

用连续激光射线强化金属材料中 的几个问题

李儒苟

(机械工程系)

摘要 本文论述了用连续激光射线强化金属材料的三个问题:增加被加工表面吸收能力的方法;强化图形以及激光强化用量与强化层特征参数之间的关系。

关键词 连续激光射线;吸收系数;激光强化图形;强化用量;强化层参数

强化机器零件,模具、刀具,除了可用脉冲激光射线之外,还可采用连续激光射线。而且用连续激光射线强化与用脉冲激光射线强化相比较,还具有一系列优点:首先,没有激光作用时间(即没有脉冲宽度)的限制,因而可大大提高强化过程的生产率,加工强化区的几何尺寸以及能在很广的范围内改变激光作用区的组织与性能,特别在强化碳钢时,能完全实现奥氏体的均质化过程,第二,沿激光射线束与工件相对移动方向(即沿强化带方向)设有多次加热而形成的回火区,因而可增加被强化表面性能的均匀性。

当然,用连续激光射线强化又有自己的特点,尤其以下三大问题对强化效果有很大影响。

1 增加被加工表面吸收能力的方法

用红外区的连续激光射线进行强化的效果,在很大程度上决定于被加工表面对激光能量的吸收能力。这又取决于激光射线的波长,被加工材料表面的状态、性能以及加热条件。

用波长 $1.06\mu\text{m}$,特别是用波长 $10.6\mu\text{m}$ 的连续激光射线在不导致被加工表面原始粗糙度破坏的用量(即表面没有熔化)下强化时,常有很大一部分(约70%—80%)激光能量因反射而造成非生产性的损耗。因此提高被加工表面对激光射线的吸收能力有很重大的意义。

提高被加工表面的吸收能力有很多方法,常用的有,用砂纸加工待强化表面;采用各种涂层;用聚焦的激光射线予辐照待强化表面等。

碳钢件和合金钢,不锈钢件,用砂纸加工后发现,其表面的吸收能力随表面粗糙度的增加而提高。但是一旦表面被激光射线加热熔化,它的吸收能力就会下降到抛光表面的水平。

试验发现,一般金属材料的吸收能力随它的导电性的减小而增加,因此用硫化处理和阳极处理的方法,在待强化表面上涂镀非金属的涂层,例如 Fe_2S_3 , Al_2O_3 等可提高材料的吸收能力80%(涂 Fe_2S_3)和100%(涂 Al_2O_3)。

但在激光射线辐照过程中，由于涂层的蒸发会使吸收能力逐渐下降。例如用150W的CO₂激光器辐照带Fe₂S₃涂层的不锈钢件，经150ms之后，Fe₂S₃涂层全部蒸发。在辐照带Al₂O₃涂层的表面时发现，激光射线辐照的头50ms内，吸收能力从100%下降到55%，随后就稳定在这个水平上。随着激光射线功率的增加，由于Al₂O₃的大量蒸发，又会导致吸收能力的明显下降。

为增加吸收能力，还可采用其它涂层，例如用W、CuO、Mn₃(PO₄)₂、Zn₃(PO₄)₂，以及氧化处理，镀Cd，Cr化处理等得到的涂层；还可采用石墨的胶质溶液 金属的氧化物等。

用钨形成的涂层，具有特殊的网格结构，其网孔的尺寸(10μm)，接近于射线的波长。因此这些网孔就成为射线能量的“收集器”，使钨涂层具有很高的吸收能力(达96%)。氧化铜涂层也具有类似结构。这些涂层效果虽好，但由于成本高，故只采用在重要场合下，一般很少采用。

如果把使用CO₂激光器，在同样辐照条件下所得到的有涂层的材料的热影响区深度与没有涂层的材料的热影响区深度比作为涂层效果指标η，那么各种涂层的效果如下(把没有涂层的碳钢件热影响区深度为1)：

涂层：	Cr	Cd	C	ZnO	Zn ₃ (PO ₄) ₂	Fe ₂ S ₄
η：	0.6	2.0	3.0	4.5	5.1	6.7

所以若根据同样辐照条件下热影响区的深度来衡量涂层效果，那么经氧化处理的表面吸收能力最大，Cr化处理的表面吸收能力最小。

在选用涂层的时候，需要注意的是，在红外辐射区激光射线作用下，涂层应具有很高的吸收激光能量的能力，它们和被加工材料有很好的粘合力，并与被加工材料的化学成分无关。最重要的指标是涂层应具有承受高温和大的射线功率密度的能力，也就是说涂层应该是耐高温的，并具有很高的导热性，与被加工材料具有很好的热动接触。涂层厚度应该最佳，大致位于30—50μm之间。涂镀和去除工艺以及测量、控制涂层厚度应尽量简单。最好是涂层赋与被加工表面具有贮油性能，或者在表层微熔的用量下能渗入一些硬的耐磨的涂层微粒，以提高表面的耐磨性。另外涂层应是便宜的，非稀有的材料。涂镀与去除过程应尽可能自动化。

2 强化图形

强化图形，即激光束扫描的次序与方式，它对强化效果也有重大影响。用CO₂激光射线强化时，有两类强化图形：一是线加工，即激光射线束沿直线或某一曲线扫描；二是面加工，即激光射线束沿整个平面或某种曲面扫描。激光作用区在射线与工件相对移动方向为带状(强化带)，在垂直于相对运动方向的截面内为扇形，就如单脉冲激光作用区一样(图1)。

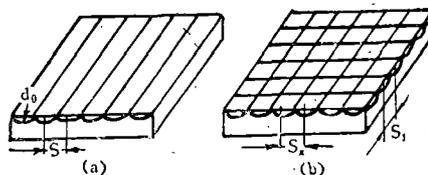


图1 强化图形

不管那种强化图形,其基本特征参数是重叠系数 $K_a = s/d_0$, S 为步长, d_0 为聚焦光斑尺寸(直径)。与脉冲激光射线强化时相类似,用连续激光射线强化时可采用 $K_a \geq 1$,即没有激光重叠作用区。也可采用 $K_a < 1$,即激光作用区有某种程度的重叠。另外对强化图形的特征还附加两个指标(图2):强化深度方向的均匀性,它决定于最小和最大强化深度之比 h_{min}/h_{max} ;宽度方向的均匀性,它决定于重叠区(回火区)所占比例 B_{HY}/B_y 。

在选择强化图形时,应综合考虑以上三个指标,对不同的加工材料,不同的加工用量应采用与之相适应的数值。

一般情况下,在用连续激光射线强化时,由于加热区对前一强化带的热影响很显著,因

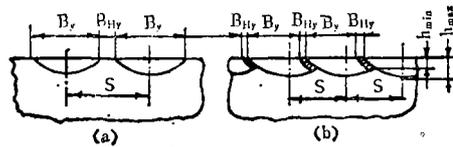


图2 强化图形的特征指标

此一般都采用 K_a 稍小于1的强化图形。而在某些情况下,又常使强化带彼此之间相隔一段距离,使激光加工区只占工件总面积的20%—50%,反而收到较好效果,可取得最大的耐磨性。

面加工时,常加工两种曲面——平面和圆柱面。强化平面有两种加工图形(图1):条状(图a)和方格状(图b)。激光加热一段之后,工件与激光束在横向相对移动一个步长 S 。在采用方格强化图形,最简单方便的是使强化带之间彼此垂直,而且两个方向的步长相等($S_x = S_y$)。当然也有采用彼此不成直角的,两个方向的步长也不相等,这也并不十分困难。

加工外圆柱面时,有三种强化图形(图3):沿单螺旋线扫描(图a);沿相对的双螺旋线扫描(图b)。在这两种情况下,工件以转速 n 回转,同时激光束与工件在工件轴向作恒量的进给运动 S 。第三种强化图形是沿工件母线扫描,而工件周期性地回转步长 S (图c)。

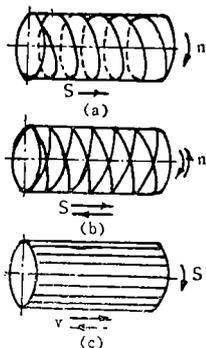


图3 加工外圆柱面的强化图形

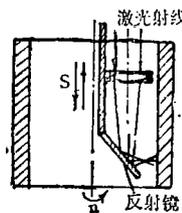


图4 插入工件内的反射镜

这三种强化图形也基本上适用于强化内圆柱面,但需要一个插入工件内的转向反射镜(图4),同时必须注意冷却和防护内反射镜以受蒸发物和黑烟的影响。为了在内表面获得螺旋线强化图形,工件(套筒)应以转速 n 不断回转,同时还在纵向作速度为 S 的相对移动。也可以工件回转而光学头作 S 移动。在沿圆柱面母线强化时工件或光学头以速度 v 在轴向移动,而

工件周期性地回转以获得步长 S 。但由于光学头的回转比较复杂，故没有得到广泛应用。

在很多情况下，为了强化内表面，不采用插入工件内部的转向反射镜，而是使激光射线

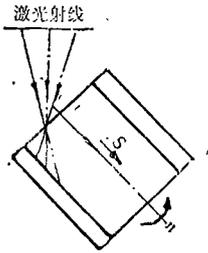


图5 不插入工件内部的转向反射镜

与工件轴线间相交成某一角度(图5)，这时在工件回转的同时，它还沿轴向移动。用这种方法所能强化的工件内表面长度有一定的限制，因为当激光射线与工件轴线之间的夹角小于 30° 后，激光反射部分增多，而导致强化质量变坏。

用连续激光射线强化时，可保证在加热带(强化带)方向的显微硬度和显微组织的均匀一致，但在垂直于强化带的横向不均匀性依然存在，就如在脉冲激光射线强化，当 $K_a < 1$ 时存在因重叠加热而形成的回火区一样。为了减少回火区的尺寸可采用各种措施，主要的有：最好以较高的速度和在较大的温度梯度下加工；采用相应措施切去激光聚焦光斑边缘功率密度低的部分。以这个观点来看，在强化时最好设法使光斑内的功率密度分布均匀或使中心的功率密度比边缘的小20%—30%。

从加工图形来看(图6)，有两种加工图形能避免回火区，第一种图形(图6)适用于强化内外圆柱面。它是利用锥面或抛物面的反射镜使环形激光线在待强化表面上形成的光圈。加工时工件以速度 v 在轴向移动。显然这种加工方法是比较复杂的。第二种方法(图3(a))工件或光学头在回转的同时还作轴向移动，并且使它们的回转速度相当高，以使在一转的时间里，工件表面的温度来不及下降到 $Fe-C$ 相图的 A_{c1} 点以下。例如在加工直径7—10mm的棒料时必须使回转率在2800—3000r/min左右。因此工件的直径有一定限制，同时要用水以提高工件的冷却速度。

3 激光强化用量与强化层特征参数之间的关系

用连续激光射线强化时的基本用量有两个：一个是激光作用区的功率密度 W_P ，它决定于激光功率 P 以及聚焦光斑的直径 d_0 ；另一个是工件与激光射线束的相对移动速度(加工速度) v ，它也决定了激光射线作用时间 t 的长短。

强化层的基本特征参数有：强化层深度 h 和宽度 b ，显微硬度 H_s ，表面粗糙度 R_z 以及表面微观几何形状。

研究发现，强化层的特征参数可用改变功率密度和调节加工速度来控制，而且存在一定的功率密度和加工速度范围，在它们的某种组合下，可获得最佳的强化质量(高的显微硬度，均匀的组织，没有裂纹，所要求的表面粗糙度以及足够大的强化层深度与宽度)。

因此可采用能量密度(比能) $W_E = W_P \cdot t = W_P \cdot d_0 / v$ (J/m²)采作为连续激光射线强化材

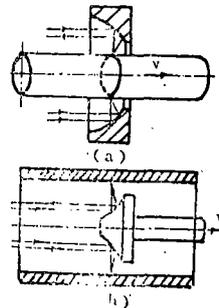


图6 加工图形

料的综合强化用量指标。

激光加工用量各因素对强化层参数的影响有如下规律：图7是在恒速($v = 50\text{ m/s}$)下得到的 $\square \times 15$ 钢试件表面激光强化层深度 h ，宽度 b 与激光功率 P 的关系；图8表示了具有涂层 $Zn_3(PO_4)_2$ 的Y10钢试件表面强化层参数(深度 h ，宽度 b ，表面粗糙度 R_z ，表面最大不平高度 H_{max} 等)与激光功率密度 W_p 和加工速度 v 之间的关系。

从图上可以看出：激光强化区尺寸(h, b)随激光功率 P 的增加而增加，但随加工速度 v 的增大而减小。激光作用区功率密度 W_p 增加，强化层的深度增加。但当激光功率 P 不变时，功率密度的增加一般是靠减少聚焦光斑直径而取得的，故功率密度增加会导致强化区宽度减小。

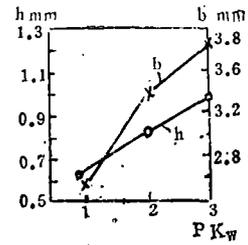


图7 强化层深度、宽度与激光功率的关系

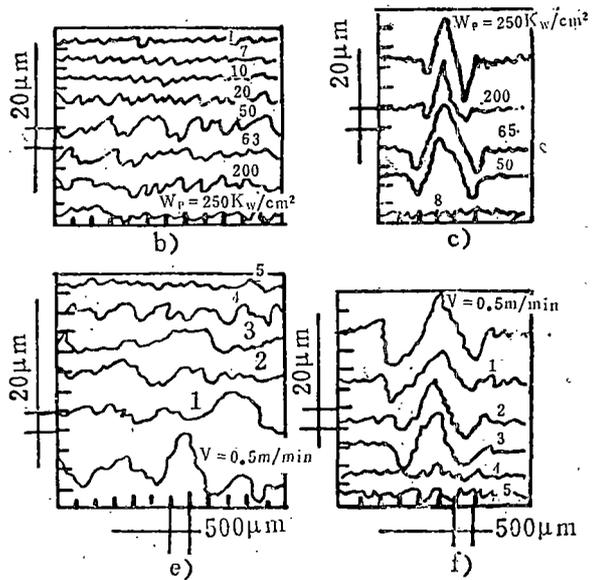
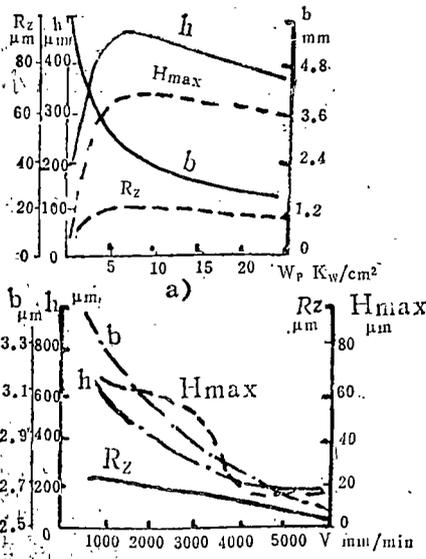


图8 深层表面强化层参数

如果粗略地估计，可认为 $h \approx P/\sqrt{d \cdot v}$ 。但同时可以看出，在加工Y10钢时，当功率密度高于 $5 \times 10^4\text{ W/cm}^2$ 之后，发现强化深度 h 不再增加，反而有一定程度的下降，这是由于部分材料开始熔化而消耗了较多能量的缘故。

另外必须指出，在强化带横截面内强化深度是不均匀的，如图9中(a)所示，最深处位于强化区中心。这是因为在一般情况下，激光射线束横截面内能量强度的分布是高斯分布，也就是说中心部分比边缘部分具有更大的能量密度。而且强化带的宽度又受聚焦程度(或说聚焦光斑直径)的限制，若散焦程度过大，会使光斑能量密度分布的不均匀性增大，导致强化区深度的不均匀性更大。为增加强化带的宽度，可采用多行程强化方式，即有多条强化带，它们可能有某些重叠或没有(见图9(b))。这种强化方式虽然增加了强化区的宽度(图9(b))，但仍得不到均匀一致的强化层深度，而且激光重叠作用区往往因回火而形成低硬度区。为增加强化区的宽度，同时获得较均匀的强化层深度并避免回火区，(图9(c))，可采用振动扫描的方式进行强化。如图10所示，即激光射线束在沿强化带移动的同时，还在强化带横向作多次的来回振动。其振动频率，移动速度及功率密度应相配合，这可采用试验法或计

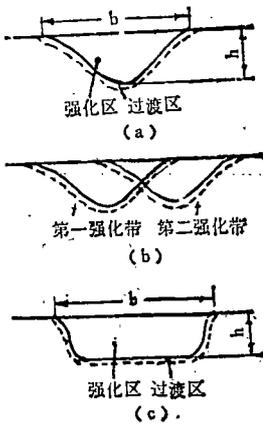


图9 强化深度

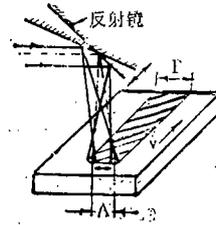


图10 振动扫描强化

算法确定。原则是控制被强化材料表面的温度在淬火温度(一般为 A_{c1} 点)与熔化温度 T_m 之间。(一般取扫描频率为200—300Hz, 功率密度约 $W_p \approx 1.55 \times 10^7 \text{ W/cm}^2$)。这时温度与时间的关系图(图11)是传统的时间——温度——相变图上加上冷热循环的组合。这样所有被扫描到的材料表面组织都由奥氏体转变为贝氏体基或马氏体基的淬火组织。

为了实现振动扫描, 需要采用特殊的扫描器, 扫描器有机械式, 电磁式、压电式和其它形式。图12是机械式扫描器的一种, 激光射线2通过聚焦透镜1投射到可动的平面或球面反射镜3上, 倾斜的反射镜3刚性地与摇臂4相联。电动机5带动凸轮6回转, 从而使摇臂4可以回转 α 角, α 角的大小由凸轮6的偏心量 e 调节。转动丝杠7可调节反射镜3与摇臂4和凸轮6接触处的距离 X 。扫描器的扫描振幅 A 决定于参数 α (或 e, x)以及反射镜与被加工表面

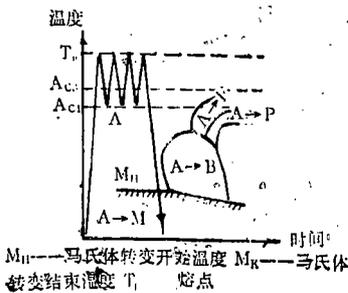


图11 温度与时间关系

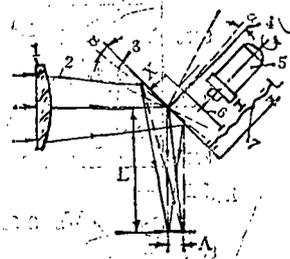
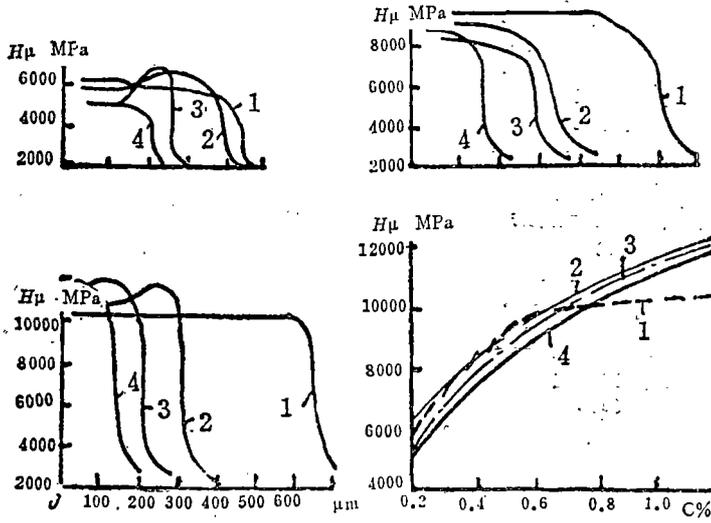


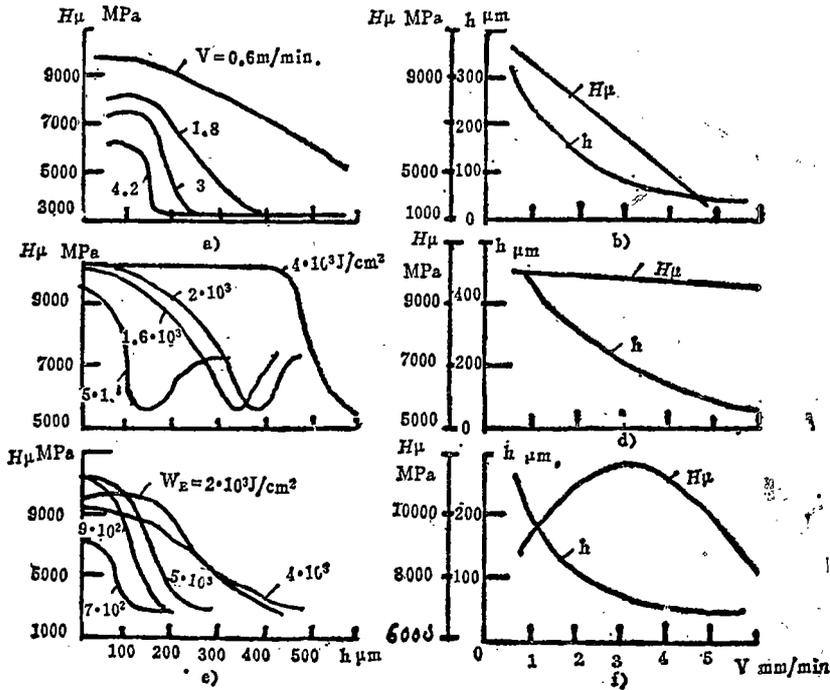
图12 机械式扫描器

之间的距离 L 。从图上可以看出： $A = L \tan \alpha = L \cdot e / k$ 。振动频率决定于凸轮6的转速 n 。扫描器的生产率 P 可近似地认为等于强化带宽度 B 与相对移动速度 v 的乘积即 $P = B \cdot v$ 。

分析碳钢表层的金相组织指出, 一般情况, 碳钢表面的激光作用区有明显不同的两层组织, 它们的区别在于相变的完全程度不同。在第一层(表层), 其中温度超过了上限临界点 A_{c1} (亚共析钢)或 A_{cm} (过共析钢), 同时发生了完全的相变再结晶, 在自动淬火过程中形成奥氏体组织, 当激光加热停止后, 这部分就变成马氏体组织。表层下面的第二层, 受热温度位于



被加工材料 (a) 号钢; (b) 45号钢; (c) 12 Y钢
 1、2、3、4 分别表示加工速度为0.6、1.8、3、4.2m/min
 图13 强化层显微硬度与加工速度的关系



被加工材料(a)P6M5; (b)XBΓ; (c) (d)LI×15(e)、(f)P18

图14 加工速度和能量密度对强化层深度和显微硬度的影响

临界之间范围内, 在珠光体晶粒区形成奥氏体, 而剩余相(铁素体或二次渗碳体)部分或全部保留, 即发生了不完全的淬火。

因此对于亚共析钢, 第二层的硬度比第一层低(图13(a)), 这是由于保留了铁素体的缘故; 对于过共析钢, 第二层的硬度高于第一层, 这里存在大量高分散的珠光体组织(图13(c))。

同时从图13中可以看出, 在20号钢中, 激光淬火区的硬度相当高, 当加工速度 $v=0.6-1.8\text{m/min}$, 其显微硬度可达6000—7000MPa, 这是一般的淬火方法所不能取得的。同时淬硬深度也足够大, 可达0.5mm, 并有足够的宽度。这充分说明用连续激光射线加热是表面强化低碳钢的有效方法。

在用激光强化时, 碳钢表层的硬度还与钢的含碳量与化学成分有关(图13)。试验发现, 对于每一类钢都存在一个特定的能量密度 W_E , 在该能量密度下, 可取得最大的强化层硬度。例如对于碳钢, 这个能量密度位于较低的区域(约为 2.10^3J/cm^2); 对于合金钢和高速钢位于较高的区域内(约为 5.10^3J/cm^2)。

用连续激光射线强化合金钢和不锈钢时, 其功率密度、加工速度对材料表面显微硬度和强化区尺寸的影响如图14所示。

研究发现, 在一般情况下, 强化碳钢, 为了取得最大的表层硬度, 最好采用较高的加工速度(当然, 这时强化层深度有一定的减少)。强化合金钢和高速钢时, 宜采用大的功率密度和多的辐照时间(小的加工速度)。在这样的条件下, 可获得足够大的强化层深度(0.5—0.8mm)。

表1列出了激光强化用量与所取得的强化层参数:

表1 激光强化用量与强化层参数

材料 (钢)	W_E (J/cm^2)	P (W)	V (m/min)	强化参数 h H_μ (μm)(wp)	材料 (钢)	W_E (J/cm^2)	P (W)	V (m/min)	强化层参数 h H_μ (μm)(wp)
45°	5×10^3	800	0.5	500 8500	X12M	1.3×10^3	800	1.8	150 11000
y 8	8×10^3	800	1.0	300 11000	P6M5	7×10^3	800	0.3	800 9800
y 10	5×10^3	800	2.0	200 12000	P18	1.5×10^3	800	2.5	200 10500
11X15	7×10^3	800	0.8	800 10000	12XH3A	7×10^3	800	0.8	400 6000
XBG	4×10^3	800	0.6	500 10500					

除了显微硬度之外, 被强化表面的另一个重要参数是表面粗糙度, 影响表面粗糙度的因素除了激光功率密度, 加工速度之外, 还有强化图形与重叠系数。研究强化表面的显微起伏(图8)可以看出, 在强化带横截面内一般都具有特殊波峰形状, 波峰的高度决定于加工用量。强化带波峰的两边都是波谷, 并且它们的体积之和都大大小于波峰的体积, 这是因为发生马氏体转变时, 材料体积增大的缘故。当激光功率不变, 随着功率密度的减少(聚焦光斑直径增大), 强化带宽度增大。强化带轮廓最大高度 H_{\max} 同样决定于射线功率密度(图8), 在功率密度小于 1.10^4W/cm^2 之前, 由于材料中不存在明显的熔化, 因而表面粗糙度与原始表面差不多, 基本上没有变化。随着功率密度的增加, H_{\max} 开始明显上升, 经过 5.10^4W/cm^2 之后达到最大值, 然后又逐渐减少。沿强化带方向的表面粗糙度 R_z 的变化规律与 H_{\max} 的大致相同。

加工速度对表面粗糙度也有很大的影响, 当加工速度小时, H_{\max} 与 R_z 都具有最大值(图8), 随着加工速度的提高, H_{\max} 与 R_z 都逐渐减小。而且在 3000m/min 之前, 两者变化的

程度大致相同,从3000mm/min开始, H_{max} 明显下降,而趋近于 R_z 。当速度为6000m/min时, H_{max} 与 R_z 都变成大致等于原始表面的粗糙度值。

本文为作者在苏联基辅工学院激光技术教研室的研究成果之一。因而文中钢的牌号均为苏联牌号。

参 考 文 献

- 1 В.С.КОВАЛЕНКО И ЖУСИНЬ (李儒荀) ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ РАЗМЕРНОЙ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ «ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА» 1988, 1
- 2 李儒荀.陶瓷的激光打孔及加工参数的优化.无锡轻工业学院学报, 1988, 4
- 3 李儒荀.脉冲激光射线强化金属材料的n个问题.无锡轻工业学院学报, 1989, 4
- 4 李儒荀.精微孔的激光加工.机械工艺师, 1988, 8
- 6 В.С.КОВАЛЕНКО ЛИЖУСИНЬ (李儒荀) В.П.КОТЛЯРОВ Н.П. АНЯКИН «ВЫБОР РЕЖИМОВ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ ОТВЕРСТИЙ В КЕРАМИКЕ» «ЭЛЕКТРОННАЯ ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ» 1988, 4

Some Problems of Surface Hardening Metal Material by CW Laser Baser Beam

Li Ruxun

(Dept. of Mech. Eng.)

Abstract Three problems of surface hardening metal material by CW laser beam are discussed in this paper; method of increasing absorption capacity of machined surface, strengthening laser pattern arrangement in the machined surface, and relationship of hardening parameters and characteristics in the hardend surface.

Keywords: CW laser beam, Specific absorption, Strengthening laser pattern arrangement, Hardening parameters, characteristics in the hardend surface