

先进绿色:

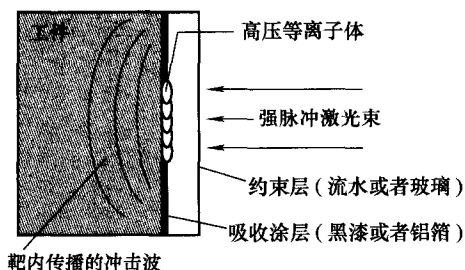
激光冲击表面改性技术

原中国航空精密机械研究所 (北京 100076) 荣烈润

材料的表面处理在现代工业产品中已显得越来越重要,尤其是对金属材料的表面强化处理在机械制造产业中显得尤为迫切。为此,人们研发了多种表面处理技术与工艺来改善材料的表面性能,以满足日益增长的需求。由于激光具有良好的可控性及可重复性等特点,从20世纪70年代起,激光开始逐渐用于金属材料表面改性处理工艺,包括激光相变硬化、表面熔覆、表面合金化、激光非晶化、激光化学气相沉积、激光物理气相沉积,以及激光冲击改性技术等。其中,激光冲击改性技术是利用激光冲击波对材料表面进行改性,提高材料(零部件)的抗疲劳、磨损及腐蚀等性能的一门技术,是改善金属材料表层物理和力学性能的无屑加工方法之一。

一、激光冲击改性技术的基本原理

激光冲击改性处理工艺是根据高功率激光与材料相互作用的物理过程,利用激光产生的等离子体冲击力学效应进行材料表面处理。激光冲击处理主要是利用其高压力学效应,这是激光冲击和其他激光表面处理技术的本质区别。激光冲击改性(强化)处理如附图所示。



激光冲击改性处理示意

激光冲击一般采用钕玻璃、红宝石及YAG高功

率激光装置,激光脉冲宽度为纳秒量级(10^{-9} s)甚至更小,激光功率密度一般大于 $10^9\text{W}/\text{cm}^2$,有时可达 $10^{13}\text{W}/\text{cm}^2$ 。

为了提高对激光能量的吸收和保护金属材料表面不受激光的热损伤,在激光冲击前,一般在工件的待冲击表面区域涂一层不透光材料,称之为涂层(吸收层),然后再覆盖一层透明材料,称之为约束层。当高功率密度(GW/cm^2 量级)、短脉冲($10\sim 30\text{ns}$ 量级)的激光通过透明约束层作用于金属表面所涂覆的能量吸收层时,涂层吸收激光能量迅速汽化并几乎同时形成大量稠密的高温($>10^4\text{K}$)、高压($>1\text{GPa}$)等离子体,该等离子体继续吸收激光能量急剧升温膨胀,然后爆炸形成高强度冲击波作用于金属表面,瞬态冲击压力的作用形成在材料内部传播的冲击波。如果冲击波的压力足够高,材料在短时间内以极高的应变率(可高达 $10^6/\text{s}$)发生变形和动态屈服,产生冷塑性变形,形成残余压应力,同时伴随位错、孪晶等晶体缺陷的形成,改善材料物理力学性能,如疲劳寿命、硬度、耐磨性及耐蚀性等。

根据上述分析,可以把激光冲击改性过程分成三个阶段:①靶面吸收高能激光并汽化。②等离子体形成高压冲击波加载于靶面。③靶材动态响应而产生塑性变形和残余压应力场。

二、激光冲击改性(强化)的应用

利用强激光与物质相互作用产生的强烈冲击波来进行表面改性和延寿技术具有高压、高能、超快的特点。它能有效止裂含裂纹的零部件,修复废旧疲劳零部件,使断裂控制技术更加完善,从而使结

构零部件更安全、合理，也更为经济。

1972年，美国巴特学院首次用高功率脉冲激光诱导的冲击波改变7075铝合金的显微结构组织和力学性能，使材料的屈服强度产生了明显的提高后，世界各国对于激光冲击改性的研究纷纷展开。

激光冲击强化技术最为典型的应用就是航空发动机叶片的强化。据称，GE公司已为B-1轰炸机F101发动机的2万多片叶片及F-16战斗机的2000多片叶片进行激光冲击强化处理，效果明显。目前，美国正在将激光冲击技术应用到F/A-22上的F119-PW-100发动机生产线，若将所有叶片都进行激光冲击处理，预计节约成本将超过10亿美元。

美国加州大学的劳伦斯·里弗莫尔国家重点实验室(LLNL)与麦锡金属表面处理公司(MIC)合作，开发了峰值功率3GW、重复频率10Hz的钕玻璃激光器系统，用于涡轮发动机叶片的激光冲击强化处理，并申请了发明专利。2003年，MIC公司推出实用化的工业产品，使得激光冲击强化技术从实验室走向工业流水线。至今，已累计处理发动机零部件2万多套。

1995年2月，Jeff Dulaney博士创立了世界上第一家激光冲击处理技术公司(LSPT)，建立了激光处理网站，利用其先进的激光冲击处理设备和系统，向工业界提供激光冲击处理技术及加工服务。

在国内，1995年华中科技大学用Nd:YAG(钕铝石榴石)激光器的小功率(193MJ)、小脉宽(5ns)、小光斑($\phi 1\text{mm}$)的激光参数对LY12CZ铝合金进行多点钉合处理，使试样的表面硬度提高5倍，硬化层深度0.1~0.2mm。2008年，西北航空公司已成功将激光冲击强化技术应用到飞机发动机生产线。

激光冲击强化技术现已开始用于机械制造行业中的弹簧、曲轴、连杆、齿轮及凸轮轴等承受交变载荷部件的处理，用于核工业领域核废料储存容器焊缝的处理，以及核反应器零件的处理，在船舶工业中船体焊接板焊缝的处理也有所应用。

三、涂层(吸收层)的选用和优化

涂层的主要作用是：①在强激光作用下，使试件不被烧蚀熔化和重新结晶。②涂层材料吸收激光能量后汽化爆炸，形成等离子体，提高等离子体冲

击压力。表面涂层是激光冲击改性中诱导冲击波形成的物质基础，对冲击效果起十分重要的作用，因此涂层的材料、厚度及涂覆工艺的选择极为重要。

1. 涂层材料的选择

涂层材料的选择原则：①对激光的吸收比较高，易于提高冲击波峰值压力。②具有低的热导率和低汽化热。③能经受高的功率密度和温度，有机化合物不宜采用。④易于涂覆至金属表层且与基体金属相容，易于去除。

目前，常用的表面涂层材料为黑漆，这种涂料一般涂覆简单，能量吸收显著，并且完成试验后极易从试样表面除去。

2. 涂层厚度的选择

在激光冲击改性过程中，由于表面涂层吸收激光能量后汽化形成等离子体，所以其厚度的控制很重要。涂层太薄，激光能量可透过吸收层而直接烧蚀金属材料；涂层太厚，会对激光冲击波形成衰减，导致传到靶材的能量损失，降低激光冲击改性效果。为此，选取涂层时，其厚度从理论上应大于或等于汽化层的厚度，在试验中最小涂层厚度一般取30~100 μm 。在假定涂层材料在激光冲击下瞬间汽化，忽略液相存在的前提下，可以使用如下公式估算涂层厚度：

$$Z = \int_0^t v dt = \frac{AI_0 t}{\rho[L + c(T_b - T_0)]}$$

式中 t ——汽化时间(s)；
 v ——涂层汽化速度(m/s)；
 A ——材料表面对激光的吸收系数；
 ρ ——材料的密度(kg/m^3)；
 L ——汽化热(J/kg)；
 c ——比热容 [$\text{J}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$]；
 I_0 ——激光入射到材料表面的功率密度(W/cm^2)；
 T_b ——汽化温度($^\circ\text{C}$)；
 T_0 ——金属表面的起始温度($^\circ\text{C}$)。

3. 涂层涂覆工艺的选择

由于涂层的厚度及其均匀性对激光冲击波产生较大的影响，因此其涂覆工艺十分重要。表面涂层的涂覆方法有两种：手工方法与涂沫器机械操作。

(1) 手工方法 将吸收层(如黑漆)涂覆于试样待冲击区,是目前试验研究中常用的方法,其不足是易造成涂层厚度不均匀,且易涂覆到其他非冲击处理区,导致激光能量利用率低,诱导的冲击波压力不稳定,从而造成试验数据不稳且可靠性差。

(2) 机械涂抹器 可消除涂层涂覆的不均匀性,但需要精确的定位控制机构,这使得激光冲击改性处理系统的结构和控制十分复杂,导致费用大幅增加,处理成本提高。

对于这两种涂覆方法,在每次冲击处理后还需一道后处理工序。用手工或高速流体喷射冲击处理区域,以去除残留的涂层。

在目前的试验中,由于条件的限制,表面涂层一般为手工涂覆,存在厚度控制的困难。涂层厚度的控制仍是激光冲击处理工程应用的一个难题。

为解决普通涂料涂层的内在质量差、与基体结合强度低等问题,国内外研究人员进行了广泛的研究,提出了以下四条解决途径:①调整喷涂过程中的工艺参数,改进喷涂设备。②涂层材料的选择及涂层的前后处理。③形成纳米复合涂层。④形成梯度复合涂层,避免基体到涂层的组织、性能的突变,缓解界面处的应力集中,改善涂层界面的结合状况,提高结合强度和涂层的表面硬度,大幅改善涂层材料的性能。

四、约束层的选用和优化

在激光冲击改性技术中,约束层的主要作用在于阻碍等离子体膨胀,大幅提高激光冲击波的峰值压力,延长激光冲击波压力的作用时间,提高作用于靶面的冲击动量,增强能量耦合。

理想约束层应具备的性能有:较高的透光率,良好的制作工艺性,一定的刚度,较高的声阻抗,厚度易控制,一定的密度,各向物理性能相同,含较少的吸收激光能量的成分,足够高的抗拉强度和剪切强度,装夹简便。

1. 约束层材料对激光冲击改性效果的影响

(1) 密度 在保证金属材料密度不变的情况下,可通过增加约束层的密度来提高冲击波峰压。此外,如果约束层的密度不均匀,会影响其对激光冲击改性的作用。

(2) 透光率 约束层材料透光率会使激光束的能量产生损失。导致能量损失的主要原因是:约束层材料对激光束的反射、散射和吸收。

(3) 声阻抗 约束层材料的声阻抗越大,则激光冲击波峰值压力越大。试验中,铝玻璃的增压作用最大,但由于其成本高,故一般用石英玻璃作为约束层材料。

(4) 刚度 约束层的刚度对激光改性的效果有很大影响。与约束层的阻抗比较,约束层本身的刚度对激光诱导的冲击波峰压会产生更大的影响。

2. 约束层厚度的选择

为了防止约束层材料在激光作用期间过早地发生约束层的碎裂破坏,必须选择一定厚度的约束层。过厚的约束层,会在当冲击波峰值压力超过约束层介质的压缩屈服值时,使约束介质的内表面发生碎裂,阻止了激光能量的通过,限制了冲击波峰值压力增大。

目前,约束层厚度的估算尚无理论公式,可通过测量激光冲击变形区的冲击效果(表面形变及硬度),来间接比较不同厚度的约束层对激光冲击波增压效果的影响,达到优化约束层厚度的目的。

由于用于激光冲击改性处理的吸收层和约束层均是分离式的,操作时按两道工序进行,存在操作和安装繁琐,工艺稳定性差,以及效率不高等缺点。为此,江苏大学提出了一种集能量吸收层和约束层于一体的新型复合能量吸收层——柔性贴膜涂层。这种新型复合层具有的特点:装夹方便,制作工艺简单,成本低;清理方便,不会对人身和光学器件造成损害;厚度精确可控,一致性好;可有效地提高激光冲击波的峰压,延长冲击波压力的作用时间等,故能大幅改善激光冲击改性的效果。

五、结语

目前,激光冲击技术在工程中应用最广泛的领域是材料表面改性,因为与一般用于材料改性处理的传统方法(如锻打、喷丸硬化、冷挤压等)相比,激光冲击处理具有非接触、无热影响区及强化效果显著等突出优点,所以人们对激光冲击强化机理,冲击波在介质中的传播和衰减,以及吸收层、约束层技术开展了大量研究。**MW** (20120126)