

包装废弃物热解余热回收用涡旋膨胀机瞬态流动特性研究

王婧, 郭立强, 武立强, 田硕

(河北白沙烟草有限责任公司保定卷烟厂, 河北 保定 071000)

摘要: **目的** 为揭示进气压力的变化对涡旋膨胀机内部流动特征及性能参数的影响机制, 探究其对膨胀机效率及实际回收功率的影响规律。**方法** 以余热回收有机朗肯循环中的涡旋膨胀机为研究对象, 利用 STAR CCM+软件, 采用重叠网格技术对涡旋膨胀机内部计算流体域进行非稳态离散求解, 分析涡旋膨胀机流场变化特性以及性能参数的变化规律。**结果** 在出口压力不变的条件下, 随着进气压力的上升, 压力场分布梯度增大; 进、出口流量均呈现周期性波动, 出口流量的波动幅度明显小于入口流量的波动幅度。填充系数的大小一定程度上反映了膨胀机内部的泄漏程度或流动阻力大小, 观察到进气压力为 0.75 MPa 时填充系数最大, 此时工质的流动阻碍相对更小, 平均质量流量也最大。涡旋膨胀机等熵效率、输出功率均随进气压力的增大而增大。**结论** 涡旋膨胀机输出功率的优化与多种因素相关, 要综合考虑进出口实际焓差和平均质量流量等因素的影响, 只考虑单方面因素缺乏一定的合理性。

关键词: 包装废弃物; 余热回收; 涡旋膨胀机; 流动特性; 数值模拟

中图分类号: TK14 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2023)15-0244-08

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.15.032

Transient Flow Characteristics of Scroll Expander for Waste Heat Recovery from Packaging Waste Pyrolysis

WANG Jing, GUO Li-qiang, WU Li-qiang, TIAN Shuo

(Baoding Cigarette Factory of Hebei Baisha Tobacco Co., Ltd., Hebei Baoding 071000, China)

ABSTRACT: The work aims to explore the effect law of inlet pressure change on the efficiency and actual recovery power of scroll expander to reveal the effect mechanism of inlet pressure change on internal flow characteristics and performance parameters of scroll expander. With the scroll expander in the organic Rankine cycle of waste heat recovery as the research object, STAR CCM+ software and overlapping grid technology were adopted to conduct the unsteady discrete solution on the internal computational fluid domain of the scroll expander, and the flow field change characteristics and the change law of performance parameters of the scroll expander were analyzed. When the outlet pressure was constant, the gradient of pressure distribution increased with the increase of inlet pressure. The flow at the inlet and outlet fluctuated periodically, and the fluctuation range of the flow at the outlet was obviously smaller than that at the inlet. The filling coefficient reflected the degree of leakage or flow resistance inside the expander to some extent. It was observed that the filling coefficient was the largest when the inlet pressure was 0.75 MPa, at which time the flow resistance of the working medium was relatively smaller and the average mass flow was also the largest. The isentropic efficiency and output power of the scroll expander increased with the increase of inlet pressure. The optimization of the output power of the scroll expander is related to a variety of factors. It is necessary to comprehensively consider the effect of the actual

收稿日期: 2022-11-15

基金项目: 河北中烟工业有限责任公司科技项目 (HBZY2022B001\HBZY2022A012)

作者简介: 王婧 (1988—), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向为厂区能源管理、节能技术分析、智能卷烟厂建设等。

通信作者: 郭立强 (1980—), 男, 工程师, 主要研究方向为厂区能源管理技术、大型空调整节能技术等。

enthalpy difference between the inlet and outlet and the average mass flow rate, and it is not reasonable to consider only unilateral factors.

KEY WORDS: packaging waste; waste heat recovery; scroll expander; flow characteristic; numerical simulation

随着快递行业的快速发展, 纸质、木质等包装产量迅速增加, 已发展成为一个需要减量化、无害化处理的固体污染物。热解是一种高效且低污染的资源利用方式, 可将生物质材料转化为高值产品, 能有效解决能源与环境的双重问题^[1-3], 是公认的高效处理纸质、木质生物质废弃物技术^[4-5]。近年来已有相关文献^[6-7]对固体废弃物直接热解技术进行了研究, 研究重点主要集中在热解工艺及气化工艺在不同温度下的热解反应特性及热解产物特性等方面。

为尽可能保证热解产物燃尽, 减弱其燃烧结渣特性对环境的影响, 流化床锅炉燃烧温度应控制在 750 °C 左右^[7-8], 但这导致流化床锅炉的排烟温度不低于 170 °C, 从而产生部分无法回收的废热。近年来, 有机朗肯循环被广泛研究, 并应用于中低温废热回收领域^[9]。结合纸质、木质包装废弃物燃烧排烟温度范围特征, 利用有机朗肯循环进一步回收利用烟气中的余热发电, 提高燃烧能量利用综合效率, 将对纸质、木质包装生命全周期过程能源高效综合利用具有积极意义。涡旋膨胀机作为有机朗肯循环的核心热功转换部件, 提升其性能对循环热效率的提高具有直接且重要的增益作用^[10-11]。由于工作原理简单、部件数量相对较少以及生产成本低, 涡旋膨胀机目前在小型热电联产系统中已被广泛使用^[12]。已有大量实验研究通过将涡旋压缩机反转作为膨胀机运行来实现, 均取得了较高的热能回收效率^[13]。但由于实验周期长, 成本高且稳态实验条件可控性差, 涡旋膨胀机的多工况优化研究难以顺利开展^[14]。针对特定应用场景, 尤其是包装废弃物热解余热回收背景下的涡旋膨胀机多工况优化目前鲜有报道。

为探索以纸质、木质包装废弃物热解燃烧流化床锅炉排烟为热源的有机朗肯循环系统涡旋膨胀机流动特性对余热回收性能的影响规律, 在已有相关余热回收涡旋膨胀机的研究基础上^[15-16], 结合纸质、木质包装废弃物热解燃烧排烟温度区间范围。通过流体力学 (CFD) 数值计算方法, 开展工作腔内工质瞬态流动特性分析及改变进气压力的变工况分析, 揭示进气压力的变化对涡旋膨胀机内部流动特征及性能参数的影响机制, 探究其对膨胀机效率及实际回收率的影响规律。

1 几何与数值计算模型

1.1 膨胀机几何模型

纸质、木质包装废弃物等热解燃烧流化床锅炉的排烟温度约为 170 °C, 考虑到与烟气进行换热的蒸发

器内部存在换热温差即夹点温差^[17], 且实际工程应用中夹点温差可达到 3 ~ 30 °C^[18]。因此, 以文献[16]中涡旋膨胀机入口处工质温度为参考, 选取工质 R134a 的进气温度为 420 K, 结合热源温度 170 °C, 经校核验算, 此时换热器夹点温差在已有文献所给的温度区间内。对于涡旋膨胀机的三维几何模型, 以文献[12]中由实体涡旋机三维扫描逆向构建的三维模型为参考, 相应涡齿参数、工作室及吸排气管道尺寸在此不再赘述。

1.2 重叠网格方法与数值计算方法

由于动涡盘的公转平移运动会引起计算流体域的形变, 因此进行涡旋膨胀机瞬态数值计算时, 每一个时间步内离散域需采用动网格技术实时调整, 以保证网格质量。结合涡旋膨胀机运行时工作腔形状变化不规律以及啮合间隙小的特点, 在 STAR CCM+ 中有 2 种动网格技术较为适用: 一种为在船舶与海洋工程流动计算中广泛采用的嵌套网格技术; 另一种为已成熟应用于涡旋机械 CFD 计算的网格重构技术。其中, 网格重构技术常与网格变形技术相结合来提高网格质量。运动部件, 即动涡盘壁面上的网格节点保持刚体运动时, 重构后的网格质量将难以控制, 例如负体积网格以及大畸变率网格的出现, 结合使用网格变形技术, 可更好地调整运动壁面附近网格节点的分布, 从而提高动网格质量。

然而, 采用网格重构技术对网格尺寸要求很高的涡旋压缩机进行瞬态数值计算时, 流体域网格按每一个时间步长的动态实时更新大大增加了网格划分的计算量, 这使得数值计算效率大大降低。嵌套网格技术则无需以上复杂繁琐的网格重构及变形技术, 通过预先划分完毕的重叠网格和背景网格之间的插值计算以及数据传递, 省去了网格重复划分的计算量, 实现了物理场的高效求解, 且计算结果的准确性已得到验证。因此, 本文选用迭代插值计算过程更为高效的重叠网格技术对涡旋压缩机内部计算流体域进行离散求解。网格划分预处理后流体计算域网格如图 1 所示, 其中图 1a 为包含进排气管道、集气室、吸气道和工作腔室的三维计算域离散网格示意图, 图 1b 为涡旋膨胀机工作腔室内经过重叠网格嵌套处理之后的俯视图。图 1 中较为明显的深色部分即为网格重叠区域。在数值计算方法方面, 选取常见的 $k-\omega$ 湍流模型, 进口边界条件为设定进口总压与总温的压力边界, 出口边界条件为设定出口静压值及带回流条件的压力边界。

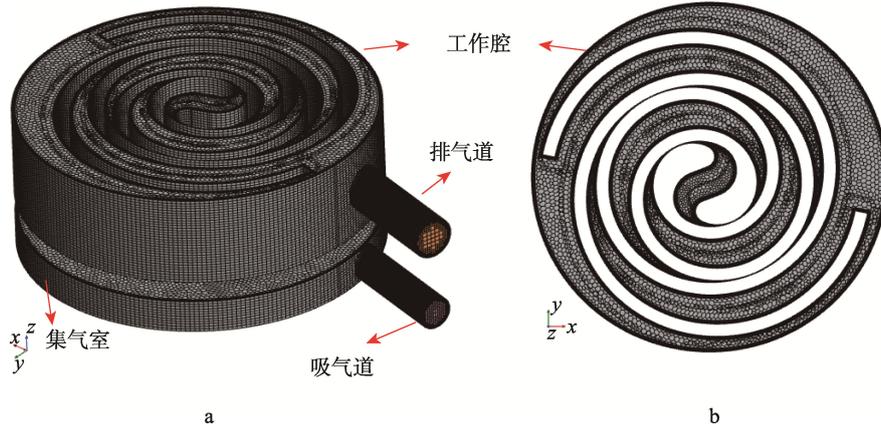


图1 重叠网格离散后的计算域
Fig.1 Computational domain after discrete solution of overlapping grid

1.3 网格无关性验证

在进行 CFD 数值仿真计算时，网格的尺度在实时影响动网格质量的同时直接决定了计算域网格数量。网格尺度应与网格质量和数量平衡，使得最终达到的仿真精度与所用计算时间得到较优的权衡。因此，在进行数值仿真之前，需对涡旋膨胀机的数值模型进行网格无关性验证，选取合适的网格尺度和数目，在保证计算精度的前提下，提高计算效率。为了选取合适的计算域网格尺度与数量，在同一工况下对 5 组不同网格数量的填充系数进行差异对比，并进行网格无关性分析。

填充系数 ϕ_{fr} 计算时由于入口处体积换算较为复杂，因此采用入口处涡旋膨胀机每分钟吸入的工质质量来计算更为简便。填充系数定义为实际进气量与理论进气量之比，如式 (1) 所示。

$$\phi_{fr} = \frac{V_{sim}}{V_{ideal}} = \frac{M_{sim}}{M_{ideal}} = \frac{M_{sim}}{\rho_{in} \cdot V_{in} \cdot N / 60} \quad (1)$$

式中： V_{sim} 为计算吸气体积流量； V_{ideal} 为理论吸气体积流量； M_{sim} 为设计吸气质量流量； ρ_{in} 为入口处制冷剂密度； V_{in} 为设计排量； N 为设计转速。

5 组不同网格数量下，对相同进出口边界条件的同一工况进行计算，所得填充系数及相应仿真计算所用时间见表 1。

表 1 网格无关性验证结果
Tab.1 Grid independence verification results

网格数量	平均质量流量/ (g·s ⁻¹)	填充系数 ϕ_{fr}	仿真计算 时间/h
607 205	103.421 5	1.485	128
785 565	101.406 4	1.456	144
977 214	100.747 7	1.447	153
1 812 564	100.567 2	1.444	198
2 592 427	100.464 9	1.443	244

显然，当网格数量逐步由 977 214 增加至 1 812 564 时，填充系数由 1.447 减小到 1.444，与较少数量网格相比，相对变化量较小，可认为填充系数此时已满足精度要求。同时，结合计算所需资源考虑，当网格数量增加到 1 812 564 时，收敛所需的计算时间已达到 198 h，而填充系数此时的变化已不大。因此，最终采用耗时相对较短且精度满足要求，数量为 977 214 的网格进行下一步的仿真计算。

2 结果与分析

2.1 流场瞬态特性分析

2.1.1 温度场

在 1/2 齿高处，不同曲轴转角下的工作腔温度场分布如图 2 所示。总体上随着吸气、膨胀、排气过程的不断进行，工作腔中工质的温度随着曲轴转角的增大逐渐降低。还可以发现，在曲轴转角为 60° 时，靠近中心吸气腔的一对称膨胀腔内的温度已有明显的非对称特征，并且该特征一直持续到曲轴转角约为 300° 时才逐渐消失。在单个工作腔内，温度的非均匀性也比较明显，靠近涡盘中心的径向间隙附近区域温度较高，沿着静涡齿壁面往外温度逐渐降低。

2.1.2 压力场

在 1/2 齿高处，不同曲轴转角下的工作腔压力场分布如图 3 所示。可以看出，在工质膨胀的过程中，每个月牙形工作腔内工质的压力值逐渐降低。另外，在同一时刻对称的一对膨胀腔内的工质压力具有明显的非对称性，并一直持续到排气过程前。这是由于涡齿齿头对吸气孔的遮挡所导致的。在膨胀机吸气过程中，涡齿齿头对吸气孔的遮挡使得吸气快结束时工作腔中的压力分布不对称，并且这种不对称性在月牙形膨胀腔成形之后一直存在，直至膨胀过程结束。

2.1.3 速度场

在 1/2 齿高处, 不同曲轴转角下的工作腔速度场分布如图 4 所示。结合容积式涡旋膨胀机的工作原理, 工质的泄漏发生在间隙位置, 因此可明显地看到径向间隙附近工质的流动速度明显增大。在其余位置工质流速较低, 这主要与动涡盘的转动速度相关。在

排气道内, 工质的流速明显增大, 这与排气道的节流作用有一定关系。另外从排气道内工质速度的大小变化可以看出, 在本周期排气腔快结束排气至下一周期开始排气后不久的一段转角范围内, 即 60°至 120°转角之间, 排气道内工质流速有较为明显的下降, 这与该过程中排气腔排出的工质体积流量减少有关。

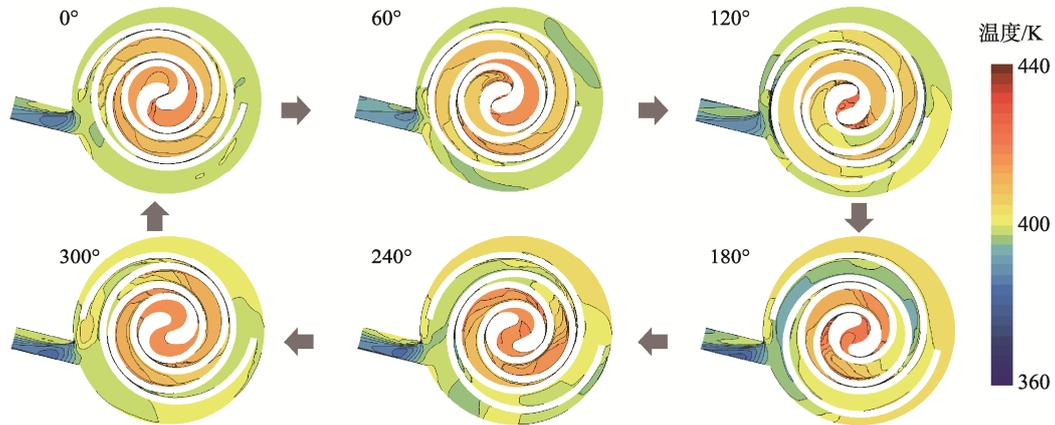


图 2 不同转角下工作腔温度分布
Fig.2 Temperature distribution of working chamber at different angles

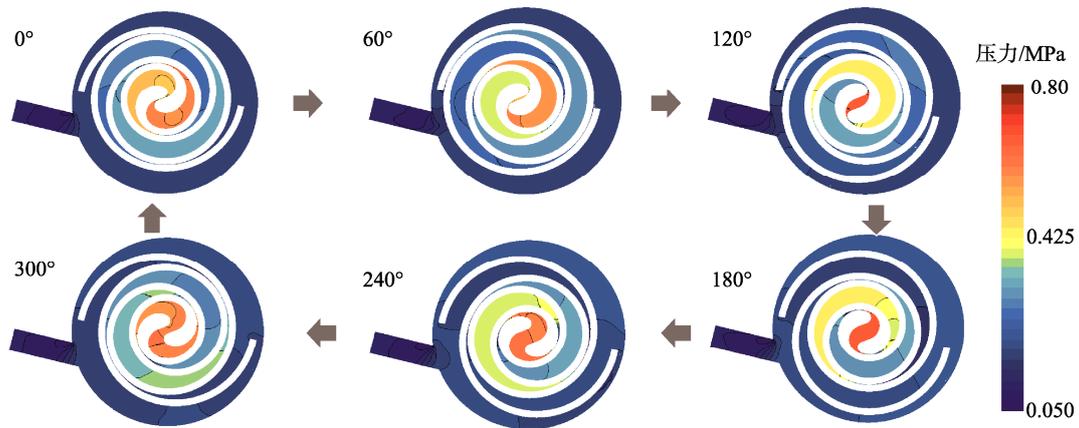


图 3 不同转角下工作腔压力分布
Fig.3 Pressure distribution of working chamber at different angles

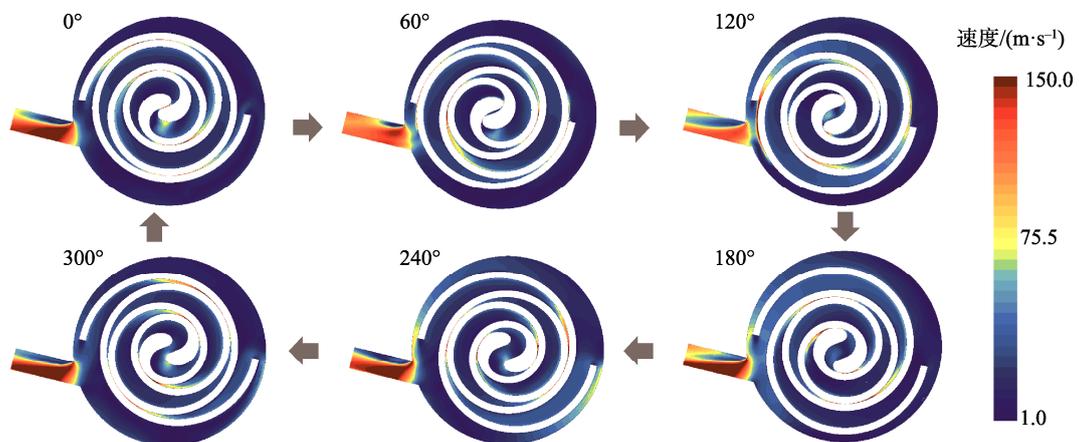


图 4 不同转角下工作腔速度分布
Fig.4 Velocity distribution of working chamber at different angles

2.2 性能参数变化规律

2.2.1 吸、排气流量的脉动

2.1 节以定性的方式主要描述了膨胀机工作腔流场的非对称变化特征。为进一步定量分析膨胀机的性能，本节主要从吸、排气流量和排气温度两方面展开研究，而膨胀机的填充系数、等熵效率及输出功率等性能指标将在下一节变工况分析中具体体现。从图 5 中可看出，进、出口流量均呈现周期性波动，其中出口流量的波动幅度较小，瞬时流量值基本在 120 g/s 附近。进口流量的波动趋势较为单调，呈较大幅度递增或递减，可见在入口处工质所受流动阻力明显强于出口处，从而造成了流量明显的大幅度波动。

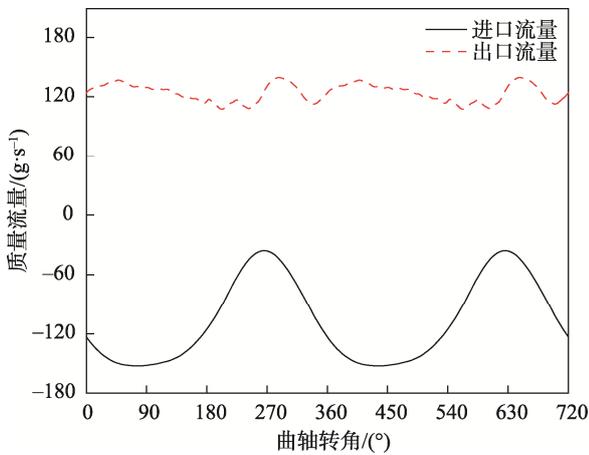


图 5 吸、排气流量随转角的变化
Fig.5 Change of suction and exhaust flow with angle

2.2.2 排气温度的变化规律

如图 6 所示，排气温度的周期性波动大致呈现为 5 个大小不等的规则温度起伏，但总体上排气温度为 391~394 K，与图 5 中排气流量幅值大致稳定的情况保持一致。因此，与入口相比，膨胀机出口处工质的流动更为稳定。一般需要额外在膨胀机入口前设置集气室或消声室来减弱流动脉动带来的不利影响，提高膨胀机的综合性能。

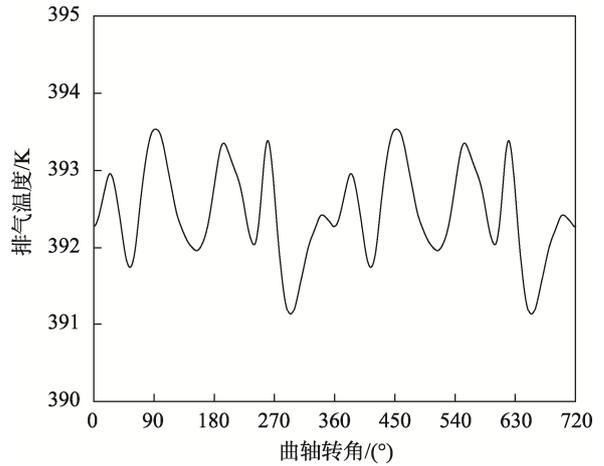


图 6 排气温度随转角的变化
Fig.6 Change of exhaust temperature with angle

2.3 变工况分析

2.3.1 变进气压力下流场变化特征

通过改变进气压力，进气温度保持不变，分析在该变工况下涡旋膨胀机性能的变化规律。图 7 对比了曲轴转角为一个周期内的中间时刻，即 180°时，不同进气压力下相同转角位置在 1/2 涡齿齿高位置的温度场云图。随着进气压力的升高，总体上温度场的分布规律几乎一致，这可能与进气温度边界保持不变有关。仅在最外侧排气腔中发现温度云图对应在统一的图例上的范围有一定程度的减小，即蓝色区域逐渐增大。由于进气压力的升高增大了进、排气口之间的绝对压差，所以工质的压力下降幅度越大时，相应的温度也下降更多，从图 7 可观察到排气腔中的工质温度随着进气压力的升高而降低。

从图 8 可知，在出口压力不变的条件下，随着进气压力的上升，压力场分布梯度增大，因而在吸气腔中上侧可看到工质压力小于进气压力 1/2 的区域面，工质压力随进气压力的升高而减小。在相同曲轴转角位置，各膨胀腔内更高的平均压力使得工质膨胀做功过程中产生更大的回收功，进气压力的升高理论上可提高膨胀机的输出功率。图 9 中未观察到工作腔内速

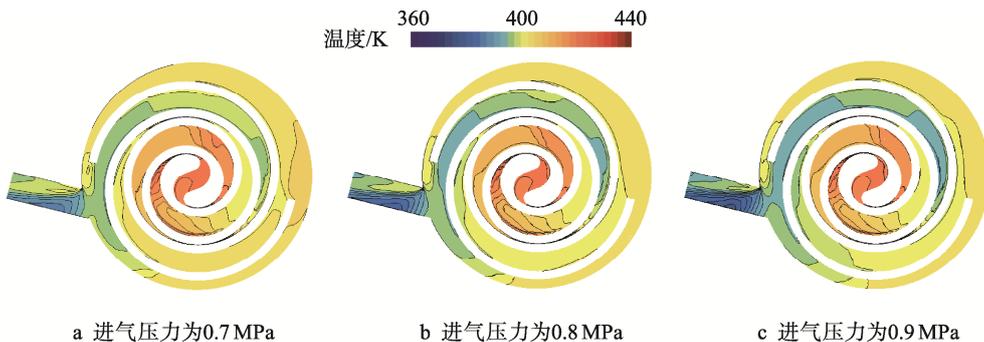


图 7 不同进气压力下温度场对比

Fig.7 Comparison of temperature field under different inlet pressure

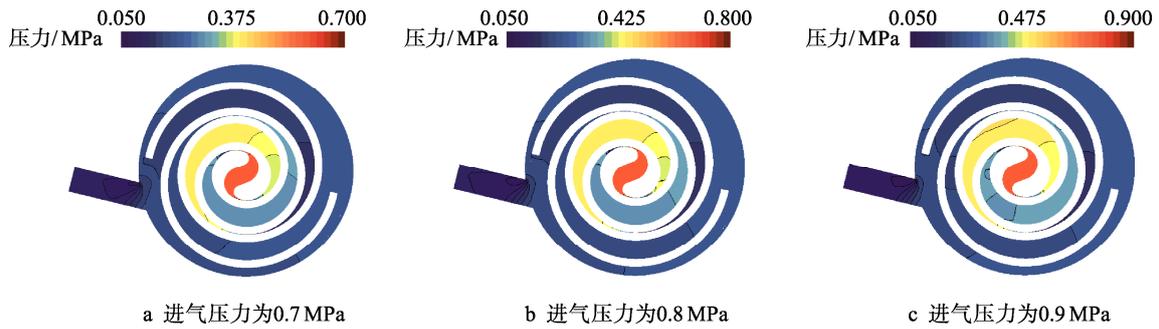


图 8 不同进气压力下压力场的对比
Fig.8 Comparison of pressure field under different inlet pressure

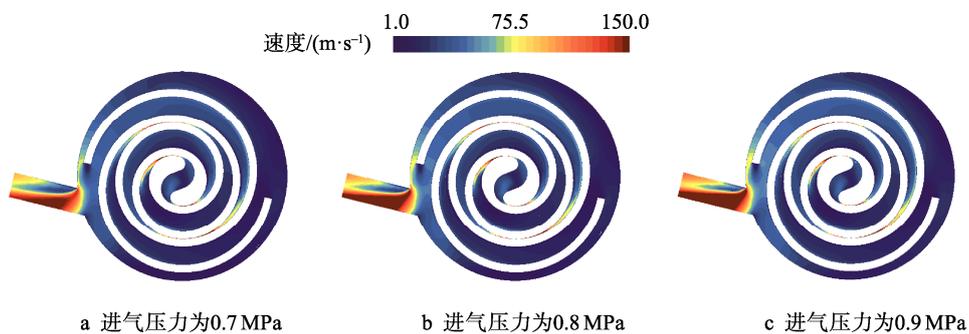


图 9 不同进气压力下速度场的对比
Fig.9 Comparison of speed field under different inlet pressure

度场明显的变化差异。各进气压力下动涡盘的转速均为 5 000 r/min, 且压力梯度的上升对工质流速的增益作用有限, 因此总体上膨胀机工作腔内速度场分布随进气压力的变化不大。

2.3.2 变进气压力下性能参数变化特征

膨胀机平均质量流量和填充系数随进气压力的变化如图 10 所示。由于进气压力的增大改变了入口处工质的密度, 且压力比的改变同时影响膨胀机内部

的流动损失, 即可能存在过欠膨胀过程, 导致流动阻力增大, 从而影响填充系数。所以图 10 中平均质量流量和填充系数的变化趋势并非呈正相关关系。在进气压力从 0.8 MPa 升至 0.85 MPa 时, 平均质量流量增大, 填充系数反而有所降低。填充系数的大小一定程度上反映了膨胀机内部的泄漏程度或流动阻力大小。观察到进气压力为 0.75 MPa 时填充系数最大, 此时工质的流动阻碍相对更小, 平均质量流量也最大。

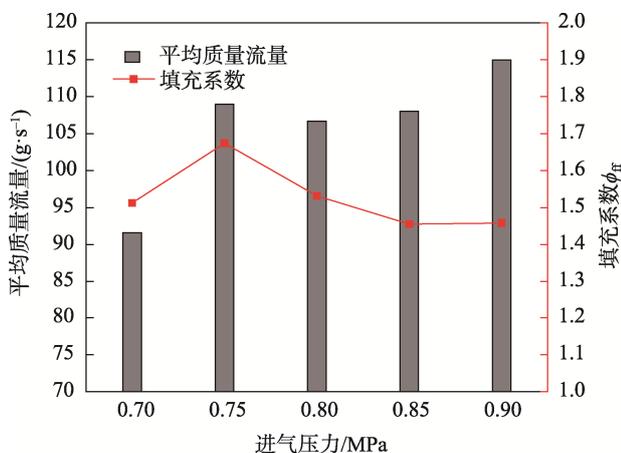


图 10 流量和填充系数随进气压力的变化趋势
Fig.10 Change trend of flow rate and filling coefficient with inlet pressure

图 11 给出了涡旋膨胀机等熵效率和输出功率随进气压力的变化规律。等熵效率和输出功率的计算分别见式 (2) 和式 (3)。

$$\eta_{is} = \frac{h_{in} - h_{out}}{h_{in} - h_{out,s}} \quad (2)$$

$$P_{out} = \bar{q}_m \cdot (h_{in} - h_{out}) \quad (3)$$

式中: h_{in} 为膨胀机入口平均比焓值; h_{out} 为出口平均比焓值; $h_{out,s}$ 为等熵膨胀后的理论比焓值; \bar{q}_m 为平均质量流量。

总体上, 膨胀机等熵效率和输出功率均随着进气压力的上升而增大。特别在进气压力从 0.7 MPa 升至 0.75 MPa 时, 输出功率有较大增幅。这不但与等熵效率的增大, 即进出口实际焓差的增大有关, 同时也与图 11 中平均质量流量的大幅增加有关, 两者共同促进了膨胀机在该进气压力下输出功率的上升。可见膨

胀机输出功率的优化与多种因素相关,如果只考虑单方面对其影响缺乏一定的合理性。涡旋膨胀机的输出功率随进气压力的增大而增大,输出功率在进气压力为 0.9 MPa 时达到最大值 2 823 W。

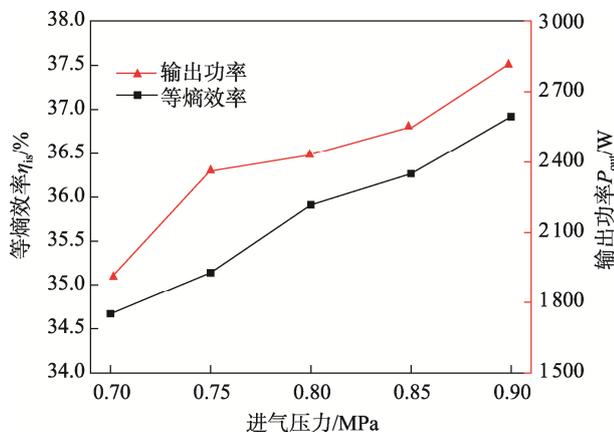


图 11 等熵效率和输出功率随进气压力的变化趋势

Fig.11 Change trend of isentropic efficiency and output power with inlet pressure

3 结语

通过 CFD 仿真软件建立了以纸质、木质包装废弃物热解燃烧排烟为热源的有机朗肯循环系统涡旋膨胀机瞬态数值模型。以 R134a 为工质进行计算得到了工作腔内温度、压力和速度场的分布特征。保证工质在入口处于过热气状态的前提下改变进气压力的大小,分析了涡旋膨胀机流场变化特性以及性能参数的变化规律。

1) 总体上随着吸气、膨胀、排气过程的不断进行,工作腔中工质的温度和压力随着曲轴转角的增大逐渐降低。由于涡齿齿头对吸气孔的遮挡效应,同一时刻结构对称的一对膨胀腔内的工质压力分布具有明显的非对称性,并一直持续到排气过程前。

2) 在出口压力不变的条件下,随着进气压力的上升,压力场分布梯度增大,靠近中心吸气腔的上侧膨胀腔内工质压力低于进气压力 1/2 的区域面积随进气压力的升高而减小。进、出口流量均呈现周期性波动,出口流量的波动幅度明显小于入口流量的波动幅度。

3) 填充系数的大小一定程度上反映了膨胀机内部的泄漏程度或流动阻力大小。观察到进气压力为 0.75 MPa 时填充系数最大,此时工质的流动阻碍相对更小,平均质量流量也最大。

4) 涡旋膨胀机等熵效率、输出功率均随进气压力的增大而增大,输出功率在进气压力为 0.9 MPa 时达到最大值 2 823 W。

参考文献:

- [1] 孙林. 废纸盒催化热解制备富氢燃气及多孔石墨碳的实验研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2021: 1-9.
SUN Lin. Experimental Study on Preparation of Hydrogen-Rich Gas and Porous Graphite Carbon by Catalytic Pyrolysis of Waste Paper Box[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2021: 1-9.
- [2] 张效林, 迪静静, 李少歌, 等. 不同种类废纸纤维形态及结构特性研究[J]. 包装工程, 2021, 42(3): 47-53.
ZHANG Xiao-lin, DI Jing-jing, LI Shao-ge, et al. Morphological and Structural Characteristics of Different Types of Wastepaper Fibers[J]. Packaging Engineering, 2021, 42(3): 47-53.
- [3] 刘惠, 苟进胜. 木质包装废弃物快速热解过程中的氮迁移机制[J]. 包装工程, 2016, 37(23): 66-72.
LIU Hui, GOU Jin-sheng. Nitrogen Transformation Mechanisms during Fast Pyrolysis of Wooden Package Waste[J]. Packaging Engineering, 2016, 37(23): 66-72.
- [4] 刘珍, 王汉青, 周跃云, 等. 包装废弃物添加脱氯半焦制备 SRF 的热解及动力学特性[J]. 环境科学学报, 2018, 38(2): 599-606.
LIU Zhen, WANG Han-qing, ZHOU Yue-yun, et al. Pyrolysis Characteristics and Kinetic Analysis of Solid Recovered Fuel Combining Package Waste with Dechlorinated Char[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2018, 38(2): 599-606.
- [5] 崔晓宇, 李铨军, 刘芳芳, 等. 以农业废弃物为原料的生物质热解液的理化特性[J]. 吉林农业大学学报, 2017, 39(5): 551-557.
CUI Xiao-yu, LI Xuan-jun, LIU Fang-fang, et al. Physical and Chemical Properties of Bio-Liquid of Agricultural Wastes[J]. Journal of Jilin Agricultural University, 2017, 39(5): 551-557.
- [6] CHEN Zhen-guo, LENG Er-wei, ZHANG Yang, et al. Pyrolysis Characteristics of Tobacco Stem after Different Solvent Leaching Treatments[J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2017, 130: 350-357.
- [7] 肖刚, 池涌, 倪明江, 等. 纸类废弃物流化床热解气化研究[J]. 工程热物理学报, 2007, 28(1): 161-164.
XIAO Gang, CHI Yong, NI Ming-jiang, et al. fluidized-Bed Pyrolysis and Gasification of Waste Paper[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2007, 28(1): 161-164.
- [8] 王菁, 蔡佳校, 张柯, 等. 不同组成纤维素热解炭的燃烧行为分析[J]. 烟草科技, 2017, 50(7): 76-81.

- WANG Jing, CAI Jia-xiao, ZHANG Ke, et al. Analyses on Combustion Behaviors of Cellulose Pyrochars of Different Compositions[J]. Tobacco Science & Technology, 2017, 50(7): 76-81.
- [9] 罗文华, 陈武, 蒋爱国, 等. 回收船舶柴油机余热的有机朗肯循环系统热力学性能比较分析[J]. 中国机械工程, 2022, 33(4): 452-458.
- LUO Wen-hua, CHEN Wu, JIANG Ai-guo, et al. Comparative Analysis of Thermodynamics Performances of ORC Systems Recovering Waste Heat from Ship Diesel Engines[J]. China Mechanical Engineering, 2022, 33(4): 452-458.
- [10] 吴竺, 朱彤, 高乃平, 等. 有机朗肯循环涡旋膨胀机性能测试与仿真分析[J]. 制冷技术, 2017, 37(1): 8-12.
- WU Zhu, ZHU Tong, GAO Nai-ping, et al. Testing and Simulation of Performance for Scroll Expander Used in Organic Rankine Cycle[J]. Chinese Journal of Refrigeration Technology, 2017, 37(1): 8-12.
- [11] 高鹏, 江龙, 王丽伟, 等. 有机朗肯循环模拟及涡旋式膨胀机的性能研究[J]. 制冷学报, 2014, 35(1): 53-57.
- GAO Peng, JIANG Long, WANG Li-wei, et al. The Simulation of ORC and Experimental Study on Scroll Expander[J]. Journal of Refrigeration, 2014, 35(1): 53-57.
- [12] ZYWICA G, KACZMARCZYK T Z, IHNATOWICZ E. A Review of Expanders for Power Generation in Small-Scale Organic Rankine Cycle Systems: Performance and Operational Aspects[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 2016, 230(7): 669-684.
- [13] 褚晓广, 张承慧, 李珂, 等. 涡旋膨胀机改造及试验性能研究[J]. 西安交通大学学报, 2014, 48(1): 37-41.
- CHU Xiao-guang, ZHANG Cheng-hui, LI Ke, et al. Improvement and Performance Experiment of a Scroll Expander[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2014, 48(1): 37-41.
- [14] 崔颂, 吴竺, 刘柳辰, 等. 无油涡旋膨胀机性能实验研究[J]. 太阳能学报, 2019, 40(1): 30-37.
- CUI Song, WU Zhu, LIU Liu-chen, et al. Experimental Investigation on Performance of oil-Free Scroll Expander[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2019, 40(1): 30-37.
- [15] 宋盼盼. 应用于有机朗肯循环的涡旋膨胀机非稳态流动特性研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2015: 1-5.
- SONG Pan-pan. Study on Unsteady Flow Characteristics of Scroll Expander Applied to Organic Rankine Cycle[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2015: 1-5.
- [16] 李要红. 涡旋膨胀机的数学模型及内部瞬态流场研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2018: 22-33.
- LI Yao-hong. Study on Mathematical Model and Internal Transient Flow Field of Scroll Expander[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2018: 22-33.
- [17] TURGUT E, YARDIMCI U. Comprehensive Analysis of the Performance of the Coaxial Heat Exchanger with Turbulators[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2022, 176: 107502.
- [18] 马新灵, 王聪, 石文琪, 等. ORC 系统蒸发器夹点温差数值分析和实验研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2023, 44(1): 65-69.
- MA Xin-ling, WANG Cong, SHI Wen-qi, et al. Numerical Analysis and Experimental Investigation of the Evaporator PPTD in ORC System[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2023, 44(1): 65-69.

责任编辑: 曾钰婵