

文章编号: 100226819(2001)042002204

# 铸铁、铸钢激光表面改性材料及工艺研究

储 训<sup>1</sup>, 马援东<sup>2</sup>

(1. 扬州大学; 2. 连云港自来水公司)

**摘 要:** 磨损、空蚀是农机具及泵装置使用中安全可靠性的主要问题。由于磨损、空蚀的侵蚀、剥蚀, 不仅造成了农机具及水泵部件的破坏, 还引起工作能力的恶化。该文在氧乙炔合金粉末喷焊研究的基础上, 利用 2 kW CO<sub>2</sub> 连续横流激光器, 采用 Ni 基合金粉末, 在铸铁和铸钢部件上进行了激光表面改性试验研究。并采用磁致伸缩仪对试样的抗磨蚀能力进行了测试。试验结果证实, 经过激光表面改性处理试样, 不仅热变形极小而且抗磨损、空蚀能力大幅度提高。

**关键词:** 磨损; 空蚀; 激光; 改性材料; 铸铁; 铸钢

**中图分类号:** TG174.44 **文献标识码:** A

磨损、空蚀是农机具及泵装置使用中安全可靠性的主要问题。由于磨损、空蚀的侵蚀、剥蚀, 不仅造成了农机具及水泵部件的破坏, 还引起工作能力的恶化。由于农机具及水泵使用环境的特殊性和恶劣性, 造成普遍磨损、空蚀严重, 加之大部分农机具及水泵产品材质多为铸铁、铸钢, 在磨损、空蚀、腐蚀、锈蚀等多种因素的作用下, 工作部件表面基材大面积剥落, 使用寿命缩短, 效率降低、振动加剧, 给安全可靠运行造成威胁。为此, 国内外采用了不少方法, 如采用高分子合成材料涂敷、硬质合金堆焊、表面镶嵌不锈钢板、线材喷涂、合金粉末喷焊、手工氩弧焊等, 以提高工作部件表面的抗磨蚀能力。但是高分子材料涂敷和线材喷涂难以与基材形成高强度的结合, 堆焊和镶嵌以及喷焊易产生较大的热变形和热应力, 手工氩弧焊工艺要求苛刻, 对加工表面要进行特别处理<sup>[1]</sup>。本文利用激光熔覆技术对铸铁、铸钢工作部件进行表面改性处理, 并用金相显微镜观察了熔覆层和过渡区的组织形貌, 用显微硬度计测量了表面层的显微硬度。用磁致伸缩仪测定和比较了铸铁和铸钢试样的抗空蚀能力, 取得了良好的效果。

## 1 激光表面改性技术原理及其特点

激光表面改性技术是指以不同的添料方式在被熔覆基体表面放置经选择的涂层材料, 经激光辐照使之和基体表面同时熔化, 快速凝固后形成稀释度

极低, 与基体材料冶金结合的高强度表面涂层, 从而显著改善基体材料表面的耐磨、耐蚀、抗氧化特性等的一种加工方法。近年来, 我们在农机具和水泵铸铁、铸钢材料的主要工作另部件上开展了激光表面改性处理的研究, 处理后的材料表面抗磨蚀能力大幅度提高。特别是激光表面改性工艺所具备的特点, 适合农机具和水泵主要工件抗磨蚀的表面处理<sup>[2]</sup>。

- 1) 冷凝速度快, 产生快速凝固组织特征, 可获得致密、均匀、高硬度的涂层;
- 2) 热变形极小, 对于对变形量有严格要求的农机具和水泵叶轮、叶轮室来说, 这一点特别重要;
- 3) 处理后的涂层与基材呈冶金结合, 不脱落;
- 4) 光束瞄准, 能进行其他方法难以接近的区域选区熔覆和加工;
- 5) 工艺过程易于实现自动化, 便于质量控制。

## 2 激光表面改性熔覆材料的性能和选择

### 2.1 熔覆材料的特点

1) 材料的基本要求: 磨损、空蚀所造成的剥蚀是一个复杂的破坏过程, 所以对激光表面改性保护材料应满足下列要求<sup>[3]</sup>: (1) 具有一定的硬度和强度以抵抗冲击应力; (2) 有一定的韧性; (3) 涂层比较致密以防水分子的渗入; (4) 能与基体产生良好的结合以防在强烈磨损与空蚀条件下脱落。

2) 材料的特点: 激光熔覆中, 自熔性合金粉末因其具有对激光熔覆的急冷急热有良好的响应、裂纹敏感性小、熔融状态下流动性好、与基体有良好的浸润性、冷凝后表面光洁度高、并有自造渣、防氧化

收稿日期: 2001203225

作者简介: 储 训, 教授, 扬州市 扬州大学水利与建筑工程学院, 225009

作用、价格低廉易得、涂层抗蚀、耐磨能力较好等特点,成为当今激光熔覆的主流材料。为了降低金属或合金的熔点,改善机械性能,在合金粉末中加入了适量的B、Si元素,形成“自熔性合金”,在重熔时能自行脱氧造渣,这种材料的特点: 有较低的熔点和良好的自熔性。适合于激光熔覆用合金粉末熔点一般控制在 1 200~ 1 300 。为了保证激光熔覆时合金粉末在熔融状态下对基体具有良好的“湿润性能”,同时又不致于流失缩陷,粉末具有适度的液态流动性和较宽的结晶温度,并保持较宽的塑性范围。粉末的固相线与液相线之间的温差一般为 50~ 150 。这对农机具和水泵曲面形状的工作部件表面以及加厚涂层非常重要。在激光熔覆过程中,B、Si元素与金属氧化物可生成硼酸盐、硅酸盐玻璃渣,对粉末和基体表面起到了保护作用,有利于湿润和结合。粉末中的 Si 元素可以降低粉末的表面张力,起到了熔剂的作用,增强了与基体表面的“湿润能力”。

含有B、Si元素合金粉末的膨胀系数为(14~ 16) × 10<sup>-6</sup>,比一般钢材略高,在激光熔覆后不致因热胀冷缩而引起表面改性层裂缝或剥落。粉末的含氧率小于 0.1% (即小于 1 000 ppm),可减少激光熔覆层中气孔和夹杂,提高改性层性能。

### 2.2 激光熔覆合金粉末材料的选择

目前,自熔性合金粉末一般有三系列: Fe 基、Co 基、Ni 基和加入一定比例(一般为 25% ~ 35%)的 WC 而构成 Fe 基 WC、Co 基 WC、Ni 基 WC 材料。Ni 基抗蚀、耐磨能力好,加工过程中不易烧蚀,具有良好的性价比,因而是激光熔覆的首选材料。

对抗磨蚀合金粉末选择应根据工件所要求的结合强度、磨蚀程度、变形要求和性能等条件来确定。硬度高的改性层,耐磨能力强,但脆性大,抗磨蚀

冲击的能力较低。在选择合金粉末时,不应仅追求高硬度,还需考虑改性层的抗裂、韧性及加工工艺性能的要求。由于改性层的组织结构是在基体中弥散分布着诸多硬质点,不同于热处理过的合金钢材,因此改性层的耐磨性和宏观硬度(HRC)不成线性比例,而其显微硬度(HV)成正比例<sup>[3]</sup>,故而选择耐磨性高低时不应过分考虑其宏观硬度的高低,这个论点已在笔者大量耐磨性能对比试验中获得证实。

粉末选择应综合考虑: 工件的实际工作状态与环境; 工艺实施的难易程度; 经济性。根据试验资料分析,推荐下列系列合金粉末进行激光表面改性处理:

1) 修复铸件的缺陷或损坏,一般选用硬度与基体相近的合金粉末。可选用韧性及加工性能较好的镍基 Ni20、Ni25,可避免铸铁在热影响区内形成 Fe<sub>3</sub>C 脆性相,防止改性层开裂。

2) 对于中等磨损并要求较好抗磨蚀侵蚀性能的使用条件,可考虑选用 Ni35,它几乎对所有基体金属均不致引起开裂,改性层富有韧性,可车削加工。对于泥沙磨损或空蚀严重的部件可选用 Ni55 或 Ni60,它们具有很高的硬度、韧性和抗冲击能力及良好的抗磨蚀性能。

3) 对于严重空蚀破坏以及高应力磨粒磨损,激光熔覆时可选用含碳化钨的 Fe2WC25、Ni2WC25、Ni2WC35 合金粉末。

### 2.3 试验材料的特性

根据自熔性合金粉末对激光改性的适应性和对表面改性材料的要求,本研究以 Ni60 和 Ni60+ WC (质量含量分别为 65% 和 35%) 两种合金粉末进行试验,粉末的成分和性能如表 1 所示。

表 1 激光改性试验材料的特性

Table 1 Property of the test material by laser cladding

| 牌号       | 化学成分δ%                   |          |        |          |          |    | 物理性能      |  |      | 涂层性能          |                            |
|----------|--------------------------|----------|--------|----------|----------|----|-----------|--|------|---------------|----------------------------|
|          | Ni                       | C        | Cr     | B        | Si       | Fe | 熔点δ       | 松装比<br>ö <sub>g</sub> · cm <sup>-3</sup> | 规格目数 | 硬度<br>öHRC    | 线膨胀系数<br>ö10 <sup>-6</sup> |
| Ni60     | 余量                       | 0.8~ 1.0 | 14~ 18 | 3.5~ 4.5 | 3.5~ 4.5 | 14 | 980       | 4.1                                      | 150  | 55~ 60        | 13.4                       |
| Ni60+ WC | Ni60+ WC(35%) (包覆非铸造 WC) |          |        |          |          |    | 980~ 1040 | 4.8                                      | 150  | 基体 60<br>WC70 | 10.9                       |

## 3 激光表面改性工艺研究

### 3.1 熔覆材料的添加方法

本研究试验了黏结剂手工预置和喷涂预置两种

方法。黏结剂法是将醋酸纤维素溶解于丙酮中制成黏结剂,再与合金粉末混合后,用手工均匀涂抹于基材表面。由于手工涂敷,质量不易控制,难以获得大面积均匀的涂层,在激光加工中出现粉末向熔池积

聚, 导致扫描带两边粉末层破坏的现象, 因而一般仅用于小型单件工件的加工。喷涂预置法是利用氧乙炔喷枪将粉末均匀喷涂附着于基材的表面, 这种添加方式在具有喷粉速度快, 涂层均匀质量易于控制, 涂层不易脱落以及工艺设备简单等特点。本研究所进行的试样比较均采用了这种方法。

### 3.2 激光表面改性的工艺参数

其工艺参数主要包括<sup>[2]</sup>: 激光功率  $P$ , 光斑尺寸 (束直径  $D$ ), 光腔的输出构型和聚焦方式, 工件移动速度或激光扫描速度  $v$ , 激光的多道搭接系数  $A$  等。这些参数依涂层的材料、性能、厚度和基体材料等具体条件不同而改变。在实际工艺运用中, 往往采用导出工艺参数即: 功率密度  $Q = \frac{P}{A}$  ( $A$  为激光光斑束面积,  $A = \frac{\pi D^2}{4}$ ) 和比能量  $E = \frac{P}{vD}$ , 这两项参数是评价和控制表面改性层质量、能力、组织形态的决定性参数。功率密度在激光表面改性熔覆过程中应满足涂层熔化 2 分解  $\delta$  化合 2 重凝的物理化学过程以及表面不被气化、氧化破坏的基本要求。

在比能量中由于引入了扫描速度参量, 所以它对熔覆后的涂层组织结构以及与基材的结合能力有较大的影响。本试验使用 HL 22kW  $\text{CO}_2$  横流激光器, 在试验中实际输出功率范围 900~ 1 000 W, 光斑直径范围 1.7~ 3 mm, 扫描速度范围 1~ 4 mm/s, 试验涂层厚度  $0.5 \pm 0.05$  mm 和  $0.80 \pm 0.05$  mm 两种。在多种方案试验比较的基础上, 以冶金结合的优异为基本判断准则, 工艺参数如表 2 中所示。

表 2 激光熔覆工艺参数

| 方案 | 功率 $P$<br>$\delta W$ | 光斑直径 $D$<br>$\delta nm$ | 搭接宽度<br>$\delta nm$ | 扫描速度 $v$<br>$\delta nm \cdot s^{-1}$ | 涂层材料    | 涂层厚度<br>$\delta mm$ |
|----|----------------------|-------------------------|---------------------|--------------------------------------|---------|---------------------|
| 1  | 1000                 | 1.7                     | 0.25                | 1.5                                  | Ni60    | $0.8 \pm 0.08$      |
| 2  |                      |                         |                     | 2.5                                  | Ni60+WC | $0.5 \pm 0.08$      |

## 4 空蚀剥蚀试验

### 4.1 试验参数

本研究以国际上通行的磁致伸缩仪人工模拟空蚀环境来测定并比较试样的空蚀稳定性。通过超声波为主体的高频扰流振荡设备将电磁振荡转化成变幅杆的高频振动, 在水中引起置于变幅杆下端的试样表面产生高频压力脉动, 从而造成空蚀破坏, 其空蚀破坏的强度主要取决于电磁振荡的频率和振幅<sup>[3]</sup>。试验的主要参数和条件见表 3。

表 3 激光熔覆试验的主要参数和条件

Table 3 Main parameters and condition of test by laser cladding

| 频率<br>$\delta kHz$ | 振幅<br>$\delta \mu m$ | 水温<br>$\delta$ | 水质  | 磁化电流<br>$\delta A$ | 发生器电流<br>$\delta mA$ | 实验时间 $t$<br>$\delta h$ |
|--------------------|----------------------|----------------|-----|--------------------|----------------------|------------------------|
| $20 \pm 1$         | $60 \pm 10$          | $20 \pm 5$     | 自来水 | $6.5 \pm 0.5$      | $300 \pm 20$         | 2                      |

### 4.2 试验结果及分析

在空蚀试验中, 常根据试样在单位时间内因空蚀而破坏的质量损失即质量损失率来评价不同材料在相同空蚀条件下的抗空蚀剥蚀能力。在本研究中, 以铸铁试样的质量损失率  $W_{Fe}$  ( $mg \delta h$ ) 为基准, 测量相同时间内其它试样的质量损失率  $W_i$  ( $mg \delta h$ ), 两者的比值即为所测试样的相对空蚀稳定性  $R$ 。

$$R = \frac{W_{Fe}}{W_i}$$

目前国内外对材料抗空蚀剥蚀的试验研究方法缺乏统一标准, 因此研究结果存在一定差异。但每组试验中各个试样之间空蚀稳定性  $R$  的相对值的优劣顺序基本一致。根据对 22 组不同基材、不同预置方式、不同合金粉末改性材料和不同改性层厚度的上百次试验结果分析, 激光表面改性和喷焊均能大幅度提高试样的抗磨蚀能力, 但激光改性后的试样不仅解决了喷焊热变形的难题, 而且其抗磨蚀能力也明显优于喷焊工艺。表 4 为实验时间  $t = 2$  h 时, 综合试验结果的相对空蚀稳定性  $R$  的数值范围。

表 4 相对空蚀稳定性  $R$  的数值范围

Table 4 Range  $R$  of relative stability of cavitations

| 基材 | 激光表面改性       |              | 喷焊处理         |              |
|----|--------------|--------------|--------------|--------------|
|    | Ni60         | Ni基WC        | Ni60         | Ni基WC        |
| 铸铁 | 17.44~ 19.15 | 24.77~ 43.44 | 12.93~ 16.41 | 15.48~ 24.13 |
| 铸钢 | 31.13~ 38.05 | 54.94~ 64.38 | 24.32~ 30.62 | 33.29~ 34.82 |

表 5 6 h 以后的相对空蚀稳定性  $R$

Table 5 Relative stability  $R$  of cavitations after 6 h

| 材料及工艺                               | 未处理试样 |      | 喷焊加工试样 |       | 激光加工试样 |       |
|-------------------------------------|-------|------|--------|-------|--------|-------|
|                                     | 铸铁    | 铸钢   | 铸铁     | 铸钢    | 铸铁     | 铸钢    |
| 质量损失率<br>$W \delta ng \cdot h^{-1}$ | 45.0  | 17.5 | 2.7    | 1.7   | 2.1    | 1.1   |
| 相对空蚀<br>稳定性 $R$                     | 1.00  | 2.57 | 16.67  | 26.47 | 21.43  | 40.90 |

根据质量损失法对铸铁、铸钢基材试样的激光表面改性处理、喷焊处理以及未经处理的相对空蚀稳定性进行综合评估, 其试验时间在 6 h 以后的相对空蚀稳定性  $R$  平均结果如表 5 所示。

从表4、表5中的空蚀稳定性 $R$ 的数值范围可以看出同样的涂层材料经激光表面改性工艺处理后的抗磨蚀能力明显优于喷焊处理工艺。对激光改性后的表面进行金相试验分析表明:

1) 激光改性层微观结构比喷焊层更为细密、均匀,热影响区更窄。由于激光功率高,扫描作用时间短,涂层和基体表层加热后熔化速度快,急速冷却时过冷度大,熔池中的合金元素能迅速形成多种化合物而增加非自发晶核的数量,使形核率大为提高,形成细小均匀的显微组织,组织细密可以提高晶界结合力,增强材料强度和韧性。减少了单位晶界上的杂质含量,而且在快速冷却过程中成分偏析程度减少,从而在整体上保证了能力。

2) 激光改性是利用激光束对熔池进行搅拌,使得熔池中气体夹杂物能上浮析出,形成较为致密的涂层,保证了熔层的质量。而喷焊过程是利用氧乙炔火焰使粉末熔化,通过大气空间喷射到基材表面。此过程伴随有空气混入焊层,在喷涂层上及界面部位往往存在较多的气孔与夹杂物分布在粗大的枝晶之间。化学成分的不均匀性和金属组织的不均匀性都降低了喷焊层的抗蚀能力。

3) 试样试验所表现出来的相对空蚀稳定性,也体现了基材对抗磨蚀能力的影响。在相同的处理工艺下,铸钢试样空蚀稳定性 $R$ 均高于铸铁试样60%以上。其原因除铸钢的强度比铸铁的强度高以外,主要是铸钢成分的偏析比铸铁材料小,同时铸铁中片状石墨和大量气孔的存在,导致熔池中合金成分的稀释,以及在熔覆层中留有气孔也是重要原因之一。

4) 铸钢和铸铁在激光熔覆处理过后,抗空蚀能力分别是原来15.91倍和21.43倍。相对于喷焊工艺而言,激光熔覆既解决了热变形问题,又进一步提高了材料的抗蚀能力。铸铁和铸钢经过激光处理后,抗空蚀能力分别是喷焊工艺处理的1.3和1.5倍。

## 5 结 语

利用2kW CO<sub>2</sub>连续横流激光器,采用Ni基和Ni基WC合金粉末,对铸铁和铸钢试样进行了激光表面改性技术的研究。用J293025型磁致伸缩仪对试样的抗气蚀性能进行了测试。试验结果表明,经激光表面改性后的试样抗气蚀性能有较大幅度的提高。激光熔表面改性加工的热变形小、与涂层能产生良好的冶金结合、加上速度快、光束瞄准、加工灵活、自动化程度高等特点使得激光表面改性工艺具有其他方法所无法比拟的优势,为农机具和水泵工作部件抗磨蚀研究提供了一个可行的方向。随着激光技术的成熟和宽带扫描激光设备的研制、价格的日益降低、材料研究的深入,激光表面改性技术将具有非常广阔的应用前景。

### [参 考 文 献]

- [1] 储训 水泵抗空蚀和磨蚀防护技术进展[J] 水泵技术, 1999 2
- [2] 关振中 激光加工工艺手册[M] 中国计量出版社, 1998 6
- [3] 储训 水泵叶片和叶轮室抗空蚀喷焊保护材料及工艺研究课题报告[R], 1993 5
- [4] 谢沛霖, 吴新跃 汽轮机叶片表面激光熔覆抗空蚀研究[J] 海军工程学院学报, 1999 2

## Material and Technology Research on Surface of Cast Iron and Cast Steel by Laser Cladding

Chu Xun<sup>1</sup>, Ma Yuandong<sup>2</sup>

(1. Hydraulic and Architectural Engineering College, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China;

2. Liangungang City Piped Water Co., Liangungang 223200, China)

**Abstract** Wear and cavitations are major problems affecting safe operation in using agricultural machinery and pump. Of wear and cavitations erosion may cause not only damage of agricultural machinery and pump parts, but also deterioration of performance. On the basis of research on alloyed powder spray, material and technology on surface of cast iron and cast steel by laser cladding by using continuously adjustable transverse flow CO<sub>2</sub> laser at 2 kW level with Ni based powders. The properties of samples are tested with a vibratory rig. According to the test results, not only is the heat warp very little, but also the wear resistant and cavitations resistant properties of claded layer on cast iron and cast steel can be raised considerably.

**Key words:** wear; cavitations; material by laser cladding; cast iron and cast steel