P91 钢焊接工艺及焊接技巧

四川机电职业技术学院机械系 （攀枝花 617000） 黄向红

【摘要】 由于 P91 钢具有良好的高温综合性能，近十几年来在我国大型发电站的主蒸汽管道中得到了广泛应用。热电厂 300MW 机组安装工程中的主蒸汽管、再热热段蒸汽管道、锅炉末级过热器出口联箱均采用了 P91 钢材。为了保证 P91 钢管道的焊接工艺和焊接质量达到要求，技术人员对 P91 新型耐热钢的焊接性进行了分析，制定了详细的焊接工艺措施，包括焊接方法选择、焊接材料选择、焊接参数选择等，并应用于生产实践中，取得了较好的效果。根据实践经验，本文对 P91 管道的焊接特性、焊接工艺以及焊接技巧进行了阐述，对 P91 钢焊接具有切实的指导作用。

随着电力工业的迅速发展，高参数、大容量机组不断涌现，对钢管材料的高温蠕变性能和抗应力腐蚀等性能提出更高要求。T91/P91 钢以其良好的高温持久强度、热稳定性和高温抗蠕变能力等综合性能，在电站锅炉的过热器、再热器及主蒸汽管道上获得越来越广的应用。该钢是美国 20 世纪 70 年代末 80 年代初开发的新型马氏体耐热钢，相当于国产 9Cr—1Mo 钢种。由于该钢与国产钢相比，具有高温强度高、抗氧化性能和抗蠕变性能好以及具有相对高的热传导性与低的热膨胀率等特点，使焊件具有较小的截面尺寸，有效地降低了焊件壁厚，减少了材料用量，降低了管道热应力，减少了热疲劳裂纹的危险。攀钢热电厂 300MW 机组安装工程中的主蒸汽管、再热热段蒸汽管道、锅炉末级过热器出口联箱均采用了 SA335—P91 钢材。其管材规格分别为 ϕ364mm × 41mm、ϕ273mm × 29mm 和 ϕ216mm × 23mm，保证 P91 钢管道的焊接工艺和焊接质量达到要求是当务之急。

一、P91 钢的性能及焊接性分析

1. P91 钢的性能

P91 钢是在 9Cr1 Mo 钢的基础上，采用纯净化、细晶化冶金技术，以及微合金化和控轧、控冷等工艺，开发出的新一代中合金耐热钢。从化学成分上看（见表 1），P91 钢中 C、S、P 含量降低了，并用 V、Nb、N 元素微合金化；从力学性能上看（见表 2），P91 钢的强度和韧性改善了。这是由于该钢的强化机理与老钢种有原则的不同，即除了固溶和沉淀强化外，还通过微合金化、控轧、形变热处理及控冷获得高密度位错和高度细化晶粒的结果。该钢的供货状态为正火 + 回火（730 ~ 760℃），显微组织是回火马氏体。

表 1 SA—213T91 材料的化学成分（质量分数）（%）

C	Mn	Mo	Cr	V	Si
0.08 ~ 0.12	0.36 ~ 0.60	0.85 ~ 1.05	8.00 ~ 9.50	0.18 ~ 0.25	0.20 ~ 0.50
Nb	**N**	**Al**	**Ni**	**S**	**P**
0.06 ~ 0.10	0.03 ~ 0.07	≤0.40	0.40	≤0.010	≤0.020

表 2 P91 钢的力学性能

屈服强度 $\sigma_{0.2}$ /MPa	抗拉强度 σ_b /MPa	常温冲击吸收功/J	伸长率 δ_5 (%)
≥415	585	≥68	20

2. P91 钢的焊接性分析

P91 钢由于降低了碳和杂质元素的含量，焊接裂纹的敏感性明显减弱，防止裂纹产生的预热温度随之而降。应该说，该钢的焊接性有所改善。尽管如此，

接头性能的明显劣化却是焊接这类钢的主要困难。因为：①焊缝由于熔敷金属没有控轧和形变热处理的机会，晶粒不可能由此获得细化，又由于熔敷金属中的Nb、V在凝固冷却过程中难以呈微细的C、N化合物析出，焊缝的韧性远不如母材。②供货状态优良的母材性能受到焊接的高温循环，母材HAZ性能必会明显劣化。③这种劣化的程度随焊接热输入的增大而加剧。

（1）焊缝金属韧性的劣化　焊缝的韧性对热输入和层间温度极其敏感。采用大热输入、高的层间温度（60kJ/cm、250～350℃）时焊缝的冲击韧度为3.9～19.5J/cm^2，降低热输入和层间温度（25kJ/cm和220～250℃）时焊缝的冲击韧度达到了73.2～113.6J/cm^2。焊缝的冲击韧性还与焊后热处理制度密切相关。此外熔敷金属的氧含量也影响焊缝金属的冲击韧性，实践证明TIG焊缝的冲击韧性优于埋弧焊和焊条电弧焊，而埋弧焊又优于焊条电弧焊。

（2）HAZ蠕变断裂强度的劣化　研究表明P91钢HAZ存在一个蠕变断裂强度劣化的区域，劣化从焊接热影响区的850℃，即A_{c_1}开始，925℃时劣化至最低值，然后逐步恢复，待热影响区温度超过1100℃以后才恢复到接近母材。可以推论，这一劣化区的宽度越大，对接头高温强度的影响也就越明显，因此控制850～1100℃热影响区的宽度是控制这一劣化影响的重要手段。显然这也需要通过控制焊接热输入和层间温度来实现。

二、P91钢的焊接工艺

1. 焊接方法及焊接材料的选择

P91钢有较高的淬硬倾向，对焊接冷裂纹很敏感，可采用钨极氩弧打底和低氢型焊条填充和盖面的焊条电弧焊焊接。焊接过程应注意：①控制热输入量。通过控制熔池温度来减小一次结晶的晶粒大小，防止马氏体晶粒长大，提高焊缝的冲击韧性。一般热输入为17～21kJ/cm。②背面充氩保护和烘干焊条（焊材需经过350℃烘焙1h，随烘随用）。③控制焊层厚度和宽度，焊条摆动幅度不得超过焊条直径的3倍。

选用P91钢专用焊丝、焊条。其化学成分见表3。

2. 焊接参数

根据P91钢性能及焊接特性，经过多次焊接试验，选择焊接参数见表4。

表3　焊丝ER90S—B9、焊条E9015—B9的化学成分（质量分数）　（%）

材料＼成分	C	Mn	P	S	Ni	Cr
ER90S—B9	0.08～0.12	0.30～0.60	≤0.02	≤0.01	≤0.40	8.00～9.50
E9015—B9	0.08～0.13	≤1.25	≤0.01	≤0.01	≤1.00	8.0～10.5

材料＼成分	Mo	N	Al	Nb	V	Si
ER90S—B9	0.85～1.05	0.03～0.07	≤0.04	0.06～0.10	0.18～0.25	0.20～0.50
E9015—B9	0.85～1.20	0.02～0.07	≤0.40	0.02～0.10	0.15～0.30	≤0.30

表4　各层焊接参数

层数	焊接方法	焊接材料	
		牌号	规格 ϕ/mm
1	GTAW	ER90S—B9	2.5
2～3	SMAW	E9015—B9	3.2
4层以上	SMAW	E9015—B9	4.0
盖面层	SMAW	E9015—B9	3.2

层数	焊接参数			
	极性	电流/A	电压/V	层间厚度/mm
1	正接	90～110	10～14	2～3
2～3	反接	100～120	20～24	2.5～3.5
4层以上	反接	135～150	20～24	3.0～4.0
盖面层	反接	100～120	20～24	3.0～3.5

3. 预热、后热、焊后热处理及层间温度的控制

焊接方法和焊接材料确定以后，获得优质接头的关键工艺措施是：焊前预热、控制层温和“及时有效”的焊后热处理。通过焊前预热可以控制焊接区的氢的行为，降低焊接区的硬度和应力峰值及改善韧性。控制层间温度一方面为防止焊缝过热；另一方面是为了保持缓冷。及时有效的焊后热处理能起到改善焊缝及其HAZ组织，提高接头的韧性和高温持久强度以及消除焊接内应力等作用。因此，施工技术人员查阅了有关资料并借鉴其他单位P91钢的焊接经验，制定了以下制度：预热

温度150～200℃（GTAW）、200～250℃（SMAW）、层间温度200～250℃；后热处理升温至300～350℃，保温2h；焊后热处理需经730～760℃回火处理，保温3～4h。

三、P91钢的焊接操作技巧

1. 焊前准备

（1）坡口加工及组对　坡口为Y形，其角度为60°±5°，钝边为1～2mm，对口间隙为3～5mm，定位焊长度为10～15mm，焊接参数与正式焊缝一样。完毕后要检查对口间隙是否合适（上大下小），并把接头两边打磨成斜坡状。焊前必须对坡口及其内外壁附近20mm范围内进行油、锈、水分等杂质的清除。坡口采用氧乙炔火焰加工并用机械方法清除表面硬化层。

（2）侧吹式背面局部充氩保护　由于本次安装的管道管径较大、管路较长，若直接向管内充氩，焊接质量不易保证，并且会浪费大量的氩气，增加工程成本。为节约氩气，可采用局部充氩的方法。同时，由于氩气流量小时，保护效果不好；加大氩气流量，会对焊接电弧产生影响，所以采用侧吹式局部充氩保护比较好。

侧吹式局部充氩可采用水溶性纸法。组对前，在管内距焊口两侧各150mm处贴水溶性纸，形成一组临时堵板，然后在对口间隙处采用侧吹式充氩管头向管内充氩气（见图1）。当管道系统进行水压试验时，水溶性纸很快溶解于水，并随水排除，不会造成不利影响。氩气流量为7～10L/min。氩气保护效果可根据焊缝颜色进行判断。焊接过程中，焊工可根据颜色调整保护气，使焊缝达到良好的保护效果。焊缝颜色和保护效果的对照见表5。

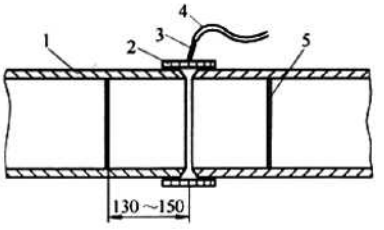


图1　侧吹式局部充氩示意图

1. 管件　2. 胶布　3. 充氩管头　4. 氩气胶管　5. 水溶纸

表5　焊缝颜色和保护效果对照表

焊缝颜色	银白	黄色	蓝色	灰红色	暗灰色
保护效果	最好	良好	较好	不良	最差

2. 焊接

（1）氩弧焊打底　对于水平固定管始焊位置在6点钟位置，焊接方向由底向上分两半部分进行，可先从逆时针方向开始。在管道的6点仰焊部位去掉一小块粘胶，在坡口内侧引弧，电弧引燃后在坡口根部间隙两侧用焊枪预热，待坡口两侧钝边熔化形成熔孔后即可填丝焊接。在管道打底过程中，仰焊部位采用内填焊丝法，使焊枪与焊接方向呈70°～80°夹角，焊丝与管内侧周向呈15°～25°夹角；立焊和平焊位置时采用外填焊丝法，焊枪与焊接方向呈90°～100°夹角，焊丝与管子周向呈10°～15°夹角（见图2）。焊接过程中，控制电弧长度为2～3mm并使焊丝端部要始终处于氩气保护区。伴随着连续送丝，焊枪同时做小幅度的锯齿形或月牙形横向摆动。当焊至平焊位置时，焊枪略向后倾，焊接速度加快，以免熔池温度过高而下坠。焊接过程中断或更换焊丝时，应先将收弧处打磨成斜坡状再进行接头。当电弧运至管子顶部平焊位置，快到封口还有7～8mm，迅速将氩气管从气室内拔出，快速焊，利用气室内的余氩，对没有焊完的根部进行保护。停弧后，焊枪不要立即移开，要待熔池凝固后再移开并关掉氩气。

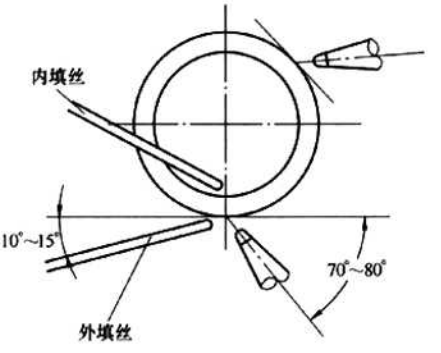


图2　氩弧焊打底角度示意

对于垂直固定管起焊位置不做要求。焊接时，在坡口内侧引燃电弧，并将焊枪在坡口根部上下划圈预热，以便形成熔池。同时注意使焊枪与焊接方向呈70°～80°夹角，焊丝与管子周向呈10°～15°夹角。送丝时应注意焊丝端部从坡口上侧斜拉向坡口下侧，同时焊枪也采用上下斜拉锯齿形或月牙形摆动方法，以保证焊缝成形良好。

（2）填充层焊接　填充层采用焊条电弧焊方法，焊接参数见表4。测试层间温度在200～250℃后可以进焊

接。焊接顺序是将打底焊前半部分作为填充焊的后半部分以便将起弧和收弧接头相互错开30mm左右。运条方法：水平固定管采用锯齿形或月牙形，垂直固定管采用上下斜拉锯齿形或月牙形，无论哪一种运条方法，焊条摆幅都不超过焊条直径的3倍。焊条角度：焊接水平固定管时，焊条角度应随焊接位置的变化而变化（见图3），仰焊起头要薄，以利于接头；焊接垂直固定管时为了防止熔池下坠保证焊缝成形良好，焊条角度也应随焊层、焊道而变化（见图4）。无论哪一种接头，最后一层焊缝都应保证管件坡口边缘不要被破坏，应低至母材表面1mm左右，形成凹槽，以利于盖面。

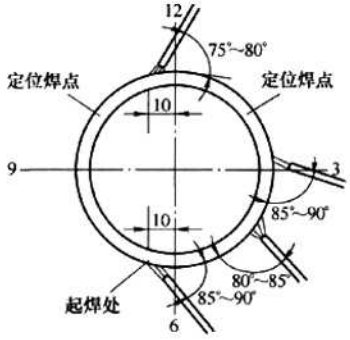


图3 水平固定管电弧焊操作示意图

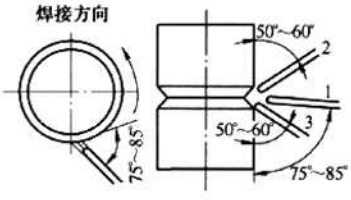


图4 垂直固定管焊接角度与顺序示意图

（3）盖面层焊接 其方法同填充层基本一样，采用多层多道焊，引弧点要在焊接前方距熔池10~15mm处，电弧引燃后要拉回熔池，待熔池形成后，方能继续向前焊接。焊接时采用锯齿形或月牙形运条，应注意焊条摆动幅度要均匀，在焊缝坡口两侧边缘要稍作停顿，使坡口边缘熔化0.5~1mm，以便确保管件坡口外边熔合良好。

四、结语

（1）选择小热输入，焊接热输入越大，母材融入焊缝越多，熔合比越大，热影响区增宽。容易使焊缝晶粒粗大，对焊接接头的塑性和韧性不利。

（2）每层每道焊缝焊接完毕后，应用角向磨光机、錾子或钢丝刷将焊渣、飞溅等杂物清理干净（尤其注意中间接头和坡口边缘）直至露出金属光泽，经自检合格后，方可焊接次层。

（3）尽量减少收弧的次数，收弧时应将熔池填满，避免产生弧坑裂纹，待熔池填满后将电弧快速移出坡口边缘熄弧。

（4）注意充氩一定时间后才能焊接。焊接过程中焊丝和管子应始终处于氩气的保护下，不可让空气侵入焊接区以防氧化。

采取上述焊接工艺措施后，对焊缝外观进行检查并按JB 4730—2005进行RT检验。产品焊接一次合格率达到了99%，说明所用焊接参数及焊接方法是合理的，为今后焊接类似材料积累了可借鉴的经验。另外，从热电厂主蒸汽管道水压试验和投入运行以来的情况来看，焊缝质量正常。因此，P91钢管道采用上述焊接工艺是行之有效的。**MW** （20100912）

《金属加工（冷加工）》2011年第4期要目

CK2120X6多主轴数控车床的自主开发与研制
250mm细长轴加工工艺方案比较
轴类零件中心孔的加工
用卧式车床加工球面
球面调心机构应用及球面加工工艺
小径薄壁螺纹盲孔的批量加工工艺技术
橡胶轴瓦的切削加工
解决丝锥磨槽裂纹难题
机床垂轴夹紧结构及相关计算
关于工装设计的一点思考
利用三爪自定心卡盘改制中心架
防止圆锥滚子磨双端面工序防进大头装置
轴承内环分解工装的设计
汽车覆盖件模具数控加工工艺
W形弯曲模具设计
阀座模具的改进
ϕ2908mm工件测量方法
数控机床进给系统的精度分析