铁表面来改变光吸收系数, 也可以增强清洗效率^[57].

3.5 激光清洗的表面损伤评价

为了提升航空发动机零部件的清洗效率, 往往会

增加激光能量, 有超过阈值的可能性, 因此清洗后表面损伤的评价十分重要. 损伤带来表面形貌、化学组成变化、缺陷产生和材料变形等结果, 导致零部件的报废. 有些情况下, 损伤不是因为热膨胀造成的, 而是在激光去除污染物的过程中导致的碎裂和剥离, 所造成的损伤, 使表面产生新的晶面. 为了监测和评价表面的损伤, 更是为了早期预防损伤的发生, 研究人员开发了不同的测量系统.

第一种方法是声波探测. 在激光清洗过程中, 从表面传出的声波带着表面状态的信息, 基本的原理是用工作和参考的声波对比来判定表面损伤. 在表面受损的情况下, 初始的声波强度和随着时间变化的声波强度可以提供表面是否受损的信息, 通过开发专家型的人工智能系统, 可以有效防止表面受损^[58].

第二种方法是空中颗粒计数感应器. 空气压缩机将清洗样品的环境空气抽入到压缩箱中, 然后用二极管光源照射, 与颗粒相互作用发生散射, 用光二极管收集散射光信息, 转变为电信号, 脉冲的高度与颗粒尺寸成正比, 脉冲的个数用微处理器进行计数, 这个方法比较适用于不产生大颗粒的情形.

4 其他激光微加工技术

4.1 增材制造

(1) 激光熔融沉积技术

激光增材制造技术以激光为能量源, 基于光束的高能量密度, 实现难加工金属的制造以及高熔点材料的熔覆等. 在航空领域中, 许多结构复杂且精度要求相对较高的部件, 如发动机整体叶盘、叶片以及飞机管道等大型零部件. 传统的方法无法制造出有较好弧形或多孔结构的工件, 对于这类型部件可采用激光熔融沉积技术, 该沉积技术效率高, 几乎不受尺寸限制, 并且工艺指标优于传统锻造. 激光熔融沉积技术作为激光金属增材制造技术的一种典型工艺, 是将增材制造的“叠层累加”原理和激光熔覆技术有机结合, 以金属粉末为加工原料, 通过“激光熔化-快速凝固”逐层沉积, 从而形成金属零部件的制造技术. 利用激光的高能量使得金属材料粉末和基材发生熔化, 在基材上形成熔池, 熔化的粉末在熔池上方沉积, 冷却凝固后在基材表面形成熔覆层. 根据成形件CAD模型的分层切片信息, 运动控制系统控制X和Y工作台、Z轴上的激

光头和送粉喷嘴的运动, 逐点、逐线、逐层形成具有一定高度和宽度的金属层, 喷射出的粉末颗粒逐层熔融固化成组分, 薄壁采用单道方式, 厚壁采用多道方式, 最终成形为整个金属零件.

由于航空发动机的零部件多处于极限环境, 大多部件金属材料的失效(诸如腐蚀、磨损、疲劳等)发生在零部件的工作表面, 从而影响了服役性能. 传统制造中为满足工件的服役条件而采用大块的原位自生颗粒增强钢铁基复合材料制造, 造成了材料的浪费, 提升了制造的成本. 同时, 受到天然生物材料结构的启发, 其外密内疏、外硬内韧、呈梯度式变化的特殊结构带来优异的性能, 为开发强韧结合、性能梯度变化的新型表层金属基复合材料提供了思路. 在航空发动机零部件制造的轻量化中, 多孔金属泡沫材料由于其独特的性能, 如隔声、吸收冲击波、电磁屏蔽等, 受到了广泛关注. 例如, 钛基金属泡沫在服役中表现出了很高的强度和抗腐蚀性. 在生产制造过程中, 与传统的制造技术相比, 增材制造无需特定的模具和锻造工艺, 可以生产任何形状的多孔材料^[59]. 例如, 在Ti6Al4V和Inconel 718等合金的制备中, 通过对微结构演化的分析和工艺调控, 可以进一步优化机械性能^[60,61]. Ahsan等人^[62]将气体雾化Ti6Al4V粉末与316 L不锈钢粉末混合, 在激光直接金属沉积过程中改变激光轨迹间距, 基于这种方法, 他们能够制造出孔隙率为25%的多孔结构金属件. Qu等人^[63]利用激光熔融沉积技术, 制备出力学性能优异的钛铝二元合金梯度材料, 该实验技术为航空发动机涡轮叶片和涡轮盘的制造提供了新方向. 在激光熔融沉积制造钛合金过程中, 熔池对先前沉积层的热效应以及对最终微观结构的形成起着重要作用. Zhu等人^[64]对沉积层的显微组织进行了深入研究, 发现, 两个热影响带之间的微观结构梯度是由于 $\alpha+\beta$ 区域的再加热效应. 层间带的形成是由于层间带内部和之间的化学组成均匀化差异, 这是由过热效应引起的. 由于大温度梯度和快速凝固过程中, 激光熔融沉积制造钛合金通常表现为大柱状 β 与超细颗粒方平组织的微观结构.

(2) 激光熔覆

激光熔覆是利用垂直于基层表面的扫描激光束熔化涂层材料和基板的薄层, 由于在基底上的材料累积, 熔体的快速凝固导致涂层的形成(图11).

在两步激光熔覆中, 涂层材料(可以是粉末、箔、

图 11 激光熔覆
Figure 11 Laser cladding.

线和热喷涂等形式)预先沉积在基板上并与激光束熔化以形成涂层。在单步包覆中,将材料作为粉末、糊剂或线材注入由激光束产生的熔池中,并熔化以形成涂层。进料速率必须足够高,以在基材上形成涂层材料的覆盖层。激光辐射对材料的影响主要取决于功率密度。此外,激光熔覆要求熔化0.1–1 mm厚的材料表面层,同时避免蒸发,这些要求限制了处理参数的范围以及可以使用的激光类型。激光加工参数的选择会影响激光处理材料的微观结构和性能。选用适当的加工参数,当激光束扫描表面时,产生熔池并沿着基板移动。一旦激光照射停止,由于向主体的热传递而发生快速冷却,并且在熔池底部开始凝固。凝固前沿以一定速度朝向表面快速前进,该速度取决于激光束扫描速度和熔池的深度和形状。由于在激光熔覆中实现了高凝固速率,所得到的微观结构很好并且经常包含非平衡相和过饱和固溶体^[65,66]。Mazumder等人^[67]还从传热传质以及非平衡态角度,建立了用于预测非平衡相图的数学模型,得到了工艺参数和最终合金组分的规律关系。基于对非平衡态合金微结构的分析,通过实验制备了耐高温、耐腐蚀的合金工件。Rottwinkel等人^[68]对镍基高温合金CMSX-4的裂纹和划痕修复做了研究,利用ANSYS模拟温度梯度来引导熔覆材料的固化过程,从而能获得单晶微结构,通过结合激光熔覆技术和重熔化来实现航空发动机单晶叶片前缘和后缘的修复。

(3) 激光选区熔化技术

激光选区熔化技术根据成形件的三维CAD模型的分层切片信息,扫描振镜控制激光束作用于成形缸

内的粉末,一层扫描完毕后,活塞缸内的活塞下降一个层厚距离,接着送粉缸上升一个层厚的距离,铺粉系统的辊筒铺展一层厚的粉末沉积于已成形层之上。然后重复上述两个成形过程,直至所有三维CAD模型的切片层全部扫描完毕。这样,三维CAD模型经逐层累积方式可直接成形金属零件。可直接制成终端金属产品,省掉中间众多过渡环节。该方法制备的金属零件具有很高的尺寸精度及较好表面质量(Ra 为10–30 μm),适合各种复杂形状的工件,尤其适合内部有复杂异型结构、用传统方法无法制造的复杂工件,此外还适合单件和小批量复杂结构件无模、快速响应制造。通过激光选区熔化技术的制造方法,工艺参数直接影响显微组织的演化,例如Thijs等人^[69]利用激光选区熔化技术制造出AlSi10Mg合金材料,实验结果表明激光选区熔化过程中产生的高热梯度导致了亚微米级细胞的微结构。因此,即使不进行沉淀硬化处理,激光选区熔化制造的产品硬度也非常高。

激光选区熔化技术具有以下几个特点:(1)成形原料一般为一种金属粉末,主要包括不锈钢、镍基高温合金、钛合金、钴铬合金、高强铝合金以及贵金属等;(2)采用细微聚焦光斑的激光束成形金属零件,成形的零件精度较高,表面稍经打磨、喷砂等简单后处理即可达到使用精度要求;(3)成形零件的力学性能良好,一般拉伸性能可超铸件,达到锻件水平。

4.2 表面冲击强化

航空发动机热端部件的主要材料为高温合金(Super alloy),随着发动机引擎性能的提升,高温合金的服役性能面临更苛刻的要求。一般来说,航空发动机的表面防护可以通过表面涂覆来实现,例如航空发动机涡轮叶片高温防护涂层技术。但这类技术不仅给零部件增加了额外的重量,而且在极限环境下始终存在着剥落的风险,因此发动机零部件表面强化技术得到关注。此外,航空发动机上的传动部分在强化处理方面的需求较大,如航空发动机叶片在转子高速旋转带动以及强气流的扰动下,面临着拉伸、弯曲和振动等各种形式的机械载荷,其中进气端的压气机叶片或前风扇叶片会受到随气流导入的异物撞击后严重受损,造成航空发动机停车失效。受到异物碰撞后,很容易在叶片的前后边缘局部形成变形和裂纹,甚至是缺口,导致应力集中,发展成为破坏源,降低叶片的安全使

使用寿命. 激光冲击强化(Laser Shock Processing or Laser Shock Peening, LSP)是一种高效的表面强化技术, 利用激光冲击波的力学效应, 在金属材料表层形成大数值残余压应力和微观组织变化, 显著提高其疲劳强度和寿命, 大幅度改善金属材料的服役性能. 激光冲击强化很适用于壁薄且型面复杂的结构, 是解决航空发动机传动部件疲劳失效问题的有效手段^[70]. 航空发动机叶片也采用强化处理后可以延迟裂纹的萌生, 提高叶片的使用寿命.

基于强激光诱导的冲击波来强化金属的表面强度, 激光表面冲击具有非接触强化的特点, 可以更显著降低表面强烈塑性变形所导致的粗糙度变化. 激光冲击强化技术的原理如图12所示, 通过表面塑性变形的方式来实现强化目的, 在塑性变形过程中, 工件表面形态改变, 残余压应力层被引入材料内部一定深度, 使得金属或合金的显微组织发生变化, 强化效果主要从材料表面形貌、显微组织以及服役性能等方面进行表征. 高峰值功率密度(GW/cm^2)的短脉冲激光作用于被强化金属表面的能量吸收涂层时, 涂层吸收激光辐照能量, 引起材料温度升高, 涂层内发生爆炸性汽化, 形成高密度的高温($>10^4 \text{ K}$)和高压($>1 \text{ GPa}$)的等离子体, 该等离子体继续吸收激光能量后进一步急剧升温, 膨胀形成高压冲击波(GPa)作用于金属表面并向材料内部传播. 高振幅残余应力是LSP改善材料性能的主

要机制之一. 在发动机叶片的高阶模式中经常发生中平面的拉伸, 残余应力和中平面拉伸之间的相互作用则会导致模态刚度的变化. 通过有限元方法来对激光冲击强化对工件(比如叶片)模态刚度和航空发动机传动部分(比如齿轮)疲劳寿命的影响进行机理研究.

4.3 焊接和切割

由于航空发动机零部件必须经受高温、高压和高转速等严格的工作环境, 一旦久用之后会出现各种损伤而无法正常使用, 如变形、磨损、开裂等情况, 如果重新制造更换零件将造成巨大经济和时间损失, 因此可以采用焊接来对其进行修复, 以实现受损零件的再利用. 在航空发动机的焊接技术中, 有电子束焊接、钎焊及真空钎焊、摩擦焊、氩弧焊、扩散焊以及焊接模拟仿真等技术, 与以上焊接修复技术相比较, 激光加工具有本体变形小、热影响小、修复性能几乎无损失等特点, 激光深熔焊接时, 金属材料对激光的吸收可以高达80%以上, 焊接效率得到显著提升, 因此深熔焊接是比较理想的焊接状态. 尽管激光焊接应力比氩弧焊应力小得多, 但激光焊接接头仍然存在一定的残余应力, 也需要经过一定的焊后处理, 可用超声冲击焊缝消除应力.

Wang等人^[72]研究了环形光束振荡激光焊接AA6061铝合金时, 振荡直径和振荡频率对焊缝表面和横截面形貌的影响. Hao等人^[73]研究了激光光束振动参数对焊缝形貌的影响, 确定了将焊接从小孔模式转换为不稳定模式焊接速度阈值为 24 m/min , 从不稳定模式转换为热传导模式的焊接速度阈值为 48 m/min . Benyounis等人^[74]建立了预测热输入和焊缝几何尺寸的线性二次多项式方程, 提出的模型能够在所使用的焊接参数范围内有效, 回归方程可用于寻找符合要求的最佳焊接条件. Tao等人^[75]采用填充丝双面光纤激光束焊接技术制备了飞机机身壁板用铝合金T形接头, 并研究送丝姿态对焊接过程稳定性的影响.

在激光焊接中, 目前研究中已有几种焊接技术: (1) 激光电弧复合焊接技术将物理性质、能量传输机制截然不同的两种热源复合在一起, 同时作用于同一加工位置, 既充分发挥了两种热源各自的优点, 又相互弥补了各自的不足, 从而形成一种全新高效的热源; (2) 高能束流焊接技术是指利用高能束流轰击焊件接缝所产生的热量, 迅速熔化金属而完成焊接的熔焊方

图 12 (网络版彩图)激光冲击强化过程原理图^[71]

Figure 12 (Color online) Schematic diagram of LSP process ^[71].

法, 其在满足飞行器关键构件大减重、长寿命、高可靠和低成本等方面独具优势, 对航空产品的发展起到了重要的促进作用; (3) 双光束激光焊接技术. 为解决常规单光束激光焊存在的局限性, 将单光束激光分离成两束激光, 通过改变两束激光能量配比、光束间距、排布方式, 对激光焊接温度场、流动场进行灵活调节, 改变熔池的流动方式, 提高单激光焊的工艺适应性, 为激光焊接工艺提供更加广阔的选择空间.

此外, 切割在航空发动机制造中也起到了重要的作用, 切割对象包括涡扇发动机内外壳体叶型孔、扇形叶型板、隔热屏及化铣零件等, 从进气道到尾喷口的各零部件都有可能需要面临切割工艺. 激光切割的应用解决了航空发动机难加工材料的切割、大型薄壁件群孔高效加工、零件叶型孔高精度切割、特种表面零件加工等一系列难题. 为了解决激光切割在结构钢、不锈钢零件上产生的切割痕迹、挂渣严重及缺口等一系列问题, 通过要对起刀方式、所用气体、气体压力、切割功率、切割速度及焦点高度等因素进行优化. Galushkin和Grishaev^[76]还根据气体激光切割过程中工艺参数的动态匹配条件, 确定了光束利用率对切割速度和光束功率的依赖关系.

5 结语

在航空发动机的MRO过程中面临着复杂的技术需求, 本文以激光微加工作为精密制造手段为例, 围绕航空发动机运行时对各部件的物化性能要求, 以激光微加工的物理机制为牵引, 介绍了其在航空发动机

MRO中的一些应用, 为航空发动机的保障工具装备开发带来了新思路, 为发动机主要失效模式(故障导向)和基础物理研究(技术牵引)的联动提供了一个较好的案例. 展望未来, 随着航空发动机的形状越来越复杂, 激光微加工的推广依然面临着亟待解决的挑战. 例如, 航空发动机中的冷却孔加工会随着发动机性能提升的要求而变得越来越复杂, 经常需要在中空结构的涡轮叶片上制备小孔阵列, 为防止击穿空腔, 往往会在加工之前向空腔中注入作为激光阻隔材料(Laser Barrier Materials)的蜡或者PTFE负载的蜡. 此外, 为了保障加工的孔槽质量, 光学传感器、同步照相机、声波探测器以及磁流探测等实时监测手段会被用来对孔加工过程进行实时监控, 以精密地控制激光打孔的给进程度. 同时, 越低角度的扩散冷却孔表面, 产生同样的冷却效果需要的冷却空气越少, 如果几何形状允许, 未来的设计里角度可能低至 10° 左右, 激光光束能以非常低的进入角度对孔穴进行微加工, 为该设计提供了实现的可能. 通过提升激光功率或者改进激光束的质量来克服进入角度的降低所造成的功率密度降低, 开发多轴的激光加工设备来实现加工. 与此同时, 要注意到加工角度的降低也可能会加剧隔热涂层的剥落. 另外, 激光微加工效率在大规模生产维修上也是一个重要的考虑因素. 以上的展望思考也是基础研究技术向行业需求转化时都或多或少会遇到的挑战, 以问题需求为导向, 以学科特点为牵引, 从流程管理、关键要素提取、核心技术开发以及工程技术验证的角度, 输入服务保障的技术支持需求, 输出基础研究的新成果, 促进我国航空发动机MRO支持技术的快速发展和先进引领.

致谢 向评审人和参与本文讨论的中国航空发动机集团生产部同事表示感谢, 特别是王健明先生、张晓冬先生为本文内容提供了诸多有益的建议意见.

参考文献

- 1 Wang Z Y, Ding S T, Li G. Failure risk control for aeroengine turbine disks based on active thermal management. *Appl Thermal Eng*, 2017, 120: 367–377
- 2 Zhou Z H, Yi X, Gui Y W, et al. Study on the heat transfer characteristics in aircraft icing. *Procedia Eng*, 2015, 99: 671–676
- 3 Cao Y H, Tan W Y, Wu Z L. Aircraft icing: An ongoing threat to aviation safety. *Aerospace Sci Tech*, 2018, 75: 353–385
- 4 He H D, Qu N S, Zeng Y B. Lotus-leaf-like microstructures on tungsten surface induced by one-step nanosecond laser irradiation. *Surf Coat Tech*, 2016, 307: 898–907

- 5 Marimuthu S, Clark D, Allen J, et al. Finite element modelling of substrate thermal distortion in direct laser additive manufacture of an aero-engine component. *P I Mech Eng C-J Mech Eng Sci*, 2013, 227: 1987–1999
- 6 Momma C, Nolte S, Chichkov B N, et al. Precise laser ablation with ultrashort pulses. *Appl Surf Sci*, 1997, 109-110: 15–19
- 7 Zhou R, Li F P, Hong M H. Laser interaction with materials and its applications in precision engineering (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2017, 47: 024201 [周锐, 李峰平, 洪明辉. 激光与物质相互作用及其精密工程应用. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2017, 47: 024201]
- 8 McNally C A, Folkes J, Pashby I R. Laser drilling of cooling holes in aeroengines: State of the art and future challenges. *Mater Sci Tech*, 2004, 20: 805–813
- 9 Yilbas B S, Yilbas Z, Akcakoyun N. Investigation into absorption of the incident laser beam during Nd:YAG laser processing of metals. *Opt Laser Tech*, 1996, 28: 503–511
- 10 Naslain R. Design, preparation and properties of non-oxide CMCs for application in engines and nuclear reactors: An overview. *Compos Sci Tech*, 2004, 64: 155–170
- 11 Rosso M. Ceramic and metal matrix composites: Routes and properties. *J Mater Process Tech*, 2006, 175: 364–375
- 12 Wang C H, Zhang L T, Liu Y S, et al. Ultra-short pulse laser deep drilling of C/SiC composites in air. *Appl Phys A*, 2013, 111: 1213–1219
- 13 Antar M, Chantzis D, Marimuthu S, et al. High speed EDM and laser drilling of aerospace alloys. *Procedia CIRP*, 2016, 42: 526–531
- 14 Low D K Y, Li L, Byrd P J. Spatter removal characteristics and spatter prevention during laser percussion drilling of aerospace alloys. *J Laser Appl*, 2001, 13: 70–78
- 15 Yeo C Y, Tam S C, Jana S, et al. A technical review of the laser drilling of aerospace materials. *J Mater Process Tech*, 1994, 42: 15–49
- 16 Low D K Y, Li L, Byrd P J. The influence of temporal pulse train modulation during laser percussion drilling. *Opt Lasers Eng*, 2001, 35: 149–164
- 17 Roos S O. Laser drilling with different pulse shapes. *J Appl Phys*, 1980, 51: 5061–5063
- 18 Zhou R, Lin S D, Ding Y, et al. Enhancement of laser ablation via interacting spatial double-pulse effect. *Opto-Electron Adv*, 2018, 1: 18001401–18001406
- 19 Low D K Y, Li L, Corfe A G. Effects of assist gas on the physical characteristics of spatter during laser percussion drilling of NIMONIC 263 alloy. *Appl Surf Sci*, 2000, 154-155: 689–695
- 20 Murray A J, Tyrer J R. Nd:YAG laser cutting and drilling of PSTZ—Influence of substrate heating temperature on recast layer microcracking. *J Laser Appl*, 1999, 11: 128–135
- 21 Kruusing A. Underwater and water-assisted laser processing: Part 1—General features, steam cleaning and shock processing. *Opt Lasers Eng*, 2004, 41: 307–327
- 22 Kruusing A. Underwater and water-assisted laser processing: Part 2—Etching, cutting and rarely used methods. *Opt Lasers Eng*, 2004, 41: 329–352
- 23 Song W D, Hong M H, Lukyanchuk B, et al. Laser-induced cavitation bubbles for cleaning of solid surfaces. *J Appl Phys*, 2004, 95: 2952–2956
- 24 Murray A J, Tyrer J R. Nd:YAG laser drilling of 8.3 mm thick partially stabilized tetragonal zirconia-control of recast layer microcracking using localized heating techniques. *J Laser Appl*, 1999, 11: 179–184
- 25 Lau W S, Yue T M, Wang M. Ultrasonic-aided laser drilling of aluminium-based metal matrix composites. *CIRP Ann*, 1994, 43: 177–180
- 26 Li L, Achara C. Chemical assisted laser machining for the minimisation of recast and heat affected zone. *CIRP Ann*, 2004, 53: 175–178
- 27 Zhang H, Xu J W. Laser drilling assisted with jet electrochemical machining for the minimization of recast and spatter. *Int J Adv Manuf Technol*, 2012, 62: 1055–1062
- 28 Freborg A M, Ferguson B L, Brindley W J, et al. Modeling oxidation induced stresses in thermal barrier coatings. *Mater Sci Eng-A*, 1998, 245: 182–190
- 29 Kamalu J, Byrd P, Pitman A. Variable angle laser drilling of thermal barrier coated nimonic. *J Mater Process Tech*, 2002, 122: 355–362
- 30 Sun J Y, Bhushan B. Nanomanufacturing of bioinspired surfaces. *Tribol Int*, 2019, 129: 67–74
- 31 Xu T, Faulhaber S, Mercer C, et al. Observations and analyses of failure mechanisms in thermal barrier systems with two phase bond coats based on NiCoCrAlY. *Acta Mater*, 2004, 52: 1439–1450
- 32 Bechert D W, Bruse M, Hage W. Experiments with three-dimensional riblets as an idealized model of shark skin. *Exp Fluids*, 2000, 28: 403–412
- 33 Naraparaju R, Schulz U, Büttner C C. High temperature oxidation stability of aerodynamically optimised riblets for blades of aero-engine applications. *Oxid Met*, 2015, 83: 133–150
- 34 Büttner C C, Schulz U. Shark skin inspired riblet structures as aerodynamically optimized high temperature coatings for blades of aeroengines.

- [Smart Mater Struct](#), 2011, 20: 094016
- 35 Nguyen T B, Park S, Lim H. Effects of morphology parameters on anti-icing performance in superhydrophobic surfaces. [Appl Surf Sci](#), 2018, 435: 585–591
- 36 Zhang H Y, Yang Y L, Pan J F, et al. Compare study between icephobicity and superhydrophobicity. [Physica B](#), 2019, 556: 118–130
- 37 Liu Y, Li X, Yan Y, et al. Anti-icing performance of superhydrophobic aluminum alloy surface and its rebounding mechanism of droplet under super-cold conditions. [Surf Coat Tech](#), 2017, 331: 7–14
- 38 Rusak D A, Castle B C, Smith B W, et al. Fundamentals and applications of laser-induced breakdown spectroscopy. [Critical Rev Anal Chem](#), 1997, 27: 257–290
- 39 Turner M W, Schmidt M J J, Li L. Preliminary study into the effects of YAG laser processing of titanium 6Al-4V alloy for potential aerospace component cleaning application. [Appl Surf Sci](#), 2005, 247: 623–630
- 40 Guan Y C, Ng G K L, Zheng H Y, et al. Laser surface cleaning of carbonaceous deposits on diesel engine piston. [Appl Surf Sci](#), 2013, 270: 526–530
- 41 Tam A C, Park H K, Grigoropoulos C P. Laser cleaning of surface contaminants. [Appl Surf Sci](#), 1998, 127-129: 721–725
- 42 Chen G X, Kwee T J, Tan K P, et al. Laser cleaning of steel for paint removal. [Appl Phys A](#), 2010, 101: 249–253
- 43 Madhukar Y K, Mullick S, Shukla D K, et al. Effect of laser operating mode in paint removal with a fiber laser. [Appl Surf Sci](#), 2013, 264: 892–901
- 44 Lu Y F, Song W D, Ye K D, et al. Removal of submicron particles from nickel-phosphorus surfaces by pulsed laser irradiation. [Appl Surf Sci](#), 1997, 120: 317–322
- 45 Bäuerle D. *Laser Processing and Chemistry*. Cham: Springer, 2000. 291–292
- 46 Arnold N. Theoretical description of dry laser cleaning. [Appl Surf Sci](#), 2003, 208-209: 15–22
- 47 Luk'yanchuk B S, Wang Z B, Song W D, et al. Erratum to: Particle on surface: 3D-effects in dry laser cleaning. [Appl Phys A](#), 2005, 81: 1329
- 48 Maharja N, Zhou W, Zhou Y, et al. Femtosecond laser cleaning for aerospace manufacturing and remanufacturing. In: 2017 Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim (CLEO-PR). Singapore, 2017
- 49 Park H K, Kim D, Grigoropoulos C P, et al. Pressure generation and measurement in the rapid vaporization of water on a pulsed-laser-heated surface. [J Appl Phys](#), 1996, 80: 4072–4081
- 50 Zhou R, Hong M H. *Handbook of Laser Micro- and Nano-Engineering: Laser Cleaning of Contaminated Substrate Surfaces*. Berlin: Springer Nature, 2019
- 51 Tam A C, Leung W P, Zapka W, et al. Laser-cleaning techniques for removal of surface particulates. [J Appl Phys](#), 1992, 71: 3515–3523
- 52 Zhang C L, Li X B, Wang Z G, et al. Laser cleaning techniques for removing surface particulate contaminants on sol-gel SiO₂ films. [Chin Phys Lett](#), 2011, 28: 074205
- 53 Lim H, Kim D. Optical diagnostics for particle-cleaning process utilizing laser-induced shockwave. [Appl Phys A](#), 2004, 79: 965–968
- 54 Jang D, Oh J H, Lee J M, et al. Enhanced efficiency of laser shock cleaning process by geometrical confinement of laser-induced plasma. [J Appl Phys](#), 2009, 106: 014913
- 55 Dunbar T, Maynard B, Thomas D A, et al. Pressure amplification of laser induced plasma shockwaves with shock tubes for nanoparticle removal. [J Adhes Sci Tech](#), 2007, 21: 67–80
- 56 Sankin G N, Zhou Y, Zhong P. Focusing of shock waves induced by optical breakdown in water. [J Acoust Soc Am](#), 2008, 123: 4071–4081
- 57 Pasquet P, del Coso R, Boneberg J, et al. Laser cleaning of oxide iron layer: Efficiency enhancement due to electrochemical induced absorptivity change. [Appl Phys A-Mater Sci Process](#), 1999, 69: S727–S730
- 58 Lee J M, Watkins K G, Steen W M. Fuzzy rule based prediction system of surface damage in the laser cleaning process. [Int J Adv Manufact Tech](#), 2000, 16: 649–655
- 59 Seo J Y, Shim D S. Effect of track spacing on porosity of metallic foam fabricated by laser melting deposition of Ti6Al4V/TiH₂ powder mixture. [Vacuum](#), 2018, 154: 200–207
- 60 Lu Y, Tang H B, Fang Y L, et al. Microstructure evolution of sub-critical annealed laser deposited Ti-6Al-4V alloy. [Mater Des](#), 2012, 37: 56–63
- 61 Yuan K B, Guo W G, Li P H, et al. Influence of process parameters and heat treatments on the microstructures and dynamic mechanical behaviors of Inconel 718 superalloy manufactured by laser metal deposition. [Mater Sci Eng-A](#), 2018, 721: 215–225
- 62 Ahsan M N, Paul C P, Kukreja L M, et al. Porous structures fabrication by continuous and pulsed laser metal deposition for biomedical

- applications; modelling and experimental investigation. *J Mater Process Tech*, 2011, 211: 602–609
- 63 Qu H P, Li P, Zhang S Q, et al. Microstructure and mechanical property of laser melting deposition (LMD) Ti/TiAl structural gradient material. *Mater Des*, 2010, 31: 574–582
- 64 Zhu Y Y, Tian X J, Li J, et al. Microstructure evolution and layer bands of laser melting deposition Ti-6.5Al-3.5Mo-1.5Zr-0.3Si titanium alloy. *J Alloys Compd*, 2014, 616: 468–474
- 65 Kar A, Mazumder J. One-dimensional diffusion model for extended solid solution in laser cladding. *J Appl Phys*, 1987, 61: 2645–2655
- 66 Kar A, Mazumder J. One-dimensional finite-medium diffusion model for extended solid solution in laser cladding of Hf on nickel. *Acta Metall*, 1988, 36: 701–712
- 67 Mazumder J, Conde O, Villar R, et al. Non-equilibrium synthesis by laser for tailored surfaces. In: *Laser Processing: Surface Treatment and Film Deposition*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1996. 47–75
- 68 Rottwinkel B, Nölke C, Kaierle S, et al. Laser cladding for crack repair of CMSX-4 single-crystalline turbine parts. *Lasers Manuf Mater Process*, 2017, 4: 13–23
- 69 Thijs L, Kempen K, Kruth J P, et al. Fine-structured aluminium products with controllable texture by selective laser melting of pre-alloyed AlSi10Mg powder. *Acta Mater*, 2013, 61: 1809–1819
- 70 Xiao Y Z, Peng C. Influence of laser shock peening on fatigue life of transmission gears in aeroengine. In: *2016 Prognostics and System Health Management Conference*. New York: IEEE, 2016
- 71 Lu G, Liu J, Qiao H, et al. The local microscale reverse deformation of metallic material under laser shock. *Adv Eng Mater*, 2017, 19: 1600672
- 72 Wang L, Gao M, Zeng X. Experiment and prediction of weld morphology for laser oscillating welding of AA6061 aluminium alloy. *Sci Tech Welding Joining*, 2019, 24: 334–341
- 73 Hao K, Li G, Gao M, et al. Weld formation mechanism of fiber laser oscillating welding of austenitic stainless steel. *J Mater Process Tech*, 2015, 225: 77–83
- 74 Benyounis K Y, Olabi A G, Hashmi M S J. Effect of laser welding parameters on the heat input and weld-bead profile. *J Mater Process Tech*, 2005, 164-165: 978–985
- 75 Tao W, Yang Z, Chen Y, et al. Double-sided fiber laser beam welding process of T-joints for aluminum aircraft fuselage panels: Filler wire melting behavior, process stability, and their effects on porosity defects. *Opt Laser Tech*, 2013, 52: 1–9
- 76 Galushkin M G, Grishaev R V. Efficiency of laser beam utilization in gas laser cutting of materials. *Laser Phys*, 2018, 28: 026001

Laser microprocessing for aeroengine MRO support

ZHOU Rui^{1,2*}, ZHANG Zi^{2*} & HONG MingHui^{3*}

¹ School of Aerospace Engineering, Xiamen University, Xiamen 361102, China;

² Aero Engine Corporation of China, Beijing 100097, China;

³ Department of Electrical & Computer Engineering, National University of Singapore, Singapore 117576, Singapore

In precision engineering, laser has been more applicable considering its great advantages in microprocessing and nanofabrication, which have great potentials and high impact applications in the maintenance, repair and overhaul (MRO) industry for aeroengines. Increasing efficiency of new-generation aeroengine requires functionalized metal components working under extreme conditions, such as high temperature, high pressure and high speed of rotation. As a non-contact manufacturing and re-manufacturing technology, laser microprocessing shows significant contribution in surface treatment of metallic components for aeroengines, leading to the performance enhancement of heat resistance, mechanical strength, decreased friction drag force and anti-icing property. In this article, laser interaction with aeronautical metallic materials and its applications are introduced for the manufacturing, maintenance and repair of aeroengines. It is interesting to explore the specific process and characteristics of laser processing, which play an important role in advanced manufacturing. Due to the complicated production procedures of aeroengine, it is of much significance to explore the physics behind laser interaction with materials in order to properly utilize the unique characteristics of laser, such as high monochromaticity, high brightness, high directivity and high coherence. Meanwhile, it benefits much to study the dynamic process of interactions and its mechanisms in laser applications, such as laser structuring, cleaning, additive manufacturing, peening, cutting and welding etc. There exist both photo-chemical and photo-thermal processes when laser and materials interact. Based on the laser microprocessing in the specific industry, the building-up MRO support system of aeroengines could be provided by a dynamic mechanism between the pioneering research outcomes and industrial demanding, leading to the fast development of advanced high-end manufacturing equipment.

laser microprocessing, aeroengine, MRO

PACS: 52.38.Mf, 79.20.Ds, 42.62.Cf

doi: [10.1360/SSPMA-2019-0224](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2019-0224)