

# 激光技术在飞机结构损伤 修理中的应用

Application of Laser Technology in Structure Damage Repair of Aircraft

海军航空工程学院 胡芳友

海军某舰载机部队 胡宝良



胡芳友

海军航空工程学院教授、博士生导师。

20世纪60年代第1台激光器发明以来,激光因其具有高方向性、高亮度、高单色性和高相干性等优良品质而被广泛应用于诸多领域,成为理想的加工热源。激光经聚焦后光斑上的功率密度可达 $10^4\sim 10^{15}\text{W}/\text{cm}^2$ 。金属材料在高的功率密度光的照射下会瞬间快速升温、熔化甚至瞬间汽化。因此,应用不同的功率密度和加热作用时间,激光就可实现表面热处理、表面重

熔、合金化、熔覆、焊接、切割、打孔、表面冲击强化等不同的加工目的,是非常理想的加热源。激光加工的表面改性技术已在飞机结构、航空发动机制造领域得到应用。我国使用激光熔覆技术熔铸航空发动机涡轮叶片冠部、涡轮导向器,成功恢复了损伤件的形状、尺寸和性能。

近些年来,随着新机的快速装备,钛合金和复合材料已成为我军现役飞机的主要结构材料。而激光由于具有高方向性、高亮度、高相干性等优良品质而被广泛应用于各个领域,它也必将在飞机结构修理领域扮演重要角色。

## 激光加工技术应用

### 1 激光热处理技术

以一定速度移动的激光束照射金属表面时,表层金属吸收能量后迅速升温,当光斑移动后,基体材料吸收表层的热量使表层金属的温度以极高的速度迅速下降,形成不同于常规淬火的自淬火。由于自淬火的降温速度极高,因此可得到显微组织特殊的表面改性层,这对于提高金属的硬度、耐磨性、耐腐蚀性、耐疲劳性有良好的作用。激光热处理是最早开发的激光加工技术,现在已形成了较完善的理论和工程应用技术。对于可以相变强化的碳钢、合金结构钢,激光表面淬火可以产生传统淬火更高的硬度,甚至对于不具有淬硬性的一些低碳钢材料也有一定的强化作用。图1为35CrMo钢的激光淬火效果。

### 2 激光表面重熔技术

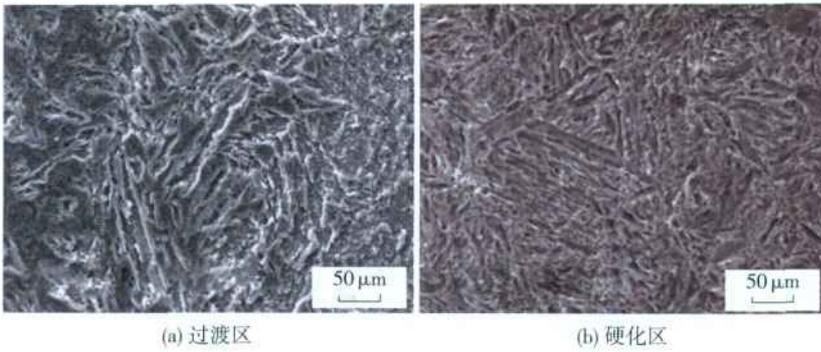


图1 35CrMo钢的激光淬火

应用比激光表面淬火更高的激光功率密度照射金属表面会使表层金属熔化,光斑移动后,基体金属吸热使熔池内金属液体迅速固化,形成强烈激冷的具有极细晶粒和过饱和固溶体显微组织,由于细晶强化和固溶强化的作用,可以明显提高材料表面的硬度、耐磨性。研究表明,通过重熔,铝合金的硬度可以提高30%~100%,这是工艺最简单的激光加工技术,但是强化的幅度有限。对于承受交变载荷的飞机结构铝合金型材、板材,激光重熔后必然存在的过热层的疲劳品质是决定结构使用寿命的关键,因此,在进入工程应用前须以试验验证激光重熔对材料疲劳性能的影响。对于结构钢材料,重熔硬化效果显著,图2所示为45#钢激光重熔不同区域组织。由图2可以看出,激光重熔后组织由珠光体转换成马氏体。

### 3 激光表面合金化技术

在激光熔化表层金属时向熔池加入设计的合金元素,可以在不改变

磨性,良好的耐腐蚀性能和耐热性能的合金化层。针对铝合金,人们试验了各种不同的合金体系的激光表面合金化工艺,如Cu、Fe、Si、Ni、Cr和WC、SiC等。其中镍基合金化层弥散有金属间化合物 $AlNi_3$ 、 $Ni_3Al$ 相,具有较高的硬度和耐磨性,但是合金化层较脆,存在开裂现象。激光熔覆的结合界面必然存在基体与熔覆材料的合金化冶金过程。图3为铝合金合金化成分扫描曲线。

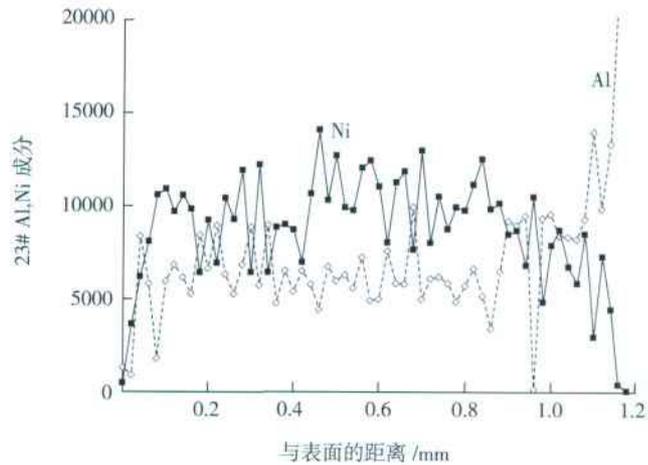


图3 铝合金合金化成分线扫描

基体合金成分的前提下在表层得到需要性能的合金化层。这项技术对特殊性能需要零件的制造十分有利,可制造出传统制造技术无法实现的非均材质、非均一性能的金属或复合材料零件。由于激光表面合金化过程中熔池降温速度极高,可形成传统冶金工艺条件下难以实现的合金、组织结构。因此,根据需要可以形成高的硬度、耐

### 4 激光焊接技术

激光能量密度高,能在瞬间使表层金属熔化、气化,是焊接的理想能源,可以获得宽度窄、热影响区小的理想焊缝。目前已经在多种金属、多种条件下获得高质量的焊缝,是应用较广泛的激光加工技术。对于飞机结构常用的LY12(2024)、LC4(7075)等高强度、焊接性能较差的变形铝合金,激光

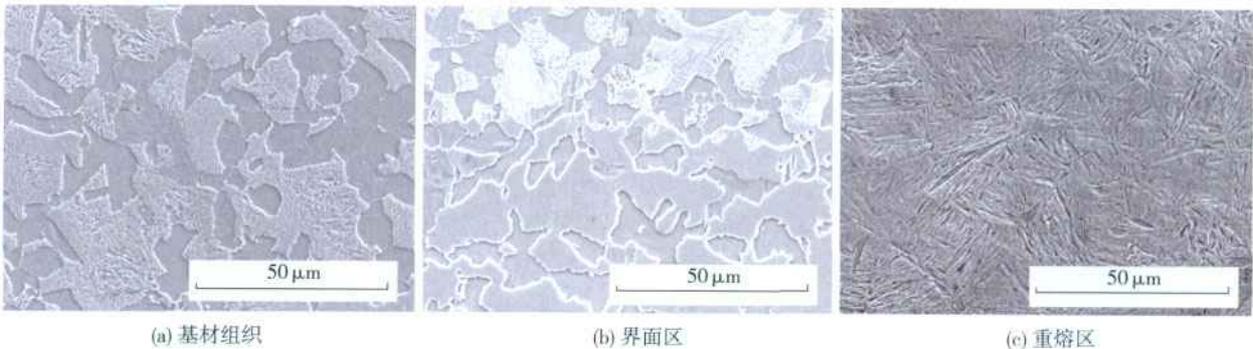


图2 45#钢激光重熔不同区域组织

焊接是最有发展前途的焊接技术。国内外研究人员应用连续式 CO<sub>2</sub> 激光、Nd:YAG 激光、半导体激光、准分子激光为能源,以不同的工艺参数实现了较理想的 2024、7075、6063、5083、5052 等合金板材焊接,并进行了有限元分析。因此,激光焊接技术在飞机结构修理领域有相当广阔的开发前景,特别是在飞机结构损伤抢修领域,由于其具有焊接速度快、施工较铆接简单的特点,是代替铆接工艺的理想技术。对于钛合金、高温合金、不锈钢材料,激光是理想的焊接能源,可形成热影响区小、焊接应力小、变形小、性能高的焊缝。

#### 5 激光切割技术

激光可以切割几乎所有材料,并且可以通过选择气化、熔化、氧化切割方法和工艺参数而在不同材料切割中得到高质量的切缝表面。激光切割变形小、精度高、节省材料、切割效率高、对环境污染小。在飞机结构损伤抢修领域,应用激光切割技术可以快速切除损伤、变形的结构,为实施修复创造施工条件、节省宝贵的时间。

#### 6 激光冲击强化技术

激光冲击强化技术是继喷丸、冷挤压之后的又一种材料表面强化技术,当极高功率密度、短脉冲的激光到达材料表面,低熔点的材料会迅速气化,表层材料的相当于爆炸的瞬间气化产生冲击波对基体会产生强烈的机械作用。因此,在需要处理的材料表面预置低熔点金属或非金属材料,经激光照射后,可以大幅度提高材料表面硬度(提高 5 倍以上),表面压应力,对提高基材的抗疲劳性能有着显著的作用。研究表明,激光冲击强化的主要机理是气化冲击波时金属表面晶粒位错密度均匀、大幅度地提高,位错的交割、缠结交互作用形成均匀的表面残余压应力,从而降低疲劳裂纹扩展速率,提高寿命的幅度达 20%~300% 以上。可以看出,该技术应用前景广阔,特别是在航空结构常见的小孔、焊

缝、凹槽等传统工艺无法强化的特殊部位(如铆钉孔),激光冲击强化是其他工艺无法替代的新技术。

#### 7 激光表面熔覆技术

激光表面熔覆是在金属基体表面上预涂一层金属、合金或陶瓷粉末,在激光重熔时,控制能量输入参数,使添加层在充分融化后使基体微熔与基体实现冶金结合,从而得到一个外加的具有需要性能的熔覆层,图 4 所示为激光熔覆层 SEM 分析。与激光表面合金化相比,该工艺过程中避免基体的过度熔化,保持了熔覆层内材料的特性和功能,是非常重要的表面改性技术,应用到飞机结构可获得巨大的技术效益。该方法在 1981 年被成功地应用于大型客机发动机涡轮叶片后引起了广泛重视,已成为国内外激光表面改性的研究重点之一。铝合金材料硬度低,在其表面熔覆一个硬的耐磨层意义特别重大。但困难的是,铝合金的导热系数高、熔点低。而熔覆层的熔点通常大大高于铝合金基体,难以形成稀释度小、性能稳定的合金化层。实践证明,经过严格控制激光工艺参数,可以实现需要功能和特性

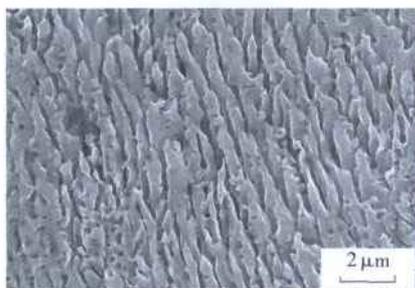
的合金表层,国内外已成功地在铝合金表面进行了多种合金熔覆实验。丰田公司已将发动机气阀座由原来的镶嵌结构改为直接熔覆,使阀座的耐磨性、润滑性、导热性等大幅提高。国外不但将激光熔覆用于表面改性,也用于机械零件的修复,由此开发研究了激光快速成型技术(DMD、DMP),用于机械零件的直接制造。对于机械零件的表面磨损和腐蚀损伤,可以用激光多层熔覆的方法恢复其尺寸和形状。美国海军已建立专门的激光熔覆修理实验室对水下装备的铝合金结构件的腐蚀损伤进行了成功的修复。对于海军飞机常见的腐蚀损伤,激光熔覆技术具有巨大的开发应用前景。

#### 激光加工技术发展前景

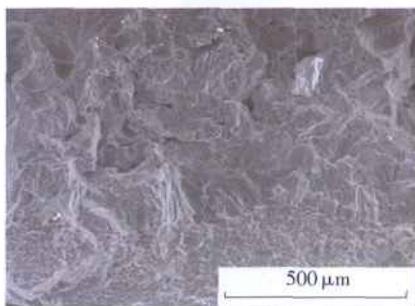
激光加工技术在很大程度上适应了现代飞机抢修中对钛合金切割、钛合金焊接、复合材料的切割的广泛需要。只要调整激光的功率密度和光斑移动速度就可以实现多种加工目的,是传统加工工艺所无法比拟的。它可以成为弥补传统抢修技术缺陷的首选先进抢修技术,也是大有发展前景的抢修技术。

激光加工的表面改性技术已在航空发动机制造领域得到应用。使用激光熔覆技术熔铸航空发动机涡轮叶片冠部,成功恢复了叶片轴向尺寸。在飞机结构修理领域,激光加工技术已经开始得到重视,加拿大将其列为有重大价值的技术。但是对于飞机结构的主要材料铝合金,由于沸点低、传热快,对激光的吸收率低,激光加工较困难,是国内外激光应用领域公认的难题。如能成功应用,具有非常高的学术价值和工程应用价值。

在激光抢修技术的研究上,我国海军已走在国内前沿。2006 年由海军航空工程学院等科研院所研制的“移动式激光抢修系统”已经开始配发部队,为激光技术应用于飞机结构修理乃至战时抢修创造了条件。(责编 小城)



(a) 熔覆区组织



(b) 试样疲劳断口

图4 激光熔覆层SEM分析