

# P91 钢的焊前预热和焊后热处理

[130031] 吉林省火电第一工程公司 王 敏 王士林

**【摘 要】** P91 钢由于具有良好的高温抗蠕变性能已被广泛应用,但因其合金含量较高,致使可焊性较差,给现场的焊接作业带来了不利影响。以华能丹东电厂 2 号机组主蒸汽管道的现场作业为例,介绍了从热处理方面提高 P91 钢焊接质量的工艺。

**【关键词】** P91 钢 大径管 焊接 预热 热处理

含 9%Cr 的合金钢具有良好的高温抗蠕变性能,这一点很早就被发现了,英国 BABCOCK 公司于 1975 年首次进行了 9%CrMo(简称 P9 钢)材料的性能实验,从此 P9 钢在该公司得到推广。后来,研究人员在这种钢材中添加了微量元素 V、Nb 等,并控制住了 C、Si 的含量,改良后的 9%CrMoV 钢简称 P91 钢。

## 1 P9 钢与 P91 钢对比

### 1.1 化学成分对比

根据华能丹东分公司提供的《改进型 9%CrMo 钢焊接准则》,将 2 种材质主要化学成分列入表 1。

表 1 P9 钢和 P91 钢化学成分对比

质量分数	w(C)	w(Si)	w(Mn)	w(P)	w(S)	w(Cr)	w(Mo)
P9 钢	≤0.15	0.25~1.00	0.30~0.60	≤0.030	≤0.030	8.00~10.00	0.90~1.10
P91 钢	0.08~0.12	0.30~0.50	0.30~0.60	≤0.020	≤0.020	8.00~9.50	0.85~1.05

除表 1 中所列各项外,P91 钢中  $w(\text{Ni}) \leq 0.40\%$ ,  $w(\text{V})$  为  $0.18\% \sim 0.25\%$ ,  $w(\text{Nb})$  为  $0.06\% \sim 0.10\%$ ,  $w(\text{Al}) \leq 0.04\%$ 。

### 1.2 机械性能对比

P91 钢的强度和抗蠕变性能比 P9 钢增强了很多,见表 2<sup>[1]</sup>。现在无论在美国还是在欧洲,P91 钢都被广泛应用在大型发电机组的高温高压蒸汽管道上。

表 2 P9 钢和 P91 钢机械性能对比

机械性能	$\sigma_b$	$\sigma_s$	$\sigma_1$	$\sigma_2$
P9 钢	≥206	≥414	≥77	≥43
P91 钢	≥414	≥586	≥110	≥94

注: $\sigma_b$  为屈服强度, $\sigma_s$  为抗拉强度, $\sigma_1$  和  $\sigma_2$  分别为实验温度 500℃、550℃,时间持续 105 h 时的高温抗蠕变强度。

当前,我国火力发电机组正快速向大型、超大型发展,P91 钢必然会越来越广泛地应用于重要管道中。在此介绍一下华能丹东电厂 2 号机组主蒸汽管

道(材质为 ASTM A335P91,规格为  $\Phi 457 \text{ mm} \times 42 \text{ mm}$ )的大径焊口,在现场采用焊接前预热和焊接后热处理的具体运作过程,供同行参考。

## 2 工艺参数的选择

华能丹东电厂 2 号机组主蒸汽管道由英国 BABCOCK 公司生产,随管道附有相应的工艺卡(heat treatment procedure),其编号为:(BS1113) HT/14M/PP5。根据该工艺卡并参考我国电力行业标准 DL5007-92 的有关规定,通过对比分析,我们确定了现场基本工艺参数,见表 3。

### 2.1 预热

#### 2.1.1 预热工艺

由于该材料可焊性差,尤其是大管径焊接口在常温下焊接或预热不均匀时极易产生冷裂纹,所以对焊前预热的要求很高,预热过程成为焊接过程中的重点。

表3 基本工艺参数对比取用表

参数	$\Phi/\text{mm}$	$\delta/\text{mm}$	$v/(\text{℃}\cdot\text{h}^{-1})$	$\theta_1/\text{℃}$	$\theta_2/\text{℃}$	$\theta_3/\text{℃}$	$t_1/\text{h}$	$\theta_4/\text{℃}$	$t_2/\text{h}$	$\theta_5/\text{℃}$	$n/\text{支}$
英	304~660	25.0~60.0	100	200~300	250~300			750~780	$\geq 2.5$	400	8
中		37.5~50.0	148	250~400	300~400	300~350	$\geq 2$	750~780	2	300	$\geq 2$
取用	304~660	25.0~60.0	100	200~300	250~300	350	$\geq 2$		2.5	300	2

注:表中 $\Phi$ 为管道外径, $\delta$ 为管道壁厚, $v$ 为升降温速度, $\theta_1$ 为氩弧打底要求的预热温度, $\theta_2$ 为电焊的预热温度, $\theta_3$ 为后热处理时的恒温温度, $t_1$ 为后热处理时的恒温时间, $\theta_4$ 为焊后热处理的恒温温度, $t_2$ 为焊后热处理时的恒温时间, $\theta_5$ 为焊后热处理降温中断控制温度, $n$ 为热电偶的设置数。

为使焊缝区氩弧打底过程的温度控制在200~300℃之间,电焊填充过程温度保持在250~300℃之间,焊前预热实行全程跟踪监控。

### 2.1.2 预热注意事项

a. 当焊缝区温度超过300℃时,热处理工应立即通知电焊工停止施焊。

b. 出现停电立即保温使之缓冷。

c. 设置热电偶和加热炉片,具体作法如下:将热电偶设置在坡口任意一侧,距离坡口边缘25mm处(如果条件具备,热电偶上下2点对称设置效果更佳);加热炉片1套2个,分别布置于坡口两端,距两端坡口边缘各50mm,2个炉片皆为宽180mm、电压220V、功率10kW的远红外线陶瓷材料制成的履带式加热器,并联接在1路控制,加温前应覆盖保温棉。

d. 露天作业的防雨、雪设施应事先备齐。

e. 预热加温应在做完气室后进行。

### 2.2 焊后马氏体转变处理

一般情况下焊接完成后,大径厚壁焊口焊缝区容易形成较大的温差,而且在降温过程中马氏体转变会增加内应力,使焊缝区的受力状态更加恶化。为避免此现象,查阅华能丹东公司提供的资料《德国电站P91(X10CrMoNb91)材料的使用现况》,得知P91材料的马氏体转变开始点温度为385℃,结束点温度为100℃,因此我们规定增加焊后马氏体转变处理:以100℃/h的速度将焊件温度降至80~100℃范围内,再恒温2h。

### 2.3 后热处理

P91钢焊接过程中采取避免热量集中、小电流多焊道的焊接工艺,导致工人作业的时间很长( $\Phi 457\text{mm}\times 42\text{mm}$ 规格的焊口连续焊接时间长达22h,焊后热处理时间长达23h)。焊接作业完成后在理论上应马上进行焊后热处理,但是,为了缓解现场热处理人员的作业压力,在焊后马氏体转变处理

后,我们有时候不直接进行焊后热处理而改为后热处理,即:将焊件升温至350℃,恒温2h再使其随炉冷却。这样,焊后热处理就可以根据现场作业情况适时进行了。在现场共有12个主蒸汽焊口在焊后热处理前采用了后热处理,均无裂纹产生。

### 2.4 焊后热处理

高温回火温度区间选在750~780℃,现场作业输入数据采用760℃。热电偶上下2点对称设置于焊缝上,2个加热炉片尺寸均为740mm×450mm,电压为220V,加热功率为15kW,上下布置,分别由2路控制,同时加热。保温棉为预热时保温棉的2倍厚。

### 2.5 热处理曲线

现场热处理实时控制打印曲线有2种,见图1、图2。

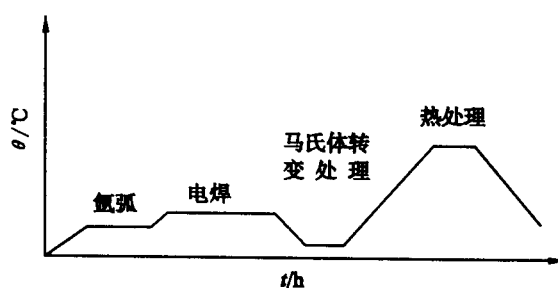


图1 焊后跟踪热处理曲线

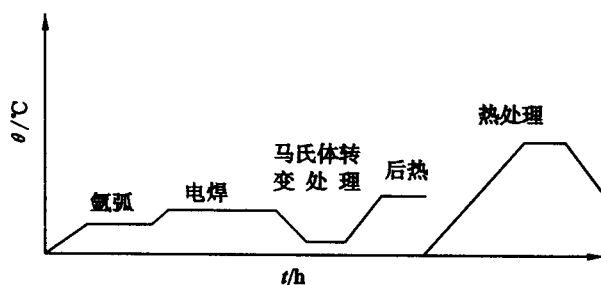


图2 焊后不跟踪热处理曲线

(下转第37页)

电所相比大约可节省土地20%~40%。

### 3 PASS的应用

根据ABB公司对阜阳变电所进行的停电比较,PASS方案的指标优于常规方案的指标。其中,总的停电频率PASS方案为常规方案的50%,总的停电持续时间PASS方案为常规方案的65%,故障停电持续时间PASS方案为常规方案的35%。

世界上投入运行最早的PASS位于瑞士的Bottmingen,它于1998年2月投入运行。澳大利亚275 kV Blackwall变电所采用一个半断路器接线,安装M1型PASS共17组,于1999年11月30日投入运行。澳大利亚还有4座变电所将于今明两年陆续投入运行。

### 4 PASS的检修维护

与常规设备相比,PASS在正常运行时操作基本相同,但是在检修维护时操作相对复杂一些。由于PASS是基于其产品的可靠性和稳定性理念开发问世的,其设备本体需要检修维护的几率较小。可能10 a、20 a或者30 a才需要检修维护一次。为减少设备元件数量和节省占地面积而增加检修维护时的操作是值得的,而且PASS的操作都是可以通过计算机完成的。PASS的检修维护是根据设备的工况而不是时间进行的,因此它的检修维护概率是很低的。

### 5 PASS的配置

标准的PASS装置是按双母线配置的,但是与

常规的双母线配电装置相比,由于考虑到其产品的可靠性,PASS没有配备出线侧隔离开关和接地开关。用于双母线接线时,PASS装置无需做任何改动。母线电压互感器的功能可以通过母联间隔和分段间隔PASS中的组合电流电压传感器实现。根据各变电所进出线回路数的不同和配电装置布置的不同,为满足母线接地的要求,规模较大的变电所母线处需要配置常规接地开关。在母线处配置接地开关也可以在检修时起到简化配电装置的倒闸操作的作用。用于一个半断路器接线时,标准配置的PASS需要取消1台母线隔离开关及其母线出线套管。为了取消母线专用接地开关,相邻串的PASS应反向布置。由于PASS不具有避雷器的功能,所有配电装置应根据需要配置常规避雷器。根据保护、控制和测量的需要如果希望在PASS装置中增加电流互感器或电压互感器是比较容易实现的。如果变电所中有载波通信的要求,仍需要配置常规的阻波器和耦合电容器。PASS不具备此功能。

经过PASS专家组广泛深入的研究论证得出如下结论:PASS技术先进、可靠性高,主要体现在智能化、在线监测、状态检修、检修维护少,能够实现无人职守。PASS的主要特点是紧凑化、小型化、节约占地、价格合理、节约运行成本,符合我国目前的国情和技术发展方向。PASS技术在我国进行工业性应用试验的条件和时机已经成熟,可以进行PASS工业性应用试验。

(收稿日期 20000717)

作者简介 胡静涛,现在东北电力设计院变电处工作,高级工程师。

(上接第19页)

### 3 小结

华能丹东电厂2号机组主蒸汽管道焊口共24个,其中异种母材(P91/10GrMo910)2个(热处理恒温温度取750℃),P91钢母材22个,热处理平均表面硬度为326 HB,焊接过程及焊后热处理,均未产生再热裂纹。截止到2000年6月1日,已安全可靠运行550 d。

实践证明:所采取的工艺符合现场实际要求和相关规程,可在实际生产中推广应用。

### 参考文献

- 1 中国机械工程学会焊接学会. 焊接手册(第2卷). 北京:机械工业出版社,1992. 228

(收稿日期 20000714)

作者简介 王 敏,现在吉林省火电第一工程公司工作,助理工程师。