

钕铁硼行业智能工厂建设与工艺优化自动化实践研究

陈嘉辉

赣州华京稀土新材料有限公司，江西赣州，341000；

摘要：本论文聚焦钕铁硼行业，深入探讨智能工厂建设与工艺优化自动化的实践应用。通过构建基于云-网-端架构的智能工厂体系，融合工业互联网平台、ERP、MES等关键系统，实现生产全流程的自动化与智能化管理；同时，运用智能算法、传感器技术等前沿手段对烧结钕铁硼生产工艺进行深度优化，有效提升产品性能一致性与稳定性，降低能耗与资源浪费。研究成果不仅为钕铁硼行业向智能化、数字化转型提供了系统的解决方案与实践经验，也为先进材料制造领域的技术升级与可持续发展提供了重要参考，对推动行业高质量发展具有重要意义。

关键词：钕铁硼；智能工厂；自动化；工艺优化；智能算法

DOI：10.69979/3060-8767.25.09.016

引言

在现代工业发展进程中，磁性材料发挥着至关重要的作用，而钕铁硼材料凭借其优异的磁性能，成为众多高技术领域的核心基础材料。从智能手机的微型振动马达达到新能源汽车的驱动电机，从大型风力发电机组的核心部件到高端医疗设备的精密磁体，钕铁硼材料的身影无处不在。据相关行业统计数据显示，近五年全球钕铁硼材料市场规模以年均8%的速度增长，预计到2025年市场规模将突破300亿美元，其广阔的应用前景和巨大的市场潜力可见一斑。

1 钕铁硼行业现状与发展需求

1.1 生产工艺的复杂性与挑战

烧结钕铁硼材料的生产工艺是一个多环节、多参数耦合的复杂过程。原料配料环节需要精确控制稀土金属、铁、硼等多种元素的比例，任何成分偏差都可能影响最终产品的磁性能。合金熔炼过程中，需要在真空环境下将原料加热至1300°C-1500°C，使各元素充分熔合，同时要严格控制熔炼温度、时间和搅拌速度等参数，以保证合金成分均匀。制粉环节采用氢爆碎（HD）、气流磨（ACM）等技术将合金锭破碎成微米级的粉末，粉末的粒度分布和形貌对后续成型和磁性能至关重要。成型过程包括模压成型、等静压成型等方法，压制力、压制方式和保压时间等参数直接影响坯料的密度和取向度。烧结过程是决定产品磁性能的关键环节，需要在1000°C-1200°C的高温下进行，温度曲线、气氛控制和冷却速度等参数的微小波动都会导致产品性能差异。退火调磁环

节则通过精确控制温度和磁场，消除内应力，优化磁性能。在传统生产模式下，这些环节大多依赖人工操作和经验判断，存在诸多问题。例如，人工配料容易出现计量误差，导致原料成分波动；在合金熔炼过程中，操作人员难以实时精确控制温度和搅拌速度，可能造成合金成分偏析；在烧结环节，传统的温控设备精度有限，无法满足高精度温度控制要求，导致产品性能不稳定。此外，生产过程中的环境参数如湿度、粉尘等也会对产品质量产生影响，但传统生产模式往往缺乏有效的监测和控制手段。这些问题严重制约了钕铁硼产品质量的提升和生产效率的提高，增加了生产成本和资源浪费。

1.2 智能化转型的迫切需求

随着全球制造业向智能化、数字化方向发展，以及市场竞争的日益激烈，钕铁硼行业面临着巨大的转型压力。一方面，客户对钕铁硼产品的性能一致性和稳定性要求越来越高，传统生产模式下的产品质量波动已无法满足高端客户的需求。例如，在新能源汽车电机领域，客户要求钕铁硼磁体的磁性能波动范围控制在±2%以内，而传统生产方式下的产品磁性能波动往往超过5%。另一方面，环保法规日益严格，对钕铁硼生产过程中的能耗、废水废气排放等提出了更高要求。传统生产模式下能源利用效率低，资源浪费严重，企业面临着巨大的环保压力。

建设智能工厂、实现生产工艺自动化优化，成为钕铁硼行业解决上述问题的必然选择。通过智能化转型，企业可以实现生产过程的精准控制，提高产品质量和生

产效率；利用自动化设备和智能算法，降低人工操作误差，减少资源浪费；同时，通过实时监测和数据分析，优化生产流程，降低能耗和排放，满足环保要求。此外，智能化转型还可以提升企业的管理水平和市场响应能力，增强企业的核心竞争力，推动行业向高质量发展。

2 钕铁硼智能工厂总体设计

2.1 智能工厂架构规划

钕铁硼智能工厂采用云-网-端三层结构设计，构建了一个完整的智能化生产体系。云端作为数据处理和存储中心，负责接收和分析来自工厂各个环节的数据，提供决策支持和远程管理服务。通过部署工业互联网平台，实现数据的集中管理和分析，利用大数据、人工智能等技术挖掘数据价值，为生产优化、设备维护、质量控制等提供科学依据。同时，云端还与企业的管理系统（如ERP系统）以及上层集团平台进行对接，实现企业内部信息共享和协同管理。网络层包括有线光纤网络和无线网络。有线光纤网络主要用于连接关键生产设备、传感器和控制中心，保证数据传输的稳定性和实时性，满足对生产过程精确控制的需求。例如，在合金熔炼炉的温度控制、真空度监测等关键环节，通过有线光纤网络实现数据的高速传输，确保控制系统能够及时响应并调整参数。无线网络则主要应用于移动设备（如AGV、手持终端）和非关键设备的数据传输，提供灵活的通信方式，便于设备的移动和扩展。通过构建工业级无线网络，实现车间内AGV的自动导航、物料搬运和数据交互，提高生产物流的自动化水平。

终端层涵盖了工厂内的各类设备和传感器，包括生产设备（如真空熔炼炉、压机、烧结炉等）、检测设备（如磁性能测试仪、粒度分析仪等）以及环境监测设备。这些设备通过安装智能传感器和控制模块，实现数据的自动采集和设备的远程控制。例如，在真空熔炼炉上安装压力传感器、温度传感器和电流传感器，实时采集炉内压力、温度和电流等参数，并将数据传输至控制系统，实现熔炼过程的自动化控制。同时，终端设备还具备一定的边缘计算能力，能够对采集到的数据进行初步处理和分析，减少数据传输压力，提高系统响应速度。

2.2 系统功能实现

智能工厂通过工业互联网平台及相关APP应用，实

现了生产业务管理与实时数据、生产工艺、业务集成等的深度融合，构建了一个数字化、网络化、智能化的生产管理体系。ERP系统作为企业资源规划的核心，负责企业的采购、销售、库存、财务等管理工作。通过与工业互联网平台对接，ERP系统能够实时获取生产计划执行情况、物料消耗数据等信息，实现对企业资源的优化配置。例如，根据生产订单和库存情况，ERP系统自动生成采购计划，确保原材料的及时供应；同时，根据销售订单和生产进度，合理安排产品发货，提高客户满意度。MES系统（制造执行系统）作为智能工厂的核心系统，负责生产过程的监控、调度和管理。在钕铁硼生产过程中，MES系统根据ERP系统下达的生产计划，自动生成详细的生产任务，并将任务分配到各个生产单元。通过与设备控制系统和传感器的实时通信，MES系统能够实时监控生产进度、设备运行状态和产品质量。例如，在合金粉末压制环节，MES系统根据生产任务要求，自动设置压机的压制力、压制次数等参数，并实时监测压制过程中的压力、位移等数据，确保压制质量。同时，MES系统还具备生产异常报警和处理功能，当检测到设备故障、工艺参数异常等情况时，及时发出报警信息，并提供相应的处理建议，保障生产过程的顺利进行。

WMS系统（仓储管理系统）与MES系统协同工作，实现了物料的智能化管理。在原料仓库，WMS系统根据ERP系统的采购订单和MES系统的生产需求，合理安排原料的入库、存储和出库。通过AGV和自动化仓储设备，实现原料的自动搬运和存储，提高仓储空间利用率和物料流转效率。在成品仓库，WMS系统根据MES系统的生产完成信息，自动安排成品的入库、分拣和发货。同时，WMS系统还具备库存盘点、库存预警等功能，实时掌握库存情况，避免库存积压和短缺。

智能安防系统通过安装摄像头、传感器等设备，实现对工厂安全的全方位监控。对车间内的关键区域（如熔炼车间、仓库等）进行实时视频监控，及时发现安全隐患和异常情况。同时，通过安装烟雾传感器、温度传感器等设备，对火灾、高温等危险情况进行预警，保障工厂人员和设备的安全。智能协同系统则为企业内部各部门之间、企业与供应商、客户之间提供了一个信息共享和协同工作的平台。通过该平台，生产部门可以及时与采购部门沟通原料需求，与销售部门反馈生产进度；

企业可以与供应商实时共享库存信息,优化供应链管理;与客户进行产品质量和交付信息的沟通,提高客户服务水平。

此外,智能工厂建立了工厂数据湖,整合了生产过程中的各类数据,包括设备运行数据、工艺参数数据、质量检测数据、能源消耗数据等。通过对这些数据的深度分析和挖掘,利用大数据分析技术和机器学习算法,实现生产过程的优化、设备故障预测、质量缺陷诊断等功能。例如,通过对烧结炉历史温度数据和产品磁性能数据的分析,建立温度与磁性能之间的数学模型,实现烧结温度的智能优化,提高产品质量。同时,根据设备运行数据的变化趋势,预测设备故障发生的可能性,提前安排维护计划,减少设备停机时间,提高设备利用率。

通过以上系统的协同工作,智能工厂实现了生产过程的数字化管控、网络化协同和智能化生产,达成了提质、增效、降本、减存、安全、双碳等智能工厂目标。生产效率提高了30%以上,产品合格率提升至98%,能源消耗降低了20%,库存周转率提高了40%,同时有效减少了生产过程中的安全事故和环境污染。

3 烧结钕铁硼自动化生产系统构建与工艺优化

在产线自动化方面,钕铁硼智能工厂实现了设备数据采集、集中控制与智能管理的全面集成。在设备数据采集环节,采用国产先进设备进行PLC数据、传感器数据、环境数据等的采集,支持有线和无线两种传输模式,确保数据采集的灵活性和可靠性。例如,在真空熔炼速凝炉上,安装了压力传感器、温度传感器、电流传感器、铜辊转速传感器等多种传感器,实时采集炉内气压、水温水压、送电电流/电压/功率、铜辊转速、测温温度等数据。这些传感器采集到的数据通过有线或无线网络传输至数据采集系统,为生产过程的监控和控制提供基础数据。

设备集中控制通过智能集中控制模块,将各真空熔炼炉等关键生产设备集中到中央控制室进行统一操控,实现了从传统分散管理向一体化智能管理的转变。在中

央控制室,操作人员可以通过监控屏幕实时查看各设备的运行状态和工艺参数,对设备进行远程控制和操作。例如,操作人员可以在中央控制室远程启动或停止真空熔炼炉,调整熔炼温度、电流等参数,查看熔炼过程的实时视频画面。同时,数据采集系统将采集到的设备运行数据和工艺参数实时显示在监控屏幕上,当检测到参数异常时,系统自动发出报警信息,提醒操作人员及时处理。

设备智能控制系统是自动化生产系统的核心部分,它可以根据客户订单的要求,自动生成对应的工艺技术参数。在生产前,系统根据订单产品的规格和性能要求,结合历史生产数据和工艺模型,计算出最佳的工艺参数组合,如合金熔炼温度、时间,粉末压制力、保压时间,烧结温度曲线等。这些参数生成后,由当班班长进行审核确认,确保参数的准确性和合理性。审核通过后,当熔炼炉下料完成并由现场操作员清理设备关键部位密封圈后,系统即开始一系列自动化操作,包括抽真空、检测压升率、自动升电流烘炉、充氩气、高温熔炼、测温、出汤、破真空、开盖等。所有操作均实现一键启动,系统对生产过程中的工艺参数进行实时监控和自动调整,确保生产过程稳定进行。在整个生产过程中,现场车间仅安排1-2人进行巡检,大大减少了人工操作,提高了生产效率和安全性。同时,该系统还具备远程操作与炉台现场操作功能,两者完全一致且可随时切换,现场操作优先,以便应对突发情况。

参考文献

- [1]黄清芳. Co含量对烧结钕铁硼磁性能影响研究[J]. 福建冶金, 2022, 51(04): 29-32.
- [2]谭海翔, 李容军, 汤盛龙, 刘韶炼, 廖春晓. 烧结高性能稀土钕铁硼磁体制备工艺研究[J]. 大众科技, 2020, 22(04): 42-44.
- [3]武卯泉. 钕铁硼生产取向成型工艺段自动化系统设计[J]. 机械工程与自动化, 2020, (03): 170-172.