基于 RS 工艺的超导薄膜隔离层设备研发

周国山

（苏州新材料研究所有限公司，江苏 苏州 215000）

摘 要 超导薄膜隔离层设备是超导产品生产工艺流程中的核心关键装备，当前国内该类装备长期高度依赖进口，不仅采购与运维成本居高不下，还存在技术适配性差、工艺迭代受限等突出短板。为破解这一“卡脖子”困境，本研究启动超导薄膜隔离层装备国产化研发项目，完全立足于国产化超导工艺产线的实际落地应用需求，重点从整机结构优化设计与全流程控制功能设计两大核心维度，对原有进口设备的柔性走带系统、高精度加热器系统、靶材恒温冷却系统等核心单元进行针对性国产化改造，最终成功自主研发出完全适配国产产线的超导薄膜隔离层装备，可充分满足反应溅射工艺（Reactive Sputtering，RS）对设备运行效率、成膜均匀性、长期运行稳定性等多项核心技术指标的严格要求，相关研发实践经验旨在为同领域技术人员提供参考。

关键词 超导薄膜隔离层；RS 工艺；走带系统；靶材中毒

中图分类号：TB43 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.27.039

0 引言

RS 工艺（Reactive Sputtering）即反应溅射工艺，在使用氩气轰击靶材时引入活性气体，活性气体会与溅射出来的靶材物质进行反应，在基板上沉积形成化合物薄膜。基于 RS 工艺的超导薄膜隔离层设备凭借材料沉积效率高、成膜质量佳等优势，在第二代高温超导带材加工领域得到广泛应用。但因目前国内尚不具备此类设备的完整自主研发能力，进口设备难以完全适配国内超导带材的个性化生产需求，而且设备维护也存在诸多不便，这导致基于 RS 工艺的超导产品生产技术水平提升受到很大限制。在此背景下，本文结合实际研发项目，深入探索基于 RS 工艺的超导薄膜隔离层设备创新设计技术，以期打破国外技术壁垒，为推动我国超导产业高质量发展提供助力。

1 项目概况

所述隔离层 RS 国产化真空设备研发项目，主要基于现有设备技术痛点问题进行深化改进。项目原有设备已经老化，重新进口建设的费用预计需八百多万元，成本较高。而且原设备在实际应用中也凸显出诸多设计不足之处。例如：加热电源电压设计偏大，设备运行过程中频繁出现打火放电现象，容易产生工艺掉电，设备运行不够稳定；双螺旋走带系统一侧驱动张力过大，无法有效适配小张力系统运行；设备收放卷室空间设计也比较小，大卷盘空间不足。综合上述多方面原因，提出此次设备创新研发项目，旨在攻克国内技术瓶颈，实现 RS 工艺超导薄膜隔离层设备的自主研发，并对设备既有技术缺陷进行改良，设计出一款能够满足 RS 工艺稳定生产新需求的高品质装备，完成对进口设备的国产化替代。

2 设备研发目标性能

本项目中的 RS 反应器主要用于在 12 mm 宽的基带上沉积 LaMnO 和 MgO 超导隔离层薄膜，基带材质为进口哈氏合金材质，适用厚度为 35 μm～65 μm 不等，每卷基带连续单根长度为 100 m～2 000 m。原设备采用的是一侧驱动控制速度，一侧放卷控制张力的模式，此次研发目标是将其改为中间驱动控制速度，两侧控制张力（一端牵引一端张力控制）的设计模式。要求工艺运行速度在 12 m/h～450 m/h 之间且可控，并且能够在最高温度约 850 ℃～950 ℃的条件下稳定走带，带材行走过程张力稳定，同时最薄带材工艺温度下行走的过程中，走带在导轮上不得出现边缘褶皱或骑边跑偏等情况，工艺误差需严格控制在 ±5% 以内。此外，新研发设备需避免原设备易打火放电的质量缺陷，整体运行状态应达到 24 h 连续稳定控制。

3 隔离层设备整体结构

按设备研发目标保守估算沉积速率，单靶材所需有效沉积区面积约为 270 cm^2。设计隔离层设备整体结构，若考虑基带只在沉积区走一道，则沉积区结构长

作者简介：周国山（1972-），男，本科，工程师，研究方向：机械设备开发。

度至少需达到180 cm，会导致靶材尺寸过大，且沉积区横向空间将被大幅浪费[1]。故项目提出往返多次走带方案，充分利用沉积区宽度，既满足工艺需求，又可缩短所需沉积区长度，优化设备空间布局，实现结构紧凑化设计目标。经分析，采用螺旋式卷绕结构是实现这一走带模式的理想策略。具体设计中将每个靶材工艺位的有效沉积区宽度设计为13.5 cm，长度设计为200 cm，利用四轴螺旋卷绕装置驱动基带在沉积区内循环螺旋走绕9道次，达到在同一靶材位相同工艺条件下多次沉积的效果，满足工艺膜层厚度要求。设备整体采用双螺旋结构设计思路，在设备两侧各布置1个螺旋室，一侧执行LaMnO工艺制备隔离层薄膜，另外一侧采用MgO工艺为超导带材覆膜，整体采用反应溅射工艺实现隔离层薄膜沉积。优化后设备整体结构组成如图1所示，具体组成部分及其功能如表1所示。

4 隔离层设备国产化自主研发挑战与攻克

4.1 走带张力均衡性优化

走带系统是隔离层设备的核心执行机构，根据现有设备的使用经验，走带系统内部张力均衡性控制是影响走带质量的关键因素。传统螺旋卷绕结构设计走带模式主要有两种：第一种为一边放卷一边控制速度，中间螺旋卷绕机构负责辅助运动，因轴承导轮为灵活结构，放卷侧恒张力控制和收卷侧恒速控制会造成收卷侧摩擦力叠加而张力偏大，放卷侧张力偏小，生产薄基带时易产生卷边问题[2]。第二种以中间螺旋卷绕结构作为主驱动，两侧做张力控制，基带速度完全由卷绕结构决定，收放卷两侧虽然可实现张力均衡控制，但需要将导轮和轴设计成固定结构，以满足两者高度同步的运动要求，而结构本身难以避免的加工误差可能导致基带抖动，同样会引发张力异常现象，造成基

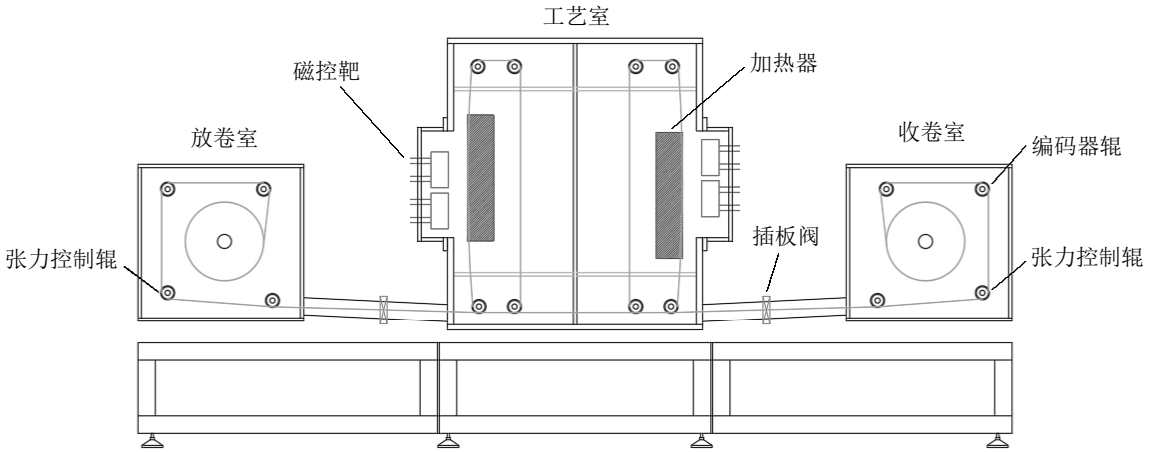

图1 设备示意图

表1 设备具体组成模块及其功能

系统模块	组成部分	功能
真空腔体系统	放卷室、镀膜室、收卷室等	提供反应溅射所需真空环境
钢带卷绕系统	伺服电机、张力传感器、导辊机构等	驱动基带行走卷绕
磁控靶及电源系统	磁控溅射靶、靶电源等	为反应溅射提供稳定供电
加热系统	高温电阻合金加热片、热电偶、温控器等	加热卷绕钢带，满足工艺所需温度要求
冷却系统	冷却水回路、过滤器、水压传感器等	对设备腔体、磁控靶、真空泵等部位进行循环冷却
抽气系统	双级旋片泵、罗茨泵、分子泵等	抽取腔体气体，维持工艺所需真空环境
真空测量	数显复合真空计、电阻规、电离规等	实时监测腔体真空度并反馈参数
控制系统	工控机、组态软件、伺服控制器、触摸屏等	全面控制各系统，保证设备安全稳定运行
安全防护系统	保护开关、报警灯等	设备出现异常运行状况时及时切断工艺电源并发出报警信息

带损伤。故本次研发设计吸取以上设计经验，新设计一款四轴主驱动紧凑型螺旋卷绕装置。产品在固定板同一垂直面上安装四组螺旋卷绕机构，采用环形布置方式，通过四个拐点定位固定，每个拐点处分别设置 1 个传动轴，其中第一和第二螺旋卷绕机构传动轴上设置多个磁力驱动导轮，第三和第四螺旋卷绕机构传动轴上设置多个常规导轮。基带可在所述环形结构非工艺侧变轨，实现螺旋卷绕。设计的创新之处在于，所述磁力驱动导轮采用内外圈设计形式，可实现柔性传动。通过合理设定磁吸力，正常运行工况下利用磁珠和磁力驱动导轮的外圈产生的吸力摩擦，可驱动基带张紧。而当基带张力过大超出设计允许值时，导轮与外圈磁吸力小于张力，两者将自动断开，使导轮打滑空转，避免强制将基带拉得过紧，由此保证基带张力基本处于比较均衡的状态。同时，中间导轮采用分段驱动设计方法，搭配张力传感器伺服电机扭矩模式的闭环 PID 控制模式进一步精准控制张力，保持基带张力动态稳定平衡。

4.2 真空击穿问题改进

原设备加热系统为满足 RS 工艺的高温加热需求，电源电压设计比较大，但也导致真空击穿概率较高，进而导致设备实际使用期间经常会出现打火放电现象。面对这一技术缺陷，本次设计研发将原本的石英灯管加热方式改为电阻加热方式，优选不易放气的高温电热合金加热器，在镀膜室左右腔室各安装一套，前后位置可调节。加热底座采用水冷设计，防止底座变形。同时，每组加热装置分三段控制，每段均配置独立的温控器和热电偶，可根据实际需求灵活调节实际加热温度[3]。加热器装配至设备中之前先对其进行加热放气除杂处理，一方面避免高温环境下材料释放污染气体，进而增加真空击穿概率；另一方面也有助于保障真空环境的洁净度，防止污染物影响成膜品质。在此基础上，设计采用＜ 60 V 的低电压供电模式，进一步降低打火放电风险。并配置大功率直流可编程电源，温度控制采用 PID 闭环控制模式，充分保证电压输出和调节的稳定性。

4.3 靶材中毒防范

在反应溅射工艺中，需要向反应腔内通入氧气，与靶材溅射粒子发生化学反应生成氧化物薄膜覆盖在基材上。该工艺环节常出现靶材中毒现象，其原因主要在于氧气流量计的控制反应速度低于溅射反应速率，工艺反应所需氧气量达到设计值后，流量计未能及时给予反馈，通入反应腔内的氧气量略有剩余。而靶材材料对氧气较为敏感，剩余氧气会继续对其进行氧化作用，同样在表面形成一层氧化膜，给下次溅射造成阻碍[4]。对此，项目采用先进的 PID 控制算法对氧气流量进行高精确度控制，同时选择 Profinet 高速通信协议，大幅提升流量计响应速度，使氧气量调节更快速。并在算法中增加工况识别与保护算法，当检测到氧气过量时，自动调整工艺参数，从控制层面可靠抑制靶材中毒现象的发生。此外，还选用了中频电源击溅射靶，可同时对基带单面进行镀膜，提高工作效率，并起到减少靶材中毒和提高沉积质量的作用。

4.4 靶材温度控制

靶材过热引起的变形，不仅会影响溅射工艺，也会影响 RS 工艺超导薄膜隔离层成膜质量。本次设计研发将原设备冷却系统背板材质全部更换为高导热的无氧铜背板，并在设备内部增加了一定数量的冷却水流道，全面提升背板换热能力。同时，通过试验方式确定靶材与铜背板之间的最优贴合与固定方案，保证靶材界面与冷却背板紧密贴合，最大限度发挥冷却系统功能，确保整个工艺生产阶段，设备内部温度持续保持稳定均匀，继而保证靶材温度始终保持在最佳范围内[5]。

5 结束语

隔离层 RS 国产化真空设备研发项目按设计预期顺利推进，项目创新设计“一端牵引、一端张力控制、中间导轮”的走带系统均衡控制走带张力，同时在加热系统和溅射工艺中引入 PID 控制算法，实现对工艺参数的高精度控制，解决了靶材中毒这一关键性技术问题。此外，通过优化冷却系统，创造最佳工艺条件，提高了隔离层生产稳定性，最终成功设计了一款高性能超导薄膜隔离层设备，经实际工艺验证，不仅设备制造成本远低于进口设备，大幅降低企业固定资产投入成本，而且设备性能质量可靠，可实现稳定生产。

参考文献：

[1] 汤晨宇，刘磊，曾广根，等. 基于 PLC 的原子层沉积设备系统设计 [J]. 机电工程技术，2024,53(01):295-299.
[2] 周洁鹏，封拥军，元洁，等. 往复式旋转对化学气相沉积薄膜性能的提升与应用 [J]. 微纳电子与智能制造，2022,04(01):110-114.
[3] 刘晋玮，曲虹屹，赵步文，等. 基于薄膜带材卷绕成型的空间管材制备设备设计与分析 [J]. 航天制造技术，2025(04):31-40.
[4] 陈国钦，袁祖浩，胡凡，等. 离子束溅射沉积设备制备薄膜均匀性研究 [J]. 电子工业专用设备，2021,50(04):35-39.
[5] 魏宇浩. 化学气相沉积工艺的设备优化分析 [J]. 集成电路应用，2025,42(01):69-71.