

## 45 钢电子束扫描表面 W 合金化组织和硬度

魏德强, 任旭隆, 王 荣, 吕少鹏

(桂林电子科技大学 教学实践部, 桂林 541004)

**摘 要:** 电子束扫描表面合金化技术可以改善钢铁材料的组织及性能. 采用等离子热喷涂技术和电子束扫描技术对 45 钢表面进行熔覆合金化处理. 研究电子束扫描对强化层组织和硬度的影响, 探讨了电子束功率、扫描速度对强化层组织和硬度的影响规律. 结果表明, 45 钢经表面合金化处理后, 其表面可分为合金化区、热影响区和基体区. 合金化区的显微组织为针状马氏体和碳化钨颗粒, 硬度为 1 250 HV, 是基体硬度的 5 倍. 热影响区的组织为针状马氏体和铁素体, 硬度为 860 HV, 是基体的 3 倍. 基体区的组织为珠光体和铁素体. 电子束工艺参数对强化层组织和硬度有较大影响, 强化层厚度随电子束功率的增加而增大, 随着扫描速度的增加而减小.

**关键词:** 电子束扫描; 合金化; 45 钢; 金相组织; 硬度

**中图分类号:** TG 495

**文献标识码:** A

**doi:** 10.12073/j.hjxb.2019400050

### 0 序 言

45 钢经调质处理后具有良好的综合力学性能, 所以广泛应用于制造机器零部件<sup>[1-2]</sup>. 但经调质处理后, 45 钢表面硬度较低, 在一些领域难以达到要求, 限制了其使用范围<sup>[3]</sup>. 为改善其表面综合性能常采用物理气相沉积技术和常规电镀等技术提高表面机械性能, 但以上方法存在强化层结合力弱和组织不致密等缺点<sup>[4-7]</sup>. 电子束扫描表面合金化是利用电子束扫描技术将一种或多种合金元素快速溶入基体, 利用能量转变和组织变化等获得具有特殊性能的合金层, 该合金层不仅结合力强、组织致密而且硬度得到较大的提高<sup>[8]</sup>.

目前国内外已有许多学者对相关问题做了研究, Zhang 等人<sup>[9]</sup>利用激光熔覆技术在 45 钢表面制备了一层无裂纹的 Ni60A 涂层, 研究发现该涂层的组织由  $\gamma(\text{Ni})$  固溶体和  $\text{Ni-Ni}_3\text{B}$  共晶体构成, 45 钢表面硬度得到大幅度提高. Efremov 等人<sup>[10]</sup>利用强流脉冲电子束对 45 钢表面进行淬火处理, 研究发现表层硬化层组织为淬火马氏体和有规则六边形的  $\alpha$ -铁素体. Matějček 等人<sup>[11]</sup>利用等离子热喷涂技术在不锈钢表面添加厚度为 20~45  $\mu\text{m}$  钨粉涂层, 不锈钢表面硬度得到一定的提高. Kim 等人<sup>[12]</sup>

利用电子束扫描技术对 SM20C, SUS303 和 Al6061 进行了表面改性, SUS303 和 Al6061 表面硬度降低, SM20C 硬度得到提高.

文中采用等离子热喷涂技术在 45 钢表面制备厚度为 20  $\mu\text{m}$  的钨粉涂层, 再利用电子束扫描技术对 45 钢进行表面合金化处理, 研究不同电子束工艺参数对 45 钢表面强化层的组织和硬度规律的影响.

### 1 试验方法

试验基材为常用的退火后的 45 钢棒料. 材料的化学成分如表 1 所示. 试验时, 将棒料用立式铣床加工成 40 mm  $\times$  40 mm  $\times$  40 mm 的试样.

表 1 45 钢的化学成分 (质量分数, %)  
Table 1 Chemical composition of 45 steel

C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni
0.42 ~ 0.49	0.17 ~ 0.37	0.5 ~ 0.8	$\leq 0.045$	$\leq 0.04$	$\leq 0.25$	$\leq 0.25$

采用型号为 SX-80 等离子热喷涂设备与 HDZ-6F 的高压数控真空电子束焊机, 其性能参数为加速电压 0~120 kV, 扫描频率 0~3 kHz, 电子束束流 0~120 mA, 聚焦电流 0~1 000 mA, 电子枪移动速度 0~100 mm/min. 采用 Tension 金相显微镜观察组织结构. 采用 Quanta FEG 450 扫描电子显微镜拍摄金相照片. 采用 HMV-ZT 维氏显微硬度计进行硬度测试.

将纯度为 99% 的钨粉通过等离子喷涂制备表

面涂层,而后采用电子束扫描方式对表面进行熔覆,形成表面合金层.利用丙酮清洗试样表面的油污和杂质,再利用24目白钢玉砂对试样表面进行喷砂处理,从而提高涂层与基体表面的结合力.喷砂时的工艺参数<sup>[13]</sup>为压力0.6 MPa,喷砂距离约为100 mm.采用等离子热喷涂设备对喷砂后的试样进行喷涂.等离子热喷涂设备的工艺参数为电流470 A,电压35 V,喷涂距离约为150 mm,Ar气压力1.1 MPa,H<sub>2</sub>气压力0.7 MPa,送粉气压力0.6 MPa,

工件移动速度为50 mm/min,喷涂厚度为20  $\mu\text{m}$ .

电子束表面合金化采用直线扫描方式.如图1所示,试验时通过调节电子束扫描装置中 $x, y$ 方向上的两对线圈构成的附加偏转线圈,在附加偏转线圈中产生的磁场使电子束在 $xOy$ 平面内产生相应的偏转,在 $xOy$ 平面形成圆环状的扫描环.电子束扫描功率140 W,扫描频率100 Hz,电子枪移动速度50 mm/min,扫描环半径2 mm,扫描环宽度0.25 mm.

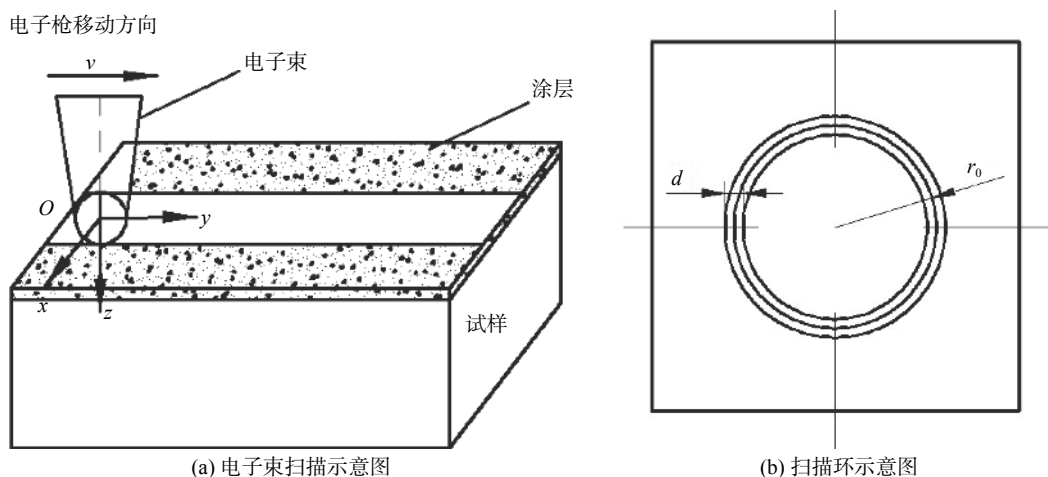


图1 电子束扫描表面处理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of electron beam scanning surface treatment

## 2 试验结果及分析

### 2.1 强化层组织分析

经电子束扫描处理后的强化层截面微观组织如图2所示.扫描后其截面形貌由合金化区、热影响区和基体三个部分组成,如图2a所示.由图2b可知合金化区在电子束扫描过程中温度最高,完全达相变温度点以上,该区域组织完全奥氏体化,熔融基体在热传导作用下,发生自淬火效果,组织得到高度细化,形成针状马氏体组织,且钨元素和碳元素发生化学反应形成碳化钨颗粒.热影响区为不完全相变区,加热温度在 $A_{c1} \sim A_{c3}$ ,组织为淬火马氏体和铁素体,如图2c.基体组织为铁素体和珠光体,如图2d.

### 2.2 显微硬度的测试

由表及里沿深度方向电子束强化层的显微硬度变化曲线如图3所示,随着距表面距离的增加,在距表面60  $\mu\text{m}$ 内,强化层硬度开始较为平缓的下

降,但距表面的距离达到60~130  $\mu\text{m}$ ,显微硬度出现突降趋势,但仍高于基体.这是由于热影响区组织的多样性,随着距表面距离的增加,马氏体含量逐渐减少,铁素体含量逐渐增多.电子束表面处理强化层的厚度约为130  $\mu\text{m}$ ,合金化区域的厚度约为60  $\mu\text{m}$ ,平均硬度是基体材料的5倍多,这是由于合金化区域组织是由大量针状马氏体和碳化钨颗粒组成,致使硬度有所增加,热影响区域的厚度约为70  $\mu\text{m}$ ,平均硬度约为基体材料的3倍,这是由于热影响区的组织由针状马氏体和铁素体.当距离表面130  $\mu\text{m}$ 后,进入基体区,硬度不变,与上述显微组织变化趋势一致.

## 3 电子束工艺参数对强化层组织和硬度的影响

电子束工艺参数对表面合金化的组织和硬度有着重大的影响,文中主要讨论电子束功率与扫描速度的影响.

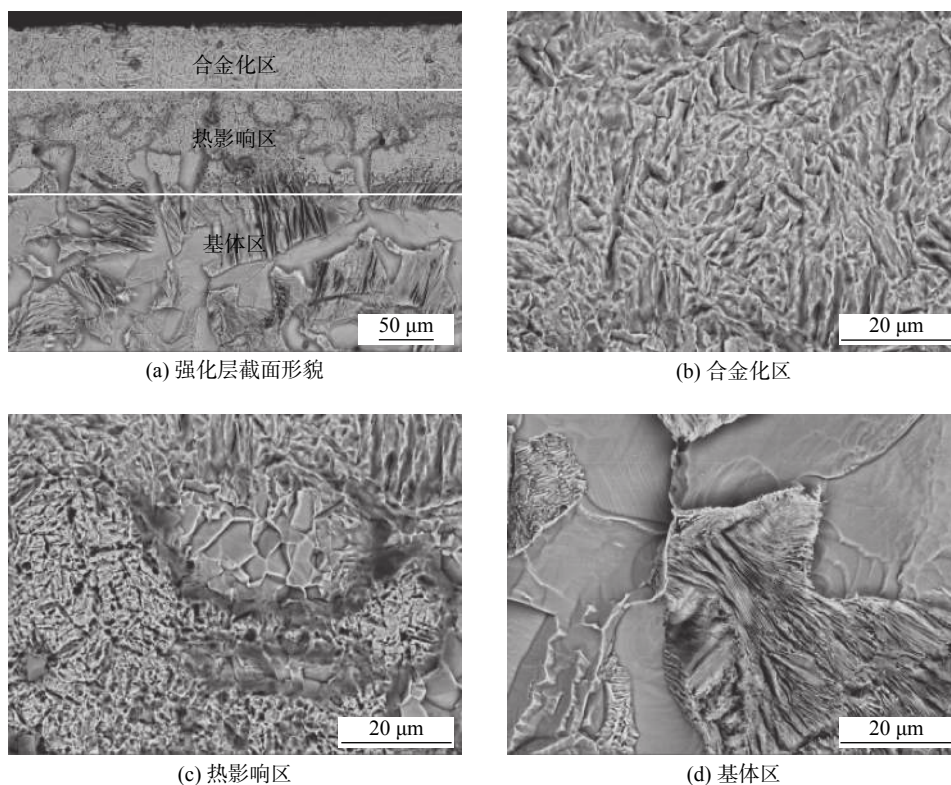


图 2 强化层组织

Fig. 2 Strengthening layer structure

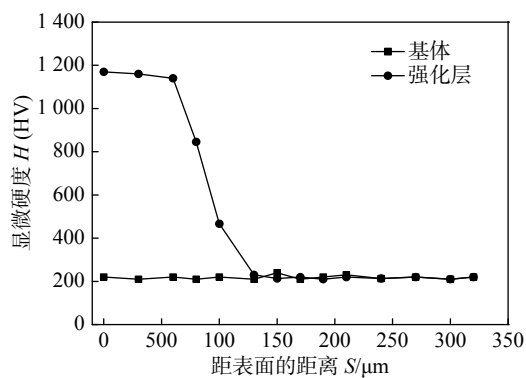


图 3 强化层硬度分布规律

Fig. 3 Hardness distribution law of strengthening layer

### 3.1 电子束功率对 45 钢强化层组织与硬度的影响

根据 45 钢和钨的相变熔化温度以及电子束能量沉积原理选择以下电子束工艺参数, 电压 70 kV, 扫描频率为 100 Hz, 扫描速度 50 mm/min, 扫描环半径为 2 mm, 讨论电子束功率分别为 70, 140, 210, 280 W 对 45 钢组织形态和硬度的影响。

#### 3.1.1 电子束扫描功率对 45 钢表面强化层组织的影响

电子束扫描功率对 45 钢组织形态的影响如图 4 所示, 图 4 表明随着扫描功率的增加, 扫描

环内的平均功率密度增加, 合金化区和热影响区吸收的能量增大, 合金化区域的奥氏体化温度就越高, 基体传热快速冷却后, 形成的针状马氏体晶粒更加细小, 且会形成更多的碳化钨颗粒。热影响区内部分组织发生奥氏体化相变, 但随着扫描功率的增加, 热影响区域的奥氏体增多, 铁素体减少, 自激冷却后, 形成的针状马氏体增多, 铁素体含量减小。当电子束扫描功率达到 280 W 时, 因功率过大, 温差过高, 冷却速度过快, 合金化区域出现裂纹。

扫描功率与合金化区以及热影响区厚度之间的关系如图 5 所示。合金化区与热影响区的厚度随着电子束扫描功率的增加呈非线性的增加, 这是因为随着电子束扫描功率的增加, 扫描环内的平均功率密度增加, 金属表面吸收的能量增大, 使得表面温度进一步升高, 通过试样的快速热传导作用, 金属表层下处于相变温度  $A_{c1}$  以上的区域相应增大, 从而导致相变合金层增大。

#### 3.1.2 电子束功率对 45 钢表面强化层硬度分布规律的影响

电子束功率对 45 钢硬度的影响如图 6 所示。强化层的硬度随着深度的增加呈非线性减小, 相同

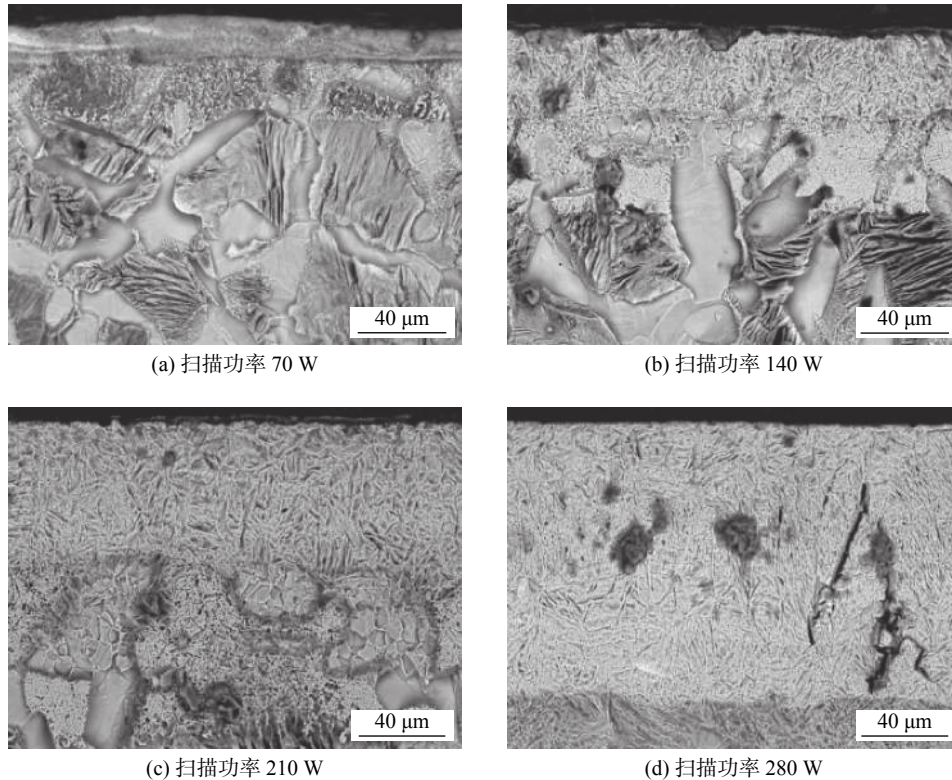


图4 扫描功率对强化层显微组织的影响

Fig. 4 Effect of scanning power on microstructure of strengthening layer

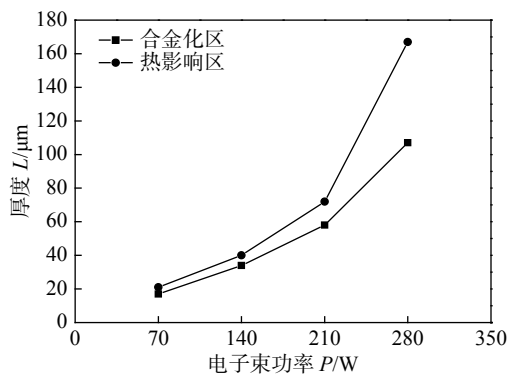


图5 扫描功率对45钢强化层厚度的影响

Fig. 5 Effect of scanning power on thickness of hardened layer of 45 steel

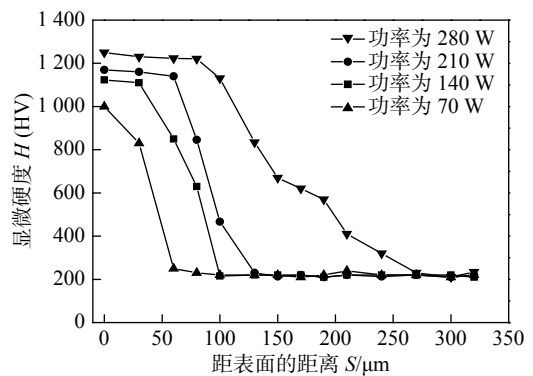


图6 电子束扫描功率对45钢显微硬度的影响

Fig. 6 Effect of electron beam scanning power on microhardness of 45 steel

深度, 功率越大, 强化层的硬度越高. 在合金化区域的最高硬度可达到 1 110 ~ 1 250 HV, 是基体硬度的 5 倍, 在热影响区的最高硬度为 830 ~ 850 HV, 是基体硬度的 3 倍.

### 3.2 扫描速度对45钢表面强化层组织形态和硬度分布规律的影响

电子束工艺参数如下, 电子束功率 140 W, 扫描环半径 2 mm. 选择扫描速度为 30, 40, 50, 60 mm/min, 讨论电子束扫描速度对 45 钢表面强化层组织形态和性能的影响.

#### 3.2.1 扫描速度对45钢表面强化层组织的影响

扫描速度对 45 钢组织的影响如图 7 所示, 图 7 表明, 随着扫描速度的增加, 电子束与试样表面作用的时间减少, 表面吸收的能量减小, 试样表层下处于相变温度  $A_{c1}$  以上的区域也相应减小. 通过试样基体的快速热传导作用, 合金化区形成的组织为针状马氏体和碳化钨颗粒, 但碳化钨颗粒数量减少, 热影响区发生奥氏体化相变的组织减少, 铁素体相应的增多.

扫描速度与合金化区及热影响区厚度之间的

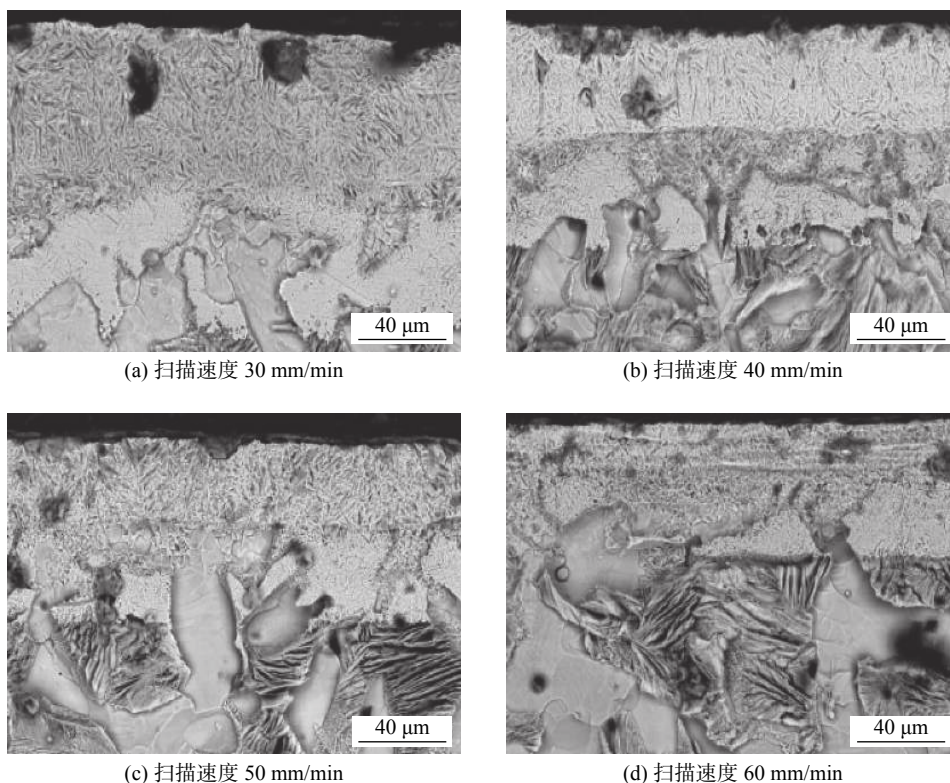


图7 扫描速度对强化层显微组织的影响

Fig. 7 Effect of scanning speed on microstructure of strengthening layer

关系如图8所示. 随着电子束扫描速度的增加, 热量向试样中传递的距离减小, 合金化区和热影响区的厚度减小, 且减小的趋势呈非线性变化.

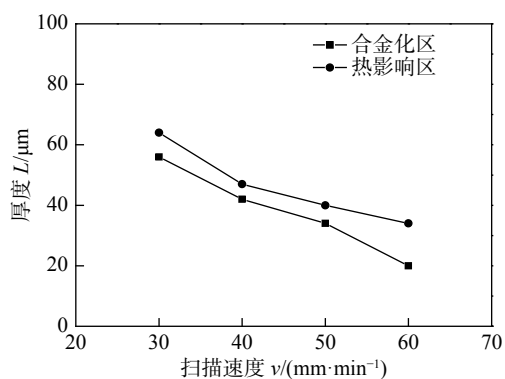


图8 扫描速度对45钢强化层厚度的影响

Fig. 8 Effect of scanning speed on thickness of strengthening layer of 45 steel

### 3.2.2 扫描速度对45钢表面强化层硬度分布规律的影响

电子束扫描速度对45钢表面硬度的影响如图9所示. 强化层的硬度随着深度的增加呈非线性减小, 在相同深度处, 扫描速度越大, 强化层的硬度越低. 在合金化区的最高硬度可达到1020~1220 HV, 是基体硬度的5倍, 在热影响区的最高

硬度可达到820~860 HV, 是基体硬度的3倍.

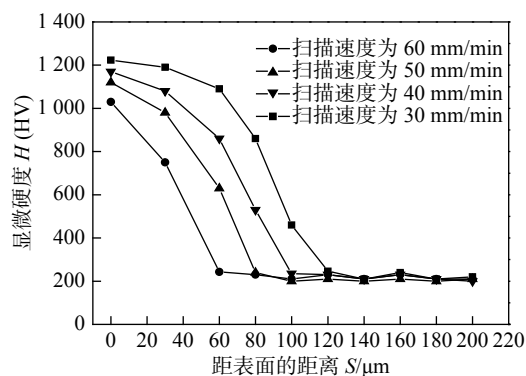


图9 扫描速度对45钢显微硬度的影响

Fig. 9 Effect of scanning speed on microhardness of 45 steel

## 4 结 论

(1) 45钢经电子束扫描合金化后, 试样表面形成一种厚度为60~270 μm的高硬度强化层. 扫描后试样表面分为合金化区、热影响区和基体区三个区域. 合金化区组织为大量的针状马氏体和碳化钨颗粒, 晶粒得到高度的细化, 热影响区组织为针状马氏体和铁素体. 试样表面硬度为1150~1250 HV, 是基体硬度的5倍.

(2) 强化层硬度随电子束功率的增加而增加, 随着扫描速度的增加而减小. 合金化区和热影响区的厚度随电子束功率的增加而增大, 随扫描速度的增加而减小. 当电子束功率增加到 280 W 时, 合金化区域由于功率过大而出现裂纹.

#### 参考文献:

- [1] Luo X, Yao Z, Zhang P, *et al.* Tribological behaviors of Fe-Al-Cr-Nb alloyed layer deposited on 45 steel via double glow plasma surface metallurgy technique[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2015, 25(11): 3694 – 3699.
- [2] Zhu X L, Yao Z J, Gu X D, *et al.* Microstructure and corrosion resistance of Fe-Al intermetallic coating on 45 steel synthesized by double glow plasma surface alloying technology[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2009, 19(1): 143 – 148.
- [3] 王 洋, 王树奇, 魏敏先, 等. 45 钢磨损性能和磨损机制的研究 [J]. 热加工工艺, 2010(16): 11 – 14.  
Wang Yang, Wang Shuqi, Wei Minxian, *et al.* Study on wear behavior and wear mechanism of 45 steel[J]. Hot Working Technology, 2010(16): 11 – 14.
- [4] 王东生, 田宗军, 王泾文, 等. 激光重熔对等离子喷涂热障涂层冲蚀行为影响 [J]. 焊接学报, 2011, 32(2): 5 – 8.  
Wang Dongsheng, Tian Zongjun, Wang Jingwen, *et al.* Effect of laser remelting on erosion behavior of plasma sprayed thermal barrier coatings[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2011, 32(2): 5 – 8.
- [5] Luo D, Tang G, Ma X, *et al.* The microstructure of Ta alloying layer on M50 steel after surface alloying treatment induced by high current pulsed electron beam[J]. Vacuum, 2017, 136: 121 – 128.
- [6] 韩建栋, 林 峰, 齐海波, 等. 粉末预热对电子束选区熔化成形工艺的影响 [J]. 焊接学报, 2008, 29(10): 77 – 80.  
Han Jiandong, Lin Feng, Qi Haibo, *et al.* Effect of powder preheating on electron beam selective melting process[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2008, 29(10): 77 – 80.
- [7] Valkov S, Petrov P, Lazarova R, *et al.* Formation and characterization of Al-Ti-Nb alloys by electron-beam surface alloying[J]. Applied Surface Science, 2016, 389: 768 – 774.
- [8] Lu T, Tan Y, Shi S, *et al.* Continuous electron beam melting technology of silicon powder by prefabricating a molten silicon pool[J]. Vacuum, 2017, 143: 336 – 343.
- [9] Zhang J, Yu H U, Tan X, *et al.* Microstructure and high temperature tribological behavior of laser cladding Ni60A alloys coatings on 45 steel substrate[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2015, 25(5): 1525 – 1532.
- [10] Efremov A M, Ivanov Y F, Itin V I, *et al.* Phase and structural transformations in iron and carbon steel induced by megavolt high-current electron beam[J]. MRS Online Proceedings Library Archive, 1992, 279: 401.
- [11] Matějček J, Vilémová M, Nevrlá B, *et al.* The influence of substrate temperature and spraying distance on the properties of plasma sprayed tungsten and steel coatings deposited in a shrouding chamber[J]. Surface and Coatings Technology, 2017, 318: 217 – 223.
- [12] Kim J, Kim J S, Kang E G, *et al.* Surface modification of the metal plates using continuous electron beam process (CEBP)[J]. Applied Surface Science, 2014, 311: 201 – 207.
- [13] Kubatík T F, Lukáč F, Stouřil J, *et al.* Preparation and properties of plasma sprayed NiAl10 and NiAl40 coatings on AZ91 substrate[J]. Surface and Coatings Technology, 2017, 319: 145 – 154.

**第一作者简介:** 魏德强, 男, 1963 年出生, 教授, 硕士研究生导师. 主要研究方向为材料表面强化处理. Email: [wdq1963@sina.com](mailto:wdq1963@sina.com)

**通信作者简介:** 王 荣, 女, 教授, 博士研究生导师. Email: [wr6056@guet.edu.cn](mailto:wr6056@guet.edu.cn)