

真空精炼用真空泵节能减排技术应用分析

孙 猛, 燕文奇, 黄 萌, 孙朝阳

(山东博科真空科技有限公司, 山东 淄博 255000)

摘 要 真空精炼在钢铁生产过程中至关重要, 其中核心设备真空泵能量消耗较大。本文对真空泵节能减排技术的应用进行了系统分析。首先, 对传统蒸汽喷射泵进行节能改造分析, 主要是核心部件的优化和运行策略调整; 其次, 讨论新型节能技术在混合系统、全干式机械泵、热驱动技术等方面的运用; 最后, 对系统集成和智能控制技术进行探讨, 包括抽气曲线优化、自适应控制、能源回收等, 旨在对减少真空精炼过程中的能耗和排放有所裨益, 进而为冶金工业实现绿色转型提供参考。

关键词 钢铁生产; 真空精炼; 真空泵; 节能减排

中图分类号: TF341.7; TF769

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.04.025

0 引言

真空精炼技术在提高钢材的洁净度方面起到关键作用, 但需要注意的是, 真空泵系统的能耗大约占到整个工序能耗的 30% ~ 50%, 这也是冶金工业在能耗和减排方面的主要关注点。传统的蒸汽喷射泵存在着效率低下、蒸汽消耗高等问题, 正面临着节能和环保的严峻压力。在实现“双碳”的今天, 高效节能真空泵技术的研发和应用已势在必行^[1]。本文旨在通过对真空泵节能技术最新研究进展的梳理, 总结归纳出传统系统改造、新型泵技术应用、系统智能控制三个层次的研究现状, 为产业节能减排和促进真空精炼工艺绿色、可持续发展提供技术借鉴。

1 传统蒸汽喷射泵系统的节能改造技术

1.1 核心部件优化设计

蒸汽喷射泵核心部件进行优化设计, 是促进泵高效运行的根本。蒸汽喷射泵由喷嘴、吸入室、混合室(喉管)、扩压器等关键零件组成, 泵内流动为伴有激波现象的复杂三维可压缩湍流。传统设计往往是建立在一维简化理论和经验公式之上, 偏离实际流动状态, 造成效率损失。在最近的几年中, 计算流体动力学(CFD)的数值模拟技术得到广泛的应用, 为更深入地理解喷射泵内部的复杂流场和揭示其能量损失的原因提供有力的工具^[2]。利用 CFD 模拟可准确地分析拉瓦尔喷嘴中工作蒸汽的扩张和加速过程、吸入室中被抽气体的运动状态、混合室中二者的强掺混和动量交换、扩压器中压力的回升过程等。基于此, 研究者能够对喷嘴的型线(收缩段和扩张段的曲线)、喉部直径、混合室

的形状与长度、扩压器的扩张角等关键几何参数进行精细化重构与优化。如优化喷嘴型线可降低激波强度和流动分离的程度, 使得蒸汽膨胀更加趋近于等熵过程; 调节混合室长度和直径比的目的是寻求使两股流体完全混合并具有最小摩擦损失的优化配比; 对扩压器的型线进行优化可以更流畅地将动能转换为压力能, 从而避免边界层的分离。这些基于流场精细解析的优化设计, 能够有效提升喷射泵的引射系数(工作流体单位质量所能引射出被抽气体的质量), 从而降低工作蒸汽消耗, 达到同样抽气任务下源头节能的目的^[3]。

1.2 系统运行策略优化

蒸汽喷射泵系统通常由多级泵(例如: 增压泵、中间泵、主泵等)与级间冷凝器串联构成, 其运行能耗不仅取决于单泵效率, 更与整个系统的匹配与运行方式密切相关。传统的运行策略往往较为粗放, 例如: 在整个精炼周期内, 无论真空度要求如何变化, 均以固定参数(例如: 蒸汽压力、阀门的开度等)运行, 造成大量能源在低负荷时段被浪费。运行策略优化最核心的思想就是要让系统运行状态与真空冶金工艺实际要求实时相匹配。第一, 蒸汽供给参数优化问题。工作蒸汽压力、过热度等因素对喷射泵性能有明显影响。稳定且适中的蒸汽压力(避免因压力过大造成过度膨胀损失)以及保证足够的过热度(避免喷嘴内部凝结而影响流动的稳定性)是高效运行的前提。通过设置准确的压力和温度调控装置以及与抽气负荷建立联动关系可以避免无效的能源供应^[4]。第二, 对冷凝器操作进行优化。级间冷凝器(大多为表面式或者混合式结构)的作用是冷凝前一级排出的可凝蒸汽(主

作者简介: 孙猛(1979-), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向: 真空获得设备及真空应用设备的设计开发。

要是水蒸气)，从而大幅减少后一级泵需要处理的非凝性气体负荷。保证凝汽器冷却水流量，温度在最佳运行条件下并提高冷凝效率是减轻后续泵组负荷和降低蒸汽总耗等关键所在。如一些研究采用增加或者优化“前置冷凝罐”的方法，使气体在进入主喷射泵系统之前预冷、冷凝和节能效果显著。

2 新型节能真空泵技术的应用进展

2.1 “水环泵+蒸汽喷射泵”混合系统

目前，在钢铁产业中，“水环真空泵+蒸汽喷射泵”的混合系统被认为是应用最广且技术相对完善的节能改进策略。这一技术路线的核心思路是利用两种泵型各自的优点来达到工况互补和能效提升的目的。水环真空泵作为一种容积式机械泵，在中低真空范围（如由大气压抽升至数千帕）内具有较高的抽气效率和相对较低的运行能耗（主要消耗电能），并且对于含可凝性蒸汽多，粉尘少的气体介质具有良好的耐受性。而蒸汽喷射泵在高真空及极高真空范围（如由几百帕抽到几十帕之内）仍具有其独特优势，且结构简单可靠^[5]。混合系统通常将水环泵作为前级泵（或称预抽泵），负责在精炼初期快速建立初步真空，并承担处理大量水蒸气的任务；蒸汽喷射泵则作为后级泵（或称维持泵），在达到一定真空度后启动，负责将真空度提升并维持在工艺要求的极高值。这种配置带来多方面的节能效益：其一，它大幅减少蒸汽喷射泵在较高压力段（其效率最低的区间）的工作负荷，从而显著降低高压蒸汽的总消耗量。其二，水环泵的电能消耗通常低于所替代的蒸汽喷射泵的等效蒸汽能耗，实现能源种类的优化（蒸汽的一部分可以被电能所代替，电厂的发电效率一般比小型锅炉的产汽效率高）^[6]。

2.2 全干式机械真空泵系统

全干式机械真空泵系统作为真空技术领域革命性的进展，它代表着真空获取装备开发的前沿阵地，它已经成熟地运用于半导体和化工中，近几年开始扩展到冶金真空精炼的重工况领域。所谓“干式”，是指泵腔内被抽气体在压缩和排放过程中，完全不被任何工作液体（如油、水）污染或接触，泵腔内部无密封液或润滑油，由此完全消除油蒸气或者水蒸气造成的真空环境污染，同时不需要繁杂的油水处理系统。用于冶金领域干式泵有螺杆式真空泵，罗茨真空泵（爪式泵）及其组合机组^[7]。其中，多级干式螺杆真空泵因其强大的抽气能力、宽广的工作压力范围、优异的粉尘耐受性（采用螺杆间隙和涂层技术来完成）以及良好的等温压缩特性，成为该领域最具潜力的选项。它的节能效果非常显著：第一，它具有高机械效率，可以将电能直接转换为抽气功，不会有蒸汽喷射泵的二次能量

转换损失（热能→动能→压力能），也不会有水环泵内液体搅动时的能量损失。第二，不需要耗用价格昂贵的高压蒸汽、运行成本与电价直接挂钩、在大部分地区有成本优势^[8]。第三，干式泵一般以变频驱动为主，能够极为灵活地根据实时抽气负荷进行转速调节，做到准确按需供能，低负荷时段的节能作用尤为明显。

2.3 新型热驱动与余热利用泵技术

面向更深层面的节能降碳研究人员正在探索以新型热力学循环为基础或者以工业余热为动力直接驱动真空泵的技术。这类技术旨在将真空精炼工序自身或钢铁厂内广泛存在的低品位余热（如烟道气废热、冷却水废热、产品显热）转化为抽真空的动力，实现能源的梯级利用和“零碳”或低碳真空获得。例如：某些研究提出一种基于吸收式或吸附式制冷循环原理的“热驱动真空泵”。其基本思路是利用低品位热源（例如80~150℃热水或者低压蒸汽）驱动制冷循环，产生低温冷剂，用于冷凝被抽气体中的可凝组分（主要是水蒸气），从而通过相变产生并维持真空。该技术实质上属于“冷凝泵”，尤其适合在被抽气体水蒸气分压较大的情况下使用，如在真空精炼初、中期使用。它最大的优点在于可直接利用工业余热而不耗或少耗高品质的电能和高压蒸汽^[9]。另一种可能的解决方案是对传统蒸汽喷射泵的驱动源进行改良，如研发使用高温热水或其他低质量蒸汽作为工作介质的喷射泵，尽管这种泵的引射性能可能稍微不如高压过热蒸汽，但是如果废热能够得到有效的利用，它的综合能源利用效率以及经济性都会是十分可观的。

3 系统集成与智能控制节能技术

3.1 基于真空冶金工艺特性的抽气曲线优化设计

真空精炼并非一个在恒定真空度下进行的过程，其工艺周期内，气体产生量、气体成分（可凝性气体和非凝性气体的配比）、对真空度的要求是动态变化的。如RH处理脱碳期生成大量CO气体为非凝性气体、生成速率较快、要求抽速较大；在气体脱除的后阶段，主要任务是处理钢液中释放的H₂、N₂等微量气体和少量的CO，尽管这些气体体积较小，但对真空度的极限要求非常高。传统的真空泵系统设计往往基于最苛刻工况（最大气体负荷及最低极限真空）进行选型配置，导致系统在大部分时间内处于低效运行状态。基于冶金工艺特性的抽气曲线优化设计，旨在精确获取或预测一个处理周期内不同阶段的气体负荷谱（气体种类、分压、总流量与时间关系曲线）。进而基于该动态负荷谱反推真空泵系统各阶抽速和极限能力最优需求曲线。基于此需求曲线，进行泵组配置（例如：决定蒸汽喷射泵级数、大小，决定机械泵型号、组合及变频

范围等), 并设计相应的管路与阀门系统, 使得系统的能力曲线与工艺需求曲线尽量接近, 以免能力过剩。该“量体裁衣”设计方法从根本上避免冗余配置设备, 保证系统全周期综合运行能效达到最佳^[10]。

3.2 智能预测与自适应控制系统

将智能预测和自适应控制技术引入到优化后的硬件系统中是动态精细化节能最核心的方法。该系统以先进的传感器网络(对真空度、气体成分、流量、温度、压力、蒸汽/电力消耗进行实时监控)为基础, 以冶金工艺模型和真空泵系统性能模型为内核, 以大数据分析和人工智能算法为驱动。第一, 该系统能根据钢水初始条件、处理对象、历史数据等实时预测和动态修正当前炉次处理过程中气体析出行为, 并提前预测抽气负荷变化趋势。第二, 自适应控制系统可依据预测负荷及当前实时监测数据对整个真空系统进行动态调节。对混合系统或者机械泵系统来说, 具体指的是自动开启和停止不同等级的水泵; 精细调整蒸汽喷射泵进口蒸汽压力和阀门开度; 对水环泵补充水温度和循环量进行准确控制; 对于变频驱动干式机械泵或者罗茨泵进行转速设定值实时优化。其目标是在任何时刻, 都以最小的能源消耗(最低的蒸汽流量或电机功率), 满足工艺对真空度(或抽速)的要求。另外, 该系统可以通过机器学习、运行数据的持续积累、控制策略的自我优化以及故障预警和能效诊断等功能, 实现由“自动化”向“智能化”的转变。

3.3 能源回收与循环利用系统

真空泵系统耗能大, 但排出工质中还带有相当余能。回收和循环利用这些余能在闭环节能中至关重要。对于蒸汽喷射泵系统, 其排出的混合气体(工作蒸汽和被抽气体)通常进入后冷却器, 蒸汽冷凝放热, 热量被冷却水带走。这部分低品位热能(温度通常在 40~80℃)可以通过高效换热器加以回收, 用于预热锅炉给水、厂区采暖或生活热水等, 提高全厂能源利用率。对水环泵系统来说, 它的工作液是在泵体中加热的, 用换热的方法来回收这一部分热也是有一定实用价值的。对干式机械泵来说, 它从压缩气体中得到的热可由泵壳冷却系统循环利用。更进一步的系统集成考虑, 是将真空泵的排气(以 CO 气体为主的 RH 处理过程)引入厂区的燃气管网或进行回收利用, 实现碳资源的循环。能源回收系统设计和经济性需综合考虑钢铁企业整体能源平衡情况综合评价和优化。

4 结束语

真空精炼中真空泵节能减排技术由单一设备改造向系统集成和智能管控深度革新转变。优化传统蒸汽喷射泵, 采用新型混合和干式泵, 并根据工艺特性制

定智能控制策略共同组成目前节能的主要途径。这些技术能明显提高能效并减少蒸汽消耗和碳排放。未来, 进一步结合大数据、人工智能技术实现更加精准的能源管理和余热深度回收将成为不断降低真空精炼环境负荷、助推钢铁工业高企和谐发展的重点方向。

参考文献:

- [1] 张成彦, 刘旺, 叶鹏, 等. 双螺杆真空泵等间隙啮合转子的构建与数值模拟[J/OL]. 真空科学与技术学报, 1-11 [2026-01-13][2026-01-14]. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=jmR62x_2o8EE00GeAZOM1bMz9BZ8Q1QGdgyvtE5J5Wpz0IMRIf7vKm0lvnzzI_MzMnr9vIsB7iNtBNYZgxji_IDNEkyDv9nl6BAfnpKblevPGz9L5HJkH3xEglGU6uYOnV1En_iiQsXwYwkmxAU_tzUw41GapHpWpCm6UySSN4KpxwQWX2iw==&uniplatform=NZKPT&language=CHS.
- [2] 张莉, 项挺, 钟云会, 等. 罗茨真空泵排气脉动研究[J/OL]. 真空科学与技术学报, 1-11 [2026-01-08][2026-01-14]. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=jmR62x_2o8HYb8fTONrwlomiMSmzeYsP6CdEnUjYjiDMcZQG4zgpTd82GWnYhh9tgh7Jobdk2Ew3PTyTXSkpwQpiesH5ORUjtUPSJhGuKrCBSq_M8jWD9XxNnUZ8kTu9vyYylsR-g0bg45_ZkQZ9CWk58I74sRvnXZrcVFRk_9nkCC1a2IVQlg==&uniplatform=NZKPT&language=CHS.
- [3] 胡园青, 肖伟云, 吴顺. 前置冷凝罐在大型煤电真空泵系统中的应用[J]. 科技创新与应用, 2025, 15(36): 169-172, 176.
- [4] 陈泽烽, 张人会, 郭广强, 等. 液环真空泵内多相流空化机理[J]. 排灌机械工程学报, 2025, 43(12): 1222-1227.
- [5] 邵振鹏. 基于 Minitab 计算的电动真空泵加速寿命试验方法设计[J]. 液压气动与密封, 2025, 45(12): 119-123.
- [6] 张世伟, 张志军, 孙坤. 干式螺杆真空泵节能运行的新进展[J]. 真空, 2026, 63(01): 40-45.
- [7] 任彦蓉, 吴俊翔, 殷婕, 等. 通过在旋转蒸发仪真空泵后加装冷阱实现低沸点有机溶剂的完全回收[J]. 化工设计通讯, 2025, 51(11): 35-38.
- [8] 王吉欣, 胡宸琪. 新能源汽车电动真空泵助力制动系统故障诊断方法[J]. 真空, 2025, 62(06): 62-69.
- [9] 张人会, 左思宇, 陈学炳, 等. 基于数据同化的液环真空泵内部流动分析[J/OL]. 华中科技大学学报(自然科学版), 1-7 [2025-11-20][2026-01-14]. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=jmR62x_2o8EwKvIftQxrST1VxxwFGPFUyVbqQhIEJPhtd6uPX84A4fo8XBzEENIHMOhjbfltcVZ9AtQiRwhkiHmYTdym3Tf68h79ecrmx1RC4ycGjxS7u34Mfuru-figAP6pFvxmxr9V2I6NAjlcXCpCejl7jw9kaZF0JIW OsmvbGrbb-EuQw==&uniplatform=NZKPT&language=CHS.
- [10] 张欣. 博亚精密机械: 国产干式真空泵的突围之路[J]. 现代制造, 2025(11): 18-19.