

# Preliminary Experimental Study on the Performance of Single Screw Expanders by Structure Parameters

Liang Cheng<sup>1</sup>, Wei Wang<sup>1,2</sup>, Hehe Chen<sup>1</sup>, Yuting Wu<sup>1,2</sup>, Chongfang Ma<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>College of Environmental and Energy Engineering, Beijing University of Technology, Beijing

<sup>2</sup>Key Laboratory of Heat Transfer and Energy Conversion, Beijing Municipality, and Key Laboratory of Enhanced Heat Transfer and Energy Conservation, Ministry of Education, Beijing

Email: wang\_wei@bjut.edu.cn

Received: Jan. 27<sup>th</sup>, 2017; accepted: Feb. 14<sup>th</sup>, 2017; published: Feb. 17<sup>th</sup>, 2017

---

## Abstract

Currently, the practical application of medium and small-scale Organic Rankine Cycle system still has many problems. And the performance of expander is an important technical bottleneck which limits its application. For a given type of expander, structural parameters have great influence on its performance. Internal volume ratio and gap are two main structure parameters which impact performance of single screw expanders. This paper carried out a preliminary study on the performance of single screw expanders under the influence of internal volume ratio and gap. The results show that the efficiency of the expander with large internal volume ratio is only about 50% of the one with small internal volume ratio, the volumetric efficiency of the former is lower than that of the latter by 20%. For the prototype of small internal volume ratio, there is no significant difference of power and efficiency of the expander with large fit gap compared with small fit gap, except the volumetric efficiency has a slight downward. For the prototype of large internal volume ratio, power and efficiency of the expander with large fit gap increase a certain extent, but the volumetric efficiency decreases compared with small fit gap.

## Keywords

Single Screw Expander, Structural Parameters, Internal Volume Ratio, Gap, Performance Testing

---

## 结构参数对单螺杆膨胀机性能影响的初步实验研究

程亮<sup>1</sup>, 王伟<sup>1,2</sup>, 陈贺贺<sup>1</sup>, 吴玉庭<sup>1,2</sup>, 马重芳<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>北京工业大学环境与能源工程学院, 北京

<sup>2</sup>传热强化与过程节能教育部重点实验室, 传热与能源利用北京市重点实验室, 北京

Email: wang\_wei@bjut.edu.cn

收稿日期: 2017年1月27日; 录用日期: 2017年2月14日; 发布日期: 2017年2月17日

## 摘要

目前, 中小规模有机朗肯循环系统的实用化仍存在许多问题, 其中膨胀机性能是阻碍其应用的重要技术瓶颈, 对于确定类型的膨胀机, 结构参数对其性能影响较大。影响单螺杆膨胀机性能的结构参数主要是内容积比和配合间隙。本文开展了内容积比及间隙对单螺杆膨胀机性能影响的初步研究工作。结果表明: 在相同间隙下, 大内容积比的膨胀机效率仅为小内容积比的50%左右, 容积效率比小内容积比的膨胀机低20%。对于小内容积比的样机, 大配合间隙与小配合间隙相比, 除容积效率略有下降外, 功率和膨胀机效率基本没有差异; 对于大内容积比的样机, 大配合间隙与小配合相比, 除容积效率略有下降外, 功率和膨胀机效率均有一定幅度增加。

## 关键词

单螺杆膨胀机, 结构参数, 内容积比, 间隙, 性能测试

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

随着我国经济的持续快速发展, 能源需求量日益增加。由于我国能源消费以化石燃料为主, 近几年环境污染问题日益严重, 所以, 大力发展各种节能、可再生能源技术显得尤为重要。基于有机朗肯循环的低温余热发电技术是目前最有前景的技术之一[1], 可广泛用于太阳能光热发电、地热发电和分布式生物质发电, 促进可再生能源在我国的利用。然而受制于膨胀机效率、工质泵效率和循环热效率等因素的制约, 小型 ORC 系统目前仍处于实验室阶段。目前小型 ORC 系统采用的膨胀机主要包括涡旋、滚动转子、滑片式、螺杆式以及透平等。其中单螺杆膨胀机具有容积效率高、噪声低、磨损小、寿命长等优点, 具有良好的市场应用前景。大量研究工作表明, 膨胀机性能对 ORC 循环热效率影响很大。Peterson 等[2]人搭建了以 R123 作为工质的小型有机朗肯发电系统, 选用的小型涡旋膨胀机膨胀比为 4.57, 膨胀机效率达到 50%, 分析出系统循环效率为 7.2%, 指出影响循环效率的关键是膨胀机。Kang 等[3]人搭建了以 R245fa 为工质的有机朗肯循环试验台, 实验中选用自己设计和制造的透平膨胀机, 实测膨胀比为 2.72, 膨胀机的最大效率为 82.2%, 系统的最大循环效率估计能达到 5.65%, 可以看出, 系统循环效率并不仅仅和膨胀机效率有关, 还与膨胀比有关。顾伟等[4]人通过比较同一工质在不同膨胀比下的循环热效率, 分析结果表明, 对于同一种工质, 系统的效率随着膨胀比的增加而增加, 可见, 膨胀比对循环热效率的影响很大。初步实验结果表明, 改变螺杆与壳体以及星轮与壳体的间隙, 对单螺杆膨胀机性能有较大影响[5]。

目前国内外开展的各项研究主要分析 ORC 系统效率, 所采用的膨胀机多为成熟产品, 对膨胀机专门的性能研究十分缺乏, 急需开展相关的研究工作。结构参数对于单螺杆膨胀机性能影响的研究工作较少,

与此相关的文献，主要是单螺杆压缩机相关的研究工作。汤炎等[6]通过推导得出了一系列公式可用于 CC 型单螺杆压缩机的排气量计算、主要几何尺寸确定等，并且提出了压缩机设计与制造的主要结构参数的选取原则。王增丽等[7]从啮合副的结构参数对排气量、排气孔口位置等方面进行分析，得到其对压缩机性能影响规律。然而，压缩机与膨胀机在结构参数选择、工况等方面并不相同，需要对单螺杆膨胀机进行专门的研究。

对于 ORC 系统，提高膨胀比会提高循环热效率，而膨胀机效率下降会降低循环热效率。获得不同膨胀比条件下膨胀机效率变化规律是 ORC 系统优化设计和运行的前提条件。然而，膨胀比并不是一个确定值，受膨胀机的结构参数、工质类型和工况条件等多方面影响。结构参数遵循基本的几何关系，其对膨胀机性能的影响可为膨胀机结构优化提供依据。为了探索内容积比及间隙的改变对单螺杆膨胀机性能的影响，本文拟开展不同内容积比及间隙条件下单螺杆膨胀机性能实验研究，为单螺杆膨胀机优化设计积累基础数据。

## 2. 膨胀机主要结构参数

### 2.1. 内容积比

根据文献[8]，螺杆压缩机内容积比是吸气结束时基元容积中的气体体积与压缩终了时基元容积中的气体体积之比，参照螺杆压缩机的定义，螺杆膨胀机内容积比是最大排气容积与最大进气容积之比。膨胀比由内容积比及过程指数所确定，内容积比是排气容积与进气容积之比，是一结构参数[9]，过程指数受工质类型及温度等影响。膨胀比和内容积比的关系式如下：

$$\varepsilon = \tau^{\kappa} = \left( \frac{V_t}{V_{in}} \right)^{\kappa} \quad (1)$$

式中  $\varepsilon$  为膨胀比， $\tau$  为内容积比， $\kappa$  为多变过程指数， $V_t$  为最大基元容积， $\text{m}^3$ ； $V_{in}$  为最大进气容积， $\text{m}^3$ 。

### 2.2. 间隙

单螺杆膨胀机的泄漏通道如图 1 所示：星轮齿顶与螺槽底面之间的间隙 L1；星轮齿前/后侧与螺槽侧面之间的间隙 L2、L4；星轮齿前、后侧，螺槽侧面及壳体围成的径向泄漏孔 L3、L5；星轮平面与壳体内壁面之间的间隙 L6；螺槽前后侧外缘与壳体内壁面之间的间隙 L7、L8；螺槽进气端外缘与壳体内壁之间的间隙 L9。

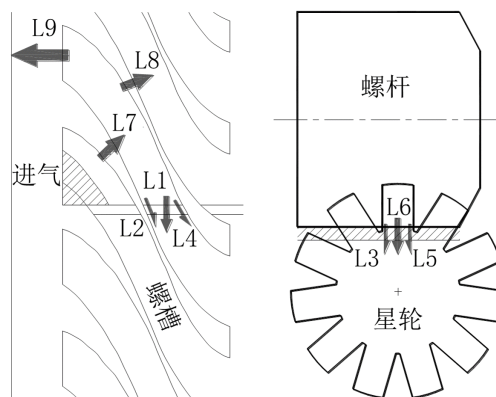


Figure 1. Distribution of leakage channels

图 1. 泄漏通道分布

本次实验主要关注的螺杆与壳体的间隙，即 L7、L8 和 L9。为了探究内容积比的改变对膨胀机性能的影响，设计了大小不同的两种内容积比样机，每种样机又设定了大小不同的配合间隙来探究配合间隙对样机性能的影响。不同结构参数的样机如表 1 所示。

### 3. 膨胀机主要性能指标

结构参数对单螺杆膨胀机性能影响很大，内容积比增大，进气流量随之减少，工况随之改变，进而会影响输出功率，排气量随进气量的减小而减小，体现在容积效率上。间隙的改变会影响不同泄漏通道气体的泄漏量，不同间隙碰摩情况亦不尽相同，会导致工况的变化，轴效率体现的是不同工况带来的综合影响。

膨胀机轴功率  $p_e$  是指通过膨胀机伸出轴输出的实际功率。实验中，轴功率  $p_e$  通常是通过测量膨胀机扭矩  $T$  和转速  $n$  的实时数据，按照下式计算获得：

$$p_e = \frac{T \cdot n}{9550} \quad (2)$$

式中： $p_e$  表示轴功率，kW； $T$  为扭矩，N·m； $n$  表示转速，r/min。

膨胀机轴效率  $\eta_s$  是指膨胀过程中轴端输出功率  $p_e$  与理想焓降之比，反映的是膨胀机的总体效率情况。轴效率的关系式如下：

$$\eta_s = \frac{p_e}{m(h_1 - h_{2s})} \quad (3)$$

式中： $m$  表示工质质量流量，kg/s； $h_1$  为膨胀机进口的实际比焓，kJ/kg； $h_{2s}$  为定熵过程的膨胀机出口比焓，kJ/kg。

容积效率  $\eta_v$  是理论排气量  $V_i$  与实际排气量  $V_r$  之比，反映膨胀机几何结构利用的完善程度。关系式如下：

$$\eta_v = \frac{V_i}{V_r} \quad (4)$$

### 4. 实验系统

单螺杆膨胀机样机的性能测试实验系统流程如图 2 所示。

实验流程：膨胀机入口进气压力设定为 8 bar，分别对四台样机进行实验。实验中，通过调节阀的开度控制入口流量，从储气罐排出的压缩空气进入膨胀机内膨胀做功，做完功的气体通过排气管路排出室外。膨胀机输出的轴功通过扭矩仪测出的扭矩和转速计算获得。在膨胀机的进出口管路上布置有各种传感器，用于监测膨胀机进出口的压力、温度以及流量等热力学参数，并通过数采设备实时记录。

Table 1. Different structural parameters of the prototypes

表 1. 不同结构参数样机

样机编号	内容积比	间隙
A	2.95	0.09 mm
B	4.02	0.09 mm
C	2.95	0.03 mm
D	4.02	0.03 mm

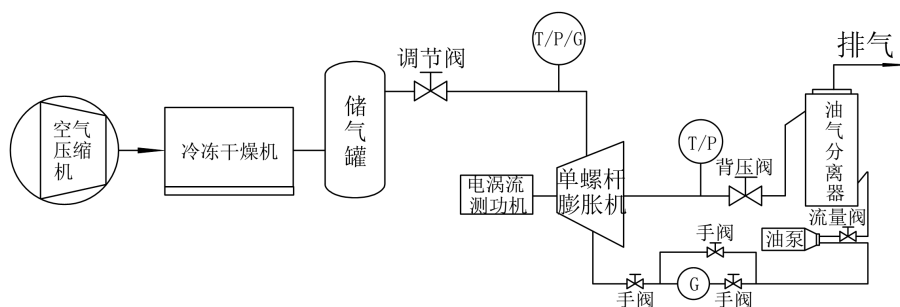


Figure 2. Performance test flow chart of single screw expander  
图 2. 单螺杆膨胀机性能测试实验流程图

温度测量：温度探头为北京中仪华世技术有限公司的 A 级 Pt100 标准热电偶，型号为 WZP21 型，测温范围为 $-200^{\circ}\text{C}\sim 650^{\circ}\text{C}$ ，误差为 $\pm(0.15 + 0.002|t|)^{\circ}\text{C}$ 。压力测量：压力探头为北京昆仑海岸传感器技术中心的 JYB-K0-HAG 型压力传感器，量程为 0~1 MPa，测量精度均为 $\pm 0.5\%$ 。流量测量：流量计为北京昆仑海岸传感器技术中心的 LUGB-25 涡街流量计，量程为 8.5~90  $\text{m}^3/\text{h}$ ，精度为 1.0%。扭矩仪：本试验系统采用的是北京威斯特中航机电技术有限公司的 CYB-803S 型扭矩传感器，其扭矩和转速的量程分别为 0~300 N·m 和 0~6000 r/min，精度为 $\pm 0.5\%$ 。

## 5. 实验结果分析

本文对四台膨胀机样机进行了性能测试，主要考察样机的功率输出、效率和容积效率。四台样机均采用实验室自主设计的螺杆直径 117 mm 膨胀机样机，其结构参数基本一样，主要区别为内容积比及螺杆与壳体配合间隙不同。

从不可逆影响因素看，主要包括泄漏、摩擦和传热损失，相对于前两者，传热损失的影响较小。泄漏会增加膨胀机输气量，但会适当减少膨胀比，摩擦会减少有效功输出，但可减少泄漏量，二者对膨胀机性能的影响是耦合的，作用机理十分复杂。首先，定性分析结构参数对泄漏量的影响。对于相同内容积比不同间隙条件下，间隙越大，泄漏量越大，随着转速的提高差别减小且泄漏量绝对值大幅下降；对于不同内容积比相同间隙条件下，内容积比越大，泄漏量越大，只是增长幅度较小，尤其是在较高转速时。而结构参数对摩擦的影响较为明确，主要是间隙的影响，当间隙变小时，摩擦增大，当小到运动件碰摩几率大增的尺寸时，摩擦大幅增加。从函数关系看，膨胀机输出功率取决于质量流量、进出口实际焓降和机械效率，由于机械回转式膨胀机机械效率较高，故主要因素为前两者。对于单螺杆膨胀机，在相同螺槽容积条件下，内容积比大小决定了最大进气容积大小，在相同进气压力条件下继而决定了进气质量流量的大小。因此小内容积比膨胀机的质量流量大于大内容积比膨胀机。进出口焓降的影响因素较复杂，除了膨胀比，还与各种不可逆损失相关，当工况相同和膨胀机效率相当条件下，小内容积比膨胀机的进出口实际焓降小于大内容积比膨胀机。实际功率输出取决于二者的相对大小。

图 3 中所示为四台不同结构参数样机输出功率随转速变化的关系。可以看到，A/C 两台膨胀机输出功率明显大于 B/D。说明内容积比变化对质量流量的影响明显大于对进出口焓降的影响。对于同为小内容积比的 A/C 样机，在较低转速下，A 样机输出功率始终大于 C 样机，随着转速的增加，二者之间的差别越来越小，在 3000 rpm 时，两台样机输出功率基本一致，均达到 3.5 kW 左右。这一结果的原因是由于小间隙的摩擦大于大间隙，且在低转速工况的差别高于高转速工况。结合前面的定性分析，可以得出，对于小内容积比的单螺杆膨胀机，泄漏对其功率输出的影响小于摩擦的影响。对于同为大内容积比的 B/D 样机，大间隙的样机输出功率始终大于小间隙，B 样机最大功率 2.0 kW，D 样机最大功率 1.6 kW。可以

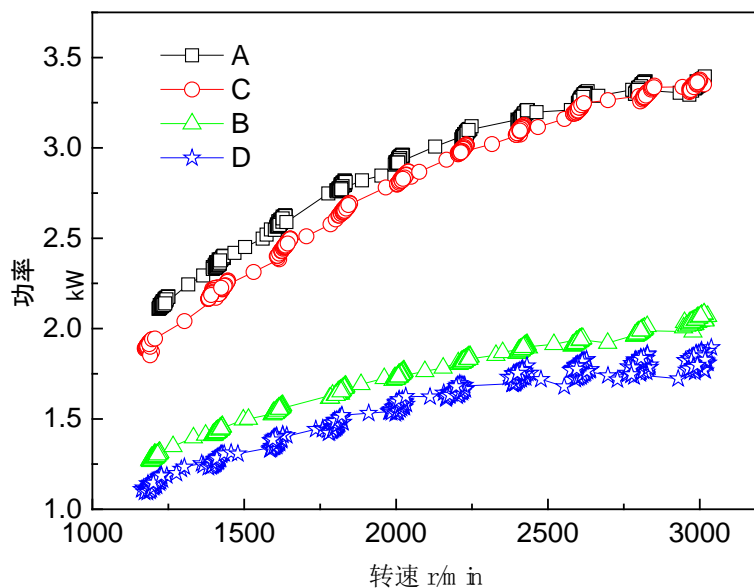


Figure 3. Variation of power output with rotational speed for prototypes  
图 3. 样机功率随转速变化

看到，摩擦对于膨胀机功率输出的影响进一步增大。从四台样机的功率输出实验结果可以得出，随着内容积比的增大，摩擦对单螺杆膨胀机的功率输出影响显著，适当增加间隙对提高膨胀机性能十分关键。

图 4 中所示为四台不同结构参数样机膨胀机效率随转速变化的关系。四台样机的膨胀机效率均随着转速的增大而升高。A/C 两台样机膨胀机效率在不同转速下基本相同，均在额定转速下达到 37% 的最大值。根据功率输出的结果，可以判断出相同转速下 A 样机的泄漏量大于 C 样机，使得 A 样机的质量流量大于 C 样机，综合结果是两台样机的效率基本相同。这说明在小内容积时，间隙对膨胀机性能的影响不敏感。大内容积的 B/D 两台样机膨胀机效率明显低于小内容积比的 A/C 样机，最高效率下降约 50%，这是由于摩擦对其性能的影响较小内容积比的样机更显著。D 样机效率始终小于 B 样机，且随着转速的提高差距略有增大。根据功率输出的结果，可以判断出相同转速下 B 样机的泄漏量大于 D 样机。但由于摩擦的影响增大，D 样机的效率也相对较低。这说明在大内容积时，摩擦是影响膨胀机性能的主要因素，必须增大间隙以减少摩擦。

图 5 中所示为四台不同结构参数样机容积效率随转速变化的关系。四台样机容积效率均随着转速的增加而增大，趋势大致相同，小内容积比样机的容积效率明显高于大内容积比样机。A 样机的容积效率低于 C 样机，差值约为 5% 左右，说明 A 样机的泄漏量大于 C 样机。B 样机的容积效率低于 D 样机，差值约为 5% 左右，说明 B 样机的泄漏量大于 D 样机。根据功率和效率的实验结果，可以看出容积效率对膨胀机性能的影响较为复杂。在摩擦情况一定时，容积效率越高膨胀机效率越高，反之则不一定。因此，对于单螺杆膨胀机，容积效率不能直观反应膨胀机性能。

## 6. 结论

通过对不同结构参数的单螺杆膨胀机样机进行的初步实验，可以得出：

1) 在相同间隙条件下，大内容积比的样机，膨胀机性能变差，膨胀机效率和容积效率均有一定程度的降低，大内容积比的膨胀机效率仅为小内容积 50% 左右，容积效率下降了 20%。

2) 在相同内容积比条件下，对于小内容积比，大配合间隙的样机与小配合间隙的样机相比，除容积效率略有下降外，功率和膨胀机效率基本没有下降；对于大内容积比，大配合间隙的样机与小配合间隙

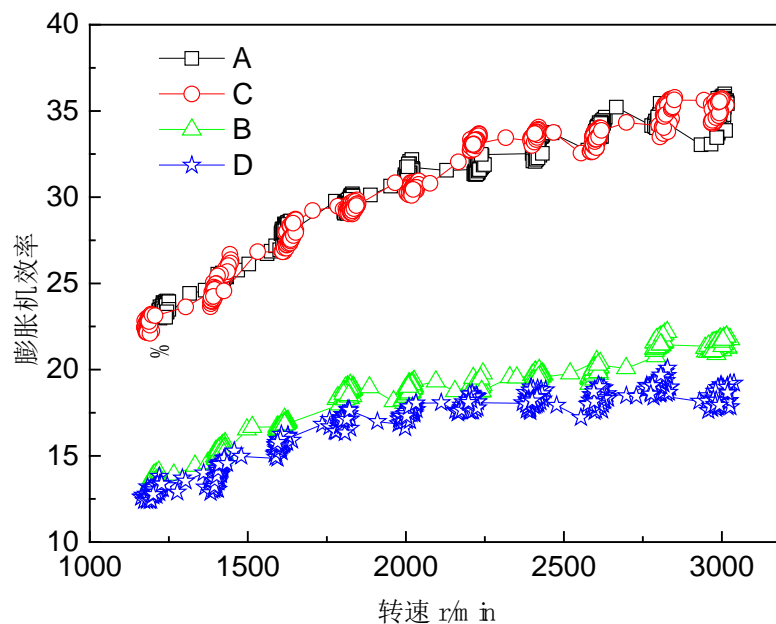


Figure 4. Variation of expander efficiency with rotational speed for prototypes  
图 4. 样机膨胀机效率随转速变化

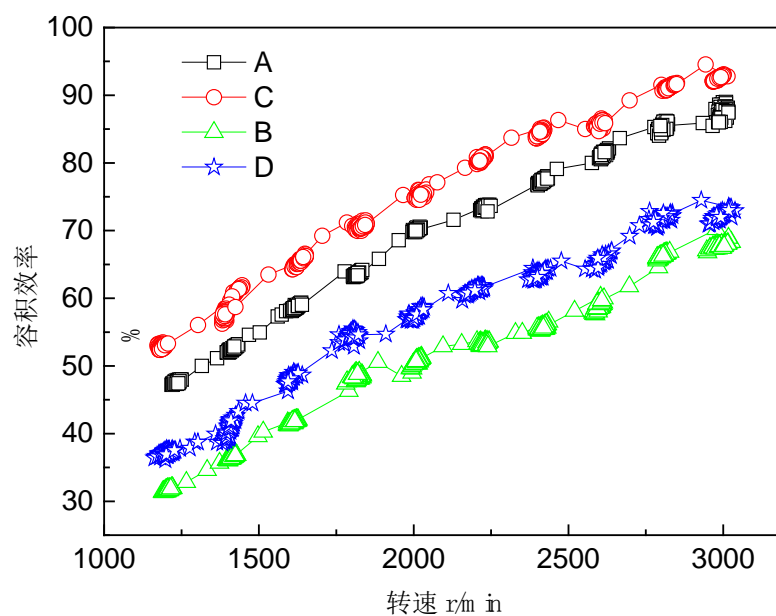


Figure 5. Variation of volumetric efficiency with rotational speed for prototypes  
图 5. 样机容积效率随转速变化

的样机相比, 除容积效率略有下降外, 功率和膨胀机效率均有一定幅度增加, 因此, 对于小内容积比的单螺杆膨胀机, 间隙对膨胀机性能的影响不敏感, 可以适当减小螺杆与壳体的配合间隙; 对于大内容积比的膨胀机, 可以适当增加螺杆与壳体的配合间隙。

### 基金项目

973 项目(2013CB228306)和国家科技支撑计划项目(2014BAJ01B05)资助。

## 参考文献 (References)

- [1] Schuster, A., Karellas, S., Kakaras, E., *et al.* (2009) Energetic and Economic Investigation of Organic Rankine Cycle Applications. *Applied Thermal Engineering*, **29**, 1809-1817. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2008.08.016>
- [2] Peterson, R.B., Wang, H. and Herron, T. (2008) Performance of a Small-Scale Regenerative Rankine Power Cycle Employing a Scroll Expander. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, **222**, 271-282. <https://doi.org/10.1243/09576509jpe546>
- [3] Kang, S.H. (2012) Design and Experimental Study of ORC (Organic Rankine Cycle) and Radial Turbine Using R245fa Working Fluid. *Energy*, **41**, 514-524. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.02.035>
- [4] 顾伟, 翁一武, 王艳杰, 等. 低温热能有机物发电系统热力分析[J]. 太阳能学报, 2008(5): 608-612.
- [5] Wang, W., Wu, Y.T., Ma, C.F., *et al.* (2013) Experimental Study on the Performance of Single Screw Expanders by Gap Adjustment. *Energy*, **62**, 379-384. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.09.031>
- [6] 汤炎, 金光熹. CC型单螺杆压缩机主要几何关系的研究[J]. 西安交通大学学报, 1989(3): 7-15.
- [7] 王增丽, 冯全科. 单螺杆压缩机几何参数对压缩机性能的影响[J]. 流体机械, 2014(11): 34-37.
- [8] 邢子文, 著. 螺杆压缩机[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- [9] 王维. 螺杆膨胀机内体积膨胀过程与结构参数的关系[J]. 天津城市建设学院学报, 1995(2): 27-30.

### 期刊投稿者将享受如下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: [se@hanspub.org](mailto:se@hanspub.org)