

## 激光表面处理对马氏体不锈钢堆焊层组织与性能的影响

邓德伟<sup>1</sup>, 李振华<sup>1</sup>, 陈文博<sup>1</sup>, 汪红所<sup>1</sup>, 孙磊<sup>2</sup>

(1. 大连理工大学 材料科学与工程学院 辽宁省激光3D打印装备及应用专业技术创新中心, 辽宁 大连 116024;  
2. 大连船用阀门有限公司, 辽宁 大连 116026)

**摘要:**为有效修复 FV520B 钢表面损伤,并提升修复后表面的耐腐蚀性能,尝试采用先堆焊,再进行激光表面处理的方法,即先采用明弧摆动堆焊方法,在 FV520B 钢基材上使用马氏体型药芯焊丝进行堆焊,并分别采用两种激光(半导体激光和光纤激光)对堆焊后的表面进行激光表面处理。研究了堆焊层的显微组织、硬度,堆焊层与基材的元素分布情况,以及经过激光表面处理后堆焊层的显微组织、硬度、耐腐蚀性和激光作用深度。研究表明,堆焊层由马氏体、 $\delta$ -铁素体、残留奥氏体和碳化物构成,硬度约为 480 HV0.3,相比基材提高了约 33.33%,堆焊层与基材之间冶金结合良好。经过激光表面处理后,堆焊层分为原始堆焊区、热影响区和重熔区。在热影响区,硬度会下降,这与激光表面处理的回火作用有关;在重熔区,硬度与原始焊接区相当。浸泡试验结果表明,激光表面处理提高了堆焊层的耐腐蚀性。随着扫描速度的降低,激光的作用深度会增加,但硬度变化不大。相对于光纤激光器,半导体激光器的作用深度更大,但两种激光处理后的表面硬度基本相同。

**关键词:** FV520B 钢;堆焊;激光表面处理;组织;硬度

**中图分类号:** TG178 **文献标志码:** A **文章编号:** 0254-6051(2024)03-0056-08

**DOI:** 10.13251/j.issn.0254-6051.2024.03.010

## Effect of laser surface treatment on microstructure and properties of martensitic stainless steel surfaced layer

Deng Dewei<sup>1</sup>, Li Zhenhua<sup>1</sup>, Chen Wenbo<sup>1</sup>, Wang Hongsuo<sup>1</sup>, Sun Lei<sup>2</sup>

(1. Technology Innovation Centre for Laser 3D Printing Equipment and Applications (Liaoning Province), School of Materials Science and Engineering, Dalian University of Technology, Dalian Liaoning 116024, China;  
2. Dalian Marine Valve Co., Ltd., Dalian Liaoning 116026, China)

**Abstract:** In order to effectively repair the surface damage of FV520B steel and improve the corrosion resistance of the repaired surface, the method of surfacing followed by laser surface treatment was applied, i. e., surfacing was first performed by open-arc swing cladding method with martensitic-type flux-cored wires on the base material of the FV520B steel, and laser surface treatment was performed on the surfaced layer with two types of lasers (semiconductor and fibre optic lasers), respectively. The microstructure and hardness of the surfaced layer, the elemental distribution between the surfaced layer and the base material, as well as the microstructure, hardness, corrosion and depth of laser effects of the surfaced layer after laser surface treatment were investigated. The results show that the surfaced layer consists of martensite,  $\delta$ -ferrite, retained austenite and carbide, and the hardness is about 480 HV0.3, which is about 33.33% higher than the base material, and the metallurgical bonding between the surfaced layer and the base material is well established. After laser surface treatment, the surfaced layer is categorised into the original surfaced zone, the heat affected zone and the remelted zone. In the heat affected zone, the hardness decreases, which is related to the tempering effect of the laser surface treatment, in the remelted zone, the hardness is comparable to the original surfaced zone. The results of the immersion experiments show that the laser surface treatment improves the corrosion resistance of the surfaced layer. As the scanning speed decreases, the depth of laser action increases, but the hardness does not change much. Compared with the fibre laser, the semiconductor laser has a greater depth of effect, but the surface hardness after both laser treatments is basically the same.

**Keywords:** FV520B steel; surfaced; laser surface treatment; microstructure; hardness

收稿日期:2023-09-15

修订日期:2024-01-13

基金项目:高端阀产业技术协同创新中心基金(2022DMV003);辽宁省激光3D打印装备及应用专业技术创新中心基金(DUT2022031)

作者简介:邓德伟(1974—),男,副教授,博士,主要研究方向为高端装备再制造、材料表面工程及金属3D打印等,E-mail:deng@dlut.edu.cn

引文格式:邓德伟,李振华,陈文博,等.激光表面处理对马氏体不锈钢堆焊层组织与性能的影响[J].金属热处理,2024,49(3):56-63.

Deng Dewei, Li Zhenhua, Chen Wenbo, et al. Effect of laser surface treatment on microstructure and properties of martensitic stainless steel surfaced layer[J]. Heat Treatment of Metals, 2024, 49(3): 56-63.

叶轮是离心压缩机高速旋转的重要部件,在工作中受力复杂。FV520B 钢是一种由英国 Firth-Vickers 材料研究室研究开发的新型低碳马氏体沉淀硬化不锈钢。该钢种在马氏体不锈钢中加入 Cu 等沉淀硬化元素,实现了弥散强化、固溶强化和相变强化,具有优良的耐腐蚀性和焊接性,较高的强度和硬度,广泛用于风机叶轮制造。由于叶轮经常在含有硫化物等腐蚀介质的环境下工作,加上复杂的受力情况,经常发生失效。这种零件制造周期长,丢弃造价高,因此对失效的零件进行再制造修复可有效提高装备的利用率,降低生产成本,提高经济效益<sup>[1-5]</sup>。堆焊是一种熔化焊接方法,其目的是在零部件表面堆焊相同或者不同的材料,以用来对材料表面进行修复和强化。堆焊具有经济且快速的优点,目前已广泛用于零件表面修复和改性<sup>[6-8]</sup>。

激光表面处理(Laser surface treatment, LST)是一种表面处理技术,其具有快速加热并冷却、可精确控制、处理后工件变形小、易操作等特点。当激光束辐射到材料表面时,与材料的相互作用分为几个阶段:激光被材料吸收变为能量、表层材料受热升温、发生固态相变或熔化、辐射移去后材料冷却。根据激光作用于材料表面时的功率密度、时间及方式的不同,激光表面处理又分为激光表面重熔<sup>[9]</sup>(Laser surface remelting, LSR)、激光

表面淬火<sup>[10]</sup>(Laser surface quenching, LSQ)、激光表面合金化<sup>[11]</sup>(Laser surface alloying, LSA)和激光表面熔覆<sup>[12]</sup>(Laser surface cladding, LSC)等。

随着激光技术的不断发展,研究激光表面处理对涂层的作用日益增多<sup>[13-17]</sup>,激光表面处理多用来改善材料的组织与性能,但目前国内关于激光表面处理对马氏体不锈钢堆焊层影响的研究不多,目前工业界存在着大量的 FV520B 钢工件再制造需求,但未见能够确保修复表面硬度和耐蚀性的方法报道。为有效修复 FV520B 钢表面损伤,并提升修复后表面的耐腐蚀性能,尝试采用先堆焊,再进行激光表面处理的方法,即先采用明弧摆动堆焊方法,在 FV520B 钢基材上使用马氏体型药芯焊丝进行堆焊,并分别采用两种激光(半导体激光和光纤激光)对堆焊后的表面进行激光表面处理。研究了堆焊层的显微组织与硬度,以及激光表面处理对堆焊层组织及其硬度和耐蚀性的影响,以期探索 FV520B 钢的高品质修复方案。

## 1 试样材料与方法

本试验采用明弧摆动堆焊在热轧态 FV520B 钢板上进行堆焊, FV520B 钢基板尺寸为 200 mm × 120 mm × 10 mm,焊丝是 YD421-O 钢,基板和焊丝的化学成分如表 1 所示。

表 1 基板 FV520B 钢及药芯焊丝 YD421-O 钢的化学成分(质量分数, %)

Table 1 Chemical composition of the substrate FV520B steel and flux-cored welding wire YD421-O steel (mass fraction, %)

钢号	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	V	Ti	Fe
FV520B	0.05	0.36	0.52	0.027	0.027	13.72	1.44	5.65	1.71	0.05	0.01	Bal.
YD421-O	0.152	0.53	1.39	0.017	0.006	12.85	1.08	0.25	—	0.26	—	Bal.

堆焊后试样实物图如图 1 所示,堆焊后使用线切割机取样(试样尺寸为 35 mm × 10 mm × 15 mm),取样示意图如图 2 所示,除油,进行砂纸打磨(200 ~ 1500 号)和抛光,腐蚀试剂为 Marble's(50 mL H<sub>2</sub>O + 50 mL HCl + 10 g CuSO<sub>4</sub>),腐蚀时间约 6 s,腐蚀之后进行显微组织观察、硬度测量及扫描电镜观察。本文使用的激光表面处理系统示意图如图 3 所示。激光表面处理系统包括激光产生器、机器人控制臂、激光熔覆头以及工业氩气瓶、压力泵、水冷机等辅助设备。半导体激光产生器的型号为 LDF4000-100,波长范围为 900 ~ 1070 nm,激光输出功率为 4 kW,工作模式有连续和脉冲两种,配备 YC52 同轴激光熔覆头,激光焦距为 15 mm,聚焦光斑直径为  $\phi$ 3 mm。光纤激光产生器的型号为 FFSC-4000F,波长范围 1075 ~ 1085 nm,激光输出功率 4 kW,工作模式为连续和调制两种,配备 LW403A 激光熔覆

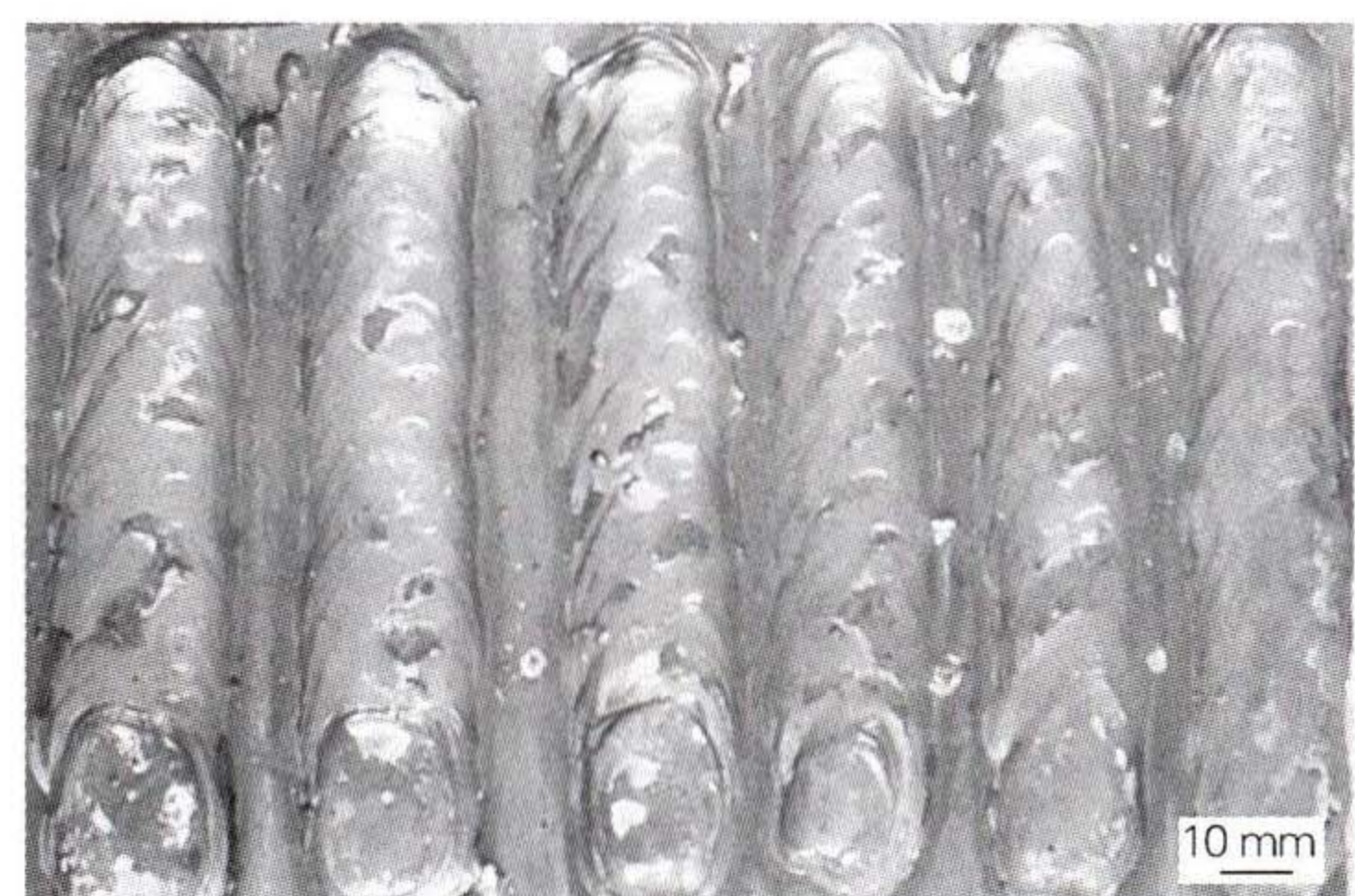


图 1 堆焊后试样实物图

Fig. 1 Real picture of the specimen after surfacing welding

头,激光焦距为 180 mm,有效光斑为  $\phi$ 15 mm。激光表面处理试验参数如表 2 所示, M1-M5 试样采用半导体激光器进行处理,激光功率为 500 W,扫描速度如表 2 所示, L1-L5 试样采用光纤激光器进行处理,激光功率

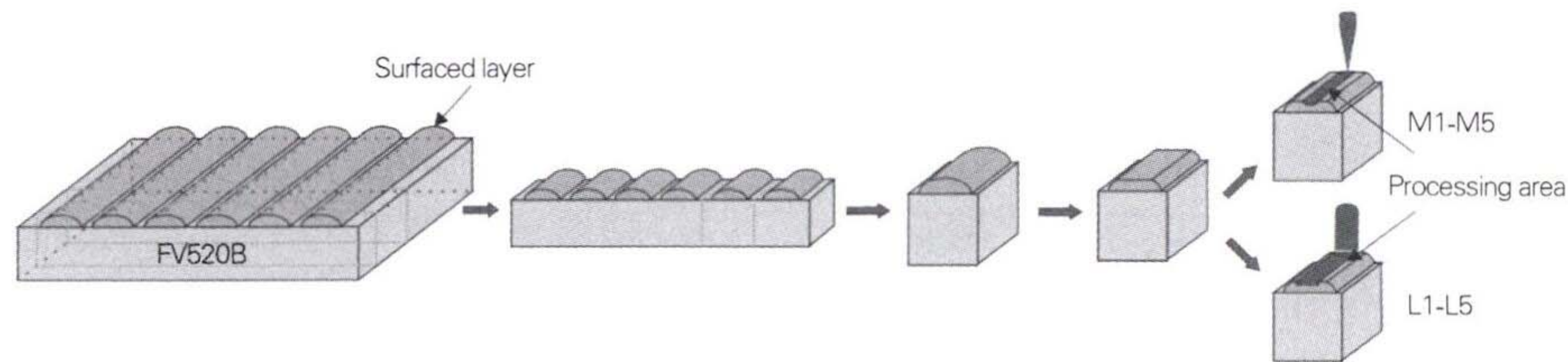


图 2 取样示意图

Fig. 2 Sampling diagram

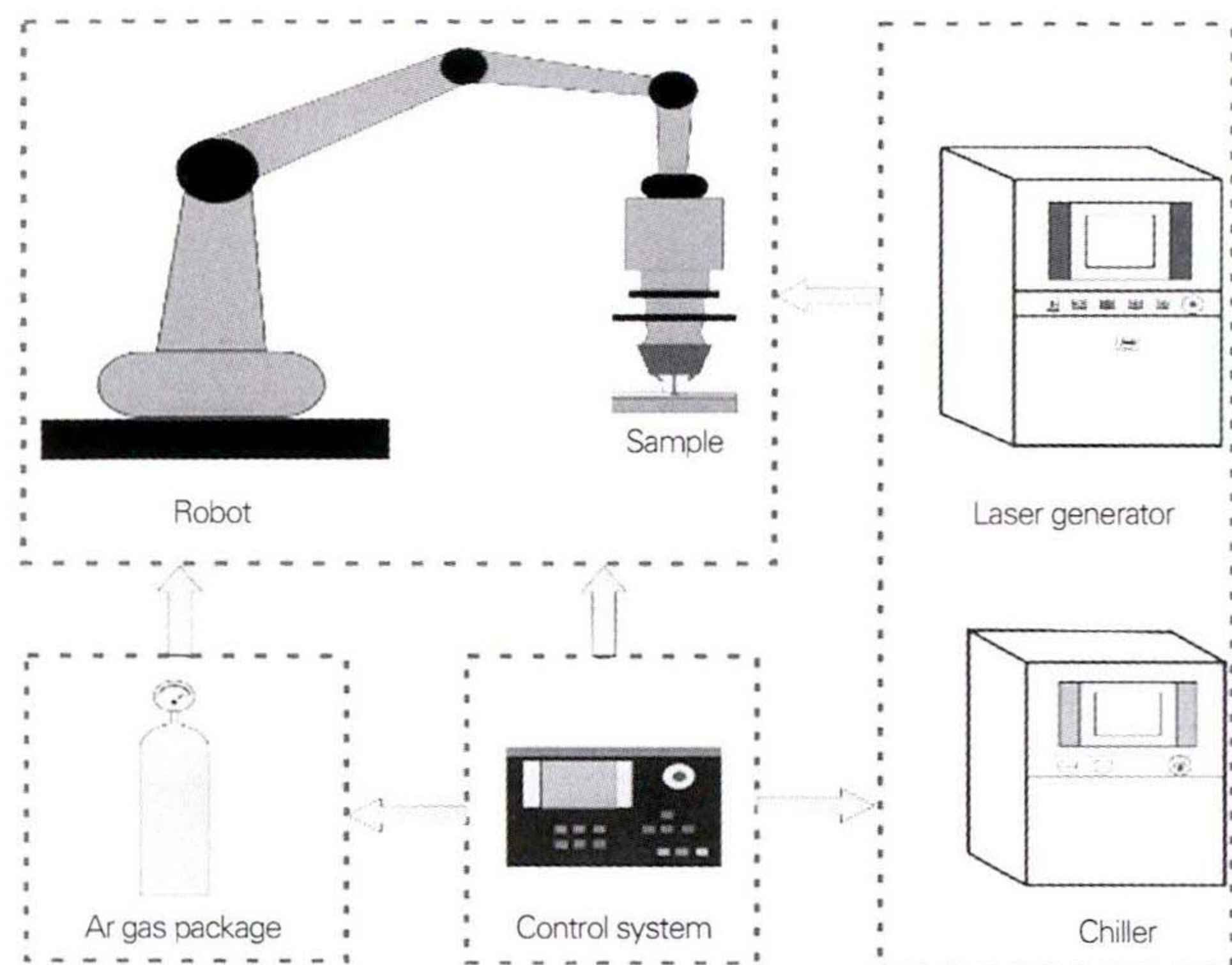


图 3 激光表面处理系统示意图

Fig. 3 Schematic diagram of laser surface treatment system

表 2 激光表面处理参数

Table 2 Laser surface treatment parameters

试样编号	激光功率/W	扫描速度/(mm · s <sup>-1</sup> )
M1	500	2
M2		4
M3		6
M4		8
M5		10
L1	2500	2
L2		4
L3		6
L4		8
L5		10

为 2500 W,扫描速度如表 2 所示。试验过程中持续通入 99.9% 的氩气。将激光表面处理之后的试样切取横截面进行打磨抛光至镜面,利用 Marble's 试剂进行腐蚀,腐蚀时间约为 6 s,腐蚀之后进行显微组织观察、硬度测量及扫描电镜观察。采用 Nikon-MA100 型光学显微镜(Optical microscope, OM)观察试样的显微组织,采用 MV-1000Z 型维氏硬度计测量试样硬度,载荷

砣码为 300 g,施压 10 s。利用 ZEISS EVO-18 型扫描电镜(Scanning electron microscope, SEM)对试样的组织形貌进行观察,利用能谱仪(Energy dispersive spectroscopy, EDS)对试样的元素分布进行检测。将 FV520B 钢、堆焊试验钢、激光表面处理试验钢,每种各 3 个平行试样,试验钢尺寸为 10 mm × 10 mm × 12 mm,试验钢用镶样剂封住,只露出外表面,使用质量分数为 10% 的盐酸进行室温浸泡腐蚀,腐蚀时间为 24 h。使用游标卡尺测量露出的外表面的长和宽,计算表面积。使用电子天平称量腐蚀前后试样钢质量。

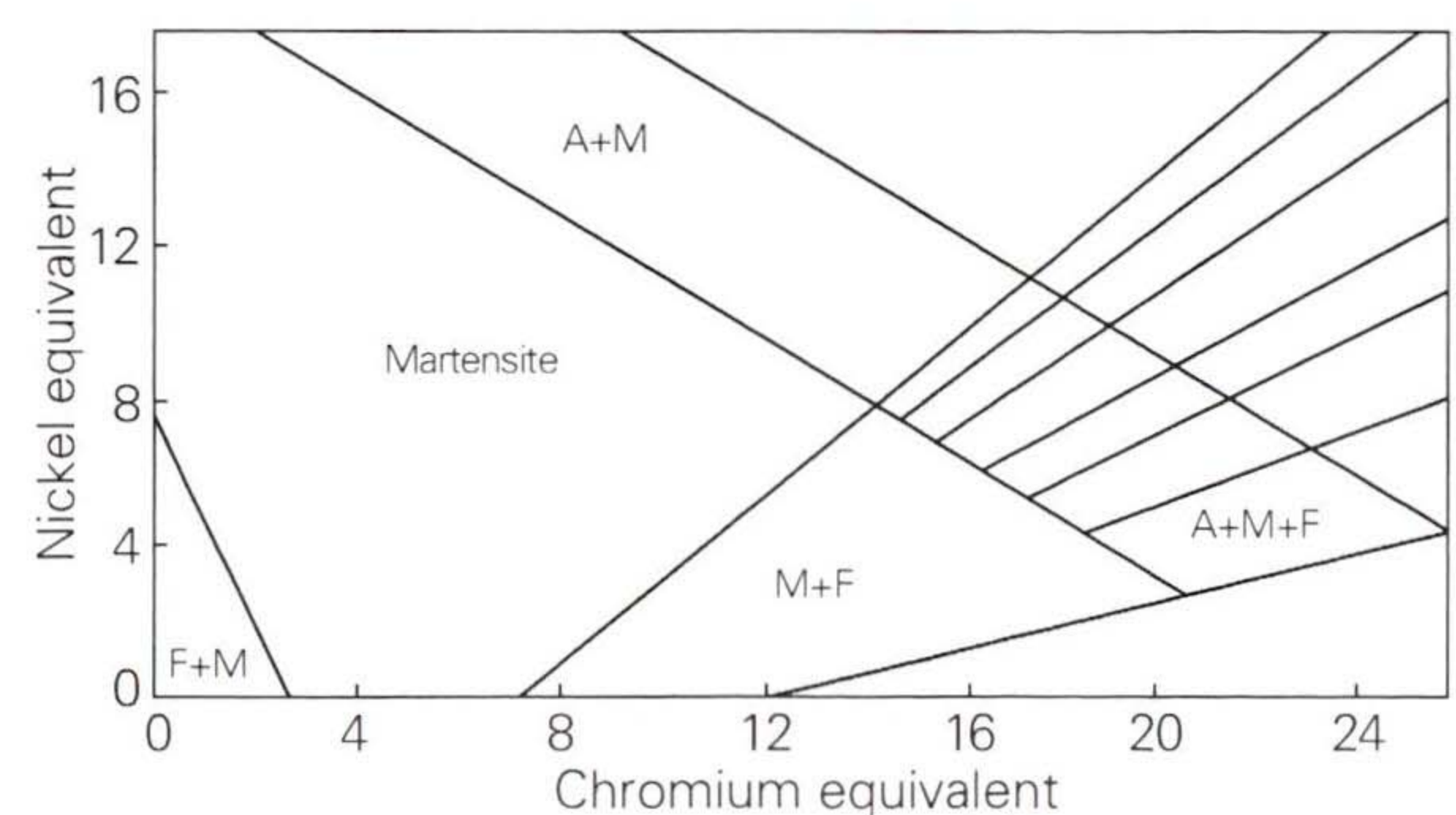
## 2 试验结果与讨论

### 2.1 堆焊后微观组织

根据 Schaeffler 图预测焊态下堆焊层的微观结构, Schaeffler 图(见图 4)的铬和镍当量( $Cr_{eq}$  和  $Ni_{eq}$ )由公式(1)和公式(2)计算,根据计算结果  $Cr_{eq} = 14.73$  和  $Ni_{eq} = 5.51$ ,可以预测焊态下堆焊层的组织为马氏体和铁素体。结合图 5 堆焊层的组织形貌,可知堆焊层由马氏体、 $\delta$ -铁素体、残留奥氏体及碳化物构成<sup>[18]</sup>。

$$Cr_{eq} = Cr + Mo + 1.5 \times Si + 0.5 \times Nb \quad (1)$$

$$Ni_{eq} = Ni + 30 \times C + 0.5 \times Mn \quad (2)$$

图 4 Schaeffler 图<sup>[18]</sup>Fig. 4 Schaeffler diagram<sup>[18]</sup>

为研究堆焊层和基体的元素扩散情况,利用 EDS 的线扫描功能进行垂直于熔合线附近的元素检测,结果如图 6 所示。可以看到, Ni 元素在熔合线处由堆焊层到基体有增加的趋势,这是因为堆焊层相对于基体

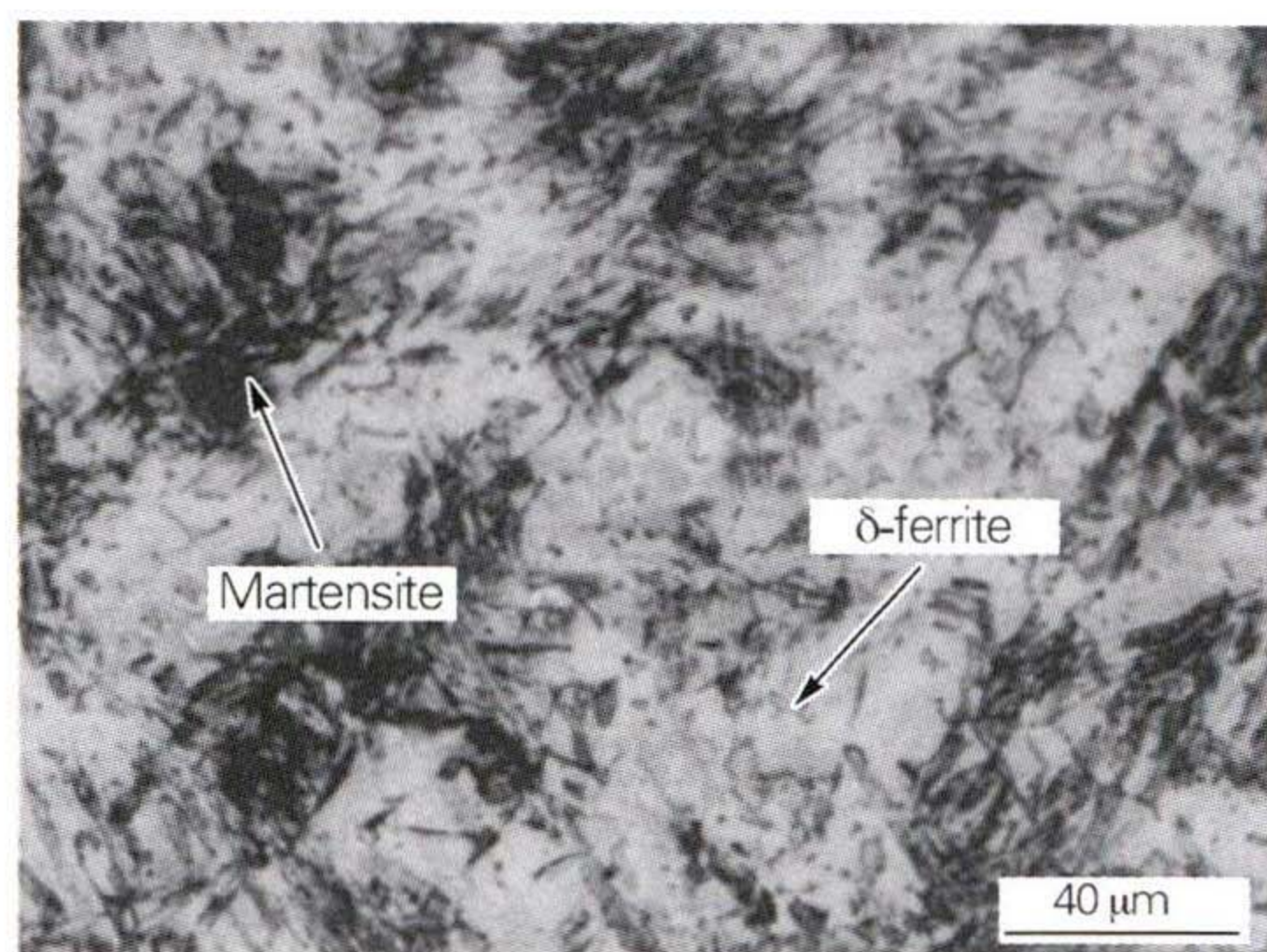


图5 堆焊层微观组织

Fig.5 Microstructure of the surfaced layer

的Ni元素含量较低,且Ni元素增加的趋势比较平缓,没有出现陡增的现象,可知堆焊层与基体之间形成了良好的冶金结合。

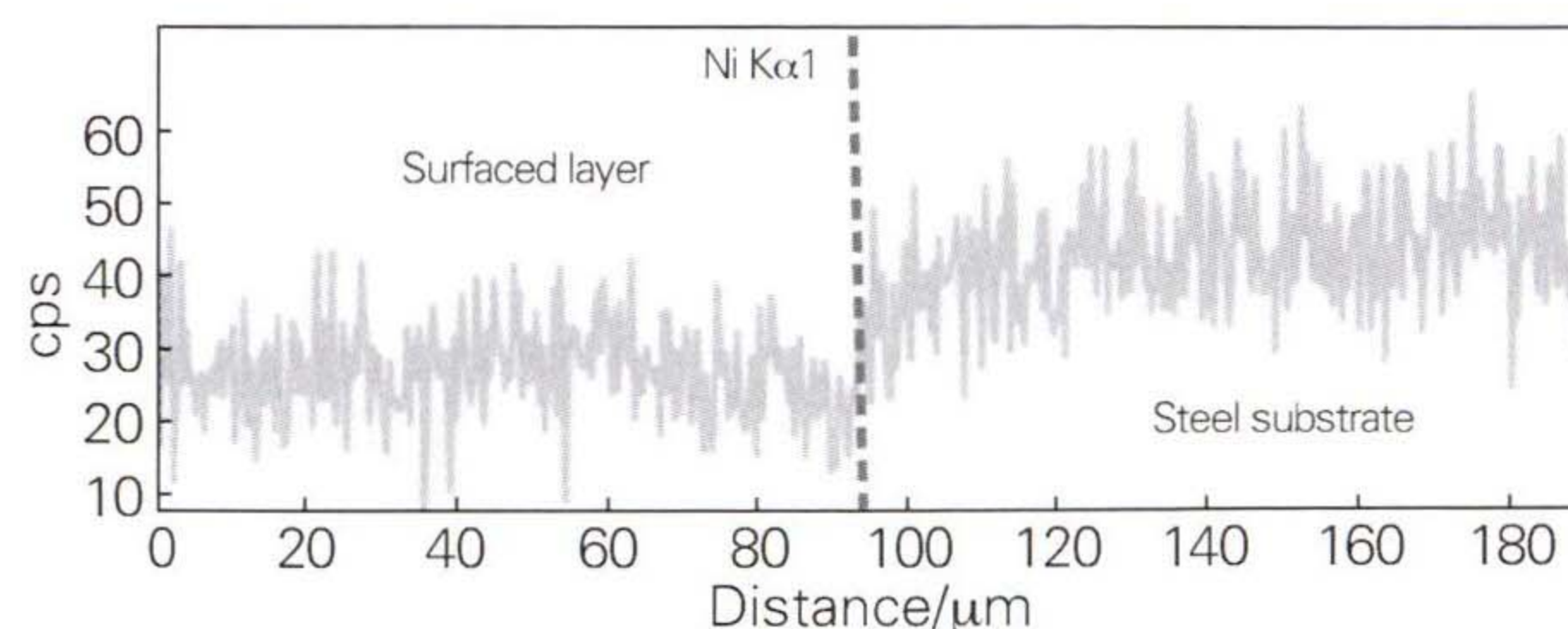


图6 试验钢堆焊后熔合线处元素分布

Fig.6 Element distribution at fusion line of the tested steel after surfacing welding

## 2.2 激光表面处理后的微观组织

图7为经扫描速度6 mm/s的半导体激光器表面处理之后试验钢的微观组织。可以观察到经激光表面处理,原焊态下的组织产生两个新的分区,分别为重熔区(Laser remelted zone, LRZ)、热影响区(Heat

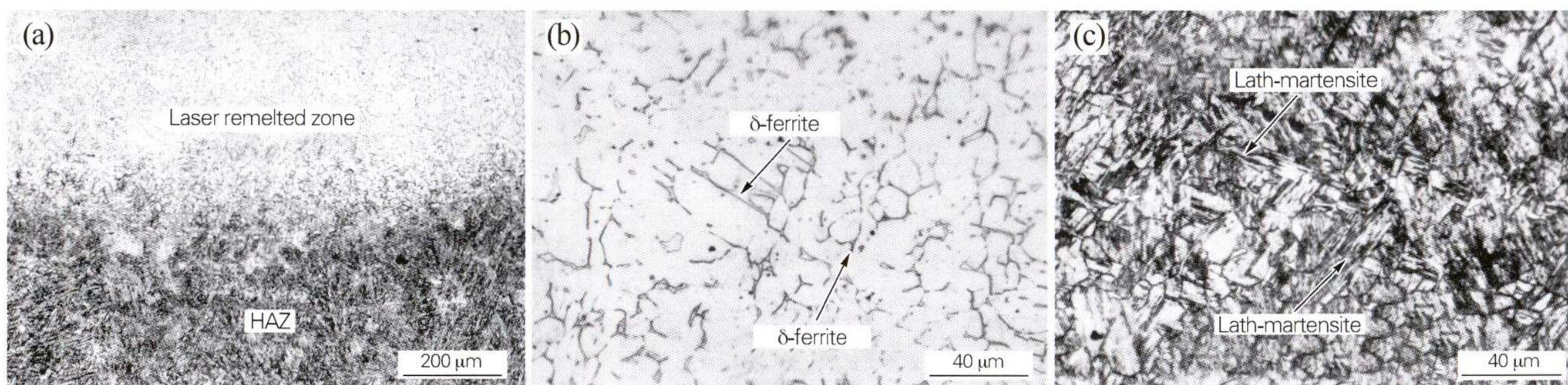


图7 经扫描速度6 mm/s的半导体激光器表面处理后堆焊层的截面微观组织

Fig.7 Microstructure in cross-section of the surfaced layer after surface treatment by semiconductor laser with scanning speed of 6 mm/s

affected zone, HAZ),如图7(a)所示。表明从外表面到堆焊层的不同区域,在激光处理时的热循环和峰值温度均有所不同。重熔区与热影响区交界为弧形,这与此类激光器输出的激光束能量分布的模式有关。重熔区、热影响区的组织分别如图7(b,c)所示。重熔区的晶界分布着大量的δ-铁素体,和原焊态下组织相对比,马氏体不易被清楚观察,而δ-铁素体较容易被观察到。在热影响区可以观察到板条状马氏体组织。分析其组织变化的原因是,堆焊层经过较高能量的激光束作用后,原焊态下的组织在激光束带来的较高温度下发生了快速的熔化凝固,使δ-铁素体在晶界得以保留,碳化物重新溶解进入马氏体基体。而在重熔区附近的热影响区由于是间接受到激光束能量的作用,所经历的峰值温度低于重熔区,此区域的峰值温度低于奥氏体化温度,原焊态下的组织相当于进行了回火处理,产生回火马氏体,由于堆焊层含碳量较低,故产生板条马氏体。图8为经扫描速度6 mm/s的光纤激光

器表面处理后堆焊层的横截面微观组织。可以观察到,经过光纤激光器作用后,原来的焊接结构同样出现了新的分区,包括重熔区、热影响区两个部分。重熔区和热影响区之间的交界处是平直的,这与激光器输出的激光束能量分布模式有关。

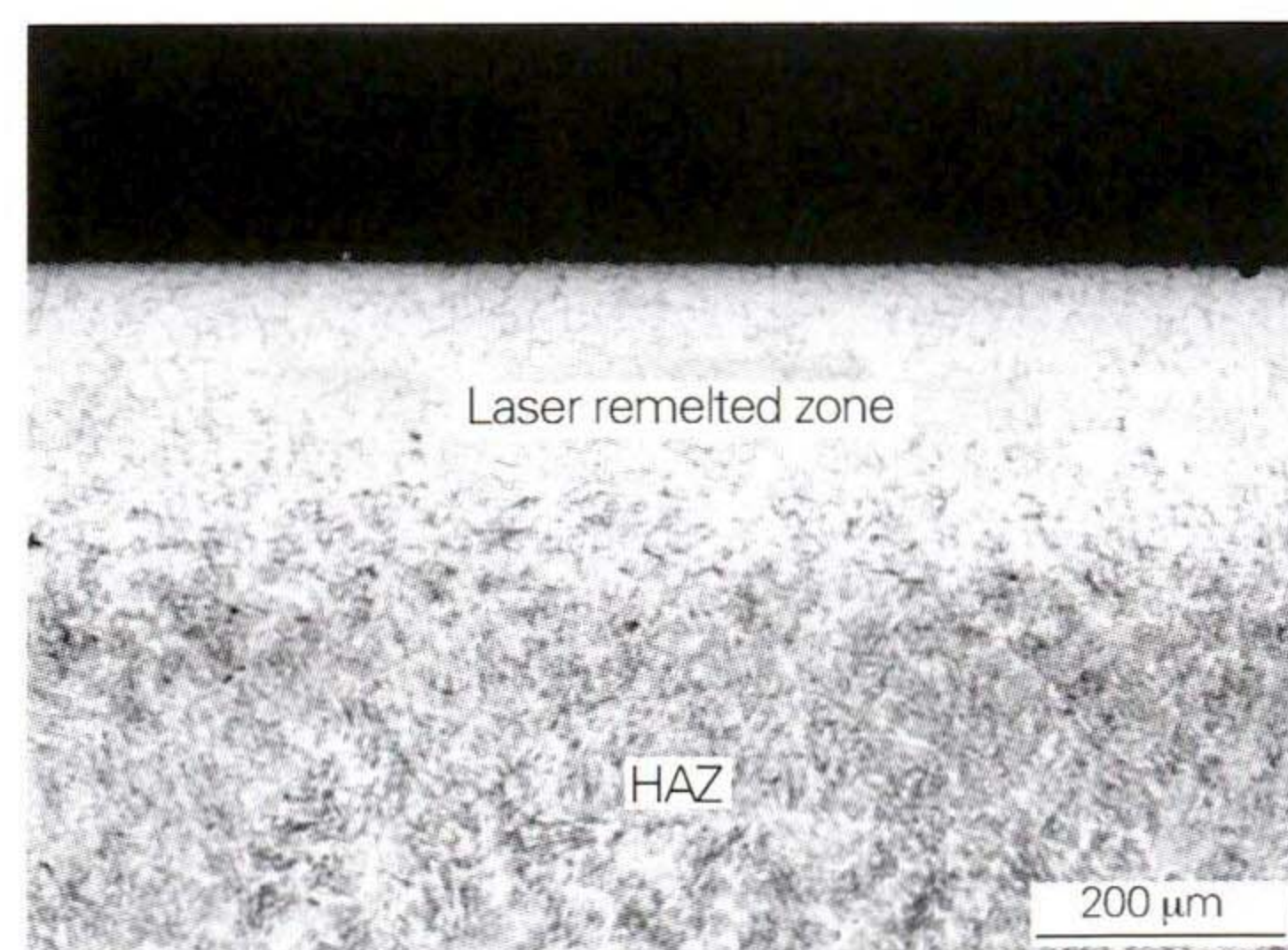


图8 经扫描速度6 mm/s的光纤激光器表面处理后堆焊层的截面微观组织

Fig.8 Microstructure in cross-section of the surfaced layer after surface treatment by fiber laser with scanning speed of 6 mm/s

图9是经扫描速度6 mm/s的半导体激光器表面处理之后试验钢截面不同区域的SEM图。如图9(d)所示,堆焊层原始组织为马氏体、 $\delta$ -铁素体和碳化物。经过激光表面处理后,如图9(b)所示,重熔区可以明显观察到 $\delta$ -铁素体,没有碳化物析出,表明重熔区经过激光束的高能量作用之后,快速熔化凝固使 $\delta$ -铁素体在晶界得以保留,原焊态下的碳化物

经过表面的高温作用溶解在基体相中。重熔区的组织由马氏体和晶界上的 $\delta$ -铁素体组成。如图9(c)所示,从激光表面处理之后热影响区的SEM形貌可以看到,板条马氏体和分布在晶界的 $\delta$ -铁素体,表明此区域在激光表面处理时温度要低于表面温度,且低于奥氏体化温度,发生了回火使组织变为板条状马氏体。

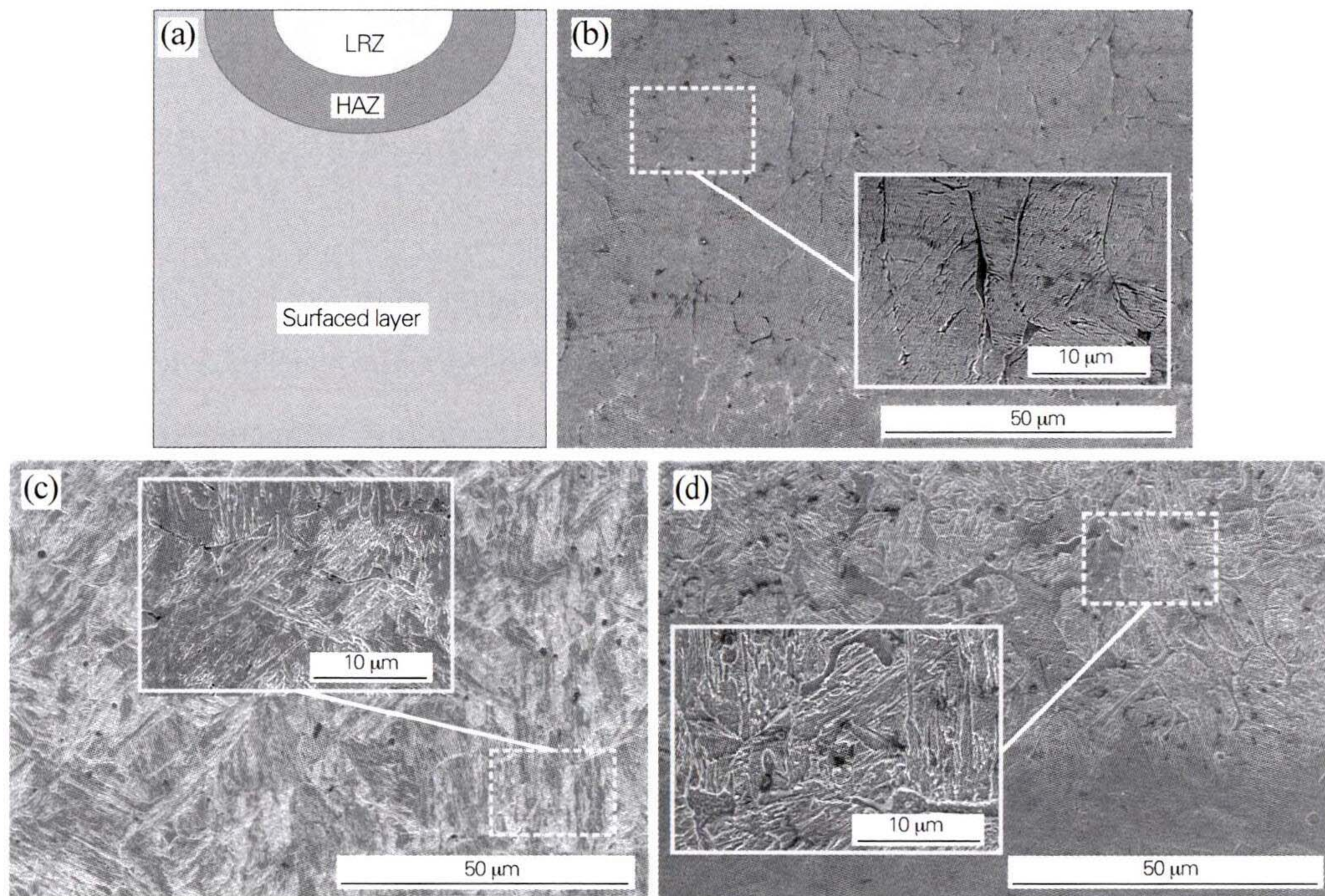


图9 经扫描速度6 mm/s的半导体激光器表面处理后堆焊层截面不同区域的SEM图  
(b)重熔区;(c)热影响区;(d)堆焊层

Fig. 9 SEM images of cross-section at different regions of the surfaced layer after surface treatment by semiconductor laser with scanning speed of 6 mm/s  
(b) LRZ; (c) HAZ; (d) surfaced layer

### 2.3 堆焊后硬度

对堆焊后试验钢进行硬度检测,如图10所示,其中0  $\mu\text{m}$ 处为堆焊层与基体的熔合线,熔合线两侧分别为基体和堆焊层。可以看出,在熔合线附近硬度变化非常明显。堆焊后堆焊层的硬度在一定范围内波动,其平均硬度约为480 HV0.3。而基体的硬度随着距熔合线距离的增加而呈现先降低再增加的趋势。这是由于堆焊后会发生碳迁移现象,即基体的碳向熔池中扩散,从而使基体的硬度值低于标准值(基体硬度的标准值约为360 HV0.3)。可以看出,堆焊后硬度得到了明显提高,相对于基体硬度提高了约33.33%。

### 2.4 激光表面处理后硬度变化

堆焊后的堆焊层硬度值相对稳定,因此在距离熔合线1 mm处向堆焊层表面进行硬度测试,经过激光表面处理后,硬度发生了变化。图11为两种激光器表

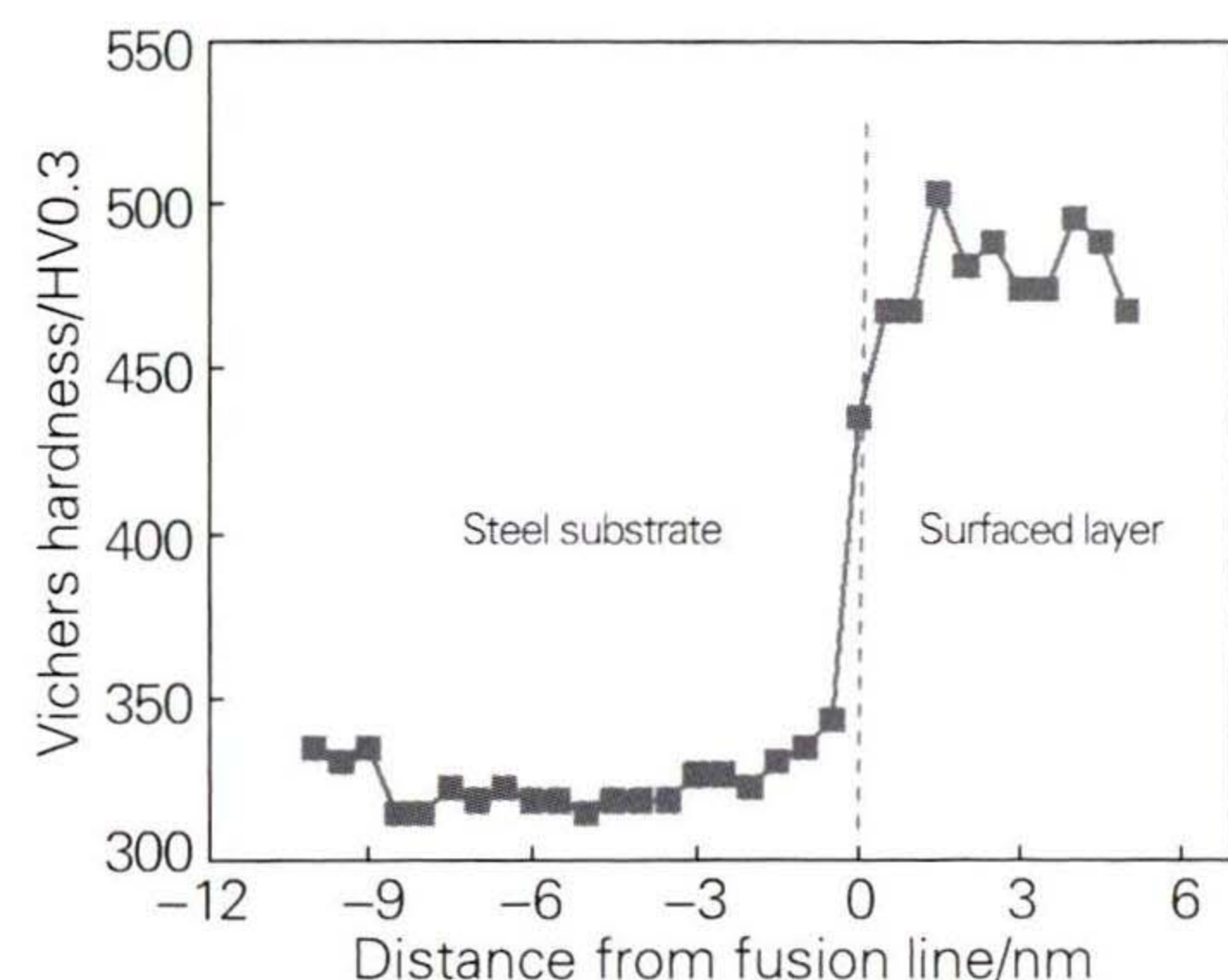


图10 堆焊后试验钢的硬度变化曲线  
Fig. 10 Hardness variation curve of the tested steel after surfacing welding

面处理后堆焊层的硬度变化曲线。可见与未经激光表面处理相比较,经过激光表面处理的堆焊层的硬度下

降,堆焊层经过激光表面处理硬度具体变化趋势为先降低后增加。这与堆焊层的原始组织及激光表面处理的特点密切相关,堆焊层在焊态下的组织为马氏体+ $\delta$ -铁素体+碳化物,经过激光表面处理,在远离表面的热影响区,受到激光束能量的作用较小,峰值温度较低,温度低于奥氏体化温度,会使堆焊层发生回火的作用,产生回火马氏体,导致硬度下降,而在靠近表面的位置激光束的能量高,峰值温度大,且与空气接触冷却速度较快,使作用于堆焊层的位置产生熔化并且迅速冷却凝固,使碳化物充分溶解在基体中,其外在表现是硬度有所提高。

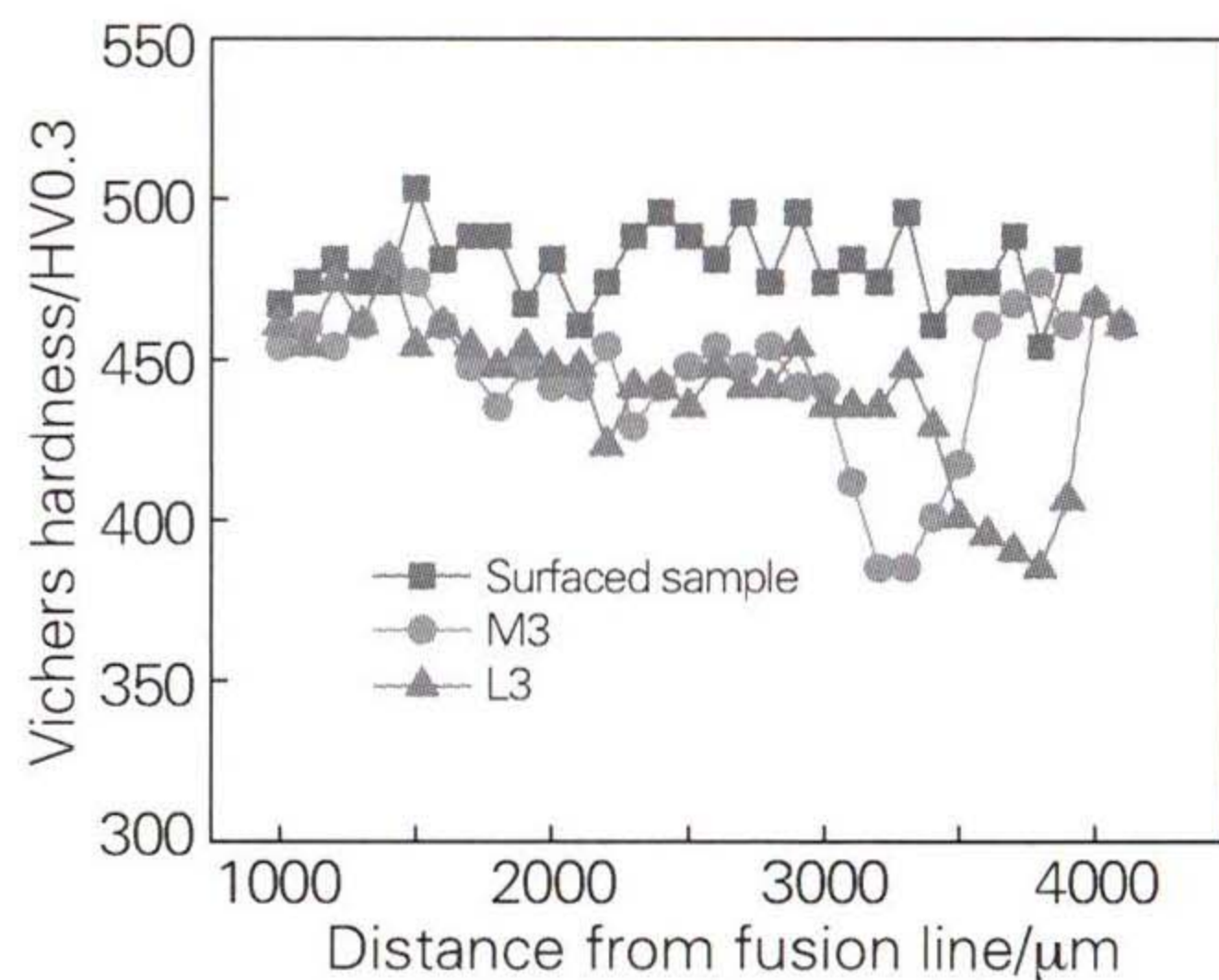


图11 激光表面处理堆焊层的硬度变化曲线  
Fig. 11 Hardness variation curves of the surfaced layer after laser surface treatment

## 2.5 激光表面处理耐蚀性

对浸泡后的试验钢使用公式计算腐蚀的失重率。

$$\bar{v} = \frac{W_0 - W_1}{S \times t} \quad (3)$$

式中: $\bar{v}$ 为失重时的腐蚀速度, $g/(m^2 \cdot h)$ ;  $W_0$ 为金属的初始质量, $g$ ;  $W_1$ 为腐蚀后金属的质量, $g$ ;  $S$ 为金属的面积, $m^2$ ;  $t$ 为腐蚀时间, $h$ 。

图12为3种试验钢经过浸泡腐蚀之后的失重腐蚀速度,可以看出试验钢经过浸泡腐蚀后,FV520B基体的失重腐蚀速度较低,经过堆焊后失重腐蚀速度较大,表明堆焊后耐蚀性变差,但经过激光处理之后,失重腐蚀速度又得到一定程度降低,表明耐蚀性又有所增加。如图13所示,从两种试验钢腐蚀12h的腐蚀形貌可以看出,激光表面处理使堆焊层发生腐蚀的位置不同,从而增加了堆焊层的耐蚀性。

## 2.6 激光表面处理的作用深度

激光能量密度是指在激光束作用于表面的过程中,激光束输入到作用区域单位面积的能量。能量密度和激光束的尺寸,激光的功率和激光扫描速度密切相关,能量密度公式为:

$$E = \frac{P \times t}{S} = \frac{P}{a \times V} \quad (4)$$

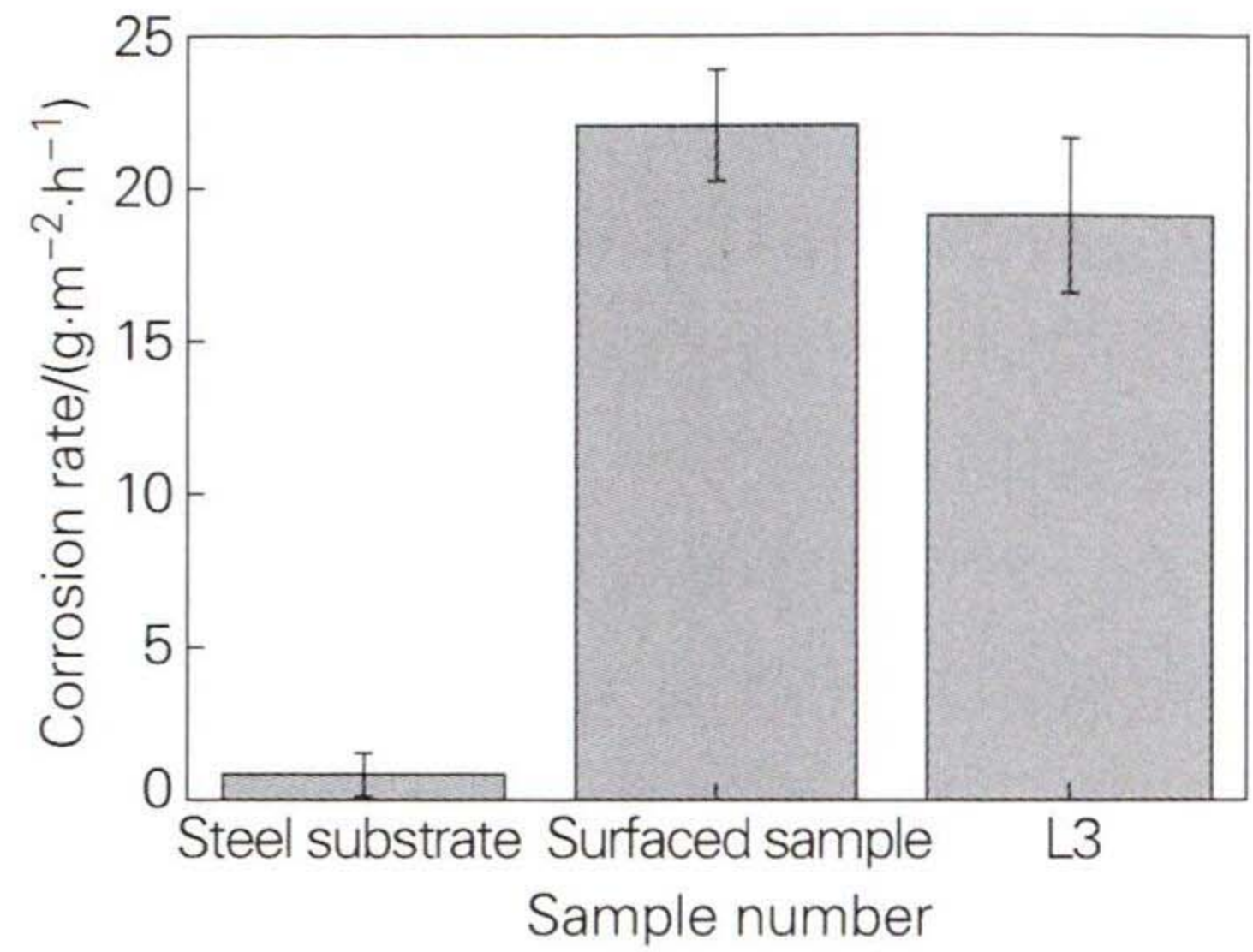


图12 试验钢失重时的腐蚀速度  
Fig. 12 Corrosion rate of the tested steel at weight loss

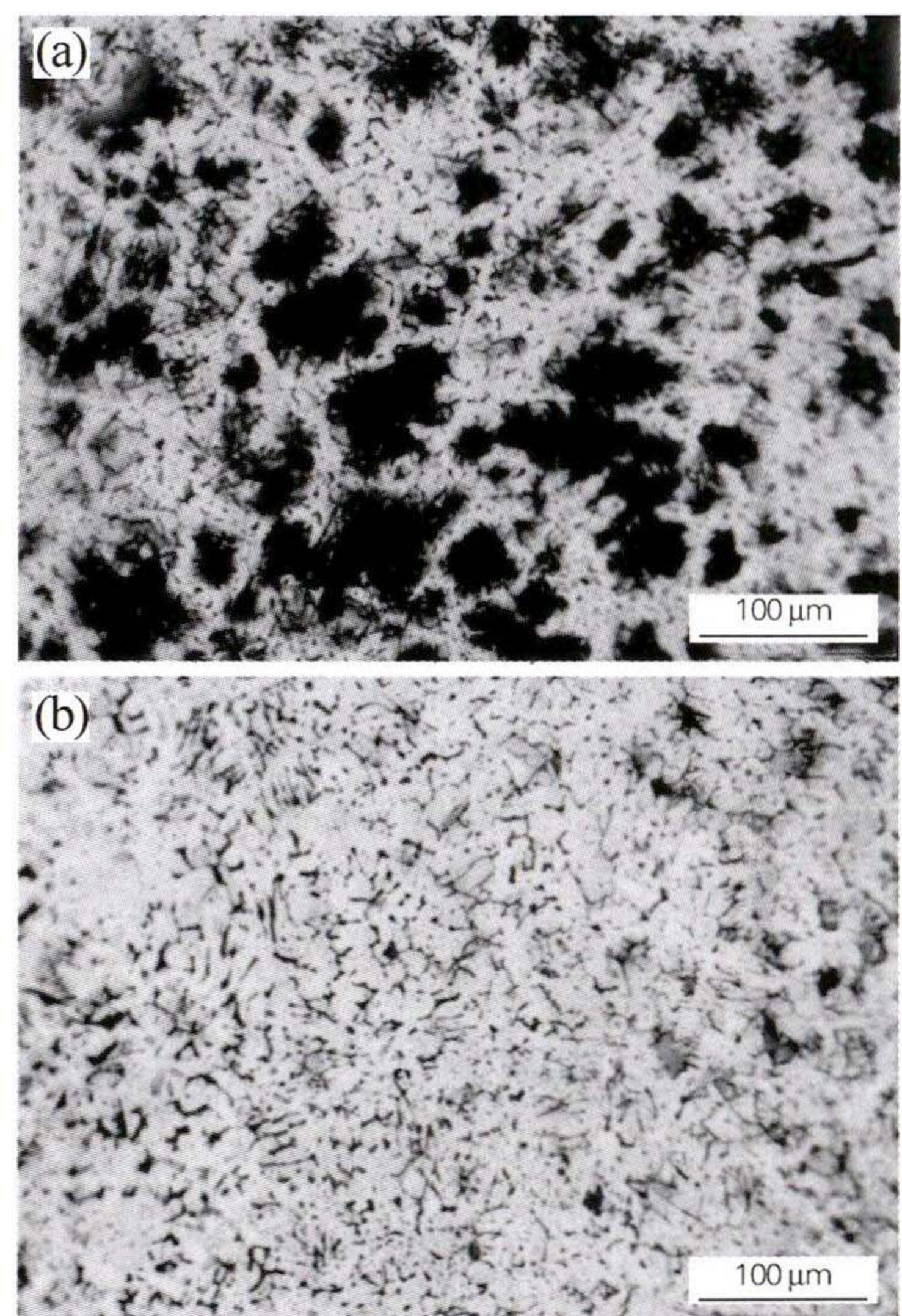


图13 试验钢激光表面处理前后腐蚀形貌  
(a)未处理堆焊层;(b)经扫描速度6 mm/s的光纤激光器表面处理堆焊层  
Fig. 13 Corrosion morphologies of the surfaced specimen before and after laser surface treatment  
(a) surfaced layer without treatment; (b) surfaced layer after fiber laser surface treatment with scanning speed of 6 mm/s

式中: $E$ 为激光能量密度, $J/mm^2$ ;  $P$ 为激光器输出功率, $kW$ ;  $S$ 为激光光斑扫描区域的面积, $mm^2$ ;  $V$ 为激光光斑扫描速度, $m/s$ ;  $a$ 为矩形光斑的长度, $mm$ ;  $t$ 为扫描时间, $s$ 。

在热影响区由于回火作用导致硬度值最小,根据最小硬度值确定两种激光器作用的深度,硬度值最小处距离表面的距离作为激光器作用的深度,如图14所示。可见在相同激光功率下,随着扫描速度的增加,激光作用深度逐渐减少,但表面硬度变化不大。根据能量密度公式可知,在相同的激光功率下,扫描速度越

大,激光作用于试样的能量密度越小,在试样对激光束能量吸收率不变的条件下,试样表面受到激光束作用的能量越小,故激光作用的深度减小。如图14所示,两种激光器在相同的能量密度下,半导体激光器相对于光纤激光器作用深度更大,这与两种激光器的波长的大小相关。半导体激光器的波长为980~1030 nm,而光纤激光器的波长范围为1075~1085 nm,导致在相同的激光束能量密度以及材料对激光束能量吸收率不变的条件下,半导体激光器使试样表面吸收的能量要大于光纤激光器,从而导致更大的作用深度。但两种激光器作用后的表面硬度相差不大。

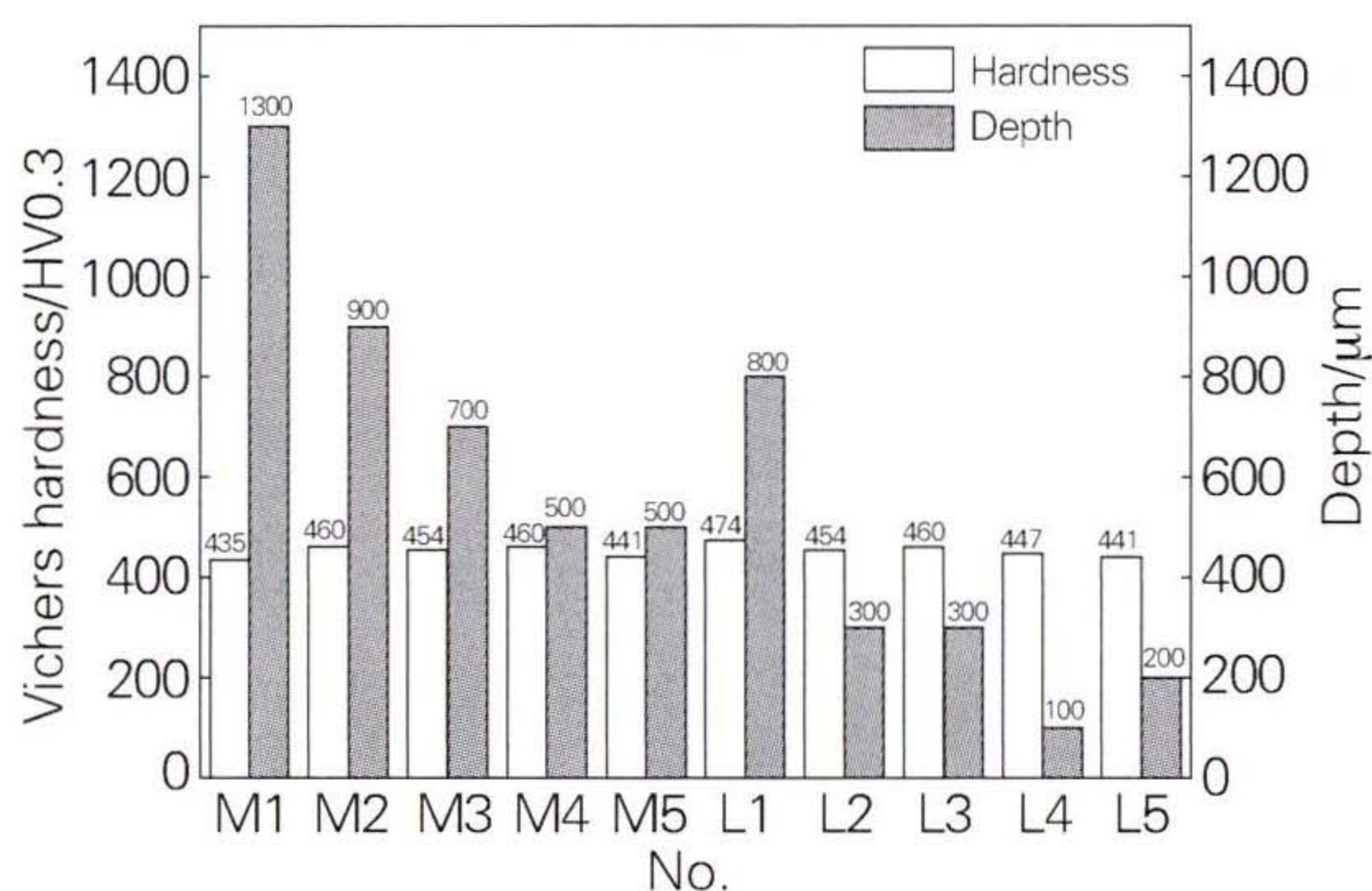


图14 激光表面处理后试验钢的作用深度与表面硬度  
Fig. 14 Depth of action and surface hardness of the tested steel after laser surface treatment

### 3 结论

1) FV520B 钢经堆焊后,其组织包含马氏体、 $\delta$ -铁素体、残留奥氏体及碳化物。堆焊后冶金结合良好,堆焊层平均硬度约为 480 HV0.3,相较于基体硬度提高了约 33.33%,实现了对基体的再制造修复强化。

2) 经过堆焊后,试样进行了激光表面处理,由于热循环和峰值温度的不同,试样在横截面上出现了明显的分区,分为原始堆焊区、热影响区和重熔区。浸泡试验结果表明,激光表面处理提高了堆焊层的腐蚀性。

3) 在两种激光器作用于试样表面后,随着扫描速度的增加,作用深度逐渐减小,但表面硬度变化不明显。当两种激光器作用于相同能量密度下时,半导体激光器的作用深度更大,这与激光器的波长有关,但是表面硬度基本相同。

#### 参考文献:

[1] 邓德伟,吕捷,马玉山,等. FV520B 钢激光打底焊结合 CMT 填充焊焊接接头的组织和性能[J]. 中国激光, 2020, 47(11): 33-43.  
Deng Dewei, Lü Jie, Ma Yushan, et al. Microstructures and properties of FV520B steel joint by laser backing welding with CMT filler welding [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(11): 33-43.

[2] 于晔,王飞宇,包翠敏,等. 真空时效加热到温时间滞后现象对 FV520B 钢组织及性能的影响[J]. 金属热处理, 2022, 47(7): 98-101.

Yu Huang, Wang Feiyu, Bao Cuimin, et al. Effect of heating arrival time lag on microstructure and properties of FV520B steel during vacuum aging[J]. Heat Treatment of Metals, 2022, 47(7): 98-101.

[3] 柳建,朱胜,蔡志海,等. FV520B 沉淀硬化不锈钢的 MAG 堆焊再制造力学特性[J]. 材料工程, 2017, 45(10): 23-31.  
Liu Jian, Zhu Sheng, Cai Zhihai, et al. Mechanical characteristic of remanufacturing of FV520B precipitation hardening stainless steel using MAG surfacing deposition[J]. Journal of Materials Engineering, 2017, 45(10): 23-31.

[4] 牛靖,董俊明,薛锦,等. FV520(B)与 18CrMnMoV 焊接接头力学性能分析[J]. 焊接学报, 2006, 27(12): 101-104.  
Niu Jing, Dong Junming, Xue Jin, et al. Analysis of mechanical properties of FV520(B) stainless steel and 18CrMnMoV steel welded joints[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2006, 27(12): 101-104.

[5] 徐滨士,方金祥,董世运,等. FV520B 不锈钢激光熔覆热影响区组织演变及其对力学性能的影响[J]. 金属学报, 2016, 52(1): 1-9.  
Xu Binshi, Fang Jinxiang, Dong Shiyun, et al. Heat-affected zone microstructure evolution and its effects on mechanical properties for laser cladding FV520B stainless steel[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2016, 52(1): 1-9.

[6] Rajkumar V, Arjunan T V, Rajesh K A. Metallurgical and mechanical investigations of Inconel 625 overlay welds produced by GMAW-hardfacing process on AISI 347 pipes[J]. Materials Research Express, 2019, 6(7): 076534.

[7] 连明洋. 齿轮用 40CrNiMo 调质钢 CMT 堆焊 HAZ 组织和性能研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2020.

[8] 钟玉,屈金山,陈文静,等. 45 钢基体上 D172 焊条堆焊层的组织与性能[J]. 机械工程材料, 2008, 32(4): 50-53.  
Zhong Yu, Qu Jinshan, Chen Wenjing, et al. Microstructure and properties of bead welding layer on 45 steel using electrode D172[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2008, 35(4): 50-53.

[9] 晔祥瑞,黄勇,陈子鹏,等. 激光重熔对 IN718 熔覆层组织与性能的影响[J]. 激光技术, 2023, 47(4): 506-512.  
Chao Xiangrui, Huang Yong, Chen Zipeng, et al. Effect of laser remelting on microstructure and properties of IN718 cladding layer[J]. Laser Technology, 2023, 47(4): 506-512.

[10] 张永辉,张双杰,王伟,等. 激光表面淬火对铬钼铸铁组织和硬度的影响[J]. 金属热处理, 2022, 47(11): 160-164.  
Zhang Yonghui, Zhang Shuangjie, Wang Wei, et al. Effect of laser hardening on microstructure and hardness of CrMo cast iron surface [J]. Heat Treatment of Metals, 2022, 47(11): 160-164.

[11] 谢燕翔,李琳,叶芳霞,等. Ti6Al4V 钛合金表面激光合金化制备 Ti-Cu 合金层的组织结构[J]. 金属热处理, 2022, 47(7): 241-244.  
Xie Yanxiang, Li Lin, Ye Fangxia, et al. Microstructure of Ti-Cu alloying layer on Ti6Al4V titanium alloy surface prepared by laser alloying[J]. Heat Treatment of Metals, 2022, 47(7): 241-244.

[12] 张亚周,葛鸿浩,金宸宇,等. 45 钢基体激光熔覆 316L 粉末搭接过程中 Cr 元素分布机制研究[J]. 中国激光, 2023, 50(8): 101-111.  
Zhang Yazhou, Ge Honghao, Jin Chenyu, et al. Distribution mechanism of Cr element during laser cladding overlapping process of 316L powder on 45 steel substrate[J]. Chinese Journal of Lasers, 2023, 50(8): 101-111.

# 稀土渗氮对 9Cr18Mo 钢的 QPQ 盐浴复合处理性能的影响

张鑫, 孟征兵, 周颖, 陈元钰, 李宇翔

(桂林理工大学材料科学与工程学院, 广西桂林 541004)

**摘要:**用自制渗氮基盐为渗氮剂和硝酸钾为氧化剂, 碳酸镧、碳酸钇和碳酸铈为稀土催渗剂组成 QPQ 稀土渗氮剂, 在 610 °C 对 9Cr18Mo 钢进行 QPQ 盐浴复合处理, 从而提高 9Cr18Mo 钢的各项性能。采用 SEM、EDS、XRD、显微硬度测试、电化学性能测试和耐磨试验等测试手段, 研究了稀土对 9Cr18Mo 钢组织和性能的影响。结果表明, QPQ 盐浴复合处理试样的表面主要由氧化层、渗氮层和扩散层组成, 主要组成物相为  $Fe_4N$ 、 $CrN$ 、 $\alpha_N$ 、 $Fe_{2-3}N$ 、 $Li_2Fe_3O_4$  和  $Fe_3O_4$ , 在 QPQ 盐浴复合处理中添加稀土比未添加稀土的显微硬度能平均提升 90 HV0.2, 耐蚀性和耐磨性也有所提高。

**关键词:** 9Cr18Mo 钢; 稀土渗氮; QPQ 处理; 耐蚀性; 耐磨性; 显微硬度

中图分类号: TG161 文献标志码: A 文章编号: 0254-6051(2024)03-0063-05

DOI: 10.13251/j.issn.0254-6051.2024.03.011

## Effect of rare earth nitriding on QPQ salt bath composite treatment performance of 9Cr18Mo steel

Zhang Xin, Meng Zhengbing, Zhou Ying, Chen Yuanyu, Li Yuxiang

(College of Materials Science and Engineering, Guilin University of Technology, Guilin Guangxi 541004, China)

**Abstract:** In order to further improve the performance of 9Cr18Mo steel, the Quench-Polish-Quench (QPQ) rare earth nitriding agent was composed of self-made nitriding base salt as nitriding agent, potassium nitrate as oxidizing agent, lanthanum carbonate, yttrium carbonate and cerium carbonate as rare earth accelerator, and then the QPQ salt bath composite treatment was carried out for the 9Cr18Mo steel at 610 °C. The effects of rare earth on the microstructure and properties of the 9Cr18Mo steel were studied by means of SEM, EDS, XRD, microhardness test, electrochemical performance test and wear resistance test. The results show that the surface of the QPQ salt bath composite treated specimen is mainly composed of oxide layer, nitriding layer and diffusion layer. The main component phases are  $Fe_4N$ ,  $CrN$ ,  $\alpha_N$ ,  $Fe_{2-3}N$ ,  $Li_2Fe_3O_4$  and  $Fe_3O_4$ . Compared with that without rare earth addition, the addition of rare earth on the QPQ salt bath composite treatment can increase the microhardness by 90 HV0.2 on average, and also improve the corrosion resistance and wear resistance.

**Keywords:** 9Cr18Mo steel; rare earth nitriding; QPQ treatment; corrosion resistance; wear resistance; microhardness

收稿日期: 2023-09-21 修订日期: 2024-01-17

基金项目: 广西科技重大专项(桂科 AA22067079)

作者简介: 张鑫(1997—), 男, 工程师, 硕士, 主要研究方向为金属材料表面处理, E-mail: 942835077@qq.com。通信作者: 孟征兵, 高级工程师, 博士, E-mail: mengzbing@163.com

引文格式: 张鑫, 孟征兵, 周颖, 等. 稀土渗氮对 9Cr18Mo 钢的 QPQ 盐浴复合处理性能的影响[J]. 金属热处理, 2024, 49(3): 63-67.

Zhang Xin, Meng Zhengbing, Zhou Ying, et al. Effect of rare earth nitriding on QPQ salt bath composite treatment performance of 9Cr18Mo steel [J]. Heat Treatment of Metals, 2024, 49(3): 63-67.

[13] Pei C G, Guo Z X, Xiao J G. Effect of laser remelting on the corrosion properties of laser thermal sprayed Al85Ni8Y4Ce3 amorphous coatings [J]. Lasers in Engineering, 2021, 51(1-5): 15-27.

[14] Yang K, Li J Q, Wang Q Y, et al. Effect of laser remelting on microstructure and wear resistance of plasma sprayed  $Al_2O_3$ -40%  $TiO_2$  coating [J]. Wear, 2019, 426: 314-318.

[15] Zhao Yanzhe, Sun Jie, Guo Kai, et al. Investigation on the effect of laser remelting for laser cladding nickel based alloy [J]. Journal of Laser Applications, 2019, 31(2): 5096126.

[16] 刘明霞, 李昭, 畅庚榕, 等. 激光重熔对高速激光熔覆 Ni625 合金涂层组织和耐蚀性的影响 [J]. 材料热处理学报, 2022, 43(8): 153-160.

Liu Mingxia, Li Zhao, Chang Gengrong, et al. Effect of laser remelting on microstructure and corrosion resistance of Ni625 alloy coating fabricated by high speed laser cladding [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2022, 43(8): 153-160.

[17] 赵运才, 上官绪超, 张继武, 等. 激光重熔改性 WC/Fe 等离子喷涂涂层组织及其耐磨性能 [J]. 表面技术, 2018, 47(3): 20-27.

Zhao Yuncai, Shanguan Xuchao, Zhang Jiwu, et al. Microstructure and wear resistance of WC/Fe plasma sprayed coatings modified by laser remelting [J]. Surface Technology, 2018, 47(3): 20-27.

[18] Farzadi A K R. Microstructural development and corrosion behavior of 13Cr-4Ni-1Mo martensitic stainless steel clad [J]. Welding in the World, 2020, 64(11): 1811-1823.