耐热钢A335—P91与不锈钢TP304H异种钢管道的焊接

张育卓　肖新　王传友　唐元生

【摘要】我公司承担的神华某深加工裂解装置施工中，有部分耐热钢A335—P91与不锈钢TP304H的异种钢管道焊接施工，我们采用镍基焊接材料，焊前不需预热，焊后不进行热处理的焊接工艺，通过严格工艺控制措施，认真控制操作过程，焊缝达到设计要求。此异种钢接头的焊接在我公司也属首次，这类异种钢焊接接头的研究试验成功，为公司今后施工积累了经验。

关键词：A335—P91TP304H镍基焊材；异种钢

我公司承担的某煤化工副产品深加工综合利用项目裂解装置高压蒸汽管线材质为ASTMA335—P91（以下简称P91），输送介质为蒸汽，设计温度545℃，设计压力13.5MPa。此管道几个预留固定焊口与不锈钢TP304H焊接，属于异种钢材料焊接。为此，我们在施工前期及时增加了P91耐热钢与TP304H不锈钢管道GTAW+SMAW的焊接方法的焊接工艺评定，为项目部能够正常施工做好了前期准备工作。

1. P91与TP304H材料管道焊接特点

（1）化学成分分析　P91为中合金耐热钢，相当于国标10Cr9Mo1VNb，主要合金元素为Cr、Mo。铬的氧化物比较致密，不易分解，在材料表面生成致密的保护膜，提高钢的耐蚀性。Cr溶于Fe_3C后，可使碳化物具有很大的热稳定性，阻止碳化物的分解和减缓碳在铁素体中的扩散，能有效防止石墨化。钼是钢中的主要强化元素，钼优先进入固溶体使其强化，提高钢的热强性，同时降低热脆敏感性。P91与TP304H的化学成分如表1所示。

（2）容易出现冷裂纹　P91材料的主要合金元素为Cr、Mo，它们都能够显著提高钢的脆硬性，Mo的作用比Cr大50倍，它们和碳共同作用，使钢的临界冷却速度降低，奥氏体稳定性增大，冷却到较低温度时发生马氏体转变，产生脆硬组织，使接头变脆。合金元素和碳的含量越高，脆硬倾向就越大，当焊接拘束度大，冷却速度快的厚壁管道焊接时，若又有氢的有害作用，就会导致冷裂纹。

（3）P91焊接时容易出现再热裂纹　再热裂纹指一些含有V、Cr、Mo等合金元素的低合金高强度钢、耐热钢，经受一次热循环后，再经受一次加热的过程中（如消除应力退火，多层多道焊及高温下工作等），发生在焊接接头热影响区的粗晶区，沿原奥氏体晶界开裂的裂纹。

（4）TP304H与P91焊接易

表1　化学成分（质量分数）　（%）

材料名称	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo	其他
P91	0.18~0.12	0.3~0.6	0.02	0.01	0.02~0.50	8.00~9.50	Ni≤0.04	0.85~1.05	V：0.18~0.25 N：0.03~0.07 Ti≤0.01 Al≤0.01
TP304H	0.04~0.10	≤2.00	≤0.045	≤0.030	≤0.75	18.00~20.00	8.00~11.00	—	—

出现焊接变形　TP304H为奥氏体不锈钢，TP304H使用温度最高可达650℃，抗氧化温度最高可达850℃。TP304H奥氏体不锈钢的线膨胀系数比低碳钢大将近50%，而热导率仅为低碳钢的1/3左右。由于TP304H奥氏体不锈钢的特殊物理性能，所以在焊接过程中会引起较大的焊接变形。特别是在和P91材料的异种钢焊接时，由于两种材料的热导率和线膨胀系数有很大差别，会产生很大的残余应力，成为焊接接头产生裂纹的主要原因之一。

2. 焊接工艺评定

施工前，公司焊接试验室依据标准“NB/T47014—2011承压设备焊接工艺评定”，选用P91管段及TP304H管段进行了接头焊接试验和焊接工艺评定，管段规格为ϕ335mm×δ20mm×L150mm。

由于此异种钢焊口数量较少，使用温度达到545℃，焊接工艺评定设计时除进行常规的弯曲、拉伸试验外，需要增加常温冲击试验（最小54J，平均68J）。经过研究相关标准和参考相关经验，并经设计批准，焊接工艺评定的焊接材料采用焊接工艺性能较好的国外镍基焊材，焊接方法选择钨极氩弧焊打底和焊条电弧焊填充盖面，打底焊背面充氩保护。特别是根据分析镍基材料的焊接原理，确定本次焊接工艺焊前无需预热，焊后不进行热处理，但是需严格控制层间温度≤100℃，焊接时采用小电流快速焊。这个工艺初次应用于P91材料的焊接。

表2　焊丝和焊条的化学成分（质量分数）　（%）

焊材类型及牌号		C	Mn	Fe	P	S	Si	Ni	Gr	Nb+Ta
钨极氩弧焊丝	INCONEL82	0.24	3.20	1.26	0.004	＜0.001	0.14	70.60	21.70	2.364
焊条	INCO—WELD A	0.024	2.1	6.8	0.001	0.004	0.51	72.90	14.9	1.51

焊接工艺评定所用氩弧焊丝为美国SMC的INCONEL82，焊条为美国SMC的INCO—WELD A。INCO—WELDA是一种出色的可以用于异种材料连接的焊条，形成的焊缝金属具有较高的强度和较好的耐高温氧化性能，抵抗低温冲击的能力也很出色。焊丝和焊条化学成分如表2所示。

焊机选用奥太公司WSM—400交直流手工焊机（见图1），本焊机采用了IGBT高频逆变技术，具有理想的静外特性及良好的动态特性。焊机在外界条件变化时（如电网电压波动、输出电缆长度不同），始终能够实现良好的焊接工艺性能，易于引弧，电弧稳定，焊缝成形容易控制。

焊接工艺评定的坡口形式如图2所示，焊接参数如表3所示。

3. 焊接试验

焊后依据NB/T47014和NB/T47013对焊缝进行外观检测：无表面气孔、夹渣、裂纹、未熔合及咬边等缺陷。RT射线无损检测显示焊接接头全部为合格Ⅰ级片。经拉伸、弯曲、常温冲击试验，指标在设计指标之内（见表4）。数据显示此焊接工艺评定合格。焊接工艺评定试样如图3所示。

4. 焊接操作技巧

焊接操作技巧主要包括以下几方面：

第一，打底焊接采用钨极氩弧焊。为防止焊缝根部氧化，全过程充氩保护。充氩保护范围以坡口轴向中心为基础，每侧250~300mm处贴上水融纸，形成封闭气室。利用细铜管把头敲扁插入焊缝内进行充氩保护，流量

图1　奥太WSM—400交直流手工焊机

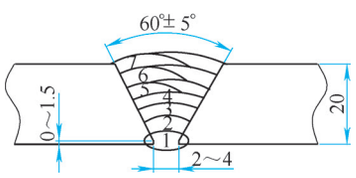

图2　坡口形式

表3　焊接参数

焊接层次	焊接方法	填充金属		焊接电流/A	电弧电压/V	焊前温度/℃	焊接速度/cm·min^{-1}
		牌号	直径/mm				
1	GTAW	INCONEL82	2.4	110	11	26	5.5
2~4	SMAW	INCO—WELD A	3.2	81~87	23~25	53	6.5
5~6	SMAW	INCO—WELD A	3.2	83~90	23~25	77	5.5

表4 焊接工艺评定相关试验结果

拉伸试验						
试样编号	试样宽度/mm	试样厚度/mm	横截面积/mm²	断裂载荷/kN	抗拉强度/kPa	断裂部位和特征
1-1	20	20	400	255.6	639	TP304H热影响区，塑性
1-2	20	20	400	259.2	648	TP304H热影响区，塑性
弯曲试验						
试样编号	试样类型	试样尺寸/mm×mm	弯轴直径/mm	弯曲角度(°)	试验结果	
1-3～6	侧弯	20×10	40	180	未见缺陷/合格	
冲击试验 （试验温度20℃，式样尺寸55mm×10mm×10mm）						
焊缝冲击试验/J		P91侧冲击试验/J		TP304H侧冲击试验/J		
1-7	142	1-10	135	1-13	176	
1-8	133	1-11	155	1-14	146	
1-9	128	1-12	176	1-15	151	

图3 焊接工艺评定试样

为20~30L/min。充氩时，当感觉氩气从焊缝间隙轻微溢出时，用锡纸或其他密封方法将焊口间隙堵住，引弧焊接时将氩气流量减少1/3，流量过大会产生内凹的缺陷。

第二，焊接时减少热输入，可有效地降低根部焊缝氧化程度，保证打底质量。收弧时先将焊接电流衰减下来，填满弧坑后，移向坡口边沿收弧，以避免产生弧坑裂纹。

第三，焊接过程中，使用手持式测温枪全程监控坡口温度，层间控制100℃以下。此类异种钢焊接的焊缝应尽量一次连续施焊完成。焊接过程中焊接接头要错开，一次焊接焊道厚度一般不超过3mm，防止应力集中导致出现裂纹。

第四，焊缝进行钨极氩弧焊打底层焊接完成后，经目测检查没有缺陷，马上进行第二层的焊接。焊接过程中应保证起弧、收弧处的质量，收弧时应回点几下灭弧，将弧坑填满，防止弧坑裂纹。

第五，焊条电弧焊焊接过程中应采用小电流快速焊，INCO—WELD A为国外进口焊条，焊接性较好，仰焊部位也可以连续焊接，焊条电弧焊焊接至一定厚度后必须采用多层多道焊接避免过多的焊接热输入，降低因大量的焊接热输入而导致产生过多的淬硬组织。

第六，电弧不宜太高，否则容易产生气孔；同时也不宜太低，否则容易产生夹渣，电弧高度一般推荐为焊条直径的0.5～1倍。焊条电弧摆动时，要适当加快，以免出现熔池“脱节”现象，造成夹渣。焊条摆动时，在保证不超过焊条直径2倍的前提下，要适当加宽，避免出现“驼峰”焊缝。分道焊接时，要注意仔细清理每层道间的夹沟和其他缺陷。现场焊接如图4所示。

图4 现场焊接

5.结语

根据合格的焊接工艺评定制定的焊接工艺通过现场施工，焊缝合格率100%，没有出现焊接裂纹等缺陷，为项目安装施工争取了时间。经过现场实践，焊接时由于焊缝可以连续焊接完成，无需进行焊前预热、焊后热处理，减少焊接工艺的难度，焊缝综合成本得到控制。

此类异种钢焊接接头的焊接工艺评定成功，为今后公司内推广使用此异种钢材质工艺管道的焊接积累了经验。

作者简介：张育卓等，中石化第十建设有限公司。

MW 20170220