

海洋工程工艺管道的局部焊后热处理

袁建松, 刘春峰, 耿建成, 徐光耀, 李成龙

海洋石油工程(青岛)有限公司 山东青岛 266520

摘要: 对LNG模块化工厂建造过程中常见的工艺管道需要热处理的工况进行了介绍, 并对常见的工艺管道、管件及包含有附件的工艺管道热处理要求进行了介绍, 同时结合热处理标准给出了常见工艺管道焊接接头不同连接形式下的热处理温度区间, 并已在国际项目上使用, 为同类项目提供施工经验。

关键词: 工艺管道; 热处理厚度; 温度区间

Partial post-weld heat treatment for offshore weld joints in process piping

YUAN Jiansong, LIU Chunfeng, GENG Jiancheng, XU Guangyao, LI Chenglong

Offshore Oil Engineering (Qingdao) Co., Ltd., Qingdao 266520, Shandong, China

Abstract: Briefly introduces the working conditions of common process piping that require heat treatment in the construction process of LNG plants, and introduces the heat treatment requirements for process piping, fittings, and piping with attachments. Meanwhile, based on the standards of heat treatment, the heat treatment temperature zones for different connection forms of process piping weld joints are given and used in international projects, providing construction experience for similar projects.

Keywords: process piping; heat treatment thickness; temperature zones

1 序言

液化天然气陆地处理工厂或海洋浮式平台油气处理模块使用模块化建造的理念已经较为普遍, 如中俄合作的YAMAL LNG项目就采用了模块化建造。相较于常规的海上油气平台, 不同的模块承担不同的功能, 如CO₂去除、压缩、脱硫等。图1所示为典型模块的工艺管道布置。由图1可看出, 此类项目中工艺管道的数量及种类众多。



图1 典型模块工艺管道布置示意

工艺管道中常用的材质主要为碳素钢、低合金碳素钢、300系列不锈钢、双相钢、超级双相钢、镍基合金、不锈钢, 或镍基合金类内衬层复合管、耐热钢、铜镍合金等类型^[1]。其中碳素钢、低合金碳素钢管道基本能占到整体的50%~60%。

目前, 欧美项目LNG模块化工厂建造管道设计标准大多选取美国系列标准设计, 工艺管道绝大部分采取ASME B31.3《Process piping ASME code for pressure piping》^[2]作为设计标准。本文主要以ASME B31.3标准为基础, 结合常出现的工艺管道及管件、附件类型等, 对热处理的要求、温度区间进行详细的阐述, 为同行业此类产品制造提供经验参考。

2 焊件的热处理

在ASME B31.3中, 根据不同材质类型、强度等划分为不同的产品材料分类号 (P-No.), 并根据不同的生产状态划分为不同的产品材料分组号 (G-No.)。如较为常见的ASTM A106B标准钢管被划分为P1G1, 与之等同的ASTM A105标准管件 (锻件) 被划分为P1G2。不同材料根据划分不同, 热处理的要求也不尽相同。施工中常见组别钢种的焊后热处理温度区间见表1。

表1 常见组别钢种焊后热处理温度区间 (°C)

产品材料分类、分组号 (P-No.和G-No.)	保温温度区间
No. 1, G-Nos.1-3 (主要为低碳钢、低合金碳素钢)	595~650
P-No.8, G-Nos.1-4 (300系列不锈钢)	一般不要求, 除非WPS有规定
P-No.10H, G-No.1 (双相钢、超级双相钢)	一般不要求, 除非WPS有规定
P-No.5A&5B (耐热钢)	650~760
P-No.11A (9Ni钢)	550~585
P-No.15E, G-No.1 (耐热钢)	705~775

其中, 对于不锈钢、双相钢、超级双相钢, 除了在管道、管件生产阶段需要进行热处理外, 在建造阶段接头一般不需要额外采取焊后消应力热处理工序。此类合金组织大多数以奥氏体为主, 产生热裂纹倾向大, 而产生冷裂纹的倾向很小, 因此焊后消应力热处理效果不显著。耐热钢在LNG陆地处理工厂或海洋油气处理平台中使用情况较少, 在陆地炼化工厂或化工厂项目中使用情况较多。

3 焊后热处理厚度要求

3.1 工艺管道对接接头

工艺管道大多为对接接头, 如对于碳素钢及低合金碳素钢 (P1G1/P1G2), 以往一般要求对接接头壁厚超过20mm以上时必须采取焊后消应力热处理。随着标准的不断更新, 目前ASME B31.3设计标准中已取消此强制规定, 具体要求依据焊接工艺评定的要求执行。目前, 大部分项目在施工中一般对于碳素钢及低合金碳素钢壁厚超过25mm的接头采取焊后热处理。

焊后消应力热处理可有效降低接头的应力水

平, 但施工中比较耗费资源, 因此设计标准中允许采取提高预热温度至95℃以上措施后可免除焊后热处理。但根据PRUETER等^[3]的评估, 仅提升预热温度对于降低焊缝残余应力效果较小, 因此在施工中需根据工况具体权衡。

目前, 国内外油气平台在建造过程中除了对于某些酸性介质等流体工艺管道强制采取焊后热处理外, 一般采取提高预热温度免除焊后热处理的方式, 以加快建造进度。而在某些中东项目工艺管道的设计建造中也会采取裂纹尖端张开位移 (Crack Tip Opening Distance, CTOD) 结合工程临界评估 (Engineer Critical Assessment, ECA) 方式, 以免除热处理。

3.2 管道支管类型接头

除了管道对接接头之外, 出现情况更多的是支管连接接头, 如图2所示。支管连接焊后热处理相对复杂, 是否热处理取决于贯穿厚度, 而贯穿厚度取决于支管、支管厚度及补强厚度等。

支管连接形式贯穿厚度计算公式见表2。对于碳素钢和低温碳素钢压力管道的支管连接, 如果主管厚度超过25mm并在任意垂直于支接焊缝的平面内, 且贯穿焊缝的厚度>25mm, 则建议进行焊后热处理。



图2 典型支管连接接头

3.3 焊后热处理温度区间分布

焊后热处理可以采用整体热处理, 焊接工件整体放置于热处理炉内。对于不具备施工条件的工厂, ASME B31.3也允许采用局部热处理方式。

如图3所示, 局部热处理区域分为保温区 (Soak Band, SB)、加热带 (Heated Band, HB)、均匀控温区 (Gradient Control Band, GCB), 其中保温区 (SB) 要求全部厚度的材料要加热到最低保温温度以上, 同时也不可以超过要求的最高温度; 加热

表2 支管连接贯穿厚度计算公式

支管连接类型	支管连接类型示意图	贯穿焊缝的厚度
支管骑座于主管上		$T_b + t_c$
支管插入主管		$T_h + t_c$
支管骑座于主管上，外带补强包板		$(T_b + t_c)$ 与 $(T_r + t_c)$ 中的较大值
支管插入主管，外带补强包板		$T_h + T_r + t_c$
支管骑座于主管上，外带补强鞍座板		$T_b + t_c$
自补强支管台（管座）		$T_m + t_c$

注： T_c 为焊喉，取 $0.7T_b$ 与 6mm 中的小者； T_b 为支管公称壁厚； T_h 为主管公称壁厚； T_r 为加强包板或鞍座的公称壁厚； T_m 为支管台焊缝厚度。

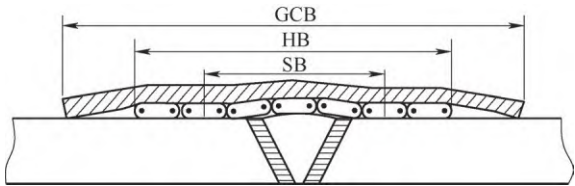


图3 热处理区域布置示意

带（HB）是指热源所覆盖的区域，热源使浸透带达到要求的温度并使焊缝周围达到要求的残余应力；均匀控温区（GCB）是指保温棉或补充热源所覆盖的区域。

保温区（SB）宽度一般为焊缝边缘两侧扩展 50.8mm 或管道厚度，二者取小者；加热带（HB）区域宽度一般为保温区宽度扩展 $4\sqrt{Rt}$ （ R 为热处理管道公称半径， t 为管道壁厚）；均匀控温区（GCB）宽度为加热带宽度扩展 $4\sqrt{Rt}$ 。

加热带宽度只要保证加热带边缘温度高于50%的保温区温度即可。一般用保温区边缘处和加热区边缘处的温度之比 k 表征轴向温度梯度，美国标准AWS D 10.10 /D10.10M：1999（R2009）《Recommended Practices for Local Heating of Welds in Piping and Tubing》中规定 $k\leq 2$ 时，才能满足局部焊后热处理要求。加热带宽度增加会使热处理区域内温度衰减更为均匀。

工艺管道的接头较为复杂，为更清晰的对施工给予指导，结合标准要求及工程施工常出现的管道连接形式，给出了常见连接形式下焊后热处理各加热温度区间的范围（见图4～图10），可作为施工指导使用。

对于管道焊接接头连接法兰的施工工况，在焊后热处理时不可避免要对法兰的局部或者整体包

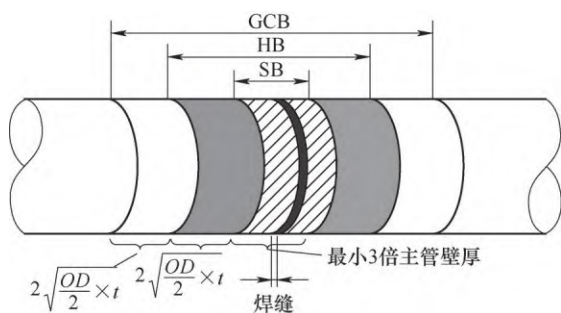


图4 对接管道焊接接头的焊后热处理区域

注: OD为主管外径, t 为主管壁厚, 下同。

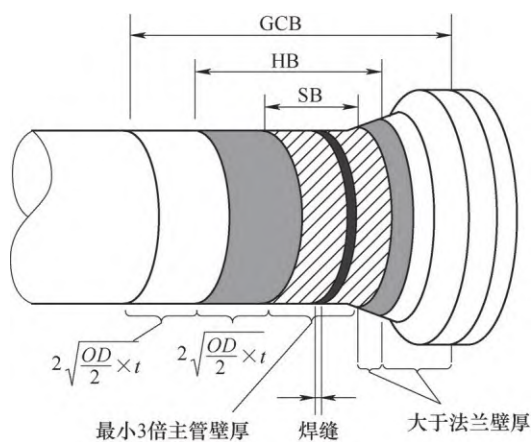


图5 对接管道焊接接头焊后热处理区域(带法兰)

覆。热处理过程会导致法兰表面原有的水密纹氧化损坏, 一般热处理后需要二次加工或修整。

管道连接接头采用支管连接的施工工况下, 焊后热处理的区域不仅要包覆支管区域, 同时也在主管规定的区域内也使用电热片或电磁感应线圈包覆。仅对支管区域进行包覆而不在主管区域进行包覆热处理, 即所采取的“受限区域焊后热处理”一般在

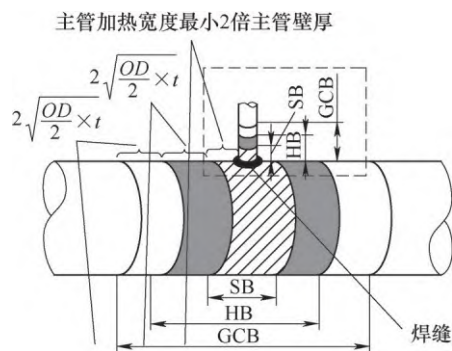


图6 对接管道焊接接头焊后热处理区域
(带支管对接焊、角接焊)

注: 支管侧的SB、HB、GCB通过支管的直径和壁厚计算得出, 详见图7。

施工中较少使用, 原因在于热处理区域受限, 无法有效达到热处理均质化内应力的效果, 反而会因加热区域不均匀而产生二次应力。

对于支管连接接头, 在支管间接焊接在主管之上的情况下, 若支管的接头与主管的距离在10倍主管壁厚之内, 则支管接头也需要进行包覆热处理; 否则, 支管可以不进行热处理。此类施工情况相对特殊, 原因在于按照施工工序, 支管类接头安装工序偏后, 施工人员无法准确识别出支管接头是否需要热处理, 容易用错焊接材料, 导致返工。因此, 对于此类接头, 需要在图样中提前识别。

当支管区域包含补强护板时, 支管区域热处理区域基本与纯支管连接无区别。主管热处理区域稍有不同, 除了需要覆盖护板全部区域外, 保温区宽度每侧需要增加至少1.5倍主管壁厚。对于主管管径相对较大(如外径900mm以上)的情况, 保温区的

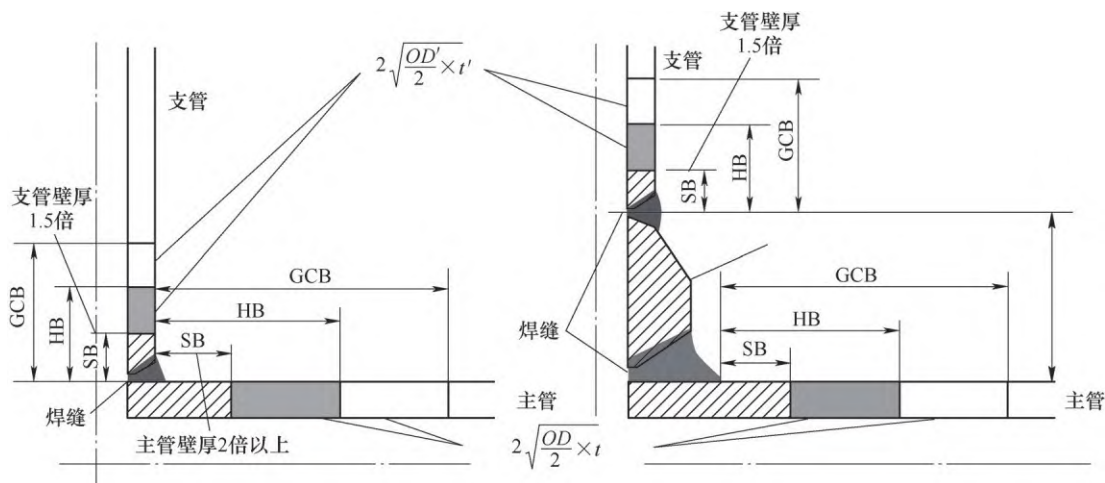


图7 支管连接焊后热处理区域细节

注: OD' 为支管外径, t' 为支管壁厚。

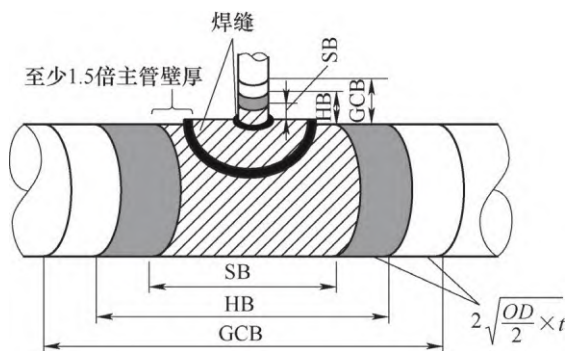


图8 对接管道焊接接头焊后热处理区域(带补强护板)

注:支管侧的SB、HB、GCB通过支管的直径和壁厚计算得出。详见图7。

范围相对较大,对于热处理设备的能力要求较高,需要多台设备同时施工。

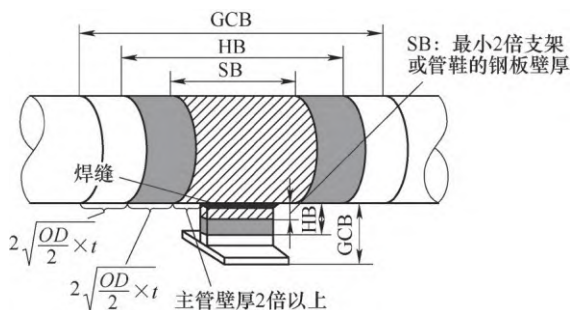


图9 对接管道焊接接头焊后热处理区域(带支架、管鞋)

当支管区域包含管鞋、支架等附件结构时,对于非承压部件的管鞋和支架热处理的加热带及均匀控制区域不做要求。此类结构在施工中也将面临质量控制问题,由于管鞋、支架单独预制,施工单位一般较少关注后续是否存在热处理要求,容易用错焊接材料,因此焊接工艺在设计时建议选用具备热处理性能的焊接材料预制此类支架、管鞋结构。

在管道对接接头区域仅包含包板的工况下,保温区域除了包含区域之外,在包板区域外边缘至少2倍主管壁厚范围内均需要包覆在保温区内。

施工过程中按照以上典型案例进行温区计算并布置热电偶及电加热片等。实际施工中,布置的温度区间宽度可大于计算的范围,更宽泛的温度区间范围可保证焊后消应力过程更为均匀。

实际的施工工况相对比较复杂,会出现以上多种形式连接的焊接接头,如图11所示的热处理接头(叠加了图4~图6的案例)、图12所示的热处理接头(叠加了图4~图6、图9的案例)。施工中局部热处理需要分别对每个接头逐项计算各温度区间分布,指导电加热片或感应加热线布置。对于预制的

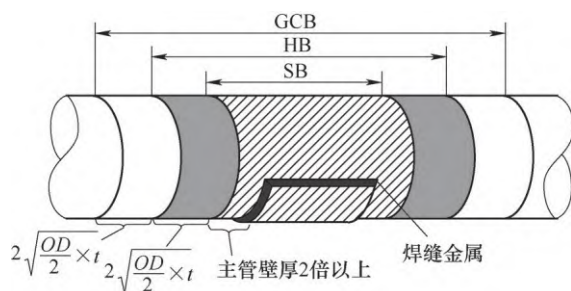


图10 对接管道焊接接头焊后热处理区域(带包板)

管道建议各个单管结构预制完成后统一热处理,避免多次热处理循环导致钢材强度下降,同时可有效降低施工成本。



图11 现场典型热处理接头



图12 现场复杂热处理接头

4 结束语

1) 工艺管道的焊后热处理,对接接头及支管接头可依据管道类型、接头壁厚及贯穿壁厚计算来决定是否采用焊后热处理。

2) 多接头的焊后热处理施工较为复杂,可按照本文中给出的多种管道连接接头的温度区间宽度单独核算后统一开展焊后热处理工作。在满足标准要求的同时,有效避免多次热循环带来的不利影响。

参考文献:

- [1] 唐健,许东,田冲,等. LNG低温管廊模块化建造工艺研究:“第十五届中国海洋(岸)工程学术讨论会”论文集(下)[C].北京:海洋出版社,2011.
- [2] ASME. Process piping ASME code for pressure piping: ASME B31.3[S]. USA: American Society Of Mechanical Engineers, 2016.
- [3] PRUETER P E, SMITH K J, MACEJKO B, et al. Commentary on recent changes in ASME B31.3 post weld heat treatment requirements and the effectiveness of weld preheat: Proceedings of “the ASME 2017 Pressure Vessels and Piping Conference” [C]. USA: American Society of Mechanical Engineers, 2017.

(收稿日期:20250108)