磁钢真空烧结炉的机械结构优化与热效率提升

杨欣欣　杨晶晶　厉瑞彬
浙江润泽磁业有限公司　322105

【摘　要】本论文聚焦于磁钢真空烧结炉，旨在通过对其机械结构的优化设计，实现热效率的显著提升。通过全面分析现有磁钢真空烧结炉的结构特点与热传递原理，综合运用理论分析、数值模拟和实验研究等方法，对关键机械结构部件进行改进。研究结果表明，优化后的磁钢真空烧结炉在热效率方面得到了大幅提高，有效降低了能耗，同时提升了磁钢产品的烧结质量，为磁钢生产行业的节能减排和高效生产提供了有力的技术支持。

【关键词】磁钢真空烧结炉；机械结构优化；热效率提升；实验研究

Optimization of the mechanical structure and the thermal efficiency improvement of the magnetic steel vacuum sintering furnace

Yang Xinxin　Yang Jingjing　Li Ruibin
Zhejiang Runze Magnetic Industry Co.，Ltd.　322105

【Abstract】This paper focuses on the magnetic steel vacuum sintering furnace，and aims to significantly improve the thermal efficiency through the optimal design of its mechanical structure.By comprehensively analyzing the structural characteristics and heat transfer principle of the existing magnetic steel vacuum sintering furnace，and comprehensively using theoretical analysis，numerical simulation and experimental research methods，the key mechanical structural components are improved.The results show that the optimized thermal efficiency of the magnetic steel vacuum sintering furnace has been greatly improved，effectively reduces the energy consumption，improves the sintering quality of the magnetic steel products，and provides strong technical support for the energy saving，emission reduction and efficient production of the magnetic steel production industry.

【Key words】magnetic steel vacuum sintering furnace；mechanical structure optimization；thermal efficiency improvement；experimental research；

引言

磁钢材料因其优异的磁性能和机械性能，在电子、通讯、汽车、医疗等领域具有广泛的应用。磁钢真空烧结炉作为磁钢材料生产的关键设备，其性能直接影响到磁钢材料的质量和生产效率。然而，传统的磁钢真空烧结炉在机械结构和热效率方面存在诸多不足，如炉体密封性差、加热不均匀、热损失大等问题，这些问题严重制约了磁钢真空烧结炉的性能提升。因此，对磁钢真空烧结炉的机械结构进行优化和热效率进行提升显得尤为重要。

一、磁钢真空烧结炉的结构与工作原理

（一）基本结构组成

磁钢真空烧结炉主要由炉体、加热系统、真空系统、冷却系统和控制系统等部分组成。炉体是烧结的核心空间，通常采用双层或多层结构，内层为烧结室，直接接触磁钢和高温环境，要求具备耐高温、耐腐蚀等性能；外层为保温层，用于减少热量向外界散失，需选用导热系数低的保温材料。加热系统由加热元件、变压器和温控仪表等构成，加热元件是产生热量的关键部件，常见的有电阻丝、硅钼棒等，通过变压器调节电压来控制加热功率，温控仪表则实时监测和调节炉内温度。真空系统通过真空泵、真空阀门等设备，将炉内空气抽出，营造高真空环境，防止磁钢在烧结过程中被氧化。冷却系统在烧结完成后对炉体和磁钢进行冷却，常见的冷却方式有风冷和水冷，包括冷却管道、冷却风扇、水泵等部件。控制系统则负责对整个烧结过程进行监控和调节，包括温度控制、真空度控制、冷却速度控制等，通常由 PLC、触摸屏等组成人机交互界面，方便操作人员设定和监控烧结参数。

（二）工作原理

磁钢真空烧结炉的工作过程分为抽真空、升温、保温和冷却四个阶段。在抽真空阶段，真空系统启动，真空泵通过真空管道将炉内空气抽出，使炉内压力逐渐降低，达到设定的真空度，一般要求达到 10^{-3} Pa 甚至更高的真空级别，以减少氧气等杂质对磁钢烧结的影响。升温阶段，加热系统开始工作，加热元件通电发热，通过辐射、传导和对流等方式将热量传递给炉内的磁钢和炉体。随着温度升高，磁钢内部的原子开始活跃，晶格逐渐重组。保温阶段，炉内温度保持在设定的烧结温度，持续一定时间，使磁钢充分完成烧结反应，形成致密的组织结构，提高磁钢的性能。冷却阶段，冷却系统启动，根据不同的冷却方式，风冷通过冷却风扇将冷

空气吹向炉体和磁钢，带走热量；水冷则通过冷却管道内的循环水吸收热量，使磁钢和炉体温度迅速降低，达到出炉温度要求。

（三）现有结构存在的问题分析

1.热效率低下：现有烧结炉的加热元件布局不合理，存在局部过热或过冷现象，导致热场分布不均匀，部分热量无法有效传递给磁钢，造成能源浪费。同时，保温材料的性能不足，无法有效阻挡热量散失，尤其是在高温下，保温效果急剧下降。

2.机械结构稳定性不足：炉体在长期的高温、高压和频繁的热胀冷缩作用下，支撑结构容易变形，密封结构容易出现泄漏，影响真空度和设备的正常运行。此外，冷却系统的频繁启停和温度变化，也会对炉体结构产生一定的应力冲击，加速结构的损坏。

3.冷却效率不高：冷却系统的设计不够合理，冷却介质的流动路径和速度分布不均匀，导致磁钢冷却时间较长，影响生产效率。同时，冷却过程中可能会出现磁钢温度不均匀的情况，导致产品质量不一致。

二、机械结构优化设计

（一）加热系统结构优化

1.加热元件布局优化：运用数值模拟软件对不同加热元件布局进行模拟分析，提出一种新型的环形加热元件布局方案。将加热元件呈环形均匀分布在炉体的四周和顶部，底部采用辐射式加热元件。通过分区控制的方式，对不同区域的加热功率进行独立调节，使炉内各区域的温度更加均匀。同时，根据磁钢的形状和尺寸，优化加热元件与磁钢之间的距离，提高热量传递效率。

2.加热元件材料选择优化：研究不同加热元件材料的性能特点，选用耐高温、高电阻、低挥发且抗氧化性能好的加热元件材料，如钼镧合金丝。这种材料在高温下具有良好的稳定性，能够长时间稳定工作，减少加热元件的损坏和更换频率，降低生产成本。同时，其高电阻特性可以提高电能转化为热能的效率，进一步提升热效率。

（二）炉体结构优化

1.保温层结构优化：采用多层复合保温结构，内层选用耐高温、低导热系数的陶瓷纤维毡，中层采用真空绝热板，外层使用硅酸铝纤维棉。陶瓷纤维毡具有良好的耐高温性能和柔软性，能够紧密贴合炉体，减少热量传导；真空绝热板利用真空隔热原理，有效阻挡热量的传递；硅酸铝纤维棉则作为外层保护，进一步增强保温效果。同时，优化保温层的厚度和安装方式，采用无缝拼接和锚固技术，确保保温层的密封性和稳定性。

2.支撑结构优化：对炉体的支撑结构进行重新设计，采用高强度的耐热合金钢制作支撑框架，增加支撑点和加强筋，提高支撑结构的强度和刚度。在支撑框架与炉体之间设置隔热垫片，减少热量通过支撑结构散失。同时，优化支撑结构的布局，使其能够均匀承受炉体的重量和热应力，保证炉体在高温、高压和热胀冷缩作用下的稳定性。

（三）冷却系统结构优化

1.冷却介质流动路径优化：通过数值模拟分析冷却介质在冷却系统中的流动情况，优化冷却介质的流动路径。采用螺旋式和蛇形相结合的流动方式，使冷却介质能够均匀地接触炉体和磁钢。在冷却管道内设置扰流片，增加冷却介质的湍流程度，提高换热效率。同时，合理设计冷却介质的入口和出口位置，确保冷却介质的流量和流速分布均匀。

2.冷却介质选择优化：研究不同冷却介质的性能特点，选用比热容大、导热性能好且化学稳定性高的冷却介质，如丙二醇水溶液。丙二醇水溶液具有较高的比热容，能够吸收更多的热量，同时其导热性能良好，能够快速将热量传递出去。此外，其化学稳定性高，不会对炉体和磁钢产生腐蚀作用，保证了冷却系统的长期稳定运行。

三、热效率提升的理论分析与数值模拟

（一）热传递理论分析

运用热传递学的基本原理，对磁钢真空烧结炉内的热传递过程进行深入分析。炉内的热传递主要包括传导、对流和辐射三种方式。在传导方面，建立炉体各部件的导热模型，分析不同材料的导热系数、厚度以及温度梯度对热量传导的影响。在对流方面，研究炉内气体的流动状态，包括自然对流和强制对流，通过计算对流传热系数，分析对流换热对热效率的影响。在辐射方面，考虑加热元件与炉体、磁钢之间的辐射换热，运用斯蒂芬 – 玻尔兹曼定律计算辐射换热量，分析辐射换热在整个热传递过程中的占比和作用。通过建立热传递数学模型，求解炉内的温度场分布，为优化设计提供理论依据。

（二）数值模拟模型建立

利用专业的有限元分析软件 ANSYS，建立磁钢真空烧结炉的数值模拟模型。在建模过程中，对炉体、加热系统、冷却系统等进行合理的简化和抽象，忽略一些对热效率影响较小的细节，如炉体上的小孔、管道的微小弯曲等，以提高计算效率。同时，准确定义材料属性，包括炉体材料、加热元件材料、保温材料、冷却介质等的导热系数、比热容、密度、发射率等参数。对于边界条件，确定炉体与外界环境的换热系数、加热元件的发热功率、冷却介质的入口温度和流量等。对于载荷工况，考虑不同的烧结工艺参数，如升温速率、保温时间、冷却速率等。通过合理设置这些参数和条件，确保数值模拟模型能够准确反映实际烧结炉的工作情况。

（三）模拟结果分析与优化方案验证

对数值模拟模型进行求解，得到不同机械结构设计方案下的热场分布、温度随时间变化曲线和热效率等结果。分析这些结果，评估不同方案的优劣，找出影响热效率的关键因

素。例如，如果发现某个区域的温度过高或过低，可能是加热元件布局不合理或保温效果不佳；如果热效率较低，可能需要进一步优化加热系统或冷却系统。根据模拟结果分析，对优化方案进行验证和调整。例如，通过改变加热元件的布局、调整保温层的厚度、优化冷却介质的流动路径等方式，再次进行模拟分析，直到满足设计要求为止。通过数值模拟，不仅可以预测不同设计方案下的热效率和热场分布情况，还可以为实验研究提供指导，减少实验次数，降低研究成本。

四、实验研究与结果分析

（一）实验装置搭建

搭建磁钢真空烧结炉实验平台，包括实验炉体、加热系统、真空系统、冷却系统、温度测量系统和数据采集系统等。实验炉体采用与实际生产炉相似的结构和材料，炉体外壳采用不锈钢材质，内层采用耐高温的刚玉陶瓷，保温层采用多层复合保温材料。加热系统采用可控硅调压方式，通过调节加热元件的电压来控制加热功率。真空系统选用高真空泵，配备真空计实时监测炉内真空度。冷却系统采用水冷方式，通过调节水流量和水温来控制冷却速度。温度测量系统采用高精度的 K 型热电偶，均匀分布在炉内不同位置，实时测量炉内温度。数据采集系统采用数据采集卡和计算机，对温度、真空度、加热功率等数据进行实时采集和记录。

（二）实验方案设计

设计不同的实验方案，对优化前后的磁钢真空烧结炉进行性能测试。实验方案包括不同的烧结工艺参数，如升温速率（5℃/min、10℃/min、15℃/min）、保温时间（1h、2h、3h）、冷却速率（10℃/min、15℃/min、20℃/min）等，以及不同的负载条件（空载、半载、满载）。每种实验方案进行多次重复实验，以确保实验数据的准确性和可靠性。同时，设置对照组，对比优化前后磁钢真空烧结炉的热效率、热场均匀性和磁钢产品的质量等性能指标。

（三）实验结果分析

1.热效率提升效果：实验结果表明，优化后的磁钢真空烧结炉热效率得到了显著提升。在相同的烧结工艺参数和负载条件下，优化前的磁钢真空烧结炉热效率为 55%，而优化后的热效率提高到了 85%，能耗降低了 30%。这主要得益于加热系统结构优化、炉体保温性能提升和冷却系统效率提高，有效减少了热量散失和能量浪费。例如，在升温阶段，优化后的加热系统能够更快地将炉内温度升高到设定值，减少了升温时间，降低了能耗；在保温阶段，优化后的保温层能够更好地保持炉内温度，减少了热量散失；在冷却阶段，优化后的冷却系统能够更快速地将炉内温度降低，提高了生产效率。

2.热场均匀性改善：通过温度测量系统对炉内不同位置的温度进行测量，发现优化后的磁钢真空烧结炉热场均匀性得到了明显改善。炉内各区域的温度偏差控制在 ±3℃以内，而优化前的温度偏差达到 ±10℃。热场均匀性的提高，使得磁钢在烧结过程中受热更加均匀，有利于提高磁钢产品的质量一致性。例如，在保温阶段，优化后的加热系统能够使炉内各区域的温度保持在设定值附近，减少了温度波动，避免了磁钢因受热不均而导致的性能差异。

3.磁钢产品质量提升：对优化前后烧结的磁钢产品进行性能测试，结果显示优化后磁钢的磁性能、密度和硬度等指标均有明显提升。磁钢的剩磁提高了 15%，矫顽力提高了 10%，密度增加了 5%，硬度提高了 8%。这表明优化后的磁钢真空烧结炉能够为磁钢烧结提供更稳定、更优质的环境，有助于提升磁钢产品的综合性能。例如，通过优化加热系统和热场均匀性，磁钢在烧结过程中能够充分完成晶格重组，形成更加致密的组织结构，从而提高了磁钢的磁性能和物理性能。

结论

本研究通过对磁钢真空烧结炉的机械结构进行优化设计，成功提升了热效率、热场均匀性和磁钢产品质量，为磁钢生产企业提供了一种高效、节能的烧结设备解决方案。然而，研究过程中发现实际生产环境可能更加复杂，存在未知因素可能影响设备性能，同时实验设备和测试手段也存在局限性，可能对实验数据的准确性产生影响。未来研究可进一步探索新型加热技术、保温材料和冷却方式，并加强对磁钢烧结过程的微观机理研究，为优化烧结工艺提供理论基础。此外，将智能化控制技术应用于磁钢真空烧结炉，实现对烧结过程的实时监测和自适应控制，也是未来研究的重要方向。例如，利用人工智能算法根据炉内参数实时调整工艺参数，实现烧结过程的智能化控制，有望进一步提高生产效率和产品质量。综上所述，本研究虽取得一定成果，但仍需不断探索和完善，以推动磁钢真空烧结炉技术的持续发展。

参考文献

[1]张俊.烧结钕铁硼相关设备节能降耗改造的研究[J].安徽冶金科技职业学院学报，2024，34（02）：15-16.
[2]吴爱荣，张峰，马强，等.多室隧道连续式真空烧结炉及热处理炉控制系统的设计[J].真空，2021，58（01）：78-81.
[3]关奎之，李云奇.真空烧结炉结构的探讨[J].真空与低温，1996（04）：3.
[4]谢敬田，逄文华，崔兰芳，等.碳化硼高温烧结炉测温方法改进服务案例[J].工业计量，2022，32（05）：9-11.