



轨道式管道垂直固定口全位置机动焊耐热钢（MAG）焊接工艺

王健

中石化第十建设有限公司第一安装分公司，山东青岛 266555

[摘要] 随着石油化工行业科学焊接技术的快速改进创新，特别是近几年大管径，厚壁管道不断应用，使用常规的焊接设备和焊接工艺，以满足不了工程施工焊接的需求，为了提升高压管道施工效率和焊接质量，攻关研发小组就轨道式管道固定口全位置机动焊MAG焊接工艺可能遇到的问题进行探讨。通过利用原有的半自动气保焊焊接工艺，结合施工现场高压管道焊接的实际情况，对焊接设备的电源升级，焊接工艺参数，气体的配比，焊枪角度等深入的分析，攻关小组经过不断的探索新设备、新工艺和操作技巧，开发出了一套合理实用的轨道式管道垂直固定口全位置机动焊接工艺，用于指导施工现场生产，该焊接工艺既保证管道垂直固定口的焊接质量，又了施工效率，降低成本，推动新设备和新工艺在施工现场的焊接技术优化发展。

[关键词] 垂直固定口全位置机动；焊接特点；焊实芯焊丝；焊接工艺

前言

我公司承揽的大连恒力蜡油加氢裂化装置高压管道固定口焊接中，结合管道二次预制和施工现场垂直固定口（2G）焊接任务量的实际情况，由于手工电弧焊焊接效率低，焊接质量不稳定，严重制约了工程的焊接质量和施工进度。采用管道垂直固定口全位置机动焊实芯焊丝 MAG 焊接工艺，其焊接效率是手工电弧焊的 3-5 倍，特别是在大口径厚壁管焊接效率尤为突出，在大连恒力固定口施工现场进行应用推广。

1 A335-P11 材质焊接性能分析

A335-P11 材质管道中主要含有铬、钼等元素，这些都是显著提高钢淬硬性的元素，特别是钼的作用比铬约大，它们延迟了钢在冷却过程中的转变，提高了过冷奥氏体的稳定性，从而在较高的冷却速度下可能形成马氏体组织，如果管材厚度较大且焊接不预热时，就有可能产生 100% 马氏体，转变出现淬硬组织，冷裂纹倾向较大，铬钼耐热钢还具有再裂纹倾向和回火脆性。

主要合金元素的作用：Cr 元素在耐热钢中的作用是提高钢的抗氧化能力，并且在高温时能使金属表面形成氧化铬保护膜，从而防止内部的合金元素继续氧化。Mo 元素主要是提高钢的热强性，是高温下固溶强化最有效的元素。Mn 含量主要是保证 Mn/S 的值，减轻硫的有害作用，从而降低其热裂纹倾向。Si 的作用是提高钢的抗氧化性。C 元素的作用是提高钢的强度，含碳量的增加对钢的高温性能有不利的影响

A335-P11 材质管道的化学成分和力学性能见表 1、表 2

A335-P11 管的化学成分 (%) 表 1

成分	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	
标准值	Min	0.050	0.500	0.30	-	-	1.000	0.440
	Max	0.150	1.000	0.60	0.020	0.0200	1.500	0.650

A335-P11 管的力学性能 表 2

钢种	屈服强度2%残余变形 (Mpa)	抗拉强度 (Mpa)	伸长率50mm标距 (%)
实际值	205	415	30

2 管道垂直固定口全位置机动焊设备介绍

结合目前管道固定口全位置焊接设备经过广泛的调研和分析，采用昆山安意源轨道式管道固定口全位置机动焊机 CH-500 Pro，该设备具有斩波器电路，抵抗输入电压波动能力极强，焊机操作简单，更换工艺参数单选钮可实现，焊枪角度任意调节，行走小车绕着楔形轨道旋转，机头行走平稳可靠，焊工只需操作，即可实现编程、系统设定、机头动作等所有的操作控制，对管道垂直固定口全位置焊接参数可以任意分段调节，可以用于实芯焊丝或者金属粉芯焊丝填充盖面。一站可以完成整个管道垂直固定口的焊接工作。



图 1 焊接电源



图 2 焊接小车

3 焊接材料的选择

结合施工现场高压管道焊接的实际情况，依据 SH/T3520《石油化工铬钼耐热钢规范》要求，焊接材料应选择与母材的化学成分相同的焊接材料，采用奥钢联伯乐实芯焊丝 T Union GM Gr1Mo 焊丝，规格 $\Phi 1.2\text{mm}$ ，小盘 5kg，焊接材料的化学成分和力学性能见表 3、表 4

焊丝化学成分(%) 表 3

项目	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	cu	Mo
标准值	0.07~0.12	0.40~0.70	0.40~0.70	≤ 0.010	≤ 0.020	1.20~1.50	≤ 0.020	≤ 0.35	0.40~0.65
实测值	0.89	0.62	0.56	0.0043	0.0086	1.28	0.013	0.078	0.55

焊丝力学性能 表 4

项目	抗拉强度 R_m (MPa)	屈服强度 ReL (MPa)	断后伸长率 A (%)	室温冲击功 A_{k2} (J)
标准值	≥ 550	≥ 470	≥ 19	≥ 54
实测值	707	596	21.5	135

4 坡口形式

(1) 管道垂直固定口全位置机动焊坡口可根据设计文件要求或工艺条件选用标准坡口和自行设计，坡口形式及尺寸应按便于操作，避免产生焊接缺陷，焊缝填充金属尽量少，尽量减少熔合比，减少焊接变形与参与应力等远侧选用。尤其是在在高压管道焊接过程中，焊枪喷嘴受坡口角度的制约，影响焊接电弧的稳定性，结合施工现场的实际情况，我们采用的坡口角度为 $68^\circ \pm 12$ 双 V 型坡口，焊接摆动幅度和熔合效果好，保证了焊缝的质量，坡口形式如下图 3 所示。

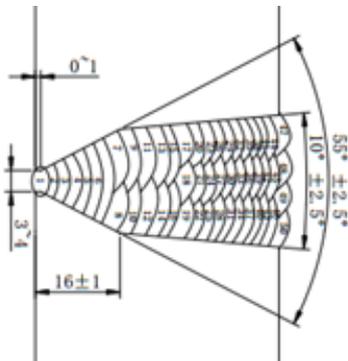


图 3 坡口形式及组对要求示意图 (单位 mm)

(2) A335-P11 材质管道下料管段宜采用机械加工，若使用等离子或火焰切割必须采用砂轮机将坡口及端部内外两侧不小于 29mm 范围内的氧化层打磨干净，坡口应进行 100% 表面无损检测，坡口加工后应进行外观检查，表面不得有裂纹、分层等缺陷。



图 4 管段切割



图 5 坡口加工

5 管道垂直固定口全位置机动特点

管道垂直固定口全位置机动焊主要用于管道的填充和盖面，采用配比合适的焊接工艺参数是保证焊接质量的重要条件。主要是送丝速度、焊接弧压、行走速度、焊枪的摆动宽度及速度、电感、分段点的度等。主要的焊接参数的选择依据管道的直径、壁厚、焊接层数、焊接模式来选取对应的焊接参数，选用的焊接参数储存在遥控器中，结合焊接的实际情况随时选用，操作简单。

5.1 焊接电流

在管道垂直固定口全位置机动焊焊接过程中，焊接电流实际指的是送丝速度，焊接电流的大小取决于送丝速度的快慢，使用过大的焊接电流，线能量对焊接材质里的合金成分过度烧损，使焊缝的综合性能变差。在热焊层填充过程中容易击穿打底层焊缝，焊缝氧化，产生较大的飞溅会使导电嘴端部堵塞堵，熔池变大液态金属增多熔池不易控制，液态金属造成流淌下坠，焊缝成形凹凸不平，产生扎丝和炸丝现象。

使用过小的焊接电流，熔深浅，填充金属连接性差，焊接电弧燃烧不稳定，焊接电压急剧升高形成较大的熔池，熔化金属在热态下浸润面积大，容易造成道间、层间及侧壁为熔合，电弧不稳定熔滴颗粒度变大，产生较大飞溅等。送丝速度的大小就是焊丝送给熔池的速度快慢，送丝速度设定的数值越大，表示焊丝送给的速度就越快，相应的焊接电流就会越大，因此焊接电流与送丝速度成正比。焊接电流主要影响焊缝的熔深。

5.2 焊接电压

在管道实际焊接过程中，焊接电压的设定值越大表示焊接过程中的电弧长度越大，电弧长度越大，电压就会越大，因此电压与电弧长度成正比。焊接电压主要影响焊缝的宽度。电弧长度过小，就是电压过小，电压过小时在焊接过程中会出现焊丝熔化不良，造成顶丝、焊缝宽度不够，熔池温度过高使熔池流淌，焊缝未熔合、飞溅等。电弧长度过大就是电压过大，电压过大时，在焊接过程中会出现焊缝金属不连续、凹陷、焊缝氧化、局部气孔、端部球形、焊缝坠流下塌、根部烧穿等。

5.3 焊接速度

焊接速度实际指的是小车的行走速度，小车行走速度过小就是焊接速度过小，过小的焊接速度会使液态熔池堆积增大焊层的厚度，造成焊缝流淌成形不良，焊层过厚度也会使焊缝内部熔合性能降低，焊接线能量增大，造成过热的温度会使焊材中的一些进行补偿性元素蒸发或者氧化，造成缺陷的产生。过大的焊接速度会使焊缝金属不连续，两侧焊脚部位无法达到良好熔合状态，焊缝两侧夹沟和咬边，气体对熔池部位保护不良等。行走速度的大小就是焊接速度的大小，行走速度设定数值越大。

5.4 摆幅的快慢直接影响道间温度有效措施之一

当需要增加摆幅的宽度，就要降低焊接速度，如果减小摆幅就要增加焊接速度，防止焊接时焊缝高低不平。根据遥控分段点的设置要求，焊接工艺需要，施焊过程中及时结合焊接位置，焊接厚度，不同的层次，设置一套合理的焊接工艺参数，保证焊缝的道间侧壁熔合良好，降低高温停留时间，缩小焊接接头的热影响区，防止合金元素的损耗。

5.5 焊丝干伸长度

焊丝的干伸长度过短，焊接电流增大，喷嘴与焊件的距离缩短，焊工观察熔池的视线不清楚，易造成焊道成形不良，同时焊枪的喷嘴过热，造成飞溅物粘在喷嘴上和气体不流畅长生气孔。焊丝干伸长度过长，焊丝的电阻值增大，焊接电弧不稳定，焊丝过热而熔合不良，金属飞溅严重，气体对熔池的保护效果也不好，焊缝成形不良。干伸长度可依据焊接参数的大小不同进行随时调整，用以补偿电弧稳定燃烧的需求。利用干伸长度与电阻之间的反比关系，完成对电弧稳定燃烧的补偿。焊丝的干伸长度保持在 9-13mm，有利于电弧燃烧的稳定，尽量压低喷嘴到熔池的距离。

6 焊接注意事项

(1) 焊接前将焊接接头移动到需要焊接的部位，调节好焊枪的高低和对中，在手持遥控器上按动摆动幅度按钮，检查焊枪所设置的摆动幅度是否设置合适，再按动检气按钮，对气体的配比和流量符合焊接工艺要求，气体流量根据焊接环境及时调整，以免混合气体对熔池保护不良。

(2) 在焊接前，首先对焊接工艺参数调整好，主要是为了避免焊丝与坡口内表面形成夹角，焊枪垂直方向为 0~10 度，焊丝水平方向倾角 80-85 度。

(3) 管道垂直固定口全位置机动焊实芯焊丝对焊接参数要求极高，经过实践验证采用多层道焊，焊层不超过 3mm，焊缝宽度不超过焊丝直径 4 倍，小的摆动幅度，保证焊接质量和外观成型。

(4) 热焊层焊接时，尽可能的稍大摆幅的宽度，上侧坡口停留时间比下侧坡口长点，使热量均匀的分散在坡口两侧，避免击穿打底层焊缝。合理的调节焊接速度和摆动宽度，使留有盖面层的深度一致，摆动幅度过宽，不易于控制熔池。

7 混合气体的选择分析

在管道垂直固定口全位置机动焊实际焊接过程中，当 CO₂ 气体过小时，电弧挺度会减小，使焊丝端部熔化速度加快，此过程加大了焊丝端部与母材之间的距离，易出现熔池流淌下坠、熔深变浅、烧损导电嘴等现象，不适用于实际焊接。

当 CO₂ 气体比例超过大时，电弧挺度增加，焊丝熔化速度减小，使焊丝端部与母材间的距离减小，飞溅增大堵塞导电嘴、两侧夹沟、焊道温度急剧升高，使焊道充分氧化等现

经过对混合气体对比分析我们选择了 80%Ar+20%CO，焊接弧燃烧稳定，飞溅减小，提高了焊丝的熔化速度，熔滴呈现稳定的喷射过渡，增加熔深，电弧均匀分布，改善了焊缝熔深形状，焊缝表面氧化现象减轻，降低焊缝咬边倾向，熔池金属的润湿性好，焊缝成型美观。

8 A335-P11管道垂直固定口全位置机动焊填充、盖面焊接

8.1 填充层焊接时

焊枪摆动幅度轻微的摆动有利于控制熔池的温度，减小熔池铁水下坠，减少焊缝的氧化，如摆幅频率过小，焊缝宽度变窄、增加了熔池温度、造成两侧夹沟，焊枪摆动幅度、速度及边缘停留时间配合应适当，动作要协调一致，注意观察焊缝的宽度，及时调整焊接参数，使焊缝边缘充分熔合。

8.2 在多层多道焊接过程中

由于熔池铁水受重力的作用下坠，加上电弧吹里受坡口角度的阻碍，铁水粘连到下坡口表面形成未熔合。弧压的长短对焊接过程的稳定性影响较大，弧压越大，焊丝电阻值增大，焊丝过热而成段熔化，结果焊接过程不稳定，焊缝成形不良，对熔池的保护不好；弧压过小，喷嘴与工件的距离缩短，焊接视线不清，焊道成形不良，还会使喷嘴过热，造成飞溅物粘住或堵塞喷嘴，影响气体对熔池的保护。



图 6 焊接过程



图 7 热焊层

8.3 盖面层焊接时

焊枪角度对防止焊道上缘出现的咬边至关重要，如是焊枪与下坡口的夹角过小，造成熔池下方熔深过浅，下坡口焊缝出现未熔合。结合焊缝的宽度对焊机上的电感及时调整，电感正数值时能增加电弧的宽度，负数值时是电弧越窄。以保证盖面层焊缝表面尺寸和边缘熔合整齐，波纹清晰熔合良好焊缝内外质量符合相关标准要求。



图 8 多层多道



图 9 盖面焊缝

管道垂直固定口全位置机动焊接工艺参数

表 5

焊接层次	焊接方式	焊材		电源极性	焊接电流 (A)	焊接电压 (V)	行走速度 (cm/min)	摆动速度 (mm)	摆动幅度 (mm/s)	内停留时间 (s)	外停留时间 (s)
		牌号	直径 (mm)								
1-2	GMAW	CHW-55B2R	1.2	直流反接	220		290	2	2	0.15	0.15
3-6	GMAW	CHW-55B2R	1.2	直流反接	240		280	3	2	0.15	0.15
7-N	GMAW	CHW-55B2R	1.2	直流反接	260		295	3	2	0.15	0.15

9 管道垂直固定口全位置机动焊接应用数据对比分析:

(1) 结合大连恒力项目蜡油加氢裂化装置高压管道，垂直固定口全位置机动实芯焊丝焊接和手工电弧焊在 A335-P11 材质管道对比分析，焊接效率是焊条电弧焊的 3~4 倍，而且可连续焊接，节省了材料和能源，焊缝其综合成本明显低于焊条电弧焊。提高了劳动生产率，减轻焊工劳动强度，焊接质量稳定，各项综合性能数据都优于焊条电弧焊。

(2) 通过对焊接相关数据的计算，手工电弧焊焊材用量每公斤多出管道垂直固定口的成本，例如，管道全位置焊接设备 120 / 天，焊工 400 / 元、普通电焊机 20 元 / 天计算，采用管道垂直固定口全位置机动焊低，手工电弧焊成本高；使用全位置自动焊对于管道的二次预制和施工现场垂直固定口的焊接施工效率，在保证施工效率和焊接质量的同时，

对管道固定口全位置机动焊与焊条电弧焊进行了如下数据对比分析：

管道固定口全位置机动焊和焊条电弧焊效率、焊接成本比较 表 6

项 目	管道固定口全位置机动焊			焊条电弧焊		
	A335-P11	A335-P11	A335-P11	A335-P11	A335-P11	A335-P11
材 质	A335-P11	A335-P11	A335-P11	A335-P11	A335-P11	A335-P11
母材规格	Φ350*35.71	Φ450*39.67	Φ500*52.37	Φ350*35.71	Φ450*39.67	Φ500*52.37
焊材规格	Φ1.2	Φ1.2	Φ1.2	Φ3.2	Φ3.2	Φ3.2
焊材用量 (kg)	6	12.5	15.5	9.5	28	41
焊接时间 (min)	200	610	820	410	1260	1950

10 结束语

管道垂直固定口全位置机动焊实芯焊丝工艺应用是一种必然的趋势，从坡口形式、焊接材料、焊接设备电源、焊接工艺参数、的深入的分析，我公司在大连恒力工程项目蜡油加氢裂化装置高压管道 A335-P11 材质焊接施工中，采用合理的焊接工艺和技术措施，既保证焊接质量，有提高了功效，共完成 A335-P11 材质管道 2650 寸，所焊口经射线检测焊接一次合格率 99.3% 以上，圆满的完成了 A335-P11 材质高压管道焊接任务，所有的焊接接头内外焊接质量得到了全面的控制，各项焊接指标符合标准要求，在高压管道垂直固定口全位置机动焊二次预制和现场焊接施工中其优势更为突出。该管道垂直固定口全位置机动焊实芯焊丝焊接工艺值得推广应用。

[参考文献]

-
- [1] 《焊接材料的选用》 化学工业出版社 李亚江 2004 年
 - [2] 《焊接方法与设备》 机械工业出版社 吴林 2001 年
 - [3] 《石油化工铬钼钢焊接规范》 SH/T3520-2015
 - [4] 《承压设备无损检测》 NB/T4013-2010