超大型 SLon 立环脉动高梯度磁选机的创新研究及应用①

罗平[1,2]，王勇平[1]，王强[1,2]
（1.赣州金环磁选科技装备股份有限公司，江西 赣州 341000；2.战略金属矿产资源低碳加工与利用江西省重点实验室，江西 赣州 341000）

摘　要：系统阐述超大型 SLon 磁选机的研制历程，重点剖析其技术创新成果及工业应用实践，旨在为复杂矿物资源高效回收提供技术支撑，为选矿装备智能化、绿色化提供参考。SLon-5000、SLon-6500 和 SLon-8000 等超大型设备的单机处理能力显著提升，单位能耗显著下降。工业应用结果表明，SLon-5000 用于钒钛磁铁矿尾矿回收，获得了 TiO_2 品位 12%的精矿，单机年节电 300 万度。

关键词：磁选机；钒钛磁铁矿；SLon 立环脉动高梯度磁选机；大型化；智能化；节能；矿物加工
中图分类号：TD951　　**文献标志码**：A　　doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2026.02.015
文章编号：0253-6099(2026)02-0101-04

Innovative Research and Application of Ultra-large SLon Vertically Pulsating High-Gradient Magnetic Separator

LUO Ping[1,2], WANG Yongping[1], WANG Qiang[1,2]
(1.*SLon Magnetic Separation Co., Ltd., Ganzhou* 341000, *Jiangxi*, *China*; 2.*Jiangxi Key Laboratory of Low-Carbon Processing and Utilization of Strategic Metallic Mineral Resources*, *Ganzhou* 341000, *Jiangxi*, *China*)

Abstract: The development process of ultra-large SLon magnetic separators was systematically reviewed, with emphasis on technological innovations and industrial applications. It aims to provide technical support for the efficient recovery of complex mineral resources and a reference for the development of smart and green mineral processing equipment. The ultra-large models such as SLon-5000, SLon-6500 and SLon-8000 exhibit significantly enhanced processing capacity and a remarkable reduced unit energy consumption. Industrial application results show that when SLon-5000 is used for the recovery of vanadium-titanium magnetite tailings, a concentrate with a TiO_2 grade of 12% can be obtained, with annual electricity saving of 3 000 000 kWh per unit.

Key words: magnetic separator; vanadium-titanium magnetite; SLon vertically pulsating high-gradient magnetic separator; large scale; smart; energy saving; mineral processing

全球矿业在绿色化、高效化转型中，面临矿石“贫、细、杂”化与传统磁选设备效率低、能耗高的问题，弱磁性矿物的高效分选成为行业急需解决的技术难题[1]。在此背景下，赣州金环磁选科技装备股份有限公司（以下简称金环磁选）持续创新，开发出 SLon 立环脉动高梯度磁选机（以下简称 SLon 磁选机），凭借磁力、脉动流体力与重力的协同分选机制，成为弱磁性矿物分选与非金属矿提纯的核心装备。

SLon 磁选机的核心分选机理为：激磁线圈通以直流电，在分选区的磁介质表面产生高梯度磁场；转环顺时针旋转带动磁介质连续性进出分选区，高效捕获磁性颗粒并转运至无磁场区由冲洗水剥离；非磁性颗粒在重力与脉动流体力作用下排入尾矿[2-4]。设备富集比大、适应性强，广泛应用于各类矿物提纯[5]。

为响应选矿工业对超大型和智能化装备的迫切需求，SLon 磁选机在大型化、粗颗粒预选工艺和高场强技术等方面实现重大突破。SLon-5000、SLon-6500 和 SLon-8000 等超大型设备的成功研制，将单机处理能力提升至 2 500 t/h，单位能耗降至 0.12 kWh/t。本文系统阐述超大型 SLon 磁选机的研制历程，重点剖析其技术创新成果及工业应用实践，旨在为矿物资源开发及装备升级提供参考。

① **收稿日期**：2025-11-03
基金项目：战略金属矿产资源低碳加工与利用江西省重点实验室资助项目（2023SSY01041）
作者简介：罗平（1994—），男，江西兴国人，硕士研究生，助理工程师，主要研究方向为弱磁性矿物的磁选与浮选。E-mail:1431379333@qq.com

1 超大型 SLon 磁选机的研制

1.1 SLon-5000、SLon-6500、SLon-8000 的研制

近年来,金环磁选研发团队在深度总结 SLon-2500、SLon-3000 和 SLon-4000 等机型技术经验的基础上,遵循“大型化设计-工业验证-迭代优化”的研发路径,相继推出 SLon-5000、SLon-6500 和 SLon-8000 等超大型磁选机,其主要技术参数见表 1。

表 1 SLon-5000、SLon-6500、SLon-8000 磁选机主要技术参数

Table 1 Main technical parameters of SLon-5000, SLon-6500 and SLon-8000 magnetic separators

机型	转环外径/mm	转环转速/(r·min^{-1})	给矿粒度/mm	-0.074 mm 粒级占比/%	给矿浓度/%	矿浆通过能力/(m^3·h^{-1})	干矿处理量/(t·h^{-1})
SLon-5000	5 000	2.5~3.5	<1.3	30~100	10~40	900~1 350	420~700
SLon-6500	6 500	2.5~3.5	<1.3	30~100	10~40	1 860~2 500	1 000~1 400
SLon-8000	8 000	2.5~3.5	<1.3	30~100	10~40	3 800~4 400	2 000~2 500

机型	额定激磁功率/kW	转环电机功率/kW	脉动电机功率/kW	脉动冲程/mm	脉动冲次/(次·min^{-1})	供水压力/MPa	冲洗水量/(m^3·h^{-1})	冷却水量/(m^3·h^{-1})
SLon-5000	92~245	55	55	0~26	0~300	0.2~0.4	450~680	7~10
SLon-6500	123~260	75	75	0~26	0~300	0.2~0.4	800~1 200	7~10
SLon-8000	179~295	132	132	0~26	0~300	0.2~0.4	1 600~2 100	9~11

2015 年,世界首台超大型 SLon-5000 磁选机研制成功,采用优化的磁系结构与转环设计,干矿处理量达 420~700 t/h,吨矿电耗仅 0.27 kWh。经过 8 年工业试验,该设备于 2023 年在攀枝花某钒钛磁铁矿项目正式投入应用[6]。

2024 年,SLon-6500 磁选机成功下线,干矿处理量提升至 1 000~1 400 t/h,吨矿电耗降至 0.19 kWh,借助模块化磁轭设计和智能控制系统,该机的运输便捷程度与运行稳定性能均获得了明显改善。

2025 年,代表行业顶尖水平的 SLon-8000 磁选机研制成功,该机集成了分体式磁轭、智能变频控制等多项创新技术,干矿处理量高达 2 500 t/h,较 SLon-5000 提升约 2.6 倍,吨矿电耗低至 0.12 kWh,吨矿电耗较 SLon-3000 磁选机吨矿电耗(0.56 kWh)降幅达 78.6%,再次刷新同类型设备的处理能力与能效记录。

这一系列超大型机型的迭代升级,标志着 SLon 磁选机在大型化技术上的跨越式突破。

1.2 超大型 SLon 磁选机节能性能研究

SLon 磁选机大型化发展的节能优势源于磁系结构创新。通过优化磁路设计并采用高导磁材料,有效减少漏磁损耗,降低激磁电流需求,从根本上实现电耗大幅下降[7]。对比不同型号设备发现,当背景磁感应强度均为 1.0 T 时,随着设备处理能力提高,单位能耗显著降低。

不同型号 SLon 磁选机的处理量和能耗见图 1。SLon-3000 磁选机单位能耗为0.56 kWh/t,SLon-5000 磁选机单位能耗降至0.27 kWh/t,SLon-6500 磁选机单位能耗低至0.19 kWh/t,SLon-8000 磁选机单位能耗仅 0.12 kWh/t。从 SLon-3000 磁选机到 SLon-8000 磁选机,干矿处理量从 300 t/h 跃升至2 500 t/h,单位能耗降幅达 78.6%。此外,大型设备兼具单位产能占地面积小和智能化程度高等优势,其低耗、高效、智能化特性,精准适配现代选矿规模化生产需求,为行业绿色低碳转型提供关键技术支撑[8]。

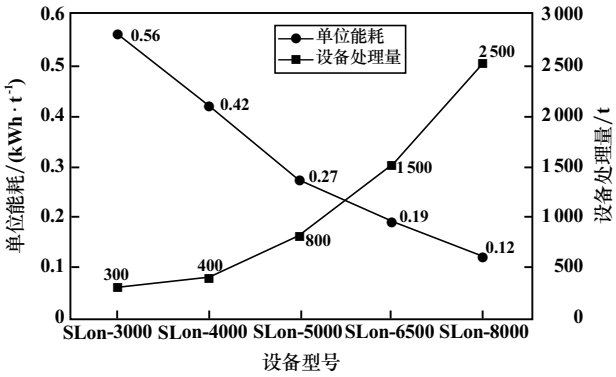


图 1 不同型号 SLon 磁选机的处理量和能耗

Fig. 1 Processing capacity and energy consumption of different SLon magnetic separators

2 超大型 SLon 磁选机技术创新

超大型 SLon 磁选机的研发突破依托于多项关键核心技术的系统性创新,涵盖智能化控制、结构设计、连接技术和基础理论等多个维度。

2.1 智能化

依托 5G+技术,SLon 磁选机搭建起全方位智能连接网络,构建成超大型 SLon 磁选机智能化控制系统。超大型 SLon 磁选机智能化控制系统如图 2 所示。从

图 2 可以看出，超大型 SLon 磁选机控制系统集成先进功能，借由 5G 网络，与公司物联网中心、用户中央控制室、手机端互联互通，多维度保障设备高效稳定运行。



图 2　超大型 SLon 磁选机智能化控制系统

Fig. 2　Intelligent control system of ultra-large SLon magnetic separator

转速采用变频控制，可根据矿物特性与处理量需求灵活调节，实现精准运转；温度预警控制时刻监测关键部件温度，异常升温时即刻报警，预防设备过热受损；脉动变频控制精准调整频率与幅度，优化矿物分选效果。同时，磁场恒定功能保障不同工况下磁场强度稳定，为分选提供稳定磁力环境；液位自适应功能依据矿浆流入量自动调节液位，避免矿浆溢出或供应不足；螺栓松动预警通过高精度传感器实时监测，松动即报警，防止设备因部件松动引发故障。

在数据处理与故障诊断上，人工智能技术发挥作用。物联网中心收集海量设备运行数据，经智能算法处理分析，转化为可视化信息，在中央控制室大屏幕和手机端实时呈现，让操作人员无论在哪都能掌握设备状态。智能故障诊断系统实时响应异常，依托先进算法从磁场、液位、螺栓等多方面精准定位故障，优化维修流程，指导运维人员快速解决，大幅缩短停机时间。

凭借 SLon 磁选机远程监控、诊断和控制一体化解决方案及云平台监控诊断系统，设备运行效率趋近 100%，人力节省超 70%，有力推动选矿工业向智能化、高效化迈进，为行业树立新标杆。

2.2　框架式、模块化电磁磁轭

在超大型 SLon 磁选机研发进程中，框架式与模块化电磁磁轭设计实现关键技术突破。超大型 SLon 磁选机框架式、模块化电磁磁轭结构如图 3 所示。从图 3 可以看出，超大型 SLon 磁选机磁轭由上磁轭、中磁轭、下磁轭及励磁线圈等构成。针对加工、安装及运输环节存在的难题，对磁轭进行科学拆分，形成模块化单元。各单元借助精密定位接口与高强度螺栓实现连接，在确保磁路完整与磁通传导效率的前提下，突破大型金属构件加工尺寸限制，降低运输对特种运载工具的依赖程度，简化现场安装流程并缩短调试周期，有效破解超大型磁轭制造及工程应用瓶颈，为矿山装备结构设计提供创新范式[9]。

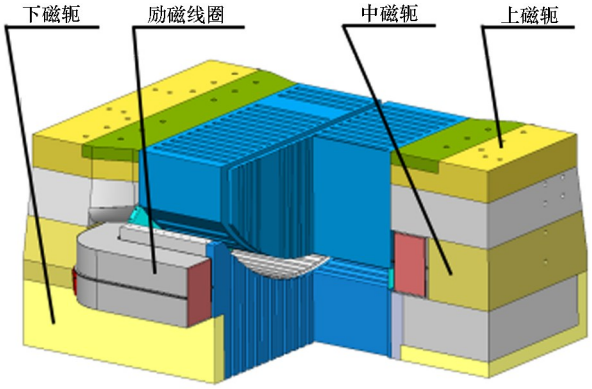


图 3　超大型 SLon 磁选机框架式、模块化电磁磁轭

Fig. 3　Frame-type and modular electromagnetic yoke of ultra-large SLon magnetic separator

2.3　分选环连接方式

为解决超大型分选环运输、安装及运行中的连接可靠性问题，金环磁选创新设计了活动轮毂双键连接＋压板式固定的新型复合连接方式。该设计通过双键定位实现轮毂与分选环的精准对中，利用压板增强轴向固定，形成刚柔结合的连接体系。此创新攻克了超大型磁轭磁通密封传输难题，突破传统大型结构件加工运输瓶颈，同时便于设备长期运行维护。经工业验证，该连接方式能确保分选环在高负荷下稳定运行，大幅提升超大型磁选机的工程适用性与可靠性，为同类重型装备结构设计提供了技术借鉴。

2.4　棒介质构建理论与方法

金环磁选首创棒介质构建理论与方法，建立棒介质-矿物相互作用的多维度理论模型，首次揭示矿物属性、磁选参数和介质丝直径的相互制约关系，解决了“介质-矿物尺度”匹配计算难题，为精确计算棒介质丝径提供基础理论；创立棒介质丝捕获特征分析法，解决介质丝表面矿粒捕获形态、脉石夹带分析难题；同时创立棒介质丝单元介质分析法，解决棒介质丝排列组合和构型的重大设计难题，通过优化介质丝空间分布与磁场梯度，将背景磁场强度从 1.0 T 提升至 1.8 T，为增强背景磁场强度、研发高磁场强度和高回收率 SLon 磁选机奠定了从理论建模到构型设计的完整技术基础[10]。

3　超大型 SLon 磁选机的应用

2024 年，全球首台超大型 SLon-5000 强磁选机在四川某企业钒钛磁铁矿提质增效技改项目中实现工业

化应用。作为尾矿资源深度回收示范工程,该设备针对选矿厂原磁选及浮选尾矿中微细粒级钛铁矿(-0.074 mm粒级占比超过60%),采用“一粗一精一扫”磁选短流程工艺,在给矿 TiO_2 品位4.5%条件下,实现精矿 TiO_2 品位12%、日产精矿超过300 t的稳定指标,设备吨矿电耗仅0.27 kWh,每年可节电300万度,相当于节煤963 t、减少 CO_2 排放2 503 t,节能减排效果显著,构建了“低品位资源增值-固废减量-低碳排放”的循环经济模式。

SLon-5000磁选机的成功应用,实现了经济效益和环境效益的双赢,为全球矿业领域的可持续发展树立了典范。随着超大型SLon磁选机的持续推广与深化应用,未来将有更多矿业企业受益于这一创新技术,共同驱动矿业行业向绿色化、低碳化、高效化方向转型发展,为我国“双碳”目标的顺利实现提供重要助力。

4 结语

1) SLon-5000、SLon-6500和SLon-8000磁选机的研制,标志着该机型向大型化发展。设备大型化有助于降低生产成本、节约占地面积,并提升选矿厂自动化生产水平。

2) SLon磁选机设备的大型化有利于降低单位能耗。SLon-5000磁选机单位能耗为0.27 kWh/t,SLon-6500磁选机单位能耗为0.19 kWh/t,而SLon-8000磁选机单位能耗仅0.12 kWh/t。从SLon-3000到SLon-8000,干矿处理量从300 t/h增至2 500 t/h,单位能耗降幅达78.6%,节能显著。

3) 超大型SLon磁选机首创框架式、模块化电磁磁轭,活动轮毂双键连接分选环结构,解决磁通密封传输等难题;依托磁介质多丝理论开发新型磁介质盒,首创棒介质构建理论,为增强背景磁场强度、研发高磁场强度和高回收率SLon磁选机奠定了基础。

4) 超大型SLon-5000磁选机在四川某企业钒钛磁铁矿技改项目实现工业化应用,针对选矿厂原磁选及浮选尾矿中-0.074 mm粒级占比超过60%的微细粒钛铁矿,采用“一粗一精一扫”磁选工艺,给矿 TiO_2 品位4.5%时,精矿 TiO_2 品位可达12%,日产精矿超过300 t,创造了巨大的经济效益。

参考文献(References):

[1] 曾招科. SLon立环脉动高梯度磁选机的影响因素研究[J]. 中国设备工程, 2025(6):145-147.
ZENG Zhaoke. Research on influencing factors of SLon vertical ring pulsating high gradient magnetic separator[J]. China Plant Engineering,2025(6):145-147.

[2] 张鑫宇,程绍凯,李文博. 高梯度磁选装备及其磁介质的研究现状[J]. 绿色矿山, 2024,2(4):424-435.
ZHANG Xinyu, CHENG Shaokai, LI Wenbo. Research status of high gradient magnetic separation equipment and its magnetic medium[J]. Green Mine, 2024,2(4):424-435.

[3] 万鹏,解志锋,丁利,等. 国外某铜钼混合精矿磁选分离工艺试验研究[J]. 中国钼业, 2024,48(5):33-37.
WAN Peng, JIE Zhifeng, DING Li, et al. Experimental study on magnetic separation process of mixed copper and molybdenum concentrate in foreign countries[J]. China Molybdenum Industry, 2024, 48(5):33-37.

[4] 李雨涵,李磊,王朋杰. SLon立环脉动磁选机转环传动系统优化设计及应用[J]. 现代矿业, 2023,39(11):213-215.
LI Yuhan, LI Lei, WANG Pengjie. Optimization design and application of swivel drive system of SLon vertical ring pulsating magnetic separator[J]. Modern Mining, 2023,39(11):213-215.

[5] 熊大和. 新型SLon立环脉动高梯度磁选机的应用[J]. 金属矿山, 2016(3):133-138.
XIONG Dahe. Application of new SLon vertical ring pulsating high gradient magnetic separator[J]. Metal Mine, 2016(3):133-138.

[6] 陈剑,曾招科. 大型高效SLon立环高梯度磁选机在非金属矿提纯中的应用[J]. 现代矿业, 2021,37(4):133-137.
CHEN Jian, ZENG Zhaoke. Application of large-scale high-efficiency SLon vertical ring high-gradient magnetic separator in non-metallic mineral purification[J]. Modern Mining, 2021,37(4):133-137.

[7] 熊大和. SLon立环脉动高梯度磁选机大型化研究与应用[J]. 有色金属(选矿部分), 2011(增刊1):163-167.
XIONG Dahe. Research and application of SLon vertical ring pulsating high gradient magnetic separator in large-scale [J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2011(S1):163-167.

[8] 熊大和. SLon-3000高梯度磁选机的研制与应用[J]. 金属矿山, 2013(12):100-104.
XIONG Dahe. Development and application of SLon-3000 high-gradient magnetic separator[J]. Metal Mine, 2013(12):100-104.

[9] 李雨涵,李磊. SLon立环脉动高梯度磁选机模块化设计探讨[J]. 四川有色金属, 2024(1):42-45.
LI Yuhan, LI Lei. Discussion on modular design of SLon vertical ring pulsating high-gradient magnetic separator[J]. Sichuan Nonferrous Metals, 2024(1):42-45.

[10] 熊涛,陈禄政,黄会春,等. SLon脉动高梯度磁选技术进展[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2024,55(12):4406-4421.
XIONG Tao, CHEN Luzheng, HUANG Huichun, et al. Progress of SLon pulsating high gradient magnetic separation technology[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2024,55(12):4406-4421.

引用本文:罗平,王勇平,王强. 超大型SLon立环脉动高梯度磁选机的创新研究及应用[J]. 矿冶工程, 2026,46(2):101-104.
LUO Ping, WANG Yongping, WANG Qiang. Innovative research and application of ultra-large SLon vertically pulsating high-gradient magnetic separator[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2026,46(2):101-104.