

N80 钢级直缝高频焊石油套管的研制

李远征^{1,2}, 毕宗岳^{1,2}, 陈浩明^{1,2}, 陈佳遥¹, 唐家睿^{1,2},
高盟召^{1,2}, 张 骥¹, 侯永利^{1,2}

(1. 宝鸡石油钢管有限责任公司, 陕西 宝鸡 721008;
2. 国家石油天然气管材工程技术研究中心, 陕西 宝鸡 721008)

摘 要: 为了进一步提升高频电阻焊套管的韧性, 实现母材与焊缝“等韧性”匹配, 采用高频焊+全管体调质热处理工艺试制 N80 钢级 $\Phi 244.48$ mm \times 11.05 mm 套管, 并对试制产品进行性能检测评价。结果表明, 管体的几何尺寸、理化性能和全尺寸实物性能均满足相关标准要求, 且经全管体调质处理后, HFW 套管的焊缝、热影响区和母材组织性能差异较小, 基本实现了焊缝与母材“等韧性”匹配, 同时套管尺寸精度较高, 性能均匀, 具有良好的抗挤毁性能, 为油田客户降本增效提供了产品保障。

关键词: 石油套管; N80 钢; 高频焊工艺; 全管体调质处理

中图分类号: TE973, TG44 **文献标识码:** B **DOI:** 10.19291/j.cnki.1001-3938.2022.08.006

Development of N80 Steel Grade High Frequency Welding Oil Casing

LI Yuanzheng^{1,2}, BI Zongyue^{1,2}, CHEN Haoming^{1,2}, CHEN Jiayao¹,
TANG Jiarui^{1,2}, GAO Mengzhao^{1,2}, ZHANG Ji¹, HOU Yongli^{1,2}

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

Abstract: In order to further improve the toughness of high frequency electric-welded oil casing and realize the matching of base material and weld equal toughness, the N80 steel grade $\Phi 244.48$ mm \times 11.05 mm oil casing was successfully trial-produced with the manufacturing process of high-frequency welding and full-length quenching-tempering treatment. The result shows that the geometric dimensions, physical and chemical properties and full-scale test are all meet the requirements of the standards. After the whole pipe quenching and tempering treatment, the difference between the weld, heat affected zone and base metal structure and performance of HFW casing is small, which basically realizes the equal toughness matching between the weld and base metal. At the same time, the casing has high dimensional accuracy, uniform performance and good collapse resistance, providing product guarantee for oilfield customers to reduce costs and increase efficiency.

Key words: oil casing; N80 steel; HFW process; full-length quenching-tempering

0 前 言

石油套管是固定油气井井壁用钢管, 用于各油田的钻采作业。由于其所处的工作环境和条件恶劣, 要求套管不但要承受套管柱产生的拉力,

还要承受地层蠕动等而产生的挫断力、射孔带来的开裂力等^[1]。通常, 石油与天然气开采用的套管需满足 API 标准的相关要求, API SPEC 5CT^[2] 标准规定, J55、N80、P110 等钢级套管有无缝管和电焊管两种类型, 与无缝管相比, 电焊

管具有生产效率高、尺寸精度高、规格范围宽、母材缺陷少等优势而被广泛推广应用^[3-8]，因此，国际上普遍采用高质量的焊管（API SPEC 5CT）取代无缝钢管^[9]。20世纪80年代初，美国、加拿大等国就已将高频直缝电阻焊（HFW）套管应用在3 000 m深井中^[10]。在国内，由于各生产厂家对HFW钢管技术的掌握程度不同、思想认识不同以及产品定位不同等种种原因^[11]，HFW套管发展缓慢，目前主要以J55钢级为主，并用作表层套管，对于市场应用广泛、更高级别的N80钢级表层套管和油层套管用量很少。为了进一步发挥HFW套管技术与效益优势，为油田用户降本增效，采用高频焊+全管体热处理工艺，开发了性能优良的N80钢级HFW套管。

本研究针对试制的N80钢级HFW套管开展了理化性能检测和全尺寸实物性能试验研究。

1 试验材料

API SPEC 5CT标准对 $\Phi 244.48 \text{ mm} \times 11.05 \text{ mm}$ N80钢级套管性能要求如下：屈服强度为552~758 MPa，抗拉强度>689 MPa，延伸率 $\geq 18\%$ ，管体横向冲击功 $\geq 14 \text{ J}$ 。因此，在化学成分设计时，一方面要考虑套管管坯的成型焊接质量，另一方面也要考虑钢管的淬透性，确保管材热处理后性能满足标准要求。C和Mn是钢中最基本的强化元素，可显著提高钢的淬透性，但是当两者的含量均较高时，会产生严重的偏析带，造成焊缝韧性下降。在钢中添加少量的Nb、V和Ti，除了细化晶粒以外，也能提高钢的高温回火性能和强度。S、P是有害元素，会降低管坯的塑性和韧性，故应尽可能降低其含量。试验套管的化学成分见表1。

表1 试验套管的化学成分 %

w(C)	w(Si)	w(Mn)	w(P)	w(S)	w(Nb+V+Ti)
0.22~0.27	0.10~0.25	1.00~1.30	≤ 0.015	≤ 0.010	≤ 0.10

2 HFW套管试制工艺

(1) 卷板规格为 $1\,530 \text{ mm} \times 11.05 \text{ mm}$ 。板坯最终轧制温度设定为 $860 \text{ }^\circ\text{C}$ ，卷取温度设定为 $600 \text{ }^\circ\text{C}$ 。卷板制备工艺流程为：铁水预处理→转炉冶炼→LF炉精炼→连铸→加热→粗轧→精轧→层流冷却→卷取→检验→包装出厂。

(2) 管坯规格为 $\Phi 244.48 \text{ mm} \times 11.05 \text{ mm}$ 。焊接功率设定为400 kW，焊速设定为15 m/min。焊管坯制备工艺流程：卷板拆卷→纵剪→钢板边缘加工→管成型→焊接→内外毛刺清除→焊缝无损探伤→定径→飞剪→静水压试验→称重、测长、打标记。

(3) 采用步进连续式加热炉将管坯加热到 A_3 以上并保温一定时间，经高压水除鳞、辊道运输，再由旋转机构运送至淬火装置，并采用外淋+内喷冷却方式进行快速冷却；在回火炉中进行全管高温回火和热旋转矫直处理，热矫直温度 $\geq 400 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

(4) 采用进口数控专用螺纹机床加工API SPEC 5B^[12]标准的偏梯螺纹。

3 试验结果

3.1 几何尺寸

采用外径千分尺、壁厚测厚仪及普通长度量具等对N80钢级直缝高频电阻焊套管的几何尺寸进行测量，检测位置如图1所示，检验数据见表2。

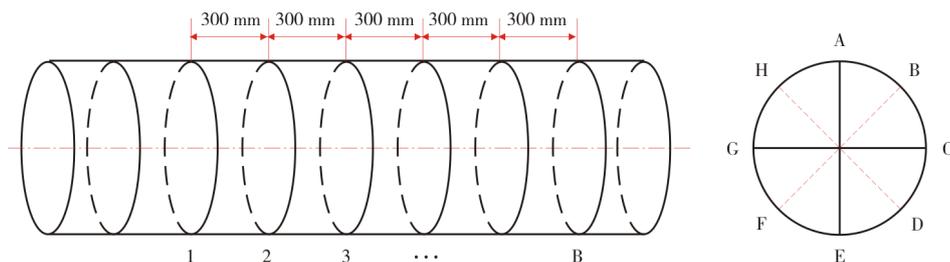


图1 管体几何尺寸检测位置示意图

表2 管体几何尺寸检测结果

检测位置	A-E		B-F		C-G		D-H	
	壁厚/mm	外径/mm	壁厚/mm	外径/mm	壁厚/mm	外径/mm	壁厚/mm	外径/mm
截面1	11.04、11.04	245.99	11.13、11.15	245.57	11.08、11.13	244.86	11.05、11.07	245.60
截面2	11.01、11.05	245.72	11.11、11.13	246.08	11.06、11.09	244.54	11.03、11.06	245.73
截面3	11.08、11.04	245.58	11.16、11.12	246.03	11.07、11.12	244.89	11.10、11.09	245.94
截面4	11.06、11.06	245.31	11.12、11.12	245.86	11.09、11.17	244.51	11.11、11.07	245.20
API SPEC 5CT 要求	壁厚 ≥ 9.67 mm, 外径 243.26 ~246.92 mm							

从表2可知, 试制套管壁厚偏差和外径偏差分别为 -0.1% ~ 1.1% 和 0.18% ~ 0.82% , 优于无缝套管且完全满足 API SPEC 5CT 要求 (壁厚 $\geq -12.5\%$ t , 外径为 -0.5% OD ~ $+1.0\%$ OD), 高几何尺寸精度和均匀壁厚可有效提升管体的抗外压挤毁性能。

3.2 拉伸与冲击性能

在试制套管上取样并加工拉伸试样, 试样尺寸为 $50.8\text{ mm}\times 31.8\text{ mm}$ 。按照 ASTM A370^[3] 标准要求

求进行拉伸试验; 同时根据 ASTM E23^[4] 标准要求在 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下进行冲击试验, 冲击试样尺寸为 $7.5\text{ mm}\times 10\text{ mm}\times 55\text{ mm}$, 试验结果见表3。由表3可知, 经过全管热处理后的 HFW 套管的母材横向和焊缝中心的冲击功值大幅超出标准要求且接近一致, 基本实现了母材和焊缝的“等韧性”匹配, 同时所试制套管的屈服强度、抗拉强度和延伸率也达到了 API SPEC 5CT 标准要求的中上线水平。

表3 套管拉伸与冲击试验结果

项目	$R_{0.5}$ /MPa	R_m /MPa	A /%	0 $^{\circ}\text{C}$, 3/4 尺寸横向冲击功/J	
				母材	焊缝
实测值	685、670、680	770、760、770	28.0、29.0、28.0	122、121、135	122、117、107
API SPEC 5CT 要求	552~758	>689	≥ 18	≥ 11.2	

3.3 压扁试验

压扁试样管环长度为 100 mm , 分别在焊缝 0° 和 90° 位置进行试验, 结果见表4, 压扁后试样宏观形貌如图2所示。可以看出, 在焊缝 0°

和 90° 位置将试样压至平行间距 157.7 mm 时, 焊缝及其他位置均无裂纹; 压至管壁贴合时, 母材没有出现分层现象, 焊缝无裂纹, 这表明材料焊接性良好, 焊缝性能优良。

表4 套管压扁试验结果

项目	焊缝位置	平板间距/mm	试验结果
实测值	0°	157.7 (0.645D)	未出现裂纹
		0 (贴合)	未出现裂纹
	90°	157.7 (0.645D)	未出现裂纹
		0 (贴合)	未出现裂纹
API SPEC 5CT 要求	在平行板间距小于 $D\times(1.074-0.0194D/t)$ 规定值之前, 试样任何部位不应该产生裂纹, 在整个压扁过程中, 不应出现不良结构特征、焊缝未熔合、分层、金属过热或挤出金属现象。		

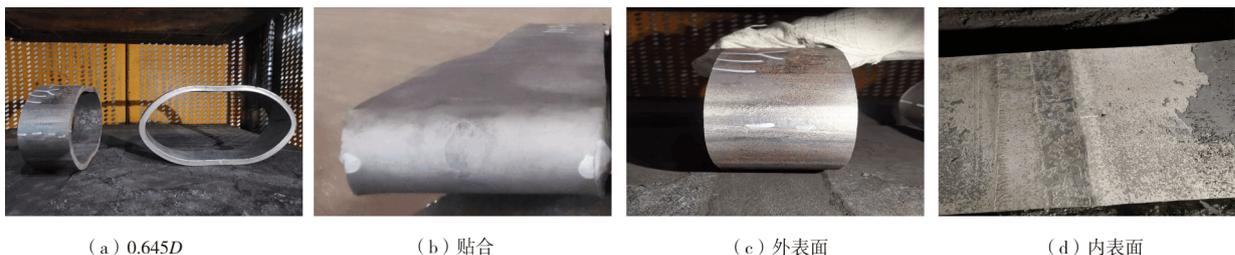


图2 压扁试验后试样宏观形貌

3.4 显微组织分析

分别在热处理前后的试验管上制取金相试样，经研磨、抛光后用4%的硝酸酒精侵蚀，使用Olympus-PMG3型显微镜观察试样的显微组织形貌，结果如图3所示。由图3(a)可以看出，热处理前焊缝区域金属流线特征明显，这是由于在焊接过程中，母材中的偏析带和轧制线在高温作用下并未完全熔化或溶解，在管壁两侧压力作用下形成的一种结晶组织；图3(b)表明，热处理前母材组织为铁素体+珠光体且存在一定的

偏析现象，带状组织为2.5级，晶粒度为10级，与热处理前母材组织相比，焊缝中心珠光体含量降低，铁素体含量增多，这与碳元素烧损或富碳液相(含C、Mn等)被挤出有关；图3(c)和图3(d)表明，全管经热处理后，焊缝、热影响区和母材的组织相似，组织中的铁素体基体中弥散分布着大量细小的碳化物颗粒，组织类型为回火索氏体+少量铁素体，回火索氏体是马氏体高温回火的产物，具有细密的结构和优良的综合力学性能。

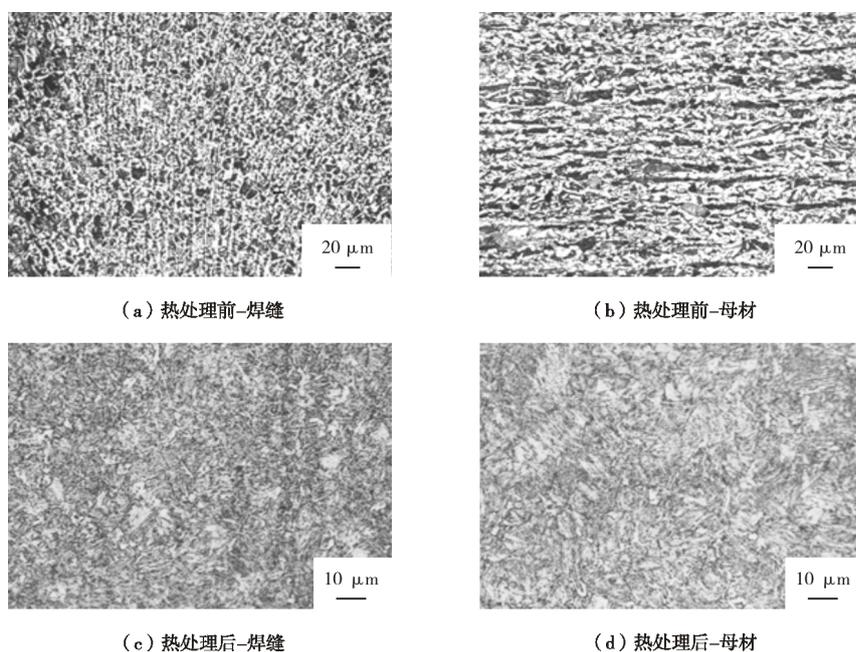


图3 全管热处理前后 N80 套管的金相组织形貌

3.5 抗挤毁性能

$\Phi 244.48 \text{ mm} \times 11.05 \text{ mm}$ N80 钢级直缝高频焊套管挤毁试验后形貌如图4所示，实际抗挤毁



图4 管体挤毁试样形貌

强度最大值 43.5 MPa，最小值 40.1 MPa，平均值 41.8 MPa，远远超出 API TR 5C3^[15] 的标准要求，充分表明 HFW 焊接套管具有优异的抗挤毁性能。

3.6 接头实物性能

试制的 $\Phi 244.48 \text{ mm} \times 11.05 \text{ mm}$ N80 BC 螺纹直缝高频焊套管在室温下进行极限载荷试验，试验结果见表5。由表5可以看出，试制的直缝高频焊套管抗滑脱性能、抗内压至失效强度均超出标准要求13%以上，确保了工程所需的性能要求。

表5 极限载荷试验结果

试样编号	试验内容	极限载荷	失效位置和失效形式	API TR 5C3 要求
1 [#]	拉伸至失效	拉伸: 5 400 kN	保载 5 min, 试样未失效	$\geq 4 779 \text{ kN}$
2 [#]	内压至失效	内压: 75 MPa	保载 10 min, 试样未失效	$\geq 43.6 \text{ MPa}$

4 结 论

(1) 采用高频焊+全管体调质热处理工艺制造的 N80 钢级套管的几何尺寸、理化性能和全尺寸实物性能均满足相关标准要求。

(2) 经全管调质处理后, HFW 套管的焊缝、热影响区和母材组织性能差异较小, 组织为回火索氏体+少量铁素体, 基本实现了焊缝与母材“等韧性”匹配。

(3) HFW 焊接套管尺寸精度高, 性能均匀, 且具有良好的抗挤毁性能。

参考文献:

- [1] 张作贵,董晓明,田青超,等. N80 ERW 套管调质前后焊缝组织演变的 EBSD 研究[J].电子显微学报,2010,29(1):98-103.
- [2] 美国石油协会. 套管和油管规范(第 10 版):API SPEC 5CT [S]. 华盛顿:美国石油协会出版业务部,2018.
- [3] 张始伟. ERW 石油套管的应用及市场分析[J]. 焊管,2008,31(1):12-19.
- [4] 侯庆平. 直缝 ERW 石油套管 N80 的研制[J]. 金属世界,2009(1):7-9.
- [5] 介升旗,刘永平. 国内 ERW 焊管发展现状及其质量控制[J]. 焊管,2006,29(6):74-79.

(上接第 34 页)

熔合、焊剂的敷洒等相关难题,掌握了埋弧自动横焊的操作要点,保证了焊接接头的无损检测结果满足标准要求。

(2) 按照规范要求完成埋弧横焊的焊接工艺试验,实现了埋弧自动横焊在海上风电导管架项目上的应用,大大提高了产品的焊接作业效率,降低了人工成本。对于大型立式筒体环缝的焊接,提供了一种可以借鉴的高效焊接方法。

参考文献:

- [1] 兰志刚,唐良喜. 大型石油储罐用横向埋弧焊焊剂的研制[J]. 焊接设备与材料,2012,41(3):35-38.
- [2] 季伟明. SPV490Q 钢与 16MnR 钢横缝埋弧自动焊工艺评定[J]. 石油工程建设,2000(1):35-37.
- [3] 沙玉章,王刚,李景波,等. 正倒装两用横缝埋弧自动焊操作机的研制[J]. 焊接设备与材料,2011(12):31-34.
- [4] 周振丰. 焊接冶金学与金属焊接性(修订本)[M]. 北京:机械工业出版社,1988.

- [6] 郝庆乐. 中小口径高频焊管无缝化技术与装备开发研究[D]. 北京:北京科技大学,2018.
- [7] 张晓磊,刘妍,袁晓鸣,等. N80 级 ERW 石油套管用钢的组织转变及性能[J]. 包钢科技,2021,47(4):50-53.
- [8] 聂向晖,王滢,刘小峰,等. HFW 焊缝结构参数对其冲击性能的影响[J]. 热加工工艺,2012,41(15):8-11,15.
- [9] 肖绍嵩. 石油套管及钻杆生产现状及发展趋势[J]. 石油矿场机械,2002,31(6):19-22.
- [10] 刘法涛,张始伟. 由新日铁 ERW 套管看我国高钢级 ERW 套管的发展[J]. 焊管,2006,29(2):5-9.
- [11] 李记科,齐玉钗,高建忠. 国内 ERW 钢管生产情况[J]. 焊管,2006,29(6):63-67.
- [12] 美国石油协会. 套管、油管和管线管螺纹加工、测量和检验:第 16 版:API SPEC 5B[S]. 华盛顿:美国石油协会出版业务部,2017.
- [13] 美国材料与试验技术委员会. 钢产品机械性能试验的标准试验方法和定义:ASTM A370[S]. 西康舍霍肯:美国材料与试验学会,2017.
- [14] 美国材料与试验技术委员会. 金属材料缺口冲击试验的标准试验方法:ASTM E23[S]. 西康舍霍肯:美国材料与试验学会,2018.
- [15] 美国石油协会. 套管或油管的性能计算(第 17 版):API Technical Report 5C3[S]. 华盛顿:美国石油协会出版业务部,2018.

作者简介:李远征(1986—),男,硕士,高级工程师,现主要从事油井管工艺技术和新产品开发工作。

收稿日期:2022-03-04

编辑:董超

- [5] 周桂芬. 埋弧自动焊工艺参数对焊缝成形质量的影响[J]. 焊接,2006,35(11):32-35.
- [6] 宋金虎. 焊接方法与设备[M]. 大连:大连理工大学出版社,2010.
- [7] 陈琨. 风电塔筒生产中埋弧自动焊的应用研究[J]. 中国设备工程,2021(12):238-240.
- [8] 冯涛,熊浩,刁凤军,等. Y 形坡口埋弧自动焊反面定位法应用[J]. 船海工程,2021,50(2):33-36.
- [9] 张远望. 埋弧自动焊技术在高强度超大型钢管环缝上的应用研究[J]. 水电与新能源,2020,34(12):16-17,22.
- [10] 胡广泽,于杰,王璐璐,等. 核电站钢制安全壳管板接头埋弧自动焊研究[J]. 热加工工艺,2020,49(23):107-110.
- [11] 陈祝年. 焊接工程师手册[M]. 北京:机械工业出版社,2002.

作者简介:罗运良(1988—),男,焊接工程师/IWE,现主要从事焊接工艺及焊接过程控制的研究工作。

收稿日期:2021-12-13

修改返回日期:2022-01-21

编辑:郭克星