

# 铁基合金激光熔覆技术工艺优化研究\*

马运哲, 董世运, 徐滨士, 韩文政

(装备再制造技术国防科技重点实验室, 北京 100072)

**摘要:** 利用激光熔覆技术对铁基Fe90合金进行工艺参数的优化试验, 运用模糊综合评判理论对正交试验参数下各试样的表面质量、硬度和显微组织进行分析和综合评价, 找到了优化后的最佳工艺参数: 激光功率3.3 kW、离焦距70 mm、扫描速度6 mm/s、送粉速率5 g/min。

**关键词:** 激光熔覆; Fe90 合金; 正交试验; 模糊综合评判; 工艺参数

中图分类号: O532.25

文献标示码: A

文章编号: 1007-9289-(2006)05<sup>+</sup>-0154-07

## Optimization of Proceeding Parameters in Laser Cladding Fe-based Alloy

MA Yun-zhe, DONG Shi-yun, XU Bin-shi, HAN Wen-zheng

(National Key Laboratory for Remanufacturing, Beijing 100072 China)

**Abstract:** In this paper, the Fe-based alloy coatings were prepared by laser cladding through orthogonal testing of proceeding parameters. The surface quality, micro hardness and microstructure of each sample under orthogonal testing processing parameters were analyzed by judgment of synthesis fuzzy theory. Based the results of judgment of synthesis fuzz method analysis, the optimized parameter were gained: 3.3kW of laser power, 70 mm of space to focus, 6 mm/s of scanning speed, 5g/min of powder feeding flow.

**Key words:** laser cladding; Fe90 alloy coatings; orthogonal testing; judgment of synthesis fuzzy; Proceeding parameters

## 0 引言

与刷镀、电镀、堆焊、热喷涂等传统表面改性技术相比, 激光熔覆技术具有热变形小, 稀释率低, 界面冶金结合、并可在廉价基材上获得高性能(高硬度、耐磨耐蚀、抗氧化、热障性能等)合金熔覆层等显著特点, 因此该技术发展潜力巨大, 已成为再制造技术中重要的支撑技术之一<sup>[1-2]</sup>。影响激光熔覆层性能的关键因素是熔覆材料与激光熔覆处理工艺<sup>[3-6]</sup>。目前, 铁基系列合金的激光熔覆技术已相对成熟, 应用的也较为广泛, 与镍基、钴基合金、陶瓷材料等相比, 铁基系列合金不仅可以缓解在技术成本上的压力, 而且在某些方面具有与镍基、钴基合金、陶瓷材料等同样优越的处理性能, 应用前景看好。但前期的研究表明<sup>[7-11]</sup>, 在不同工艺参数下, 铁基合金熔覆层存在质量不好控制、易产生裂纹、气孔、夹杂、硬度不均等问题。针对此问题,

文中采用激光熔覆工艺参数的正交试验方法, 从表面质量、硬度试验、组织分析三方面入手, 通过模糊综合评价的方法, 找出影响上述三方面的主要影响因素及其显著程度, 优化出最佳的工艺参数, 解决铁基合金激光熔覆中存在的裂纹、气孔、硬度不均等问题。

## 1 试验材料和方法

### 1.1 试验材料

基体选用退火态45钢, 试样尺寸50 mm×10 mm×10 mm, 试验前用砂纸打磨, 并丙酮液中超声波清洗, 除去附着在表面的铁锈、油污等杂质。熔覆材料选择北京矿冶研究总院产Ni60和Fe90两种常用的自熔性合金粉末, 分别在球磨机里机械搅拌, 混合均匀后, 80 °C干燥2 h后待用。合金粉末的成分见表1。

### 1.2 试验设计

试验采用北京工业大学激光工程研究院TASC500型CO<sub>2</sub>激光器配合五轴联动机床, 焦距为270 mm的无氧铜抛物线聚焦镜, PFL-IA型侧向气动

收稿日期: 2006-08-02; 修回日期: 2006-09-20

基金项目: \*国家自然科学基金项目(50505052); 装备维修研究与改革项目(编号略)

作者简介: 马运哲(1980-), 男, 山东滕州人, 硕士研究生。

式压缩氮气同步送粉，氩气保护熔池。

表1 激光熔覆粉末成分表

Table 1 The chemical compositions of laser cladding alloy powder

粉末	成分(wt%)						粒度
	C	Cr	B	Si	Ni	Fe	
Fe90	0.15~	12~	1.5~	1.0~			-140+
	0.20	15	2.0	1.5		Bal	325目

针对影响送粉式激光熔覆熔覆层性能最突出的四种工艺参数（激光功率，光斑直径，扫描速度和送粉速率），制定了四因素三水平，试验次数为9的 $L_9(3^4)$ 正交表，如表2所示。

表2 正交试验

Table 2 Orthogonal testing

试验号	因素和水平			
	P	L	$V_b$	$V_f$
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

为确定各参数水平值，首先在 A3 钢基体上进行多次摸索试验，以制备出成型良好、无宏观裂纹熔覆层的工艺参数为第二水平值，对各参数前后浮动一定范围，制定出第一和第三水平值，如表3所示。

表3 Fe90合金正交试验各因素水平

Table 3 Elements level of orthogonal testing of Fe90 alloy

水平	1	2	3
激光功率 P/kW	3.0	3.3	3.6
离焦距 L/mm	60	70	80
扫描速度 $V_b$ / (mm/s)	4	5	6
送粉速率 $V_f$ / (g/min)	5	6	7

### 1.3 试样制备

在每个基体试样采用一组正交试验参数进行单道熔覆。试验后，采用线切割沿熔覆方向的横截面切割成块状试样，经过镶嵌、砂布粗磨、砂纸细磨、机械抛光和超声波清洗，采用4%硝酸酒精轻腐蚀3~5s的试样进行显微硬度测试；采用王水腐蚀6~10s的试样进行金相观察和组织分析。

### 1.4 分析仪器

采用体式显微镜观察表面形貌，用Olympus光学显微镜和Quant 200型SEM扫描电子显微镜分析熔覆层的组织特征，用HVS-1000数显显微硬度计测量从熔覆层到基体的硬度分布。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 表面质量与分析

Fe90试样表面质量对比分析的结果如表4所示：

表4 Fe90激光熔覆层的表面质量评价

Table 4 Judgment of surface quality of Fe90 laser cladding coatings

编号	表面质量评价指标				
	表面成型	表面氧化	飞溅	裂纹	气孔
1	成型最好，平整光滑	氧化严重	少量	无	无
2	成型良好，少有未熔，平整	氧化严重	少量	无	无
3	成型良好，少有未熔，平整	少有氧化	少量	无	无
4	成型良好，未熔较多，平整	氧化严重	少量	无	无
5	成型最好，平整光滑	少有氧化	微量	无	无
6	成型最好，平整光滑	氧化严重	少量	无	无
7	成型良好，少有未熔，平整	氧化严重	少量	无	无
8	成型良好，未熔较多，平整	氧化严重	少量	无	无
9	成型最好，平整光滑	氧化严重	微量	无	无

通过体视显微镜观察，在试验的九组试样中，所有试样均不存表面裂纹和气孔，说明选配的工艺参数范围与材料有相对较好的匹配性。Fe90 合金熔覆层多数具有良好的成型性来看，分析主要是由于 Fe90 合金中合金含量较少，与基体 45 钢易于润湿，熔池反应充分，流动性强，因此外观成型性好。

同时在表中可看出，Fe90 的抗氧化性较差，这与 Fe 基合金的主要组成元素 Fe 抗氧化性弱有关。另外，由于熔池反应中生成的气体都很少，难以在表层聚集爆破，所以表面基本上没有飞溅。

### 2.2 硬度试验结果与分析

硬度试验是在 HVS-1000 型数显硬度计上进行试验，试验力为 0.98 N (100 g)，试验力的保持时间为 15 s。在测试点中，第一点的位置位于熔覆层内距结合界面 0.1 mm 处，以后各点分别以 0.1 mm 的增量沿垂直于结合界面向熔覆层的方向取点测试。图 1 为 Fe90 激光熔覆层的显微硬度分布图。

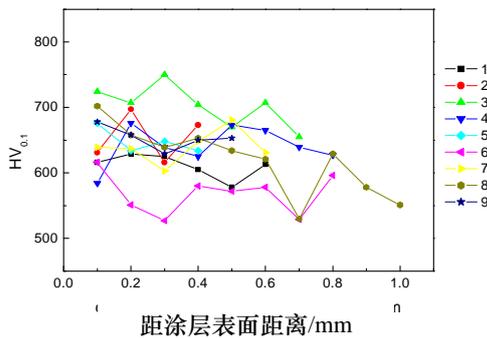


图 1 Fe90 激光熔覆层的显微硬度图

Fig.1 Micro hardness of Fe90 laser cladding coatings

由图 1 可知，在 Fe90 激光熔覆中，同一参数下的熔覆层硬度分布比较均匀，不同的工艺参数可在一定范围内调节硬度水平和分布，而工艺对硬度的影响最终体现在熔覆层组织对硬度的影响上。

表 5 是对影响 Fe90 熔覆层硬度水平的因素显著程度进行的极差和方差分析。

由极差分析与方差分析的结果可知 Fe90 合金激光熔覆中因素与水平影响显著程度如下：扫描速度  $V_b$  是影响激光熔覆硬度水平的最主要因素，其次是激光功率  $P$  和送粉速率  $V_f$ ，最后是光斑直径  $L$  不显著。分析原因主要是因此溶池的冷却速度是影响相变强化的主要因素，而影响冷却速度的主要激

光参数是扫描速度、激光功率等。

表5 Fe90熔覆层硬度水平极差分析与方差分析表

Table 5 Diagram of range analysis and variance analysis of micro hardness level of Fe90 laser clad coatings

试验号	因素和水平				显微硬度/ HV <sub>0.1</sub>
	P/ kW	L/ mm	V <sub>b</sub> / (mm/s)	V <sub>f</sub> / (g/min)	
01	3.0	60	4	5	614.7
02	3.0	70	5	6	652.0
03	3.0	80	6	7	702.4
04	3.3	60	5	7	644.7
05	3.3	70	6	5	641.0
06	3.3	80	4	6	567.7
07	3.6	60	6	6	638.7
08	3.6	70	4	7	620.4
09	3.6	80	5	5	653.7
I <sub>j</sub>	1969.1	1898.1	1808.8	1909.4	
II <sub>j</sub>	1853.4	1913.4	1950.4	1858.4	T=5735.3
III <sub>j</sub>	1912.8	1923.8	1982.1	1967.5	
R <sub>j</sub>	115.7	25.7	173.3	109.1	
S <sub>j</sub>	2231.6	111.4	13327.6	1986.6	S <sub>j</sub> =17657.2

### 2.3 显微组织分析

激光熔覆工艺对熔覆层性能的影响很大程度上反映在对熔覆层组织的影响，找出不同工艺参数下组织的差异是深入分析工艺的影响规律的一个重要内容。由于激光热处理工艺具有快速加热和快速冷却的特点，熔池具有很高的过冷度和冷却速度，因此激光熔覆层的组织主要是非平衡组织。

图2为Fe90合金熔覆层的电镜照片。图3~图11为Fe901-9号试样熔覆层中部的光学显微镜下的显微组织，放大倍率均为500倍。

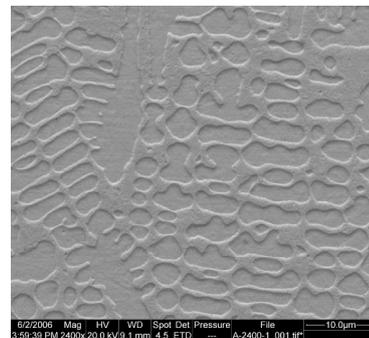


图 2 Fe90 激光熔覆层中部的显微组织形貌

Fig.2 Microstructure morphology of middle part of Fe90 laser clad coating revealed by SEM

由图3~图11可看出, Fe90激光熔覆层的组织主要以白色的低碳马氏体和灰色的残余奥氏体组成。在图3、5、7、8、9、10、11可看到熔覆层的凝固组织呈现出明显的树枝晶形貌, 图2和4则呈现较明显的胞状晶形貌。Fe90合金激光熔覆层中马氏体的晶粒度在几个微米到几十个微米之间, 虽然激光熔

覆层组织中存在较大数量的残余奥氏体, 物理冶金学的角度讲, 残余奥氏体是一种相对软的相, 但在激光熔覆的工艺条件下, 残余奥氏体存在大量的位错缺陷, 并且残留奥氏体存在过饱和的碳微区, 因此激光熔覆层的残余奥氏体是被强化了了的残余奥氏体, 可以使熔覆层的整体硬度得到提高。



图3 1号试样熔覆层组织

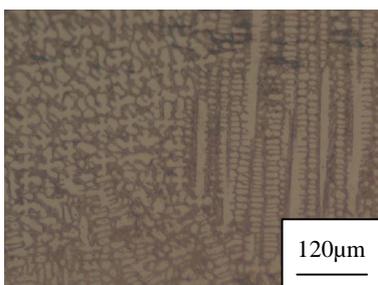


图4 2号试样熔覆层组织



图5 3号试样熔覆层组织

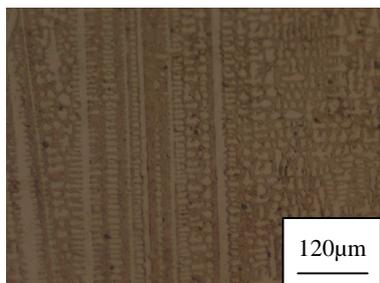


图6 4号试样熔覆层组织



图7 5号试样熔覆层组织



图8 6号试样熔覆层组织

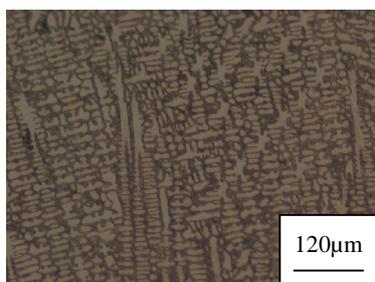


图9 7号试样熔覆层组织



图10 8号试样熔覆层组织

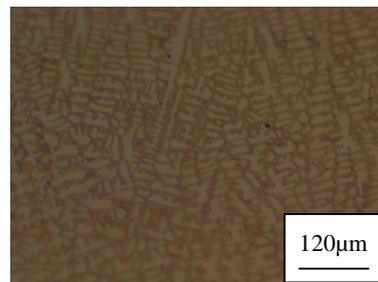


图11 9号试样熔覆层组织

Fig.3 ~ Fig.11 Microstructure of laser clad coatings of samples number 1 to number 9

根据组织的耐磨性可知, 马氏体是一种比较优越的耐磨组织, 在图8、10和图11中的马氏体的方向比较一致, 且粒径小, 数量多, 明显优于其它的试样组织。

### 3 模糊综合评价

采用模糊技术同经典的综合评判理论相结合的模糊综合评判对 Fe90 激光熔覆层的表面质量、

硬度和显微组织三项指标的分析数据进行综合评判。主要方法是通过对各个试样因素集的评语集合, 得到模糊评判矩阵, 经过专家知识和经验得到各评价指标的权数判断矩阵, 然后采用层次分析的方法对权数的一致性指标进行分析, 找到比较客观的各评价指标权重系数。再采用模糊算子进行模糊综合评判<sup>[12-13]</sup>。

#### 3.1 表面质量的隶属评判

在表面质量的综合评价中,根据材料表面改性对表面质量要求的实际情况,并进行CR值判定,确定判断矩阵为:

成型, 氧化, 飞溅

$$P_s = \begin{bmatrix} 1 & 4 & 5 \\ 1/4 & 1 & 2 \\ 1/5 & 1/2 & 1 \end{bmatrix} \begin{matrix} \text{成型} \\ \text{氧化} \\ \text{飞溅} \end{matrix}$$

求得:

$$W_s = (0.6833 \quad 0.1998 \quad 0.11689)^T,$$

$$PW_s = (2.0668 \quad 0.6043 \quad 0.3534)^T$$

$$\lambda_{\max} = 3.0241, \quad CI_s = 0.0121, \quad RI_s = 0.58,$$

CR = 0.0208 ≤ 0.10, 其中下标s代表表面质量。

可知,上述判断矩阵具有较满意的一致性,所以对表面质量的综合评价的权重系数为:

$$W_s = (0.6833 \quad 0.1998 \quad 0.1169)^T$$

在表4对表面质量的模糊语言描述的基础上,采用统一的表面质量隶属评判对照表,评语集合为: {好, 较好, 一般, 较差, 差}, 如表5所示。

表5 表面质量隶属评判对照表

Table5 Judgment table of surface quality of each sample

隶属关系对照	表面指标的评价指标				
	好	较好	一般	差	较差
存在未熔和金属球, 不连续	0	0	0	0.4	0.6
成型差, 表面不平整, 基本连续	0	0	0	0.6	0.4
局部金属成型, 较连续	0	0	0.7	0.3	0
成型良好, 少有不平整, 连续	0.3	0.7	0	0	0
成型好, 稍有不平整, 连续	0.5	0.5	0	0	0
成型好, 表面较平整连续光滑。	0.7	0.3	0	0	0
成型良好, 表面较平整连续光滑。	0.4	0.6	0	0	0
成型最好, 表面平整光滑连续	0.9	0.1	0	0	0
无 (表面氧化)	1	0	0	0	0
基本无 (表面氧化)	0.8	0.2	0	0	0
少有氧化	0.4	0.6	0	0	0
氧化严重	0	0	0	0.1	0.9
无 (飞溅)	1	0	0	0	0
微量 (飞溅)	0.4	0.6	0	0	0
少量 (飞溅)	0	0.3	0.7	0	0

可得1-9号试样的表面质量隶属评判模糊矩阵:

$$\tilde{R}_1 = \begin{bmatrix} 0.9 & 0.1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.1 & 0.9 \\ 0 & 0.3 & 0.7 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \tilde{R}_2 = \begin{bmatrix} 0.4 & 0.6 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.1 & 0.9 \\ 0 & 0.3 & 0.7 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\tilde{R}_3 = \begin{bmatrix} 0.4 & 0.6 & 0 & 0 & 0 \\ 0.4 & 0.6 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.3 & 0.7 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \tilde{R}_4 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0.4 & 0.6 \\ 0 & 0 & 0 & 0.1 & 0.9 \\ 0 & 0.3 & 0.7 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\tilde{R}_5 = \begin{bmatrix} 0.9 & 0.1 & 0 & 0 & 0 \\ 0.4 & 0.6 & 0 & 0 & 0 \\ 0.4 & 0.6 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \tilde{R}_6 = \begin{bmatrix} 0.9 & 0.1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.1 & 0.9 \\ 0 & 0.3 & 0.7 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\tilde{R}_7 = \begin{bmatrix} 0.4 & 0.6 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.1 & 0.9 \\ 0 & 0.3 & 0.7 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \tilde{R}_8 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0.4 & 0.6 \\ 0 & 0 & 0 & 0.1 & 0.9 \\ 0 & 0.3 & 0.7 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\tilde{R}_9 = \begin{bmatrix} 0.9 & 0.1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.1 & 0.9 \\ 0.4 & 0.6 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

根据模糊评判的理论,对表面质量进行一级评判,其评判结果应由权重分配系数矩阵与模糊矩阵进行合成,其中  $\tilde{A}_s = W_s^T = (0.6833 \quad 0.1998 \quad 0.1169)^T$ ,

$\tilde{R}_i$  分别为  $\tilde{R}_1 - \tilde{R}_9$ ,即采用模糊算子对矩阵进行复合

运算  $\tilde{B}_i = \tilde{A}_s \circ \tilde{R}_i$ 。

对合成矩阵进行归一化处理之后为  $\tilde{C}_1 - \tilde{C}_9$ :

$$\tilde{C}_1 = (0.56 \quad 0.10 \quad 0.10 \quad 0.08 \quad 0.16)$$

$$\tilde{C}_2 = (0.28 \quad 0.42 \quad 0.08 \quad 0.07 \quad 0.15)$$

$$\tilde{C}_3 = (0.36 \quad 0.54 \quad 0.10 \quad 0 \quad 0)$$

$$\tilde{C}_4 = (0 \quad 0.09 \quad 0.09 \quad 0.32 \quad 0.50)$$

$$\tilde{C}_5 = (0.77 \quad 0.23 \quad 0 \quad 0 \quad 0)$$

$$\tilde{C}_6 = (0.56 \quad 0.10 \quad 0.10 \quad 0.08 \quad 0.16)$$

$$\tilde{C}_7 = (0.28 \quad 0.42 \quad 0.08 \quad 0.07 \quad 0.15)$$

$$\tilde{C}_8 = (0 \quad 0.09 \quad 0.09 \quad 0.32 \quad 0.50)$$

$$\tilde{C}_9 = (0.62 \quad 0.11 \quad 0 \quad 0.09 \quad 0.18)$$

### 3.2 硬度的隶属评判

由于硬度指标已经量化，对硬度指标的模糊化是采用模糊分布确定隶属关系。其中对最大最小硬度 HV 值采用等差方法进行 4 区间划分，其中最高硬度对好的隶属度为 1，对差的隶属度为 0；最低的硬度对好的隶属度为 0，对差的隶属度为 1，每一区间隶属函数采用降半梯形、三角形和升半梯形分布确定。评语集合为：{好，较好，一般，较差，差}，隶属评判函数见表 6：

表 6 硬度指标的隶属函数对照表

性能模糊评判	隶属函数	HV 的范围
好	1	HV ≥ 797.6
	(x-740.2) / 57.4	797.6 > HV ≥ 740.2
较好	0	HV < 740.2
	0	HV ≥ 797.6
一般	1- (x-740.2) / 57.4	797.6 ≥ HV ≥ 740.2
	(x-682.7) / 57.4	740.2 > HV ≥ 682.7
较差	0	HV < 682.7
	0	HV ≥ 740.2
差	1- (x-682.7) / 57.4	740.2 > HV ≥ 682.7
	(x-625.2) / 57.4	682.7 > HV ≥ 625.2
较好	0	HV < 625.2
	0	HV ≥ 682.7
一般	1- (x-625.2) / 57.4	682.7 > HV ≥ 625.2
	(x-567.8) / 57.4	625.2 > HV ≥ 567.8
较差	0	HV < 567.8
	0	HV ≥ 625.2
差	1- (x-567.8) / 57.4	625.2 > HV ≥ 567.8
	1	HV < 567.8

根据上述隶属函数对硬度试验结果（表 3-4）的各试样的平均硬度值进行模糊评判  $\tilde{D}_i$ ，(i=1, 2, ..., 9)，其中 i 表示试样号。

$$\begin{aligned} \tilde{D}_1 &= (0 \ 0 \ 0 \ 0.26 \ 0.74) & \tilde{D}_2 &= (0 \ 0 \ 0.15 \ 0.85 \ 0) \\ \tilde{D}_3 &= (0 \ 0.11 \ 0.89 \ 0 \ 0) & \tilde{D}_4 &= (0 \ 0 \ 0.11 \ 0.89 \ 0) \\ \tilde{D}_5 &= (0 \ 0 \ 0.09 \ 0.91 \ 0) & \tilde{D}_6 &= (0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1) \\ \tilde{D}_7 &= (0 \ 0 \ 0.07 \ 0.93 \ 0) & \tilde{D}_8 &= (0 \ 0 \ 0 \ 0.29 \ 0.71) \end{aligned}$$

$$\tilde{D}_9 = (0 \ 0 \ 0.16 \ 0.84 \ 0)$$

### 3.3 组织的隶属评判

对显微组织评判的主要原则是组织属于模糊语言描述指标，对组织的评价标准是基于耐磨性，由于 Fe90 得到的是马氏体强化相和残余奥氏体的混合组织，而从金属学的角度讲，韧性相+强化相的多相组织其耐磨性取决于强化相的数量、大小和在基相中的分布状况，强化相数量越多，粒度越小，分布越均匀，组织的耐磨性就越好。反之越差，因此对各试样的金相图谱进行逐一评判。表 7 是显微组织的等级评价表：

表 7 显微组织的等级评价表

评语集	等级组织状况描述
好	组织主要为强化相，数量最多，粒度最小，分布最均匀
较好	组织主要为强化相，数量较多，粒度较小，分布基本均匀
一般	强化相含量较少，粒度一般，分布较均匀，含有少量夹杂
较差	强化相分布不均匀，颗粒较大，组织中有少量的夹杂、气孔或微裂纹
差	强化相数量最少，晶粒粗大，分布最不均匀，存在夹杂、裂纹或气孔

以下是对显微组织的模糊评判  $\tilde{E}_i$ ，(i=1, 2, 3, ..., 9, 01, 02, 03, 04, 05, 06, 07, 08, 09)，其中 i 表示试样号。

评语集合为：{好，较好，一般，较差，差}

$$\begin{aligned} \tilde{E}_1 &= (0.2 \ 0.8 \ 0 \ 0 \ 0) & \tilde{E}_2 &= (0 \ 0.4 \ 0.6 \ 0 \ 0) \\ \tilde{E}_3 &= (0 \ 0 \ 0.6 \ 0.4 \ 0) & \tilde{E}_4 &= (0 \ 0 \ 0 \ 0.4 \ 0.6) \\ \tilde{E}_5 &= (0.4 \ 0.6 \ 0 \ 0 \ 0) & \tilde{E}_6 &= (0.2 \ 0.8 \ 0 \ 0 \ 0) \\ \tilde{E}_7 &= (0 \ 0.8 \ 0.2 \ 0 \ 0) & \tilde{E}_8 &= (0.4 \ 0.6 \ 0 \ 0 \ 0) \\ \tilde{E}_9 &= (0.9 \ 0.1 \ 0 \ 0 \ 0) \end{aligned}$$

### 3.4 模糊综合评判

#### 3.4.1 熔覆层性能综合权重系数

首先确定熔覆试样综合评价的判断矩阵：

$$P_s = \begin{matrix} \text{表面, 硬度, 组织} \\ \begin{bmatrix} 1 & 1/2 & 1/2 \\ 2 & 1 & 1 \\ 2 & 1 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix} \begin{matrix} \text{表面} \\ \text{硬度} \\ \text{组织} \end{matrix}$$

求得  $W_c = (0.22 \ 0.39 \ 0.39)^T$ ,  $PW_c = (0.62 \ 1.44 \ 1.44)^T$

$\lambda_{\max_c} = 3.0182$ ,  $CI_s = 0.0182$ ,  $RI_c = 0.58$ ,  $CR_c = 0.009$ ,

下标 c 代表熔覆层性能。

可见, 上述判断矩阵具有较满意的一致性, 因此, 对熔覆层性能综合评价的权重系数为:

$W_c = (0.22 \ 0.39 \ 0.39)^T$ 。

### 3.4.2 熔覆层性能综合评判

模糊综合评判的因素集: {表面质量, 硬度, 显微组织}, 评语集: {好, 较好, 一般, 较差, 差}。由表面质量评判  $\tilde{C}_i$ , 硬度评判  $\tilde{D}_i$  和显微组织评判  $\tilde{E}_i$ , 得到各试样的模糊矩阵  $\tilde{F}_i$  ( $i=1, 2, 3, \dots, 9$  其中 i 表示试样号)。 $\tilde{F}_i$  矩阵的第一行取值来自  $\tilde{C}_i$ , 第二行取值来自  $\tilde{D}_i$ , 第三行取值来自  $\tilde{E}_i$ 。采用 *zadeh* 算子对模糊矩阵进行复合运算得到评判结果  $\tilde{G}_i$  并做归一化处理 ( $i=1, 2, \dots, 9$ )。得到  $\tilde{G}_i^*$ :  
 $\tilde{G}_1^* = (0.16 \ 0.29 \ 0.07 \ 0.19 \ 0.29)$   $\tilde{G}_2^* = (0.14 \ 0.25 \ 0.25 \ 0.25 \ 0.11)$   
 $\tilde{G}_3^* = (0.18 \ 0.18 \ 0.32 \ 0.32 \ 0)$   $\tilde{G}_4^* = (0 \ 0.09 \ 0.11 \ 0.4 \ 0.4)$   
 $\tilde{G}_5^* = (0.31 \ 0.31 \ 0.07 \ 0.31 \ 0)$   $\tilde{G}_6^* = (0.19 \ 0.33 \ 0.08 \ 0.07 \ 0.33)$   
 $\tilde{G}_7^* = (0.16 \ 0.29 \ 0.15 \ 0.29 \ 0.1)$   $\tilde{G}_8^* = (0.25 \ 0.25 \ 0.06 \ 0.19 \ 0.25)$   
 $\tilde{G}_9^* = (0.32 \ 0.09 \ 0.13 \ 0.32 \ 0.14)$

因此, 对于 Fe90 合金各试样, 虽然 9 号试样好的程度 0.32 为最高, 但较好的程度偏低仅为 0.19, 而 5 号试样好和较好的程度分别为 0.31 和 0.31, 综合的结果优于 9 号试样, 因此, 经过模糊综合评判得 Fe90 合金的激光熔覆试验中的最佳试样为 5 号试样, 其最佳试验工艺参数为: 激光功率  $P$  为 3.3kW、离焦量  $L$  为 70 mm、扫描速度  $V_b$  为 6mm/s、送粉速率  $V_f$  为 5 g/min。

## 4 结 论

(1) Fe90合金在较大的工艺参数变化范围内, 均可得到无裂纹和气孔的激光熔覆层; Fe90激光熔

覆层的表面成型性较好, 但抗氧化性较差。

(2) 影响Fe90合金激光熔覆层硬度的显著程度, 由大到小排列的因素依次为: 扫描速度  $V_b$ , 激光功率  $P$ , 送粉速率  $V_f$ , 光斑直径  $L$ 。

(3) Fe90激光熔覆层的组织主要树枝晶态的马氏体和残余奥氏体组成。

(4) 通过模糊综合评判分析, 优化出激光熔覆试验的最佳工艺参数 Fe90 合金: 激光功率 3.3 kW、离焦量 70 mm、扫描速度 6mm/s、送粉速率 5g/min。

## 参考文献:

[1] 徐滨士, 刘世参. 表面工程新技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.1.  
 [2] 谢明. 材料表面的熔覆技术及展望 [J]. 武汉大学邵阳学院学报, 2004, 9(3): 47-52.  
 [3] 李春彦, 张松, 康煜平, 等. 综述激光熔覆材料的若干问题 [J]. 激光杂志, 2002, 23(3): 5-10.  
 [4] 胡木林, 谢长生, 王爱华, 等. 激光熔覆材料相容性的研究进展 [J]. 金属热处理, 2001, (1): 1-8.  
 [5] 刘喜明, 关振中. 送粉式激光熔覆工艺参数对熔覆层组织性能的影响 [J]. 金属热处理学报. 1999, 2(1): 34-39.  
 [6] 范伟光. 工艺参数对送粉式激光熔覆组织及性能的影响 [J]. 电焊机, 2003, 33(7): 37-39.  
 [7] 刘月龙, 斯松华. 激光熔覆铁基合金涂层研究进展 [J]. 安徽工业大学学报, 2005, 22(4): 348-351.  
 [8] 余菊美. 铁基合金激光熔覆层质量与性能改善的研究 [D]. 郑州: 郑州大学. 2004.  
 [9] 李胜, 胡乾午, 曾晓雁, 等. 激光熔覆专用铁基合金粉末的研究进展 [J]. 激光技术, 2004, 28 (6): 591-594.  
 [10] 刘其斌, 朱维东, 陈江. 高温合金激光熔覆涂层中裂纹防止方法的研究 [J]. 贵州工业大学学报. 2000, 29(5):56-59.  
 [11] 刘喜明, 关振中送粉式激光熔覆获得最佳熔覆层的必要条件及其影响因素 [J]. 中国激光. 1999, 26(5): 470-476.  
 [12] 吴翊, 李永乐, 胡庆军编著. 应用数理统计[M]. 北京: 国防科技大学出版社. 1995.  
 [13] 茆垆编著. 实用模糊数学 [M]. 北京: 科学技术文献出版社, 1989.

作者地址: 北京丰台区杜家坎 21 号 100072

装备再制造工程系

Tel: (010)66718541

Fax: (010)66717144