

# 调质处理对 H13 钢等离子堆焊 Ni60/WC 覆层组织和硬度的影响

陈 稳, 王华君, 谢 冰, 周春杨, 饶润胤

(武汉理工大学 材料科学与工程学院, 湖北 武汉 430070)

**摘 要:**对 H13 钢表面等离子堆焊的 Ni60/WC 覆层进行调质处理,研究了调质处理对 Ni60/WC 覆层组织和硬度的影响。结果表明:调质处理工艺消除了 Ni60/WC 覆层的裂纹敏感性,WC 分布得到改善,覆层中有大量 Cr<sub>3</sub>B<sub>3</sub> 硬质相析出;覆层中部花瓣状枝晶形态消失,条状、块状硼化物组织形成;调质处理后覆层的硬度升高,覆层到基体的显微硬度曲线过渡较为平稳,从而提高了覆层的力学性能。

**关键词:**调质处理;粉末等离子堆焊;显微组织;显微硬度

**DOI:** 10.14158/j.cnki.1001-3814.20180608

**中图分类号:** TG156.6; TG174

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1001-3814(2020)6-0109-04

## Influence of Quenching and Tempering Treatment on Microstructure and Hardness of Ni60/WC Coating on H13 Steel by Plasma Transferred Arc Welding

CHEN Wen, WANG Huajun, XIE Bing, ZHOU Chunyang, RAO Runyin

(School of Materials Science and Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

**Abstract:** Ni60/WC coatings on the surface of H13 steel were quenched and tempered by plasma transferred arc welding. The effects of quenching and tempering process on the microstructure and hardness of Ni60/WC coatings were studied. The results show that after quenching and tempering treatment, the crack sensitivity of the coating is eliminated, the distribution of WC improves, and a large amount of Cr<sub>3</sub>B<sub>3</sub> hard phase precipitate in the coatings; the shape of petal dendrite disappears and the boride stripy and massive structure appear in the middle of the coatings. After quenching and tempering treatment, the hardness of the coating increases, the transition of the microhardness curve from the coatings to the substrate is relatively smooth, thus the mechanical properties of the coating improve.

**Key words:** quenching and tempering treatment; powder plasma transferred arc welding; microstructure; microhardness

热锻模是锻造工业中重要的工艺装备。在热锻模服役过程中,锻模型腔长时间承受周期性急冷急热所引起的热胀冷缩及高温软化,导致其型腔表面易出现磨损、裂纹和塑性变形等缺陷,使用寿命低<sup>[1-2]</sup>。通过表面堆焊技术可在热锻模表面制备出一定厚度的高温合金覆层,可提高模具的寿命,因而表面堆焊技术广泛应用于热锻模延寿方面。与 CO<sub>2</sub> 气体自动保护焊、TIG 氩弧焊等传统的堆焊技术相比,等离子堆焊技术具有稀释率低、效率高、工件变形小的特点,在

热锻模的延寿方面具有明显优势<sup>[3-4]</sup>。Ni60(NiCrBSi)是镍基自熔性合金粉末,成形性能好,具有较优良的高温性能<sup>[5]</sup>。碳化钨是耐磨硬质材料,能很好湿润镍基合金。在 H13 钢表面堆焊 Ni60/WC 覆层,可兼顾金属的韧性与陶瓷的耐磨性能,其热锻服役性能优于单一的镍基合金覆层<sup>[6-8]</sup>。在等离子堆焊的过程中,等离子弧温度高,加热冷却速度快,焊后覆层中存在残余应力,易产生焊接裂纹。另外,基体为退火态 H13 钢,其强韧性不能满足热锻模的性能要求,基体成为锻模性能脆弱的区域,因此有必要消除覆层裂纹敏感倾向以及提高基体的力学性能。

热处理能有效调节金属组织和性能,可释放残余应力从而获得优良的性能<sup>[9]</sup>。覆层性能相对优良,基体性能较差,因此,H13-Ni60/WC 复合材料的热处理工艺主要参考基体 H13 钢性能要求,同时兼顾 Ni60/WC 覆层性能。H13 钢在最终服役时通常需要

收稿日期:2018-03-06

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51475346)

作者简介:陈稳(1994-),男,安徽阜阳人,硕士研究生,主要研究方向:堆焊覆层的制备及其力学行为;电话:15071420583;

E-mail: chenwenwut@163.com

通讯作者:谢冰(1968-),女,湖南长沙人,讲师,主要研究方向:堆焊覆层的制备及其力学行为;电话:18971478732;

E-mail: xiebing\_whut@126.com

进行调质处理。本文以提高基体性能为目的,探究调质处理对等离子堆焊 Ni60/WC 覆层组织和硬度的影响。

## 1 实验材料及方法

采用 H13 (4Cr5MoSiV1) 热作模具钢为基体材料,尺寸为 30 mm×80 mm×15 mm,堆焊合金粉末材料为 75% Ni60+25% WC, Ni60 合金粉末的化学成分如表 1 所示。

表 1 Ni60 合金粉末的化学成分(质量分数,%)

C	B	Si	Cr	Fe	Ni
1.05	3.55	3.85	15.25	3.85	余量

焊前将 2 块 H13 钢板放入 300℃保温炉保温 2h,防止堆焊层产生裂纹。采用 PTA-200A 型等离子焊机在 H13 钢基体上制备镍基碳化钨覆层,堆焊工艺参数:焊接电流 95A、焊接速度 20 mm/min、送粉速度 12 g/min,等离子喷嘴与试板间距 10 mm。试样 1 空冷至室温,为焊态试样。试样 2 采用调质处理工艺制备,其工艺为:焊后立即放入箱式电阻炉中,600℃保温 2h,完成后随炉冷却;随后将试样 2 放入高温箱式电阻炉中,850℃预热 30 min 后,升温到 1020℃保温 8 min 后油淬;回火采用两次回火工艺,在 600℃保温 2h 后空冷。

热处理前后在试样熔覆层中部取样,采用 D-8X 射线衍射仪测试熔覆层物相;采用 MR2000 型光学金相显微镜观察基体及熔覆层组织;采用电子探针显微仪和能谱分析仪分析熔覆层的形貌和成分;采用 HV-10001S 型显微硬度仪测试显微硬度,每隔 0.4 mm 打一个点,载荷为 200 N,加载时间 15 s。

## 2 实验结果及分析

### 2.1 调质处理对覆层物相的影响

图 1 是 H13 钢等离子堆焊 Ni60/WC 覆层调质处理前后的 XRD 图谱。可知,等离子堆焊后未处理覆层主要由 (Ni, Fe)、Cr<sub>4</sub>Ni<sub>15</sub>W、Ni<sub>17</sub>W<sub>3</sub>、Ni<sub>2</sub>Cr<sub>3</sub>、Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub> 和 WC 等相组成。经调质处理后,覆层 XRD 图谱中主要的衍射峰变化不大,但发现有新相 Cr<sub>5</sub>B<sub>3</sub> 可被标定,这是由于调质处理致使覆层组织发生了相变反应。在等离子堆焊过程中,加入的 WC 颗粒发生分解, Ni60 合金粉末中的 Cr、Ni 原子易和分解的 W、C 原子发生复杂的化学反应,抑制了 Ni60 合金

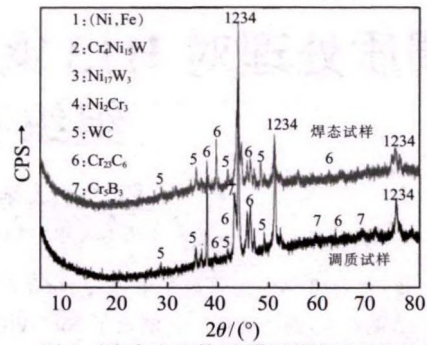


图 1 调质处理前后覆层物相的 XRD 图  
Fig.1 XRD patterns of the coatings before and after quenching and tempering treatment

粉末中 B 原子和 Cr 原子的结合。B 原子过饱和地固溶存在于  $\gamma$ -(Ni, Fe) 中,该固溶体物相不稳定。在调质处理过程中,由于原子扩散加剧,过饱和固溶体  $\gamma$ -(Ni, Fe) 中的 B 和 Cr 结合生成了 Cr<sub>5</sub>B<sub>3</sub>。

### 2.2 调质处理对显微组织的影响

图 2 调质处理前后覆层的 EPMA 截面形貌。图 2(a) 为焊态试样横截面 50 倍下的背散射形貌。可看出,覆层与基体界面中间有灰色带状区域,附近无空洞和裂纹等缺陷,基体与覆层之间结合很好,实现了较高的结合强度。焊态试样在熔合线底部有一条明显裂纹,沿着 WC 颗粒扩展。裂纹产生的原因为:等离子堆焊具有快速加热和快速冷却的特点,造成覆层产生较大的残余应力,开裂敏感性增加;同时,添加的 WC 硬质相硬度高脆性大,很易产生应力集中,导致覆层在 WC 附近区域出现裂纹。覆层底部有大量白色不规则 WC 相分布在近熔合线处,中部出现了较多条状、鱼骨状、轴状等灰白色的富钨相,周边有很多灰黑色的团状富镍相聚集。图 2(b) 为调质处理后试样横截面 50 倍下的背散射形貌。从图 2(b) 可看出,焊后调质处理后的覆层底部无裂纹产生,焊后处理作用明显。试样在堆焊完成后放入炉内保温缓冷,降低了堆焊试样的冷却速度,有效抑制了裂纹的出现。经调质处理后,覆层底部白色不规则

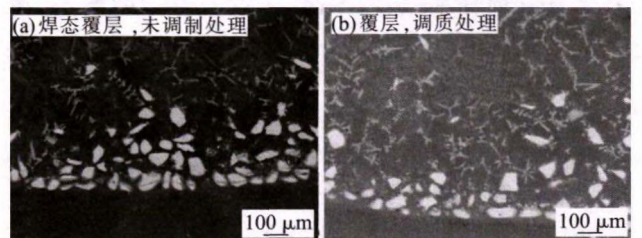


图 2 调质处理前后覆层的 EPMA 截面形貌  
Fig.2 EPMA cross-sectional morphologies of the coatings before and after quenching and tempering treatment

WC相向覆层中部扩散,WC的分布得到改善,中部灰黑色的团状富镍相分解破碎,团聚现象消失,均匀分布在覆层中。

在覆层中部同时观察到新的条状、块状黑色相。为确认新相成分,对该区域进行微区分析。图3是调质处理后覆层中部500倍下的EPMA形貌。表2是其不同区域EDS分析结果。从图3可看出,覆层中

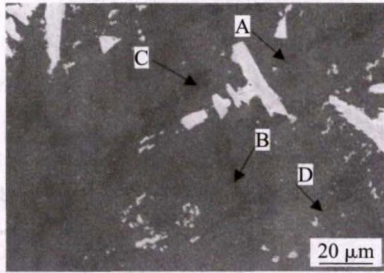


图3 调质处理后覆层中部的EPMA照片  
Fig.3 EPMA micrograph of the coatings in the middle after quenching and tempering treatment

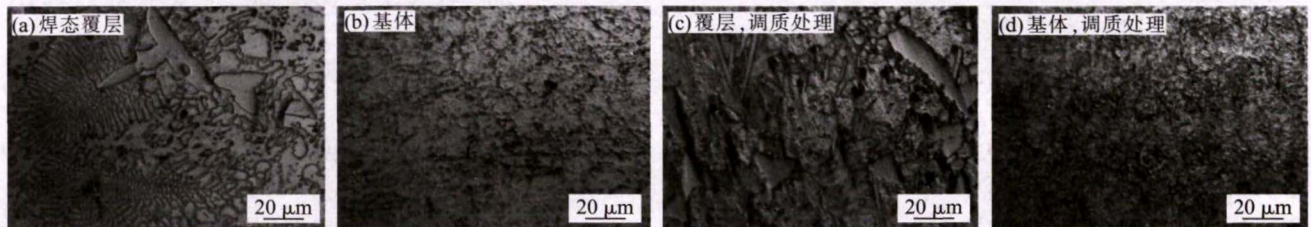


图4 调质处理前后试样的显微组织

Fig.4 Microstructure of the test samples before and after quenching and tempering treatment

### 2.3 调质处理对显微硬度的影响

图5是调质处理前后等离子堆焊Ni60/WC覆层在熔合线附近两侧各4mm范围内的显微硬度变化曲线。热处理前,试样基体为退火态,远离焊层的基体显微硬度较低,为360HV左右。靠近熔合区附近1mm处,基体H13钢在堆焊过程中发生淬火效应,基体显微硬度高达700~800HV,远离熔合线处的

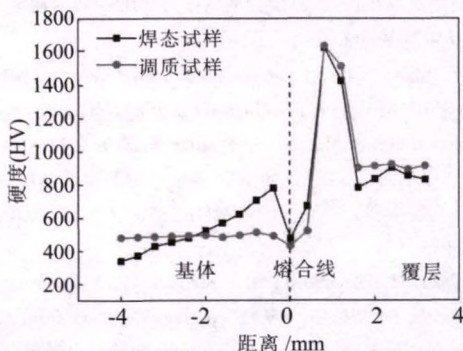


图5 调质处理前后覆层的显微硬度分布  
Fig.5 Microhardness distribution of the coatings before and after quenching and tempering treatment

表2 图3中不同区域EDS结果(原子分数,%)

Tab.2 EDS analysis of different areas in Fig.3 (at%)

区域	B	Cr	Ni	W	Si	Fe
A	51.37	20.57	22.39	0.77	1.06	3.84
B	37.42	26.41	25.96	0.66	0.57	8.98
C	42.31	28.21	20.31	0.52	1.44	7.21
D	49.58	23.54	21.31	0.32	0.09	5.34

部分布着大量条状、块状黑色相;通过EDS分析,这些相富含Cr和B,可确定新相为 $Cr_5B_3$ 。

图4为调质处理前后试样的显微组织。焊态下覆层中部包含花瓣状枝晶、灰白色等轴状组织和枝晶间白色共晶组织(图4(a))。H13钢的基体组织为粒状珠光体和少量碳化物,晶粒细小(图4(b))。经调质处理后,花瓣状枝晶形态消失,等轴状组织、硼化物条状、块状组织和白色共晶组织分布在白色基体相上(图4(c))。经调质处理后,基体组织为回火马氏体、碳化物和少量的残余奥氏体(图4(d))。

基体硬度则逐渐降低;熔覆层平均硬度约为912.3HV,约为基体的4.6倍。添加的WC硬质相和生成的 $Cr_4Ni_{15}W$ 、 $Ni_2Cr_3$ 、 $Ni_{17}W_3$ 、 $Cr_{23}C_6$ 等增强相在覆层中弥散分布,提高了熔覆层的整体硬度。堆焊层一侧覆层硬度先急剧增高后下降,离熔合线越远,基体对覆层的稀释作用越来越小,硬度逐渐上升。WC沉积在近熔合线处,WC硬度为1632.4HV,造成该区域硬度急剧升高。由图5还可知,焊态下的试样中覆层到基体的显微硬度突变幅度大,影响覆层的性能。

从图5还可知,热处理后的基体显微硬度约为480HV,这是由于调质处理后H13钢基体组织发生相变,组织由粒状珠光体转变成回火马氏体。堆焊层的平均硬度升高,约为1013.3HV,且覆层组织和硬度分布较均匀,其主要原因是调质处理后,覆层中析出了条状、块状相 $Cr_5B_3$ ,这些硬质相在覆层中起到骨架增强相的作用,从而提高了覆层硬度。从图5可知,覆层到基体的显微硬度曲线过渡较为平稳,整体硬度升高,调质处理改善了基体和覆层的力学性能。

### 3 结论

(1) 采用等离子堆焊技术在 H13 钢表面制备了 Ni60/WC 覆层, 覆层物相主要由 (Ni, Fe)、 $\text{Cr}_4\text{Ni}_{15}\text{W}$ 、 $\text{Ni}_2\text{Cr}_3$ 、 $\text{Ni}_{17}\text{W}_3$ 、 $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ 、WC 等相组成。经过调质处理后, 覆层中生成了  $\text{Cr}_3\text{B}_3$  硬质相, 提高了覆层的硬度。


(2) 调质处理工艺消除了覆层的裂纹敏感性, WC 分布得到改善。调质处理后, 覆层中部灰黑色的团状富镍相团聚现象消失, 条状、块状的黑色  $\text{Cr}_3\text{B}_3$  相析出, 花瓣状枝晶形态消失, 条状、块状硼化物组织形成; 基体组织由粒状珠光体转变成回火马氏体。

(3) 焊态下的覆层硬度高达 912.3HV, 覆层硬度分布不均匀, 覆层到基体的显微硬度突变幅度大; 调质处理后覆层硬度升高到 1013.3HV, 覆层硬度分布均匀, 基体性能得到改善。覆层到基体的显微硬度曲线过渡整体较为平稳, 硬度升高, 调质处理改善了基体和覆层的力学性能。

#### 参考文献:

- [1] 王孟, 刘宗德, 宝志坚. H13 钢汽车热锻模具失效机理分析[J]. 锻压技术, 2008, 33(4): 83-86.
- [2] Njeh F, Kchaou M, Elleuch R, et al. Analysis of degradation and failure mechanisms that develop in hot forging die [J].

Journal of Failure Analysis & Prevention, 2012, 12 (3): 273-280.

- [3] Sudha C, Shankar P, Rao R V S, et al. Microchemical and microstructural studies in a PTA weld overlay of Ni-Cr-Si-B alloy on AISI 304L stainless steel [J]. Surface & Coatings Technology, 2008, 202(10): 2103-2112.
- [4] Lin N, Wu C H, He Y H, et al. Effect of Mo and Co additions on the microstructure and properties of WC-TiC-Ni cemented carbides [J]. International Journal of Refractory Metals & Hard Materials, 2012, 30(1): 107-113.
- [5] 葛言柳, 邓德伟, 田鑫, 等. 焊接参数对 Ni60 合金等离子堆焊层组织结构和显微硬度的影响 [J]. 中国表面工程, 2011, 24(5): 26-31.
- [6] Celik O N. Microstructure and wear properties of WC particle reinforced composite coating on Ti6Al4V alloy produced by the plasma transferred arc method [J]. Applied Surface Science, 2013, 274: 334-340.
- [7] Liyanage T, Fisher G, Gerlich A P. Microstructures and abrasive wear performance of PTAW deposited Ni-WC overlays using different Ni-alloy chemistries [J]. Wear, 2012, 274-275(3): 345-354.
- [8] 芦琪, 杜聪, 王洪福, 等. 热锻模等离子喷焊制备 Ni60 基陶瓷覆层的实验研究[J]. 热加工工艺, 2014, 43(8): 131-133.
- [9] Deng H X, Shi H J, Tsuruoka S, et al. Influence of heat treatment on characteristic behavior of Co-based alloy hardfacing coatings deposited by plasma transferred arc welding [J]. Key Engineering Materials, 2011, 462-463: 593-598. 

(上接第 108 页) 处发生明显 Fe、W 元素扩散现象, 沉积机理主要是机械结合伴随少量的微区冶金结合和扩散。

(2) 由 HVAF 制备的 WC-10Co-4Cr 涂层非常致密, 涂层整体孔隙率保持在 1.4% 左右, 无明显的裂纹与孔洞, 涂层整体维氏硬度达到 1200HV。

(3) 由于 HVAF 的超音速特点, 有少许 WC 颗粒在极高速度下直接撞击进入基体中, 形成孤岛群落, 并在基体中留下细小裂纹。

#### 参考文献:

- [1] Liu Y, Liu W, Ma Y, et al. A comparative study on wear and corrosion behaviour of HVOF and HVAF-sprayed WC-10Co-4Cr coatings [J]. Surface Engineering, 2017, 33(1): 63-71.
- [2] 栗卓新, 方建琦, 魏琪, 等. 国内外热喷涂涂层形成机理的研究进展 [J]. 中国机械工程, 2006, 25(11): 1198-1203.
- [3] 周庆生, 李俊兰, 阙月琴, 等. 热喷涂涂层结合机理的研究

[J]. 机械科学与技术, 1990, 13(3): 39-44.

- [4] 杨晖, 潘少明. 铝合金表面超音速等离子喷涂 WC-12Co 涂层的结合机理 [J]. 热加工工艺, 2008, 37(23): 105-108.
- [5] 杨晖, 潘少明. 超音速等离子喷涂 WC-12Co 涂层的结合机理 [J]. 材料热处理学报, 2009, 30(3): 187-191.
- [6] 任建平, 刘敏, 邓春明, 等. 在 高强铝合金基体上采用超音速火焰喷涂 WC-CoCr 涂层性能的研究 [J]. 材料研究与应用, 2010, 4(2): 95-99.
- [7] Li Y, Lian Y, Li J J, et al. Solid particle erosion behavior of HVOF/HVAF sprayed WC-Co-Cr coatings [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 2016, 230(6): 1-14.
- [8] 白冰, 张治民, 王江慧. 步进距离对 HVAF 喷涂 WC-10Co-4Cr 涂层孔隙率和显微硬度的影响 [J]. 热加工工艺, 2019, 48(8): 154-156.
- [9] Myalska H, Szymański K, Moskal G. Microstructure and properties Of WC-Co HVAF coatings obtained from standard, superfine and modified by sub-micrometric carbide powders [J]. Archives of Metallurgy and Materials, 2015, 60(2): 759-766.
- [10] 石晓轩. T10 表面不同喷涂层微观组织及耐磨性研究 [D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2016. 