

高强度 CT110 连续管环焊对接工艺*

李博锋^{1,2}, 王雷雷¹, 张思琪¹, 张 涛¹

(1. 中国石油宝鸡石油钢管有限责任公司, 陕西 宝鸡 721008;

2. 中油国家石油天然气管材工程技术研究中心有限公司, 西安 710018)

摘 要: 为了满足连续管在超长水平井中的作业需求, 延长连续管使用寿命, 解决连续管下入深度不足的问题, 针对 CT110 钢级 $\Phi 50.8 \text{ mm} \times 4.0 \text{ mm}$ 连续管, 设计了合理的环焊对接工艺, 并进行了焊接接头的检测评价。结果表明, 该工艺下焊接接头的强度可达 835 MPa 以上, 疲劳寿命达到母材的 36%~50%, 并具有良好的塑性及抗内压等力学性能, 可满足现场施工需要。现场采用该焊接工艺, 将两盘长度为 4 500 m、规格为 $\Phi 50.8 \text{ mm} \times 4.0 \text{ mm}$ 的 CT110 连续管进行对接后在长庆油田某井中完成了水平井通洗井作业和首段射孔作业, 均取得了良好的效果。

关键词: 连续管; 环焊; 力学性能; 水平井

中图分类号: TG444.74; TE931.2 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19291/j.cnki.1001-3938.2023.07.012

Butt Welding Process of CT110 High Strength Coiled Tubing

LI Bofeng^{1,2}, WANG Leilei¹, ZHANG Siqi¹, ZHANG Tao¹

(1. CNPC Baoji Petroleum Steel Pipe Co., Ltd., Baoji 721008, Shaanxi, China; 2. Chinese National Engineering Research Center for Petroleum and Natural Gas Tubular Goods Co., Ltd., Xi'an 710018, China)

Abstract: In order to meet the needs of coiled tubing work in ultra long horizontal wells, extend the service life of coiled tubing and solve the problem of insufficient running depth of coiled tubing, a reasonable girth welding butt process is designed and welded joints of CT110 grade $\Phi 50.8 \text{ mm} \times 4.0 \text{ mm}$ coiled tubing are inspected and evaluated. The results show that under the process, the strength of the butt joint can reach more than 835 MPa, the fatigue life can reach 36%~50% of the base metal, and has good plasticity and internal pressure resistance, which meet the needs of on-site field operation. The welding process is adopted on site. After butt welding of two plates of $\Phi 50.8 \text{ mm} \times 4.0 \text{ mm}$ CT110 coiled tubing with length of 4 500 m, the horizontal well flushing and first perforation were completed in a well in Changqing oilfield and works well.

Key words: coiled tubing; girth welding; mechanical properties; horizontal well

0 前 言

连续管环焊对接技术在现场作业中发挥着重要作用, 采用该技术进行修复, 能够延长连续管使用寿命、降低作业成本。同时, 还可实现连续管管柱接长, 解决连续管下入深度不足的问题。此外, 采用连续管环焊对接技术, 还可以实现连续管与其他作业工具的连接, 以满足作业过程中

的特殊需求^[1-5]。目前, 该技术已经在海外油田作业现场取得普遍应用, 但由于连续管作业工况苛刻, 焊接接头需要承受较大拉伸载荷和塑性弯曲疲劳载荷, 对焊接接头的综合力学性能要求较高, 进而提高了连续管对接焊作业工艺的控制要求^[6-7]。对此, 国外开展了大量的研究工作并在现场应用中不断总结经验, 制定了严格的焊接作业技术规范, 以控制焊接接头质量。例如 API 5C8《连续油

*基金项目: 中国石油天然气集团有限公司科学研究与技术开发项目“致密气及页岩气井连续管带压完井与采气一体化技术现场试验”(项目编号 2022ZS26)。

管的保养、维护与检测》在第5章中,针对连续管对接焊作业规范进行了明确的规定,同时Quality Tubing、Tenaris、Global Tubing等连续管制造商也制定了明确的作业技术规程,并在现场建立了服务中心为客户提供对接焊作业及技术培训。随着我国连续管作业技术的发展,现场连续管环焊对接技术的需求日益增长,宝鸡石油钢管有限责任公司牵头开展了大量环焊焊接方法、材料、工艺等系统的试验研究,制定了工艺规范和标准,开发出了首套连续管对接焊作业装置,并成功将该技术推广到现场应用中,取得了较好的应用效果。

本研究以CT110钢级 $\Phi 50.8\text{ mm}\times 4.0\text{ mm}$ 连续管为例,设计了对接焊工艺,并对焊接接头性能进行了检测。采用该对接焊技术,在长庆油田某井成功将2盘CT110钢级 $\Phi 50.8\text{ mm}\times 4.0\text{ mm}$ 规格、单盘长度4 500 m的连续管进行了对接,并顺利完成了通洗井、射孔的作业过程,解决了连续管单盘长度无法满足超长水平井作业下入深度要求的问题,为连续管对接焊技术在油田现场的推广应用积累了经验。

1 连续管作业工况

长庆油田靖某井为超长水平井,完钻井深6 835 m,垂直井深3 024 m,水平段长度3 500 m,造斜点位于980 m处,最大井斜 89.8° 。本次采用连续管作业类型为通洗井和首段射孔,要求连续管作业时最大下入深度达6 600 m以上,射孔压力

65 MPa,最大井口压力65 MPa,预计承受最大拉伸载荷180 kN,压缩载荷80 kN。由于运输条件限制,单盘连续管长度为4 500 m,无法实现6 600 m的作业深度要求,对此设计采用在现场将两盘规格为 $\Phi 50.8\text{ mm}\times 4.0\text{ mm}$ 的CT110连续管进行对接焊后下井,以满足现场作业对下入深度的要求。作业时连续管对接焊接头需要下入斜井段,在作业过程中还需要承受 $1\,300\text{ N}\cdot\text{m}$ 的扭转载荷,同时还需要承受较高的内循环压力以及轴向载荷。此外,更为苛刻的是在下井过程中,焊接接头在注入头处发生反复的塑性弯曲变形,需承受塑性弯曲疲劳载荷。因此,为了确保现场作业安全,要求焊接接头在具有较高强度和塑性的同时,还需要具有良好的抗疲劳、抗扭转和抗内压性能。

2 焊接工艺

目前,连续管对接焊常用的焊接方法有焊条电弧焊和钨极氩弧焊。连续管管径小、壁厚薄,对焊缝成形质量要求高。焊条电弧焊焊接时易产生飞溅,且相较于钨极氩弧焊,其焊缝根部成形质量和线能量不易控制,因此现场很少采用。钨极氩弧焊具有焊接线能量易控制、单面焊双面成形效果好等特点,特别适合对焊缝形貌控制要求高的小管径对接焊,因此现场应用较多。焊接作业流程如图1所示,对于连续管对接焊作业,其关键在于严格控制焊前组对质量以及进行合理的焊接工艺参数设置,以保证焊接接头良好的力学性能。

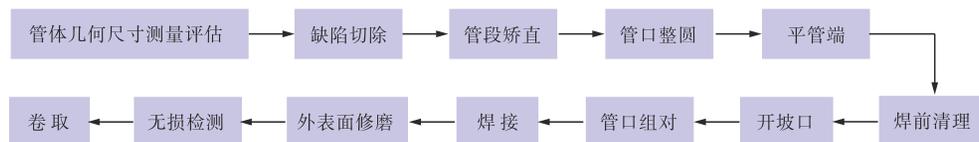


图1 连续管现场环焊对接作业流程

2.1 焊前组对质量控制

现场焊接前,连续管在卷筒上经过多次缠绕,其直度和椭圆度发生了较大变化,对焊前组对质量产生影响。因此,需要对待焊两端管体直度及外径进行检测,必要时进行管体矫直和管口整圆。采用直尺紧贴管体外表面,要求直尺与管体之间不得有间隙,同时当两端管口外径差 $>0.25\text{ mm}$ 时需进行整圆,以满足组对作业的要求。此外,氩

弧焊工艺对铁锈、油污等较为敏感,容易产生气孔等缺陷,因此在焊接前还需要对坡口两侧20 mm范围内进行清理,使其露出金属光泽。

2.2 焊接工艺参数控制

为确保焊缝区力学性能与母材的合理匹配,采用自主研发的专用高强度低合金钢焊丝进行焊接。相关研究表明,在焊接热循环作用下,连续管热影响区发生回复与再结晶过程,热影响区软

化是引起接头疲劳寿命降低的主要原因^[8-9]。对此,焊接时需要采用小线能量、多层多道焊工艺,并严格控制焊接线能量,通过减少焊接热输入,适当提高热影响区冷却速度,使得该区域在焊接热循环作用下产生的回复与再结晶程度减小,并使位错密度降低程度减小,从而达到降低热影响区软化的目的。对于本研究CT110钢级 $\Phi 50.8\text{ mm}\times 4.0\text{ mm}$ 连续管焊接,将线能量控制在 $8\sim 12\text{ kJ/cm}$ 。

受连续管长度、缠绕状态等因素限制,连续管对接焊只能采用管体固定的全位置焊接方式,因此增加了焊缝形貌的控制难度。为了获得良好的焊缝形貌,减少焊接缺陷,结合现场实际将焊接位置划分为平焊、上坡焊和仰焊三个区段,并针对焊接熔池在不同区段的受力特点,针对性地进行工艺参数的设置。在平焊位置施焊时,由于熔池受重力影响下坠,容易导致焊缝根部余高过高,因此在保证焊透的情况下采用较低的焊接电流,同时适当提升弧压,确保焊缝宽度合理;在上坡焊位置施焊时,熔池受重力影响向后流淌,此时采用小的焊接电流,并适当降低弧压以防止形成未熔合、气孔等缺陷;在仰焊位置施焊时,熔池受重力作用下坠,容易产生内凹缺陷,因此应降低电弧电压以提高电弧吹力,防止熔池下坠,同时还应适当减小送丝量。针对 $\Phi 50.8\text{ mm}\times 4.0\text{ mm}$ 规格CT110连续管,焊接时电流为 $90\sim 110\text{ A}$,电压为 $9\sim 11\text{ V}$ 。焊接采用 40° 单面V形坡口,钝边 1 mm ,组对间隙 2 mm ,焊后对外表面焊缝余高进行修磨,使其与母材平齐。

3 焊接接头力学性能试验及结果

为了充分评估焊接接头性能,确保作业安全性,现场焊接作业前进行了焊接工艺评定,并按照API 5C8《连续油管的保养、维护与检测》要求对焊接接头力学性能进行了检测评价。

3.1 强度及塑性

依据ASTM A370标准在Z1200KN电子万能材料试验机上进行焊接接头整管拉伸试验,试验结果见表1。从表1可以看出,焊接接头抗拉强度均高于标准规定的 793 MPa ,且拉伸断口位于母材。沿管体轴向垂直于环焊缝将焊接接头剖开制取焊缝横向弯曲试样,在WE-30B万能试验机上进行

弯曲试验,弯轴半径 8 mm ,弯曲角度 180° ,弯曲后试样如图2所示。焊缝及熔合线均未出现裂纹和开裂,说明焊接接头具有良好的强度和塑性。

表1 焊接接头拉伸试验结果

外径/mm	壁厚/mm	抗拉强度/MPa	断口位置
50.8	4.0	835	母材
50.8	4.0	845	母材
50.8	4.0	835	母材
标准要求		$\geq 793\text{ MPa}$	



图2 焊接接头弯曲试样

3.2 硬度

沿焊接接头横向制取金相试样,经磨制抛光后用 $4\%\text{ HNO}_3$ 酒精溶液腐蚀,采用Durascan 70硬度计进行显微硬度测试,测试位置如图3所示,测试结果见表2。从表2可以看出,焊接接头硬度符合API 5C8标准规定的不高于 30 HRC (301 HV_{10})的要求。

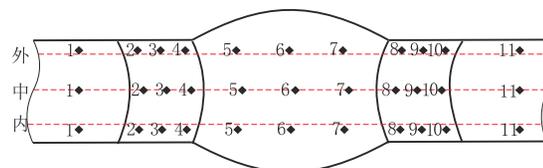


图3 焊接接头硬度试验位置示意图

表2 焊接接头硬度测试结果

测试位置	HV_{10}										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
外	265	279	273	297	289	278	285	252	262	261	265
中	255	262	264	265	275	282	268	238	258	275	268
内	257	262	250	275	266	258	260	236	262	270	275

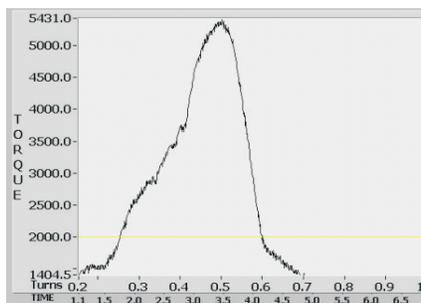
3.3 抗疲劳试验

采用疲劳试验机模拟现场作业时连续管起出和下井的过程,以及焊接接头在卷筒和导向拱之间产生的弯曲疲劳过程。试验时,将试样安装于疲劳试验机弯曲模与矫直模之间,采用油缸推动

试样进行反复的弯曲—矫直，直至试样开裂失效。试验条件：弯模半径为1 828.8 mm，内压分别为11.7 MPa、34.47 MPa和67 MPa，压力介质为水。试验结果见表3，从表3可知，随着试验压力的增加，焊接接头疲劳循环寿命降低显著，这是由于内压越高，疲劳循环过程中管体承受的环向应力越大，从而造成更大的疲劳损伤，降低了疲劳寿命。因此，应尽可能避免在高内压状态下进行起、下作业，以防止焊接接头过度疲劳损伤影响作业安全。此外，焊接接头是连续管管体上的结构异常点，必然会造成连续管疲劳寿命下降。国外研究表明，连续管手工对接焊接接头的疲劳寿命约为管体母材的25%^[10]，本次试验焊接接头疲劳寿命为母材的36%~50%，与国外水平相当。

表3 焊接接头疲劳试验结果

弯模半径/mm	试验内压/MPa	焊接接头疲劳寿命/次	母材平均疲劳寿命/次	焊接接头与母材疲劳寿命比值/%
1 828.8	11.7	135	359	38
		130		36
	34.47	68	140	49
		70		50
	67	33	91	36
		35		38



(a) 扭矩加载曲线

3.4 抗内压试验

采用HY-MLK-7K-W型静水压爆破试验系统对焊接接头进行抗内压爆破试验。试样有效长度为2.5 m，压力介质为水，试验时焊接接头位于试样中心，试验结果如图4所示，爆破压力为126.3 MPa，焊接接头表现出良好的抗内压性能。

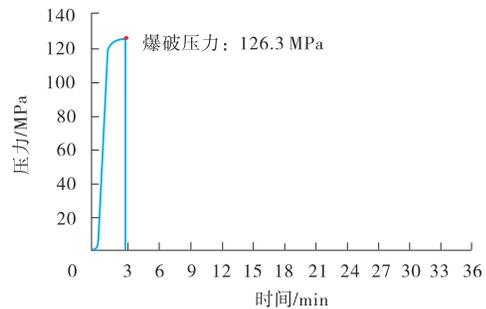


图4 焊接接头水压爆破试验结果

3.5 抗扭转试验

参照GB/T 10128—2007《金属材料室温扭转试验方法》，采用MK1500-07型上卸扣扭矩试验机对焊接接头进行抗扭转试验，试验结果如图5所示。由图5(a)可知，加载扭矩至5 405 N·m后，焊接接头完好，未发生扭转屈服变形，达到了标准规定的5 370.4 N·m扭转屈服强度的规定^[11]，同时满足在下井作业过程中承受1 300 N·m扭转载荷的工况要求。



(b) 试验后焊接接头

图5 焊接接头扭转试验结果

4 现场焊接作业及下井应用

现场采用专用撬装式连续管焊接装置进行作业，为充分测试连续管对接焊接头的可靠性，共进行两次焊接。第一次所焊接头用于下入过程中的安全性测试，第二次所焊接头用于下井作业。第一次焊接完成后，将焊接接头在不带

内压的情况下，在作业卷筒上进行30次的反复弯曲缠绕测试后，从连续管管柱上切断，采用Φ38.1 mm钢制通径球进行通径试验，整个通径试验过程顺畅无卡阻现象，表明焊缝根部余高控制较好。随后对该焊接接头进行外观和射线检测，焊接接头外观检查无明显变形和开裂，射线检测未发现裂纹、未焊透、夹渣、气孔等

缺陷,同时焊缝根部形貌控制良好,无内凹、焊瘤及咬边等。在实验室采用连续管疲劳试验机对该焊接接头进行疲劳性能测试,试验内压34.47 MPa,弯模半径1 828.8 mm,经过46次疲劳循环后在焊缝处发生开裂失效,说明该焊接接头剩余疲劳寿命为管体母材在同条件下疲劳寿命平均值(140次)的32%。

第二次对接焊接头经无损检测合格后,在长庆油田某井完成通洗井和首段射孔作业。作业时最大下入深度约6 600 m,最大内循环压力68 MPa,起下过程中焊接接头承受最大拉伸载荷185 kN,最大压缩载荷85 kN,整个作业过程顺利,焊接接头性能满足施工要求。作业完成后将焊接接头从连续管盘卷上切割下来,依据ASTM A370标准在Z1200KN电子万能材料试验机上进行抗拉强度测试,拉伸载荷为523 kN,抗拉强度为859 MPa,满足API 5C8标准中抗拉强度不小于793 MPa的规定。

5 结 论

(1) 针对CT110钢级 $\Phi 50.8 \text{ mm} \times 4.0 \text{ mm}$ 连续管,采用手工钨极氩弧焊方法,通过小线能量及多层多道焊的工艺,结合全位置焊接熔池的受力特点,有针对性地分区段设置焊接参数,从而降低了热影响区软化程度,改善了焊缝成形形貌,确保了焊接接头良好的力学性能。

(2) 本研究工艺下所焊接头的强度可达835 MPa以上,疲劳寿命达到母材的36%~50%,同时具有良好的抗内压、抗扭转等力学性能,可满足现场施工需要。

(3) 油田现场采用该焊接工艺将两盘长度4 500 m、规格 $\Phi 50.8 \text{ mm} \times 4.0 \text{ mm}$ 的CT110连续管进行对接焊,实现了目前国内最长(9 000 m)连续管的焊接,并完成了水平井通洗井和首段射孔作业,满足了连续管下入6 600 m作业的深度需求,取得了良好的应用效果。对作业后焊接接头进行拉伸测试,其抗拉强度满足相关标准要求,焊接接头质量完全满足现场作业安全需要。

(4) 随着连续管作业技术在深井、超长水平井的应用,对大规格高强度连续管的需求日益增多。由于受道路运输条件的限制,单盘连续管长度很难满足现场对作业深度的需要,进而成为制约连续管技术发展的瓶颈。因此,采用对接焊技术进行连续管管柱接长将成为解决该问题的关键,该技术在深井、超长水平井连续管作业中具有广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] 李霄,贺大川,张广利,等.强制冷却对连续油管对接接头热影响区软化的影响[J].热加工工艺,2020,49(7):20-23.
- [2] ARNAM W D, SMITH D. Good coiled tubing welds properly managed do not break [C]//Spe/icotatubing roundtable. Texas, USA: Society of Petroleum Engineers, 2000: 5-6.
- [3] 李博锋,刘云,汪强,等. CT90连续油管对接焊接头的组织和性能分析[J]. 钢管, 2018, 47(3): 16-19.
- [4] 周兆明,谭金松,张健,等.连续油管疲劳寿命模型与试验机的发展概述[J].石油矿场机械,2020,49(6):6-11.
- [5] 朱健.连续油管焊接接头疲劳寿命研究[D].西安:西安石油大学,2018.
- [6] NEWMAN K R, BROWN P A, ARNAM W D. Analysis of coiled tubing welding techniques [C]//Spe/icotatubing roundtable. Texas, USA: Society of Petroleum Engineers, 1996: 26-28.
- [7] 鲁明春,刘彦平,高海军,等.连续管现场对接焊技术及应用[J].焊管,2021,44(7):32-34.
- [8] 黄鹏儒,王雷,冯雪楠,等.焊接热循环对连续油管焊接HAZ组织的影响[J].焊管,2019,42(2):19-24.
- [9] 冯雪楠,周勇,刘云,等.连续油管环焊接头的疲劳性能[J].金属热处理,2019,44(10):6-9.
- [10] LUFT H B. Development of welding procedure specification for girth welds in coiled tubing [C]//Spe/icotatubing roundtable. Texas, USA: Society of Petroleum Engineers, 1999: 25-26.
- [11] 石油管材专业标准化委员会.油气井用连续管推荐作法:SY/T 6698—2007[S].北京:石油工业出版社,2008.

作者简介:李博锋(1981—),男,陕西宝鸡人,高级工程师,主要从事油气管材的焊接及检测工作。

收稿日期:2022-08-01

修改返回日期:2023-02-11

编辑:黄蔚莉