

电力输送单管塔低温焊接工艺开发与应用

王海峰

上海丰标检测技术有限公司 上海 200120

摘要：加拿大电力输送塔属于单管多边形管塔，服役地区自然环境比较恶劣，大风、雨雪、低温严寒天气较为常见，单管塔在设计满足强度的同时，对于焊缝低温冲击性能也要满足相关标准的规定（ -40°C ，27J），这就对焊接工艺技术提出了比较高的要求，要满足这一要求，焊接工艺的开发和应用就显得尤为重要，能够满足低温冲击试验合格的焊接参数是工艺开发的主要技术难点，需要通过焊接工艺评定试板、对焊接试板进行检验来完成，项目的焊接施工顺利完成且产品能够顺利通过客户检验是焊接工艺应用成功的重要标志。要满足低温冲击韧度要求，在钢材和焊材本身需要满足的前提下，开发适合低温冲击的焊接参数，保证焊接时对焊缝热输入的控制，这样就可以控制焊缝金属晶体组织形态，从而确保焊缝金属低温冲击性能，在焊接参数的开发过程中，使用金相组织检验的方法对焊缝晶体组织进行分析和跟踪，在生产实施过程中，通过设计专用工装来保证管子转角速度，进而保证生产时使用的焊接参数符合试验时经过评定的参数。

关键词：焊接参数；低温冲击；金相组织；工装应用

1 序言

加拿大电力输送行业是国内单管塔企业近些年重点开发的市场，市场需求量较大，单管塔产品壁厚较大、长度较长、底板厚度较大，对于焊接施工来说，制作这样的产品无论从生产工艺还是质量控制上来说，都是很大的挑战，比如对于焊缝的质量控制，如何做到加拿大市场需求的低温冲击焊缝要求，这是需要企业成立技术攻关小组进行具体设计和实践模拟的，因此，对于 -40°C 冲击吸收能量的要求，谁能满足这一焊接要求，那么无疑是具有非常大的市场竞争力，这是客户招标所列的一项重要考核条例，也是对企业技术实力的考核，能满足它并能拿出实际的控制措施和满足要求的具体产品，那么对于企业的市场竞争力会有很大的提升，这也是焊接新技术的开发和应用的重要意义。

2 产品基本信息介绍

加拿大电力输送单管塔为12边形带底板环形焊接结构，底板与杆体通过焊缝连接且无筋板，由于焊缝在产品应用过程中承受 360° 方向动载荷，受力较大，所以焊缝的质量要求较高，设计强度等级

为一级，焊缝环形周长为 $7\sim 8\text{m}$ ，一级强度焊缝超声波检测比例为100%，管壁厚度25mm，底板厚度120mm，管体一侧开 $45^{\circ}\sim 55^{\circ}$ 坡口无钝边，管体内测加与杆体同边数的衬环当作焊接衬垫来实现焊缝全焊透，底板与管体组对间隙 $6\sim 8\text{mm}$ ，衬环与杆体间隙小于 0.5mm （见图1）。

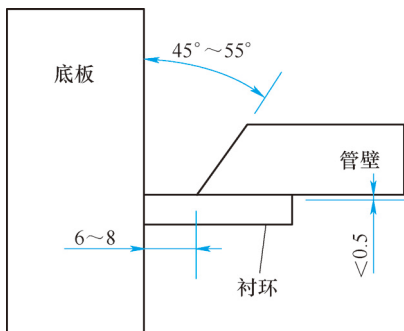


图1 焊接接头

采用埋弧焊（SAW）单焊丝焊接技术^[1]。埋弧焊工艺技术具有焊接质量稳定、焊缝外观优异、焊缝组织分布均匀、节省工人劳动强度等诸多优点，根据产品技术要求，焊缝强度要大于等于材料强度，且焊缝性能满足 -40°C 冲击吸收能量27J，管体原材料采用美标ASTM A572 Grade 65，此为低合金

高强钢，类似中国国标的Q460材料，钢材强度高、焊接性能好，钢材原材料化学成分及力学性能规定见表1和表2，材料低温冲击性能可以满足在-40℃下27J，入厂时均已按照批号进行过复检，结果合格。

表1 ASTM A572 Grade65化学成分（质量分数）（%）

C	Mn	S	P	Si
0.23	1.65	0.04	0.05	0.40

表2 ASTM A572 Grade65力学性能

屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率（%）
450	550	17

焊材采用鑫字牌无镀铜高强度埋弧焊焊丝XW-ENi1K， $\phi 4.0\text{mm}$ ，此焊丝搭配XUN-50焊剂，具有强度高、低温韧性好，焊接过程中焊道脱渣容易，以及工人劳动强度低等诸多优点，在国内众多行业均有应用，其化学成分和力学性能规定见表3和表4，冲击性能符合在-40℃下27J。

表3 埋弧焊焊丝XW-ENi1K化学成分（质量分数）（%）

C	Mn	S	P	Si	Ni	Cu
0.12	0.80~1.40	0.020	0.020	0.40~0.80	0.75~1.25	0.35

表4 埋弧焊焊丝XW-ENi1K力学性能

屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率（%）
470	550~700	20

3 焊接工艺开发

母材和焊材在入厂检测中结果均合格，可以进行焊接参数的开发。焊接参数的开发主要通过焊接模拟真实焊接接头的工作试件来进行，使用和管体材料壁厚一样的25mm试板，提前机加工制作焊接坡口，焊接操作工选用技术能手进行，焊机采用林肯DC-1000焊接电源，送丝机构采用林肯NA-5整套送丝机构，此设备配套体系是林肯电气比较成熟的一套埋弧焊焊接设备，能保证在焊接过程中不会有任何问题，焊剂采用与XW-ENi1K配套的XUN-50烧结焊剂，焊剂提前进行300℃烘干1h，然后在100℃保温待用。焊前对试板进行预热处理，温度不宜过高，50℃左右即可，预热时不可直接将预热火焰加热至焊接坡口处，预热正确位置为距离坡口50~75mm范围以外，且预热时要正反两面进行预热，预热完毕后使用红外线测温仪进行预热温度测定，各个方位共取5个点，5个点的平均值为正确的预热温度，接下来开始焊接，首次焊接参数见表5。焊接

过程中严格控制焊道层间温度低于260℃，焊接完毕后检查焊缝表面，表面光滑，无毛刺、咬边、焊瘤等不连续缺陷，放置自然条件下让试板温度降至室温，经超声波检测后内部无缺陷，满足一级焊缝质量要求，随即将试板送去机加工取样，取样数量为2个拉伸试样，4个侧弯试样，10个CVN冲击试样，其中冲击试样为5个焊缝冲击和5个热影响区冲击，加工好后送实验室进行试验。

表5 首次焊接参数

焊接电流/A	电弧电压/V	焊接速度/mm·min ⁻¹
450	32	320

经过实验室测试，2个拉伸试样断裂强度符合标准要求，4个侧弯试样弯曲后无裂纹，10个CVN冲击试样结果不符合标准要求，冲击试验失败（现场冲击图片见图2），原因分析：原材料和焊材都满足低温冲击性能要求且入厂检验均合格，焊缝低温冲击不合格，只能说明问题出现在焊接工序上，建议对焊缝晶体组织进行检测。经实验室对焊缝金相晶体组织检测结果显示，焊缝铁素体组织比较粗大（见图3），这种类似块状铁素体组织一般情况下低温冲击性能差，由此可见，焊缝低温冲击数据不合格很有可能是由于这种块状组织引起的，一般情况下，焊缝晶体组织粗大则是由于焊接时热输入过大^[2]，焊缝晶体在焊接过程中太过膨胀导致，引用热输入公式对首次焊接热输入值进行计算，首次焊接的焊道热输入值为2.7kJ/mm，在此数据的基础上，我们进行第二次焊接试验的热输入值预制，且第二次焊接试验必须要降低焊接热输入，焊接电流从原来的450A下降到430A，焊接速度由原来的320mm/min增加到400mm/min（见表6），热输入为2.064kJ/min，比第一次焊接时的热输入值下降约25%，准备好之后，使用备用试板进行第二次试验。

表6 第二次焊接参数

焊接电流/A	电弧电压/V	焊接速度/mm·min ⁻¹
430	32	400

焊接完毕后检测焊缝表面质量，合格后将焊接试板空冷至室温，超声波检测无问题后，送机加工取样，经过试验，焊缝和热影响区低温冲击性能合格（见图4），初步推测很可能是由于热输入值降

低所致，为了查明真相，遂对焊缝晶体组织进行金相检测，结果显示焊缝晶体组织主要为针状铁素体（见图5），至此就可以判断，首次低温冲击试验不合格原因是由于热输入过大、晶体组织粗大引起

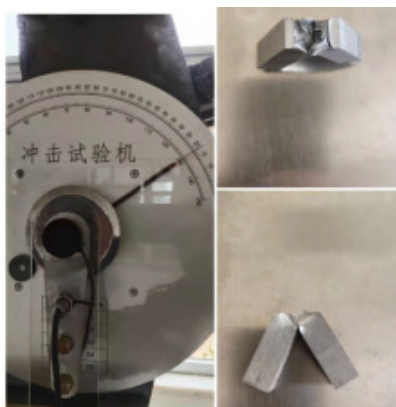


图2 冲击试验失败焊缝

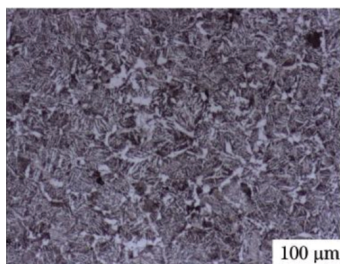


图3 块状铁素体（网络借图）

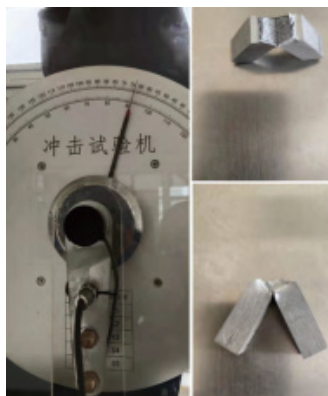


图4 冲击试验合格焊缝

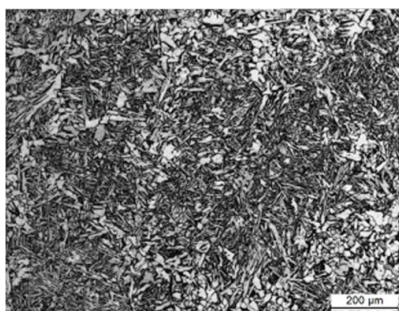


图5 针状铁素体（网络借图）

的，此次经过降低热输入而得到的针状晶体组织，试验合格，热输入值是影响焊缝低温冲击结果的直接因素，至此，焊接参数开发工作完成，将所有试验过程中的重要参数归纳总结，形成焊接工艺指导文件WPS下发生产现场，指导生产部门施焊。

4 焊接工艺应用

在具体生产施焊过程中，由于产品本身的结构比较特殊为圆周12边形，且焊缝两侧母材的厚度比过大，焊接过程中焊缝两侧受力不均衡，极易在焊脚部位产生焊脚裂纹（厚度较薄的管体一侧），焊接施工前需要对具体施焊工艺进行完善，除了经过试验的参数外，还需要增加防止焊脚裂纹产生的工艺方法^[3]。

针对产品特殊焊接结构——焊缝圆周并非纯圆而是整个圆周分为12边进行分析，在焊接时，当滚轮通过焊缝两边连接处时和当滚轮在直线边焊接时的焊接速度会不一样，且在焊接直边时，经过专业检测，焊缝焊脚部位基本不会出现焊脚裂纹和其他焊接缺陷，因此问题都集中在当滚轮通过两边连接处时，需要对此部位的焊接工艺进行完善，此处问题主要是由于产品两个边连接时有夹角产生的，当管子转过滚轮时，由于本身重力的作用，会产生一个焊接加速度，此加速度的产生会使原来的焊接速度增加，改变焊接参数，所以如何杜绝和避免此加速度对焊接产生的不利影响，将是解决此问题的根本方法。

通过对问题进行深入的分析，我们决定设计一套焊接辅助设备，此设备的作用就是在产品焊接时保证在整个圆周范围内焊接速度都是均衡的，不会产生变化。我们设计了一套专用设备（见图6），在焊接时它可以将管子包围起来，通过圆周6处夹具将管子牢牢夹住，一是焊接时滚轮架不直接与管子面接触，二是通过辅助工装，焊接辅助工装可以起到转换焊接速度的作用，因为辅助工装圆周为纯圆形，焊接时在滚轮架上可以匀速转动，从而避免了管子通过尖角产生加速度^[4]。

5 结束语

采用本文工艺方案，我们对前期订单数量的前10%进行检测，各项检测数据均符合项目的验收标准规定，后续产品按照第一批进行常规控制，产品

核电站蒸汽发生器管板镍基合金堆焊质量的控制

沈天阔

中广核工程有限公司 广东深圳 518124

摘要：蒸汽发生器管板镍基合金堆焊是蒸汽发生器制造的基本工序，也是关键工序，堆焊质量直接影响到设备制造进度和后续工艺质量。通过描述镍基合金电渣堆焊工艺，包括焊前准备、规范参数和必要的检测措施，以及分析有关影响堆焊层质量的因素，进行了焊接过程的控制，最终获得性能优良的产品。

关键词：蒸汽发生器；管板；镍基合金；电渣焊

1 序言

蒸汽发生器是压水堆核电站的核心设备，也是核电厂运行过程中发生故障最多的设备之一，大多数故障都是由各种腐蚀造成的。管板为蒸汽发生器的最关键部件，它起着隔离核岛一、二回路的作用^[1, 2]。由于管板一侧（以下简称“一次侧”）长期接触带有放射性和腐蚀性的高温冷却剂，所以在管板制造过程中，必须在一次侧面堆焊镍基合金，以满足其耐高温、抗腐蚀的需求。

管板镍基合金堆焊是蒸汽发生器制造过程中的关键工序，堆焊质量直接影响到设备的制造进度、产品质量以及后续工序的难易程度。本次设备采用带极电渣焊堆焊镍基合金，此焊接方法比一般的焊接难度大很多，主要体现在以下几个方面：

- 1) 镍基合金电渣焊焊接电流大，热输出量高。在管板镍基合金堆焊中，由于母材与堆焊层材料性能差异较大，容易造成母材热影响区晶粒粗大。
- 2) 管板一次侧镍基堆焊的过程中使用镍基合金

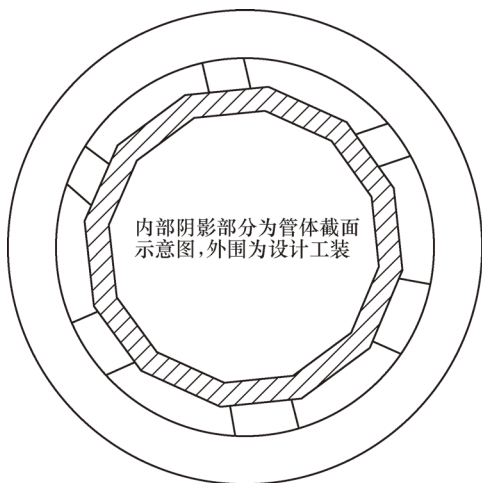


图6 焊接辅助工装

验收顺利完成。

另外，首次焊缝冲击试验不合格，对于焊接工艺的开发打击是比较大的，通过科学的检测手段，

最终找到了造成不合格的根本原因，通过改正相关不合理参数，第二次就很好地完成了冲击试验，为项目顺利进行提供了强有力的保障，在焊接工艺应用阶段，通过生产结合实际，对实际问题进行深入的分析，找到了产生风险的原因，通过设计制造相关工艺装备，保证了产品能够顺利达到项目要求，从而顺利交付。

参考文献：

- [1] 朱锴年，裴学强，管伟.低温风电机组基础环的焊接工艺研究[J].金属加工(热加工)，2017（4）：61-64.
- [2] 马志才.埋弧焊在LNG低温储罐底板焊接中的应用[J].金属加工(热加工)，2014（4）：31-33.
- [3] 史耀武.焊接制造工程基础[M].北京：机械工业出版社，2016.
- [4] 陈祝年.焊接工程师手册[M].2版.北京：机械工业出版社，2009.

MW 20210511