



永磁直驱风力发电机转子机座焊接变形控制

王庆伟

【摘要】 转子机座作为永磁直驱风力发电机的核心部件，具有焊接质量要求高、加工精度高、加工后不允许偏重等特点，这就需要对筒体成形精度、钎焊质量控制及焊后去应力退火等过程提出非常严格的要求；为满足电机批量生产的需求，对上述各个过程中涉及到的关键点进行技术总结，为实现永磁直驱风力发电机批量化生产打下坚实的基础。

关键词： 风电；转子机座；成形；焊接；退火

1. 概述

随着国家能源战略政策的调整，风力发电作为清洁能源和可再生能源越来越受到国家的重视，风力发电设备制造业蓬勃发展。为了占领风电市场，我公司先后自主研发并制造了多种机型的风力发电机产品，其中永磁直驱同步风力发电机即第三代风力发电技术，因其具有较好的可靠性及稳定性已成为目前的主流机型。采用作为电机的转动部件，转子机座进行磁钢装配后即成为永磁直驱风力发电机的转子部件，使得转子机座承受电机运行过程中的扭矩、冲击和疲劳载荷，属于电机的核心重要部件；其焊接质量的优劣直接影响后续的加工精度，从而影响转子装配的质量，进而影响电机总装配后的各项电气性能；而由于转子机座大直径、薄壁的固有属性，

具有壳体成形圆度误差大、刚性差、焊接及退火变形大等特点，是永磁直驱电机结构件中制造难度系数最大的部件。

2. 转子机座结构及制造难点

2.5MW永磁直驱风力发电机转子机座焊接结构如图1所示，材质为Q345E，筒体壁厚50mm，筒体中径4902mm，高度1470mm，焊接件毛坯重量11.8t，加工后总重9.9t。

(1) 为避免工件加工后偏重，要求筒体成形后圆度误差 $\leq 3\text{mm}$ ，各零部件钎装同心

度 $\leq \phi 5\text{mm}$ ，钎焊后圆度误差 $\leq 5\text{mm}$ 。对成形、钎焊的质量控制提出了非常严峻的挑战。

(2) 整个结构件有3条环焊缝、筒体2条纵焊缝，全部焊缝要求清根全焊透，焊接工作量大，采取的措施不当将导致焊接变形严重。

(3) 由于整体刚性较差，导致焊后退火、吊装、翻身等过程若措施不当均有一定的塑性变形，影响整体装焊尺寸，从而影响后续的精加工。

3. 筒体成形质量控制

(1) 筒体下料 下料尺寸：

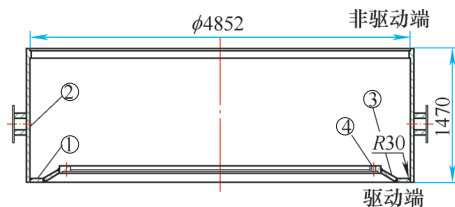


图1 2.5MW转子机座结构示意图

注：①~④为焊接顺序。

-50mm×1470mm×15409mm+(800mm压头)，长度方向均分二接一。数控气割下料，检查对角线公差≤2mm，保证筒后续体成形高度允差满足标准要求。钢板两长棱边打磨倒角R3mm，防止卷制时棱边切割缺陷因应力集中而破坏母材。

(2) 筒体成形 第一，两端均匀划出压头线并打上洋冲眼，将钢板吊装平稳落到两下辊上，使钢板的纵向中心线与辊筒轴线平行度≤3mm。

第二，在三辊卷板机上两端预弯后按中径 $\phi 4902 (+3 \sim +5)$ mm卷制成形（见图2），成形时利用弧形样板检查曲率。卷制曲率达到要求后气割去除两端压头，并割出对接坡口，对称双面V形坡口（角度 $45^\circ \pm 5^\circ$ ，钝边2mm）。

第三，坡口制备好后，将筒体用行车吊进大三辊内进行收口。收口过程中要注意控制收口处对接错边量≤2mm。焊接筒体纵焊缝，两侧交替施焊控制纵焊缝棱角度。

第四，焊后在三辊上校圆至圆度 $(D_{\max}-D_{\min}) \leq 6$ mm（见图3），合格后再采用天然气火焰局部校圆至圆度 $(D_{\max}-D_{\min}) \leq 3$ mm（见图4）。

第五，筒体两端装焊米字支撑（见图5），进炉中间消应热处理（ISR） $(610 \pm 10)^\circ\text{C} \times 2\text{h}$ ，以去除卷圆及火焰矫正局部残余应力。

第六，制作弦长 $D_i/6$ 且不小于300mm的内或外圆样板，检查筒体圆度、纵焊缝棱角度及局部凹凸量≤3mm，高度允差（-2~



图2 筒体卷制成形



图3 筒体三辊上校圆

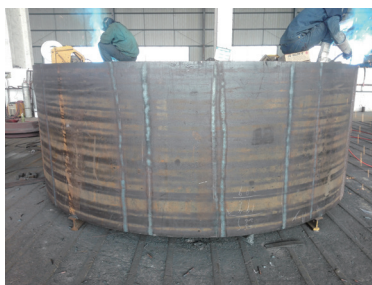


图4 局部火焰矫正

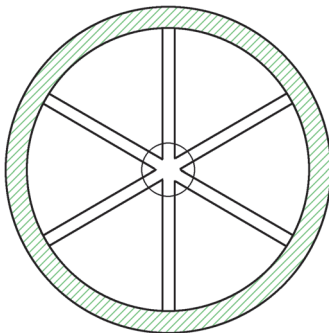


图5 ISR前两端装焊米字支撑

+3) mm。

4. 铆焊过程质量控制

(1) 焊接应力和变形产生的原因 第一，焊接时焊件局部不均匀受热和冷却是产生变形和应力的主要原因，在焊缝附近金属受拉应力，离焊缝较远处的金

属受压应力。

第二，焊缝金属在凝固和冷却过程中体积要发生收缩，使焊件产生变形和内应力。焊缝金属的收缩量决定于熔化金属的填充量，熔敷金属多则收缩量大。

第三，由于焊件的刚性限制了焊件在焊接过程中的变形，所以刚性不同的焊接结构，焊后变形和应力的不同。

第四，在焊接过程中多种因素影响应力与变形，如焊接方法、焊接速度、焊件的装配间隙、对口质量、焊件的自重，特别是装配顺序和焊接顺序对焊接应力有较大的影响。

第五，焊接应力和变形不但可能引起工艺缺陷，一定条件下将影响结构的承载能力，诸如强度、刚度和受压稳定性。除此之外，还将影响到结构的加工精度和尺寸稳定性。

(2) 转子机座控制焊接应力和变形的措施 第一，焊前预热：对焊接坡口及其两侧3倍板厚的范围采用天然气火焰预热 $\geq 100^\circ\text{C}$ ，焊后用石棉布覆盖，以降低焊缝的冷却速度，减小焊接区的温度梯度，从而降低焊接接头的拘束度，减小焊接应力和变形。

第二，控制焊缝金属填充量：为减小焊接收缩量，应尽量减小填充金属量，因此“序1+序2”采用K形坡口，坡口角度 40° ，“序2+序3”、“序3+序4”采用V形坡口，坡口角度 40° ，选择合适直径的喷嘴可以保证焊丝干伸长能够到达焊缝根部。

第三，控制装配间隙及错边

量：应保证各件之间的装配间隙 $\leq 2\text{mm}$ ，局部可为 3mm 但不应超过焊缝长度的 10% ；为满足上述要求需对序2内、外圆应留二次配割余量；将需1、序2、序3预装并做好标记，并划出项2内外圆二次配割线，气割去除内、外圆余量并按图6所示割出坡口。

第四，刚性固定法：为适应批量生产的需求，提高生产效率，对转子机座采取整体装配刚性固定的方式控制焊接变形（见图7）。

第五，定位焊缝：部件之间拼接焊缝应错开 100mm 以上，避免应力集中；控制各部件装配同心度 $\leq \phi 3\text{mm}$ 合格后由具有资质的焊工实施定位焊，焊缝长度应 $\geq 50\text{mm}$ ，间距宜为 $300 \sim 600\text{mm}$ 。

第六，选择合理的焊接顺序：3条环焊缝焊接顺序依次为“序1+序2”、“序3+序4”、“序2+序3”，以减少内侧环缝收缩造成筒体变形，同时有利于防止由于焊接变形造成项4高度尺寸的变化。

所有环缝圆周方向两名焊工分段对称施焊，焊接过程中在各基准面架设百分表监测焊接变形情况，随时调整焊接顺序，多次翻面、正反交替焊接。

第七，合理的焊接方法及焊

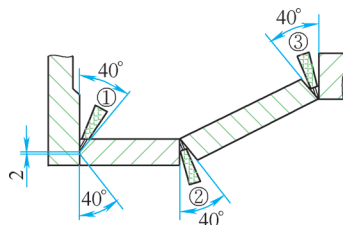


图6 焊接坡口示意

注：①~③为焊接顺序。

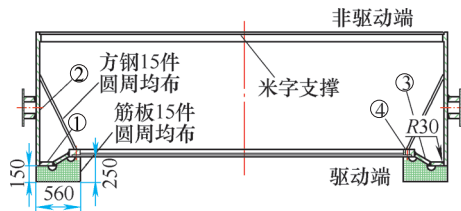


图7 刚性固定法装配

注：①~④为焊接顺序。

接热输入：由于 CO_2 气体保护焊具有生产效率高、对油锈敏感性低、电弧热量集中、焊接变形小及焊接成本低等特点，因此转子机座焊接选用 CO_2 气体保护焊（GMAW），焊接设备为A160-500。焊前按照ASME第IX卷进行焊接工艺评定，根据PQR和WPS制定合理的焊接参数（见附表，气体流量： $15 \sim 20\text{L}/\text{min}$ ），以保证焊接接头 -40°C 冲击韧性、力学性能及弯曲性能与Q345E母材匹配。在焊接参数规定的范围内选择合理的焊接热输入，采取多层多道焊的方式，控制每道焊缝厚度 $\leq 13\text{mm}$ ，每道焊缝宽度 $\leq 20\text{mm}$ ，避免热输入过大造成构件产生较大的焊接变形。

第八，焊后火焰矫正：检查序1筒体圆度，上中下三个位置各测8点并做记录，对超差部位火焰局部校圆至圆度（ $D_{\max} - D_{\min}$ ） $\leq 3\text{mm}$ ，利用铅垂线检查项1垂直度 $\leq 3\text{mm}$ ；检查序4平面度 $\leq 2\text{mm}$ ，利用水平仪检查序4上平面至筒体非驱动端的高度

差；对尺寸超差影响后续加工的部位进行火焰矫正，无法矫正的部位允许局部堆焊。

（3）焊缝外观检查及无损检测 第一，焊后所有焊缝打磨至与母材圆滑过渡，焊缝咬边深度不得超过 0.5mm ；序1+序2内侧焊脚打磨出 $R30\text{mm}$ ，以缓解应力集中，提高部件的疲劳寿命。

第二，焊后至少间隔 24h 对焊缝进行 $100\%\text{MT}$ 检测，验收标准：ASME-VIII-APP6； $100\%\text{UT}$ 检测，验收标准：ASME-VIII-APP12；对超标缺陷按照返修工艺卡要求进行返修，返修次数不得超过两次。

5. 退火过程质量控制

为改善焊缝的组织 and 性能，消除焊接过程中产生的残余应力，提高焊接结构件的力学性能和几何尺寸的稳定性，需进行焊后去应力退火。退火过程中被加热工件随着温度的升高强度下降，当强度下降到一定水平，焊接应力高于加热金属的屈服强度时，工件就会产生局部塑形变形，从而使残余应力得到释放。

焊接参数

焊道	焊丝牌号	焊丝直径/mm	电源极性	焊接电流/A	电弧电压/V	焊接速度/ $\text{cm}\cdot\text{min}^{-1}$	热输入/ $\text{kJ}\cdot\text{cm}^{-1}$	道间温度/ $^\circ\text{C}$
打底	CHW-50C9	1.2	DC-直流反接	100~160	21~27	10~25	26	≤ 200
填充				160~320	24~34	20~45	33	
盖面				160~320	24~34	20~45	33	

(1) 转子机座装炉注意事项 第一, 为防止在去除应力的过程中产生新的附加应力, 应尽量减少工件各部分的温差, 温差越小, 应力去除的越充分和均匀。因此, 首先装炉量要合适, 其次工件应置于热处理炉的有效加热区内。

第二, 配炉时尽可能将壁厚和结构与转子机座较为接近的工件装为一炉, 以便选择合适的工艺规范。

第三, 工件的排列和支撑应有利于工件均匀加热和炉内气氛的正常流通; 若分层装应遵循“大不压小”、“重不压轻”的原则, 避免工件在自重活压力的作用下产生变形。

第四, 工件应调平, 悬空的部位应予以支撑; 工件上的方变形拉筋保留至退火出炉。

(2) 退火曲线 结合相关标准及生产实际情况, 制定的焊后退火曲线如图8所示。

第一, 升、降温阶段以炉温为准, 保温阶段已件温为准; 工件200℃入炉; 控制降温速度 $\leq (60 \pm 10) ^\circ\text{C}/\text{h}$, 避免转子机座在降温过程中因形成温度梯度产生附加应力而降低退火效果, 工件150℃出炉后空冷。

第二, 装焊时防变形的拉筋退火后采用气割、气刨并留1~2mm打磨量方式去除, 并进行MT检测。

第三, 对转子机座的装焊尺寸进行检查, 用肉眼或低倍放大镜检查焊缝有无裂纹。合格后清理工件并进行喷砂喷漆等防腐处理。

转子机座焊接件成品如图9

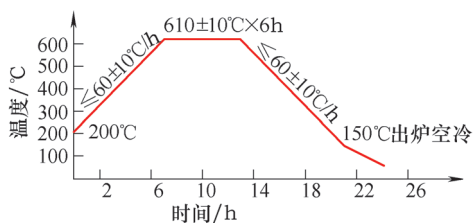


图8 焊后退火曲线



图9 2.5MW转子机座成品

所示。

6. 结语

(1) 转子机座筒体成形并校圆后, 两端支撑进行中间消除应力处理 (ISR), 能有效的去除了卷圆及火焰矫正产生的残余应力, 防止后续在焊接过程中残余应力的叠加引起转子机座产生严重的焊接变形。

(2) 在转子机座铆焊过程中, 通过采取控制装配间隙、选择合理的坡口形式、控制熔敷金属的填充量、焊前预热焊后换冷、选择合理的焊接顺序及控制焊接热输入等措施, 可有效控制焊接应力和变形。

(3) 在退火过程中专业人员对转子机座装炉、升温、保

温、降温等过程进行严格的监控, 确保热处理过程受控, 可有效去除80%左右的焊接残余应力。

综上所述, 通过对转子机座整个铆焊过程中的关键点进行详细的技术总结并应用于生产实际, 使得转子机座退火前后装焊尺寸一次交检合格率达95%以上, 从而保证转子机座的加工精度, 为永磁直驱风力发电机的批量化生产打下坚实的基础。

作者简介: 王庆伟, 东方电气集团东方电机有限公司。

MW 20170621