

焊接变形对电机零部件装配精度的影响及控制技术

郭彬宇

宁夏西北骏马电机制造股份有限公司 宁夏 石嘴山 753000

摘要:在现代电机制造领域,焊接作为一种高效、经济的连接工艺,被广泛应用于机座、端盖、支架等关键结构件的生产中。然而,焊接过程中不可避免地会产生热应力与塑性变形,即焊接变形。这种变形会直接影响电机零部件的几何尺寸精度、形位公差以及后续的装配质量,进而对电机的运行性能、振动噪声水平乃至使用寿命构成潜在威胁。本文系统分析了焊接变形的产生机理及其在电机典型零部件(如机座、端盖)中的具体表现形式;深入探讨了焊接变形对电机定转子气隙均匀性、轴承同轴度、整机振动等核心装配精度指标的负面影响;在此基础上,从设计优化、工艺改进、过程控制和焊后处理四个维度,全面综述并提出了针对性的焊接变形控制技术。研究表明,通过多学科协同设计、先进焊接工艺应用及智能化过程监控,可有效抑制焊接变形,显著提升电机零部件的装配精度与整机性能,为高精度、高性能电机的智能制造提供理论支撑与实践指导。

关键词:焊接变形;电机零部件;装配精度;气隙均匀性;控制技术

引言

电机作为电能与机械能相互转换的核心装置,其性能直接关系到工业自动化、新能源汽车、航空航天等关键领域的运行效率与可靠性。随着“双碳”目标的推进和高端装备制造业的发展,市场对电机的功率密度、效率、噪声及可靠性提出了前所未有的高要求。在此背景下,电机的制造精度,尤其是核心零部件的装配精度,成为决定其最终性能的关键因素。在电机结构中,机座、端盖、支架等承载与支撑部件通常采用钢板或铸钢材料,并通过焊接工艺进行成形与连接。焊接因其成本低、适应性强、易于实现自动化等优势,在中小型及大型电机制造中占据主导地位。然而,焊接是一个高度非线性的瞬态热-力耦合过程。焊接电弧产生的局部高温(可达数千摄氏度)使焊缝及近缝区金属经历快速加热、熔化、凝固及冷却,导致材料内部产生复杂的残余应力场和不可逆的塑性应变,宏观上表现为焊接变形。这种变形若超出设计公差范围,将直接破坏零部件的几何完整性,导致后续装配困难,甚至引发严重的功能性缺陷。因此,深入研究焊接变形对电机零部件装配精度的影响机制,并发展行之有效的控制策略,对于提升我国电机制造业的核心竞争力具有重要的理论价值与工程意义。

1 焊接变形的产生机理与类型

1.1 机理

焊接变形的本质源于焊接热循环引起的不均匀热膨胀与收缩。根据热弹塑性理论,焊接过程可分为以下几个阶段:在加热阶段,电弧热源作用于局部区域,使

其温度迅速升高至熔点以上。受热区域试图膨胀,但受到周围低温区域的约束,从而在高温区产生压应力。当压应力超过材料在该温度下的屈服强度时,便发生压缩塑性变形。进入冷却阶段后,热源移开,焊缝及热影响区开始冷却收缩。此时,先前已发生压缩塑性变形的区域试图恢复原状,但同样受到周围材料的刚性约束,无法完全自由收缩,从而在焊缝及近缝区形成拉伸残余应力,而远离焊缝的母材区域则形成压应力以保持整体平衡。这种不协调的收缩行为最终导致整个构件产生宏观的永久变形。

1.2 类型

在电机零部件的焊接结构中,常见的焊接变形类型主要包括纵向收缩变形、横向收缩变形、角变形、弯曲变形、扭曲变形以及波浪变形。纵向收缩变形沿焊缝长度方向发生,虽然单次变形量较小,但在长焊缝结构中累积效应显著;横向收缩变形垂直于焊缝长度方向,是影响板件对接或角接头尺寸精度的主要因素。角变形则由于焊缝截面上下或左右加热不均,导致构件向一侧弯曲,这在T型接头或角焊缝中尤为常见,会严重影响端盖或法兰的平面度。当焊缝布置不对称于构件截面中性轴时,收缩力会产生一个弯矩,导致整个构件向焊缝一侧弯曲,这是机座类箱型结构产生整体弯曲的主要原因。扭曲变形通常由焊接顺序不当或结构刚性不足引起,表现为构件沿其长度方向发生螺旋状扭曲,对长筒形机座的危害极大^[1]。此外,波浪变形主要发生在薄板焊接结构中,由于焊缝纵向收缩产生的压应力超过薄板的临界失稳应力,导致板面出现波浪状起伏。这些变形模

式往往不是孤立存在的，而是相互耦合、共同作用，使得预测和控制变得异常复杂。

2 焊接变形对电机零部件装配精度的具体影响

电机的高性能依赖于其内部精密的机械与电磁配合。焊接变形通过改变关键零部件的几何形态，直接或间接地破坏了这种精密配合。

2.1 对定转子气隙均匀性的影响

定转子之间的空气间隙（气隙）是电机电磁能量转换的关键区域。理想状态下，气隙应沿圆周方向均匀分布。气隙不均匀度（通常用最大气隙与最小气隙之差与平均气隙的比值来衡量）是评价电机装配质量的核心指标。机座作为定子铁心的安装基体，其几何精度至关重要。若机座因焊接产生椭圆度（横截面呈椭圆形）或锥度（沿轴向直径变化），将直接导致定子铁心内径随之变形。即使定子铁心本身精度很高，其内径也会被迫贴合变形的机座内壁，从而形成非圆形的磁路。当转子在其中旋转时，气隙会呈现周期性变化，产生单边磁力，引发强烈的1倍频（转频）振动和噪声。与此同时，端盖的止口圆度和平面度同样不容忽视。端盖通过止口与机座配合，并支撑轴承。若焊接导致端盖止口变形，则其与机座止口的配合会出现局部间隙或过盈，使得端盖在装配后无法精确定位。更严重的是，端盖本身的轴承室同轴度若因焊接角变形或扭曲而超差，将直接导致两侧轴承中心线不重合，迫使转子轴线发生偏斜，造成气隙在轴向和周向上的双重不均匀，进一步恶化电机的电磁性能与运行稳定性。

2.2 对轴承系统同轴度与运行稳定性的影响

电机的平稳运行高度依赖于轴承系统的高精度安装。通常，机座两端的轴承室必须保证极高的同轴度，公差常控制在几十微米以内。一旦机座因焊接产生整体弯曲或扭曲变形，这种宏观几何偏差将直接传递至两端的轴承安装孔，使其轴线不再平行或共线。装配后的转子轴系将处于强制弯曲状态，不仅显著增加了轴承的预紧载荷，加速其疲劳失效进程，还会激发高阶模态振动，严重影响电机的动态性能和使用寿命^[2]。尤其在高速或重载工况下，这种由装配误差引发的附加动载荷可能成为电机早期失效的主要诱因。因此，控制机座焊接变形，确保轴承孔的同轴度，是保障电机长期可靠运行的基础。

2.3 对整机装配与密封性能的影响

除了核心的电磁和机械性能，焊接变形还对电机的整机装配效率和防护等级构成挑战。在实际生产中，机座或端盖的局部翘曲、波浪变形常常导致其与其他部件

（如风罩、接线盒、底脚等）在装配时发生干涉。这不仅需要额外的人工修配，延长了生产周期，也增加了制造成本，降低了生产线的自动化水平。更为关键的是，对于IP54及以上防护等级的电机，机座与端盖之间的配合面必须保证良好的密封性。若端盖因焊接产生较大的平面度误差，将无法与机座端面形成连续、均匀的接触，导致密封圈受力不均。在电机运行过程中，持续的振动会使密封界面产生微动，极易造成密封失效，使灰尘、水分等有害介质侵入电机内部，危及绕组绝缘系统安全，最终可能导致电机短路或烧毁。由此可见，焊接变形的控制不仅是精度问题，更是关乎产品功能完整性和安全性的系统工程。

3 焊接变形的综合控制技术

针对上述影响，必须采取系统性的措施，从源头预防、过程抑制到末端补偿，全方位控制焊接变形。

3.1 设计阶段的预防与优化

“好的设计是成功的一半”。在产品初期就融入抗变形理念，是最经济有效的控制手段。首先，焊缝布局应遵循“对称、分散、短小”的原则。尽可能将焊缝对称布置于截面中性轴两侧，使收缩力相互抵消；避免长而连续的焊缝，可采用断续焊代替；同时，合理设计坡口形式，在保证接头强度的前提下减小填充金属量，从而有效降低总的热输入。其次，通过结构刚性增强来提高抗变形能力。在不影响功能和重量的前提下，增设加强筋、隔板或将平板结构改为U型、槽型等封闭或半封闭截面，可以显著提升结构的整体刚性和局部稳定性，有效抵抗焊接应力的扰动，抑制失稳和扭曲^[3]。最后，预留反变形量是一种行之有效的经验方法。基于历史数据、经验公式或数值模拟结果，在零件下料或装配时，预先给构件施加一个与预期焊接变形方向相反、大小相当的初始变形。焊接冷却后，两者相互抵消，从而获得理想的最终形状。这种方法在控制角变形和弯曲变形方面效果尤为显著，已在大型电机机座制造中得到广泛应用。

3.2 工艺过程的精细控制

焊接工艺参数和操作方法是影响热输入和应力分布的直接因素，其精细化控制是抑制变形的核心环节。一方面，应积极推广低热输入焊接技术的应用。例如，气体保护焊（GMAW/MIG, GTAW/TIG）相比传统的焊条电弧焊，电弧更稳定，热效率更高，可精确调控热输入，减小热影响区，从而有效降低变形。对于更高精度要求的场合，激光焊与激光-电弧复合焊凭借其能量密度高、焊接速度快、热输入极小的优势，几乎不产生宏观变形，特别适用于高精度、薄壁零部件的焊接，尽管设备

成本较高，但在高端电机制造中展现出巨大潜力。另一方面，制定合理的焊接顺序至关重要。基本原则是“由内向外、由中间向两边、对称施焊、分段退焊”。通过科学规划焊道的施焊次序，可以引导残余应力的分布，使其相互平衡，避免应力集中和累积变形。例如，在焊接大型电机机座时，应优先焊接内部隔板以建立基本框架，再对称地焊接外部纵缝，并采用分段退焊法以减少热量累积。此外，在焊接过程中使用专用夹具、胎具或点固焊将工件牢固地固定在预定位置，利用外部刚性约束来限制其自由变形，也是一种简单而有效的物理控制手段，但需注意过大的拘束力可能增加焊接裂纹的风险。

3.3 先进的仿真与智能监控技术

随着计算能力的飞速提升，数值模拟与智能传感技术为焊接变形的精准预测与主动控制提供了强大工具。焊接过程数值模拟利用有限元分析（FEA）软件，建立包含热传导、相变、弹塑性力学的多物理场耦合模型，能够精确预测特定焊接工艺下工件的温度场、应力场和最终变形量。工程师可以在虚拟环境中反复试验不同的设计方案和工艺参数，找到最优解，从而在物理试制前就规避潜在的变形风险，大大缩短研发周期，降低成本^[4]。在此基础上，结合机器视觉、激光测距、红外热像等先进传感技术，可以实现对焊接过程的在线监测。实时获取的熔池形态、工件温度分布及微小变形等数据，可被反馈至控制系统，用于动态调整焊接电流、电压、速度等关键参数，形成一个闭环的自适应控制回路。这种智能化的监控方式，能够确保焊接过程始终处于最优状态，将变形控制在设计公差带内，代表了未来焊接制造的发展方向。

3.4 焊后校正与处理

对于已经产生的、超出公差范围的焊接变形，仍可采用焊后处理手段进行修正或缓解。机械校正是最直接的方法，通过压力机、辊床等设备对变形部位施加外力进行冷矫直，适用于塑性较好的材料和较小的变形量，但可能引入新的残余应力，且效率较低。火焰矫正是另

一种传统而有效的技术，它利用氧-乙炔火焰对构件的特定区域进行局部、快速加热，利用其随后的不均匀收缩来抵消原有的焊接变形。这种方法对操作者经验依赖性强，若控制不当，容易造成过矫或产生新的热损伤。此外，振动时效（VSR）与热时效（PWHT）虽不能直接减小宏观变形，但能有效消除或均化焊接残余应力。通过降低残余应力水平，可以显著提高构件的尺寸稳定性，防止其在后续的机加工或长期使用过程中因应力缓慢释放而发生二次变形，从而间接保障了装配精度的长期可靠性，是高端电机制造中不可或缺的后处理工序。

4 结语

焊接变形是制约电机零部件装配精度提升的关键瓶颈之一。本文系统阐述了焊接变形的热-力耦合产生机理，并详细剖析了其对电机定转子气隙均匀性、轴承同轴度及整机装配性能的负面影响。研究表明，单一的控制手段难以奏效，必须采取全生命周期、多维度协同的综合控制策略。未来，随着智能制造技术的深度融合，焊接变形的控制将朝着更加精准化、智能化的方向发展。基于数字孪生的虚拟调试、基于人工智能的工艺参数自优化、以及集成了在线感知与自适应控制的智能焊接机器人系统，将成为解决这一经典难题的新范式。通过持续的技术创新与工程实践，必将推动我国电机制造业向更高精度、更高可靠性的目标迈进。

参考文献

- [1] 吴林, 电机装配工艺. 重庆市, 重庆昆旺电子有限责任公司, 2023-10-20.
- [2] 李佳坤. 电机装配工艺流程优化及工装夹具设计研究[C]//中国智慧工程研究会. 2024人工智能与工程管理学术交流论文集. 杭州英吉士电机有限公司, 2024:94-96.
- [3] 戴云飞, 张颖, 郑兆星, 等. 电机铁芯的自粘接工艺与焊接工艺比较及性能研究[J]. 粘接, 2025, 52(05):5-8.
- [4] 李刚, 关锰, 张艳敏, 等. 热输入对电机支架不同位置V型接头焊接热循环和残余应力的影响[J]. 机械工程材料, 2021, 45(12):84-89.