doi: 10.3969/j.issn.1007-9289.2014.04.005

# 电子束扫描对熔化区显微组织及性能的影响\*

# 魏德强,赵振雷,王 荣

(桂林电子科技大学教学实践部,广西桂林 541004)

**摘** 要:为提高 H13 模具钢的使用寿命,采用热喷涂技术在 H13 钢表面制备 Ni60A 合金层,利用电子束扫描的方法处理表面合金层。研究电子束扫描处理对 H13 钢表面合金层及基体熔化区组织和性能的影响。 采用扫描电子显微镜(SEM)、能谱仪(EDS)、X 射线衍射仪(XRD)、显微硬度计和磨损试验机对 H13 钢电子 束表面合金层及基体熔化区的显微组织、成分、硬度和耐磨性进行分析测试。结果表明:经电子束扫描后, Ni60A 合金层与 H13 钢基体完全熔合在一起,形成冶金结合,扫描处的组织形态可以分为 4 个区域:即熔化 区、过渡区、热影响区和基体。合金层组织由层片状组织转变为短小的枝晶和柱状晶,H13 钢基体熔化区的 组织可分为:熔池上部的等轴晶区、熔池中部的柱状晶区和熔池底部的枝晶区。合金层的显微硬度值为 340~ 380 HV<sub>0.1</sub>,比未处理前 Ni60A 合金层的硬度有所提高,磨损形式主要为磨粒磨损和断续的较浅的犁沟磨损, 在整个磨损试验过程中磨损失重很小,耐磨性得到提高。

关键词:H13 钢;Ni60A;电子束;显微组织

中图分类号: TG174.442; TG456.3 文献标志码: A 文章编号: 1007-9289(2014)04-0030-07

# Effects of Electron Beam Scanning on Microstructure and Properties of Melting Zone

WEI De-qiang, ZHAO Zhen-lei, WANG Rong

(Department of teaching practice, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, Guangxi)

**Abstract**: To improve the H13 steel working life, the method of thermal spraying is adopted to prepare Ni60A alloy layer on the surface of H13 steel and the method of electron beam scanning is used to process the surface alloy layer. The effect of electron beam scanning on structure and properties of substrate melting zone and surface alloy layer of H13 steel is researched. Scanning electron microscope (SEM), energy dispersive spectrometer (EDS), X-ray diffraction (XRD), microhardness tester and abrasion machine are used to analyze the microstructure, component, hardness, and abrasion resistance of the substrate melting zone and surface alloy layer of H13 steel scanned by electron beam. The experiment results show that after the scanning of electron beam, Ni60A alloy layer and H13 steel substrate are completely fused together and metallurgical bonding is formed; the microstructure form of the scanned zone can be divided into four zones; melting zone, transition zone, heat-affected zone and substrate. The structure of the alloy layer transforms from lamellar structure to smallish dendrite and columnar crystals. The melting zone structure of H13 substrate can be divided into three parts: equiax crystal zone at the upper part of the melting zone, columnar crystal zone in the middle part of the melting zone and dendrite zone at the bottom of the melting zone. Microhardness of the alloy layer is from 340 to 380  $HV_{0,1}$  and is larger than that of Ni60A alloy layer unprocessed. The abrasion forms are mainly abrasive wear and spiccato shallow plough wear. The wear volume is very small in the whole wear experiment and the abrasion resistance is improved.

Key words: H13 steel; Ni60A; electron beam; microstructure

**收稿日期**:2014-04-17;**修回日期**:2014-07-03;**基金项目**:\*广西自然科学基金(2012CXNSFDA053026) **作者简介**:魏德强(1963-),男(汉),黑龙江鸡西市人,教授,硕士;研究方向:电子束表面处理

网络出版日期: 2014-07-10 09: 39; 网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20140710.0939.002.html 引文格式: 魏德强,赵振雷,王荣.电子束扫描对熔化区显微组织及性能的影响[J].中国表面工程,2014,27(4): 30-36.

## 0 引 言

H13 模具钢是一种热作模具钢,因其具有较高的淬透性和淬硬性,被广泛应用于模具行业。 在使用过程中由于受到热疲劳、冲蚀、应力腐蚀、 表面热焊合等物理、化学因素的影响,该材料的 寿命严重降低<sup>[1]</sup>。众所周知,模具的失效首先出 现在材料表面,因而探索提高 H13 钢表面性能的 实用新工艺,将具有重要的实际意义。

表面合金化作为表面改性的一种方法,它具 有提高材料表面硬度、耐磨性及耐腐蚀性,防止 材料热疲劳,提高使用寿命等优点而被广泛的研 究和使用<sup>[2]</sup>。近年来电子束表面合金化方法以 其能量利用率高、能量透入深度大、束流偏转灵 活、对焦方便和保护效果好而被广泛应用于工业 与科研领域中<sup>[3]</sup>。目前,电子束表面合金化技术 在国内外都得到了深入而广泛的研究<sup>[4-11]</sup>。

文中利用电子束扫描加热的方式对 H13 钢进行了表面合金化处理,探讨了电子束扫描对 Ni60A 合金层及基体熔化区显微组织和性能的 影响。

# 1 材料与方法

#### 1.1 材料

基体材料为热轧空冷状态的 H13 热作模具 钢,其化学成分如表 1 所示。涂层材料选用 Ni60A 合金粉末,粒度为 48~75 μm,其化学成分 如表 2 所示。

#### 表 1 H13 钢的化学成分

Fabl	le 1	Chemical	composition	of	H13	steel

 $(\omega/\%)$ 

Element	С	Si	Mı	n (	Cr	
Content	0.32-0.45	0.82-1.2	2 0.22-	0.5 4.75	5-5.5	
Element	Mo	V	S	Р	Fe	
Content	1.12-1.75	0.8-1.2	<0.03	<0.03	Bal.	

## 表 2 Ni60A 合金粉末的化学成分

Table 2 Chemical composition of Ni60A alloy powder

						(ω/ %	)
Element	С	Si	В	Cr	Fe	Ni	
Content	0.8	4.0	0.5	17.0	<8.0	Bal.	

# 1.2 方法和表征

采用下料锯床将 H13 钢板材切割成若干长 度为 45 mm 的小段,用立式铣床加工成 40 mm× 35 mm×25 mm 的长方体试样。在试样 40 mm× 35 mm表面上,采用热喷涂的方法预先制备一层 Ni60A 合金层。

通常情况下,试样表面存在油污及铁锈,这 将严重影响热喷涂层的质量,降低 Ni60A 涂层与 H13钢基体的结合强度。为了避免上述因素的 影响,需对基体试样进行预处理。在预处理中, 首先使用砂纸除去基体试样表面的铁锈,然后将 试样放入 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 溶液待表面的油脂溶解后,用 清水冲洗干净,最后对基体进行喷砂粗化,其目 的为保证热喷涂层与基体良好结合。预处理完成 后,为了防止氧化,应尽早实施喷涂。采用 QT-E2000-7型喷枪,使用氧乙炔中性火焰热源,在 H13 钢表面制备一层厚 0.5~1.0 mm 的 Ni60A 合金涂层,其工艺参数如表3所示。喷涂前为减 小基体和涂层的温度差,防止涂层中裂纹的产 生,对 H13 钢试样进行预热处理,预热温度为 300 ℃。热喷涂完成后将试样置于干燥且空气流 通比较好的环境中进行自然冷却。

表 3 热喷涂工艺参数

Tab	le 3	Parameters	of	the	thermal	spray	technol	logy
-----	------	------------	----	-----	---------	-------	---------	------

Parameters	Value		
Oxygen pressure/MPa	0.45		
Oxygen flow /(L $\cdot$ h <sup>-1</sup> )	1 000		
Acetylene pressure/MPa	0.07		
Acetylene flow $/(L \cdot h^{-1})$	950		
Spray distance/mm	200		
Relative moving speed /(mm $\cdot$ s <sup>-1</sup> )	380-400		
Coating thickness/mm	0.5-1.0		

电子束扫描设备采用 HDZ-6F 高压数控真 空电子束焊机。具体工艺参数:加速电压为 60 kV,电子束的电流 30 mA,束斑直径为4 mm, 工件相对移动速度为 10 mm/s。电子束扫描完 成以后,沿垂直于扫描道方向,采用电火花线切割 的方法加工出 10 mm×10 mm×25 mm 的长方体, 制备成金相试样,用 Tension 金相显微镜观察组织 结构;用日产 JSM-5610LV 扫描式电子显微镜拍 摄金相照片并进行 EDS 能谱分析;用 MH-6 显微 硬度计进行硬度测试,测试时,加载重量为 500 g, 加载时为 10 s,用 MM200 磨损试验机来测量试验 试样的耐磨性,磨损试验选用 YG6 硬质合金磨轮 (尺寸为: $\Phi$  40 mm×12 mm),转速 400 r/min,载荷 为 2~8 kg,磨损试验过程中每隔一定时间用精 度为 0.000 1 g 的 FA1004N 型电子天平测量一 次磨损失重。

# 1.3 电子束扫描方式

采用电子束对表面预置 Ni60A 合金涂层的 H13 钢进行表面处理,其扫描方式如图 1(a) 所 示。调节电子束扫描装置中 y、z 方向上两对线 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 Oyz 平面内产生相应的偏转, 在 Oyz 平面形成圆形的束斑。经调试电子束设 备和试验测量,控制电子束扫描的束斑直径为 4 mm,固定电子束下束位置。按照设定的速度, 通过移动工作台实现试样在 Oxy 平面的移动,进 而实现对试样表面的直线扫描。图 1(b)为电子 束扫描后,试样的表面形貌。



(a) Schematic diagram of electron beam scanning



(b) Surface morphology of scanned sample

图 1 电子束扫描方式和扫描后试样表面形貌 Fig. 1 Electron beam scanning method and the surface morphology of sample after scanning

# 2 结果与讨论

#### 2.1 熔化区显微组织形貌和成分

表 4 为试样电子束扫描前后 Ni60A 合金层 的组织成分,通过 EDS 成分分析可知,合金层中 除 Fe 元素的含量变化较大以外其它元素的含量 变化较小,基本上保持了热喷涂层的成分,在能 谱测试的过程中还发现,C、B 等元素在熔池中部 有聚集现象。

表 4 合金层 EDS 分析结果

Table 4 EDS anal	(w/%)				
Area	Ni	Cr	Fe	Si	Other
Thermal spray alloy layer	72.85	16.93	1.88	4.34	Bal.
Electron beam scaned	69.37	16.64	5.75	4.18	Bal.

图 2 为试样经电子束扫描后,熔池横截面形 貌。由图可以看出经电子束扫描后,扫描处的组 织形态可以分为 4 个区域:即 A 处的熔化区,B、 C 白亮处的过渡区和热影响区,D 处的基体。由 实测可知,熔池的深度约为 6 mm。



图 2 熔池的截面形貌 Fig. 2 Cross section morphology of the molten pool

图 3 为试样经电子束扫描后,熔化区各处显 微组织形貌。由图 3(a)~(c)可知,H13 钢基体 熔化区的组织又大致可分为 3 个区域:熔池上部 (1~2 mm)的等轴晶区、熔池中部(2~4 mm)的 柱状晶区和熔池底部(4~6 mm)的枝晶区。由金 属凝固过程中的晶体生长与控制原理<sup>[12]</sup>可知:熔 融的金属在凝固过程中形成的组织形态主要取 决于熔池中的两种热流,一是液体的自由能高于 固体的自由能,固液界面存在正的温度梯度,液 体凝固时释放的结晶潜热通过固体排出,这种热 流情况主要出现在定向凝固中,凝固组织为柱状 晶;二是液态金属处于过冷状态,液体的自由能 低于固体的自由能,固液界面存在负的温度梯 度,在这种情况下结晶潜热通过液体而排出,凝 固组织为等轴晶。由于在熔池上部的冷却主要 靠熔液与周围环境的辐射换热来完成,因此此处 的冷却速度较小,过冷度小,固液界面为负的温 度梯度,因此组织形态主要为等轴晶;在熔池中 部凝固的晶粒主要沿垂直于熔池壁的方向生长, 为定向生长,液态金属凝固时释放的热能通过已 凝固的固体传出,凝固组织主要为柱状晶;在熔 池的底部,熔液通过 H13 钢基体散热,过冷度大, 形核速率大,凝固速度比较慢,凝固组织主要为 枝晶和细枝晶。



(g) Junction of alloy layer and the matrix



(i) Electron beam scanning alloy layer



图 3(d)为过渡区显微组织,由图可知过渡区 为白亮的完全淬火硬化区,该区域组织为隐晶马 氏体+合金碳化物+残余奥氏体,同时由图可知 该区域中还分布着未熔的球状碳化物。

图 3(e)为热影响区显微组织,在热影响区由 于温度差别较大,组织构成复杂,主要由回火马 氏体、回火索氏体、回火托氏体和碳化物组成。 该区域有明显的黑白相间排列紊乱的组织,这是 由于随着距离表面电子束热源的距离增加,该区 域获得的能量少,温度较低,冷却速度极快,因此 奥氏体中的碳和合金元素扩散不充分,形成贫碳 马氏体和高碳马氏体交替存在的组织,由于贫碳 马氏体易发生部分自回火,腐蚀后呈暗色,而高 碳马氏体腐蚀后呈白亮色,这与文献[13]中得到 的结果相似。

图 3(f)为 H13 钢基体的显微组织形貌,其组 织主要为回火索氏体和马氏体。图 3(g)为 Ni60A 合金层与基体结合处组织,由图可知,经 热喷涂制备的 Ni60A 合金层与 H13 钢基体表面 为机械结合,有明显的分界面,经电子束扫描后 Ni60A 合金层与 H13 钢基体完全熔合在一起,形 成冶金结合。

图 3(h)(i)分别为图(g)中的热喷涂合金层 和电子束扫描后的合金层组织形貌,可以发现热 喷涂合金层主要为层片状的组织结构,经电子束 扫描后合金层的组织均匀致密,主要由固溶体和 共晶体组成,其形态主要为树枝晶和胞晶。对比 图 3(i)和 3(a)可知,合金层处的组织形态相对于 基体熔池上部的等轴晶更细小致密,一方面由于 在熔池的不同区域温度梯度和冷却速度不同导 致晶体形态不同,另一方面由于 Ni60A 合金层中 高熔点的合金元素(C,Si,B,V等)比较多,在合 金层熔化时,以残留颗粒的形式存在于熔池中, 当凝固时以此形核,有利于晶粒的形成,使组织 更细小致密。

#### 2.2 显微硬度分布规律

由图 4 可以看出采用的 H13 钢基体的表面 平均硬度值为 95.5 HRBS(约 220 HV),采用热 喷涂法制得的 Ni60A 合金层的平均硬度值为 108.5 HRBS(约 330 HV),合金层的硬度约为基 体的硬度的 1.5 倍。





Fig. 4 Surface average hardness of the matrix and alloy laver

由图 5 可以看出经电子束扫描后,熔化区的 硬度分布有很大提高但不均匀。在熔池上部(距 表面 0~2 mm 处,包括表面合金层和基体熔化 区),显微硬度值为 340 ~380 HV<sub>0.1</sub>,比未处理前 Ni60A 合金层的硬度有所提高;在熔池中部(距表 面 2~3 mm 处),显微硬度值为 380~590 HV<sub>0.1</sub>,

为基体的硬度 1.7~2.7 倍;在熔池底部(距表面 3~4 mm 处)熔化区显微硬度为 500~780 HV<sub>0.1</sub>, 为基体的硬度的 2.3~3.5倍;在过渡区和热影响 区(距表面 4~5.5 mm 处)显微硬度值呈下降趋 势,从780 HV0.1下降为280 HV0.1。这主要是由 于,经电子束扫描后,合金层与基体熔合到一起,合 金层被稀释,合金层中的Ni元素含量降低,因此熔 池上部的硬度比合金层有所提高;在熔池中部, 合金层中高硬度、高熔点的硬质强化相 Ni<sub>2</sub>Si 和  $Cr_{23}C_6$  等颗粒,经熔池中的对流作用,均匀分布 在  $\alpha$ -Fe 基体中,但由于熔池中部的温度较高,冷 却速度低,凝固时间长,因此凝固组织主要为粗 大的柱状晶,所以熔池中部的硬度比基体硬度增 加较少;在熔池底部,硬度提高比较大,这是由 于,一方面 Ni<sub>2</sub>Si 和 Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub> 等颗粒这些硬质相在 熔池底部弥散分布,对基体起到弥散强化作用; 另一方面由于熔池底部与温度低的基体接触,冷 却速度较快,形成较硬的超细共晶组织,有效地 阻止晶粒的长大,起到了细晶强化的作用,从而 使熔池底部的硬度较基体有较大提高。过渡区 和热影响区的硬度也高于基体,一是由于合金层 中的硬质合金元素在高温下扩散到过渡区和热 影响区;二是由于在高温下快速冷却,起到淬火 的作用,从而使硬度提高。



#### Fig. 5 Microhardness of molten pool section

#### 2.3 耐磨性测试分析

图 6 为 H13 钢基体、热喷涂 Ni60A 合金层 以及电子束扫描后 Ni60A 合金层磨损后的表面 形貌,图 7 为相同条件下的磨损失重量。从图可 以看出,它们的磨损机理及耐磨性有很大差异。 图 6(a)为 H13 钢基体摩擦磨损后的形貌,由于 未经处理的 H13 钢硬度比较低,磨盘表面微凸体 对 H13 钢基体表面犁削作用较强,磨损表面有比 较深而宽的犁沟出现,磨损表面粗糙。同时在磨 损时,接触区的材料不断变形,呈现出明显的塑 性变形,导致金属粘着而被剥落。图 6(b)为热喷 涂 Ni60A 合金层摩擦磨损后的形貌,磨损形式主 要为犁沟效应和磨粒磨损,这主要是由于经热喷 涂方法制得的合金层,为层片状组织,致密度比 较低,磨盘表面微凸体易压入合金层造成犁沟磨 削和磨粒磨损。图 6(c)为经电子束扫描后的合 金层磨损形貌,由图可知,磨损形式主要为磨粒 磨损和断续的较浅的犁沟磨损。这可能是由于 经电子束扫描后合金层形成的致密组织和硬质 合金相,使耐磨性得到显著提高,表面不易产生 磨痕和剥落。H13钢、热喷涂 Ni60A 合金层及电 子束扫描后的 Ni60A 合金层的磨损失重曲线如 图 7。由图可知,H13 钢基体的磨损量随时间的 增加而呈线性增加,在时间为 50 min 时,磨损量 为 38 mg,热喷涂 Ni60A 合金层及电子束扫描后 的 Ni60A 合金层的磨损曲线在 30 min 时斜率稍 增大,在 50 min 时的磨损失重量分别为 18 mg 和 16 mg,比 H13 钢的耐磨性有较大提高。同时由 图可知,在整个实验过程中经电子束扫描后的试 样的磨损失重都比较低,因此耐磨性最好,这与 测试的硬度相一致。



(a) H13 steel matrix

(b) Thermal spray alloy layer

(c) Electron beam scanning alloy layer

图 6 基体及合金层表面的磨损形貌







Fig. 7 Wear weight loss of the matrix and alloy layer surface

# 3 结 论

(1) 经电子束扫描后,Ni60A 合金层与 H13 钢基体完全熔合在一起,形成冶金结合,扫描处 的组织形态可以分为 4 个区域:即熔化区、过渡 区、热影响区和基体。试样表面的 Ni60A 合金层 由层片状组织转变为短小的枝晶和柱状晶,H13 钢基体熔化区的组织可分为:熔池上部的等轴晶 区、熔池中部的柱状晶区和熔池底部的枝晶区。

(2) 经电子束扫描后,合金层的显微硬度值 为 340~380 HV<sub>0.1</sub>,比未处理前 Ni60A 合金层的 硬度有所提高;在熔池中部,显微硬度值为 380~ 590 HV<sub>0.1</sub>,为基体的硬度的 1.7~2.7倍;在熔池 底部熔化区显微硬度值为 500~780 HV<sub>0.1</sub>,为基 体的硬度的 2.3~3.5倍;在过渡区和热影响区 显微硬度值为从 780 HV<sub>0.1</sub>到 280 HV<sub>0.1</sub>,呈下降 趋势。

(3) 经电子束扫描后的合金层磨损形式主要 为磨粒磨损和断续的较浅的犁沟磨损,在整个磨 损实验过程中磨损失重最少,耐磨性最好。

# 参考文献

- [1] 张春华,李春彦,张松,等. H13 模具钢激光熔凝层的组
  织及性能[J].金属热处理,2004,29(10):14-16.
- [2] Dobrzanski L A, Polok A, Jonda E, et al. Structure and properties of surface layers obtained by alloying of the hot work tool steels [J]. Journal of Achievements in Materials

and Manufacturing Engineering, 2006, 17: 329-332.

- [3] Dutta Majumdar J, Weisheit A, Mordike B L, et al. Laser surface alloying of Ti with Si+Al for an improved oxidation resistance [J]. Materials Science and Engineering A, 1999, 266(1/2): 123-124.
- [4] 张秉刚,赵健,冯吉才.电子束表面合金化的研究进展 [J].焊接学报,2011,32(11):108-112.
- [5] 魏德强,信卫坡,王荣.电子束扫描对铝合金表面强化层的影响[J].机械工程学报,2010,46(16):125-130.
- [6] 魏德强,信卫坡,王荣. 45 钢电子束相变硬化组织和硬度的研究[J]. 机械工程学报,2012,48(2):127-132.
- [7] Pogrebnjak A D, Bratushka S, Boyko V I, et al. A review of mixing process in Ta/Fe and Mo/Fe systems treated by high current electron beams [J]. Nuclear Instrument and Method in Physics Research B, 1998, 145(3): 373-390.
- [8] Margincean G, Utu D. Microstructure refinement and alloying of WC-Co Cr coatings by electron beam treatment [J]. Surface & Coatings Technology, 2010, 205(7): 1985-9.

- [9] Dong C, Wu A, Hao S, et al. Surface treatment by high current pulsed electron beam [J]. Surface & Coatings Technology, 2003, 163(313): 620-624.
- [10] 李振铎,于月光,曾克里,等. 电子束重熔 Ni60A 自熔合 金涂层的研究 [J]. 矿冶, 2003, 12(3): 52-56.
- [11] 石其年.45 钢电子束表面合金化处理研究 [J].黄石工学 院学报,2007,23(2):16-19.
- [12] 常国威,王建中.金属凝固过程中的晶体生长与控制 [M].北京:冶金工业出版社,2002,88-114.
- [13] Xu G, Wang T, Zhu H Y, et al. Generation of the cascadedfifth-order nonlinear phase shiftswith femtosecond pulse[J]. Chinese Optics Letters, 2003, 1(7): 417 -419.

作者地址:广西省桂林市七星区金鸡路1号 541004 桂林电子科技大学教学实践部 Tel:(0773)2290192 E-mail:108439846@qq.com

(责任编辑:常青)

# 本刊关于参考文献著录的要求

本刊参考文献符合国标 GB/T7714-2005,并参考 CAJ-CDB/T1-1998 技术规范,采用顺序编码 著录,依照其在文中出现的先后顺序用阿拉伯数字标出,并将序号至于方括号内,排列于文后。参考文 献应尽量引用国内外正式公开发表的引文且各项信息齐全,作者的英文名采用姓前名后格式,姓用全 称且首字母大写,名用缩写且保留大写的首字母,作者在3名以上只列前3名,后加",等";题名后应标 注文献标识类型;期刊名称(包括英文期刊)采用全称;著录期刊的年、卷、期信息应齐全。具体格式 如下:

① 期刊:[序号] 作者. 文名[J]. 刊名, 出版年, 卷(期): 起止页码.

② 论文集:[序号] 作者.题名[C].编者.文集名,出版地:出版者,出版年,起止页码.

- ③ 学位论文: [序号] 作者. 题名 [D]. 保存地: 学位授予单位, 年份.
- ④ 专著:[序号] 著者名. 书名[M]. 版本. 出版地:出版者,出版年.
- ⑤ 报告:[序号] 作者名. 报告题名[R]. 出版地:出版者,出版年.
- ⑥ 标准:[序号] 标准代号. 标准顺序号一发布年. 标准名称[S].
- ⑦ 专利:[序号] 专利所有者. 专刊题名[P]. 专利国名: 专利号. 年一月一日(批准日期).
- ⑧ 报纸:[序号] 作者. 题名[N]. 报纸名, 年一月一日(版次).

⑨ 电子文献:[序号] 作者名.题名[J/OL]([EB/OL]或[DB/OL]).电子文献出处或可获得的地址,发表或更新日期.

(本刊编辑部 供稿)