

# 钒对半高速钢氩弧熔覆层组织及其高温性能的影响

张 勇, 葛泽龙, 唐家成, 綦秀玲

(辽宁工程技术大学材料科学与工程学院, 辽宁 阜新 123000)

**[摘要]** 为促进半高速钢轧辊再制造技术的发展,基于半高速钢的合金体系,研究调整氩弧熔覆粉末中钒的含量对增强熔覆层高温性能和改善焊接工艺性的影响规律。通过工艺试验分析钒添加量对焊缝成形性的影响;通过金相观察、XRD物相分析钒的添加对焊缝组织的影响;通过高温抗氧化试验、红硬性试验检测钒的添加对熔覆层高温情况下的工作特性的影响。试验结果表明:钒的添加能够改善熔覆层成形,提高半高速钢熔覆层的高温抗氧化特性、红硬性和热疲劳性能。

**[关键词]** 氩弧熔覆; 半高速钢; 钒; 高温性能; 工艺性

**[中图分类号]** TG401 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1001-1560(2021)01-0023-05

## Influence of Vanadium on the Microstructure and High Temperature Properties of Semi High-Speed steel TIG Cladding Layer

ZHANG Yong, GE Ze-long, TANG Jia-cheng, QI Xiu-ling

(College of Materials Science and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

**Abstract:** Aim at promoting the development of semi high-speed steel rolls remanufacturing technology, based on the alloy systems of semi high-speed steel, the influences of vanadium addition in argon arc welding powders on the high-temperature properties and weldability of cladding layer were studied. In addition, the effect of vanadium addition on the formability of welding seam was explored through welding process test. The means of metallographic observation and XRD were employed to study the effect of vanadium addition on the cladding layer microstructure. Furthermore, high temperature oxidation and red hardness tests were carried out to clarify the effect of vanadium addition on the high temperature properties of cladding layer. Results showed that adding vanadium could modify the formability of cladding layers and improve their high-temperature oxidation resistance, red hardness and thermal fatigue resistance.

**Key words:** argon arc welding; semi-high speed steel; vanadium; high temperature properties; weldability

## 0 前言

宝钢从1998年开始从比利时OSB公司引进半高速钢材质的冷轧辊,邢台机械轧辊有限公司在2000年试制成半高速钢材质的冷轧辊供宝钢1420机组使用。东北特殊钢集团2008年试制成半高速钢辊坯SHSS-I<sup>[1]</sup>。近年来,有研究表明:通过不同热处理状态下的组织及碳化物形态分布的调控来控制碳化物的溶解和析出,能够有效改善轧辊的性能<sup>[2]</sup>。相对于传统的高速钢轧辊,半高速钢轧辊减少了合金元素含量,但仍能保持足够的二次硬化效果,满足工作辊的表面硬度及耐磨性要求,可代替高速钢使用<sup>[3]</sup>。随着半高速钢轧辊的推广应用,根据其性能特点,半高速钢轧辊可

望在中板轧机四辊粗轧、型钢万能轧机、热带连轧机轧边机上得到应用<sup>[4]</sup>。

轧辊是冶金生产制造中关键的设备零件,而轧辊在使用的过程中经常会遇到磨损等问题。为了减少损耗,提高利用效率,实现绿色环保发展,可对废旧轧辊进行再制造<sup>[5]</sup>。再制造方法中,电弧堆焊方式的再制造因修复效率高、修复层与基体间冶金结合等特性被广泛应用<sup>[6]</sup>。半高速钢作为高速钢的替代品是为了解决钨等合金元素的紧缺而研发的具有高速钢的性能而合金元素含量低于高速钢的合金钢。但是,由于半高速钢的使用时间较短,对于半高速钢轧辊的再制造研究仍处于初始阶段。同时,半高速钢合金总量在8%~15%,碳含量为0.5%~1.2%,易产生脆性相,导致熔覆

**[收稿日期]** 2020-07-26

**[基金项目]** 2019年辽宁省教育厅项目(19-1124)资助

**[通信作者]** 张 勇(1977-),副教授,主要从事焊接结构及工艺设计方面的科研和教学工作, E-mail: zhangyongdiy@163.com

层在焊接修复过程极易产生裂纹<sup>[7]</sup>,使得工件失效,导致修复效率及其质量降低。这些都迫切需要对半高速钢轧辊进行相关的再制造方面的研究。

有研究表明,钢中所含各种碳化物的硬度不同,对钢的耐磨性的贡献也不同。因为高速钢轧辊中通常含有较高的钨、钼、铬、钒等合金元素,可增强耐磨性,其中钒对于高速钢耐磨性的影响最大<sup>[8]</sup>。因为钒极易与碳反应,形成碳化物,细化晶粒,增加耐磨性,抑制开裂倾向;添加钒还能够在一定程度上改善钢的焊接性<sup>[9,10]</sup>。基于上述理论,结合半高速钢轧辊需要在热轧条件下工作的技术需求,本工作采用氩弧熔覆的方法,研究添加不同质量分数的钒对半高速钢熔覆层组织及高温工作性能的影响,以推动半高速钢轧辊再制造技术的发展。

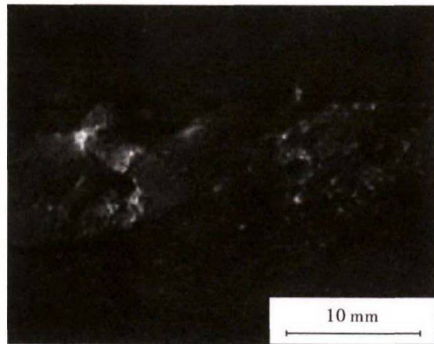
## 1 试验材料及试验方法

### 1.1 试验材料及熔覆试验

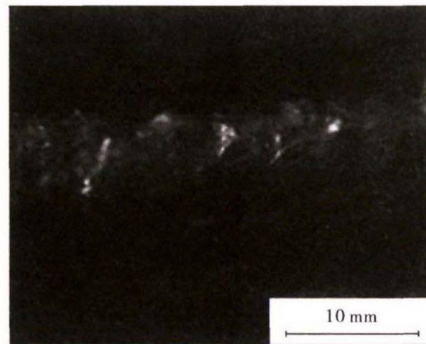
基体材料采用 45 钢,试验钢板尺寸为 200 mm×100 mm×8 mm。半高速钢合金粉末中,分别添加质量分数为 1%、2%、3%、4%和 5%的钒,制成熔覆合金粉末。半高速钢合金粉末化学成分见表 1。

表 1 半高速钢合金粉末化学成分(质量分数) %

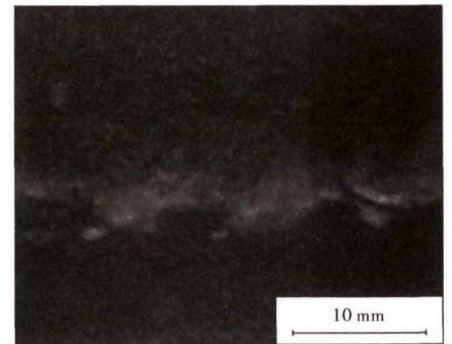
元素	C	Cr	Mo	Co	Ni	W	Nb	Fe
含量	0.8	4.0	2.0	1.0	0.5	3.5	0.5	余量



(a) 焊接电流 170 A



(b) 焊接电流 180 A



(c) 焊接电流 190 A

图 2 不同焊接电流所得熔覆层的表面形貌

### 1.2 组织及高温性能试验

用线切割方法截取待金相观察的试样,用 1.5 μm 的金刚石抛光膏抛光,腐蚀液采用体积比硝酸:盐酸:无水乙醇=1:1:3 的酸液进行金相试样的腐蚀。用 OLMPUS 激光共聚焦显微镜观察微观组织。采用 XRD-6100 型 X 射线衍射仪进行 XRD 分析,试验参数:Cu 靶 Ka 辐射,Ni 滤波片,管电压为 40 kV,管电流为 30 mA,扫描速度为 10 (°)/min,扫描范围 10°~100°。

将合金粉末 30 g 倒入研钵中,研磨 3~4 min,加 10 滴水玻璃,采用 WE-30 液压式万能试验机将混合均匀的合金粉末压制合金块体,自然干燥 24 h,放入远红外烘干炉升温至 250 °C 保温 1 h 备用。

为了确定关键焊接工艺参数——焊接电流的影响,焊接工艺试验采用未添加钒的半高速钢合金粉末压制的块体,合金块体放置在预处理后的工件上,如图 1 所示。

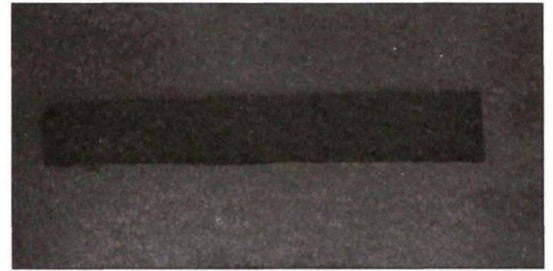


图 1 焊接试件

采用 WSM-500 钨极氩弧焊机,钨极直径 2 mm,焊接速度为 120 mm/min,氩气流量为 7 L/min,焊接电流分别选择 170,180,190 A 进行工艺试验。图 2 为合金粉末块体在焊接电流 170,180,190 A 时对应的熔覆层表面形貌。由图可知:焊接电流为 170 A 时,焊道表面出现较多气孔;为 180 A 时,焊道表面光滑,无咬边、气孔等缺陷;为 190 A 时,焊道出现咬边等缺陷。因此,焊接电流确定为 180 A。

熔覆层的高温性能测试中,将钒含量为 0、1%、2%、3%、4%和 5%的熔覆层区域加工成 20 mm×8 mm×2 mm 的试样。高温抗氧化性能测试中,用 FA1004N 型天平称取试件质量,SX2-9-12TF 型高温炉升到 700 °C,将试件放入炉内,10 h 后将盛有试件的坩埚取出,待温度降至室温称量,测算其单位面积增重量。红硬性试验中,将各成分的试件分成 3 组,置于升温至 650 °C 的炉中保温,每隔 4 h 取出一组空冷至室温,测量其表面维氏硬度。热疲劳试验中,采用新型全固态感应

加热设备 HR-BF-120, 工件线切割成尺寸为 50 mm×10 mm×8 mm 的试样, 加热电流 200 A, 加热电压 500 V, 加热时间 40 s, 加热结束后用镊子夹取试件快速放入水中淬火, 这个加热-冷却的过程进行 20 次, 然后进行试样观察。

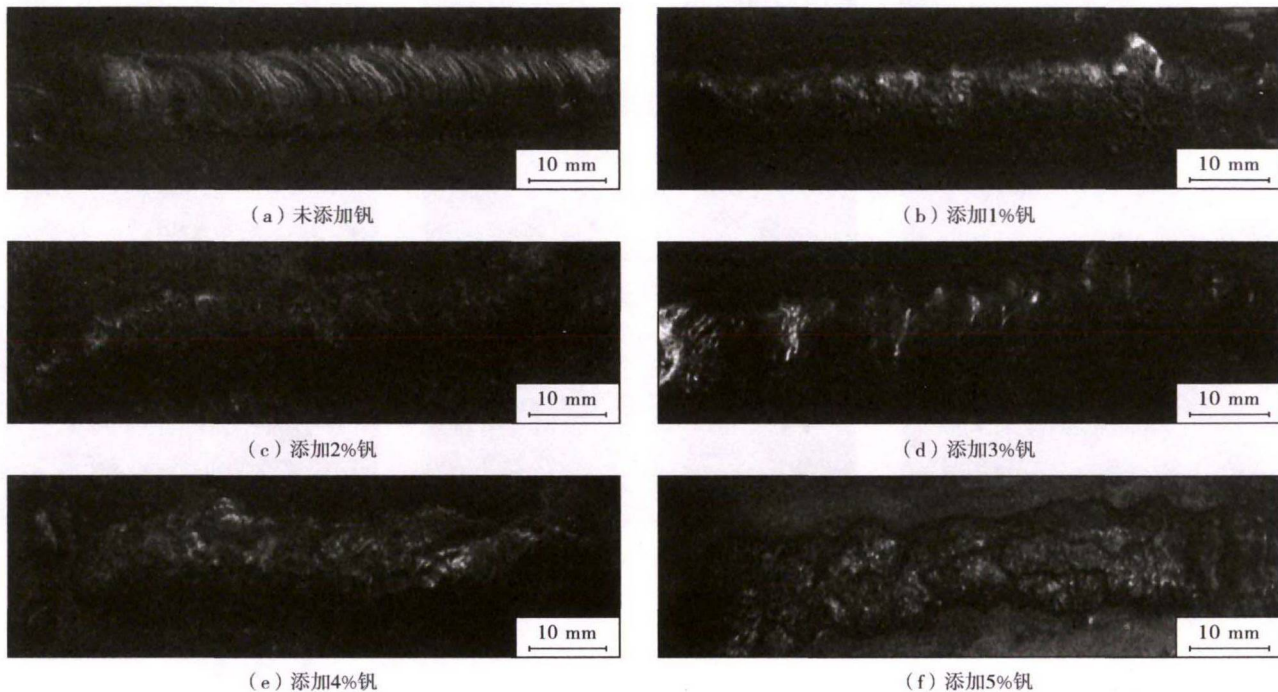


图3 钒含量对表面形貌的影响

由图可以看出:随着钒的含量增加焊道表面开始变得粗糙,鱼鳞纹形貌消失。钒含量在 1%~3% 间变化时,表面成形较好;当钒含量超过 3% 时,易局部聚集,产生焊瘤,堆焊处焊缝成形性变差。

## 2.2 熔覆层微观组织观察

半高速钢的成分含有 4.0%Cr、3.5%W、2.0%Mo 和 1.0%Co, 其他合金成分较少, C 含量接近共析成分点。通过添加一定含量的合金元素, 形成具有高硬度、高耐磨性的 Cr、W、Mo 和钒的碳化物, 并通过 W、Mo 和钒的碳化物使熔覆层具有二次硬化的特性。Co 形成固溶体, 提高了熔覆层回火稳定性。熔覆层微观组织如图 4 可所示, 由图 4 知:熔覆层主要由马氏体、碳化物及部分残余奥氏体构成; 当加入的钒元素逐渐增加至 3% 时, 碳化物的量随钒的加入量增加而增多, 细小弥散析出的碳化物在晶界处呈不连续网状均匀分布, 显微组织变得更加细小; 当加入的钒元素超过 3% 时, 沿晶界析出的碳化物变得粗大, 但仍呈不连续分布状态。

## 2.3 XRD 谱

未添加和添加 3% 钒的熔覆层组织的 XRD 谱如图 5 所示。由图 5 可知:未添加钒的半高速钢合金粉末所

## 2 结果及分析

### 2.1 添加钒对焊缝成形形貌的影响

钒元素的添加量对焊接电流为 180 A 的焊缝成形情况的影响如图 3 所示。

形成的熔覆层中, 主要包括 Mo、Cr 和 Co 的铁基固溶体相和 Cr 的碳化物相 ( $\text{CrC}$  和  $\text{Cr}_7\text{C}_3$ ); 添加 3% 钒的半高速钢合金粉末所形成的熔覆层中, 主要由 Mo、Cr、Co 和 Ni 的铁基固溶体相和碳化物相 ( $\text{Cr}_7\text{C}_3$  和  $\text{V}_2\text{C}$ ) 构成。这是由于钒为强烈的碳化物形成元素, 改变了熔覆层中的碳化物的构成。

### 2.4 高温氧化性能

高温氧化性能是指金属在高温下所表现出来的氧化速度快慢。采用 700 °C、间隔 10 h 取样的高温氧化试验, 考察了半高速钢合金体系中添加不同含量的钒对复合合金粉末熔覆层高温抗氧化性能的影响, 试验结果如表 2 所示。由表 2 可知:初始氧化增重程度随着钒元素加入量的增加而降低; 在经历快速的初始增重后, 在试验过程中不同钒含量的熔覆层每 10 h 的氧化增重量分别是, 0 时为 2.9  $\text{mg}/\text{mm}^2$ 、1% 时为 2.2  $\text{mg}/\text{mm}^2$ 、2% 时为 2.1  $\text{mg}/\text{mm}^2$ 、3% 时为 1.1  $\text{mg}/\text{mm}^2$ 、4% 时为 0.9  $\text{mg}/\text{mm}^2$ 、5% 时为 0.5  $\text{mg}/\text{mm}^2$ 。结果表明:熔覆层高温抗氧化性能随钒加入量的增加而改善, 原因在于强碳化物形成元素钒减少了 Cr 合金与碳的反应, 促进了高温时形成 Cr 的氧化物, 抑制了高温氧化发展; 同时, 钒也能

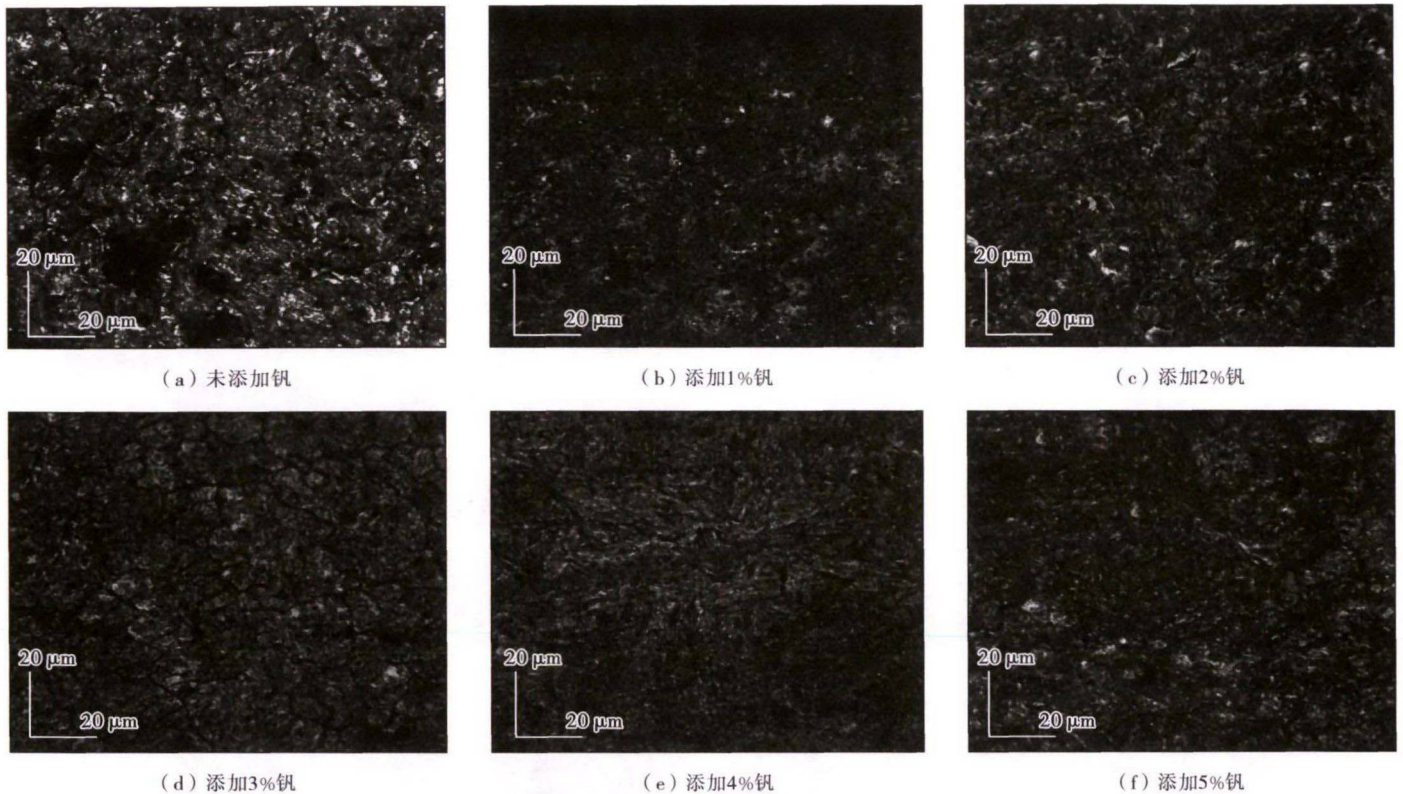


图4 不同钒添加量熔覆层的显微组织

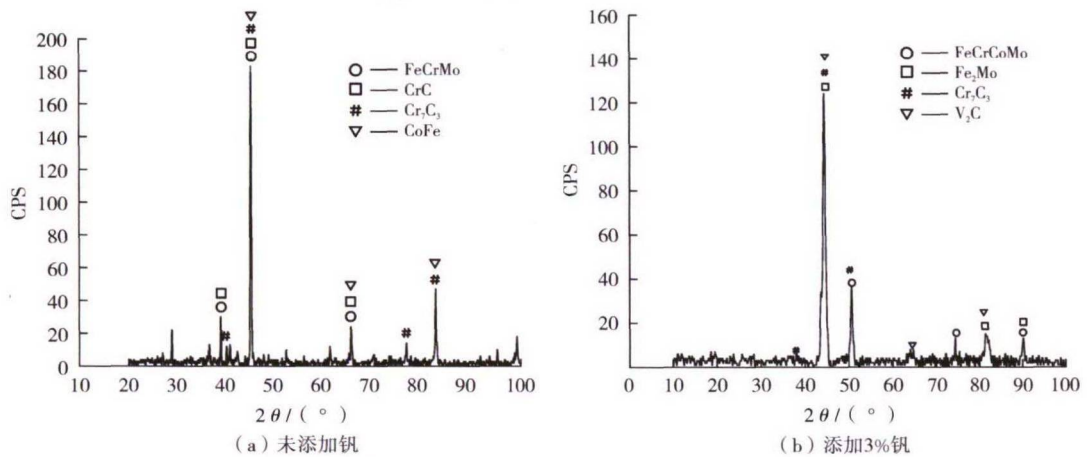


图5 添加钒前后熔覆层的XRD谱

够形成致密的氧化物薄膜,阻碍熔覆层的进一步氧化,从而从根本上提高了熔覆层的高温抗氧化性能。

表2 高温抗氧化增重试验结果 mg/mm<sup>2</sup>

w(钒)/%	10 h	20 h	30 h	40 h	50 h	60 h	70 h	80 h
0	6.2	9.4	12.7	15.8	19.0	21.8	24.5	26.9
1	5.9	8.3	10.8	13.0	15.6	17.8	19.9	21.6
2	3.3	5.8	8.2	10.8	12.9	14.9	16.7	18.4
3	3.2	5.2	6.1	7.3	8.8	9.9	10.9	11.5
4	2.5	3.6	4.4	5.3	6.2	7.9	8.7	9.4
5	2.3	3.4	3.8	4.5	5.0	5.3	5.7	6.3

红硬性是材料的抗回火稳定性。熔覆层的加热软化是由两个过程引起的。第一,工件在温度变化时,不

发生组织变化而引起强度(硬度)变化,其特征是升温时变软,降温时又恢复原来的硬度,称之为可逆软化;第二,由于试样在升温时发生组织转变,由硬相组织变为软相组织,如马氏体分解、碳化物集聚以及基体的再结晶,这些变化都是不可逆的,故当温度降至室温时,高温时的软相组织被保留下来,称之为不可逆软化。可见,不可逆变化是针对熔覆层中马氏体回火时的转变而言的,取决于马氏体对回火过程的抵抗能力,故称为抗回火稳定性。为了分析熔覆层的红硬性,将不同钒含量的熔覆试样加热至 650 ℃,分别保温 4, 8, 12 h 后取出空冷至室温,用维氏硬度计测量距焊道表面 1 mm 区域的维氏硬度值,结果如表 3 所示。

表3 红硬性试验数据

$w(\text{钒})/\%$	HV			
	0 h	4 h	8 h	12 h
0	453	424	401	388
1	515	498	481	469
2	584	565	552	546
3	652	640	624	619
4	624	611	602	599
5	535	528	520	514

由表3可知:在保温加热4,8,12 h后,不同钒含量的试样硬度值随着保温时间的增加越来越低,初始时试样硬度降低幅度较大,随着时间的增长,硬度降低的幅值逐渐减少。在过程中不同钒含量的熔覆层每4 h的硬度降低幅值分别是,0时为65 HV、1%时为46 HV、2%时为38 HV、3%时为33 HV、4%时为25 HV、5%时为21 HV。因此,作为能够提高回火温度、回火稳定性

的合金元素钒,将其与半高速钢合金粉末机械混合制成熔覆合金粉末,以此通过氩弧焊制得的熔覆层具有较好的红硬性和抗回火软化性。

热疲劳是指由于温度梯度循环引起的热应力循环(或热应变循环)而产生的疲劳破坏现象。热疲劳试验20次时,含钒为0、3%和5%的试样热疲劳截面形貌如图6所示。含钒为0的试样反复加热冷却20次时,表面裂纹呈龟裂状,且焊缝中部出现明显的裂纹;含钒3%的试样反复加热冷却20次时,局部表面出现龟裂状,但无明显裂纹出现;含钒5%的试样反复加热冷却20次时,局部表面出现明显的龟裂。试验结果说明:添加钒的熔覆层,通过细化晶粒及均匀弥散析出碳化物等途径提高了工件的热疲劳寿命;但钒的添加量过多时,易产生粗大且不均匀的碳化物,将导致工件的热疲劳性能降低。

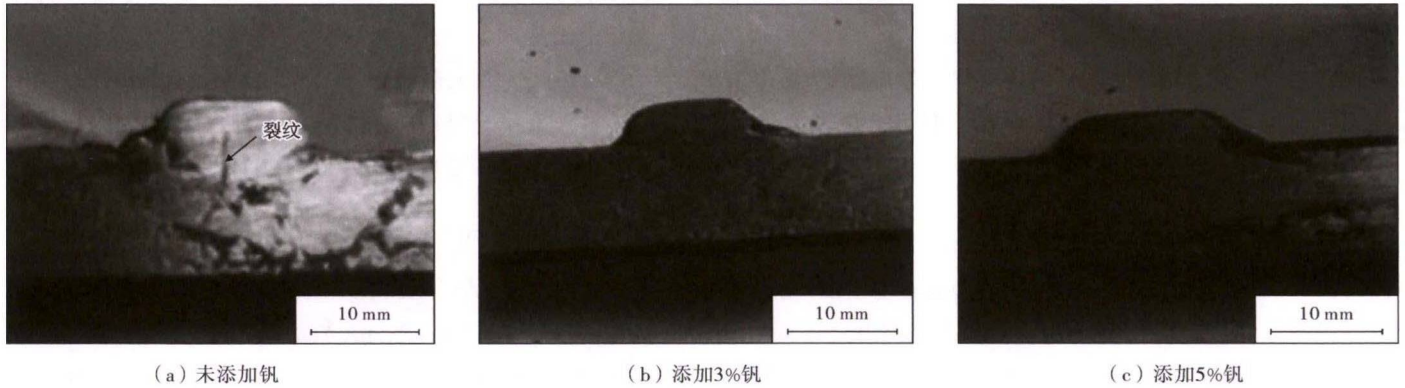


图6 热疲劳测试试样的截面形貌

### 3 结论

(1)采用氩弧焊在基体上熔覆添加钒的半高速合金粉末,钒的添加会对熔覆层表面成形产生影响。当钒含量从1%~3%变化时,表面成形较好;当钒含量超过3%时,易局部聚集产生焊瘤,成形性变差。

(2)熔覆层微观组织主要由马氏体及碳化物及部分残余奥氏体构成,当加入钒元素后,熔覆层碳化物由 $\text{CrC}$ 和 $\text{Cr}_7\text{C}_3$ 转变成由 $\text{Cr}_7\text{C}_3$ 和 $\text{V}_2\text{C}$ 构成。当加入的钒元素逐渐增加至3%,细小弥散析出的碳化物均匀分布晶界处,显微组织变得更加细小;当加入的钒元素超过3%时,沿晶界析出碳化物变得粗大。

(3)钒的加入改善了熔覆层高温性能,使得熔覆层的耐高温氧化性、热疲劳性能和微观组织均有所改善;随着钒在熔覆层中含量的增加,红硬性不断被提高。

#### [ 参 考 文 献 ]

[1] 于瑞芝,刘英武,岳喜军.新一代半高速钢辊坯 SHSS-I 的试制[J].大型铸锻件,2008(3):21-23.

- [2] 鲁莎,郭秋娟,田明艳.半高速钢轧辊显微组织和碳化物类型研究[J].大型铸锻件,2017(2):4-7.
- [3] 刘德富,尹钟大.高速钢及半高速钢轧辊[J].钢铁,2004,39(4):69-73.
- [4] 翁宇庆.轧钢新技术3000问(中册带钢轧辊分册)[M].北京:中国科学技术出版社,2005:200.
- [5] 褚秀军.大型和超大型冶金轧辊再制造技术研究与应用[J].中国高新技术企业,2017(7):65-67.
- [6] 徐滨士,董世运,朱胜,等.再制造成形技术发展及展望[J].机械工程学报,2013,48(15):96-104.
- [7] 刘会杰.焊接冶金与焊接性[M].北京:机械工业出版社,2010:151-154.
- [8] 许勇静,陈俐.Cr-Mo-V堆焊合金的成分对其组织及性能的影响[J].焊接技术,2003,32(3):39-41.
- [9] 樊东黎,潘健生,徐跃明,等.中国材料工程大典15卷[M].北京:化学工业出版社,2005:54-58.
- [10] 查小琴,惠卫军,雍岐龙,等.钒对中碳非调质钢疲劳性能的影响[J].金属学报,2007,43(7):719-723.

[ 编 校 : 魏 兆 军 ]