薄壁风电轴承保持架加工变形控制技术分析

韩泳佳

（江苏神意科技制造有限公司，江苏 泰州 225327）

摘 要 薄壁风电轴承保持架多为铝合金或黄铜等材质，加工时易受切削力、热应力等耦合作用，出现局部塌陷等变形问题。本文以大型风电轴承保持架加工项目为例展开研究，深入剖析了薄壁机加工变形的成因，论述了大直径薄壁环件机加工变形控制技术，具体涉及专用夹具夹紧力优化、去应力工序路线制定等关键内容。经实践验证，该项目形成的系统化加工方案能够有效解决薄壁风电轴承保持架加工过程中的变形难题，大幅提升了工件制作的合格率。

关键词 薄壁环件机；磁力底座；夹紧力优化；热处理；加工应力

中图分类号：TH133.33；TG75 **文献标志码**：A DOI：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.30.005

0 引言

随着我国风电产业的快速发展，大型风力发电机组对核心部件的性能及可靠性均提出了更严格的要求。其中，轴承保持架作为风电轴承的关键组件，承担着引导滚动体运动等重要职能，但该部件结构多为大直径薄壁环件，刚性相对较弱，在车削等机械加工过程中，易受切削力等多重因素耦合影响产生变形，导致部件尺寸出现形状失真等情况，一定程度上制约了产品的最终装配精度。本文将大型风电轴承保持架加工项目作为研究对象，结合薄壁机加工变形的内在机理，探索大直径薄壁环件机加工变形控制技术的应用路径，对提升同类大型薄壁环件的精密制造水平具有重要的现实意义。

1 案例项目背景

1.1 基本情况

本次大型风电轴承保持架加工项目订单数量为 236 件，共计 149 万元。该部件属于大直径薄壁环件精密制造部件，但此次制造的部件存在直径大、壁厚小等特点，对应的加工难度较大且交付时间也较为紧张，这对产品的生产工艺水平提出了较为严苛的挑战。面对上述挑战，项目围绕薄壁件加工变形问题展开了系统分析，深入研究了变形的形成机理与影响因素，据此对专用夹具的夹紧力进行了优化设计，避免因装夹力不当而诱发工件变形；同时制定了针对性的去应力工序路线，有效消除了切削加工产生的残余应力。通过上述技术措施的综合实施，从装夹、切削到后处理各环节形成了完整的变形控制体系，为项目按期高质量交付提供了可靠的技术支撑。

1.2 工艺分析

此次制造的薄壁风电轴承保持架，采用的是 42CrMo4，此类材质在经锻造及热处理后，工件会存在毛坯残余应力，外加构件径厚比大、整体刚性偏弱，会进一步破坏环体刚度的连续性，加工过程中易产生椭圆畸变、平面翘曲、局部塌陷等变形缺陷。在进行车削工序时，需合理控制夹紧方式，规避径向夹紧带来的强迫变形，降低卸夹后的回弹误差，对应的切削参数也需根据材料特性进行合理控制，严格控制加工工艺的切削力与切削热，以减少让刀现象与表层残余应力的累积。在此基础上，工件加工后，需安排应力释放处理工序，抑制工件后续时效的变形问题，以持续保持架圆度、平面度等关键参数的达标效果，使其能够充分满足风电轴承的装配使用要求。

2 薄壁机加工变形成因剖析

项目涉及制造的两款产品，对应直径分别为 1 700 mm 与 1 900 mm，壁厚分别是 16 mm 与 20 mm，详情如表 1 所示。此类产品的径厚比值较大，构件整体结构刚度薄弱，圆度控制要求需控制在 1.4 mm 以内。在常规机加工工艺条件下，工件易产生多源耦合变形：一是在装夹阶段，工件受径向夹紧力影响，环体会产生弹性强迫变形，导致工件在加工时尺寸看似达标，但在卸除夹具后会发生回弹，造成圆度超差。二是切削过程切削力带来的让刀效应，断续切削形成的交变冲击，

作者简介：韩泳佳（1988-），男，本科，工程师，研究方向：机械制造。

会进一步引发工件的局部退让。三是切削热形成的周向温度梯度，会在工件加工去除材料阶段，打破毛坯原有的应力平衡，而残余的应力会重新释放，叠加其余外界因素的影响，致使工件的圆度指标难以满足设计阈值。

表1 产品规格详情表

批号	名称	规格（mm）	材质	计划数量
1	锻件	φ1758×φ1598×t188	42CrMo4	118
2	锻件	φ1919×φ1702×t252	42CrMo4	118

3 大直径薄壁环件机加工变形控制技术

3.1 磁力底座论证与排除

针对常规装夹工艺下薄壁环件易出现回弹、圆度超差等实际问题，项目开展了磁力底座精加工工装方案的专项论证。该类薄壁环件径厚比大、刚性差，若沿用传统三爪卡盘或端面压紧方式，夹紧力集中易导致工件受力不均而变形。经综合比选，确定采用全域均匀吸附的磁力底座装夹方案，以面接触替代传统点式、环式夹紧结构，使工件端面受力均匀分布，消除局部集中应力，从根源上规避强迫变形与让刀变形问题，有效保障了薄壁环件的加工精度与稳定性。但结合客户实际的技术要求，并与客户深度沟通确认后，得知此次42CrMo4材质风电保持架产品，需严禁一切带磁性物件直接接触工件，且产品终检设置了严格的剩磁专项检验项目，明确规定工件加工后不允许存在残余磁性，否则会影响轴承装配精度、运行稳定性、服役寿命等[1]。在此背景下，若采用磁力底座加工，工件加工过程会被磁化，产生持续性剩磁。若要满足质检标准，需配套增设专业去磁设备或专属去磁工序等环节，会额外增加设备采购、工序工时、人工检测等多项成本。因此，综合项目订单体量、交付周期、整体生产成本管控要求等多个方面，认为新增去磁工艺的投入成本过高、性价比较低且无实际落地价值，故摒弃了磁力底座的装夹方案。

3.2 专用夹具夹紧力优化

针对此次1 700 mm、1 900 mm大直径薄壁风电轴承保持架的产品特性，项目开展了装夹受力方式专项优化改进工作。根据传统大型立车四爪装夹工艺以径向向内夹紧为主要受力形式的装夹逻辑，深度剖析夹紧力的直接作用力点位，明确工件易产生径向挤压形变等情况的根本原因，摒弃传统径向夹紧模式，规避径向变形缺陷，创新采用虎钳式专用夹具，用于完成精加工的装夹，以实现夹紧力的结构性优化[2]。该方案主要是使用虎钳作为专用夹具，利用虎钳的工作原理，将夹紧作用力由传统的圆周径向向内挤压，转变为针对工件壁厚的侧向夹持固定。此方式在实际的装夹过程中，能够利用虎钳精准夹持环件的侧壁壁厚位置，全程无任何径向压紧力作用于工件圆环面，从根源上避免工件薄壁环体因径向受力产生的弹性变形、塑性凹陷或后续回弹变形等问题。

虎钳式的夹持点位相对稳定，受力也较为均匀，可有效约束工件加工过程中的微抖动与让刀现象，大幅改善大径薄壁件切削时的应力分布状态，规避断续切削带来的形变偏差。同时，此次受力优化方案能够在无需接触磁化设备，不额外增加工艺成本的情况下，适配产品的无磁加工要求，既能稳定保障工件加工后的圆度精度，完美适配此次大直径薄壁风电保持架的精加工变形控制需求，还能充分满足客户对工件加工的特殊需求。

3.3 去应力工序路线制定

由于此次加工工件所用材质较为特殊，存在工件加工应力集中等工艺难点，所以项目经过多轮工艺的迭代优化，最终确定了粗车、去应力、半精车、放置时效、精车的阶梯式应力释放加工工序路线，以保障产品圆度等关键形位精度能够满足相关技术标准。此工序路线的制定主要以分层切削、逐级释压为核心加工思路，从根源拆解并消除工件加工的残余应力，能够有效规避薄壁环件加工及后续存放或检测过程中的形变问题。其中，粗车工序会优先快速去除工件中的大部分加工余量，打破锻造、热处理毛坯原始的应力平衡状态，将加工时产生的大量切削残余应力，再利用后续专项去应力退火工艺进行消除，解决毛坯初始应力与粗加工应力叠加堆积的问题，避免前期应力遗留导致的后期变形偏差[3]。当工件完成去应力处理后，再对其进行半精车加工，进一步均匀修正工件余量、修整初步形位误差，小幅释放二次加工产生的轻微应力，缩减精加工的切削余量，降低精车切削的载荷。

半精车后增设的自然放置时效工序，能够让工件内部残留的微量应力充分缓慢均匀地释放，规避应力瞬时集中释放造成的扭曲或椭圆变形等问题。经以上工艺打磨，最后精车精加工面临的工件整体应力状态趋于稳定，切削余量小且切削力弱，从而显著降低因切削热或机械力诱发的二次变形风险。

3.4 加工精度与变形控制

鉴于两款薄壁风电轴承保持架对应成品需满足外圆、内孔直径 Φ±0.5 mm、高度 ±0.2，通过上述制定的工件去应力工序路线，以粗精分工序逐级消减变形。在实际的制造过程中，对锻造后工件进行正火细化组织、均匀基体，以稳定材料的内应力。粗车阶段，采用大切削用量快速去除大部分余量，重点在于均衡材料分布并初步修正几何形状，此时不过分追求表面质量与极限尺寸精度，允许变形充分显现[4]。针对去应力处理的工件，则将粗加工累积的残余应力使用退火消除，阻断其在薄壁状态下集中释放，再以较小余量的半精车搭配静置 24 小时工序，使工件的残余应力能够继续缓慢释放，促进工件的变形问题充分外显。此时再搭配小余量的精车锁定工件的最终尺寸，将总变形压缩在精车可修改的范围内。

在此基础上，对工件加工的切削参数进行分级控制，粗车采用 R2.4 大圆弧角刀，进给≤ 15 mm/min，转速≤ 30 r/min，侧重去除效率。精车更换 R0.8 小圆弧角刀，进给降至≤ 10 mm/min，减小切削力与切削热，抑制让刀与热变形。装夹精度随工序递进收紧，粗车找正允差 0.5 mm，调头收紧至 0.3 mm，精车最终调头装夹内孔精修，保证定位一致、降低装夹强迫变形，确保工件成品能够达到相关精度要求。

3.5 试制验证与生产应用

基于项目前期开展的变形机理分析以及分级去应力的工艺路线规划，开展了产品的试制验证工作。结合两款样件外径分别达到 Φ1758 mm、Φ1919 mm，壁厚仅 16.25 mm、20.25 mm 的实际几何特征，以及工件圆度指标要求控制在 1.4 mm 以内的加工要求，严格按照既定的加工工艺路线实施，各工序执行既定的工艺参数。在实际过程中，重点监控粗车后工件的应力释放状态及精车过程中的尺寸稳定性，并利用专用测量机对完工样件进行全尺寸检测。结果显示两款大直径薄壁保持架的实测样件圆度误差稳定控制在 0.8 mm 以内，优于既定的 1.4 mm 的技术指标要求，同时工件对应的端面平面度与径向跳动也完全符合图纸规定。此次试制验证，进一步确认了上述制定工艺路线的有效性，证明该方案能显著抑制薄壁环件在加工过程中的弹性变形与残余应力释放导致的二次变形。

将该工艺应用于产品的小批量试制阶段，该磁力底座装夹工艺被正式纳入风电保持架产品的生产流程。经连续多批次加工验证，采用新工艺加工的工件在尺寸精度与形位公差方面均表现稳定，相关产品顺利通过交检部门的逐项检验，满足图纸技术要求及客户验收标准。从生产统计数据来看，新工艺的成效主要体现在两个维度：其一，单件加工周期较传统装夹方式明显缩减，主要得益于磁力吸附免去了反复调整夹爪、校准压紧力的辅助操作环节，有效压缩了装夹占用的时间；其二，因装夹变形导致的圆度超差返修率得到有效控制，全域均匀吸附使工件受力状态高度对称，从根源上规避了局部集中应力引发的强迫变形问题，产品一次交检合格率显著提升。上述两方面改善共同推动了生产效率与经济效益的同步增长，既保障了此次风电保持架订单的稳定制造与按期交付，满足了客户对高精度产品的批量供货需求，也为公司后续承接同类大直径、超薄壁复杂结构件的精密加工任务提供了可复制的工艺范本，对企业精密加工技术体系的完善与市场竞争力的提升具有积极的推动作用[5]。

4 结束语

大直径薄壁环件的加工变形控制是提升风电轴承制造质量的关键环节。本文所述大型风电轴承保持架加工项目基于对大直径薄壁环件传统加工工艺的分析，以及对薄壁环件加工变形成因的深度剖析，实施了针对性的技术优化。在此过程中，该项目通过筛选装夹方案，结合专用夹具夹紧力的优化，有效解决了薄壁环件在加工过程中的弹性变形问题，并通过制定针对性的去应力工序路线，高效消除了工件的残余应力。同时，搭配对工件加工精度及变形的合理化控制，成功使工件的加工精度达到了规定标准。最终，经试制验证及生产应用，证实了该工艺方案在抑制薄壁件加工变形、提升尺寸稳定性等方面的显著成效。该项目于规定时间之前完成了高质量的任务交付，实现了产品经济效益与制造质量的双重达标。

参考文献：

[1] 刘晟杰，万光虎，聂延艳，等. 基于 DEFORM 的风电轴承保持架窗口冲裁过程仿真研究 [J]. 机械设计与研究，2025,41(03):272-278.

[2] 黄承志，韩瑜. 镍基高温合金薄壁环件的车削工艺研究 [J]. 锻造与冲压，2025(11):44,46,48.

[3] 赵培振，郑世育，郑广会，等. 再结晶退火在风机主轴轴承保持架中的应用 [J]. 锻造与冲压，2023(06):42-44.

[4] 周雨，胡林荣，王俊伟. 高温合金薄壁环件车削变形控制方案 [J]. 金属加工（冷加工），2025(10):48-51.

[5] 凌利月，程德华，张献国，等. 纯钼薄壁环件加工变形控制研究 [J]. 精密成形工程，2025,17(09):204-211.