

Analysis of the Impact of Welding Residual Stress on the Assembly Accuracy of Key Engine Components

Yu Xiao

Guoying Changhong Machinery Factory, Guilin, Guangxi, 541002, China

Abstract

Welding residual stress, a critical issue in the welding process, profoundly impacts the assembly accuracy of engine components. Due to uneven temperature distribution during welding, stress variations across different zones can alter the geometric shape, dimensional precision, and assembly compatibility of parts. This study combines theoretical analysis with experimental validation to explore the mechanisms by which welding residual stress affects engine component assembly accuracy. By comparing residual stress distributions under different welding conditions, the study examines their influence on assembly precision. Results demonstrate that proper control of welding residual stress can significantly enhance both assembly accuracy and overall quality. Based on these findings, recommendations for optimizing welding processes and stress relief measures are proposed, providing theoretical support and practical guidance for improving engine component assembly accuracy and quality. These optimization methods will help mitigate the negative impact of residual stress on assembly accuracy and elevate overall assembly quality.

Keywords

welding residual stress; engine; key components; assembly accuracy; welding process

焊接残余应力对发动机关键部件装配精度的影响分析

肖宇

国营长虹机械厂, 中国·广西 桂林 541002

摘要

焊接残余应力是焊接过程中产生的重要问题, 对发动机关键部件的装配精度影响深远。由于焊接过程中的温度不均匀分布, 不同区域的应力状态会导致部件几何形状、尺寸精度和装配匹配性的变化。本研究结合理论分析与实验验证, 探讨了焊接残余应力对发动机部件装配精度的影响机制。通过比较不同焊接工艺条件下的残余应力分布, 研究了其对部件装配精度的影响。结果表明, 合理控制焊接残余应力可显著提高部件的装配精度和整体质量。基于此, 提出了优化焊接工艺和应力释放措施的建议, 为提高发动机部件的装配精度和质量提供了理论支持和实践指导。这些优化方法将有助于减少残余应力对发动机部件装配精度的负面影响, 提高整体装配质量。

关键词

焊接残余应力; 发动机; 关键部件; 装配精度; 焊接工艺

1 引言

焊接残余应力是由焊接过程中的热循环引起的内部应力, 其在焊接后的部件中以不同的形式存在, 影响着部件的力学性能、疲劳寿命以及装配精度。在发动机的关键部件制造中, 由于其对高精度和高可靠性的要求, 焊接残余应力的控制成为了生产工艺中的一个重要环节。特别是在复杂的发动机部件, 如缸体、缸盖及其他高温部件, 焊接残余应力的存在可能导致尺寸误差、几何变形甚至功能失效。因此, 研究焊接残余应力对发动机关键部件装配精度的影响具有重要的工程意义。

【作者简介】肖宇(1998-), 男, 中国黑龙江佳木斯人, 本科, 助理工程师, 从事焊接技术与工程研究。

本研究主要分析焊接残余应力对发动机关键部件的装配精度的影响, 通过实验与数值模拟相结合的方式, 探讨不同焊接方法、不同焊接参数下焊接残余应力的分布规律, 并结合具体的发动机部件分析其装配精度的变化趋势。研究结果能够为实际生产中焊接工艺的优化、部件装配精度的提升提供理论依据。

2 焊接残余应力的基本理论

2.1 焊接残余应力的产生机制

焊接残余应力的产生主要是由于局部加热和冷却不均匀所引起的温度梯度。在焊接过程中, 热源作用下的加热使得焊接区金属膨胀, 而冷却过程中, 金属的收缩不均匀, 特别是在焊接接头和热影响区(HAZ)附近。这种不均匀的加热与冷却使得不同区域的材料经历不同程度的膨胀和收缩,

导致了部件内部的应力积累。焊接接头由于受到最高温度影响，热输入较高，导致该区域的膨胀最为显著，冷却时又产生较大的收缩，进而形成较大的残余应力。此外，焊接接头的几何形状、热输入的分布以及焊接顺序等因素也会对残余应力的产生影响。由于热膨胀和收缩的不均匀性，焊接过程中的残余应力往往分布不均，严重时可能影响部件的几何精度和机械性能。

2.2 焊接残余应力的分布特征

焊接残余应力的分布具有一定的规律性。通常情况下，焊接接头区域的残余应力最大，这主要是由于热输入较高，导致该区域膨胀和收缩最为剧烈。紧接着，热影响区（HAZ）内的残余应力较大，但随着离开焊接接头的距离增加，残余应力逐渐衰减。热影响区的应力分布受焊接工艺、焊接顺序和冷却速率等因素影响，通常呈现出从焊接接头到远离接头的区域逐渐减小的趋势。在焊接接头外，特别是远离焊接区域的部位，残余应力则逐渐减小，直至接近原始材料的应力水平。残余应力的具体分布情况与焊接参数、材料类型、焊接方法以及焊接顺序等密切相关。例如，较大的热输入和不对称的焊接顺序往往会导致较大的残余应力集中，这些因素共同作用，最终决定了残余应力的空间分布特征。

2.3 焊接残余应力的测量方法

焊接残余应力的测量方法主要有 X 射线衍射法、切割法、孔钻法和应变计法等，每种方法有其独特的适用范围和测量精度。X 射线衍射法是一种非破坏性方法，适用于测量薄壁部件的残余应力，能够提供较高的精度，但对于厚壁材料的应用有一定限制。切割法通过切割样本并测量切割后变形的的方式来推算残余应力，适用于较厚的材料，但该方法为破坏性测试，通常仅限于实验室研究。孔钻法通过钻孔并测量孔周围的应变来推算残余应力，适用于较厚材料的残余应力测量。应变计法则通过在部件上安装应变计，测量焊接过程中的应变变化，能够直接获得应力信息。选择适合的测量方法对于研究焊接残余应力对部件性能的影响至关重要，不同的测量方法各有优势和局限，因此在实际应用中需根据具体情况进行选择，确保测量结果的准确性和可靠性。

3 焊接残余应力对发动机关键部件装配精度的影响

3.1 残余应力引起的几何变形

焊接残余应力直接影响部件的几何形状，尤其是在多次焊接和复杂几何形状的部件中。由于焊接过程中热源分布的不均匀，导致不同区域的温度差异，从而产生不同的膨胀和收缩，进而引发残余应力。这些应力会在部件内部积累，产生翘曲、弯曲、扭曲等形变，严重影响部件的几何精度。以发动机缸体和缸盖为例，在焊接过程中，由于残余应力的作用，这些部件可能出现形变，特别是在焊接接头附近。由于焊接后的应力无法完全消除，残余应力会使部件的几何形状发生变化，进而影响装配精度。几何变形不仅影响部件的

装配精度，也可能使得部件之间的配合出现问题，导致装配困难甚至无法正常装配。因此，焊接过程中需要采取合理的工艺措施，控制残余应力，减少其对几何形状的影响，以保证部件的装配质量和整体性能。

3.2 残余应力对配合精度的影响

焊接残余应力会显著影响部件的配合精度，尤其是在发动机等精密机械的装配过程中。发动机的关键部件，如气缸盖与缸体的结合、轴承座与轴的配合等，都要求高度精确的配合。然而，焊接残余应力的存在可能导致部件形变，从而改变部件之间的间隙。尤其是在焊接接头附近，由于应力分布的不均匀，部件可能发生偏移或不规则变形，导致配合部件之间的尺寸偏差增大。这种尺寸偏差会直接影响装配精度，甚至可能使得部件无法精确安装或造成装配时的干涉，影响发动机的整体性能和可靠性。例如，气缸盖和缸体之间如果因残余应力引起的形变过大，可能无法达到密封要求，进而影响发动机的密封性和运行效率。通过优化焊接工艺、合理控制焊接顺序和参数，可以有效减小残余应力，从而保证部件配合精度和装配精度。

3.3 残余应力与疲劳寿命的关系

焊接残余应力不仅影响部件的几何形状和配合精度，还可能通过影响部件的疲劳性能，间接影响装配精度。残余应力分布的不均匀性可能导致局部应力集中，进而而在高应力区域形成微裂纹，影响部件的疲劳寿命。特别是在发动机等高负荷、循环应力环境下，疲劳破坏可能导致部件的疲劳裂纹扩展，最终导致部件失效。在焊接接头区域，由于温度和应力的剧烈变化，残余应力常常是应力集中源，极易成为疲劳裂纹萌生的起点。在发动机的高温、高压运行环境中，这些裂纹可能导致关键部件的失效，影响发动机的整体可靠性。残余应力过大不仅缩短了部件的使用寿命，也可能在后续的装配过程中加剧部件之间的不匹配，进一步影响装配精度。因此，控制焊接过程中产生的残余应力，优化焊接工艺，减少应力集中，能够有效延长部件的疲劳寿命，确保发动机的长期稳定运行。

4 焊接工艺对残余应力分布的影响

4.1 不同焊接方法对残余应力的影响

不同焊接方法对残余应力的产生和分布有显著的影响。常见的焊接方法包括 TIG 焊、MIG 焊、激光焊接等。TIG 焊接由于其较高的热输入，容易导致较大的温度梯度，从而产生较大的残余应力。MIG 焊接相比之下，由于热输入较小，残余应力相对较低，适用于对残余应力要求较高的应用场景。激光焊接则由于其集中热源的特点，能够精确控制热输入，焊接区的加热与冷却过程更为均匀，从而有效减小残余应力的产生。此外，激光焊接还具有较小的热影响区，这有助于减少焊接过程中热应力的积累。根据不同的工艺要求，选择合适的焊接方法能够有效控制残余应力的分布，从而优化部件的装配精度和性能。

4.2 焊接顺序与残余应力的关系

焊接顺序在多道焊接中对残余应力的分布起着重要作用。合理的焊接顺序不仅能够减少焊接过程中产生的变形，还能有效地控制残余应力的集中。在多道焊接工艺中，焊接顺序的合理安排能够使得焊接过程中产生的热应力相互抵消，降低应力集中现象。例如，采用对称焊接顺序可以使两侧焊接产生的残余应力相互抵消，减少因不均匀加热而导致的变形。此外，合理的焊接顺序还可以使得热源的影响在不同焊接道之间得到平衡，从而有效分散残余应力，减小工件的整体变形和残余应力的影响，确保部件的精度和装配质量。

4.3 焊接参数的优化

焊接参数对残余应力的分布有重要影响，适当优化焊接参数有助于有效控制残余应力的产生。焊接电流、焊接速度、预热温度等因素都会影响焊接过程中热输入的大小，进而影响残余应力的分布。适当降低焊接速度能够减少热输入，进而减少焊接过程中产生的温度梯度，从而减小残余应力的分布。在高精度部件的焊接中，精确控制预热温度也十分重要，适当的预热温度能够降低冷却速率，使得部件在冷却过程中应力产生的速度变慢，减小冷却过程中产生的残余应力。此外，优化焊接电流和热输入，使得焊接区域的温度分布更加均匀，也有助于减小残余应力，提高部件的装配精度和质量。

5 实验与数值模拟分析

5.1 实验方案设计

本研究采用实验与数值模拟相结合的方法，设计了不同焊接工艺条件下的试件，进行焊接残余应力的测量与分析。实验中选取了发动机关键部件的焊接样品，重点关注焊接接头区域的残余应力分布。通过 X 射线衍射法测量试件的焊接残余应力分布，并结合形变测试与装配精度测量，分析焊接残余应力对部件装配精度的影响。形变测试采用激光干涉仪等高精度设备，保证了测试结果的准确性和可重复性。通过这些实验数据，本研究能够评估不同焊接工艺对残余应力分布的影响，并为后续的工艺优化提供基础。

5.2 数值模拟方法

为了深入了解焊接过程中残余应力的分布，本研究采用了有限元分析（FEA）方法，对焊接过程中的热源、材料行为及残余应力进行数值模拟。通过模拟，可以更精确地预测不同焊接参数（如焊接速度、热输入等）对残余应力分布的影响。模拟过程中，考虑了材料的热力学性质、相变效应及热膨胀行为，确保了模拟结果的准确性与可靠性。数值模

拟能够补充实验数据，在无法直接测量的区域提供理论支持，进一步帮助优化焊接工艺，减少残余应力对部件装配精度的负面影响。

5.3 实验与模拟结果分析

实验结果表明，焊接残余应力在焊接接头区域最为显著，且其分布受到焊接工艺参数的影响。随着焊接速度、热输入等参数的变化，残余应力的大小和分布发生了明显变化。具体来说，较高的热输入导致较大的残余应力，尤其是在焊接接头区域。数值模拟结果与实验数据高度吻合，验证了焊接工艺对残余应力分布的影响规律。通过对比不同焊接参数下的残余应力分布，研究表明，优化焊接工艺，尤其是调整热输入和焊接速度，能够有效减小残余应力，从而提高部件的装配精度和整体质量。这为进一步优化焊接工艺提供了理论支持，并为提高发动机部件的装配精度和可靠性提供了有效指导。

6 结语

焊接残余应力对发动机关键部件的装配精度具有显著影响，尤其是在精密装配要求较高的应用中。研究表明，焊接过程中由于温度不均匀导致的残余应力可能导致部件发生几何变形，如翘曲和弯曲，这些变形会直接影响部件的配合精度。焊接残余应力不仅使部件的尺寸发生偏移，还可能引起配合面间隙的变化，影响最终的装配效果。焊接工艺、焊接顺序和焊接参数对残余应力的分布有重要影响。不同焊接方法和焊接顺序会导致残余应力的集中或分布不同，从而影响部件的变形程度和装配精度。因此，合理选择焊接工艺并优化焊接参数，是控制残余应力、减小变形、提高部件装配精度的关键。结合实验与数值模拟的研究方法，能够有效预测焊接工艺对残余应力的影响，并为工艺优化提供理论支持。通过这一方法，能够为焊接工艺的改进提供科学依据，确保发动机关键部件的装配精度和整体质量。

参考文献

- [1] 唐磊,曾一达,郭正华,等.分段跳焊对发动机支架变形和残余应力的影响[J].机械工程学报,2025,61(18):138-150.
- [2] 杨俊.焊接参数及热处理对航空发动机用摩擦焊接头组织及疲劳性能的影响[D].西北工业大学,2020.
- [3] 陈引妮.大型固体发动机壳体外部件焊接裂纹及变形控制技术研究[D].西安理工大学,2015.
- [4] 张熠.基于焊接过程分析的叶片自动焊接修复轨迹规划[D].河北工业大学,2015.
- [5] 刘丽洁.钢桥面板焊接残余应力数值模拟及影响因素分析[D].石家庄铁道大学,2023.