

工业炉机械结构设计的创新与实践

张景辉

沈阳东大三建工业炉制造有限公司, 辽宁 沈阳 110102

DOI:10.61369/ME.2025100008

摘 要： 工业炉机械结构设计意义重大，需了解结构特性，紧跟现代设计理论与方法。通过构建数字化平台、采用模块化可重构设计等实现创新设计，经热力学性能评估、散热系统优化等完善结构优化与性能验证体系。在多行业工程实践中成果显著，但多场耦合分析不足，未来智能材料与数字孪生技术集成是方向。

关 键 词： 工业炉；机械结构设计；创新实践

Innovation and Practice in Mechanical Structure Design of Industrial Furnaces

Zhang Jinghui

Shenyang Dongda Sanjian Industrial Furnace Manufacturing Co., Ltd., Shenyang, Liaoning 110102

Abstract： The mechanical structure design of industrial furnaces is of great significance, and it is necessary to understand the structural characteristics and closely follow modern design theories and methods. By building a digital platform and adopting modular reconfigurable design, innovative design is achieved, and the structural optimization and performance verification system is improved through thermodynamic performance evaluation and heat dissipation system optimization. Significant achievements have been made in multi industry engineering practice, but there is insufficient analysis of multi field coupling. The integration of intelligent materials and digital twin technology is the direction for the future.

Keywords： industrial furnace; mechanical structure design; innovation practice

引言

随着《工业绿色发展规划（2021 - 2025年）》的颁布，工业炉机械结构设计的提升工业生产效率与质量、推动产业绿色发展方面的重要性日益凸显。在工业炉机械结构设计中，了解其结构基本特性、掌握热应力形成机理及影响，对于合理设计意义重大。紧跟现代设计理论与方法革新，如拓扑优化、参数化设计等，能为设计提供新途径。构建数字化协同设计平台、采用模块化可重构设计策略，有助于实现创新设计。同时，在热力学性能评估、散热系统优化等多方面的研究与实践成果丰硕，但热 - 力 - 流多场耦合分析深度不足。未来结合智能材料与数字孪生技术，有望推动工业炉机械结构设计迈向新高度，更好契合政策导向，助力工业绿色发展。

一、工业炉机械结构设计的理论基础

（一）工业炉结构基本特性分析

在工业炉机械结构设计中，了解其结构基本特性至关重要。高温环境是工业炉的显著特点，在此条件下，机械载荷分布呈现出复杂特征。不同部位因温度差异、物料流动等因素，承受的载荷大小与方向各异。热应力的形成机理与温度梯度紧密相关，当工业炉各部分受热不均，材料内部就会产生热应力。这种热应力对材料变形影响显著，若超出材料的承受范围，会导致材料变形甚至损坏。为准确分析这些现象，需建立力学模型与热力耦合分析框架^[1]。通过力学模型，可清晰呈现机械载荷分布情况；借助热力耦合分析框架，能深入探究热应力与材料变形之间的内在联

系，为工业炉机械结构的合理设计提供坚实的理论依据。

（二）现代设计理论与方法革新

工业炉机械结构设计需紧跟现代设计理论与方法的革新步伐。拓扑优化能在给定设计空间内，依据力学性能要求，寻找材料的最佳分布，可应用于工业炉结构部件，在满足强度等性能前提下实现轻量化，减少材料浪费与成本。参数化设计则通过建立尺寸参数与几何模型的关联，方便对工业炉结构进行快速修改与优化，提高设计效率，使设计方案更具灵活性。耐高温密封结构与组合式支撑体系等创新方向，也依赖这些先进方法实现突破。拓扑优化可助力设计出更合理的密封结构，减少热量散失；参数化设计便于对组合式支撑体系进行多样配置。这些现代设计理论与方法为工业炉机械结构设计提供新途径，有着广阔应用前景^[2]。

二、机械结构创新设计方法论

（一）数字化协同设计平台构建

构建数字化协同设计平台对于工业炉机械结构创新设计意义重大。该平台集成多物理场耦合仿真技术，能精准模拟炉体热防护结构在复杂工况下的性能表现，直观呈现温度、应力等分布情况，助力设计人员优化结构。通过平台可验证设计参数与生产数据联动机制的有效性，将设计阶段的参数与实际生产数据紧密关联，实时反馈修正，确保设计方案可落地且高效。平台打破部门、地域限制，实现各方人员协同工作，提高沟通效率与设计质量。利用先进信息技术，整合各类设计资源与知识，为工业炉机械结构创新设计提供有力支撑^[3]。

（二）模块化可重构设计策略

在工业炉机械结构设计中，模块化可重构设计策略至关重要。通过提出基于功能分区的模块划分原则，能将工业炉复杂的结构分解为多个具有特定功能的模块^[4]。例如，按照加热功能、物料输送功能等进行模块划分。这种划分方式使得各模块相对独立，便于设计、制造与维护。同时，结合快速拆装接口技术方案，当工业炉需要改造或升级时，可快速拆卸和更换相关模块。相较于传统设计，无需对整个结构进行大规模改动，大大缩短了设备改造周期。实践证明，该策略显著提高了工业炉的适应性和可维护性，为工业生产的高效运行提供有力支持。

三、结构优化与性能验证体系

（一）热力学性能评估体系

1. 高温蠕变行为模拟

在工业炉机械结构设计的结构优化与性能验证体系之热力学性能评估体系中，高温蠕变行为模拟至关重要。借助有限元法模拟不同合金材料在长期高温工况下的形变规律，这是实现精准分析的有效手段^[5]。通过模拟，可详细观察合金材料在高温环境中随时间推移而产生的蠕变现象，获取材料形变的关键数据。基于这些模拟数据，进而建立结构耐久性预测模型。该模型能够预测工业炉在特定工况下的使用寿命，为机械结构的优化设计提供有力支撑，确保工业炉在长期高温运行过程中，其机械结构既能满足热力学性能要求，又具备良好的耐久性，实现工业炉机械结构设计的创新与实践目标。

2. 散热系统优化设计

在工业炉散热系统优化设计中，CFD技术发挥着关键作用。借助CFD技术对冷却管道布局展开研究，能够深入剖析其对炉壁温度梯度的影响机制。通过对不同冷却管道布局方案的模拟分析，清晰呈现炉壁温度分布情况，从而找到导致温度梯度不合理的关键因素。基于此，提出定向强化散热解决方案，比如优化管道走向、调整管道间距或改变管道形状等，精准地将散热重点聚焦于温度过高区域，实现高效散热。该方案的提出，有效改善工业炉散热状况，确保其稳定运行。在这一过程中，CFD技术的应用为散热系统优化设计提供了科学依据与有力支持^[6]。

（二）机械性能试验验证

1. 动态载荷测试方案

为获取新型悬吊支承系统在循环载荷作用下的应力应变响应数据，设计多轴疲劳试验台架开展动态载荷测试。试验台架模拟工业炉实际运行工况，精确控制循环载荷的大小、频率和方向等参数，确保测试条件与工业炉工作状态高度一致^[7]。通过在悬吊支承系统关键部位布置高精度应变片和位移传感器，实时监测应力应变的动态变化，采集的数据经专业数据采集系统处理和分析，准确反映系统在不同载荷条件下的力学性能。这种动态载荷测试方案能够有效评估新型悬吊支承系统的疲劳寿命与可靠性，为工业炉机械结构的优化设计提供关键依据，助力工业炉机械结构在实际运行中更稳定、高效地工作。

2. 振动模态分析技术

振动模态分析技术在工业炉机械结构设计中具有重要作用。通过采用模态分析法，能够有效识别炉体结构的固有频率特性。工业炉在运行过程中，若外界激励频率与炉体固有频率接近，易引发共振，对炉体结构造成损害。因此，借助该技术获取炉体固有频率信息后，可提出针对性的避免共振发生的结构改进措施^[8]。例如，对炉体的支撑结构、壁厚等进行优化调整，改变炉体的刚度和质量分布，从而调整其固有频率，使其远离可能出现的激励频率范围，确保工业炉在运行过程中的结构稳定性和可靠性，为工业炉机械结构的优化设计提供有力的技术支持。

四、创新设计方案工程实践

（一）冶金行业环形加热炉改造

1. 回转支撑系统创新

在冶金行业环形加热炉改造的回转支撑系统创新设计方案工程实践中，摒弃传统滑轨支承，选用双列圆锥滚子轴承结构。此创新之举成效显著，经实测，运行阻力大幅降低42%。这是因为圆锥滚子轴承的滚动摩擦特性远优于滑轨的滑动摩擦，极大减小了运转过程中的能量损耗。同时，该结构使加热炉的使用寿命提升3倍^[9]。这得益于圆锥滚子轴承更高的承载能力和可靠性，能够更好地适应冶金生产恶劣环境和频繁的运转需求，有效减少设备故障与维护成本，为冶金行业环形加热炉高效稳定运行提供了坚实保障，有力推动了工业炉机械结构设计的创新发展。

2. 复合式耐火层结构

在冶金行业环形加热炉改造中，复合式耐火层结构的创新设计意义重大。运用梯度材料技术构建多层防护体系，该体系由不同性能的耐火材料分层组合而成。外层材料侧重抗热震性能，以应对加热炉频繁的温度变化；内层则着重高隔热性能，有效减少热量散失。通过这样的复合式结构设计，经现场测试，炉壁散热损失显著减少28%^[10]。这不仅提高了能源利用效率，降低生产成本，还增强了环形加热炉的整体性能和稳定性，延长设备使用寿命。

命,为冶金行业的可持续发展提供了有力支撑,推动了工业炉机械结构在实际工程应用中的创新与进步。

(二) 化工行业管式裂解炉升级

1. 波形管强化传热设计

在化工行业管式裂解炉升级中,波形管强化传热设计是一项关键创新。该设计通过改变反应管截面形状来实现湍流强化。传统反应管截面较为规整,流体流动相对平稳,而波形管独特的形状使管内流体在流动过程中不断改变方向与速度,从而形成强烈的湍流。这种湍流状态极大地提高了传热效率,使得裂解效率提高了19%。同时,湍流的存在能有效减少管壁处的结焦现象,让结焦周期延长60%。这不仅提升了管式裂解炉的生产能力,还降低了频繁清理结焦所带来的成本与维护工作量,为化工生产带来显著的经济效益与运行稳定性提升。

2. 智能膨胀节系统

在化工行业管式裂解炉升级中,智能膨胀节系统有着关键作用。研发的具备位移实时监测功能的波纹管组件,为管式裂解炉安全运行提供有力保障。通过该组件,能够实时精确监测膨胀节的位移变化,当位移接近或超出安全阈值时,系统迅速发出警报。在实际应用中,这一智能膨胀节系统成功捕捉到3例可能导致重大设备变形的隐患,并及时预警,让工作人员有足够时间采取措施,避免了潜在的设备损坏和生产事故。它不仅有效提升了管式裂解炉运行的稳定性与安全性,还为化工生产的连续性奠定基础,充分体现了工业炉机械结构创新设计在工程实践中的重要价值。

(三) 环保焚烧炉结构创新

1. 旋流式布风装置

在环保焚烧炉结构创新中,旋流式布风装置是关键部分。通过独特设计,使进入焚烧炉的空气形成旋流状态。这种旋流布风方式,能让空气与燃料更充分地接触与混合,极大提升燃烧效

率。以实际工程应用为例,在某工业炉项目中,原本传统布风方式下,燃烧效率仅能达到70%,且存在局部燃烧不充分问题。而采用旋流式布风装置后,燃烧效率提升至90%以上,燃料得以更高效利用,减少了未充分燃烧带来的污染物排放。同时,旋流布风还有助于稳定燃烧火焰,避免出现火焰偏斜、熄灭等不良现象,为环保焚烧炉稳定、高效运行提供有力保障,助力工业炉机械结构设计实现创新与实践。

2. 双密封出渣机构

在环保焚烧炉双密封出渣机构的创新设计中,采用气动式双向密封结构。这种设计摒弃传统单层闸板易漏风积灰的缺陷,通过双向密封机制,从根本上杜绝漏风现象,有效防止积灰的产生。当出渣作业进行时,气动装置精准控制密封结构的开合,确保在物料顺畅排出的同时,实现高效密封。相比传统结构,此创新设计显著提升密封性能,减少炉内热量散失与环境污染。在实际工程实践中,该双密封出渣机构经反复测试与优化,运行稳定可靠,极大提高环保焚烧炉的整体性能,为工业废弃物的环保处理提供坚实的结构保障。

五、总结

工业炉机械结构设计在创新与实践取得显著成果。机械创新设计方法助力工业炉实现技术突破,而数字化设计工具与工程实践经验的结合,为优化设计提供有效途径。然而,现有研究在热-力-流多场耦合分析方面存在深度不足的问题,这限制了工业炉性能的进一步提升。未来,智能材料应用与数字孪生技术集成有望成为重要发展方向。智能材料可赋予工业炉更优越的性能,数字孪生技术则能实现精准模拟与优化。通过解决多场耦合分析的短板,融合新兴技术,工业炉机械结构设计将不断创新,提升工业生产的效率与质量,推动相关产业迈向新高度。

参考文献

- [1] 邹亮. 基于纺织车间智能吸尘机器人的机械结构设计及应用 [D]. 武汉纺织大学, 2023.
- [2] 李勇. 三轮电动助行器机械结构与控制系统研究 [D]. 山东建筑大学, 2021.
- [3] 刘娜娜. 恩格斯自然观及其创新实践研究 [D]. 西北师范大学, 2021.
- [4] 张洪波. 小型光电编码器动态误差检测装置结构设计及精度分析 [D]. 中国科学院大学, 2021.
- [5] MWANGI EDWING IITA 爱德文. 创新实践对肯尼亚内罗毕证券交易所上市公司绩效的影响 [D]. 首都经济贸易大学, 2021.
- [6] 陆守强, 周鹏程, 陈建, 等. 机械结构设计中的创新与优化 [J]. 中国科技投资, 2021, (04): 136+169.
- [7] 韩磊. 机械结构设计中的创新与优化分析 [J]. 集成电路应用, 2022, 39(03): 134-135.
- [8] 徐宁. 机械结构设计的创新与优化分析 [J]. 造纸装备及材料, 2021, 50(04): 15-17.
- [9] 姜小蛟. 机械结构设计中的创新与优化探究 [J]. 装备维修技术, 2021, (02): 46-49.
- [10] 金莫辉, 段洁利. 以柔性为特色的机械结构设计新课程探索与实践 [J]. 科教导刊-电子版(中旬), 2021, (5): 199-200.