

风电塔架黑塔制作工艺研究

孙江涛

(华电曹妃甸重工装备有限公司 河北 唐山 063200)

摘要: 在碳达峰碳中和发展研究的主体趋势下, 本文从海上风电制造工艺的角度出发, 针对风电塔架黑塔制作的工艺进行研究, 包括风电塔筒制造的要点以及黑塔制作的步骤等过程, 涵盖现存风电塔筒关键工序, 为海上风电的工艺进一步发展以及促进能源转型起到积极的正向作用, 为完成大功率、大直径塔筒制造夯实基础。

关键词: 风电塔架; 黑塔制作; 工艺研究; 能源

0 引言

随着全球经济的快速发展, 化石燃料的燃烧对环境造成了较大影响, 而且大部分化石燃料属于不可再生资源, 为了维持人类正常的生活、工作以及社会活动, 其他清洁、可替代能源的开发越来越受到关注^[1-4]。风力发电作为新型、可再生的替代能源, 在世界范围内每年可提供的风能可达 1300 亿瓦, 在如今碳达峰碳中和的背景下, 开发利用风能将有效减少全球范围内的二氧化碳排放量, 对改善全球气候有着至关重要的作用^[5]; 作为助力碳中和目标实现的关键因素之一, 对风能的研究利用在改善能源结构、发展可再生资源等方面具有重大意义^[6-8]。

风电塔筒制造是海上风电机组装置最为基础的条件之一。随着海上风电清洁能源的开发利用, 众多学者及工程师在风电塔筒制造领域的研究不断深入, 保证风电桩基的安全性及实用性。在风电塔筒制造过程中, 制造材料主要采用热轧低合金钢, 而保证制造质量的关键就是保证塔筒的椭圆度、直线度在正确的范围内, 按照制作工艺做好精度控制^[9]。

1 风电塔架黑塔制造的要点

塔架制造工艺主要从筒节、门框及法兰三个方面有序进行。

(1) 筒节的主要流程: 材料采购—入厂检验—拆图排版—数控切割—编号标记—尺寸检验—加工坡口—卷圆成型—焊接纵缝—回圆—无损检测;

(2) 门框的主要流程: 材料采购—入厂检验—拆图排版—数控切割—编号标记—加工坡口—加工成

型—焊接纵缝—无损检测;
(3) 法兰的主要流程: 整体采购之后完成入厂检验即可。

2 风电塔架黑塔制作的步骤

2.1 钢板下料

钢板下料的过程主要采用数控切割机来完成, 根据设计方案及生产工艺进行数控编程, 保证设计的程序准确无误后再进行正式的钢板下料^[9]。筒体钢板数控切割下料后, 将钢板的炉批号、材质牌号及塔架总编号、部件编号标识在筒壁钢板上。

当割件切割完毕后, 需对每张钢板的大弦长、小弦长、对角线等主要尺寸进行检查, 切割尺寸的允许偏差如表 1 所示。

表 1 切割尺寸的允许偏差

项目	允许偏差 /mm
长度 L_1/L_2	± 2
宽度 b	$+1 \sim 2$
对角线差值 $ D_1-D_2 $	≤ 3

在部件的切割质量方面, 零件热切割棱边不应有裂纹、熔渣及氧化皮, 其割痕深度不得大于 0.5mm。局部割痕不得大于 2mm; 切割边棱与表面垂直度不得大于 1.5mm; 零件棱、边之间的垂直度及平行度不得大于相应尺寸的公差的 1/2。

钢板下料开制坡口前, 需用样冲在钢板中心线处打出样冲眼, 长度不得小于 50mm, 采用半自动切割机进行; 坡口形式尺寸按要求 (图 1) 制作, 不同厚度的板材之间的过渡必须要顺滑, 当相邻筒体板厚差超过 4mm 时, 较厚的筒体要开小于 1:4 的单面过

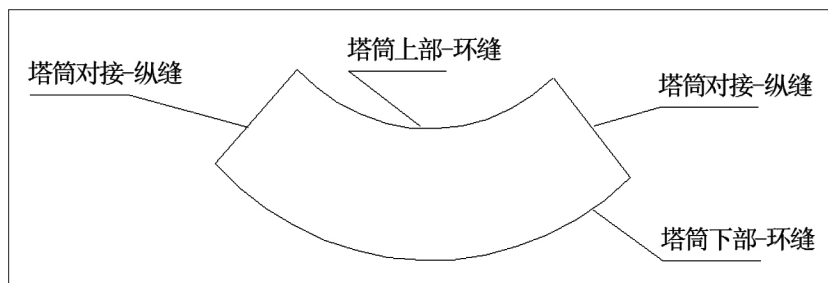


图1 塔筒单节塔体示意图

渡斜坡。

2.2 单节筒体的卷制

筒节卷制前应清除卷板机及钢板表面夹杂硬物，先将卷板机空车运转，检查卷板机工作是否正常；并使用专用吊具将钢板吊装进入卷板机工位，钢板进入卷板机时要注意坡口朝向，然后找正钢板，使钢板对接口边缘与轴辊中心线平行；进行两端头的预弯，多次调整上辊加压力，来回小幅度进给并随时使用样板检查预弯区弧度，预弯弧度应稍大于设计工艺的要求，以防在纵缝处产生无法挽回的局部凹凸变形；预弯完成后，将板料长度中心进给到卷板机上辊所在位置，逐步下压上辊并来回滚动，使板料的曲率半径逐步减小，直至达到规定要求，在此过程中要保持钢板对接口边缘与轴辊中心线平行，以免卷出后产生歪曲错口现象，并随时使用样板检查筒体圆度及棱角度，当样板与筒体之间的间隙不超过3mm时进行合口。在卷制成形后，要求内、外表面无压痕、拉伤等现象，钢板卷制后其边缘应圆滑过渡，表面不得有损伤、皱褶和凹面，划痕深度不得大于0.5mm且不得超过其允许公差值的1/2。在筒体外侧进行定位焊，保证定位焊安全可靠，之后在筒体外侧进行打底焊。打底焊采用连续焊，焊接参数严格按照焊接工艺执行。打底焊焊接完成后，加装引熄弧板，引熄弧板厚度、材质坡口形式应与筒体相同。

2.3 筒节纵缝的焊接

筒节纵缝焊接前应校核坡口组对质量、尺寸、错边量等，使用角磨机对打底焊焊道进行清洁，去除坡口内及其两侧各20mm内的飞溅及焊道表面氧化物。筒节纵缝的焊接采用埋弧多层多道焊的焊接方式，纵缝焊接时应将焊接试板一并焊接完成，试板应与筒节纵缝同时焊接，焊接后在连接部位射线探伤拍见证片，并100%UT检测。焊接后使用气割的方式与筒体分离，并进行各项力学检验，使用埋弧

焊小车或焊接操作臂进行内纵缝的焊接，焊接前预先调节好焊接参数，并调节轨道或操作臂，保证表面成形；内纵缝焊接完成后，从外侧进行清根，清根需完全清除打底焊层及未熔合层，并在清根完成后使用打磨的方式，清除清根焊道表面的氧化金属层；清根完成后，在焊接平台上进行外纵缝的焊接，主要根据焊接工艺对外纵缝进行焊接。

2.4 筒体回圆

筒体回圆前要去除纵缝两端引熄弧板。引熄弧板的去除应采用火焰切割的方法，切割时严禁割伤母材，并在切割完成后将切割处打磨平整，并且严禁使用敲击的方法；回圆时应使工件在逐步减少的矫正载荷下多次辊卷，焊缝部位由于焊接材质较硬，回圆时应特别注意焊缝区局部凹凸度；回圆过程中要不断使用样板对筒体椭圆度进行测量，若产生局部直边超差无法回圆的区域，可使用一块预弯厚钢板垫于筒体与卷板机上辊之间，下压上辊并将直边压弯；回圆完成后，用样板检查筒体局部凹凸度，并且测量筒体外周长、直径比、局部凹凸度，应达到相应的工艺设计要求，并将外周长记录于筒体外侧，由质量人员不定期进行抽检。筒节回圆后，检测筒节任意局部表面凸凹度，不符合要求者应进行进一步回圆。塔筒筒节任意处横切断面的圆度公差应满足： $D_{\max}-D_{\min} \leq 0.005D$ 且 $\leq 2\text{mm}$ (D 为公称直径) 的要求，如图2所示。法兰焊接完成后，法兰外圆不圆度 $D_{\max}-D_{\min}$ 须小于等于3mm (塔筒顶法兰外圆不圆

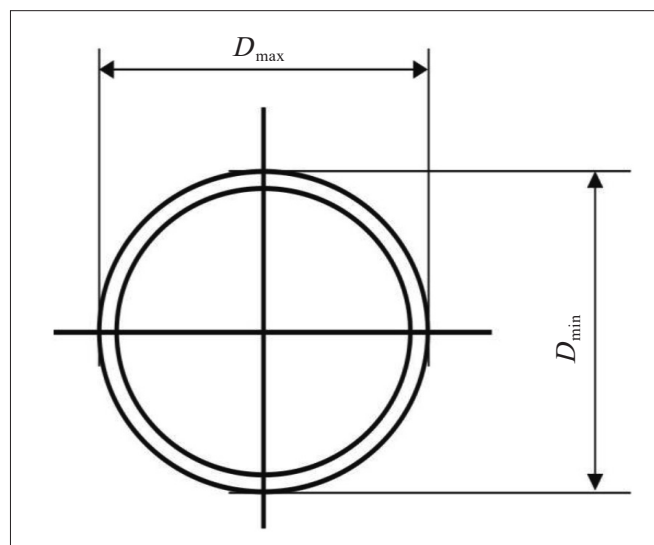


图2 筒节任意处横切断面的圆度公差示意图

度 $D_{\max}-D_{\min}$ 须小于等于 2mm)。

2.5 塔筒的组对

筒体组对前要做好焊缝排布规划,测量法兰脖颈外圆周长及筒节外圆周长,组对时采用外侧对齐,计算好错边量。塔筒法兰与筒体的组对可采用卧式与立式两种组对的方式,使用卧式组对时,将与法兰连接筒节置于滚轮架上,使用专用吊具将法兰竖直吊起进行组对,组对时保证错边量均匀。使用立式组对时,第一次组对前,测量法兰组对平台平面度或超平组对台架,保证平面度不超过 2mm,将法兰置于组对平台或台架上予以固定,将与其相连筒节吊至法兰脖颈上,使用千斤顶调整筒体圆度,保证错边量均匀;筒体与筒体的组对采用卧式组对的方式,将筒体放于组对滚轮架上,通过液压顶升系统调节滚轮架高度保证组对筒体中心线在同一直线上,使筒节与筒节的错边量满足要求(表 2),将筒体间坡口间隙调节均匀。在塔筒进行组对时,尽量避免使用马脚,若不可避免使用马脚,去除马脚时,应采用火焰切割的方法。切割时严禁割伤母材,并在切割完成后将切割处打磨平整,严禁使用敲击的方法。塔筒的组对可采用先小组焊后大组焊的方式,也可使用增长式组对的方式,每两节组对完成后可对环缝先进行焊接,并进行无损探伤检测。筒体对接主环焊缝均采用埋弧自动焊焊接。塔段组对、焊接时在专用滚轮架上进行,单段塔架及整体预组装后,塔架上下端面的平行度、垂直度、平面度公差要求见表 2。

表 2 单段塔架及整体预组装塔架参数

参数	单段塔架	整体预组装塔架
高度(直高)	±10mm	-40 ~ +40mm

单段塔架两端面平行度和同轴度的检测与修正操作,在 $O_1(O_2)$ 位置分别固定找出中心孔做中心支架(图 3),要求孔拴上钢卷尺;在另一端用弹簧称拴在钢卷尺上,用相同的拉力测量并记录。 $A、B、C、D$ 四个象限斜边长及对角线长相对差值在 3mm 以内为合格;筒节对接时纵向钢板的翘边误差应符合要求(表 3),筒节对接示意图如图 4 所示。

2.6 塔筒门框组装、焊接

塔筒门框与筒体组装和焊接应在筒体与法兰焊合后进行,有以下 6 个主要步骤。

(1) 开孔:将下段塔筒置于滚轮架上,将门框中

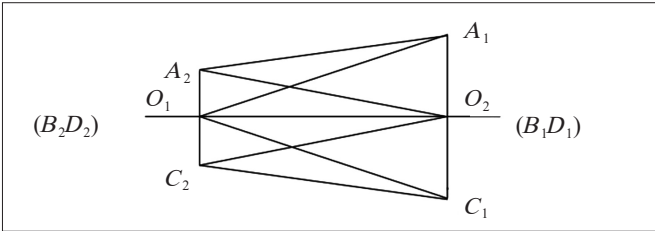


图 3 平行度和同轴度检测示意图

表 3 筒节对接参数要求 单位: mm

板厚 δ	8	10	12	14	16	18	≥ 20
d_L	200	250	300	350	400	450	500
d_x	1.0	1.5	2.0	2.0	2.5	2.5	3.0

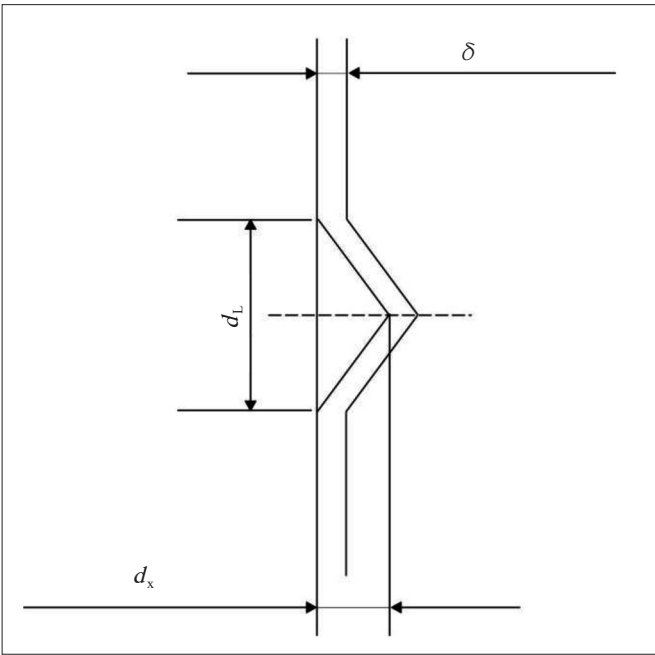


图 4 筒节对接示意图

心位置调整到最高点位置,将门框吊至筒体上,划出门框开孔切割线,采用气割开孔但不割断,将门框位置调整到最低点,将门框切下并切割出周边组焊坡口;

(2) 组装:将门框吊装与筒体进行组对,调整尺寸达到图纸要求后点焊固定;

(3) 焊接:塔架门框与筒体的焊接采用气体保护焊,先焊内部坡口侧,外侧清根后焊接,焊缝全熔透;

(4) 焊缝焊接热处理:塔筒门框与塔筒连接的焊缝,焊接完成后进行热处理消除焊接应力;

(5) 焊缝探伤:门框与筒体的焊缝进行 100%UT 及 100%MT 检测, I 级合格;

(6) 焊缝外观:塔架门框与筒体焊缝表面应光滑、平整,无漏焊、烧穿、裂纹、夹渣等缺陷。

3 结语

本文详细介绍了风电塔筒制造工艺的主要流程，包括风电塔筒制造的要点及黑塔制作的步骤等过程，涵盖现存风电塔筒关键工序的同时，为海上风电由“浅蓝”走向“深蓝”，实现“风电海水制氢”零碳经济，为完成大功率、大直径塔筒制造夯实基础。

参考文献：

[1]DAI Y,KONG F ,TAI X,et al. Advances in Graphene-Supported Single-Atom Catalysts for Clean Energy Conversion[J]. Electrochemical Energy Reviews, 2022, 5(02):1-31.

[2] 陈薇，施瑞鑫． 科学程式还是知识政治：STS 视角下清洁能源议题的边界竞争和联合生产 [J]． 新闻界，2022(11):4-15+25.

[3] 王宗永，陈睿山，王尧，等． 碳中和背景下我国清洁能源发展所需矿产资源供需特征 [J]． 地质学刊，2022, 46(03):305-

312.

[4] 吴萱． “双碳”背景下清洁能源企业家技术创新制度激励研究 [J/OL]． 经营与管理 :1-7[2023-03-18]. DOI:10.16517/j.cnki.cn12-1034/f.20220926.004.

[5] 李恩平． “双碳”背景下太阳能和风能弱质资源区的能源转型战略选择—以江西为例 [J]． 企业经济，2022, 41(12):22-30.

[6] 田利，郭刘潞，尹彦涛，等． 海上风力发电塔架直、间接作用的研究状态及展望 [J]． 工业建筑，2016, 46(05):131-138.

[7] 韦有周． 英国可再生能源扶持政策的最新态势及启示研究—以海上风电产业为例 [J]． 应用能源技术，2016, 225(09):42-45.

[8] 余浩，肖彭瑶，林勇，等． 大规模海上风电高电压穿越研究进展与展望 [J]． 智慧电力，2020, 48(03):30-38.

[9] 陆伟大． 风电塔筒制造技术及质量控制探讨 [J]． 中国设备工程，2021, 466(04):189-191.

作者简介: 孙江涛(1990.04-)，男，汉族，河北唐山人，本科，工程师，研究方向：机电工程。

更正

本刊 2022 年第 34 期(12 月上旬刊，总第 582 期)第 101 页基金项目信息修改为：吉林省教育科学“十四五”规划 2021 年度一般课题。课题名称：基于 CBE-CDIO 理念的高职电工实训课程教学改革与实践；课题批准号：GH21475。

《中国机械》编辑部