304不锈钢管在GMAW焊接工艺条件下的接头性能优化

刘书慧，吕增，汪彬，蒋丁存，蔡新荣
海洋石油工程（青岛）有限公司　山东青岛　266520

摘要：某项目要求对304不锈钢管采用GMAW焊接工艺进行焊接，并对焊接工艺的几方面要素提出了比较具体的细节要求。在给定的前提条件下，现场施工前期焊接试验时出现了接头根部熔合欠佳的问题，弯曲试验开裂。经多方面的工艺条件优化，通过调整坡口装配、焊丝直径和焊接参数等措施，最终使得焊接接头熔合改善，各方面的理化性能满足标准的相关要求。

关键词：304不锈钢；GMAW焊接工艺；根部开裂；工艺优化

1　序言

304不锈钢具有较高的强度，在－196℃温度条件下具有优良的低温韧度以及良好的焊接性，常用于LNG核心工艺模块的低温服役管道。某项目设计要求对其中一部分304不锈钢管采用GMAW（熔化极气体保护焊）工艺进行焊接，并对焊接工艺几个方面的要素提出了一些限定要求。在项目早期阶段，进行焊接试验并测试焊接接头的各方面性能，结果出现了多次无法用常规X射线检测出的熔合不充分问题，焊接接头的侧弯和晶间腐蚀试验均出现了不同程度的根部开裂现象。为此，开始分析可能导致熔合不足的原因，并通过多组焊接试验进行验证，结果表明，优化后的焊接接头性能满足标准规定的相关要求，进一步验证了优化后的焊接工艺是合适的。

根据项目设计要求，对一部分304不锈钢管系统采用GMAW工艺进行焊接，适用的公称直径为500~2750mm，壁厚为5.5~40mm。这其中涉及到管道在车间预制接长和现场安装，以及管道与法兰、三通与弯头等管件的焊接工作。

焊接方面的具体要求如下：

1）根焊采用GMAW-S（熔化极气体保护短路过渡电弧焊）工艺，对应的焊接设备在几个国际知名品牌的设备中选择。

2）热焊采用GMAW-P（熔化极气体保护脉冲过渡电弧焊）工艺，焊接设备采用与根焊相同的设备，其余填充和盖面的焊接方法及设备不限制。

3）焊接材料采用ER308L实芯焊丝，其中对焊丝中的硅含量有一定要求，即硅含量需略高于传统焊丝。

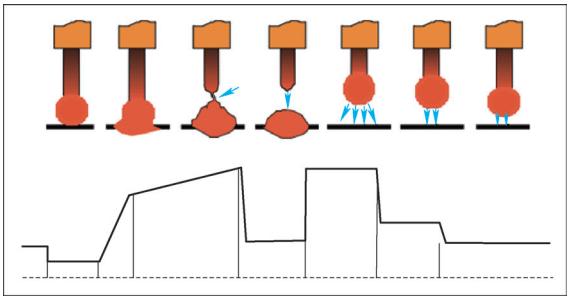
4）焊接保护气体为98%氩气+2%CO_2，背面保护气为纯氩气。

5）焊接工艺评定执行ASME B31.3和ASME IX的相关要求，同时还需要按照ASTM A262 Practice E方法对焊接接头进行晶间腐蚀试验测试。

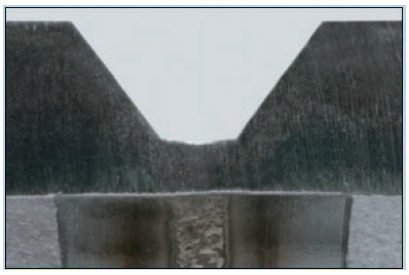
2　前期焊接试验

经过梳理落实该焊接工艺的各方面要素，选取了适合的GMAW焊机和ER308L焊丝开展前期焊接试验。适用于不锈钢根焊的GMAW-S工艺，其电流输出和独特的波形控制技术比较适合于根焊成形，根部熔合比较充分均匀，焊接飞溅较小，焊接效率高，热输入较小，其输出特性如图1所示。

经过一周的试焊，焊接技师初步适应了GMAW-S和GMAW-P工艺用于304不锈钢的焊接，焊接操作和焊缝成形趋于稳定，因此准备从试焊转到对焊接参数和焊接接头理化性能的研究测试。



a）GMAW-S波形控制



b）根焊的焊接成形

图1　GMAW-S根焊输出特性

2.1　试验材料

试验母材选取ϕ355.6mm、壁厚11mm的304不锈钢管，焊丝选用ϕ1.0mm的ER308L。焊接位置为5G。选用此尺寸的钢管进行焊接，共需焊接4层：根焊采用GMAW-S工艺、热焊与填充和盖面采用GMAW-P工艺。在工作量不是很大的情况下，能够比较全面地考察如下几方面情况：焊接方法的输出特性、全位置的焊接操作情况和焊道熔合及成形等。

2.2　坡口形式

坡口采用ASME B31.3标准推荐的单面75°的形式，如图2所示。由于GMAW-S工艺为半自动送丝，焊接速度较快，焊接热输入较小，因此坡口的钝边几乎为0mm，仅在装配坡口之前用砂轮机将根部打磨光滑，去除根部切割可能残留的毛刺。组对的间隙为2.5~3.5mm，根据焊接技师的实操反馈，这个间隙范围对于全位置焊接成形操作最容易。

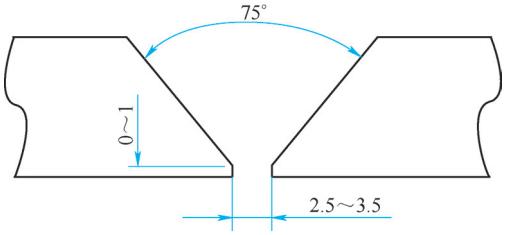


图2　试验坡口形式

2.3　焊接参数

在实际焊接过程中，共完成了2个试件的焊接，其焊接参数的平均值见表1。在此参数下完成的试件焊道外观良好，焊缝成形匀称，焊道正反两面的外观成形满足ASME标准的外观要求，通过了工程师和检验人员的外观检测。

表1　焊接试验所选取的焊接参数

焊层	工艺方法	送丝速度 /m·min^{-1}	电弧电压 /V	焊接电流 /A	焊接速度 /mm·min^{-1}	热输入 /kJ·mm^{-1}
打底	GMAW-S	4.45	15.7	105	110	0.7~0.9
填充	GMAW-P	4.32	18.6	97	120	1.0~1.4
盖面	GMAW-P	3.94	18.6	97	130	1.0~1.3

2.4　无损检测

对焊接试件进行磁粉和X射线检测，磁粉检测执行ASME VIII标准，X射线检测和判定执行ASME B31.3标准。无损检测的结果均符合标准的相关要求，判定为合格。

2.5　理化性能测试

按照ASME IX标准的相关要求对焊接接头进行力学性能测试，取4个侧弯试件、2个减截面拉伸试件、3组低温冲击试件、2个宏观试件，并测定了焊接接头的铁素体含量[1]。另外，取3个晶间腐蚀试件，按照ASTM A262 Practice E方法对焊接接头进行测试。

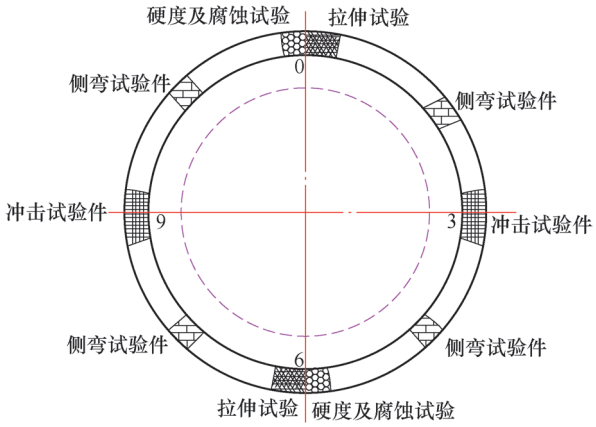
测试结束后，侧弯试件出现了根部开裂问题，晶间腐蚀之后的根弯试验同样出现了根部开裂，表明焊接试件的根部熔合存在问题。尽管无损检测没有发现超标缺陷，但高度疑似出现了根部冷搭接问题。

冷搭接是 AWS 技术和标准文献在阐述 GMAW 焊接接头中存在的一种缺陷时，所用的非标准焊接缺陷术语。所谓冷搭接，实际上即是未熔合，它常易于发生在 GMAW 焊缝中。冷搭接有别于一般意义上的未熔合，其特点是缺陷尺寸小，不易于被目视检测和 RT 等常用方法探测出来。

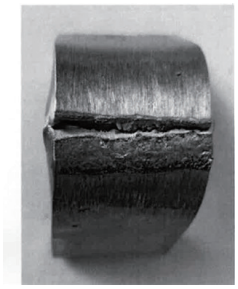
研究表明，产生冷搭接的原因归结为飞溅在熔池两侧脚部、熔池溢出及以上两者的组合，冷搭接的尺寸为 0.01~1.5mm。其中尺寸较大的冷搭接容易目测到，而10μm 级的冷搭接却很难用无损检测方法发现。

3 开裂原因分析及优化措施

因为管子圆周方向的全位置几乎都有开裂，而且在有弯曲开裂试件的邻近位置，补充取样的弯曲试件也出现了不同程度的开裂问题。最初分析认为，根部熔合欠佳的主要原因是焊接参数较小，热输入不足，因此调整的方向是适当增大焊接参数，主要是提高送丝速度和焊接电流，二者正相关。但通过试焊，仍出现了类似图3中的弯曲开裂问题。因此，一致认为，提高送丝速度和焊接电流的做法不是调整的主要方向，因为当前技师们采用的焊接参数在焊接过程中的操控是比较适宜的，如果参数提高过大，会出现操作和成形困难等问题，所以焊接参数仅适合少许增加。



a）取样位置



b）弯曲开裂的试件

图3 性能测试件的取样位置和弯曲开裂的试件

进一步分析发现，需要将坡口组对间隙适当增加，由原来的2.5~3.5mm增加到3~5mm，以此来延长根焊时电弧在根部两侧的停留时间，适当增加了根焊的摆动。另外，尝试用ϕ0.9mm的焊丝，随着焊丝直径减小，如果在单位时间内输出相近数量的熔敷金属，则需要提高送丝速度进而增大少许焊接电流，对熔合有一定改善作用。而且由于焊丝直径的减小，技师们在焊接过程中对根焊的熔池操控能够更加精确，普遍反映在高速送丝的情况下，尽管焊丝源源不断地持续送进，依然能比较从容地操控电弧和根部熔合，焊接过程的可操控性有了较好的改善。

4 验证优化措施

为了验证制定的优化措施，采用前期模拟试验的管材进一步开展焊接试验。

（1）焊接参数方面的优化　将坡口装配间隙调整到3~5mm，换用了ϕ0.9mm的焊丝，并将送丝速度调整到5.08m/min左右。

（2）焊接操作方面的优化　由于坡口组对间隙有所增大，因此在施焊过程中尝试调整根焊时的摆动幅度和角度，适当延长根焊时电弧在母材两侧的停留时间。经过反复多次尝试，技师们普遍反映，由于GMAW工艺采用机械式送丝，因此焊丝送进速度较快，且根部间隙的调整属于微调，根部空间增大有限，难以特别明显地主动控制延长电弧在根部两侧停留时间的操作，说明在这个量级的调整变化，焊接技师们在操作过程中没有明显的感知。

经过采取以上优化措施，焊接完成的多组试件外观成形良好，无损检测合格，随后的各项力学性能试验和晶间腐蚀试验合格，验证了优化后的焊接工艺满足标准要求。

5 结束语

通过分析在指定的GMAW工艺条件下304不锈钢管产生弯曲开裂的原因，调整坡口组对间隙、焊丝直径、送丝速度等工艺参数的组合等措施，获得了304不锈钢管在GMAW焊接工艺组合条件下良好的接头性能。

GMAW焊接工艺在众多焊接标准中都要求对焊接接头开展弯曲试验，以此验证焊接工艺的熔合问题。因此，在制定合适的GMAW焊接工艺时，需要结合实际工况不断优化所选焊接要素的组合匹配，并通过试验测试反复验证焊接工艺的稳定性。

参考文献：

[1] 何德孚，刘榴.冷搭接——GMAW 焊缝值得关注的一种缺陷[J].桥梁焊接规范，2012（2）：35-38.

MW 20201129