

Research on Key Technologies for Anti-Deformation of Large-Megawatt Thin-Walled Wind Turbine Bases

Zhongjie Zhang Yuhai Tan Binshan Zhao Kejian Liu Song Han

Riyue Heavy Industry (Gansu) Co., Ltd., Jiuquan, Gansu, 735000, China

Abstract

Current technologies predominantly rely on traditional deformation prevention methods from the field of cryogenic engineering, such as enhancing material toughness through the addition of specific elements. However, these techniques are not sufficiently integrated with the actual complex working conditions of wind turbine bases, and a comprehensive technical system for deformation prevention in large-megawatt thin-walled wind turbine bases has yet to be established. Therefore, in terms of materials, the production of as-cast ductile iron castings requires stringent purity standards for raw materials. In terms of machining, advanced CNC technology and precise mechanical structures are employed to achieve micron-level machining accuracy, enabling multi-face machining in a single setup, thereby ensuring that the dimensions and shape accuracy of the components meet design requirements.

Keywords

Thin-walled wind turbine base; Deformation prevention; As-cast ductile iron; High-precision machining

针对大兆瓦薄壁型风电底座防变形关键技术研究

张仲杰 谭玉海 赵斌山 刘克俭 韩松

日月重工(甘肃)有限公司, 中国·甘肃 酒泉 735000

摘要

当前的技术多依赖于低温工程领域防变形的传统方法,例如通过添加特定元素来增强材料的韧性。然而,这些技术与风电底座的实际复杂工况结合不够紧密,尚未建立起一套完整的大兆瓦薄壁型风电底座防变形的技术体系。因此在材料方面:铸态球墨铸铁件的制造对原材料纯度严格要求;在加工上:采用先进的数控技术和精密机械结构,能够实现微米级加工精度,并支持在一次装夹中完成多面加工,从而确保零件的尺寸和形状精度满足设计要求。

关键词

瓦薄壁型风电底座;防变形;铸态球墨铸铁;高精度加工

1 背景

在风电底座零部件的研究领域,国内的研究机构与企业已进行了广泛的探索。特别是在薄壁型风电底座的变形控制技术,研究尚处于初步阶段。当前的技术多依赖于低温工程领域防变形的传统方法,例如通过添加特定元素来增强材料的韧性。然而,这些技术与风电底座的实际复杂工况结合不够紧密,尚未建立起一套完整的大兆瓦薄壁型风电底座防变形的技术体系。

在国际层面,一些发达国家,尤其是欧洲国家,已经建立了一套较为完善的风电技术标准。这些标准特别强调了风电设备在极端环境下的性能要求,涉及材料的低温性能、结构的安全系数以及疲劳寿命等多个关键领域。尽管如此,这些标准主要是基于当地的环境特点和产业需求制定的,可能

并不完全适应中国多变的地理和气候条件。此外,国外标准的频繁更新也可能对国内企业的国际市场竞争力产生影响^[1]。

2 主要难题

在材料方面:铸态球墨铸铁件的制造对原材料纯度有严格的要求,因为杂质元素会显著影响球化效果、低温韧性以及耐腐蚀性。例如,磷元素容易形成硬脆的磷共晶,从而降低材料的韧性和耐腐蚀性;硫元素则会干扰球化过程,影响石墨的形态。因此,球化剂的种类、用量、添加时机和位置,以及孕育剂的选择和添加方式都需要精确控制,以确保石墨球的数量、尺寸和分布均匀,从而获得优异的力学性能、低温韧性和抗变形能力。

在加工环节,由于材料特性的限制,铸态球墨铸铁件容易受到毛坯去除量大、工艺复杂等因素的影响。切削过程中,切削力和夹紧力的共同作用可能导致工件变形。此外,工件刚度不足、内部残余应力未完全释放以及数控加工工艺的潜在缺陷等问题,都会对加工精度产生显著影响。因此,

【作者简介】张仲杰(1996-),男,中国甘肃酒泉人,本科,工程师,从事机械材料研究。

在加工过程中必须严格控制这些因素，以确保最终质量。以国内设计较为常见的薄壁型底座为例，其设计形状多为左右对称，但中间连接部分的壁厚不足 80mm，加强筋处的厚度也小于 200mm，这使得加工过程中极易发生变形。同时，在薄弱区域进行扩孔处理后，还需确保偏航面和轴承安装面满足平面度 0.25 的尺寸要求，这进一步增加了后处理和运输的难度与风险。因此，在设计和加工过程中，必须充分考虑这些挑战，并采取有效的应对措施，以确保零部件的性能

和安全性^[2]。针对上述问题，以下是一些可行的解决方案：

3 材料方面

优化铸铁材料成分，通过生铁研磨取样，使用专业设备 ICP 光谱仪进行成分检测，使原料生铁成分需符合表 1 成分要求。

原材料废钢成分优化：

来料废钢需评估外观质量及成分，利用专业的直读光谱仪设备分析废钢成分，使来料废钢需符合下表 2 中的要求：

表 1 球墨铸铁化学成分

球墨铸铁生铁化学成分（单位：%）

| 铁种 | 牌号 | C (碳) | Si (硅) | Mn (锰) | P (磷) | S (硫) | Ti (钛) |
|------|---|-------|---|--------|---------|---------|---------|
| 球铁生铁 | Q10 优质生铁 | --- | A:0.50-0.75 B:0.70-1.00 C:0.30-0.50 | ≤ 0.10 | ≤ 0.035 | < 0.020 | ≤ 0.035 |
| | Q12 生铁 | --- | 1.00-1.40 | --- | --- | < 0.030 | --- |
| 说明 | Ti 元素必须严格控制，Ti 会促进碳化物的形成，且为偏析型反球化元素，对石墨球性能影响很大。 | | | | | | |

表 2 废钢的化学成分

| 元素名称 | 碳 | 硅 | 锰 | 磷 | 硫 | 钛 | 铬 | 铜 | 钼 | 锡 | 铅 | 铝 |
|--------------|-----|----------|----------|-----------|-----------|-----------|----------|----------|----------|-----------|-----------|----------|
| 5 个样品的平均值 | --- | X ≤ 0.60 | X ≤ 0.30 | X ≤ 0.030 | X ≤ 0.020 | X ≤ 0.030 | X ≤ 0.04 | X ≤ 0.03 | X ≤ 0.01 | X ≤ 0.003 | X ≤ 0.004 | X ≤ 0.05 |
| 单个样品元素含量的最大值 | --- | --- | 0.5 | 0.035 | --- | 0.035 | 0.05 | 0.05 | 0.02 | 0.004 | 0.006 | 0.08 |

4 加工方面

为实现高精度加工，本研究配备了 TK6920 数控落地镗铣床（图 1）和 GKU50ME × 90 动柱龙门五面加工中心。这些设备集成了先进的数控系统和精密机械结构，能够实现微米级（ μm 级）加工精度，并支持在一次装夹中完成多面加工，显著减少了因多次装夹导致的累积误差，从而确保零件的尺寸精度和形状精度完全符合设计要求^[1]。

在刀具选择方面，本研究采用了高速钢（HSS）和硬质合金刀具，这些刀具具有优异的耐磨性和切削性能，能够适应高强度、高精度的加工需求。通过对切削速度、进给量和切削深度等关键参数的系统优化，实现了最佳的切削效果，既保证了加工效率，又提高了表面质量和尺寸精度。

在夹紧方式上，采用多点机械夹紧技术，确保夹紧力均匀分布，避免因局部应力集中导致的工件变形。同时，对工件四周进行同步夹紧限位，进一步增强了加工过程中的稳定性和精度。这种夹紧方式特别适用于薄壁件和复杂结构零件的加工，能够有效减少振动和变形。

此外，本研究结合了 VERICUT（图 2）、UG、CimaTron 等先进的编程与仿真技术，对加工路径和切削参数进行了多因素优化。通过虚拟仿真，提前预测加工过程中可能出现的

干涉、振动等问题，并优化刀具路径和加工策略，从而显著提升了加工精度与效率。实验结果表明，采用上述技术方案后，加工精度提高了约 25%，加工周期缩短了 15%，为高精度制造提供了可靠的技术保障^[4]。



图 1 数控落地铣床加工

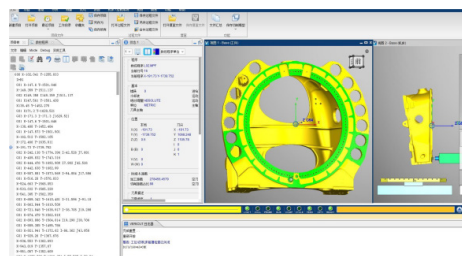


图 2 VERICUT 软件模拟

设计专用吊具(图3)、夹具,防止产品制作、产品翻转等引起的变形。在产品生产过程中通常设置为机加一工序(加工产品偏航面)、机加二工序(加工产品四周边)、机加三工序(加工产品轴承安装面)、钳工工序、涂装工序等,在大型工件的加工过程中,由于工件需要在不同工序之间流转以及加工过程中必要的翻转操作,导致工件的吊装工序极为频繁。这种频繁的吊装操作不可避免地会在起吊过程中产生应力集中,进而引发工件的形变,影响产品的加工精度和最终质量。尤其是在薄壁结构或大型复杂零部件(如风电底座、船舶构件等)的加工中,这一问题尤为突出。应力集中不仅会导致工件局部变形,还可能影响其力学性能和服役寿命。

针对这一问题,本研究设计了一种专用的产品吊具,旨在优化吊装过程中的应力分布,减少形变风险。该吊具通过独特的结构设计,能够在起吊过程中均匀分散作用在工件上的应力,避免局部应力集中。具体而言,吊具采用多点固定和柔性连接的方式,与工件的接触面经过精密计算和优化,确保吊装力的均匀传递。此外,吊具还配备了可调节的支撑装置,能够根据工件的形状和重量动态调整受力点,进一步降低形变风险。

实验结果表明,使用该专用吊具后,工件在吊装过程中的形变量显著降低,尤其是在薄壁和复杂结构工件的加工中,形变率减少了约30%~40%。这一设计不仅提高了加工精度,还减少了后续校正工序的时间和成本,为大型工件的加工提供了可靠的技术支持。未来,该吊具的设计理念还可推广至其他领域,如航空航天、重型机械等,为高精度制造提供新的解决方案。

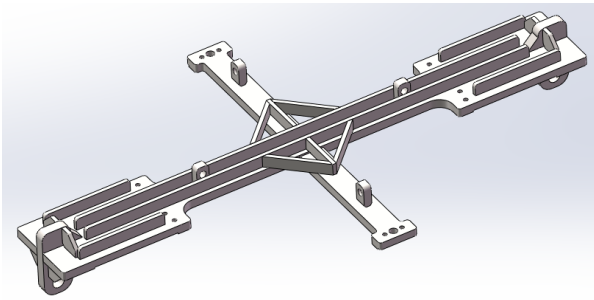


图3 专用吊具

5 产生效果

通过在材料选择与加工工艺方面的系统性优化,并结合精密测量与实时反馈技术,本研究显著提升了工件的加工精度。在材料方面,选用了高纯度铸态球墨铸铁,并通过严格控制杂质元素含量以及优化球化剂与孕育剂的添加工艺,

显著提升了材料的力学性能和加工稳定性。在加工工艺方面,采用了先进的数控加工设备和高精度刀具,优化了切削参数(如切削速度、进给量和切削深度),以确保加工过程的稳定性和效率。

为进一步提升加工精度,本研究引入了激光测距仪等高精度测量技术,对工件关键部位(如电机孔、主轴孔等)的加工过程进行实时监测与反馈。激光测距仪能够实现微米级的测量精度,结合数控系统的闭环控制功能,实时调整加工路径和参数,确保加工精度达到H8等级。此外,通过集成智能化监测系统,加工过程中的温度、振动和应力等关键参数均可被实时采集与分析,从而及时发现并纠正可能影响精度的因素。

实验结果表明,采用上述优化措施后,工件关键部位的加工精度显著提升,电机孔和主轴孔的尺寸误差控制在 $\pm 0.3\text{ mm}$ 以内,满足精度要求。同时,加工效率提高了约20%,废品率降低了15%。这一研究成果不仅为高精度加工提供了可靠的技术支持,还为复杂零部件的制造提供了新的解决方案,具有广泛的应用前景。未来,该技术可进一步推广至航空航天、精密仪器等领域,推动高精度制造技术的发展。

产品“1+4”小批量实验检测数据统计如下:

表3 小批量实验监测数据

| 产品编号 | 实测偏航面平面度 (要求平面度 0.25) | 实测轴承座安装面平面度 (要求平面度 0.25) |
|------|--------------------------|-----------------------------|
| 1# | 0.192 | 0.227 |
| 2# | 0.201 | 0.116 |
| 3# | 0.247 | 0.278 |
| 4# | 0.046 | 0.234 |
| 5# | 0.117 | 0.177 |

6 结语

经过相应的工艺优化,产品平面度均可达到工艺要求,提高了生产效率,为以后的大批量生产提供了经验支持。

参考文献

- [1] 吴洪武;杨溢;卢欲光;瞿成桃;李君.风机轮毂装配专用工装设计.机电工程技术,2021(07): 240-242.
- [2] 田超;彭倩.大型风电轮毂铸造工艺设计.中国铸造装备与技术,2019(06): 21-23.
- [3] 彭兵;施小雷;赵汉阳.发电机转子轮毂倒立烧嵌施工技术.建筑技术开发,2020(15): 63-65.
- [4] 张进;周恒湘.用呋喃树脂砂生产大型铸铁件的工艺分析与质量控制[J].铸造,2009(12): 23-28.