

# 细晶 TP347H 焊材选用及焊接规范研究

张永光, 银润邦, 钟正彬

东方电气集团东方锅炉股份有限公司, 四川 自贡 643001

**摘要:** 针对细晶奥氏体不锈钢 TP347HFG 的焊接材料选用及接头性能优化问题, 本研究通过分析其高温许用应力、抗氧化性能及结构应用条件, 明确了氩弧焊焊丝选型原则。结果表明: THERMANIT 304HCu 与 ERNiCr-3 焊丝可匹配 TP347HFG 的高温性能需求; 当设计按普通 TP347H 许用应力计算时, 允许选用 ER347 焊丝; 膜式壁管屏结构需避免使用 ERNiCr-3 焊丝以防止界面开裂。通过焊接试验与微观组织分析, 发现焊接线能量增加会显著扩大热影响区粗晶区宽度, 进而降低接头高温抗氧化性能。基于力学性能与金相表征结果, 提出焊接线能量宜控制在 8 kJ/cm 以内, 以确保接头高温强度与抗氧化性能满足工程要求。研究结果为超临界锅炉关键部件的焊接工艺制定提供了理论依据。

**关键词:** TP347HFG; 焊接材料; 焊接线能量; 热影响区; 高温性能

中图分类号: TG422 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2025)03-0110-07

## Research on Welding Consumables Selection and Process Specifications for Fine-Grained TP347H Steel

ZHANG Yongguang, YIN Runbang, ZHONG Zhengbin

Dongfang Boiler Co., Ltd., Zigong 643001, China

**Abstract:** To address the selection of welding materials and optimization of joint performance for fine-grained austenitic stainless steel TP347HFG, this study establishes gas tungsten arc welding (GTAW) filler metal selection criteria through analyzing high-temperature mechanical properties and oxidation resistance under various conditions. Results show that THERMANIT 304HCu and ERNiCr-3 filler metal are suitable for TP347HFG. ER347 filler metal is permissible when design is based on the yield strength of TP347H. Avoiding ERNiCr-3 in membrane wall panels to prevent interface cracking is recommended. Microstructural analysis reveals that increased welding heat input significantly widens the coarse-grained heat-affected zone, thereby degrading high-temperature oxidation resistance. Based on mechanical and metallographic characterization, the recommended maximum welding heat input is 8 kJ/cm to ensure joint strength and oxidation performance. The research provides a theoretical basis for the design of critical components in supercritical boilers.

**Keywords:** TP347HFG; welding materials; welding heat input; heat-affected zone; high-temperature performance

引用格式: 张永光, 银润邦, 钟正彬. 细晶 TP347H 焊材选用及焊接规范研究[J]. 电焊机, 2025, 55(3): 110-116.

Citation: ZHANG Yongguang, YIN Runbang, ZHONG Zhengbin. Research on Welding Consumables Selection and Process Specifications for Fine-Grained TP347H Steel[J]. Electric Welding Machine, 2025, 55(3): 110-116.

## 0 引言

TP347HFG 是日本住友公司在 TP347H 的基础

上, 通过改进制管工艺、调整成分配置而开发的细晶奥氏体不锈钢。该钢利用微细的铌碳化物(NbC)的溶解和沉淀机理, 采用特殊的热处理工艺, 使晶

收稿日期: 2024-07-04 修回日期: 2024-09-21

作者简介: 张永光(1987—), 男, 学士, 高级工程师, 主要从事焊接和热处理工艺研究。E-mail: 544977819@qq.com.

粒得到细化。晶粒的细化,有利于Cr原子在扩散中穿过晶界向氧化膜外层扩散以形成保护性的氧化膜,从而阻止蒸汽对金属的氧化,因此,大大地提高材料的抗高温蒸汽氧化性能,在同样试验条件下,TP347HFG氧化膜内层厚度约为普通TP347H的40%<sup>[1]</sup>。此外,由于该材料在18Cr-10Ni钢的基础上添加了约0.8% Nb,Nb含量的增加也使MX相的数量增加,使得析出强化作用进一步加强,从而提高钢的持久强度,且MX相对于 $M_{23}C_6$ 更为稳定<sup>[2-3]</sup>。根据ASME提供的许用应力,TP347HFG在650℃的许用应力高于TP347H钢20%以上。

目前对于超临界、超超临界锅炉过热器、再热器用管,高温蒸汽氧化是锅炉运行过程中面临的重点问题之一,因为锅炉运行一段时间后,过热器和再热器管子内壁出现氧化皮脱落是比较普遍的,脱落的氧化皮薄片被蒸汽吹到受热面管子的弯管处,或者被吹到汽轮机里<sup>[4]</sup>,当氧化皮在弯管处积累到一定程度后,会对管内蒸汽流动产生阻塞从而导致管子过热并引起爆管,同时剥落的腐蚀产物碎片随蒸汽进入汽轮机内,引起汽轮机严重的腐蚀损坏。由于TP347HFG具有良好的抗高温蒸汽氧化能力和较高的许用应力,所以目前我国锅炉行业中,在超(超)临界锅炉高过、高再部件中已经批量性使用TP347HFG钢管,部分代替SUPER304H,从而降低成本。由于该钢没有开发出匹配的焊材,国内对该材料焊材的选用和研究多停留在室温性能方面,未考虑高温许用应力和使用条件,从而导致焊材选用要么过高引起成本增加,要么接头性能不能满足使用要求。因此针对TP347HFG的焊材选用研究十分有必要;此外,该钢的特点是通过细化晶粒来改善抗蒸汽氧化性能,而焊接后的热影响区的晶粒会变粗大,这对接头性能的影响如何,有必要进行研究,以便指导焊接工艺的合理制定。

## 1 焊接材料的选用研究

TP347HFG目前主要作为钢管用于过热器和再热器,在工程应用中不可避免地要进行焊接,其中对接焊缝既要承受与钢管相同的压力和温度,也要承受管内侧蒸汽的氧化,其焊材的选用对产品的安

全运行十分关键,在此进行重点研究。由于锅炉过热器和再热器均为小管,管子直径一般在80 mm以下,焊接方法以氩弧焊为主,因此,在本文进行焊材选用研究中重点研究氩弧焊焊丝的选用。

### 1.1 高温性能分析

针对TP347HFG管子对接焊缝,国内目前主要选用ER347和ERNiCr-3这两种焊丝,国内对此研究<sup>[5-6]</sup>主要集中在如何提高焊缝合格率和保证接头室温力学性能,没有深入研究接头的高温性能,也没有研究焊材选配能否满足钢管的高温长期使用要求。由于TP347HFG一般应用于蒸汽温度在600℃及以上的部件,因此,在焊材选型中,对接接头高温性能的分析研究是不可或缺的,只有研究清楚其高温性能,才能结合部件的运行工况和产品结构特点来合理选用焊材。

为此,结合主蒸汽温度600℃超超临界机组所用的主要不锈钢<sup>[7]</sup>进行焊材选用分析,列出可供选择的常用的、成熟的不锈钢焊丝型号(或牌号)如表1。

表1 TP347HFG可供选择的焊材

Table 1 TP347HFG available welding materials

焊材牌号或型号	对应母材锅炉不锈钢母材
ER347	SA-213TP347H
THERMANIT 304HCu	S30432
T-HR3C	TP310HCbN
ERNiCr-3	TP310HCbN

#### 1.1.1 许用应力分析

由于TP347HFG的特点之一是许用应力高,那么表1所列的焊材的许用应力能否满足TP347HFG是选用焊材首先需要确定的。为了分析表1所列四种焊材的许用应力能否满足TP347HFG要求,在表1中列出了四种焊材对应的母材,通过对应母材与TP347HFG材料的许用应力进行对比来分析四种焊材能否满足TP347HFG的许用应力要求。需要说明的是ERNiCr-3虽然匹配的母材并不是TP310HCbN,但该焊材是ASME标准推荐使用的焊材,在我国工程实践中大量验证能满足TP310HCbN的性能<sup>[8]</sup>,故在此将ERNiCr-3对应的锅炉不锈钢母材定为TP310HCbN。根据ASME标准列出上表对应的母材及TP347HFG在600℃和650℃下的许用应力,如表2所示。

表2 材料许用应力(MPa)

Table 2 Allowable stress of materials (MPa)

温度/°C	TP347HFG	TP347H	S30432	TP310HCbN
600	107	92.3	121	118
650	67	53.9	78	68.9

注:数据来源于ASME II D篇。

由表2可见,TP347H的许用应力低于TP347HFG,而S30432和TP310HCbN的许用应力高于TP347HFG。因此在正常情况下,TP347HFG选用与S30432、TP310HCbN匹配的焊材(即THERMANIT 304HCu、T-HR3C、ERNiCr-3),其接头许用应力可以满足要求,而选用与TP347H匹配的焊材(ER347)则存在许用应力达不到母材要求的风险。

### 1.1.2 高温抗氧化性分析

TP347HFG的另一特点为优良的抗蒸汽氧化能力,那么选用表1所列的焊材能否满足抗蒸汽氧化的要求,也有必要进行分析,根据文献[9]列出四种材料的抗氧化性能如表3所示。

表3 抗蒸汽氧化性能

Table 3 Anti steam oxidation performance

材料	蒸汽氧化垢(650 °C、1 000 h)/μm
TP347HFG	17
TP347H	27
S30432	18
TP310HCbN	<2.5

由表3可见,TP347H的抗蒸汽氧化性能不如TP347HFG, S30432与TP347HFG相当, TP310HCbN明显优于TP347HFG。因此,TP347HFG选用THERMANIT 304HCu、T-HR3C、ERNiCr-3的抗蒸汽氧化性能满足母材要求,而选用ER347则蒸汽氧化性能会较差。因此从高温抗氧化性能分析THERMANIT 304HCu、T-HR3C、ERNiCr-3焊接TP347HFG可行。

针对焊缝的高温抗氧化性,在焊材选型时,相对次要,因为电站锅炉中出现的氧化皮脱落导致的超温爆管一般都是由大块的氧化皮脱落导致的,而焊口在整个锅炉过热器和再热器中的占比很小,且内壁的焊缝尺寸更小(宽度约2 mm),即使其抗氧化性比母材差,产生的氧化皮尺寸和数量均很少,不足以引起弯头的堵塞导致爆管,因此在焊材选型时不必将其作为决定性条件,以此分析,ER347焊接

TP347HFG从抗氧化性分析并非完全不可行。

### 1.1.3 不同应用环境下的焊材选用分析

由以上论述可知,从许用应力和高温抗氧化性角度,选用THERMANIT 304HCu、T-HR3C、ERNiCr-3焊材焊接TP347HFG可行,而选用ER347焊材则许用应力和抗高温蒸汽氧化性能较差,匹配性不是很好,一般不推荐使用,但也不是绝对,要根据具体应用环境做相应的分析。

如果产品设计在选用TP347HFG时,只是为了取其好的抗氧化性能,而许用应力仍然按普通TP347H进行强度计算,则选用ER347焊材也可行。

在膜式壁管屏上应用TP347HFG管子要整体考虑其焊接工艺,比如,目前国内膜式壁管屏上大量采用TP347HFG管子跟06Cr19Ni10的扁钢的焊接结构(见图1),由于管子材质跟扁钢材质都为18-8的不锈钢,故TP347HFG管子跟06Cr19Ni10的扁钢角焊缝一般采用不锈钢ER308或ER347焊丝进行焊接。膜式壁管屏长度较长,在制造过程中不可避免地存在管子自身对接,此种情况下,若管子对接焊缝采用镍基材料ERNiCr-3,在膜式壁管屏扁钢角焊缝焊接时,则会存在不锈钢角焊缝与管子对接焊缝相焊的情况,这样很容易产生裂纹<sup>[10-11]</sup>,如图2所示。因此,当TP347HFG作为膜式壁管屏时不宜选用ERNiCr-3焊丝,此时优选THERMANIT 304HCu和T-HR3C焊丝,若设计计算时,TP347HFG许用应力按TP347H计算,也可选用ER347焊丝焊接。

除此外,还应考虑焊材的经济性,从焊丝的采购成本分析,ER347、THERMANIT 304HCu、ER-



图1 不锈钢膜式壁

Fig. 1 Stainless steel membrane wall

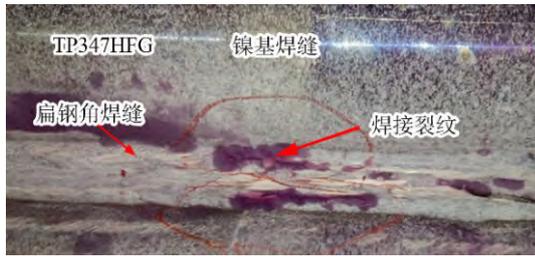


图2 角焊缝裂纹

Fig. 2 Crack in fillet weld

NiCr-3、T-HR3C 依次升高,且 T-HR3C 焊丝用量极少,很少有厂家生产,不仅价格昂贵而且采购难度很高,因此,从采购成本和采购周期考虑,一般不选用 T-HR3C 焊丝。

#### 1.1.4 焊材选型小结

综上所述,SA-213TP347HFG 对接焊缝的氩弧焊焊丝优选 THERMANIT 304HCu,其次选用 ER-NiCr-3;当产品设计时选用 TP347HFG 材料只是取其优良的抗蒸汽氧化性能;强度计算按普通 TP347H 的许用应力设计时,可选用 ER347;若 TP347HFG 做为膜式壁管屏,则对接焊缝宜选用 THERMANIT 304HCu 和 ER347,不能采用镍基焊丝。

## 1.2 接头性能试验

根据材料的高温性能,从材料许用应力、抗氧化性及经济性确定出上述焊材后,需要对三种焊材进行接头性能评价和评定,重点考察其可焊性和接头的常规力学性能。具体评定标准按 NB/T47014。

### 1.2.1 试验条件

本实验所用的管材为:SA-213TP347HFG,规格  $\varnothing 45 \times 8.2$ ,化学成分标准值见表4、力学性能标准规定值见表5。

表4 母材化学成分(质量分数,%)

Table 4 Chemical composition of base metal (wt. %)

C	Si	Mn	P
0.06~0.10	≤1.0	≤2.00	≤0.045
S	Cr	Ni	Nb
≤0.030	17.0~19.0	9.00~13.0	8C~1.10

表5 母材力学性能

Table 5 Mechanical properties of base metal

$\Sigma_f$ /MPa	$\Sigma_b$ /MPa	$\delta$ /%	晶粒度(级)	硬度/HB
≥205	≥550	≥35	7~10	≤192

实验所用氩弧焊焊丝为 THERMANIT 304HCu、ERNiCr-3、ER347 其化学成分见表6,分别采用自动

焊和手工焊试样,共6种试样。

表6 焊丝化学成分(质量分数,%)

Table 6 Chemical composition of welding wire (wt. %)

焊丝	C	Si	Mn	Cr
304HCu	0.07~0.13	≤0.60	≤3.5	17.0~20.0
ERNiCr-3	≤0.10	≤0.50	2.5~3.5	18.0~22.0
ER347	0.04~0.08	0.3~0.65	1.0~2.5	19.0~21.5
焊丝	Ni	Nb+Ta	Ti	Cu
304HCu	15.0~18.0	0.2~0.8	—	2.5~3.5
ERNiCr-3	≥67.0	2.0~3.0	≤0.75	≤0.5
ER347	9.0~11.0	10C~1.0	—	≤0.75

焊接方法采用热丝 TIG 焊和手工钨极氩弧焊,焊接规范见表7。

表7 焊接规范

Table 7 Welding specifications

焊接方法	层数	焊接电流/A	电弧电压/V
热丝 TIG 焊	共3层	160~180	10~11
手工钨极氩弧焊	共3层	100~120	12~14

### 1.2.2 试验结果

为了分析三种焊材的可焊性,对施焊的接头进行 100% 射线探伤,合格标准按 NB/T 47013.2II 级进行评价,常规力学性能按 NB/T 47014 进行试验和评价,试验结果见表8。

表8 试验结果

Table 8 Test results

试样	一次探伤 合格率/%	接头抗拉强度 /MPa	面、背弯各 两个(90°)
304HCu 自动焊	100	630~670(断于焊缝)	无开口或开裂
ERNiCr-3 自动焊	100	580~620(断于焊缝)	无开口或开裂
ER347 自动焊	100	610~640(断于焊缝)	无开口或开裂
304HCu 手工焊	100	630~670(断于焊缝)	无开口或开裂
ERNiCr-3 手工焊	100	590~640(断于焊缝)	无开口或开裂
ER347 手工焊	100	620~650(断于焊缝)	无开口或开裂

从以上试验可知,采用三种焊材均具有良好的可焊性,一次探伤合格率达到 100%,接头抗拉强度、弯曲均达到标准要求,满足 NB/T47014 要求,评定合格。因此 THERMANIT 304HCu、ERNiCr-3、ER347 焊材可用于产品焊接。

## 2 焊接规范研究

### 2.1 焊接条件

焊接方法分为热丝 TIG 焊和手工钨极氩弧焊两

种方式,管子材质为SA-213TP347HFG,规格为45×8.2,焊丝为ERNiCr-3,试样A、B、C采用热丝TIG焊,坡口形式见图3,其中A采用常用焊接规范,B采

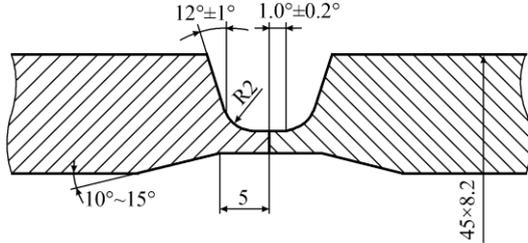


图3 热丝TIG焊坡口形式

Fig. 3 Hot wire TIG welding groove

用小焊接规范,C采用大焊接规范;试样D、E采用手工氩弧焊,坡口见图4,其中D采用小焊接规范,E采用大焊接规范。具体焊接规范见表9。

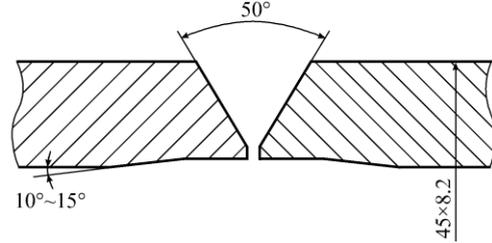


图4 手工氩弧焊坡口形式

Fig. 4 GTAW groove

表9 焊接规范

Table 9 Welding specifications

编号	焊接方法	层数	焊接电流 /A	电弧电压 /V	焊接速度 /(cm·min <sup>-1</sup> )	送丝速度 /(cm·min <sup>-1</sup> )	最高层间 温度/°C	线能量/(kJ·cm <sup>-1</sup> ) (q=UI/v)
A	热丝TIG焊	共3层	160~180	10~11	12~14	140~340	—	9
B	热丝TIG焊	共3层	130~160	同上	同上	同上	—	8
C	热丝TIG焊	共3层	200~220	同上	同上	同上	—	10
D	手工氩弧焊	共3层	100~120	12~14	—	—	150	—
E	手工氩弧焊	共3层	100~150	12~15	—	—	320	—

## 2.2 试验结果及分析

### 2.2.1 接头力学性能

接头室温抗拉强度与弯曲结果见表10,高温拉伸性能见表11。

表10 室温拉伸及弯曲试验结果

Table 10 Results of room temperature tensile and bending tests

编号	抗拉强度(MPa)及断裂位置	弯曲结果
A	590~620(断于焊缝)	面弯90°两个未裂 背弯90°两个未裂
B	590~610(断于焊缝)	面弯90°两个未裂 背弯90°两个未裂
C	580~630(断于焊缝)	面弯90°两个未裂 背弯90°两个未裂
D	610~630(断于焊缝和母材)	面弯90°两个未裂 背弯90°两个未裂
E	590~640(断于焊缝)	面弯90°两个未裂 背弯90°两个未裂

由室温拉伸试验结果知,抗拉强度值都大于母材规定的最小值550 MPa,且有较大裕度,满足母材的强度要求。从断裂位置看,大多断裂在焊缝上,这是因为加工坡口时端部进行了内镗,从而使焊缝处的壁厚比母材减薄了0.4 mm,所以拉伸时断裂在焊缝上。从A、B、C、D接头的抗拉强度来看,强度

值没有明显差距,所以不管采用机械TIG焊还是手工TIG焊,采用小的焊接线能量还是大的焊接线能量,对接头的抗拉强度无明显影响。

面背弯均未裂,说明焊缝有较好的塑性,即使采用较大的焊接线能量也能保证较好的塑性。

表11 试样650 °C的拉伸试验结果

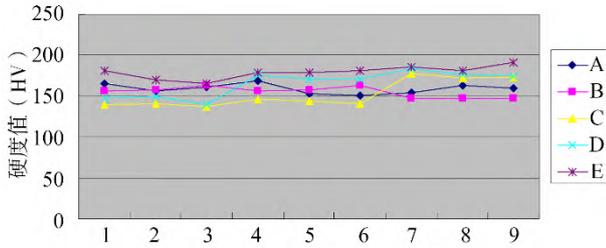
Table 11 Tensile test results of specimens at 650 °C

试样	屈服强度 /MPa	抗拉强度 /MPa	延伸率 /%	断面收缩率 /%	断裂 位置
A	140~150	350~360	30~40	65~75	两个均断 于母材
B	150~165	350~360	30~40	65~75	两个均断 于母材

由表11可知,A、B高温拉伸性能并无明显变化,且断裂位置不在焊缝和热影响区,因此可以得出焊缝和热影响区的强度值不低于母材。

### 2.2.2 硬度值测定试验结果

焊缝、热影响区、母材硬度值各测三点,硬度曲线如图5所示。由图5可知,焊缝和热影响区的硬度值与母材相差不多,且都小于母材规定的最大硬度200 HV,焊接线能量及焊接方法对硬度值的影响无一定规律性。



1、2、3为焊缝上的三点,4、5、6为热影响区的三点,7、8、9为母材上的三点。

图5 接头硬度

Fig. 5 Joint hardness

### 2.2.3 接头冲击功及分析

接头冲击功如表12所示。由表12可知,焊缝和热影响区有良好的冲击性能,焊接线能量对TP347HFG冲击性能影响不明显。

表12 接头冲击功(J)

Table 12 Joint impact energy(J)

位置	A(25 °C)	B(25 °C)	D(0 °C)	E(0 °C)
热影响区	均值89.7	均值86	均值79.3	均值78.3

注:冲击试样尺寸为5×10 mm。

### 2.2.4 金相分析

接头断面微观照片见图6,接头断面微观检查未发现缺陷,通过对比过热区晶粒度和过热区宽度得出以下结果,见表13。

由微观组织可知,焊缝组织正常,宏微观均无缺陷产生。由过热区晶粒度和过热区宽度的比较可见,过热区的晶粒度比母材粗大得多,改变焊接线能量对过热区晶粒度的影响不很明显,但对过热区宽度影响明显,增大焊接线能量,过热区宽度增大。采用手工钨极氩弧焊焊接,过热区宽度要比采用热丝TIG焊的小,其原因一方面是机械焊的热输入比手工氩弧焊大,另一方面,机械焊连续不间断焊接完成整个接头,层间温度高于手工氩弧焊,因此高的焊接线能量和高的层间温度导致其过热区宽度增大。当采用机械焊不易控制层间温度时,控制线能量也能保证较小的过热区,焊接线能量控制在8 kJ/cm时,最大过热区宽度小于1.5 mm(两侧累计小于3 mm),9 kJ/cm时,过热区最大宽度约1.5~1.8 mm(两侧累计达到3~3.6 mm),10 kJ/cm时过热区最大宽度约2.5~3 mm(两侧累计达到5~6 mm)。

### 2.2.5 分析及小结

由以上试验结果可知,焊接后接头热影响区的

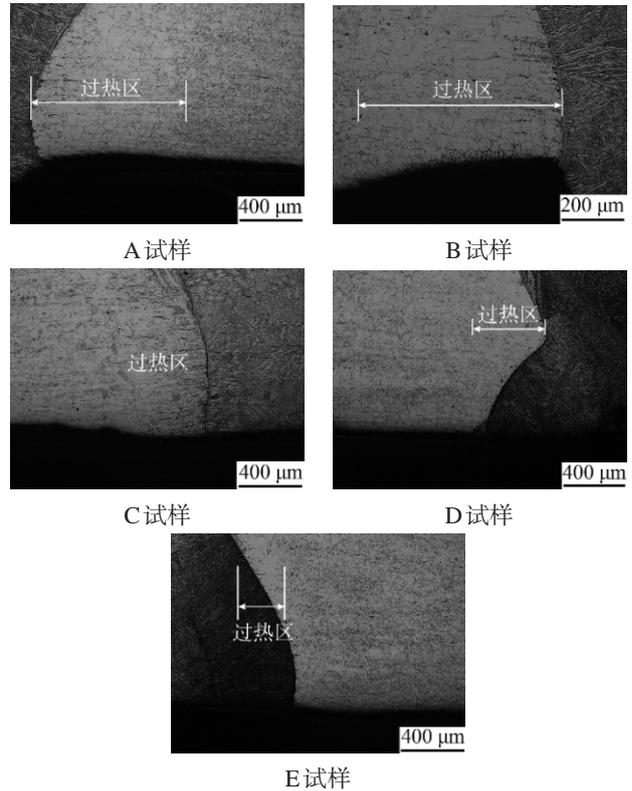


图6 接头微观照片

Fig. 6 Microscopic photo of the joint

表13 微观检查结果

Table 13 Microscopic examination results

编号	组织	过热区最大晶粒度和位置	过热区最大宽度(mm)及位置	母材晶粒度
A	A+C	4-5级(根部)	1.5~1.8 mm(根部)	
B	A+C	4-5级(根部)	<1.5 mm(根部)	
C	A+C	4-5级(2,3层交界处)	2.5~3 mm(2,3层交界处) (根部宽度为与A试样接近)	8
D	A+C	4-5级(根部)	<1.5 mm(1,2层之间)	
E	A+C	4-5级(1,2层之间)	<1.5 mm(1,2层之间)	

晶粒度变粗,焊接热输入越大,过热区的宽度越大,由于母材的高温抗氧化性能是通过细化晶粒来实现的,粗晶TP347H的抗蒸汽氧化性能比细晶的差很多。所以热影响区的晶粒粗化将不利于抗高温蒸汽氧化,采用小的焊接线能量和低的层间温度有利于接头抗氧化性能的保证。因此建议焊接线能量控制在8 kJ/cm以内,此时两侧的过热区宽度约2 mm,即使氧化也不会对弯头爆管起到加剧作用。

晶粒变粗后,除了对抗氧化性影响外,对力学性能,尤其是高温持久性能有无影响需要重点关

注,从试验结果看,当焊接线能量在8~10 kJ/cm变化时,接头的室温拉伸性能、高温拉伸性能、弯曲、冲击功、硬度等没有明显影响,性能满足标准要求,能达到使用要求。但是以上性能均为短时性能,对于在高温高压下使用的电站锅炉部件来说,除考虑短时性能外,还需要分析其高温持久性能。根据文献[12]研究,TP347HFG的蠕变强度比TP347H高的原因不在于晶粒尺寸,而是在于热处理制度。因此,热影响区晶粒变粗对其持久强度并无必然影响。

由以上试验结果及分析可知,焊接规范增大,对力学性能无明显影响,但对高温氧化性会存在不利影响,焊接线能量宜控制在8 kJ/cm以内。

### 3 结论

(1)SA-213TP347HFG对接焊缝的氩弧焊焊丝一般情况下可选用 THERMANIT 304HCu 或 ER-NiCr-3。当产品设计时选用TP347HFG材料只是取其优良的抗蒸汽氧化性能,而强度计算仍按普通TP347H,则可选用ER347。若TP347HFG做为膜式壁管屏,则对接焊缝宜选用 THERMANIT 304HCu 或 ER347(当许用应力按普通TP347H设计时),不宜选用ERNiCr-3。

(2)焊接线能量在8~10 kJ/cm变化时,对接头力学性能无明显影响,但对粗晶区宽度有影响,随焊接线能量增大,粗晶区宽度增大,粗晶区增大不利于高温抗氧化性能,焊接线能量应控制在8 kJ/cm以内。

#### 参考文献:

- [1] 李健,马云海,杨小川,等. 锅炉用TP347HFG和内壁喷丸TP347H奥氏体耐热钢抗蒸汽氧化性能对比研究[J]. 发电设备,2019,33(1):16-20.  
LI J, MA Y H, YANG X C, et al. Comparative Investigation on Steam Oxidation Resistance of TP347HFG and Inner Surface Shot-peened TP347H Austenitic Heat Resistant Steel for Boilers[J]. Power Equipment, 2019,33(1):16-20.
- [2] 张弘,周平,孙兰,等. 固溶温度对TP347HFG耐热钢组织和性能的影响[J]. 材料导报,2018,32(1):234-248.  
ZHANG H, ZHOU P, SUN L, et al. Effect of Solution

Temperature on Microstructure and Properties of TP347 HFG Heat Resistant Steel[J]. Materials Reports, 2018, 32(1):234-248.

- [3] 彭志方,党莹樱,彭芳芳. C和Nb含量对TP347HFG钢在650℃析出相参量和持久寿命的影响[J]. 金属学报,2012,48(4):450-454.  
PENG Z F, DANG Y Y, PENG F F. Effect of Carbon and Niobium Contents on Phase Parameters and Creep Rupture Time at 650℃ for TP347HFG Steel[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2012,48(4):450-454.
- [4] 尹成武,杨洪权. 高温受热管氧化皮生成机理研究进展[J]. 西安工业大学学报,2013,33(2):87-97.  
YIN C W, YANG H Q. Research Progress of Oxide Formation Mechanism for High Temperature Heating-Surface Tube[J]. Journal of Xi'an Technological University, 2013,33(2):87-97.
- [5] 殷智,殷守斌. 超临界锅炉TP347HFG的焊接性能及焊接工艺初探[J]. 山东工业技术,2016(12):36-37.  
YIN Z, YIN S B. Preliminary Study on Welding Performance and Welding Process of TP347HFG Supercritical Boiler[J]. Journal of Shandong Industrial Technology, 2016(12):36-37.
- [6] 苗慧霞,陈雅斌,刘树生. 电站用SA-213TP347HFG钢的焊接工艺研究与应用[J]. 焊接技术,2016,45(9):86-89.  
MIAO H X, CHEN Y B, LIU S S. Research and Application of Welding Process for SA-213TP347HFG Steel Used in Power Stations[J]. Welding Technology, 2016, 45(9):86-89.
- [7] 王起江,洪杰,徐松乾,等. 超超临界电站锅炉用关键材料[J]. 北京科技大学学报,2012,34(S1):26-33.  
WANG Q J, HONG J, XU S Q, et al. Key materials used in ultra-supercritical power station boilers [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2012,34(S1):26-33.
- [8] 张玮,莫春鸿. 奥氏体耐热钢SA-213TP310HCbN采用ERNiCr-3焊接接头性能试验及应用研究[J]. 电焊机,2019,49(8):72-76.  
ZHANG W, MO C H. Performance test and application of welded joint of welding austenitic heat-resistant steel SA-213TP310HCbN with ERNiCr-3[J]. Electric Welding Machine, 2019,49(8):72-76.
- [9] 张俊峰,王黎明. 超超临界压力锅炉高温部件材料简析[J]. 发电设备,2009(6):461-463.  
ZHANG J F, WANG L M. Material Analysis for High-temperature Components of Ultra Supercritical Pressure

- Boilers[J]. Power Equipment, 2009(6):461-463.
- [10] 赵辉, 付永生, 张学武. 带镍基堆焊层管嘴与 Type 304L GTAW 焊接裂纹分析及预防措施[J]. 热加工工艺, 2015, 44(11):243-244.
- ZHAO H, FU Y S, ZHANG X W. Welding Crack Analysis and Prevention Measures of GTAW Welding Between Nozzle of Nickel Based Alloy Welding Layer and Type 304L[J]. Hot Working Technology, 2015, 44(11):243-244.
- [11] John C. Lippold, Damian J. Kotecki. 不锈钢焊接冶金学及焊接性[M]. 陈剑虹, 译. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- [12] Fine-Grained TP347H Steel tubing with High Elevated-Temperature Strength and Corrosion Resistance for Boiler Applications[R]. Osaka & Tokyo, Japan: Sumitomo Metal Industries, Ltd, 1989.