

风力发电塔筒法兰焊后平面度控制技术

杨朝猛

江苏神山风电设备制造有限公司 江苏阜宁 224400

摘要：风力发电塔筒法兰焊后平面度是塔筒质量控制的关键指标之一。法兰焊后平面度的好坏将直接影响塔筒吊装后的受力状况，从而影响塔筒的使用寿命。通过对风力发电塔筒法兰焊后平面度的控制技术进行研究，为后续相关产品的焊接变形控制提供借鉴。

关键词：风力发电塔筒；法兰；平面度；控制；矫正

1 序言

风力发电是清洁能源，没有其他常规能源（比如煤电、核电等）会照成的环境污染问题；能够有效减少碳、硫等温室效应气体的排放^[1]。在常规能源告急和全球生态环境恶化的双重压力下，风力发电有着巨大的发展潜力。风力发电塔筒是整个风力发电系统的基础部件之一^[2]；托起整个风力发电机组和叶片；同时也吸收发电机组的振动。目前，风力发电塔筒一般由4~6段组成；每段塔筒上下端有法兰，风场现场由高强度螺栓通过法兰将各塔段联接起来。塔筒法兰的焊后平面度直接影响塔筒吊装后的受力状况。因此，塔筒法兰的焊后平面度是塔筒生产过程中质量控制的关键指标之一。

2 塔筒法兰焊后平面度的控制

2.1 塔筒法兰焊前平面度的控制

目前塔筒法兰均为整体锻造后再机加工的产品。根据塔筒加工技术规范的要求，法兰生产厂家能够通过机加工的手段，将法兰平面度控制在要求的范围之内。目前的塔筒加工技术规范要求顶法兰（与风力发电机组相连的法兰）加工后平面度0.3mm以内，其余法兰机加工后平面度0.5mm以内。江苏神山风电设备制造有限公司（以下简称“神山公司”）在购置法兰后，对入厂的法兰进行入厂前的检查，包括尺寸检测、无损检测等，检查全部合格后，方可入库待上线生产。

2.2 与法兰相连筒节的质量控制

法兰焊后平面度的好坏与相邻的筒节质量息息

相关。相邻筒节的圆度、端口平整度等都会影响法兰最终的焊后平面度。为保证筒节的质量，我们从以下几个方面进行控制。

（1）下料 钢板下料前，应根据筒节的外形尺寸，放样出标准的下料图。然后根据数控切割机的工艺参数（割嘴大小、切割补偿量、切割速度及板厚等）编制下料程序。下料后的尺寸控制为：长宽数据与理论相比 $-2\sim 2\text{mm}$ ，对角线之差 $\leq 3\text{mm}$ 。下料前，采用数控切割机的喷粉功能，提前在钢板表面喷出切割线；测量切割喷粉线并合格后再开始切割。切割完毕实测相关的数据，并做好数据记录。

（2）坡口 坡口是后道焊接的基础，要求坡口开制准确、无缺棱等缺陷。如有缺棱等缺陷，应按神山公司相关的修补规定修补到位：坡口钝边为3mm（公差控制 $-1\sim 0\text{mm}$ ），坡口角度公差范围为 $\pm 2.5^\circ$ 。坡口切割小车加工坡口时，要按相应的坡口图调整好切割嘴的角度；切割后用角度尺实测坡口角度并做好记录。对有缺棱的部位进行修补。

（3）卷圆 卷圆时，必须采用标准的卷圆检验样板进行圆度控制。卷制时，首先要做好预闷头的工作；采用相应的卷圆检验样板来控制曲率。卷圆检验样板为根据筒节的直径与板厚确定好数值，采用激光数控下料而成。卷制过程中，用样板接触筒节内壁或者外壁，保证凹凸不大于塔筒加工规范要求的数值（该数值与筒节的板厚有关）。

筒节纵缝焊接完毕后，必须进行二次回圆处理；回圆控制同样采用标准的卷圆检验样板，合格

标准同卷圆。

2.3 组对

正常塔段的筒节数量为6~15个, 为保证法兰焊后的平面度, 法兰与其相邻筒节先行组对, 然后在上线与其他筒节一一依次组对。神山公司采用法兰水平组对法。

(1) 法兰组对平台 神山公司专门利用钢轨道制作了法兰组对平台, 利用平台根部的调平装置, 将平台上表面调整到同一水平面上; 整体的误差控制在1mm以内。定期对该工作平台的上表面进行检测与调试, 如图1所示。



图1 法兰组对平台

(2) 组对 组对前, 选择经过复测合格的法兰以及经过前道检测合格的筒节。利用钢卷尺实测法兰和筒节的外周长, 并记录好相关的数据。将待组对法兰吊运至组对平台上并放置好, 吊入组对筒节; 依据组对原则(中心层对齐还是外壁对齐)进行组对。要求计算法兰与筒节的外周长实测值之差(要求控制在8mm以内), 如果超差, 则需要更换筒节或者法兰。该差值用来计算组对时的实际错边量, 若实际错边量大于塔筒规范要求的最大错边量(一般为 $0.1t$ 且 $\leq 2\text{mm}$), 那么该筒节需要返工处理或者需要再次核实法兰的外形尺寸。

神山公司要求零间隙组对, 即要求筒节端口与法兰端口必须完全接触或者间隙均匀一致。采用目视检测的方法, 整圈的光亮程度一致即可。组对的过程中, 用钢直尺从法兰 0° 线开始逐步对齐并定位焊。定位焊完成后, 再次利用焊规及钢直尺检查整圈的错边量情况, 合格后, 进行打底焊。

2.4 焊接控制

打底焊结束后, 该筒节与法兰便可上线与其他筒节整体合拢, 合拢完成并经过同轴度、平行度检测合格后, 可以进入埋弧焊。神山公司为确保法兰

焊后的平面度, 在法兰埋弧焊之前对法兰的平面度增加了一次检测。由于该环缝尚未进行埋弧焊, 因此大多数情况下, 此时的平面度数据是合格的。若不合格, 需要单独查找分析原因, 进行返工处理。

埋弧焊时, 焊剂应已烘干并处于保温状态; 焊前需对焊缝进行预热, 预热温度在 $90\sim 120^\circ\text{C}$ 。法兰环缝要求一次性焊接完成, 焊接层间温度必须大于预热温度且小于 200°C 。焊接过程中如果有不可避免的接头(如更换焊丝), 须把接头往后50mm长度进行打磨后重新引弧; 盖面熄弧点与开始点至少有100mm的重叠。埋弧焊焊接的电流、电压、速度、焊接顺序等按照神山公司的WPS执行, 见表1。

焊接完成并经过冷却且焊缝NDT检测合格后, 对法兰焊后平面度进行测量; 如焊缝需要返修, 则必须在返修合格后才能进行法兰焊后平面度的检测。根据塔筒加工技术规范, 塔筒顶法兰焊后平面度一般为 $0\sim 0.8\text{mm}$, 其余法兰的焊后平面度一般为 $0\sim 2\text{mm}$ 。根据神山公司的实际经验数据, 只要严格按照上述流程控制好各个环节, 法兰的焊后平面度一次合格率在97%以上。一般不能一次性合格的均是塔筒顶法兰, 这是由于塔筒顶法兰的焊后平面度要求较高导致。

2.5 顶法兰的焊后平面度控制

(1) 背靠背法组对 目前, 随着风力发电机组兆瓦级数的不断提高, 塔筒顶法兰的脖颈高度也是越来越高; 能够到达 $450\sim 650\text{mm}$ 的高度。神山公司采用将两片法兰背靠背固定在一起, 然后再与相邻筒节组对并焊接的方法。利用法兰自身在机加工后的平面度较高以及法兰自身的刚度较好, 来保证焊接过程中不发生变形(见图2)。该方法能够有效地提升顶法兰焊后的平面度数值, 经过实际操作, 顶法兰焊接利用此方法后的焊后平面度一次合格率能够达到99%。

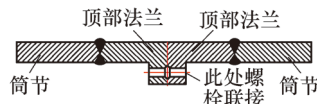
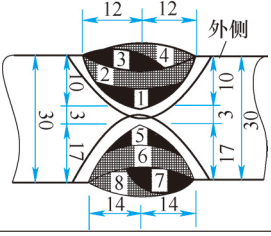
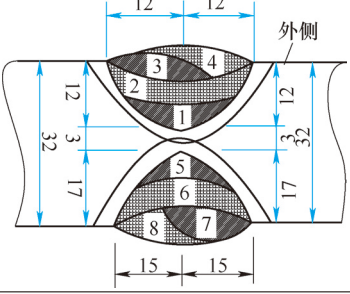
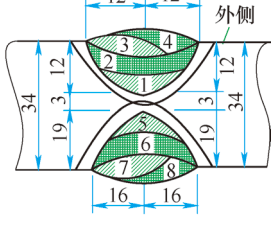
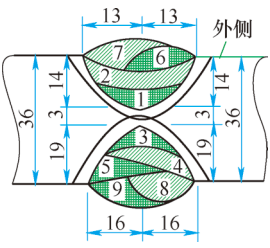
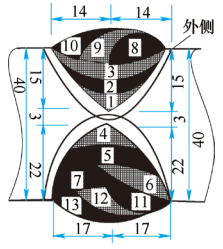
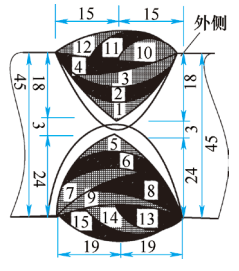


图2 顶法兰背靠背组对法

(2) 预留加工余量法 针对部分机型的顶部法兰的脖颈高度仅有 $120\sim 200\text{mm}$ 的情况, 无法采用上述的背靠背方法时; 神山公司将这种类型的顶法兰的盘厚加厚 $1\sim 2\text{mm}$ 。该类型的顶法兰与相邻筒

表1 神山公司的焊接参数 (节选)

坡口形式	板厚 /mm	焊丝 直径/ mm	焊接 顺序	外缝			焊接 顺序	内缝		
				焊接 电流/A	电弧 电压/V	焊接速 度/m·h ⁻¹		焊接 电流/A	电弧 电压/V	焊接速 度/m·h ⁻¹
	30	4	1	620 ± 50	32 ± 1	17 ± 2	5	720 ± 50	33 ± 1	16 ± 2
			2	660 ± 50	34 ± 2	16 ± 2	6	720 ± 50	34 ± 2	16 ± 2
			3	660 ± 50	34 ± 2	18 ± 1.2	7	660 ± 50	34 ± 2	20 ± 1.2
			4	660 ± 50	34 ± 2	17 ± 2	8	660 ± 50	34 ± 2	19 ± 2
	32	4	1	620 ± 50	32 ± 1	17 ± 2	5	720 ± 50	33 ± 1	16 ± 2
			2	660 ± 50	34 ± 2	16 ± 2	6	720 ± 50	34 ± 2	16 ± 2
			3	660 ± 50	34 ± 2	18 ± 1.2	7	660 ± 50	34 ± 2	20 ± 1.2
			4	660 ± 50	34 ± 2	17 ± 2	8	660 ± 50	34 ± 2	19 ± 2
	34	4	1	620 ± 50	32 ± 1	17 ± 2	5	720 ± 50	33 ± 1	16 ± 2
			2	660 ± 50	34 ± 2	16 ± 2	6	720 ± 50	34 ± 2	16 ± 2
			3	660 ± 50	34 ± 2	18 ± 1.2	7	660 ± 50	34 ± 2	18 ± 1.2
			4	660 ± 50	34 ± 2	17 ± 2	8	660 ± 50	34 ± 2	17 ± 2
	36	4	1	640 ± 50	32 ± 1	17 ± 2	3	720 ± 50	33 ± 1	16 ± 2
			2	680 ± 50	34 ± 2	16 ± 2	4	720 ± 50	34 ± 2	16 ± 2
			6	680 ± 50	34 ± 2	20 ± 1.2	5	660 ± 50	34 ± 2	17 ± 1.2
			7	680 ± 50	34 ± 2	19 ± 2	8	680 ± 50	34 ± 2	20 ± 1.2
			—	—	—	—	9	680 ± 50	34 ± 2	19 ± 2
	40	4	1	640 ± 50	32 ± 1	17 ± 2	4	720 ± 50	33 ± 1	16 ± 2
			2	680 ± 50	34 ± 2	16 ± 2	5	720 ± 50	34 ± 2	16 ± 2
			3	660 ± 50	34 ± 2	17 ± 1.2	6	720 ± 50	34 ± 2	20 ± 1.2
			8	680 ± 50	34 ± 2	20 ± 1.2	7	720 ± 50	34 ± 2	19 ± 2
			9	680 ± 50	34 ± 2	19 ± 2	11	720 ± 50	34 ± 2	20 ± 1.2
			10	680 ± 50	34 ± 2	20 ± 1.2	12	720 ± 50	34 ± 2	19 ± 2
			—	—	—	—	13	720 ± 50	34 ± 2	19 ± 2
	45	4	1	660 ± 50	32 ± 1	17 ± 2	5	720 ± 50	33 ± 1	16 ± 2
			2	680 ± 50	34 ± 2	16 ± 2	6	720 ± 50	34 ± 2	16 ± 2
			3	680 ± 50	34 ± 2	20 ± 1.2	7	720 ± 50	34 ± 2	20 ± 1.2
			4	700 ± 50	34 ± 2	19 ± 2	8	720 ± 50	34 ± 2	19 ± 2
			10	700 ± 50	34 ± 2	20 ± 1.2	9	720 ± 50	34 ± 2	17 ± 1.2
			11	700 ± 50	34 ± 2	19 ± 2	13	720 ± 50	34 ± 2	20 ± 1.2
			12	700 ± 50	34 ± 2	20 ± 1.2	14	720 ± 50	34 ± 2	19 ± 2
			—	—	—	—	15	720 ± 50	34 ± 2	19 ± 2

(续)

坡口形式	板厚/mm	焊丝直径/mm	焊接顺序	外缝			焊接顺序	内缝		
				焊接电流/A	电弧电压/V	焊接速度/m·h ⁻¹		焊接电流/A	电弧电压/V	焊接速度/m·h ⁻¹
	48	4	1	660±50	32±1	17±2	5	720±50	33±1	16±2
			2	680±50	34±2	16±2	6	720±50	34±2	16±2
			3	680±50	34±2	20±1.2	7	720±50	34±2	20±1.2
			4	700±50	34±2	19±2	8	720±50	34±2	19±2
			11	700±50	34±2	18±2	9	720±50	34±2	20±1.2
			12	700±50	34±2	20±1.2	10	720±50	34±2	19±2
			13	700±50	34±2	19±2	15	720±50	34±2	20±1.2
			14	700±50	34±2	20±1.2	16	720±50	34±2	19±2
			—	—	—	—	17	720±50	34±2	19±2

节按前述的组对焊接工艺流程正常组对焊接。焊接完成后，对顶法兰的表面进行一次机加工处理；机加工处理的量即为前面预留的盘厚增加量。经过机加工的顶法兰平面度合格率为100%。但是此方法，加工周期较长，且操作不便；故而在神山公司内部应用的也比较少。

2.6 火工矫正

神山公司的法兰焊后平面度检测是通过激光测平仪Easy-Lasyer来进行，激光测平仪能够测出法兰面各点的位置高低，从而自动生成该法兰面的平面度及内倾度。根据实际经验，法兰平面度超差的一般为法兰面上的个别点；而非整个法兰面上所有的点都超差。若有整个法兰面全部点各都超差，即形成严重的质量事故；需要专项分析其原因并出具专门的解决方案，在此不详细说明。针对个别超差的点，采用火工矫正的方法来进行法兰焊后平面度的矫正，如图3所示。

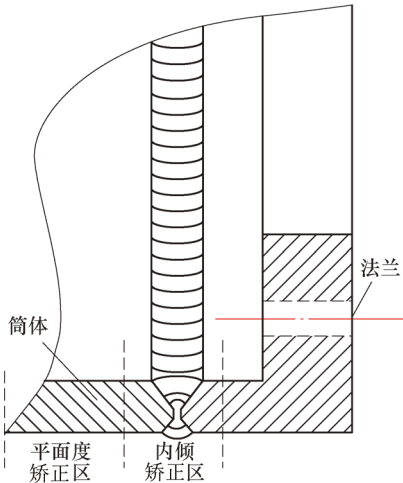


图3 火工矫正

火工矫正前，该环缝的NDT检测必须已经合格。根据平面度检测报告，确定基准点位置和火工矫正区域。火工矫正区域通常为筒体钢板的两侧，在火工矫正区域内进行矫正，基准点区域不允许进行火工矫正。火工矫正利用火焰加热，火焰与筒体接触中心温度≤600℃，不允许使用氧化焰。矫正时应让有经验的人员根据平面度检测报告，对需要矫正的区域作出预判；矫正时为与法兰面平行的条状加热，2~3条加热量矫正0.5~1mm；采用工装均匀加热。矫正后，在空气中自然冷却，严禁采用水冷；在表面温度冷却至40℃以下时，可以进行平面度复测。平面度合格后，需对矫正区域进行抛光处理；并做MT检测，检查是否有表面缺陷；对热影响区及母材做硬度测试，其数值≤350HV。

3 结束语

神山公司经过多年的探索与总结，掌握了一整套完整的控制法兰焊后平面度的方法，法兰焊后平面度在出厂前的第三方检测中，合格率为100%。得到了监理及业主的一致好评，树立了我公司良好的品牌形象。

参考文献：

[1] 刘波，贺志佳，金昊.风力发电现状与发展趋势[J].东北电力大学学报，2016，36（2）：7-13.
[2] 齐伟，王海东，沈忠，等.风电塔筒的焊接[J].金属加工（热加工），2018（4）：26-28.

MW 20210302