

# 激光重熔含35%WC的镍基合金涂层

陈忠孝 刘吉茂 崔伟

(大连铁道学院) (大连机车车辆厂)

**摘要** 利用激光束重熔含35%WC的镍基自熔合金涂层时, 为防止WC溶解, 必须采用较低能量密度的激光束重熔涂层。这时重熔层的相组成是块状WC均匀分布在由Ni-Fe-Cr固溶体和CrB、Ni<sub>3</sub>B等组成相组成的基体中。由于固溶体中含Cr量高, 所以激光重熔层在浓度为1.2mol/L的H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>溶液中自腐蚀电位高、自腐蚀电流密度小, 具有较好的耐蚀性。激光重熔层的抗磨粒磨损性能均比火焰重熔层和火焰喷涂层好。

**关键词** 激光束; 激光重熔; 重熔层

## 0 序 言

采用热源集中、加热速度快的激光束快速重熔合金涂层, 具有重熔层性能高、表面光洁、基体受热影响小和工件变形小等优点。所以, 在金属表面强化技术中, 激光重熔涂层的工艺会有很大的发展前途和一定的应用前景。

本文在研究了铁基、镍基、钴基和含25%WC的铁基自熔合金涂层的激光重熔的基础上, 采用5kW的CO<sub>2</sub>激光加工机又重熔了含35%WC的镍基自熔合金涂层, 研究了重熔层的组织组成、化学成分的分布、耐蚀性和抗磨粒磨损性能, 并与火焰喷涂层和火焰重熔层进行了比较, 为使激光重熔技术能在一定领域中推广应用提供了数据。

## 1 试验材料和试验方法

### 1.1 试验材料

基体材料为10mm厚的45号钢板。喷涂或涂覆材料为含35%WC的镍基自熔合金粉末。其化学成分是: 16%Cr、3.5%B、4.5%Si、15%Fe和0.8%C, 其余为Ni。粉末粒度为-150目。

### 1.2 试验方法

用氧乙炔火焰喷涂或在粉末中添加适量粘结剂把合金粉末喷涂或涂覆在45号钢板表面上。涂层厚度为0.3~0.4mm。然后, 用5kW的CO<sub>2</sub>激光加工机重熔涂层。选用能量密度较高和较低的两种重熔工艺参数: (1) 激光功率3.5kW、扫描速度5mm/s、光束宽度4mm; (2) 激光功率2.5kW、扫描速度25mm/s、光束宽度4mm。均采用多道搭接, 搭接宽度为1mm。

为了比较,研究了火焰喷涂层和火焰重熔层的性能。

用光学显微镜观察显微组织、用显微硬度计测量显微硬度、用电子探针分析微区成分、在磨料磨损试验机上进行磨损试验,在普林斯顿332-1型现代腐蚀电化学测量装置上测量极化曲线,研究了重熔层的耐蚀性。

## 2 试验结果及其分析

### 2.1 重熔层的显微组织

图1所示为火焰喷涂层的组织。由图1看出,喷涂层是由粉末颗粒堆积粘接而形成的层状结构,涂层中有气孔(深黑色)和氧化物边界(灰色),WC颗粒(白色)镶嵌在喷涂涂层中。在每个喷涂粉末微粒中,多种硬质相,如Ni或Cr的硼化物弥散地分布在Ni-Cr固溶体基体中<sup>1</sup>。在喷涂层与基材的结合线上可以看到参差不齐的咬合作用。由此不难看出,虽然每个喷涂粉末微粒的显微硬度可能很高,但由于微粒间存在气孔或氧化物边界,显然,相互间的结合强度不会很高,涂层在受磨损过程中,粉末微粒容易脱落。

上述缺陷可采用火焰重熔方法消除,如图2所示。显然,喷涂层中粉末微粒间的气孔或氧化物边界消失。较大的不规则块状WC硬质相(白色)分布在基体中,细小的块状物(白色)为Ni-Cr固溶体,黑色区域为Cr或Ni的硼化物(CrB或Ni<sub>3</sub>B)<sup>2</sup>。

图3所示为激光重熔层的显微组织。从图3看出,能量密度对激光重熔层的显微组织的影响很大。当能量密度较低时,有块状WC硬质相(白色)镶嵌在细小针状奥氏体基体中(图3a)。而当能量密度较高时,块状WC硬质相消失,显微组织主要是树枝状晶(图3b)。所以,激光能量密度过大时,WC将发生熔解,这是激光重熔含WC的合金涂层时应该防止的。

另外,对比火焰重熔层和能量密度较低的激光重熔层的显微组织发现,火焰重熔层的显微组织中黑色区域多,白色区域少;而激光重熔层的显微组织(图3a)中黑色区域少,白色区域多。

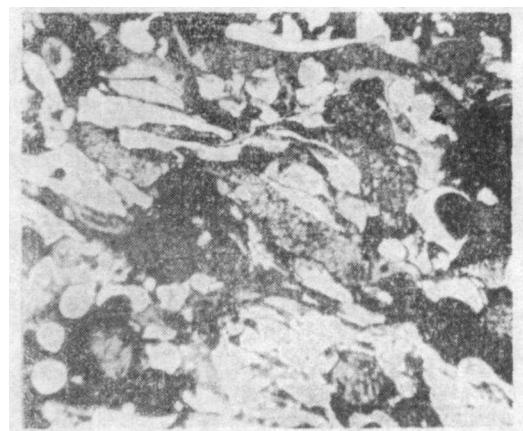


图1 火焰喷涂层组织  $\times 400$   
Fig.1 Microstructure of flame spray coating  $\times 400$

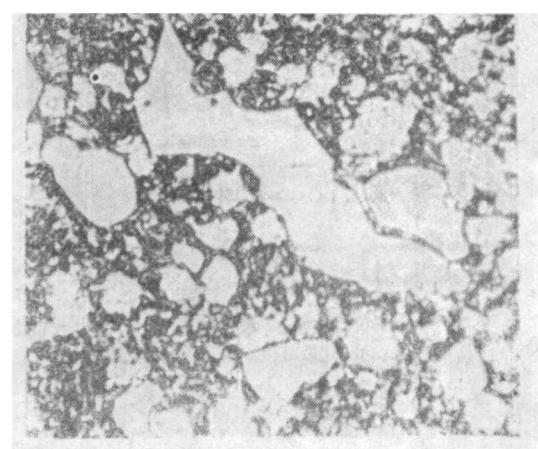
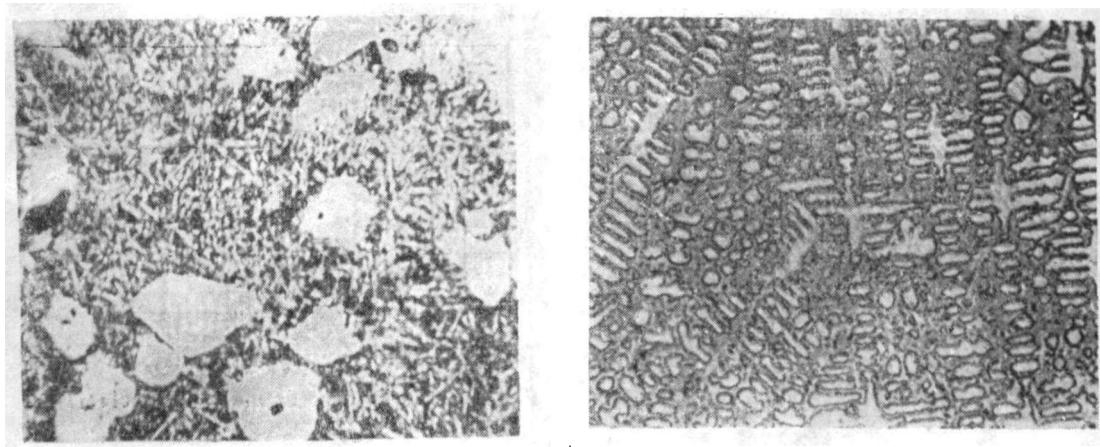


图2 火焰重熔层的显微组织  $\times 600$   
Fig.2 Microstructure of coating remelted by flame  $\times 600$



(a) lower energy density (Power: 2.5kW.  
Travel speed: 25mm/s, Laser beam width: 4mm)

(b) Higher energy density (Power: 3.5kW.  
Travel speed: 5mm/s, Laser beam width: 4mm)

图3 激光重熔层的显微组织  $\times 1000$

Fig.3 Microstructure of coating remelted by laser beam  $\times 1000$

## 2.2 重熔层基体化学成分微区分析

利用电子探针对火焰重熔层和能量密度较低的激光重熔层的基体进行了化学成分的微区分析, 分析的结果列于表1。

表1 重熔层基体化学成分微区分析

Table 1 Chemical composition analysis of the matrix of the remelted coating

remelted coating	Chemical composition (%)				
	B	Si	Cr	Fe	Ni
remelted coating by flame	black zone	7.81	2.44	20.48	12.77
	white zone	3.17	3.05	5.82	78.39
remelted coating by Laser beam	black zone	8.29	2.81	23.37	12.13
	white zone	3.60	4.25	20.12	55.98
					61.35

从表1看出, 无论是火焰重熔层还是激光重熔层, 其基体中的黑色区域除了含Fe外主要含有Ni、Cr和B, 白色区域主要含有Ni、Cr和Fe。对比《焊接金相图谱》中火焰重熔层的金相照片<sup>[3]</sup>以及经过论证认为, 黑色区域是Ni<sub>3</sub>B、CrB与少量奥氏体共晶, 表1中所列Ni、Cr、B的含量是指Ni<sub>3</sub>B、CrB中Ni、Cr、B的含量; 白色区域是Ni-Cr-Fe固溶体。由于激光重熔层的黑色区域(即Ni<sub>3</sub>B、CrB)比火焰重熔层的黑色区域明显减少, 所以在激光重熔层基体固溶体中的含Cr量明显增高。

## 2.3 重熔层的耐蚀性

重熔层表面在腐蚀介质中的腐蚀情况可由重熔层的极化曲线来说明。将激光重熔层、火熔重熔层和火焰喷涂层试样制成电极, 用普林斯顿332-1现代腐蚀电化学装置对重熔层在1.2mol/L的H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>溶液中进行极化曲线测量, 考察其耐蚀性。测量时以铂为辅助电极, 以

饱和甘汞电极为参比电极，测量装置的基本原理如图4所示。

试验所得的极化曲线如图5所示。图5中纵坐标为自腐蚀电位( $E$ )，横坐标为自腐蚀电流密度( $i$ )。从图5看出：(1)激光重熔层的自腐蚀电位最正( $E_2 = -294\text{mV}$ )，火焰重熔层次之( $E_3 = -444\text{mV}$ )，火焰喷涂层的自腐蚀电位最负( $E_1 = -458\text{mV}$ )；(2)激光重熔层的自腐蚀电流密度明显低于火焰喷涂层和火焰重熔层的自腐蚀电流密度。

试验结果表明，激光重熔层在 $\text{H}_2\text{SO}_4$ 溶液中的自腐蚀电位最正，自腐蚀电流密度最小，所以其在 $\text{H}_2\text{SO}_4$ 溶液中的耐蚀性最佳。

特殊性能的材料之所以具有很好的耐蚀性，一方面是由于组成特殊性能材料的元素原子具有很高的稳定性，即不易与腐蚀介质发生作用而溶解；另一方面是材料具有钝化作用<sup>1,4,5</sup>，即在金属表面上形成钝化膜。钝化则表现为腐蚀速度的减缓。而钝化的实质则可理解为微电池中的金属溶解反应被阻止。金属的阳极溶解过程是金属离子从金属相转移到溶解相的过程，如果钝化膜是金属的不良导体，即如果金属离子通过膜层的阻力很大，那么，金属表面一旦形成这层膜，金属阳极溶解过程就会减弱。实验证明，Cr的钝化作用最显著，金属的电极电位越高，生成的表面膜越厚<sup>6,7</sup>。另外，只有固溶在金属中的Cr才能提高金属的电极电位，才能具有钝化作用<sup>8</sup>，如果Cr与其它原子结合生成其它相，那么Cr就失去了提高金属耐蚀性的作用。所以，虽然激光重熔层和火焰重熔层所采用的材料一样，但处理方法不同，所得到的表面层的耐蚀性就不同。一方面是由于Cr在重熔层中的分布不同，钝化作用所形成的表面膜的致密性不同所致。激光重熔层在整个腐蚀界面上能形成比较致密的、钝化作用比较强的钝化膜；另一方面，激光重熔层中的Ni-Fe-Cr固溶体区域中Cr的含量高，提高了该区的电极电位所致。

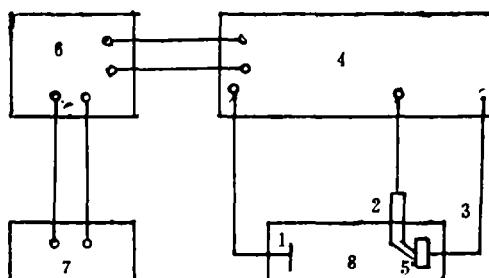


图4 极化曲线的测试系统

Fig.4 The system for measuring polarizing curve

- 1.Pt electrode 2.Saturated calomel electrode
- 3.Analysis electrode 4.Princeton 332-1 system
- 5.Sample 6.Apple I microcomputer 7.Printer
- 8.Electrolytic cell

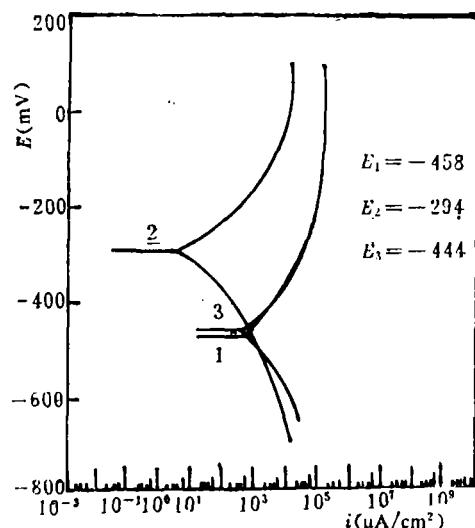


图5 喷涂层和重熔层的极化曲线

(扫描速度3mV/s)

Fig.5 Polarizing curve of spray coating and remelted coating

- 1.Flame spray coating 2.coating remelted by laser beam 3.coating remelted by flame

一方面是由于Cr在重熔层中的分布不同，钝化作用所形成的表面膜的致密性不同所致。激光重熔层在整个腐蚀界面上能形成比较致密的、钝化作用比较强的钝化膜；另一方面，激光重熔层中的Ni-Fe-Cr固溶体区域中Cr的含量高，提高了该区的电极电位所致。

## 2.4 重熔层的硬度和耐磨性

利用显微硬度计测量了块状WC相和重熔层基体的显微硬度。重熔层中WC硬质相的显微硬度HV<sub>50</sub> 1700~1900。重熔层中基体的显微硬度列于表2。

表2 重熔层基体的显微硬度 (HV<sub>50</sub>)

Table 2 Microhardness of the matrix of the remelted coating (HV<sub>50</sub>)

remelted coating	measuring point									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
remelted coating by laser beam	643	726	823	780	666	795	740	820	739	873
remelted coating by flame	566	1028	473	396	1072	321	302	766	372	1300

从表2看出, 激光重熔层基体的硬度分布比较均匀, 在HV<sub>50</sub> 813~666之间; 而火焰重熔层基体的硬度分布很离散, 最高为HV<sub>50</sub> 1300, 最低为HV<sub>50</sub> 302。

为了比较重熔层和喷涂层的磨粒磨损情况, 在ML-10磨粒磨损试验机上进行了低应力磨粒磨损试验。用400号金相砂纸作为磨料, 施加5N的压力, 进行了磨损试验。用电光天平称取磨损试样的失重。磨粒磨损试件如图6所示。

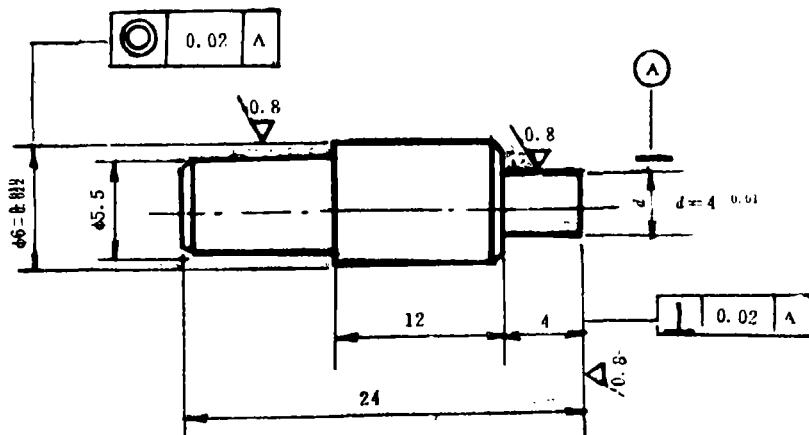


图6 磨粒磨损试件

Fig. 6 Sample for particle erosion test

试验结果以试验次数—失重为坐标轴绘成图7。由图7看出, 含35%WC的镍基自熔合金重熔层的抗磨粒磨损性能最好。

## 3 结 论

(1) 用激光束重熔含WC的自熔合金涂层时, 为防止WC熔解必须选用较低的激光能量密度。

(2) 激光重熔含WC的镍基自熔合金涂层的重熔层的相组成, 是块状WC硬质相均匀分布在由Ni-Fe-Cr固溶体和硼化物组成的基体中。

(3) 由于固溶体中含Cr量高, 激光重熔层在浓度为1.2mol/L的H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>溶液中耐腐蚀

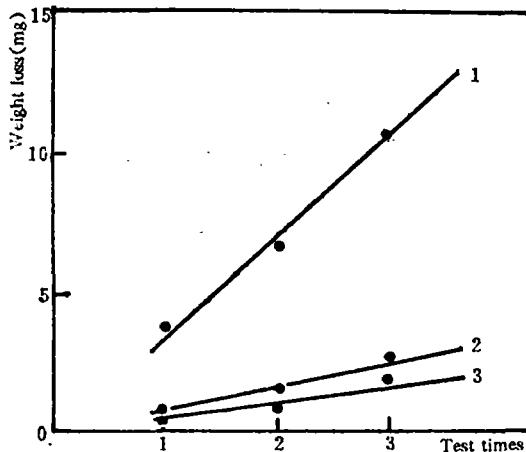


图7 重熔层和喷涂层磨粒磨损曲线

Fig.7 Particle erosion curves of remelted coating and spray coating

1. Flame spray coating 2. coating remelted by flame 3. coating remelted by laser beam  
(Lower energy density)

电位高, 自腐蚀电流密度小, 具有较好的耐蚀性。

(4) 激光重熔层的抗磨粒磨损性能优于火焰重熔层和火焰喷涂层。

(1992年6月19日收到修改稿)

### 参考文献

1. 韦福水. 热喷涂技术. 北京: 国防工业出版社, 1978.131~137
2. 郭治安等. 合金粉末氧乙炔火焰喷涂与喷熔. 北京: 煤炭工业出版社, 1985.96~98
3. 斯重遥等. 焊接金相图谱. 北京: 机械工业出版社, 1987.
4. 王建安. 金属学与热处理(下册). 北京: 机械工业出版社, 1980.173
5. 魏宝明等. 金属腐蚀理论及应用. 北京: 化学工业出版社, 1984.179~180
6. 曹楚南. 腐蚀电化学原理. 北京: 化学工业出版社, 1986.332
7. [苏] 托马晓夫. 腐蚀与耐腐蚀合金. 晋铁梁等译. 北京: 化学工业出版社, 1982.12~20
8. 于福州. 金属材料的耐腐蚀性. 北京: 科学出版社, 1982.15~22

**Coating of nickel base alloy containing  
35% WC remelted by laser beam**

*Chen Zhongxiao, Liu Jimao*

*(Dalian Railway Technology Institute)*

*Cui Wei*

*(Dalian Locomotive and Rolling Stock Works)*

**Abstract** The energy density of laser beam should be low to avoid dissolving of WC, when remelting the coating of nickel base alloy containing 35% WC. The microstructure of the remelted coating is that the block-like WC phase is evenly distributed over the matrix of Ni-Fe-Cr solid solution, CrB and Ni<sub>3</sub>B. The coating has higher self-corrosion potential, lower self-corrosion current density and better corrosion resistance because of the higher Cr content in the solid solution. The particle erosion resistance of the coating remelted by laser beam is better than that of the coating remelted by flame or that of the coating sprayed by flame.

**Key words** laser beam; laser remelting; remelted coating