

# WC含量对WC-Ni60喷焊层微观组织和硬度的影响

赵虎林<sup>1</sup>, 苟藏红<sup>1</sup>, 袁永峰<sup>2</sup>, 曹静<sup>2</sup>, 赵昕<sup>3</sup>

(1. 陇南师范高等专科学校, 甘肃 陇南 742500; 2. 甘肃宝徽集团锌冶炼厂, 甘肃 陇南 742300;  
3. 甘肃省礼县石桥镇中心小学, 甘肃 陇南 742211)

**摘要:**使用氧乙炔火焰喷焊工艺在A3钢板上制备了不同WC含量(10%、20%、30%、40%、50%)的WC-Ni60合金粉末喷焊层,通过对比分析,研究了不同WC含量对喷焊层的微观组织和硬度的影响。结果表明:喷焊后的WC-Ni60合金层与A3钢板基体结合处形成“白亮带”共晶组织,冶金结合良好;随着WC含量的增加,喷焊层的微观组织中WC颗粒逐渐增多,显微硬度也越大,喷焊层的显微硬度可达基体材料的2倍以上。但是在WC含量超过30%以后,微观组织中容易出现气孔等缺陷。

**关键词:**WC-Ni60合金粉末;WC含量;火焰喷焊层;微观组织;力学性能

中图分类号: TG166.7 文献标志码: A 文章编号: 0254-6051(2024)04-0278-06

DOI: 10.13251/j.issn.0254-6051.2024.04.044

## Effect of WC content on microstructure and hardness of WC-Ni60 spray welding coating

Zhao Hulin<sup>1</sup>, Gou Zanghong<sup>1</sup>, Yuan Yongfeng<sup>2</sup>, Cao Jing<sup>2</sup>, Zhao Xin<sup>3</sup>

(1. Longnan Teachers College, Longnan Gansu 742500, China;

2. Gansu Baohui Zinc Products Co., Ltd., Longnan Gansu 742300, China;

3. Gansu Lixian Shiqiao Town Central Primary School, Longnan Gansu 742211, China)

**Abstract:** WC-Ni60 spray welding coatings with different WC contents (10%, 20%, 30%, 40% and 50%) were prepared on A3 steel plate by oxyacetylene flame spray welding process. Through comparative analysis, the effect of WC content on the microstructure and hardness of the spray welding layer was studied. The results show that after spray welding, a “white bright band” eutectic structure forms at the junction of the WC-Ni60 alloy coating with the A3 steel plate matrix, and the metallurgical bonding is good. With the increase of WC content, WC particles in the microstructure of the spray welding coating gradually increase, the microhardness is also higher and reaches more than 2 times of that of the base material. However, when the WC content exceeds 30%, pores and other defects are easy to appear in the microstructure.

**Keywords:** WC-Ni60 alloy powder; WC content; flame spray welding coating; microstructure; mechanical properties

收稿日期: 2023-10-16 修订日期: 2024-03-05

基金项目: 甘肃省陇南市科技计划(2021-10)

作者简介: 赵虎林(1986—),男,讲师,硕士,主要研究方向为有色金属焊接、有色金属冶金等, E-mail: 455125571@qq.com

引文格式: 赵虎林, 苟藏红, 袁永峰, 等. WC含量对WC-Ni60喷焊层微观组织和硬度的影响[J]. 金属热处理, 2024, 49(4): 278-283.

Zhao Hulin, Gou Zanghong, Yuan Yongfeng, et al. Effect of WC content on microstructure and hardness of WC-Ni60 spray welding coating[J]. Heat Treatment of Metals, 2024, 49(4): 278-283.

[2] 崔 崑. 钢的成分、组织与性能 第四分册: 工模具钢[M]. 北京: 科学出版社, 2013.

[3] 赵步青. 热处理炉前操作手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2010.

[4] 陈 杰. H13钢及其热处理[J]. 热处理技术与装备, 2008(4): 44-46.

Chen Jie. The study of H13 steel and its heat treatment[J]. Heat Treatment Technology and Equipment, 2008(4): 44-46.

[5] 吴 健. 激光淬火+表面氮化复合处理方案的选择[J]. 热加工工艺, 2007, 36(14): 50-62.

Wu Jian. Order choice of composite treatment schemes about laser quenching + surface nitriding[J]. Hot Working Technology, 2007, 36

(14): 50-62.

[6] 张亚龙, 徐新成, 杨向东, 等. 激光表面淬火对H13钢显微组织及性能影响[J]. 热加工工艺, 2014, 43(8): 153-155.

Zhang Yalong, Xu Xincheng, Yang Xiangdong, et al. Effects of surface quenching on microstructure and properties of H13 steel[J]. Hot Working Technology, 2014, 43(8): 153-155.

[7] 詹 武. 模具钢的激光相变硬化研究[J]. 模具工业, 2002(1): 56-60.

Zhan Wu. Study on laser beam transformation hardening of die steel[J]. Die and Mould Industry, 2002(1): 56-60.

[8] 李炯辉, 林德成. 金属材料金相图谱[M]. 北京: 机械工业出版社, 2020.

水轮机叶轮与水流接触面在服役过程中因长期受水流和泥沙的冲蚀,同时受气泡的空蚀,导致接触面易产生冲蚀磨损,形成蚀坑,同材质焊接修复后并不能提升其耐腐蚀性和耐磨性,虽能继续服役,但需要反复修复,延误生产,造成产能损失。Ni60合金粉末因其耐磨性能好、耐腐蚀性能优、硬度高等特点,广泛用于提高零件的表面力学性能<sup>[1-2]</sup>。本文在水轮机叶轮修复试验时发现,喷焊Ni60合金粉末确实在水轮机叶轮修复表面时极大提高了叶轮的耐磨性和耐腐蚀性能,但水轮机叶轮由于经常受水流高速冲击磨损,尤其是在洪涝季节水中泥沙含量剧增的情况下,Ni60合金喷焊层对于抵挡泥沙的高速冲击磨损效果还稍显欠缺。因此考虑在Ni60合金粉末中加入硬化相以有效提高合金喷焊层抵抗冲击磨损能力。WC颗粒具有硬度高、耐磨性能好、性能稳定等优点,而且具有与Fe基、Ni基等合金良好的润湿性,所以试验在Ni60合金粉末中加入WC颗粒,形成WC-Ni60合金粉末喷焊层,发现喷焊层除耐腐蚀外,还具有优良的抗泥沙冲击磨损能力,但WC含量对喷焊层的微观组织和力学性能有很大影响,因此本文通过配制不同WC含量的WC-Ni60合金粉末进行表面火焰喷焊,对比研究了WC含量对喷焊层微观组织和力学性能变化规律<sup>[3-5]</sup>。

## 1 试验材料与试验方法

### 1.1 试验材料

试验所用基材为A3钢板,喷焊材料为不同比例均匀混合的WC与Ni60合金粉末,WC粉末的质量分数分别为10%、20%、30%、40%和50%。WC粉末纯度为99.5%,粒度在200目左右,市售Ni60合金粉末的粒度为200目左右,主要化学成分如表1所示。图1为WC粉末和Ni60合金粉末的微观形貌。

表1 Ni60合金粉末化学成分(质量分数,%)  
Table 1 Chemical composition of the Ni60 alloy powder (mass fraction, %)

C	B	Si	Fe	Cr	W	Ni
0.80	3.5	4.00	15.00	15.50	3.00	余量

### 1.2 喷焊工艺

试验通过火焰喷焊工艺在A3钢板表面制备厚度为1.5~2.0 mm的WC-Ni60合金粉末喷焊层,所用A3钢板尺寸为210 mm×100 mm×6 mm,喷枪为QH-2/h型氧乙炔火焰焊枪。喷焊时,喷枪与A3钢板距离为150~200 mm,氧气压力为0.3 MPa,乙炔气体压力为0.05 MPa,送粉量在1.5~1.8 kg/h<sup>[6]</sup>。喷焊具体

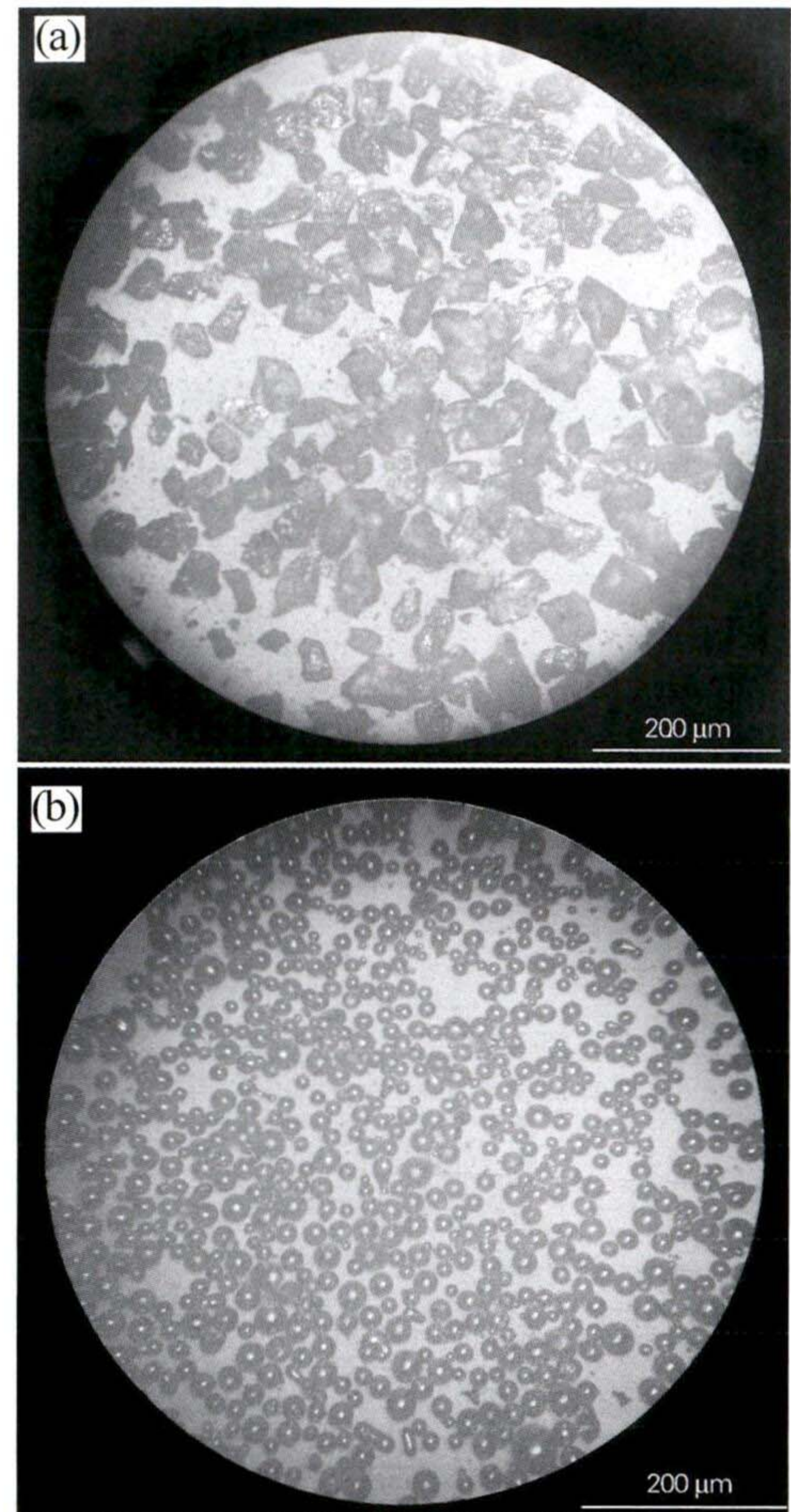


图1 WC粉末(a)和Ni60粉末(b)的微观形貌  
Fig. 1 Morphologies of the WC powder(a) and Ni60 powder(b)

步骤为:打磨A3钢板喷焊面—丙酮清洗—预热(300~400℃)—喷焊基础层(厚度0.3~0.5 mm)—喷焊合金粉末层(厚度1.5~2.0 mm)—表面重熔—冷却—取样<sup>[7]</sup>。

为保证喷焊层厚度均匀,采用多层多道喷焊工艺,喷焊层整体厚度维持在2~2.5 mm之间,喷焊温度在900~1000℃之间。为保证组织均匀且合金粉末充分熔化,喷焊后增加重熔工艺,重熔温度在1000~1200℃之间,重熔时间为30 s左右。

### 1.3 显微组织观察和硬度测试

对喷焊层试样进行打磨抛光和化学腐蚀,腐蚀液为盐酸与硝酸(混合比为3:1)加CuCl<sub>2</sub>的混合液,然后使用MeF3大型光学显微镜对喷焊层表面和截面进行显微组织分析。使用Hx-100TM光学显微硬度计测试显微硬度,加载载荷为1 kg。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 显微组织

不同WC含量的WC-Ni60合金粉末喷焊层的表

面微观形貌如图 2 所示。由图 2 可见,喷焊层表面基体材料为镍合金,白色不规则状 WC 粒子嵌入在镍基合金中,结合良好,且随着 WC 含量的不断增加,WC 颗粒数量逐渐增多,尺寸也逐渐增大,这可使喷焊层的硬度逐渐增大。分析其原因,主要是在 WC 含量较少

时喷焊热量较为充足,有部分 WC 颗粒已经熔化或边缘熔化,形成的 WC 颗粒较小,边缘比较圆润。随着 WC 含量增大,热输入不足以熔化所有的 WC 颗粒,有的边缘熔化较多,有的边缘熔化较小,所以呈现出较多带尖角的 WC 颗粒。

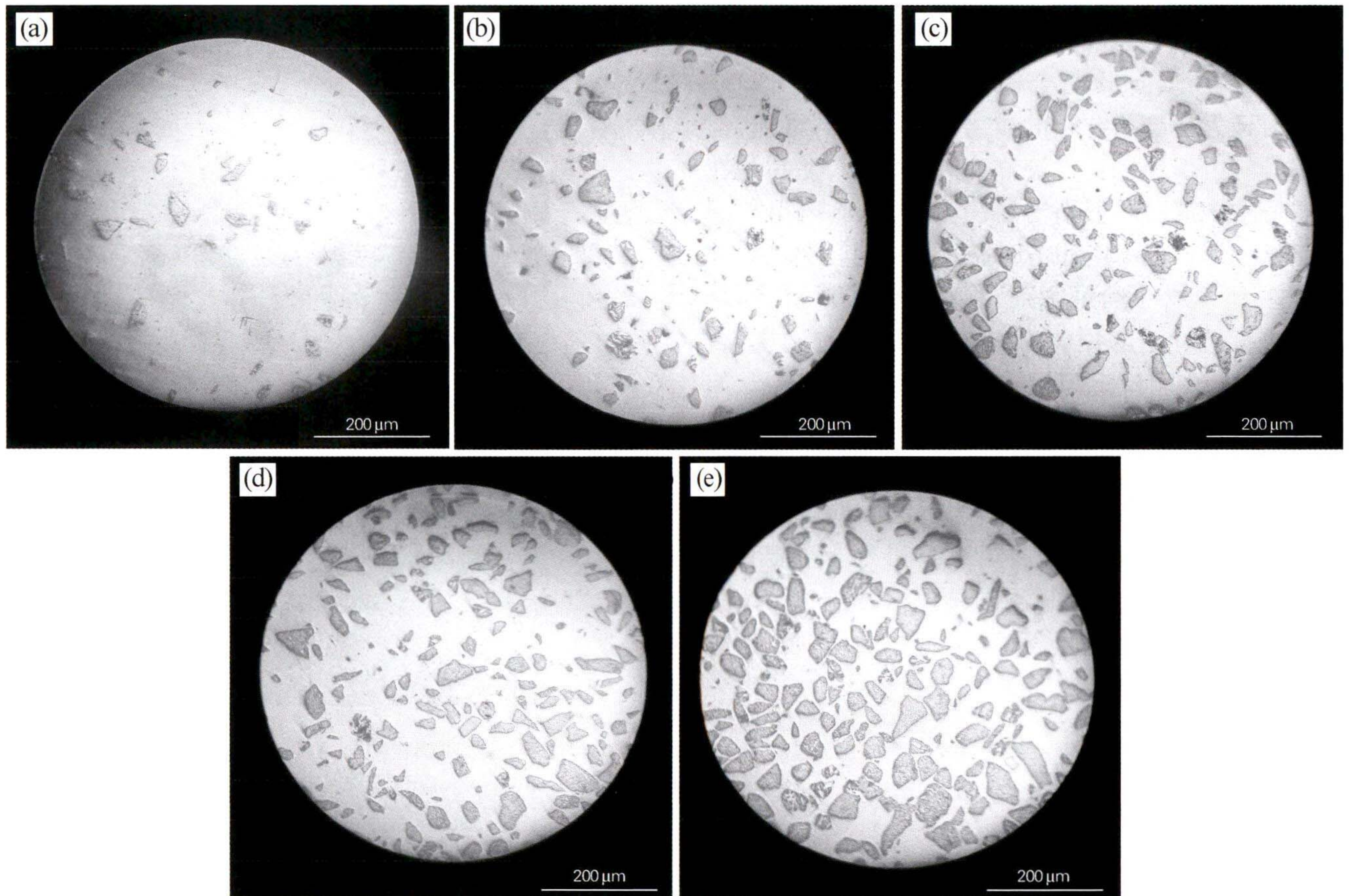


图 2 不同 WC 含量的 WC-Ni60 喷焊层表面微观组织

Fig. 3 Microstructure at surface of the WC-Ni60 spray welding coating with different WC contents  
(a) 10%; (b) 20%; (c) 30%; (d) 40%; (e) 50%

图 3 为不同 WC 含量的 WC-Ni60 合金粉末喷焊层的截面微观形貌。由图 3 可知,不同 WC 含量的喷焊层均与 A3 钢板基体结合良好,Fe 原子与镍基合金相互浸润,形成“白亮带”共晶组织,使喷焊层合金与基体形成良好的冶金组织,且冶金层并不受 WC 含量的影响。当 WC 含量超过 30% 以后,喷焊过程中容易出现气孔等缺陷,此缺陷并不是组织成分导致,所以在喷焊高 WC 含量的 WC + Ni60 合金时,需要调整喷焊工艺,增加重熔时间或者提高重熔温度,即可避免。

图 4 为 WC 含量 30% 的 WC-Ni60 合金粉末喷焊层表面不同区域的微观形貌。喷焊是一个复杂的冶金反应过程,由图 4(a)可知,喷焊层表面 Ni 基层主要为分布着细小紧密且均匀的凝聚态组织,分析其成分主

要为镍基合金。凝聚态组织中分布有大量颗粒状的 W 化合物以及针状、树枝状的共晶组织。

由图 4(b)可见,WC 颗粒周围紧密分布着形如三角形、梯形、多边形以及长条状组织,其形状规则,多为 W 化合物。分析其形成原因,主要是在喷焊过程中,WC 颗粒边缘部分受热熔化溶解,析出具有活性的 Si 元素,Si 元素又与 W 元素形成  $WSi_2$  化合物。这些化合物在冷却过程中以三角形、梯形、多边形以及长条状附着在 WC 颗粒周围,增加了 WC 颗粒的结合强度,又提高了喷焊层的耐腐蚀性能<sup>[8-10]</sup>。

由图 4(c)可见,WC 颗粒表面呈现针状、树枝状共晶组织。随着 WC 含量的增加,喷焊过程中 WC 颗粒与熔融态金属接触晶面增加,液态金属中的 Ni、Cr 原子在 WC 颗粒界面发生反应置换出 W 原子,此过程

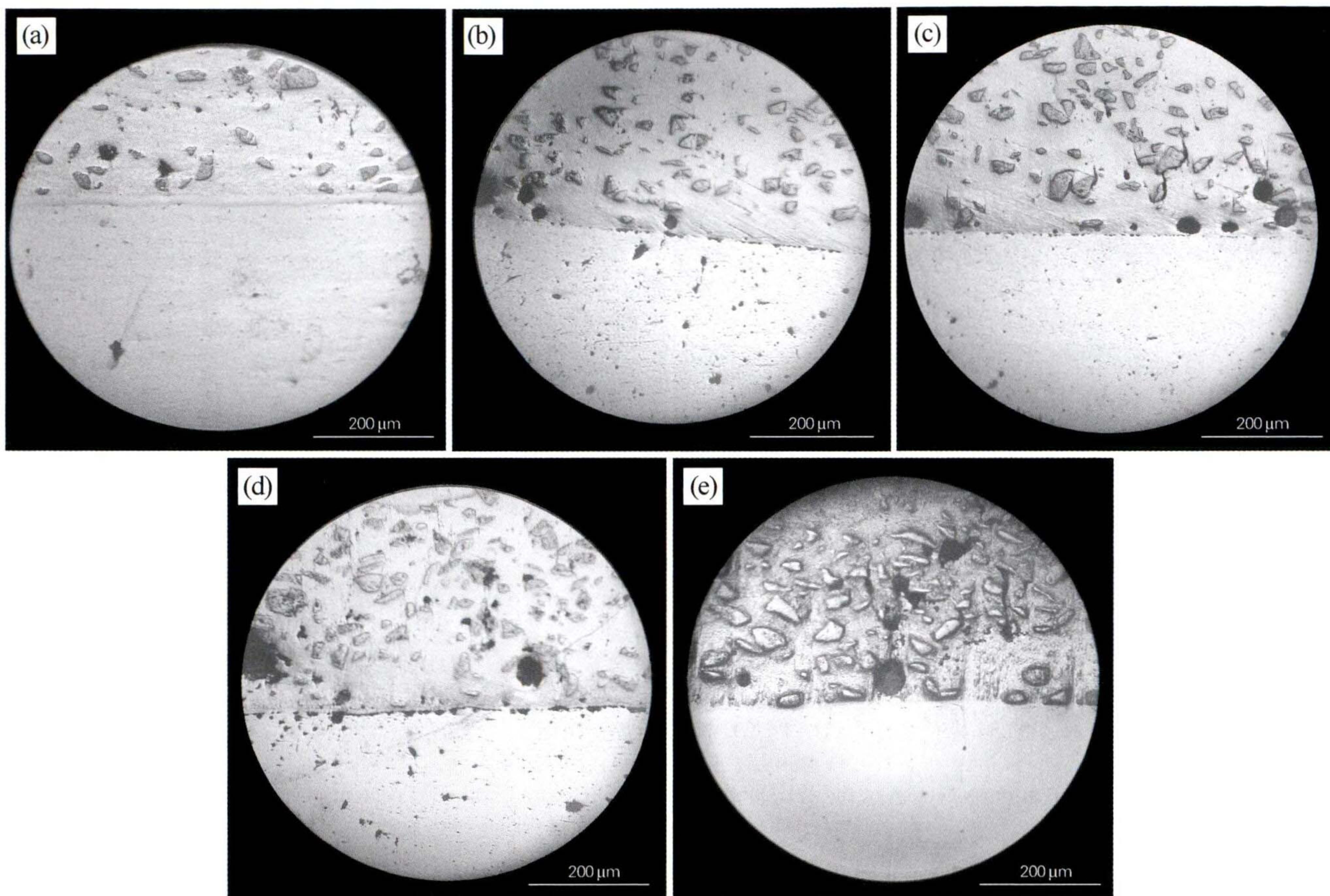


图3 不同WC含量的WC-Ni60喷焊层截面微观组织

Fig. 3 Microstructure in cross section of the WC-Ni60 spray welding coating with different WC contents  
(a) 10% ; (b) 20% ; (c) 30% ; (d) 40% ; (e) 50%

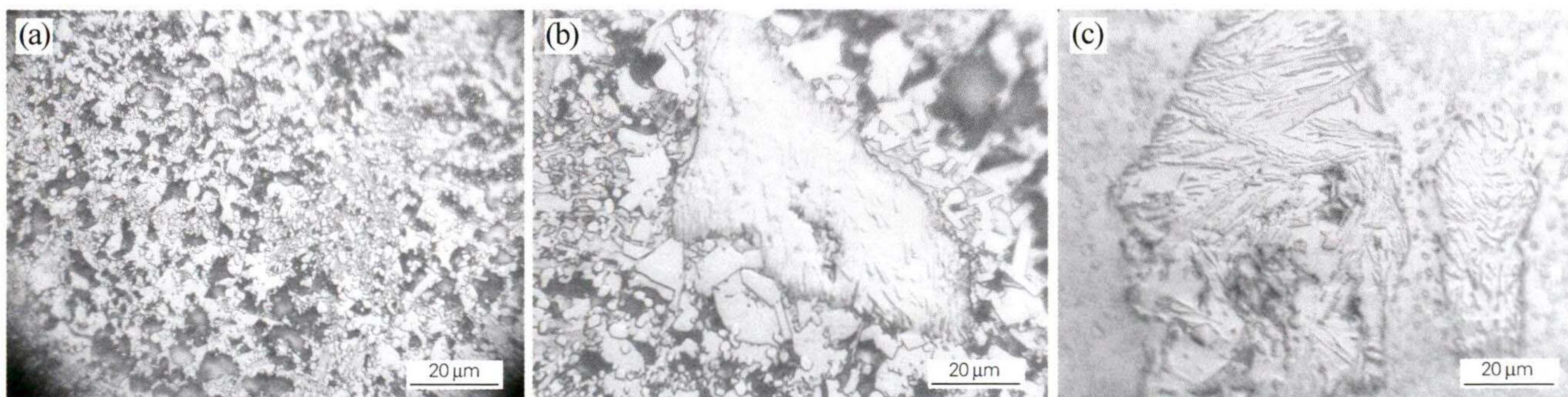


图4 WC含量为30%时WC-Ni60喷焊层表面不同位置的微观组织  
(a)Ni基体;(b)WC颗粒周围;(b)WC颗粒内部

Fig. 4 Microstructure at surface of the WC-Ni60 spray welding coating with WC content of 30% in different areas  
(a) around nickel matrix; (b) around WC particles; (c) inside of WC particles

不断进行,形成WC、 $W_2C$ 共晶混合物以及复杂的 $Ni_4B_3$ 、 $Cr_4Ni_{15}$ 等化合物<sup>[11-14]</sup>。

图5为WC含量30%的WC-Ni60合金粉末喷焊层截面不同区域的微观形貌。由图5(a)可见,基体在靠近喷焊层区域的晶粒明显比远离喷焊层区域的晶粒粗大,说明喷焊的加热过程中基体受到了热影响作用。

本试验主要研究喷焊表面的力学性能,对基体材料的受热影响并不作要求。若其它应用方面需要控制基体材料受热影响,可在喷焊时对基体做定向冷却,以减少热影响区对基体材料力学的影响。

由图5(b, c)可见,喷焊层与基体结合处的晶粒均匀、明亮且沿基体外表面带状分布,喷焊层与基体

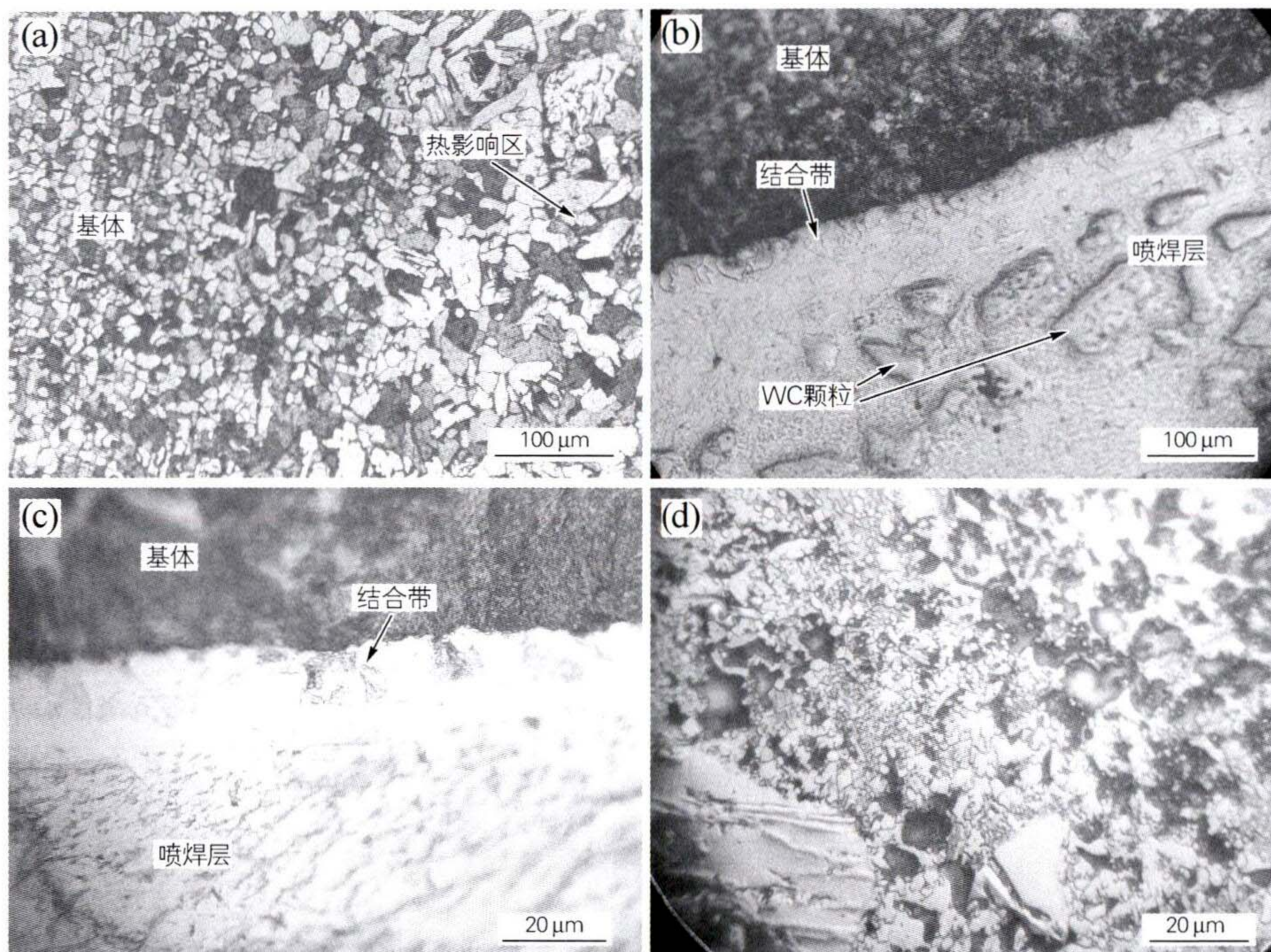


图 5 WC 含量为 30% 时 WC-Ni60 喷焊层截面不同位置的微观组织

(a) 基层; (b, c) 结合层; (d) 喷焊层

Fig. 5 Microstructure in cross section of the WC-Ni60 spray welding coating with WC content of 30% in different areas

(a) substrate; (b, c) junction; (d) spray welding coating

结合良好,为冶金结合。其形成原因是在喷焊过程中合金粉末中的 B、Si 等元素熔化形成的硼硅酸盐保护了熔融态合金,增加了润湿性,熔融态合金与基体之间的 Ni、Fe 等原子相互扩散、相互渗透,形成固溶体<sup>[15]</sup>。

由图 5(d)可见,喷焊层晶粒细小均匀,多为 Ni-Fe 金属间化合物,喷焊层不仅与基体结合良好,也与其中的 WC 颗粒结合良好。结合图 4(b)可以看出,WC 颗粒周围分布着大量共晶组织,即增强了结合强度,又提高了喷焊层的耐腐蚀性能。牢牢结合的 WC 颗粒可大大提升喷焊层的硬度和耐磨性。

## 2.2 显微硬度

喷焊层微观组织由合金基层和 WC 颗粒组成,在测试其硬度时,除在合金基层打点外,每一个试样也选择在其 WC 颗粒上打点,得到的显微硬度变化曲线如图 6 所示,由图 6(a)可知,WC 含量越高,喷焊层表面硬度也越高,喷焊层硬度由高硬度的钨化物分布决定。由图 6(b)可知,从基体到喷焊层,不同 WC 含量喷焊层的硬度变化规律大致相同,均是在熔合线处开始大幅提升,喷焊层的显微硬度可达基体材料的 2 倍以上,且 WC 含量越高,其显微硬度也越高。

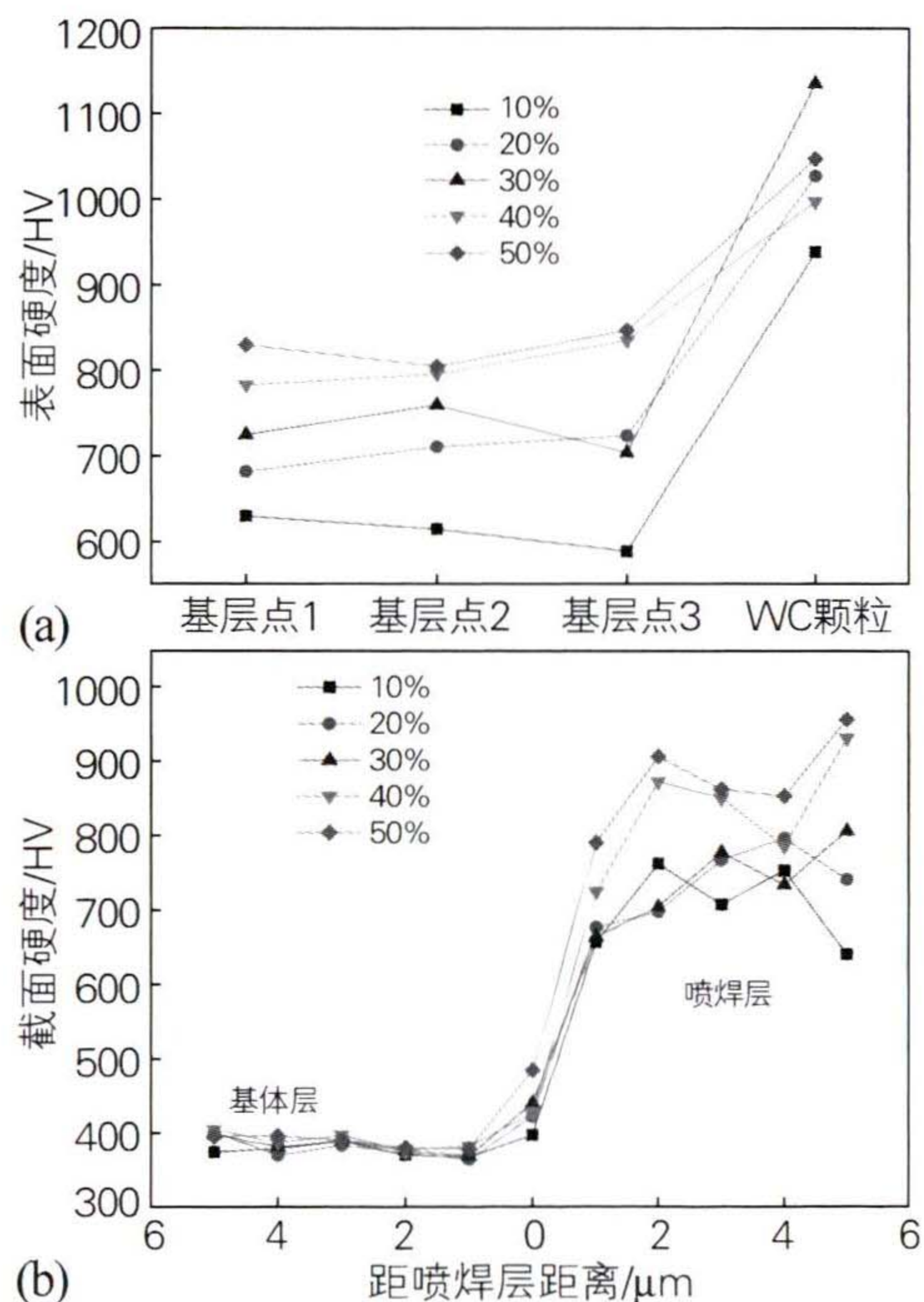


图 6 不同 WC 含量的 WC-Ni60 喷焊层显微硬度

(a) 表面; (b) 截面

Fig. 6 Microhardness of the WC-Ni60 spray welding coating with different WC contents

(a) surface; (b) cross section

### 3 结论

1) WC-Ni60合金粉末喷焊层组织主要由合金基层与颗粒状WC构成。合金基层中主要有镍基合金、钨化物、 $Ni_4B_3$ 、 $Cr_4Ni_{15}$ 等化合物。在WC含量较少时,其颗粒较小,边缘圆润。随着WC含量增加,喷焊层中形成的WC颗粒分布逐渐不均匀、大小不一,且多呈尖角、棱角状。

2) 喷焊层与基体间形成“白亮带”结合区,结合区的组织均匀,呈共晶状态,形成良好的冶金结合。当WC含量超过30%时,喷焊层与基体表面容易形成气孔、黑点等缺陷,为受热不均匀所致。

3) 喷焊层主要由合金基层与WC颗粒组成。合金基层组织细致紧密,并在WC颗粒周围形成包围式的规则状共晶组织,并随WC含量的增加而增多。共晶组织牢牢地紧固WC颗粒,有效地提高了喷焊层的硬度。

4) 喷焊层的表面硬度和截面硬度相对于基体都有很大提升,甚至达到基体的2倍以上。WC含量越高,其硬度均值越大。

#### 参考文献:

- [1] 陈艺文, 柏洪武, 巩秀芳, 等. 氧乙炔火焰喷焊镍基复合涂层的显微组织和腐蚀性能研究[J]. 表面技术, 2021, 50(5): 295-299.  
Chen Yiwen, Bai Hongwu, Gong Xiufang, et al. Study on microstructure and corrosion performance of nickel base composite coatings prepared by oxy-acetylene flame spray welding[J]. Surface Technology, 2021, 50(5): 295-299.
- [2] 杨效田, 魏亨利, 周俊, 等. 重熔温度对Ni60/WC定向结构涂层微结构演变的影响[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2022, 43(4): 5887-591.  
Yang Xiaotian, Wei Hengli, Zhou Jun, et al. Effects of remelting temperature on the microstructure evolution of Ni60/WC directional structure coating[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2022, 43(4): 587-591.
- [3] 徐进, 阳义. 水轮机过流部件现场激光熔覆修复和表面强化涂层应用研究[J]. 大电机技术, 2020(6): 55-57.  
Xu Jin, Yang Yi. The application research of field laser cladding repair and surface strengthening coating in the flow passage parts of hydraulic turbine[J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2020(6): 55-57.
- [4] 吴有伍, 谭兴龙, 吴琴, 等. 铸造碳化钨添加量对镍基复合喷熔涂层性能的影响[J]. 铸造, 2013, 62(9): 874-877.  
Wu Youwu, Tan Xinglong, Wu Qin, et al. Effect of the casting WC powder content on the performance of WC reinforced Ni-based spray-fused coating[J]. Foundry, 2013, 62(9): 874-877.
- [5] Usana-Ampaipong T, Dumkum C, Tuchinda K, et al. Surface and subsurface characteristics of NiCrBSi coating with different WC amount prepared by flame spray method [J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2019, 28: 580-590.
- [6] Afsous M, Shafyei A, Soltani M, et al. Characterization and evaluation of tribological properties of NiCrBSi-Cr composite coatings deposited on stainless steel 420 by HVOF[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2020, 29: 773-788.
- [7] Chen Z X, Li H, Ren L M, et al. Effect of tungsten carbide addition on the wear resistance of flame-sprayed self-lubricating Ni-graphite coatings[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2020, 29: 1156-1164.
- [8] 王长生, 杨蕴林. WC加入量对Ni60自熔合金喷焊层磨粒磨损性能影响[J]. 热加工工艺, 1997, 26(11): 28-31.  
Wang Changsheng, Yang Yunlin. Effect of the WC addition on the abrasive wear properties of fused Ni60 self-fluxing alloy coating[J]. Hot Working Technology, 1997, 26(11): 28-31.
- [9] 董志红, 范洪远, 陈诗海. Cr-WC-Ni60热喷焊复合涂层的微观结构[J]. 金属热处理, 2005, 30(4): 67-69.  
Dong Zhihong, Fan Hongyuan, Chen Shihai. Microstructure of Cr-WC-Ni60 composite coating by thermal spraying [J]. Heat Treatment of Metals, 2005, 30(4): 67-69.
- [10] 李于朋, 李宁, 王世君, 等. 等离子喷焊Ni60A合金的组织与性能研究[J]. 长春工业大学学报, 2010, 31(4): 399-402.  
Li Yupeng, Li Ning, Wang Shijun, et al. Microstructure and properties of plasma spray welding Ni60A alloy [J]. Journal of Changchun University of Technology, 2010, 31(4): 399-402.
- [11] 张学萍, 李文. 三种Ni-WC合金粉末喷焊层耐磨性的研究[J]. 沈阳工业学院学报, 2000, 19(3): 46-49.  
Zhang Xueping, Li Wen. Study on wearability properties for three kinds of Ni-WC powder coating [J]. Journal of Shenyang Institute of Technology, 2000, 19(3): 46-49.
- [12] 李福泉, 冯鑫友, 陈彦宾. WC含量对WC/Ni60A激光熔覆层微观组织的影响[J]. 中国激光, 2016, 43(4): 111-117.  
Li Fuquan, Feng Xinyou, Chen Yanbin. Influence of WC content on microstructure of WC/Ni60A laser cladding layer [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(4): 111-117.
- [13] 李金华, 单鹏超, 姚芳萍, 等. 激光熔覆工艺参数对Ni60硬度和显微组织的影响[J]. 热加工工艺, 2023, 52(23): 58-62.  
Li Jinhua, Shan Pengchao, Yao Fangping, et al. Effects of laser cladding process parameters on hardness and microstructure of Ni60 [J]. Hot Working Technology, 2023, 52(23): 58-62.
- [14] 王建萍, 唐菊, 王灿, 等. 氧乙炔火焰喷焊制备自熔性合金涂层及其性能研究[J]. 表面技术, 2018, 47(2): 117-121.  
Wang Jianping, Tang Ju, Wang Can, et al. Properties of self-fluxing alloy coating prepared by oxy-acetylene flame spray welding [J]. Surface Technology, 2018, 47(2): 117-121.
- [15] 李朋洋, 余新泉, 黄怡, 等. 火焰喷焊和等离子堆焊制备Ni60及Ni60-WC涂层的组织与性能[J]. 机械工程材料, 2017, 41(10): 38-43.  
Li Pengyang, Yu Xinquan, Huang Yi, et al. Microstructure and properties of Ni60 and Ni60-WC coatings by flame spraying and plasma arc surfacing [J]. Materials for Mechanical Engineering, 2017, 41(10): 38-43.