

风机塔架门框焊接对底部T形法兰圆度的影响及预防

张雪飞

西门子歌美飒再生能源（上海）有限公司 上海 200082

摘要：在风力发电的风机安装过程中，底段T形法兰起到了连接塔架和地面基础桩作用，是连接风机的重要部件，直接影响了风机的安装及运行寿命。生产中，底段塔架门洞及门框的焊接对T形法兰平面度的影响重大，为此讨论及分析了门框焊接对底段T形法兰圆度的影响、预防措施及解决方案。

关键词：法兰；门框；焊接变形；圆度

The influence and prevention of wind turbine door frame welding on the ellipticity of bottom T-flange

ZHANG Xuefei

Siemens Gamesa Renewable Energy (Shanghai) Co., Ltd., Shanghai 200082, China

Abstract: In the installation process of wind turbine, the bottom T-flange plays the role of connecting the tower and the ground foundation pile, and is an important part of connecting the fan, which directly affects the installation and operation life of the fan. In production, the welding of the bottom tower door hole and door frame has a great influence on the flatness of the T- flange. This paper discusses and analyzes the influence of door frame welding on the ellipticity of the bottom T-shaped flange, preventive measures and solutions.

Keywords: flange; doorframe; welding deformation; ovality

1 序言

在全球气候变暖及化石能源资源受限的背景下，大力发展可再生能源、促进能源转型已成为全球的共识，随着“双碳”目标的提出，很多国家已承诺在2050年前达到“碳中和”，而风能是一种清洁而稳定的可再生能源，已成为继煤电、水电的第三大电源^[1]，成为推动能源转型和节能减排的重要力量。

风机塔架是整个设备的关键支撑部分，承受的载荷包括风载荷、机组自重、电动机的振动及受力变化时的摆动等，底段和基础桩的连接是稳固整个塔架的重中之重，T形法兰位于塔架的最底端，与

风机基础直接连接，作为支撑风力发电机组的关键结构，其质量直接影响风机运行安全。风机的门洞距离底部T形法兰2000mm左右，它的焊接是导致T形法兰变形超差的主要因素，本文着重讲述门洞及门框（加强板）的焊接对T形法兰圆度的影响。

2 T形法兰圆度要求

底部T形法兰结构如图1所示。根据项目图样要求，底部T形法兰圆度验收要求见表1。

测量方法：门框在平台上水平放置，分别测量水平方向及垂直方向的法兰直径，两个方向直径的差值就是法兰的圆度，该差值越小，法兰的圆度越好，因此越有利于风场法兰与基础桩之间螺栓的安装。

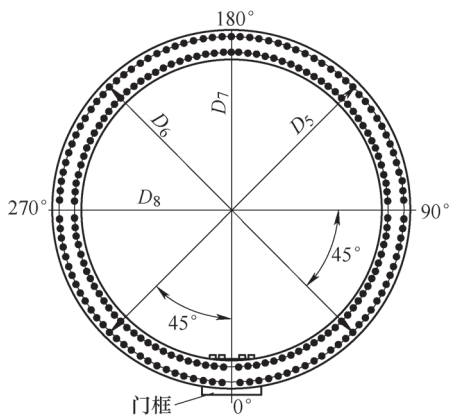


图1 底部T形法兰结构示意图

表1 法兰椭圆度验收要求 (mm)

计算方法及要求	验收要求
$\Delta = D_7 - D_8$	$ \Delta \leq 8$

3 T形法兰椭圆变形

本文研究的背景是6套塔架所有的焊接工作完成后，质量检查过程中发现共6套T形法兰圆度严重超差。

经过分析，以下几个原因对法兰圆度的影响巨大（见图2）。

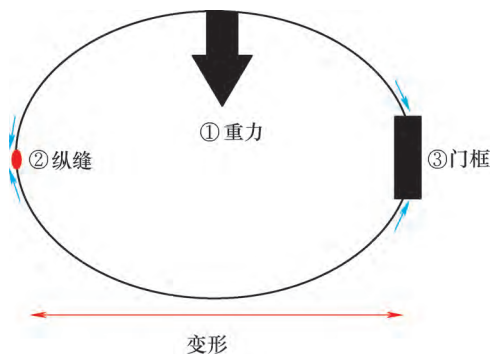


图2 法兰圆度的影响因素

(1) 法兰自重的影响 在焊接后，法兰、筒体由于本身的自重，由圆形变形为椭圆形，这个变形为弹性变形，当塔筒吊装立起来后就会恢复。但是在存储及运输时间过长的情况下，法兰可能会由弹性变形转变为塑性变形。在塔筒立起来时，法兰孔与基础桩的螺栓预制孔无法完全重合，导致塔架安装困难。安装后，螺栓处应力集中，风机运行时受力复杂，容易引起基础桩开裂。

(2) 纵缝焊接变形的影响 在法兰上纵缝的焊接过程中，焊接区域因受热和冷却的不均匀，而产生横向和纵向的收缩，由于塔节是圆柱结构，所以

焊后结构在焊缝位置形成一个轻微的折角，塔节组装成塔段后，这些纵缝分别位于塔段的90°和180°位置，塔节受到90°和180°的拉应力，从而导致法兰由圆形变为椭圆形。

(3) 门框焊接的影响 在塔架设计过程中，门洞塔体板和门框都是EN 10025-3：2019的结构钢，材料信息及性能见表2。

表2 钢材材料性能

材料	门框厚度/mm	塔体板厚度/mm	弹性模量/MPa	泊松比
S355NL	100	50	210	0.3

采用有限元单元法来模拟门洞与门框附近的应力分布，分析得出门洞与门框连接位置是整个塔架应力最集中的位置^[2]，如图3所示。

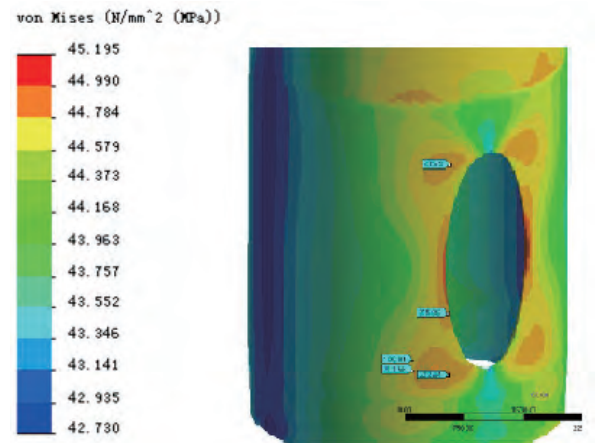


图3 门洞与门框附近的应力分布

底部T形法兰距离门框最底端2m左右，门框焊接的引起的轴向收缩会直接拉扯T形法兰，同时也会引起环向收缩，如图4所示。

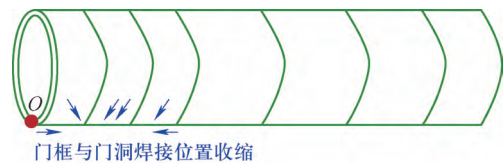


图4 门洞与门框的焊接收缩

由此可知，门框与塔节的焊接对法兰的影响至关重要，关系到法兰平面度及圆度是否满足图样要求，从而也影响到整个风机在运行过程中，底部T形法兰是否能为整个风机提供安全稳固的支撑作用。

焊前工艺设计时，要考虑到此位置的应力如何缓解及释放，焊后如果应力得不到释放，此处应

力集中加剧，在淬硬组织、氢、拘束应力的作用下产生延迟裂纹。如果应力全部得到释放，在拉应力作用下，引起门框及附近塔体板位置横向和纵向收缩；在剪切力的作用下，引起门框的脚变形，同时邻近的底部T形法兰也会被拉应力影响，拉向塔节一侧，导致法兰圆度及平面度超出规定范围。

4 T形法兰圆度变形控制

生产中，要将门框焊接引起的变形对法兰圆度的影响减到最小，在焊接工艺设计时采取了以下几种措施，取得了很好的效果。

(1) 坡口形式 门框与塔节板的坡口采用K形坡口，如图5所示。

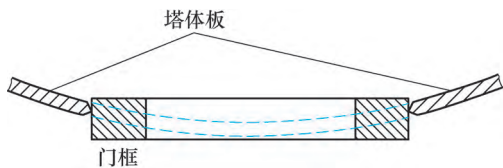


图5 门框与塔节板焊接接头

当塔体板与门框接头设计为单V形坡口焊缝时（见图6），焊接各阶段对T形法兰圆度的影响见表3。



图6 门框与塔节板单V形坡口

表3 塔体板V形坡口焊缝对T形法兰圆度的影响（mm）

检测点	内侧坡口焊接前	内侧坡口焊接后	外侧坡口焊接后
T形法兰圆度	10.25	16.7	12

当塔体板与门框接头设计为K形坡口焊缝时（见图7），如果钢板厚度是 t ，内侧坡口深度可以设计成 $3t/5$ ，外侧 $2t/5$ 。由于门框两侧的塔体板是圆弧结构，导致外侧坡口增大便于清根，坡口外侧清



图7 门框与塔节板K形坡口

根，保证清根后的坡口深度为 $3t/5$ 。各阶段的底部T形法兰圆度见表4。

表4 塔体板K形坡口焊缝对T形法兰圆度的影响（mm）

检测点	内侧坡口焊接前	内侧坡口焊接后	外侧坡口焊接后
T形法兰圆度	10.33	9.1	6

对比以上两种坡口形式，发现K形坡口焊缝完成后对应的底部T形法兰的圆度比V形坡口焊缝的圆度减少了6mm，影响最小，并满足图样最大8mm的验收要求。

由此得出，焊缝的截面尺寸越大，焊接材料填充量越大，焊接收缩变形量就越大，为了减少焊缝的收缩及变形，在坡口设计阶段应选用K形坡口。

(2) 焊接顺序 采用合理焊接顺序可控制门框焊接的角变形及收缩变形。塔架门框焊接和其他组装焊接不同，需要靠转动滚轮架翻转门框方面焊接，同时需要搭建辅助工装便于焊工施焊，生产中为了减少焊接过程中门框的翻转，尽量避免选择内外两侧交替焊接的顺序^[3]。首先坡口内侧焊接，焊满后将外侧坡口碳弧气刨清根，然后将门框转到顶部180°位置进行坡口外侧焊接。

同时，由于门框是椭圆形环形结构，可以分为4个区域，由2名焊工同时同向对称施焊，各区域内的焊缝采用分段退焊法或分段跳焊法施焊。

门框按采用前述方法焊接完成后，经质检检测门框各尺寸满足图样要求。

(3) 控制焊接热输入 一般情况下^[4]，热输入过大时，加热的高温区范围大，冷却速度慢，塑性变形区增大，因此采用小的热输入是改善塑性变形的的方法之一。

用CO₂气体保护焊来代替焊条电弧焊，坡口角度小，焊缝截面尺寸小，焊接速度快，焊接热输入小，焊接受热面小，变形和应力也相应减小，同时提高工效，缩短工期。焊接参数见表5。

表5 CO₂气体保护焊焊接参数

焊丝直径/mm	焊接电流/A	电弧电压/V	焊接速度/(mm/min)
1.2	260~300	27~32	300~390

(4) 施焊环境温度不宜过低 组对和焊接时构件温差小，冷却速度慢，焊后变形和应力也会减小，施工环境低于5℃，需要预热母材至30°以上。焊接完成后采用缓慢的冷却速度，细化焊缝及热

影响区的晶粒组织，在提高焊缝的塑性和韧性的同时，可减少焊接应力和变形。

为了提高法兰圆度的合格率，避免风场与基础桩装配困难，下面工艺措施也可以根据实际情况实施。

1) 增加检测点。塔段所有焊缝焊接完成后，分别将门框放置在 0° 和 90° 进行测量，具体验收要求应满足图样要求，在任何情况下垂直距离不能比水平距离大。

2) 火焰矫正。塔节组装完成后，如果发现圆度超差，可采用火焰加热连接底部T形法兰塔节的纵缝以消除应力^[5]，火焰矫正应严格按照制造工厂的作业指导执行，温度控制在 $550\sim 650^{\circ}\text{C}$ 。矫正完成后，进行超声波、磁粉检测。

3) 支撑固定。使用液压工装对底部T形法兰上下支撑，避免法兰在重力方向下塌，可以反复利用，也可以采用“十”字支撑（见图8）或“米”字支撑（见图9）固定。

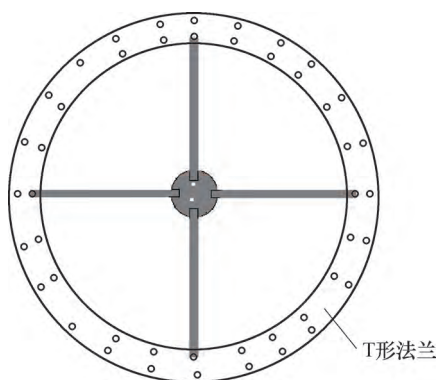


图8 “十”字支撑

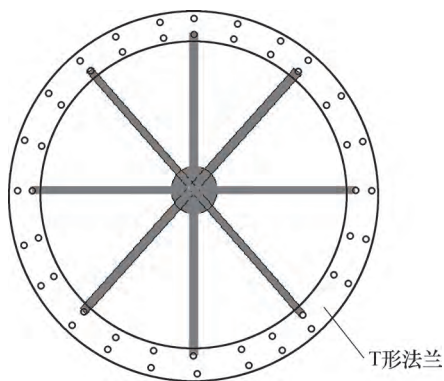


图9 “米”字支撑

5 结束语

塔筒门框的焊接对底部T形法兰的圆度有着很大的影响，合理设计塔体与门框之间接头的坡口，同时合理布置焊接顺序及焊接参数是减少门框处应力集中及焊接变形的关键，也是控制法兰圆度的关键，对风场风机的安装及稳定都起到了至关重要的作用。因此，施工过程需严格依照相关工艺进行。在实际操作中，需要对各种影响焊接质量的因素进行全面考虑，注重焊接过程的控制和质量检测，确保施工质量和安全稳定。

参考文献：

- [1] 梁建明，王占英，刘春东，等. 风电塔筒法兰焊接工艺[J]. 焊接技术，2009，38（2）：30-31.
- [2] 区达铨，王发展，赵申，等. 大型复杂框架结构焊接变形与应力控制仿真[J]. 中国机械工程，2018，29（5）：616-622.
- [3] 田昕. 面向焊接顺序优化的焊接变形仿真技术基础研究[D]. 南京：南京航空航天大学，2009.
- [4] 孔凡强. 风电塔筒法兰焊接变形控制的工艺措施[J]. 现代制造技术与装备，2011（3）：51-52.
- [5] 石南辉，吴桦，郝亮. 风塔法兰与筒节焊后的火焰矫正工艺[J]. 金属加工（热加工），2014（4）：61-62.

MW 20240301