

# 深水导管架 TKY 疲劳节点焊缝的无损检测

黄雪波

(海洋石油工程股份有限公司, 珠海 519050)

**摘要:** 在深水导管架的建造过程中, 有部分管状 TKY 节点焊口是疲劳节点。介绍深水导管架 TKY 疲劳节点焊缝的结构型式和组对焊接工艺, 并结合规范对其无损检测的要求, 梳理了目视检测、磁粉检测、超声检测等方法的技术要求和验收要点, 并制定了合理的检测工艺, 以确保 TKY 疲劳节点焊缝质量提供技术参考。

**关键词:** 深水导管架; TKY 疲劳节点; 目视检测; 磁粉检测; 超声检测; 根部缺陷

**中图分类号:** TG115.28      **文献标志码:** B      **文章编号:** 1000-6656(2023)03-0035-04

## Nondestructive testing of fatigue TKY joint welds of deep water jacket

HUANG Xuebo

(Offshore Oil Engineering Co., Ltd., Zhuhai 519050, China)

**Abstract:** During the deep water offshore jacket construction, there are some tubular TKY joint welds are fatigue joints. This paper introduces the structural characteristics and assembly welding processing of fatigue TKY joint welds of deep water jackets. Combined with the requirements of the relevant code for non-destructive testing method, the technical requirements and acceptance requirements of visual inspection, magnetic particle inspection and ultrasonic inspection are summarized, and a reasonable testing process is formulated which can provide technical reference for ensuring the weld quality of TKY fatigue joint.

**Key words:** deep water jacket; fatigue TKY joint; visual inspection; magnetic inspection; ultrasonic inspection; root defect

海上采油平台有多种结构, 其中, 导管架平台是最常见的一种结构。导管架主要通过卷制焊接接长的主杆件, 支撑管等结构类型组成, 各结构类型之间通过焊接连接形成管状 TKY 节点, 如图 1 所示, 处在集中受力位置的节点称为 TKY 疲劳节点<sup>[1]</sup>。

在导管架服役期间, TKY 疲劳节点的受力最为复杂, 不仅需承受导管架自身和上部组块的巨大重量, 还需承受海水潮汐、海风、内波流和平台设备振动产生的多种交变作用力。如果 TKY 疲劳节点焊缝质量存在问题, 在台风等恶劣海况条件下, 其很有可能发生断裂和失效, 从而导致整个导管架的解体和平台的倾覆, 最终造成灾难性的油气泄露事故和

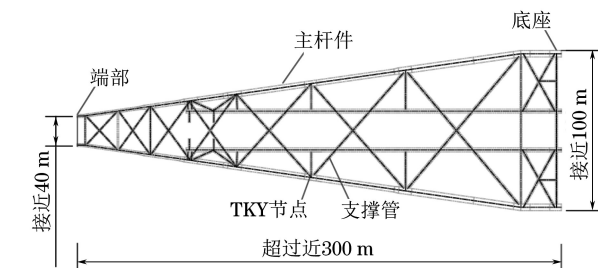


图 1 深水导管架卧式建造平面图

海洋污染。

按照设计规范 API RP 2A-WSD—2014《海上固定平台的规划、设计和建造的推荐做法 工作应力设计法》的要求, 导管架 TKY 疲劳节点的焊缝检测主要采用目视检测、磁粉检测和超声检测等方法。

无损检测是质量控制的一个重要手段, 文章通过介绍 TKY 疲劳节点的结构组对和焊接工艺特点, 梳理 TKY 疲劳节点焊缝各检测方法的技术要求和质量验收要点, 并完善相关的检测工艺细节, 以

**收稿日期:** 2022-08-04  
**作者简介:** 黄雪波(1986—), 男, 本科, 工程师, 主要从事海洋工程无损检测方面的研究工作  
**通信作者:** 黄雪波, 394663747@qq.com

为确保 TKY 疲劳节点焊缝质量提供技术支撑。

## 1 TKY 疲劳节点的组对和焊接工艺特点

深水导管架采用卧式建造,底座的垂直高度超过 100 m,端部的垂直高度超过 40 m,主杆件的厚度为 38~100 mm,直径为 2~4.2 m,TKY 疲劳节点的支撑管壁厚为 28~50 mm,直径为 0.762~1.219 m。根据不同重量及高空组对的难度,TKY 疲劳节点的现场组对和焊接主要有以下两种工艺。

(1) 对支撑管分段进行组对焊接,如图 2 所示。实施时,首先将支撑管的尾端管与主杆件进行组对,可从内侧或者外侧进行施焊,接着进行清根,再完成整个焊道的焊接,然后完成尾端管与支撑管的环缝组对和焊接,此时环缝对接可从不外侧进行施焊。

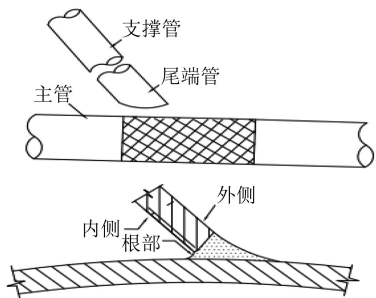


图 2 分段组对焊接工艺及根部成形

(2) 对支撑管进行整体组装,如图 3 所示。具体工艺为:将支撑管或者立片整体与主杆件进行组对,外侧施焊,完成整个焊道的焊接。

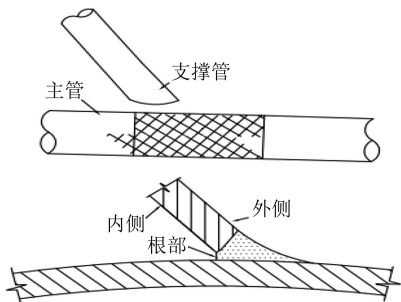


图 3 整体组对焊接工艺及根部成形

第一种组对焊接方式需要进行两次组对和焊接才能完成整个过程,但能够减小尾端管的组对难度,保证整体焊道的焊接质量和根部焊道的全熔透,这对 TKY 疲劳节点焊缝的质量尤为重要,因此 TKY 疲劳节点优先采用此工艺。第二种方式只需进行一次组对和焊接,工作效率高,但因支撑管或立片整体质量和长度较大,不易调节角度和位置,较难控制根部间隙大小,且只能在外侧焊接,根部焊道的质量很难控制,且当根部存在超标缺陷时,因空间狭小亦很

难保证返修质量。当现场条件所限,无法采用第一种工艺时,也经常采用第二种工艺。

## 2 TKY 疲劳节点焊缝的检测

### 2.1 目视检测

在 TKY 疲劳节点焊接完成后,目视检测需按照 AWS D1.1 /D1.1M:2010《钢结构焊接规范》中表 6.1 的要求进行验收,而 TKY 疲劳节点为了获得更好的抗疲劳性能以及减少应力集中,需对疲劳节点焊缝表面整体进行打磨和研磨处理,以得到改善的焊缝外观形状(其要求见图 4,图中  $t$  为焊趾处母材厚度, $b$  为支管母材厚度)。

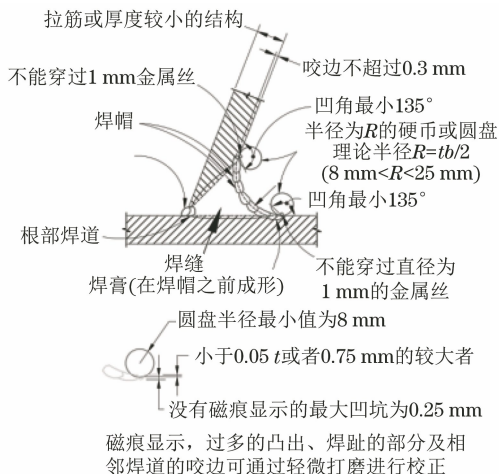


图 4 改善的焊缝外观形状要求

焊缝检测流程如下:首先使用 135°扇形尺测量焊趾处与主杆件及支撑杆件之间的二面角,如图 5(a)所示,当二面角小于 135°时,需增加焊趾位置与杆件之间过渡的区域范围;其次测量焊缝圆滑过渡的间隙,如图 5(b)所示。圆环直径一般为支撑杆件壁厚的一半,最大不超过 25 mm,最小不超过 8 mm,圆环与焊缝之间的间隙不超过 1 mm 为合格,如果超过该值还需对焊缝表面进行研磨,并重复上述检测步骤,直至焊缝圆滑过渡满足要求。

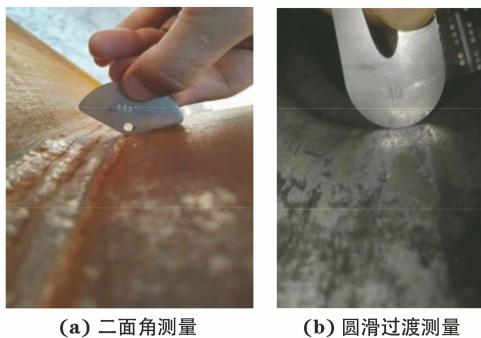


图 5 二面角和圆滑过渡的测量操作示意

2.2 磁粉检测

按照 API RP 2X—2015《海上结构制造超声检测和磁粉检测推荐作法及无损检测人员技术资格鉴定指南》(以下简称 API RP 2X 标准)要求,对于疲劳节点的磁粉检测可以采用湿法和干法的交流磁轭法进行检测,其中湿法应用于温度不高于 57.2℃ 的工件,干法应用于温度不高于 315.6℃ 的工件(如气刨清根后的焊缝或尚未完全冷却的焊缝)。

磁粉检测主要技术参数与技术要求如下:① 一般在焊接完成 48 h 后进行;② 使用提升力不小于 4.5 kg 的交流磁轭;③ 每一批干磁粉中至少有 75% 重量的干磁粉颗粒能通过 120 ASTM 筛网,至少有 15% 重量的干磁粉颗粒能通过 325 ASTM 筛网;④ 被检区域内光照度不低于 1 000 lx;⑤ 磁轭的布置如图 6 所示;⑥ 被检测区域内磁场强度不低于  $30\times10^{-4}$  T 或能在磁场指示器(见图 7)上产生相应的显示,并使用特斯拉计(见图 8)或磁场指示器确定有效检测区域的大小。

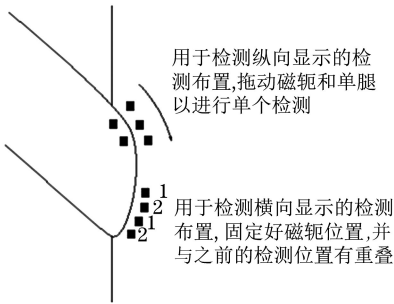


图 6 磁轭布置示意

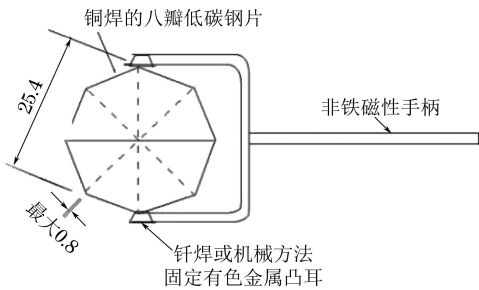


图 7 磁场指示器测量磁场强度示意

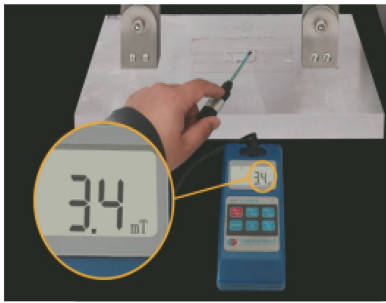


图 8 特斯拉计验证磁场强度

当对 TKY 疲劳节点进行纵向磁粉检测时,不可能接触到所有位置(如 Y 形管接头的根部和趾部区域),对这些不能接触到的位置可以使用单腿磁轭法进行检测。该方法原理是:将单腿磁轭放置在铁磁性工件上,从而产生径向磁场(见图 9),现场检测(见图 10)时将单腿磁轭向旁边移动,可接触到根部和趾部的位置,通过径向磁场来检测出与焊缝方向平行的缺陷。在检测前要验证和确保被检区域满足如图 11 所示的要求。

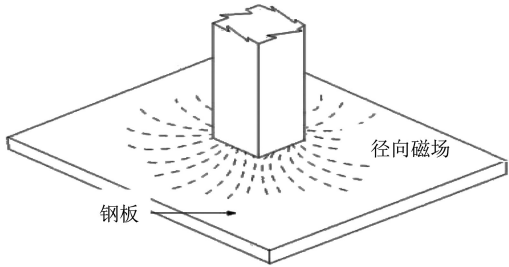


图 9 单腿磁轭的布置和磁场分布示意



图 10 单腿磁轭的现场检测

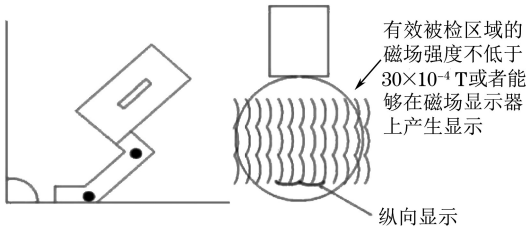


图 11 单腿磁轭的布置和纵向显示分布

在对 TKY 疲劳节点完成磁粉检测后,对相关显示按照 API RP 2X 标准中第 8.8 条要求进行验收,对不合格工件应进行返修,直至合格为止。

2.3 超声检测

超声检测仪器应满足 API RP 2X 标准中 7.5.1 节的要求,探头及其他附件满足 API RP 2X 标准中 7.5.2 节要求。为了保证探头与接触面之间有良好的接触,宜使用较小尺寸探头。当需要更好地甄别根部信号时,可以选用低频率探头保证良好的声束指向性。超声检测焊缝和母材的灵敏度要求如表 1 所示,灵敏度试块结构如图 12 所示。

超声检测具体要求和注意事项如下所述。



表 1 超声检测的灵敏度要求

灵敏度类别	试块要求	技术要求
母材扫查灵敏度	被检母材	二次底波波高为满屏 80%
内部缺陷灵敏度	直径 1.6 mm 横孔,厚度与被检工件相近(见图 12)	制作最少 3 个点的 DAC(距离-幅度)曲线
根部缺陷灵敏度	高度为 1.6 mm 的方槽,厚度与被检工件相近(见图 12)	方槽反射波高为满屏 80%
表面补偿	选择与母材厚度相近的灵敏度试块	采用双探头串列法实测表面补偿



图 12 灵敏度试块结构示意图

(1) 组对焊接前的母材扫查:在 TKY 疲劳节点组对焊接之前,应对脚印位置的主管母材进行扫查(见图 13),检测区域包含焊缝在主管投影的位置,宽度一般约为 150 mm,以保证在焊接前主管母材没有超出标准要求的分层缺陷;当发现有缺陷时,应按照 ASTM A578/A578M—2012《特殊用途的普通钢板与复合钢板直射法超声检测》中的 A 级要求进行验收。

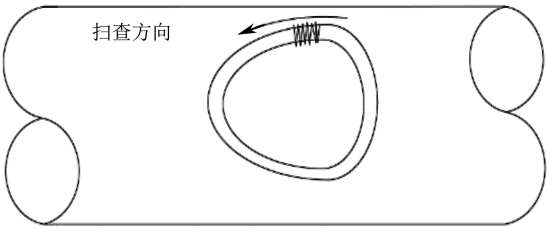


图 13 脚印位置的主管母材超声扫查示意

(2) 检测时机:与磁粉检测时间要求一致,一般在磁粉检测合格后进行。

(3) 母材直探头扫查:使用直探头对支管母材位置进行扫查,以确保没有影响斜探头检测的母材缺陷。

(4) 焊缝扫查:探头应放置在支撑杆件上,并始终垂直焊道,沿焊缝方向进行扫查,作适当摆动,如图 14 所示。

条件允许时,应按照扫查方案使用 0°,45°,60°和 70°探头分别对整个焊缝进行扫查。当探头能进入支管内或主管内时,应当进入管内进行扫查;当只能在支管外侧扫查时,应对根部焊道的回波仔细甄

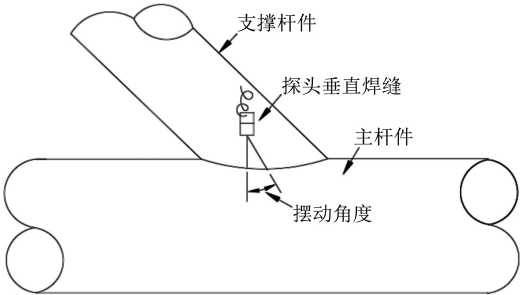


图 14 探头垂直焊缝扫查示意

别,避免误判和错判。

(5) 扫查样式要求:TKY 疲劳节点需按照如图 15 所示的扫查样式进行扫查,疲劳节点的焊缝表面都会打磨光滑,因此需使用 45°探头沿焊缝轴线骑焊缝进行横向扫查,如图 15 中动作 F 所示。

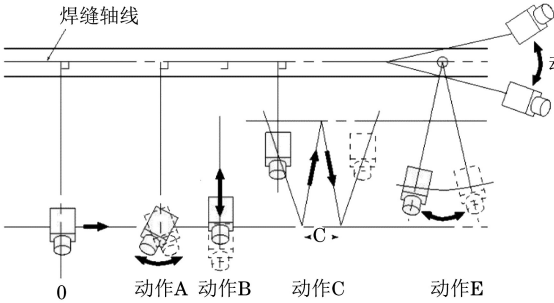


图 15 TKY 疲劳节点的扫查样式

(6) 一比一作图:由于管状 TKY 节点的超声检测声束路径会随曲率而改变,因此超声回波的判断较为困难。为了更好地区别结构回波,可对声束路径使用一比一作图法来确认缺陷位置,也可以使用声

(下转第 83 页)

通过优化传感器结构或使磁场聚焦来检测孔状腐蚀。

## 4 结论

(1) 不同壁厚钢板的检测信号在  $t < 16.326\text{ ms}$  时重合, 在  $t > 16.326\text{ ms}$  时出现明显的分叉, 表明电磁法在金属管道缺陷检测中具有可行性。

(2) 对频率、电流、提离高度和缺陷类型等影响参数的试验表明, 频率只会对检测信号的完整性造成影响; 激励电流变化对检测信号幅值和衰减速度影响不大; 提离高度影响检测信号的幅值, 对衰减率无影响; 在传感器有效覆盖范围内, 缺陷处于传感器正下方时最容易被发现; 当缺陷体积相同时, 均匀腐蚀要比穿孔腐蚀更容易发现。

(3) 试验结果不仅在传感器优化及实际工况作业中具有重要的指导意义, 还对具有包覆层金属管道的腐蚀和缺陷检测有借鉴意义。

## 参考文献:

[1] 王安泉, 陈健飞, 杨勇, 等. 铁磁性材料的脉冲涡流测

厚与特征量提取[J]. 无损检测, 2020, 42(11): 38-41.

[2] 张涛. 基于脉冲涡流对埋地金属管道缺陷定量算法研究[J]. 电子测量技术, 2018, 41(20): 28-31.

[3] 田亚团, 向安, 来园凯. 基于脉冲涡流晚期信号斜率的不锈钢壁厚测量[J]. 无损检测, 2022, 44(3): 18-21, 31.

[4] 殷雪峰, 程千里, 窦凤杰, 等. 基于脉冲涡流的提高高度检测方法[J]. 压力容器, 2021, 38(9): 81-86.

[5] 任旭虎, 张圣坤, 张振. 铁磁性材料缺陷的脉冲涡流检测系统设计[J]. 无损检测, 2020, 42(10): 72-75.

[6] 赵桐, 彭斌. 基于脉冲涡流的金属薄板厚度检测研究[J]. 仪表技术与传感器, 2020(1): 117-121.

[7] 李开宇, 高雯娟, 王平, 等. 冷轧带钢屈服强度的脉冲涡流检测方法研究[J]. 电子测量技术, 2019, 42(5): 71-75.

[8] 崔赞, 孙志毅. 小型脉冲涡流缺陷检测系统的设计[J]. 工业控制计算机, 2018, 31(10): 20-21, 24.

[9] 李俊涛, 张涛. 传感器提离高度对瞬变电磁法检测信号的影响[J]. 无损检测, 2020, 42(7): 16-19.

[10] 张涛. 管道缺陷位置对瞬变电磁检测信号的影响[J]. 无损检测, 2018, 40(9): 19-21.

(上接第 38 页)

束模拟软件, 通过输入相关参数来简化相关步骤。

(7) 特殊位置的一次波主管壁垂直反射回波的利用: 通过理论计算, 当焊缝截面的二面角与探头角度加起来为  $180^\circ$  时, 能够获得一次波的主管壁底面结构垂直反射回波。当有回波位置在主管壁反射波之前, 可以很清楚地判断该回波为缺陷回波。当缺陷回波与主管壁反射回波的声程距离正好等于主管壁厚时, 可以判断该缺陷为主管壁的未熔合类缺陷。

(8) 特殊位置的二次波主管壁垂直反射回波的利用: 当探头角度与焊缝截面二面角相同时, 能够获得二次波的主管底面垂直反射回波。当主管壁垂直反射回波与缺陷之间的声程距离正好为主管壁厚时, 可以判断该缺陷为未熔合类缺陷。

由于超声探头总是存在一定的声束宽度和扩散角, 因此在使用不同角度探头进行扫查时, 总能在沿支管焊缝长度方向上的不同区域内看到强烈的主管壁反射回波, 在检测时可利用该特殊反射, 提高对未熔合类缺陷和其他类缺陷的判别和区分能力。

检测完成后, 疲劳节点的超声检测验收需采用 API RP 2X 标准 A 级要求验收。但同时需考虑到 TKY 疲劳节点根部返修的困难, 谨慎进行焊缝根部焊道反射回波的辨别和定量, 避免不必要的返修。当支撑管与主管之间的局部二面角夹角位于  $15^\circ \sim 75^\circ$  时, 根部封底焊缝不连续可以忽略不计。

## 3 结语

深水导管架 TKY 疲劳节点焊缝的无损检测是项目质量的关键控制点, 根据其节点结构型式和焊接工艺特点, 对其无损检测特点和技术要求进行重点解析, 制定可靠的目视、磁粉和超声检测工艺, 可确保其质量。目前该类 TKY 疲劳节点的目视、磁粉和超声检测工艺已在某深水导管架建造场地现场中应用, 并取得较好的效果。

## 参考文献:

[1] 程志虎. T、K、Y 管节点焊缝超声波探伤[J]. 无损检测, 1994, 16(11): 323-328.