

文章编号:0253-4339(2025)05-0058-11

doi:10.12465/j.issn.0253-4339.2025.05.058

应用于 MVC 系统的水蒸汽压缩机研究进展

潘家军^{1,2,3} 张化福^{2,3} 张振涛^{2,3} 杨俊玲^{2,3} 孟祥文¹ 吴宏伟⁴

(1 青岛科技大学机电工程学院 青岛 266000; 2 中国科学院理化技术研究所 北京 100190;

3 中国轻工业食品药品保质加工储运装备与节能技术重点实验室 北京 100190;

4 赫特福德大学工程与计算机科学学院 哈特菲尔德 AL10 9AB)

摘要 机械蒸汽压缩(MVC)系统是一种将低温余热资源进行回收再利用,可达到节能、减碳目的的一种节能技术。压缩机作为 MVC 系统中的核心设备,其性能的优劣直接影响系统的整体性能。主要对水蒸汽压缩机的热力学性能及结构性能进行综述,提出相关优化建议及改进思路,为后续对水蒸汽压缩机性能的优化提供一定的参考与帮助。

关键词 水蒸汽压缩机; MVC 系统; 热力学性能; 几何参数; 优化

中图分类号: TB61; TH45

文献标识码: A

Research Progress on Water Vapor Compressors Applied to MVC Systems

Pan Jiajun^{1,2,3} Zhang Huafu^{2,3} Zhang Zhentao^{2,3} Yang Junling^{2,3} Meng Xiangwen¹
Wu Hongwei⁴

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao, 266000, China; 2. Institute of Physical and Chemical Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100190, China; 3. Key Laboratory of Quality Assurance Processing, Storage and Transportation Equipment and Energy Conservation Technology for Food and Drug in China, Beijing, 100190, China; 4. School of Engineering and Computer Science, University of Hertfordshire, Hatfield, AL10 9AB, UK)

Abstract Mechanical vapor compression (MVC) systems are energy-saving technologies that recover and reuse low-temperature waste heat resources, achieving energy conservation and carbon reduction. As the core equipment in MVC systems, the compressor directly affects the overall performance of the system. This article primarily reviews the thermodynamic and structural performance of vapor compressors, proposes relevant enhancement suggestions and improvement ideas, and provides a reference and assistance for the subsequent optimization of vapor compressor performance.

Keywords steam compressor; MVC system; thermodynamic performance; geometric parameters; optimization

日常工业生产中会产生大量的低温余热资源,研究如何有效地利用低温余热资源是十分必要的。目前,2种主要的技术被应用于低温余热资源的利用,一种是高温热泵节能技术,可以实现工业非蒸汽余热的回收,另一种则是针对工业低温蒸汽余热回收的机械蒸汽压缩(mechanical vapor compression, MVC)节能技术。其中机械蒸汽压缩因高效、节能、环境友好等特点成为目前工业领域内的常用技术手段。MVC 技术在国内应用范围十分广阔,目前已在海水淡化、食品、干燥、废水处理等行业中展开应用和推广^[1-2]。

水蒸汽压缩机作为 MVC 系统的核心设备,是限制 MVC 节能技术发展推广的重要技术壁垒,在 MVC

系统中,研究重点主要集中于3种类型的水蒸汽压缩机:罗茨式、离心式以及螺杆式。选取合适的水蒸汽压缩机,对其进行深入研究和优化将有助于提升整个系统的性能和效率。本文首先对 MVC 系统的发展历程、工作原理及应用场景进行介绍;针对不同类型水蒸汽压缩机的工作特点、性能研究、几何参数、应用场景等方面进行叙述,最后对 MVC 系统中的水蒸汽压缩机国内外研究进行总结。

1 MVC 系统介绍

机械蒸汽压缩技术,又称为机械蒸汽再压缩(mechanical vapor recompression, MVR),作为高效的

基金项目:国家自然科学基金(21978308, 52206032)资助项目。(The project was supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 21978308 & No. 52206032).)

收稿日期:2024-04-09;修回日期:2024-07-14;录用日期:2024-08-21

蒸发技术在蒸发界备受关注,其最早是由瑞士 Sulzer-EscherWyss Ltd 在 1917 年发明,至 1925 年由奥地利公司 Reichenhall 安装了世界上第 1 台 MVC 设备^[3],并在 20 世纪 50 年代国外已将 MVC 技术广泛应用于蒸发工艺中,国内对于 MVC 技术的研究起步稍晚,在 20 世纪 80 年代随着国内对于蒸汽压缩机的研究得到一定进展,MVC 技术渐渐受到越来越多学者的关注^[4]。

1.1 MVC 系统工作原理及热力学状态

MVC 蒸发系统作为一种高效、温和的节能技术具有许多优点:低运行成本,仅需少量锅炉蒸汽即可驱动;辅助设施需求少,占地面积紧凑;启动便捷,运行平稳,操作界面友好;结构简约,安装投入低,蒸发效率出色。该系统主要由蒸发器、分离器、压缩机、预热器、冷凝水罐、原料箱组成。MVC 系统的工业流程如图 1 所示,原料液从原料箱流出,经过预热器的预热后变为高温原料液流入蒸发器,通过在蒸发器内换热蒸发得到气液混合蒸汽,接着通过分离器进行分流得到低温二次蒸汽与循环液,低温二次蒸汽经过压缩机的压缩成为高温过热蒸汽,循环液经过循环泵进入蒸发器内继续蒸发浓缩,冷凝水罐内的冷凝水通过喷水泵喷水消除过热蒸汽的过热度,得到高温饱和二次蒸汽,高温饱和二次蒸汽通入蒸发器中作为加热源与料液换热得到高温饱和和冷凝水,高温冷凝水通过预热器冷却后变成低温冷凝水流入冷凝水罐,最终从冷凝水罐排出。

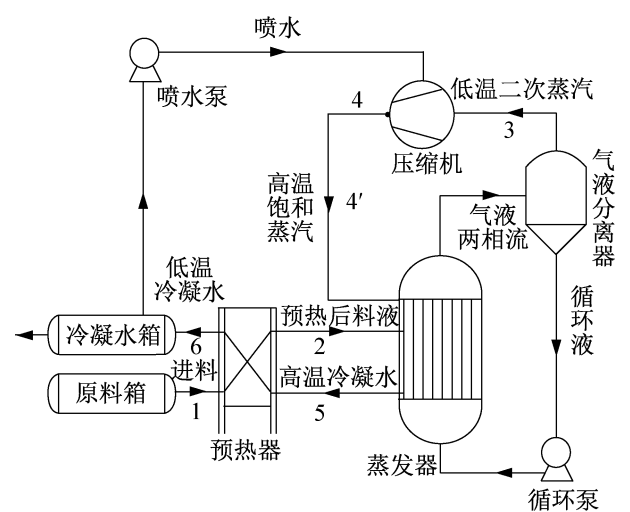


图 1 机械蒸汽压缩 (MVC) 蒸发系统工作流程
Fig.1 Workflow of mechanical vapor compression (MVC) evaporation system

MVC 蒸发系统的热力学过程如图 2 所示。由图 2 可知,料液通过预热器 (1-2) 为等压升温过程,焓值、熵值、温度均增加,料液经预热后接近或达到饱和

液(2);料液经过蒸发器与分离器(2-3)为等压蒸发过程,温度和压力保持不变,焓值与熵值增加,产生低温饱和二次蒸汽;低温饱和二次蒸汽经过压缩机压缩(3-4)理想状态下为等熵绝热压缩过程,得到高品位蒸汽,但由于压缩机的密封性,实际为不可逆过程,不完全绝热,所以压缩后的二次蒸汽变为具有过热度的高温蒸汽(4);过热度消除阶段(4-4')为等压冷却过程,压力不变,温度、焓值和熵值均降低,高温过热二次蒸汽(4)经冷却变为高温饱和二次蒸汽(4');冷凝阶段(4'-5)为高温饱和二次蒸汽等压冷凝过程,压力和温度不变,焓值和熵值降低,变成高温冷凝水(5);冷却阶段(5-6)高温冷凝水通过预热器换热,温度、焓值、熵值均降低,变成低温冷凝水最终流入冷凝水罐中排出或喷水利用。

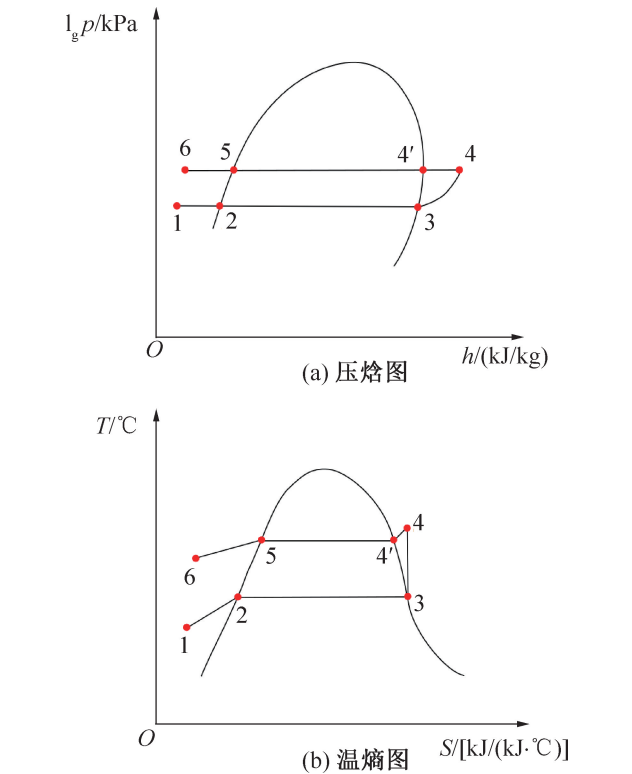


图 2 MVC 蒸发系统的热力学过程
Fig.2 Thermodynamic process of MVC evaporation system

1.2 MVC 系统应用现状

近年来,随着对 MVC 系统及水蒸气压缩机的研究,发现该系统已在海水淡化、食品、干燥、废水处理等行业中展开应用。越云凯等^[5]提出建立 MVC 海水淡化的数值模型,通过应用工程方程求解器分析系统性能与各项参数之间的关系,包括增压比、蒸发温度、进料海水的浓度和温度,研究发现较低的增压比和蒸发温度有助于降低系统的比功耗并提高淡水回收率。此外,降低进料海水的温度和浓度也能有效提升系统的淡水回收效率,为优化海水淡化设备提供了

重要的数据支持。W. Grattieri 等^[6]介绍了 MVC 在意大利食品工业中的应用,包含乳品浓缩、果蔬汁的浓缩,并将单效 MVC 蒸发器与传统的三效蒸发器进行了成本对比,得出 MVC 蒸发器的能耗减小了约 1/3。Zhang HuaFu 等^[7]提出了利用 MVC 真空带式干燥系统对糖浆进行干燥处理,实验结果表明,采用 MVC 系统可以显著降低工艺能耗,降幅为 33.2%~66.33%并通过建立模型与拟合方程通过性能预测得到工艺参数范围,为系统的优化提供了技术支持。田玲^[8]采用 MVC 卧式降膜蒸发技术分别对高盐废水、焦化废水 RO 凝缩液等进行蒸发处理,每蒸馏出 1 t 蒸馏水的能耗为 20.8~25.1 kW·h,蒸发出的水质良好可以回收,每吨废水处理成本可控制在 15.1 元以下,相较于反渗透法 (spacer tube reverse osmosis, STRO) 处理工艺成本 (19.05 元/t) 更低,提高系统效率降低运行成本与设备投资。

2 水蒸气压缩机的研究现状

水蒸气作为一种流动介质,在压缩系统中表现出低摩尔质量、高绝热指数和大比热容等特性,这些属性使系统具有较小的压差、较大的压比、较低的单位容积制冷量、较大的容积流量以及较高的排气温度等特点^[9]。然而,水蒸气压缩机在使用过程中也面临部件腐蚀的问题。当前,针对水蒸气压缩机的防腐防锈、密封性能、耐高温能力以及确保长期稳定运行等方面的技术问题,已成为亟需解决的重要课题^[10]。

目前应用于 MVC 系统的水蒸气压缩机主要分为 3 种,分别为离心式蒸汽压缩机、螺杆式蒸汽压缩机、罗茨式蒸汽压缩机,系统根据其任务条件选取合适的水蒸气压缩机,3 种压缩机的技术特点对比如表 1 所示。

2.1 离心式水蒸气压缩机

离心式压缩机作为速度式压缩机的代表,通过加快叶轮的旋转速度来增加气体的流速。气体在叶轮内因离心力作用而向外扩张,该过程中气体的动能被有效转换为压力能。随着气体流经叶轮并经历扩压流动,其速度和压力均得到显著提升,实现了气体的有效压缩。

M. N. Sarevski 等^[11]通过离心式水蒸气压缩机与两相喷射器相结合,达到了大流量,高压比的压缩效果,使离心式水蒸气压缩机的应用范围变得更广。陕鼓动力公司张武等^[12]与德国技术专家共同设计开发了以离心式压缩机为水蒸气压缩机的高性能水蒸气压缩机机组,单级压缩比可达 2.3,饱和蒸汽温升最大可达 24.8%。Sun Jianting 等^[13]研究了湿压缩对

表 1 3 种不同水蒸气压缩机技术特点对比

Tab.1 Comparison of technical characteristics of three different water vapor compressors

序号	名称	技术特点
1	离心式蒸汽压缩机	大流量 (100~2 000 m ³ /min); 低压比 (1.2~2.2); 排气温度高; 效率高; 对液滴比较敏感; 叶轮材料昂贵; 存在喘振风险
2	螺杆式蒸汽压缩机	中小流量 (5~300 m ³ /min); 高压比 (≤10); 效率高; 结构简单; 稳定性高; 可湿压缩; 可变频灵活调节; 适应高压场所; 造价较高
3	罗茨式蒸汽压缩机	中小流量 (5~500 m ³ /min); 中低压比 (1.5~3.5); 稳定性好; 振动较小; 噪声较高; 效率较低; 不适用高压场所; 造价低廉

离心式压缩机的影响,湿压缩提高了压缩机的总压比和等温效率,在注水比为 2%、液滴平均直径为 10 μm,与干压缩相比其最大总压比和峰值效率分别提高了 4.25% 和 0.71%。庞卫科等^[14]研究了蒸发压力对耗电功率以及系统性能的影响,蒸发压力从 95 kPa 升至 110 kPa 时,单位能耗蒸发水量 (specific moisture extraction rate, SMER) 从 30.04 kg/(kW·h) 降至 29.62 kg/(kW·h),COP 从 23.41 降至 22.99,绝热效率从 0.25 降至 0.21。郝帅^[15]对蒸发器的物料热料衡算得到压缩机工艺数据,对叶轮扩压器蜗壳进行选型设计得出随进口温度升高,叶轮进出口压力几乎无影响,扩压器进出口压力比从 2.16 大幅提升至 2.53。

预防喘振风险是离心式压缩机的一个重大技术难关,喘振是指当压缩机的流量降至一定程度时,压缩机内部的气流方向发生变化,导致叶轮和扩压器等部件出现气流的旋转脱离,形成喘振。该现象对离心式压缩机具有重大影响,会造成压缩机性能的恶化,会导致供气参数大幅度波动,破坏工艺系统的稳定性,加剧轴承、轴颈的磨损,对轴承产生冲击、机组静动件碰撞破坏^[16]。李泽洋^[17]通过控制设计源头设置逆止阀,搭建防喘振系统以预防喘振。江小英^[18]自主研发阻尼轴承系统,压缩机在临界速度时的振幅显著下降,为了提高滚动轴承的抗振性能,压缩机轴承采用滚动轴承,性能调节范围宽,抗击变化负荷的能力提升,在不同工况下预防喘振。谢林^[19]设计了开机过程和正常运行过程中流量减小工况的防喘控制算法预防喘振。张明^[20]提出了融合振动信息与工

艺信息的喘振故障控制策略,使用振动分析方法实现防喘系统喘振限实验标定优化,降低喘振影响。

应用离心式水蒸气压缩机的 MVC 蒸发系统,多用于浓缩溶液提升浓度,利用离心压缩机低能耗高效率特点,达到节约成本的目的,如表 2 所示。

表 2 离心式水蒸气压缩机的应用范围

Tab.2 The application scope of centrifugal steam compressors

应用单位	压缩机类型	应用效果
贵溪冶炼厂 ^[21]	离心蒸汽压缩机	利用离心压缩机的 MVC 系统 150 d 处理 30 366 m ³ 硫酸铜溶液共节约 123.430 3 万元
浙江巨化股份有限公司电化厂 ^[22]	高速离心蒸汽压缩机	在处理过程离心压缩机温升为 20 ℃ 以上,为 MVC 蒸发 10 万 t/a 节约费用约 806.9 万元
南京工业大学 ^[23]	单级离心蒸汽压缩机	MVC 系统的性能系数达到 17.2,离心压缩机的低压比焓效率达 62%
南方电网电力科技股份有限公司 ^[24]	离心压缩机	入口流量为 0.5 t/h,温升为 10 ℃,在 MVC 系统运行 168 h,钙镁离子质量浓度从 1 229 mg/L 降至 1 033 mg/L,相比于普通蒸发系统,平均电耗节约 37.5 kW·h/m ³
中蓝连海设计研究院有限公司 ^[25]	单级离心式压缩机	入口流量为 11 t/h,压缩机实际功率为 1 415 kW,运行 8 000 h 可节约效益至 572.52 万元

2.2 螺杆式水蒸气压缩机

螺杆式压缩机属于容积式压缩机,依靠基元容积的周期性吸气、压缩、排气,完成整个压缩过程。

2.2.1 单螺杆水蒸气压缩机

单螺杆压缩机属于容积式压缩机,气体通过吸气口进入工作腔内,通过螺杆与星轮啮合相对运动,基元容积逐渐减小,达到压缩气体的目的。其结构简单,转子径向与轴向力完全平衡,轴承使用寿命长,无余隙容积,压比大,不会发生喘振,噪声低,可变频灵活调节,系统泄漏少,拆卸维修方便,但存在排气温度过高,星轮片的磨损严重,寿命短等问题^[1,26]。

李亚南等^[27]在对压缩机性能影响因素的研究中发现,当喷水孔直径由 5 mm 增至 7 mm,且在额定工况下运行时,排气温度显著下降 40.4 K,同时容积效率和绝热效率分别提升 3.99% 和 7.57%,通过韦伯数来确定不同喷水孔直径的最小喷水量。陈伟成等^[28]对水蒸气压缩机的喷水水质中的钙镁离子与酸性进行了要求,防止设备中产生水垢以及腐蚀。Wang Zengli 等^[29]通过控制工作腔容积分析水蒸气的

热力学性能,当喷水质量流量从 0 L/s 增至 0.2 L/s,排气温度降低 88.81 K,排气压力降低 7.96%,随着喷水速率的不断增大会降低压缩机的绝热效率,降低喷水温度和压力可提高绝热效率。王力威等^[30]研究了系统在不同蒸发温度下的性能,发现当蒸发温度超过 80 ℃,压缩机的容积效率能够提升至 0.73 以上,绝热效率则能够达到 0.5 以上,此时系统的 COP (coefficient of performance,性能系数) 可达到 12.5。由此可知,提升蒸发温度对于减少能耗、增强系统性能系数以及提高单位电能蒸发水量具有积极作用。

啮合副型线设计是研发单螺杆压缩机重点关注的课题之一,啮合副型线是星轮齿侧与螺杆槽壁接触配合的几何曲面型线,寻求接触应力小,磨损小,接触良好,泄漏少的型线^[31]。目前单螺杆压缩机的啮合副型线主要分为直线-直线包络面啮合副(磨损部位固定,寿命短、泄漏量大,属于淘汰啮合副^[32]);圆柱-圆柱包络面啮合副(加工精度差,精度影响大,影响容积效率^[33]);直线包络面啮合副(车削加工,所需刀具的精度和强度很高,存在批量生产困难^[32])。湘潭大学的许明文^[34]按照 PC 型单螺杆压缩机螺杆和星轮的空间位置关系,设计一次包络啮合副母面的数学模型,推导出螺槽包络面方程和一次包络的啮合条件。王可等^[35]建立啮合副空间坐标系,设计了圆柱-圆柱包络啮合副,根据空间啮合定理得到了啮合线。李锦上^[36]设计了单螺杆压缩机双椭圆产形面二次包络型线,利用空间坐标确定啮合点和转换关系,运用三面共点构造法生成星轮的啮合面。吴伟烽等^[37]根据星轮螺杆的啮合位置,建立坐标系,计算出多圆柱包络面。以多段圆柱分段啮合,提升星轮片的寿命和压缩机的容积效率。

MVC 系统选用单螺杆水蒸气压缩机大多应用于高温升,高压比工况,如表 3 所示。

2.2.2 双螺杆水蒸气压缩机

双螺杆压缩机的核心结构包括机壳、一对螺旋形的阴阳转子、精密轴承、喷油装置、同步齿轮以及高效密封件。在压缩机的机壳内部,一对螺旋形转子紧密啮合,其中阳转子作为驱动轮与电机直接连接,而阴转子则作为从动轮随之旋转。机壳的两端设计有专门的进气口和排气口,转子在机体内的旋转运动导致基元容积随着转子的相互啮合和分离而周期性变化,从而实现气体的有效压缩^[43-44]。其结构简单,转速高,体积小,动力平衡好,运行稳定,容积效率高,但存在噪声大、转子干涉磨损等问题。

Shen Jiubing 等^[45]压缩机进口温度为 79 ℃,转速从 2 000 r/min 升至 3 000 r/min,压缩机功耗从

表 3 单螺杆水蒸气压缩机的应用范围

Tab.3 Application scope of single screw steam compressor		
应用单位	压缩机类型	应用效果
西安交通大 学 ^[38]	单 螺 杆 压 缩机	在蒸发工艺中,螺杆压缩吸气量为 17 m ³ /min 时,工作 1 年,相较于罗茨与离心可节约运行成本达 21 612~59 329 元
	单螺杆压缩机的高温热泵机组	供热温度为 95~130 ℃,余热温度为 35~55 ℃时采用单机压缩机的高温热泵结合经济器循环,余热温度为 8~25 ℃时采用复叠循环,系统制热量为 170~750 kW
Star Refrigeration ^[40]	Neatpump 热泵	采用特殊的铸钢设计单螺杆压缩机可承受高达 7 600 kPa 的压力,热源温度为 50 ℃,输出温度为 90 ℃,可实现 COP 为 4
北京华源泰盟 节能设备有限 公司 ^[41]	单螺杆蒸汽 压缩机	蒸发浓缩排气温度从 113 ℃ 升至 126 ℃,相较于传统双效或三效蒸发可节约费用 69%和 42%
新疆大学 ^[42]	单螺杆水蒸 气压缩机	采用气相温度为 100 ℃,对 2 000 kg 质量分数为 15%磷酸氢二钠溶液蒸发浓缩至 40%,蒸发水量约为 1 250 kg,节约费用 72. 714%(180. 51 元)

65 kW 升至 104 kW,体积流量从 48 m³/min 升至 82. 4 m³/min,容积效率从 74%升至 82%,等熵效率几乎保持不变。孙时中等^[46]研究了运行转速和冷凝温度对压力脉动特性的影响,发现随着转速的升高,排气腔压力脉动从转速为 1 380 r/min 时的 58. 6 kPa 升至 4 200 r/min 时的 141. 0 kPa,随着冷凝温度升高,压力脉动幅值从 34 ℃时的 132. 0 kPa 升至 57 ℃时的 314. 0 kPa。马凯等^[47]发现双螺杆压缩机的喷水量与旋转速度呈正比关系,喷水量与压缩蒸汽最佳质量比为 8. 9%~10. 4%,连续喷液可增大容积效率 20%。胡斌等^[48]为了得到高的输出温度影响因素,通过搭建超高温水蒸气热泵样机测试发现,蒸发温度为 80 ℃,冷凝温度从 115 ℃升至 145 ℃时,热泵 COP 从 4. 88 降至 1. 89。在蒸发温度为 85 ℃、冷凝温度为 117 ℃时,最高 COP 为 6. 1,制热量为 285 kW 的热泵,其 COP 和卡诺效率随着输出温度的升高而增加。

双螺杆式压缩机的阴阳转子在相互啮合的过程中,会产生周期性的交变应力,进而引起机械振动。转子轴系通常具有一定的弹性,加工和装配的微小误差均可能导致轴系的不对中和不平衡,从而放大振动,引发机械性噪声。同时,在吸气、压缩和排气的过

程中,转子的齿和齿槽与壳体壁面的精确配合形成变化的工作容积,这种周期性变化会导致气流脉动,进而生成为流体动力源的振动噪声^[49]。周明龙等^[50]采用双层壁结构壳体阻碍振动噪声传递,降低压缩机的噪声。陈文卿等^[51]基于声波干涉原理,在排气端面上设计气流脉动衰减装置,通过旁支流道产生气流脉动与压缩机气流脉动幅值相等,相互叠加抵消,达到衰减流体性振动噪声。张炯焱^[52-53]对双螺杆压缩机原有的 4/6 型线转子的齿间面积、容积、接触线和泄漏三角形进行了优化设计,在原有的基础上提出了减小中心距的螺杆转子型线,优化出 4/5 齿形线,优化后的型线和转子结构显著地减小了齿顶间隙面积、接触线长度以及三角泄漏面积,在提高螺杆压缩机效率的同时节省了加工材料成本。张炜等^[54]通过数值模拟研究了齿顶间隙和齿间间隙对螺杆转子结构特性的影响。分析结果显示,随着间隙尺寸的增加,阴阳转子的最大变形先呈现增大趋势,随后逐渐减小,且整体变化幅度较为有限。为了预防转子变形引发的干涉和磨损问题,建议齿顶间隙控制在 0. 17 mm 以上,齿间间隙控制在 0. 33 mm 以上。

表 4 简要列举了双螺杆蒸汽压缩机的市场应用效果,发现双螺杆蒸汽压缩机常用于大流量高温升工况。

表 4 双螺杆水蒸气压缩机的应用范围

Tab.4 Application scope of twin-screw steam compressor		
应用单位	压缩机类型	应用效果
神户制钢 ^[39]	半密封双螺 杆压缩机	工艺过程中余热温度为 70 ℃,输出 165 ℃ 蒸汽,流量为 890 kg/h,COP 为 2. 5
里昂大学 ^[55]	水蒸气喷射 双 螺 杆 压 缩机	以 85~95 ℃ 的余热为热源,冷凝温度为 145 ℃时,可提供超过 300 kW 的热量输出
江苏通润驱动 设备股份有限 公司 ^[56]	喷水双螺杆 蒸汽压缩机	以压比为 3. 4,设计流量为 83 m ³ /min,处理 60 t/d 污水,能耗约为 35 kW·h/t,产水量为 1. 03 t/h
Kobelco ^[57]	半封闭双频 双 螺 杆 压 缩机	双螺杆压力可达 6 300 kPa,可将温度降至 90 ℃,当热源温度为 35 ℃,供热温度为 80 ℃,COP 为 5. 0,制热量为 14 MW
天津海水淡化 与综合利用研 究所 ^[58]	双螺杆蒸汽 压缩机	双螺杆压缩机蒸汽温升为 22. 3 ℃,压比为 2. 26,处理负荷为 24 m ³ /d,进水溶解性固体 TDS ≤ 200 000 mg/L, COD ≤ 50 000 mg/L 效率为 71. 2%

注:TDS:total dissolved solids;COD:chemical oxygen demand。

2.3 罗茨式水蒸气压缩机

罗茨式压缩机作为一种容积式压缩设备,依靠一对相互啮合的回转叶轮,将低压气体从吸气端引入并通过叶轮的旋转将其压缩至高压端的排气腔,从而实现气体压力的急剧增加。在压缩过程中,气体的容积逐渐减小,以此达到压缩的效果。这种压缩机具有良好的动平衡性,振动较小,对粉尘的干扰不敏感。然而,在运行中可能会遇到排气温度过高的问题,这不仅可能引起热量沿主轴传递至机械密封或轴承,影响其使用寿命,还可能带来较大的运行噪声和严格的密封要求^[2,10,16,59]。

俞丽华等^[60]通过中间补气或喷水来缓和排气温度过高的问题,建立补气式罗茨蒸汽压缩机工作过程的数学模型,结果表明每个工况阶段均有相应的补气质量比,当补气质量比为相应工况下的最大值时,罗茨压缩机具有最高的容积效率、最低排气温度和最小轴功率,随着补气质量比的增大,罗茨压缩机的排气温度逐渐降低。Zhang Huafu 等^[61-62]研究罗茨水蒸气压缩机的性能参数随蒸发温度变化的规律时,发现随着蒸发温度的升高,吸气流量由 7.10 m³/min 增至 11.74 m³/min,而压缩比功则由 310.69 kJ/kg 降至 158.54 kJ/kg。同时,容积效率和等熵效率分别从 52.21% 提升至 71.54% 和从 16.48% 增至 36.15%,显示出明显的上升趋势。上述结果表明,提升压缩机的工作频率对于增强其效率是有益的。顾承真等^[63]研究了进料温度、蒸发压强、压缩机频率对 MVC 蒸发系统性能指标 SMER 和总蒸发水量的影响,SMER 与水蒸发量随着进料温度的提升而升高,SMER 随着蒸发压强的增大而减小,蒸发水量随压缩机频率的增大而增大,电加热功耗随着压缩机频率的增大而减小。Hong Housheng 等^[64]搭建了一个以罗茨压缩机为水蒸气压缩机的 MVC 实验平台,研究了进料温度、蒸发压力、压缩机频率对压缩机蒸发率、SMER 和功耗的影响,随着进料温度的升高,蒸发率与电加热功耗变化,随着蒸发压力的增大,蒸发率增大,SMER 降低;随着压缩机的频率增大,蒸发率上升,SMER 保持平缓,压缩机功耗增大,电辅热功耗降低。

江远峰^[65]采用一种单极集装式机械密封结构,该密封结构可以有效防止介质泄漏并维持腔体内压力,密封结构主要包括轴套、介质端第一动环和介质端第二动环等部分。这些部件通过紧定螺钉固定在一起,形成一个完整的集合体。密封旋转部分呈单变截面横向 L 型环,该 L 型环的设计有助于在旋转时维持稳定的密封效果。L 型环与腔体内壁之间存在一定间隙,该间隙允许输送介质通过,而最终由密封

副实现密封作用,横向 L 型环内由循环冷却水带走热量达到降温目的。张宝夫等^[66]经过对转子型线的研究,发现多叶转子型线相比于二叶宽齿顶的转子型线,可以减少气流引起的噪声,为了保证转子在任何位置都处于啮合状态,设计了一种由圆弧、摆线、圆弧、圆弧组成的型线扭叶转子,该设计有助于减少转子之间的间隙,从而降低气流冲击和噪声。蔡玉强等^[67]为了提升罗茨压缩机的性能,设计了一种新型三叶转子型线,该型线由圆弧、渐开线和圆弧包络线组合而成,成功将压缩机的面积利用系数提升了 16%。通过应用 FLUENT 软件对新型扭叶罗茨压缩机与直叶罗茨压缩机的内部流场进行模拟对比,结果表明新型三叶罗茨压缩机能够实现约 4 kPa 的增压效果,不仅满足了工作要求,还使出口压力和流量更加稳定。此外,新型设计有效延长了回流时间并减弱了回流强度,从而有助于降低运行过程中的噪声。

表 5 简要列举了罗茨水蒸气压缩机的应用范围,发现罗茨式水蒸气压缩机常用于低压缩比工况,凭借低能耗、高效率特点降低成本。

表 5 罗茨式水蒸气压缩机的应用范围

Tab.5 Application scope of Roots steam compressor

应用单位	压缩机类型	应用效果
江苏北矿金属循环利用科技有限公司 ^[68]	罗茨蒸汽压缩机	1 kg 蒸汽由状态 1(压力 0.1 MPa, 温度 100 ℃, 蒸汽焓 2 675.1 kJ, 相变潜热 2 257.6 kJ) 经过罗茨压缩机做功 90.5 kJ 到达状态 2(压力 0.16 MPa, 温度 113 ℃, 蒸汽焓 2 696.3 kJ)
胜利油田勘察设计院公司 ^[69]	罗茨压缩机	罗茨压缩机在蒸发工艺过程中,在进料温度为 98 ℃, 压缩前后压力升为 20 kPa, 随着压缩机频率的增大总蒸发量与净蒸发量同步增加
浙江省生物燃料利用技术重点实验室 ^[70]	罗茨蒸汽压缩机	在 MVC 干燥系统运行过程中,罗茨压缩机的压缩比从 1.3 升至 2.1, 系统能效比从 8.8 降至 5.1, 单位耗能从 3.4 kg/(kW·h) 降至 2.2 kg/(kW·h)
National University of Singapore ^[71]	罗茨蒸汽压缩机	输入流量达到 9.5 m ³ /min, 压缩机的转速为 2 400 r/min 时其功率为 22.5 kW, 压缩比为 1.55, 系统效率可达 67%
金桥益海(连云港)氯碱有限公司 ^[72]	罗茨蒸汽压缩机	MVR 蒸发工艺 1 t 水能耗成本为 23.4 元, 五效蒸发工艺 1 t 水能耗成本为 65.7 元, 15 万 t/a 烧碱规模可节约成本 2 200 万元

3 结论与展望

MVC 系统作为一种高效节能技术,压缩机的性能直接决定了系统的节能效果。压缩机的能效比是衡量其性能的重要指标,能效比越高,意味着在单位能量输入下,压缩机能够提供更多的制冷或加热效果。此外,压缩机的可靠性和噪声水平也是评估其性能的重要因素。综上所述,在 MVC 系统中,压缩机的性能包括能效比、可靠性和噪声水平,这些因素共同决定了系统的节能效果。因此,选择合适的压缩机对于确保 MVC 系统的高效运行至关重要。通过针对 3 种压缩机的热力学性能、结构性能、应用范围 3 方面的整理综述得到如下结论:

1) 离心式压缩机具有大流量和高效率的特点,然而受限于较低的单级压比和较高的排气温度,以及对液滴的敏感性,应用领域相对受限。但通过采用组合式设计的离心压缩机,能够有效克服这些局限。例如,将离心式压缩机与具有高压比比的螺杆压缩机相结合,可以实现超过 20 的升压比,从而扩展其应用范围。此外,研究原动机与离心压缩机的集成结构,也是当前离心式压缩机发展的关键方向之一。

2) 单螺杆式压缩机具有结构合理和转子力的完全平衡,其轴承寿命长、无余隙容积以及较大的压比等特点使其在工业应用中表现出色。然而,星轮的磨损和过高的排气温度可能会缩短单螺杆压缩机的使用寿命并降低其效率,同时材料成本也相对较高。虽然目前的研究表明通过喷水可以有效降低排气温度,但星轮磨损问题仍是亟待解决的重大挑战之一。因此,优化星轮型线设计成为了提升单螺杆压缩机性能的关键研究领域。

3) 双螺杆式压缩机流量范围大,具有高压比,能够满足多种蒸汽压缩工艺的需求。然而,这种压缩机存在较大的运行噪声和转子间的干涉磨损等问题。为了解决这些问题,国内外的学者正致力于对螺杆压缩机的关键几何参数进行深入研究,包括齿轮比、间隙尺寸和转子型线等。通过精心设计转子型线和精确控制间隙尺寸,旨在有效控制双螺杆压缩机的噪声和脉动,从而优化其整体性能。

4) 罗茨式压缩机以低振动、简洁的结构和对粉尘的不敏感性而受到青睐,得益于其出色的动平衡特性。但同时也面临着流量有限、压比较低、运行噪声较大、调节困难以及高密封要求和高排气温度等挑战。当前的研究重点集中于降低排气温度、减少噪声和提升密封性能上。鉴于压比的限制可能会影响罗茨压缩机的应用范围,探索提高其压比和简化调节过

程的方法,成为优化该类型压缩机的重要研究方向。

本文受中央引导地方科技发展资金项目(ZYYD2022B11, 2022ZY0048);河北省重大专项(23291801Z);埃及科学、技术和创新基金管理局(STIFA)(ID:44205)资助。(The project was supported by the Central Guiding Local Science and Technology Development Fund Project (No. ZYYD2022B11 & No. 2022ZY0048), Hebei Province Major Special Project (No. 23291801Z), the Science, Technology & Innovation Funding Authority (STIFA) of Egypt (ID: 44205).)

参考文献

- [1] 张化福, 童莉葛, 张振涛, 等. 机械蒸汽压缩蒸发技术研究现状与发展趋势[J]. 化工学报, 2023, 74(增刊 1): 8-24. (ZHANG Huaifu, TONG Lige, ZHANG Zhentao, et al. Recent progress and development trend of mechanical vapor compression evaporation technology[J]. CIESC Journal, 2023, 74(Suppl. 1): 8-24.)
- [2] 张建军, 李帅旗, 陈永珍, 等. 蒸汽再压缩技术研究现状与发展趋势[J]. 新能源进展, 2020, 8(3): 207-215. (ZHANG Jianjun, LI Shuaiqi, CHEN Yongzhen, et al. Overview and development tendency of steam recompression[J]. Advances in New and Renewable Energy, 2020, 8(3): 207-215.)
- [3] 黄成. 机械压缩式热泵制盐工艺简述[J]. 盐业与化工, 2010, 39(4): 42-44. (HUANG Cheng. Compendium of the mechanical compressed heat pump technology[J]. Journal of Salt and Chemical Industry, 2010, 39(4): 42-44.)
- [4] 赵媛媛, 赵磊, 钱方, 等. 机械蒸汽再压缩(MVR)蒸发器在食品工业中的应用[J]. 中国乳品工业, 2015, 43(1): 27-28. (ZHAO Yuanyuan, ZHAO Lei, QIAN Fang, et al. Application of the mechanical vapor recompression (MVR) evaporator in the food industry[J]. China Dairy Industry, 2015, 43(1): 27-28.)
- [5] 越云凯, 吴小华, 张振涛. MVR 海水淡化系统运行特性分析与优化[J]. 工程热物理学报, 2018, 39(9): 1985-1990. (YUE Yunkai, WU Xiaohua, ZHANG Zhentao. Operation characteristic analysis and optimization of MVR seawater desalination system[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2018, 39(9): 1985-1990.)
- [6] GRATTIERI W, MEDICH C, VANZAN R. Electrotechnologies for energy end uses: application of mechanical vapor recompression to food industry [C]//16th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution CIRED. London: Institution of Electrical Engineers, 2001.
- [7] ZHANG Huaifu, ZHANG Zhentao, TONG Lige, et al. A novel mechanical vapor compression vacuum belt drying

- system; model development, experimental verification and performance prediction [J]. *Energy Conversion and Management*, 2022, 269: 116108.
- [8] 田玲. MVR 蒸发技术在废水处理中的应用研究[J]. *工业水处理*, 2023, 43(4): 144–148. (TIAN Ling. Study on the application of MVR evaporation technology in wastewater treatment [J]. *Industrial Water Treatment*, 2023, 43(4): 144–148.)
- [9] 任金禄. 水制冷剂压缩式制冷机[J]. *制冷与空调*(北京), 2008, 8(增刊1): 53–59. (REN Jinlu. Water refrigerant compression refrigeration machine [J]. *Refrigeration and Air-conditioning*, 2008, 8(Suppl. 1): 53–59.)
- [10] 吴迪, 胡斌, 王如竹, 等. 水制冷剂及水蒸气压缩机研究现状和展望[J]. *化工学报*, 2017, 68(8): 2959–2968. (WU Di, HU Bin, WANG Ruzhu, et al. A review on development and prospect of water refrigerant and water vapor compressor [J]. *CIESC Journal*, 2017, 68(8): 2959–2968.)
- [11] ŠAREVSKI M N, ŠAREVSKI V N. Preliminary study of a novel R718 refrigeration cycle with single stage centrifugal compressor and two-phase ejector[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2014, 40: 435–449.
- [12] 张武, 李新宏, 惠明. 高性能 MVR 水蒸汽压缩机技术及应用[J]. *有色冶金节能*, 2016, 32(3): 35–38. (ZHANG Wu, LI Xinhong, HUI Ming. Technology of high performance MVR vapor compressor and it's application [J]. *Energy Saving of Nonferrous Metallurgy*, 2016, 32(3): 35–38.)
- [13] SUN Jianting, ZUO Zhitao, LIANG Qi, et al. Theoretical and experimental study on effects of wet compression on centrifugal compressor performance[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2022, 212: 118163.
- [14] 庞卫科, 林文举, 潘麒麟, 等. 离心风机驱动机械蒸汽再压缩热泵系统的性能分析[J]. *机械工程学报*, 2013, 49(12): 142–146. (PANG Weike, LIN Wenju, PAN Qilin, et al. Performance analysis of mechanical vapor recompression heat pump driven by centrifuge fan [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2013, 49(12): 142–146.)
- [15] 郝帅. MVR 丙烯腈废水零排放工艺关键设备设计研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2017. (HAO Shuai. Research on the design of key equipment for MVR acrylonitrile wastewater zero discharge process [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2017.)
- [16] 黄成, 董晓铭. 三种常用机械压缩式热泵(MVR)的特点[J]. *盐科学与化工*, 2021, 50(1): 48–50. (HUANG Cheng, DONG Xiaoming. Characteristics of three kinds of mechanical compression heat pumps (MVR) [J]. *Journal of Salt Science and Chemical Industry*, 2021, 50(1): 48–50.)
- [17] 李泽洋. 离心式压缩机喘振原因及其预防措施分析[J]. *设备管理与维修*, 2022(14): 82–84. (LI Zeyang. Analysis of causes and preventive measures for centrifugal compressor surge [J]. *Plant Maintenance Engineering*, 2022(14): 82–84.)
- [18] 江小英. 国产低温升离心蒸汽压缩机在 MVR 中的应用[J]. *风机技术*, 2020, 62(增刊1): 34–37. (JIANG Xiaoying. Application of domestic low temperature rising centrifugal steam compressor in MVR[J]. *Chinese Journal of Turbomachinery*, 2020, 62(Suppl. 1): 34–37.)
- [19] 谢林. MVR 水蒸汽压缩机喘振控制与联锁保护方法研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2018. (XIE Lin. research on surge control and interlocking protection methods for mvr steam compressors [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2018.)
- [20] 张明. 整体齿轮式离心压缩机复杂系统故障机理及诊治方法研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2017. (ZHANG Ming. Research on the fault mechanism and diagnosis and treatment methods of complex systems in integral gear centrifugal compressors [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2017.)
- [21] 汪超勤. MVR 在硫酸铜蒸发中的应用[J]. *世界有色金属*, 2022(14): 190–192. (WANG Chaoqin. Application of MVR in copper sulfate evaporation [J]. *World Nonferrous Metals*, 2022(14): 190–192.)
- [22] 江泳, 吴兴东. MVR 技术在含氯废水治理中的应用[J]. *氯碱工业*, 2019, 55(3): 26–28. (JIANG Yong, WU Xingdong. Application of MVR technology in treatment of chlorinated wastewater [J]. *Chlor-Alkali Industry*, 2019, 55(3): 26–28.)
- [23] 董守亮, 李庆生. MVR 技术在液态奶蒸发系统中的应用[J]. *轻工机械*, 2014, 32(4): 1–4. (DONG Shouliang, LI Qingsheng. Application of mechanical vapor recompression technology in liquid milk evaporation system [J]. *Light Industry Machinery*, 2014, 32(4): 1–4.)
- [24] 林廷坤, 冯永新, 赵宁, 等. 机械式蒸汽再压缩技术浓缩脱硫废水中试研究[J]. *水处理技术*, 2022, 48(8): 111–115. (LIN Tingkun, FENG Yongxin, ZHAO Ning, et al. Pilot study on the concentration of desulfurization wastewater by mechanical vapor recompression technology [J]. *Technology of Water Treatment*, 2022, 48(8): 111–115.)
- [25] 胡立海. 蒸发组合工艺在危废废水物化预处理中的应用[J]. *中国资源综合利用*, 2022, 40(11): 182–185. (HU Lihai. Application of evaporation combined process in physicochemical pretreatment of hazardous waste water [J].

- China Resources Comprehensive Utilization, 2022, 40(11): 182-185.)
- [26] 胡斌, 姜佳彤, 吴迪, 等. 工业高温热泵发展现状与展望[J]. 制冷学报, 2023, 44(6): 1-12. (HU Bin, JIANG Jiatong, WU Di, et al. Development status and prospects of industrial high-temperature heat pumps[J]. Journal of Refrigeration, 2023, 44(6): 1-12.)
- [27] 李亚南, 王景甫, 吴玉庭, 等. 水润滑单螺杆空气压缩机喷水雾化的理论分析及仿真[J]. 北京工业大学学报, 2022, 48(5): 552-560. (LI Yanan, WANG Jingfu, WU Yuting, et al. Theoretical analysis and simulation on water injection atomization of water-lubricated single screw compressor [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2022, 48(5): 552-560.)
- [28] 陈伟成, 邓谦. 全无油喷水单螺杆压缩机的研发与应用[J]. 流体机械, 2010, 38(10): 51-52. (CHEN Weicheng, DENG Qian. Research and application on the full oil free single screw compressor[J]. Fluid Machinery, 2010, 38(10): 51-52.)
- [29] WANG Zengli, YUAN Qizhen, ZHOU Hongyang, et al. Research on heat and mass transfer characteristics of water-sprayed single-screw vapor compressor [J]. Applied Thermal Engineering, 2023, 230: 120811.
- [30] 王力威, 庄景发, 杨鲁伟, 等. 单螺杆水蒸汽压缩机驱动的MVR系统性能实验研究[J]. 中国科学院大学学报, 2015, 32(1): 38-45. (WANG Liwei, ZHUANG Jingfa, YANG Luwei, et al. Experimental study on performance of MVR system driven by single screw water vapor compressor [J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2015, 32(1): 38-45.)
- [31] 郑雷飞, 夏振鹏. 我国单螺杆压缩机的发展历程与进展[J]. 压缩机技术, 2006(2): 44-47. (ZHENG Leifei, XIA Zhenpeng. Development and progress of single screw compressor in China [J]. Compressor Technology, 2006(2): 44-47.)
- [32] 邵娟. 单螺杆压缩机螺旋啮合副啮合特性研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2007. (SHAO Juan. Research on the meshing characteristics of spiral meshing pairs in single screw compressors[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2007.)
- [33] 聂秋根, 肖尧先. 不规则螺旋槽的数控加工[J]. 制造技术与机床, 1996(7): 77-79. (NIE Qiugen, XIAO Yaoxian. CNC machining of irregular spiral grooves [J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 1996(7): 77-79.)
- [34] 许明文. PC型单螺杆压缩机型线设计及关键零部件制造实验研究[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2012. (XU Mingwen. Experimental study on profile design and key component manufacturing of PC single screw compressor [D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2012.)
- [35] 王可, 毛俊杰, 孙兴伟. 单螺杆压缩机螺旋啮合副型线设计及加工方法研究[J]. 通用机械, 2010(3): 78-80. (WANG Ke, MAO Junjie, SUN Xingwei. Research on processing technology of spiral meshing pair of single screw compressor[J]. General Machinery, 2010(3): 78-80.)
- [36] 李锦上. 单螺杆压缩机的双椭圆产形面二次包络型线研究[J]. 压缩机技术, 2013(5): 15-18. (LI Jinshang. Study on the secondary enveloping line with double ellipse shape surface in single screw compressor [J]. Compressor Technology, 2013(5): 15-18.)
- [37] 吴伟烽, 冯全科, 徐健. 单螺杆压缩机齿型的多圆柱包络原理[J]. 西安交通大学学报, 2007, 41(11): 1271-1274. (WU Weifeng, FENG Quanke, XU Jian. Principle of multi-column envelope couple of single screw compressor [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2007, 41(11): 1271-1274.)
- [38] 高磊, 张凯, 董冰, 等. 螺杆水蒸汽压缩机的MVR系统在碱回收中的应用[J]. 化工进展, 2014, 33(11): 3112-3117. (GAO Lei, ZHANG Kai, DONG Bing, et al. Research of MVR system with twin-screw vapor compressor in lye recovery [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2014, 33(11): 3112-3117.)
- [39] 刘华, 张治平, 王升, 等. 我国离心式制冷机组发展现状及趋势[J]. 暖通空调, 2022, 52(12): 41-47. (LIU Hua, ZHANG Zhiping, WANG Sheng, et al. Development status and trend of centrifugal chillers in China [J]. Journal of HV&AC, 2022, 52(12): 41-47.)
- [40] ZHANG Shengjun, WANG Huaixin, GUO Tao. Experimental investigation of moderately high temperature water source heat pump with non-azeotropic refrigerant mixtures [J]. Applied Energy, 2010, 87(5): 1554-1561.
- [41] 孙桂祥, 罗先德, 侯超. 机械蒸汽再压缩热泵蒸发技术用于蒸氨废液处理实验研究[J]. 节能与环保, 2022(3): 62-64. (SUN Guixiang, LUO Xiande, HOU Chao. Experimental study on mechanical steam recompression heat pump evaporation technology for ammonia waste liquid treatment [J]. Energy Conservation & Environmental Protection, 2022(3): 62-64.)
- [42] 刘军. 夹套式MVR热泵蒸发系统设计及性能研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2015. (LIU Jun. Design and performance study of jacketed MVR heat pump evaporation system [D]. Urumqi: Xinjiang University, 2015.)
- [43] 呼建栋, 雷新星. 双螺杆压缩机超温故障分析与对策[J]. 化学工程与装备, 2021(5): 163-164. (HU Jiandong, LEI Xinxing. Analysis and countermeasures of overheating faults in twin-screw compressors [J]. Chemical

- Engineering & Equipment, 2021(5): 163–164.)
- [44] 张满. 螺杆压缩机转子抱死分析及预防措施[J]. 今日制造与升级, 2022(4): 133–136. (ZHANG Man. Analysis and improvement of rotor damage in the helical-lobe compressor [J]. Manufacture & Upgrading Today, 2022(4): 133–136.)
- [45] SHEN Jiubing, XING Ziwen, ZHANG Kai, et al. Development of a water-injected twin-screw compressor for mechanical vapor compression desalination systems [J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 95:125–135.
- [46] 孙时中, 周明龙, 陈文卿, 等. 双螺杆制冷压缩机排气压力脉动特性的实验研究[J]. 制冷学报, 2024, 45(1): 28–35. (SUN Shizhong, ZHOU Minglong, CHEN Wenqing, et al. Experimental investigation of the characteristics of discharge pressure pulsation in a twin-screw refrigeration compressor [J]. Journal of Refrigeration, 2024, 45(1): 28–35.)
- [47] 马凯, 陈文卿, 李丹童, 等. 中大容量工业余热高温热泵的压缩机技术现状[J/OL]. 制冷学报, 1–14. (2024–05–10) [2024–07–14]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2182.TB.20240508.1459.006.html>. (MA Kai, CHEN Wenqing, LI Dantong, et al. Compressor technology status of medium and large-capacity industrial waste heat and high temperature heat pumps[J]. Journal of Refrigeration, 1–14. (2024–05–10) [2024–07–14]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2182.TB.20240508.1459.006.html>.)
- [48] 胡斌, 吴迪, 姜佳彤, 等. 水蒸气超高温热泵系统的实验研究[J]. 工程热物理学报, 2021, 42(4): 833–840. (HU Bin, WU Di, JIANG Jiatong, et al. Experimental study of a water vapor compression heat pump with very high temperature output [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2021, 42(4): 833–840.)
- [49] 周明龙, 陈文卿, 武晓昆, 等. 制冷压缩机振动噪声控制技术[J]. 制冷与空调(北京), 2023, 23(2): 73–80. (ZHOU Minglong, CHEN Wenqing, WU Xiaokun, et al. Control technologies of vibration and noise in refrigeration compressor [J]. Refrigeration and Air-conditioning, 2023, 23(2): 73–80.)
- [50] 周明龙, 陈文卿, 何志龙, 等. 螺杆制冷压缩机振动噪声控制技术研究[J]. 制冷与空调(北京), 2019, 19(3): 55–60. (ZHOU Minglong, CHEN Wenqing, HE Zhilong, et al. Research on control techniques of vibration and noise in twin screw refrigeration compressor [J]. Refrigeration and Air-conditioning, 2019, 19(3): 55–60.)
- [51] 陈文卿, 沈九兵, 严思远, 等. 半封闭变频螺杆制冷压缩机降噪方法及试验[J]. 机械工程学报, 2020, 56(14): 188–195. (CHEN Wenqing, SHEN Jiubing, YAN Siyuan, et al. Design and experimental research of noise reduction method for semi-hermetic variable frequency twin-screw refrigeration compressor [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(14): 188–195.)
- [52] 张炯焱. 双螺杆压缩机齿型优化[J]. 压缩机技术, 2020(2): 49–53. (ZHANG Jiongyan. Optimization of the twin screw compressor rotor structure [J]. Compressor Technology, 2020(2): 49–53.)
- [53] 张炯焱. 双螺杆压缩机热动力学特性研究[J]. 压缩机技术, 2020(5): 29–32. (ZHANG Jiongyan. Study on the thermodynamic characteristics of twin screw compressor [J]. Compressor Technology, 2020(5): 29–32.)
- [54] 张炜, 何亚银, 王凯, 等. 齿顶及齿间间隙对双螺杆压缩机转子结构特性的影响[J]. 机床与液压, 2023, 51(3): 167–172. (ZHANG Wei, HE Yayin, WANG Kai, et al. Influence of tooth top and inter-tooth clearance on the structural characteristics of twin-screw compressor rotors [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2023, 51(3): 167–172.)
- [55] CHAMOUN M, RULLIERE R, HABERSCHILL P, et al. Experimental and numerical investigations of a new high temperature heat pump for industrial heat recovery using water as refrigerant [J]. International Journal of Refrigeration, 2014, 44: 177–188.
- [56] 沈九兵, 张凯, 邢子文, 等. 采用双螺杆压缩机的机械蒸汽再压缩污水处理系统试验研究[J]. 机械工程学报, 2016, 52(10): 185–190. (SHEN Jiubing, ZHANG Kai, XING Ziwen, et al. Experimental study of mechanical vapor compression wastewater distillation system using twin screw compressor [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(10): 185–190.)
- [57] OUE T, OKADA K. Air-sourced 90 °C hot water supplying heat pump "HEM-90A" [J]. Kobelco Technology Review, 2013.
- [58] 邢玉雷, 胡斌, 吕宏卿, 等. 高压比 MVR 蒸发结晶装置研制与应用[J]. 中国给水排水, 2023, 39(24): 46–52. (XING Yulei, HU Bin, LYU Hongqing, et al. Development and application of mechanical vapor recompression evaporation crystallization device with high pressure ratio [J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(24): 46–52.)
- [59] 卢奇, 黄超, 秦妮, 等. MVR 蒸发工艺系统中压缩机的选用分析[J]. 辽宁化工, 2020, 49(7): 817–819. (LU Qi, HUANG Chao, QIN Ni, et al. Analysis on selection of compressor in MVR evaporation process system [J]. Liaoning Chemical Industry, 2020, 49(7): 817–819.)
- [60] 俞丽华, 许树学, 马国远. 中间补气对罗茨式水蒸气制冷压缩机工作性能的影响[J]. 制冷与空调(四川), 2016, 30(4): 502–507. (YU Lihua, XU Shuxue, MA

- Guoyuan. Effect of a vapor injection on working performances of the roots compressor in water vapor compression refrigeration system[J]. *Refrigeration & Air Conditioning*, 2016, 30(4): 502–507.)
- [61] 张化福, 张青春, 童莉葛, 等. 罗茨水蒸气压缩机性能实验研究[J]. *制冷学报*, 2022, 43(1): 68–73. (ZHANG Huafu, ZHANG Qingchun, TONG Lige, et al. Experimental study on performance of roots steam compressor[J]. *Journal of Refrigeration*, 2022, 43(1): 68–73.)
- [62] ZHANG Huafu, ZHANG Zhentao, TONG Lige, et al. Experimental research and model optimization of a novel mechanical vapor compression evaporation system driven by Roots steam compressor [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2023, 150: 185–199.
- [63] 顾承真, 洪厚胜, 张志强, 等. 罗茨压缩机驱动 MVR 热泵系统的实验研究[J]. *化工进展*, 2015, 34(6): 1602–1606. (GU Chengzhen, HONG Housheng, ZHANG Zhiqiang, et al. Experimental study of mechanical vapor recompression of heat pump driven by roots compressor [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2015, 34(6): 1602–1606.)
- [64] HONG Housheng, LI Wei, GU Chengzhen. Performance study on a mechanical vapor compression evaporation system driven by Roots compressor [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, 125: 343–349.
- [65] 江远峰. 水蒸气罗茨压缩机轴封优化设计[J]. *机电信息*, 2021(12): 36–38. (JIANG Yuanfeng. Current research status of hard corrosion-resistant nano-composite coatings[J]. *Mechanical and Electrical Information*, 2021(12): 36–38.)
- [66] 张宝夫, 李金建, 吴意囡, 等. 提高罗茨式蒸汽压缩机运行特性的设计改进[J]. *化工机械*, 2018, 45(6): 722–724. (ZHANG Baofu, LI Jinjian, WU Yinan, et al. Design improvement for roots vapor compressors [J]. *Chemical Engineering & Machinery*, 2018, 45(6): 722–724.)
- [67] 蔡玉强, 李德才, 朱东升. 新型三叶罗茨压缩机设计研究[J]. *载人航天*, 2016, 22(3): 347–353. (CAI Yuqiang, LI Decai, ZHU Dongsheng. Research on design of a new type three lobe roots compressor[J]. *Manned Spaceflight*, 2016, 22(3): 347–353.)
- [68] 姚现召, 姚雷, 张帆. MVR 热泵技术在硫酸镍蒸发中的工业应用[J]. *中国资源综合利用*, 2018, 36(12): 163–165. (YAO Xianzhao, YAO Lei, ZHANG Fan. MVR technology in the application of nickel sulfate evaporation crystallization [J]. *China Resources Comprehensive Utilization*, 2018, 36(12): 163–165.)
- [69] 张勤灵, 刘晓华, 张涛. 机械蒸气再压缩系统再生高浓度溶液的性能研究[J]. *制冷学报*, 2021, 42(3): 19–27. (ZHANG Qinling, LIU Xiaohua, ZHANG Tao. Regeneration performance of high concentration solution by mechanical vapor recompression system [J]. *Journal of Refrigeration*, 2021, 42(3): 19–27.)
- [70] 陈海, 程榕, 郑燕萍, 等. MVR 耙式干燥系统设计与蒸发性能研究[J]. *现代化工*, 2017, 37(8): 174–177. (CHEN Hai, CHENG Rong, ZHENG Yanping, et al. Design and evaporation performance of rake dryer based on mechanical vapor recompression [J]. *Modern Chemical Industry*, 2017, 37(8): 174–177.)
- [71] BAHAR R, HAWLADER M N A, WOEL L S. Performance evaluation of a mechanical vapor compression desalination system[J]. *Desalination*, 2004, 166: 123–127.
- [72] 朱天松, 樊春升. 机械蒸汽再压缩(MVR)技术在淡盐水浓缩中的应用[J]. *苏盐科技*, 2013, 40(4): 12–14. (ZHU Tiansong, FAN Chunsheng. Application of mechanical vapor recompression (MVR) technology in diluted salt water concentration[J]. *Jiangsu Salt Science & Technology*, 2013, 40(4): 12–14.)

通信作者简介

孟祥文, 男, 讲师, 青岛科技大学大学机电工程学院, 13370888656, E-mail: meng_qust2013@163.com。研究方向: 机械蒸汽压缩技术。

About the corresponding author

Meng Xiangwen, male, lecturer, School of Mechanical and Electrical Engineering, Qingdao University of Science and Technology, 86–13370888656, E-mail: meng_qust2013@163.com. Research fields: mechanical steam compression technology.