

# 专题讨论——能源工程焊接技术

## SA213-TP304H 不锈钢焊接工艺 优化试验研究

常建伟,朱国庆,夏跃广,陈东旭,邱明林,邓新华,孙建华  
(河南第一火电建设公司,河南 平顶山 467031)

**摘要:**对 SA213-TP304 钢的焊接进行了不同焊接材料、不同保护方法的对比试验。结果表明,药芯焊丝加焊接渗透剂的工艺方法效果最好,对该钢焊接接头检验方法进行了对比试验,采用 PT+RT 检验可保证检验结果的可靠性,并对实际工程焊接提出了建议。

**关键词:**工艺优化;SA213-TP304;焊接

**中图分类号:**TG44      **文献标识码:**B      **文章编号:**1001-2303(2005)08-0001-04

### Research of welding procedure optimization of SA213-TP304H

CHANG Jian-wei, ZHU Guo-qing, XIA Yue-guang, CHEN Dong-xu, QIU Ming-lin, DENG Xin-hua, SUN Jian-hua  
(He'nan No.1 Thermal Power Construction Company, Pingdingshan 467031, China)

**Abstract:** This paper describes the welding procedures of stainless steel SA213-TP304 adopting the different welding material and gaseous shielding medium. The result shows that the best welding process is finished by means of flux-cored wire+welding activating agent. After the comparison test on the steel joint, it shows the reliability of the examination result, the corresponding comments are proposed to the project welding.

**Key words:** procedure optimization; SA213-TP304; welding

## 1 问题

某电厂锅炉高温再热器采用 SA213-TP304H 不锈钢制造,规格  $\phi 57 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ ,蒸汽压力 14.5 MPa,蒸汽温度 540  $^{\circ}\text{C}$ 。在管子与管子中间有鳍片,距离焊缝约 70 mm,在管子下部焊有保温销钉。该高温再热器采用手工钨极氩弧焊工艺。

为保证工程焊接质量,对 SA213-TP304 钢的焊接与检验工艺进行优化试验。

## 2 试验内容与结果

### 2.1 化学成分分析

收稿日期:2005-03-01

作者简介:常建伟(1965—),男,河南偃师人,高级工程师,学士,主要从事焊接管理工作。

试验用母材的化学成分见表 1。

表 1 母材 SA213-TP304H 的化学成分 %

| 项目 | $\omega(\text{C})$ | $\omega(\text{Si})$ | $\omega(\text{Mn})$ | $\omega(\text{P})$ | $\omega(\text{S})$ | $\omega(\text{Cr})$ | $\omega(\text{Ni})$ |
|----|--------------------|---------------------|---------------------|--------------------|--------------------|---------------------|---------------------|
| 范围 | 0.04<br>~<br>0.10  | $\leq 0.75$         | $\leq 2.00$         | $\leq 0.040$       | $\leq 0.030$       | 18.00<br>~<br>20.00 | 8.00<br>~<br>11.00  |
| 实测 | 0.08               | 0.46                | 1.22                | 0.028              | 0.026              | 17.70               | 9.42                |

### 2.2 焊接工艺优化试验

焊接 TP304 等高合金钢时,为避免焊缝根部氧化,需要对焊缝背面进行充氩气保护,工程施工中,由于位置的局限和结构的复杂性,很难保证焊缝背面的充气质量。

为了探索和改善 SA213-TP304H 的焊接工艺,有必要对该钢的焊接工艺进行优化,以简化焊接工



艺,保证焊接质量。

## 2.2.1 不同焊接材料的焊接工艺比较

### 2.2.1.1 试件

SA213-TP304H,规格  $\phi 57 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 。

### 2.2.1.2 焊接方法

手工钨极氩弧焊。

### 2.2.1.3 焊接材料

主要使用的焊接材料:ER308L 焊丝、KJ308L-T 焊丝。其化学成分如表 2 所示。

表 2 ER308L 和 KJ308L-T 化学成分 %

| 焊丝       | $\omega(\text{C})$ | $\omega(\text{Cr})$ | $\omega(\text{Ni})$ | $\omega(\text{Si})$ | $\omega(\text{Mn})$ |
|----------|--------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| ER308L   | 0.04               | 19.30               | 9.72                | 0.53                | 1.72                |
| KJ308L-T | 0.02               | 18.18               | 9.86                | 0.34                | 0.83                |
| 焊丝       | $\omega(\text{P})$ | $\omega(\text{S})$  | $\omega(\text{Cu})$ | $\omega(\text{Mo})$ |                     |
| ER308L   | 0.026              | 0.023               | 0.45                | 0.16                |                     |
| KJ308L-T | 0.015              | 0.010               | —                   | —                   |                     |

a. 实芯焊丝 ER308L( $\phi 2.5 \text{ mm}$ );

b. 药芯焊丝 KJ308L-T( $\phi 2.5 \text{ mm}$ )打底,ER308L 填充盖面。KJ308L-T 是氩弧焊打底专用药芯焊丝,焊接管子时,可在免除背面充氩保护的情况下,有效防止背面焊道的氧化。

c. 药芯焊丝 KJ308L-T 打底,ER308L 填充盖面,

表 3 3 种焊接方案工艺参数

| 方案号 | 焊丝类型            | 坡口角度( $^{\circ}$ ) | 对口间隙 $b/\text{mm}$ | 钝边 $l/\text{mm}$ | 焊接电流 $I/\text{A}$ | 焊接电压 $U/\text{V}$ | 氩气流量 $Q/\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ | 焊接速度 $v/\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ |
|-----|-----------------|--------------------|--------------------|------------------|-------------------|-------------------|---------------------------------------|--|
| a   | ER308L          | 30                 | 2.5~3.0            | 0.5              | 85~100            | 10~14             | 9~10(正面) 8~10(背面)                     | 30~35                                  |
| b   | KJ308L-T+ER308L | 30                 | 2.5~3.0            | 0.5              | 80~120            | 10~14             | 9~10(正面) —(背面)                        | 25~35                                  |
| c   | KJ308L-T+SS7    | 25                 | 1.5~2.0            | 0~0.5            | 80~90             | 10~14             | 9~10(正面) —(背面)                        | 30~40                                  |

## 2.2.2 操作工艺比较

在以上 3 组焊接方案中:

方案 a 在工程施工中运用普遍,焊接时需背面充氩保护,在试验室评定时,因工艺易于严格控制,焊接质量可以保证。但对工程施工来讲,充氩保护有难度,氩气浪费大,焊缝背部氧化仍然严重,若焊工操作工艺不当,焊接热输入过大,层间温度过高,结构拘束应力大时,容易出现焊接热裂纹。

方案 b 采用药芯焊丝 KJ308L-T 打底,实芯焊丝 ER308L 盖面。KJ308L-T 属气渣联合自保护焊丝,焊缝背面保护良好,免去了内充氩保护,工艺得到简化。背面焊渣易脱落,打底后需轻轻敲打焊缝,脱去焊渣,吹管时可很容易地将焊渣排除掉。工程实践中,采取该工艺焊接及根部缺陷修复,焊接质量明显改善。

焊前焊件坡口涂专用的焊接活性剂 SS7。这是一种新型的活性化 TIG 焊方法,即 A-TIG(Activating flux TIG)焊。在相同的焊接规范下,与常规的 TIG 焊相比,可以大幅度地提高熔深,提高生产率,降低生产成本,同时还可以减小焊接变形。

### 2.2.1.4 焊接位置

垂直固定。

### 2.2.1.5 焊接工艺

a. 焊前清理坡口和焊丝。药芯焊丝 KJ308L-T 属药芯过渡,采用碳钢卷制药芯,易锈蚀,所以焊前必须打磨。

b. 药芯焊丝 KJ308L-T 一般不必烘干,但是药芯易吸潮,根据实践经验,焊前采用 100~150  $^{\circ}\text{C}$  烘干后使用效果更佳。

c. 焊前不预热,控制层间温度在 100  $^{\circ}\text{C}$  以下,焊后不热处理。

d. 使用焊接活性剂时,将活性剂 SS7 与丁酮以 1:1 的比例混合,然后均匀涂抹在坡口面内,待丁酮挥发后再施焊。渗透剂的用量要适当,若太少,熔池粘度降低不多,流动性改善不明显;若太多,熔池粘度降低太多,流动性变差。

上述 3 种焊接方案的工艺参数如表 3 所示。

实践证明,该工艺对操作者要求较高。药芯焊丝的熔滴含有药渣和保护气体,熔池粘度大,流动性更差,熔渣和气体排出困难,易形成夹渣和气孔。因此,KJ308L-T 打底焊接时要注意:

a. 坡口间隙适当加大。

b. 填加焊丝的方式与实芯焊丝不同,不能直接把熔滴送进熔池,应在熔池前方打一直径 3~4 mm 左右的熔孔,利于熔渣透过焊缝背面。横焊时熔滴在焊丝的前上方送进熔孔,电弧对熔滴加热,待熔渣和气体排出后再向前移。若熔滴直接送进熔池,则易形成夹渣和气孔。

c. 在每个接头处,首先要作一熔孔,对前一凝固熔池应打磨一斜坡,在熔孔处送进熔滴。

d. 收弧时不能马上熄弧,要对熔滴加热一会儿,否则焊缝背面易出现缩孔。

e. 使用的焊接电流比实芯焊丝的大 5~10 A。

由此可见,采用 KJ308L-T 打底,虽然焊接质量较好,免去了内充氩保护,但是操作难度很大,要求焊工在施焊时要精力高度集中,有一滴熔滴送不到位,就会出现焊接缺陷,而且这种缺陷不能像实芯焊丝那样通过电弧的加热和搅拌排除,只能通过打磨来消除。由于焊接电流较大,热输入量相对较高,这对不锈钢的性能是不利的,应适当控制焊接速度。在管障碍部位因送丝困难,易出现焊接缺陷。另外,KJ308L-T 焊丝焊接水平固定位置时,难度大,仰焊处缩孔和内凹严重。

方案 c 采用了 SS7 焊接渗透剂后,电弧的穿透力明显增强,熔池粘度降低,流动性得到改善,熔渣和气体易于排出。同方案 b 相比,既具有其优点,又改善了方案 b 的不利因素,使得操作难度降低,易于控制熔滴向熔池送进。采用这种工艺焊接的焊缝,焊缝背面保护良好,不易出现焊接缺陷,取得了满意的效果。该工艺明显的优点是坡口角度、对口间隙和钝边尺寸相应减少,焊接电流也比前两种方案降低了 10~20 A。因此焊接线能量大大降低,这对不锈钢的焊接是极为有利的。

### 2.2.3 机械性能试验

按以上 3 种工艺方案制备的焊件,分别加工成弯曲和抗拉试件,进行常温机械性能试验,其结果见表 4。

表 4 冷弯与拉伸试验结果比较

| 方案   | 焊接位置 | 弯曲角度 $\alpha / (^{\circ})$ | 缺陷情况 | 抗拉强度 $\sigma_b / \text{Mpa}$ | 断裂位置 |
|------|------|----------------------------|------|------------------------------|------|
| 方案 a | 垂直固定 | 90                         | 无    | 575/575                      | 母材断  |
| 方案 b | 垂直固定 | 90                         | 无    | 536/532                      | 母材断  |
| 方案 c | 垂直固定 | 90                         | 无    | 593/633                      | 母材断  |

由表 4 可以看出,方案 c 的抗拉强度明显提高。

### 2.2.4 金相组织比较

3 种方案焊缝及热影响区的微观金相组织。分别如图 1~图 3 所示。

从金相组织可以看出:方案 c 焊缝及热影响区的晶粒度最细小;3 种方案的焊缝组织都是奥氏体和  $\delta$  铁素体,但是方案 a、b 的  $\delta$  铁素体含量比方案 c 相对多一些,这是因为方案 c 焊接规范小。

### 2.2.5 工程无损检验方法的选择性比较

根据目前工程上常用的无损检测方法,可选择的检验方法有 RT、UT、PT。2.2.1 试验表明,超声波探伤不适用于该工程上钢部件的检验。这是因为:对奥

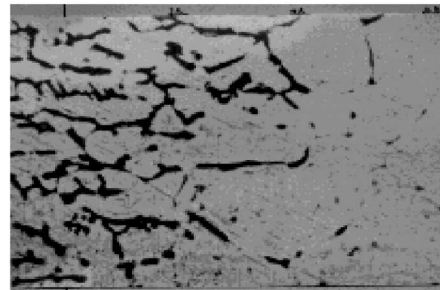
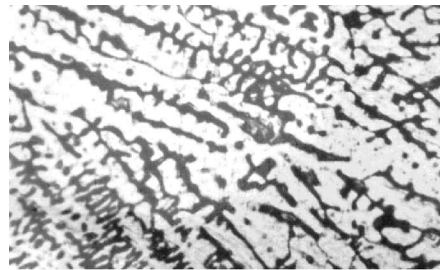


图 1 方案 a 焊缝、热影响区组织(300 $\times$ )

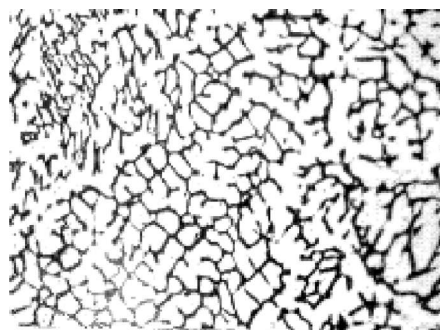


图 2 方案 b 焊缝、热影响区组织(300 $\times$ )

氏体不锈钢进行超声波探伤时的杂波大;该部件管径小,且焊缝附近有保温钉,检验位置不够;对人员要求高。2.2.2 试验表明,射线探伤(X 射线)适用于该钢该部件的检验,但采用 X 射线探伤对窄小裂纹的检出具有一定的困难。

综合考虑,选用的透照参数为:焦距 500 mm,电压 155~165 kV、曝光时间 2~2.5 min、像质指数为 11;焊接接头两侧母材的影像黑度控制在 2.5~3.0 之



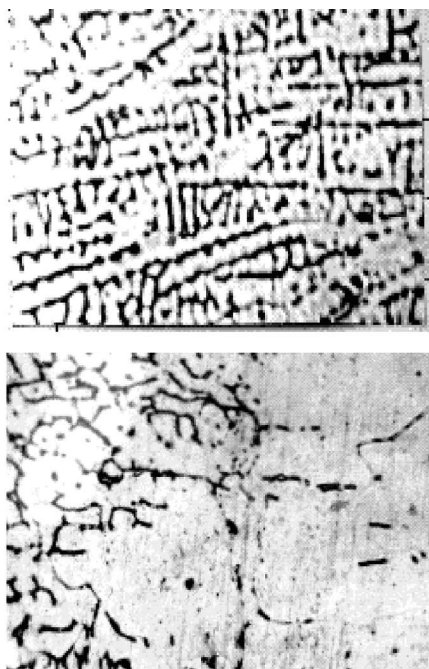


图 3 方案 c 焊缝、热影响区组织(300×)

间,采用双壁双投影法(焊接接头影像椭圆开口严格控制在 2~3 mm 之间),必要时采用双壁双影直透法来检查根部裂纹。

进行底片评定时应注意:如果在射线底片上有部分裂纹显示,就足以识别其为裂纹,不需要显示整个长度。

在射线探伤确认焊接接头合格后,通过着色探伤,对焊接接头及附近区域进行表面检测,以确保焊接接头表面质量。由于受再热器结构的影响,进行着色探伤时,应同时对焊接接头的两侧进行检测,特别加强鳍片处及其附近区域的检测,以确保在同一条件下对整个被检区域进行检测。

### 3 焊接工艺优化评价及应用

通过如上所述的 3 种方案的对比,可以看出方案 a 工艺繁琐,工程现场内充氩气保护不良,焊缝背面易氧化;方案 b 采用药芯焊丝,工艺简化,但熔池粘度大,对操作工艺要求高,且焊接规范偏大,对奥氏体的不锈钢焊接接头性能不利;方案 c 采用焊接渗透剂,改善了熔池粘度,增加了铁水的流动性,焊工容易控制熔池尺寸,操作难度降低。同时焊接电流和坡口尺寸减少,甚至可以不开钝边进行焊接,降低了不锈钢焊接的热输入,这对焊接接头的组织和性能非常有利。

但是,KJ308L-T 焊丝对平焊和横焊有良好的

工艺性能,不适合全位置焊接,主要缺陷是在仰焊位置易出现气孔。

对该钢的工程检验,超声波探伤不适合;射线探伤对裂纹不敏感,需要严格检验工艺,并采取一定的透照措施,但是,就该工程的高温再热器而言,由于焊缝及其附近存在保温销钉,造成射线探伤时无法放置底片。因此,工程上采用渗透探伤为主,射线探伤为辅进行检查。

以方案 c 焊接工程焊口 170 余道,以方案 b 对焊接根部缺陷进行修理,以常规氩弧焊工艺对非根部缺陷进行修理,以 PT+RT 进行检验,机组运行近两年,该部分焊口无泄漏,效果很好。

### 4 结论

a. 从机械性能和组织对比试验可以看出,对 TP304H 类奥氏体钢打底层焊接,采用药芯焊丝加渗透剂的工艺最好。其优点是:可实现小电流、小坡口、背面免充氩焊接,现场施工难度降低,降低劳动强度,可提高焊接效率;焊缝组织晶粒度细小, $\delta$  铁素体含量控制效果好,可提高抗裂性;焊缝强度高。

b. 对 TP304H 钢的检验应采用渗透探伤加射线探伤方法,而且进行射线探伤时,应采用特殊的工艺,以提高缺陷检出率。

### 5 建议

a. 工程上对该钢的焊接,应选择优秀焊工施焊,并针对工程使用的焊接工艺进行专门的训练或培训。焊接前需制定专门的处理措施,焊接过程严格工艺纪律,不得随意改变焊接规范。

b. 在工程施工中,应尽可能地减小焊口组对时的应力,避免强力对口,同时预留必要的反变形量。严格禁止对焊接接头进行加热校正。

c. 工程焊接时可采用方案 a 进行打底,以方案 b 对根部缺陷进行修理,以常规氩弧焊工艺对非根部缺陷进行修理。

d. 焊接时,若采用药芯焊丝,应注意起头和收弧处的质量,特别是仰焊位置的质量,避免出现气孔。

e. 工程焊接检验采用 PT+RT,进行射线探伤应采取必要的工艺措施。当具备射线检验条件时,应采用低电压、长时间的工艺,以提高对比度,焊缝两侧母材的影像黑度控制在 2.5~3.0 为宜。建议使用微焦点 X 射线探伤机,超微粒高反差胶片,以满足工程的特殊需要。

