

低温余热蒸汽 ORC 发电系统热力性能实验研究

杨新乐¹, 黄菲菲¹, 赵阳升², 冯增朝²

(1. 辽宁工程技术大学 机械工程学院, 辽宁 阜新 123000; 2. 太原理工大学 采矿工艺研究所, 山西 太原 030024)

摘 要: 为了解矿藏热采过程低温余热 ORC 发电系统热力性能及其影响因素, 搭建了低温余热蒸汽 ORC 热力发电实验系统, 以 5 kW 背压式汽轮机为原动机, 采用 R11 工质进行 ORC 热力性能测试实验。实验结果表明, 110 °C 热源下, 蒸发压力超过 0.85 MPa 后工质存在气液两相状态, 提升至 120 °C 后工质均为过热状态, 增加热源温度可提高进入汽轮机的工质允许蒸发压力; 汽轮机带电机运行后转速下降, 在一定的热源温度下, 汽轮机转速和相对内效率随蒸发压力的提升呈现不断增加的趋势, 同时随热源温度上升, 汽轮机转速增加, 相对内效率提升; 在不同的热源温度下, 系统输出功率和热效率均随工质蒸发压力的提升而不断增加, 最大输出功率达 1.12 kW, 热效率达 4.92%, 提升热源温度能够增加进入汽轮机工质过热度, 提高系统的输出功率, 但对系统热效率影响不大。

关 键 词: 低温余热蒸汽; ORC 系统(有机朗肯循环); 汽轮机; 热力性能; 实验测试

中图分类号: TK212 文献标识码: A

引 言

灌注蒸汽开采是当前或未来矿藏高效安全开采的有效途径之一。由于开采过程中蒸汽注入量大且持续, 在尾端不可避免存在大量的低品位余热蒸汽。余热蒸汽的直接排放将产生巨大的能源浪费及严重的环境热污染^[1]。对于矿藏热采低温余热蒸汽, 由于温度和压力较低, 无法直接进入工业汽轮机推动汽轮机做功, 因而可采用有机朗肯循环(ORC)系统利用余热源加热低沸点工质使其达到高温高压状态并送入汽轮机做功来获取电能, 该系统具有结构简单、效率高、环境污染小等优点^[2]。

文献[3~5]针对 ORC 系统热力性能进行了大

量的理论研究, 国内外对 ORC 系统的实验研究多集中在以涡旋膨胀机为原动机的热力性能实验^[6~9], 而目前对于采用工业汽轮机为原动机的 ORC 系统实验研究并不多见。本研究首次采用 5 kW 小型工业背压式汽轮机为原动机, 以对流热采油页岩低温余热回收利用为工业背景, 在太原理工大学采矿工艺研究所内设计并搭建了一整套全工业化产品的低温余热蒸汽 ORC 热力发电实验系统, 采用 R11 为实验测试工质, 进行了 ORC 实验系统热力性能测试实验, 实验测试结果为 ORC 系统的工业化应用及系统进一步的热力性能优化提供技术参考和设计依据。

1 低温余热 ORC 热力发电实验系统

以低温余热蒸汽为热源的 ORC 热力发电实验系统原理及实验系统如图 1 和图 2 所示。

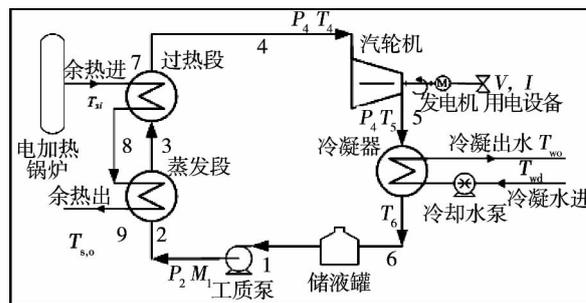


图 1 低温余热 ORC 发电系统原理图

Fig. 1 Schematic drawing of the low temperature waste heat ORC power generation system

实验系统主要设备均来自工业成型产品。低温余热蒸汽发电实验系统主要由电加热蒸汽锅炉、工质泵、蒸发器、汽轮机、发电机、冷凝器、储液罐及相应的测量、控制系统组成。蒸发器和冷凝器采用管

收稿日期: 2013 - 03 - 04; 修订日期: 2013 - 04 - 09

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(50534030), 国家自然科学基金青年基金项目(51104083)

作者简介: 杨新乐(1980 -), 男, 辽宁盘锦人, 辽宁工程技术大学副教授, 博士。

壳式换热器,由于余热蒸汽潜热值较大,故设计蒸发器换热面积 18 m²,冷凝器换热面积 12 m²。蒸发器采用立式结构,自上而下设计为过热段和蒸发段,过热段设计目的为实现工质的过热防止工质进入汽轮机发生液击而损坏叶片,同时为防止蒸发器进气压力瞬间过大,在蒸发器上加装安全阀,根据汽轮机额定压力,安全阀压力设定 1.2 MPa。实验过程中为防止工质与明火接触产生巨毒性气体,实验热源由全自动电加热蒸汽锅炉提供,额定蒸发压力 0.4 MPa,蒸汽流量 60 kg/h。工质泵采用不锈钢多级离心泵,额定流量 1 m³/h,额定扬程 150 m,泵效率 0.8,蒸发器出口工质流量随蒸发压力变化而变化,瞬时流量可由流量计测得。汽轮机采用 5 kW 级工业背压式汽轮机,额定进气压力 0.8 MPa、背压 0.2 MPa,额定转速 2 980 r/min,汽轮机实物结构如图 3 所示,通过手动调节汽轮机主进气阀门可控制进入汽轮机工质的蒸发压力。发电机采用 3 kW 同步发电机,转速 1 500 r/min。为实现与汽轮机转速相匹配,采用 V 形皮带与汽轮机输出轴相联。实验用电设备采用 3 个 1 kW 草坪灯并联使用。



图 2 低温余热 ORC 发电实验系统
Fig. 2 Low temperature waste heat ORC power generation test system

系统测试采用 R11 为实验工质。尽管 R11 目前为工业上逐步淘汰的氟利昂工质,但 R11 的热力性质与目前较多文献 [3 ~ 4] 推荐的 R123 工质相似,因此适合在实验室作为实验系统性能测试工质使用。

系统主要测量参数为工质在各个热力过程的温度、压力、流量以及汽轮机转速和发电机电功率。主要温度、压力、流量测点如图 1 中所示。汽轮机转速

利用汽轮机上的转速传感器测定,发电机电功率通过电流表和电压表读数计算得出。

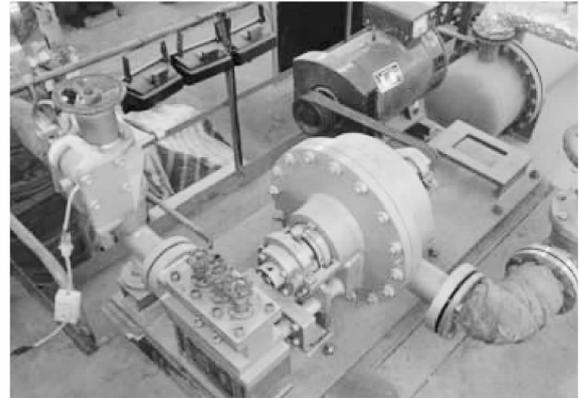


图 3 5 kW 汽轮机组
Fig. 3 5kW steam turbine unit

2 实验数据处理及分析

实验过程中在任意一个蒸发压力下,待系统稳定发电后,记录实验数据,根据实验数据换算出工质在各状态点比焓后进行数据处理。

2.1 实验数据处理

2.1.1 汽轮机相对内效率

由于汽轮机相对内效率与工质在汽轮机进出口处的状态,以及工质在汽轮机中运行工况有关,因此工质的过热或欠饱和以及在汽轮机中发生的工质泄漏或者热泄漏对汽轮机相对内效率均有影响,故定义汽轮机相对内效率为工质实际进出口焓降与理论焓降之比^[10]:

$$\eta_T = (h_4 - h_{5a}) / (h_4 - h_5) \quad (1)$$

式中: h_4 —工质在汽轮机进口比焓, kJ/kg; h_{5a} 和 h_5 —工质在汽轮机出口的实际比焓和理论比焓, kJ/kg。

2.1.2 系统热效率

由于实际热源来自于矿山开采排放余热,因此用于提供蒸汽热源的电功率耗损可忽略不计,系统热效率可以由式(2)近似得出:

$$\eta = \frac{W_{net}}{Q_{吸}} \approx \frac{W_t - W_p}{n_{WF}(h_4 - h_1)} \quad (2)$$

式中: W_t —汽轮机输出功率, kW; W_p —泵耗功, kW; h_1 —工质在工质泵入口比焓, kJ/kg。

这里需要特别指出的是,泵耗功并非为泵的额定功率,其耗功值可根据热力学第一定律由工质泵进出口侧工质焓降近似求得,工质在热力过程的焓

值可由温度、压力计算得出,其计算式为:

$$W_p = n_{wf}(h_1 - h_2) / \eta_p \quad (3)$$

式中: h_2 —工质在工质泵出口焓, kJ / kg; η_p —泵效率, %。

2.1.3 实验结果不确定度

实验直接测量数据结果按 n 次测量算术平均值计算,间接测量结果不确定度按文献 [11] 给出的公式进行计算:

$$\delta(R) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial R}{\partial x_i} \delta x_i\right)^2} \quad (4)$$

2.2 实验结果及分析

2.2.1 蒸发器出口工质热力状态

对于 ORC 热力发电系统,工质在汽轮机进出口焓差是影响系统热效率和净输出功率的重要因素。在汽轮机背压保持不变的情况下,汽轮机入口工质热力状态决定汽轮机做功的效能,而汽轮机入口工质热力状态由蒸发器换热性能决定。图 4 所示为实验测试过程中不同热源温度条件下蒸发器出口温度随蒸发压力的变化关系。

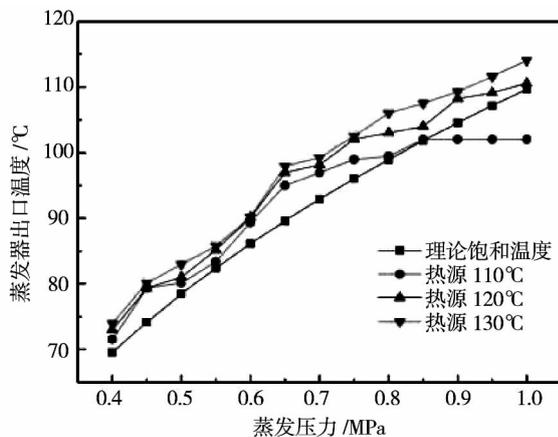


图 4 蒸发器出口温度随蒸发压力变化规律

Fig. 4 Law governing the changes of temperature at the outlet of the evaporator with the evaporation pressure

由图 4 可以看出,工质在蒸发器出口处温度分布大部分高于理论饱和温度,这说明工质在出口处均达到了过热状态。在 110 °C 热源条件下,由于蒸发器端部存在换热温差,造成工质出口温度不可能达到热源温度,在 0.85 MPa 左右,工质最高温度可达到 102 °C,之后继续提升压力后工质温度基本保持不变,此时工质状态为气液两相状态,这种热力状态的工质不仅将降低汽轮机做功效能,同时在高压

力下工质蒸汽干度低于 90% 时有可能对高速运转的汽轮机叶片造成液击现象进而损坏汽轮机,因此对于 110 °C 热源,进入汽轮机的工质蒸发压力控制在 0.85 MPa 以内为宜。由图 4 亦能看出,对于热源温度 120 和 130 °C,由于换热量的增大,汽轮机入口工质温度较 110 °C 有了一定的提升,同时在实验测试压力范围内,工质均保证过热状态,工质过热度也随蒸发压力的提升而增加,这样由于进入汽轮机的工质允许蒸发压力的提升,汽轮机做功效能将得到改善。

2.2.2 汽轮机性能实验结果

实验过程中为测试汽轮机性能,对汽轮机在不同工况条件下运行时转速进行了测试。图 5 为不同蒸汽热源温度,汽轮机转速随工质蒸发压力变化情况,其中空转工况为热源温度 130 °C 时,断开发电机测定的汽轮机转速。

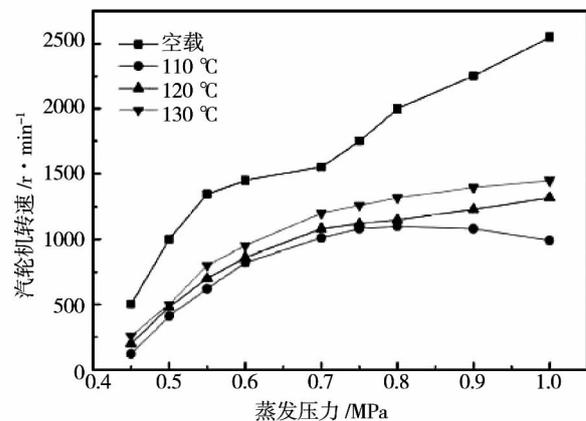


图 5 汽轮机转速随蒸发压力变化规律

Fig. 5 Law governing the changes of the rotating speed of the steam turbine with the evaporation pressure

由图 5 可以看出,在实验能够达到的蒸发压力范围内,空载和带发电机运行两种工况下汽轮机转速均随蒸发压力的提升呈现不断增加的趋势,说明进入汽轮机的工质温度越高、蒸发压力越大,工质获得焓值越大,则汽轮机做功能力越高。对于热源 110 °C 蒸汽条件下,当蒸发压力超过 0.85 MPa 后,汽轮机转速明显下降,同时汽轮机出现振动现象,这是因为工质以两相状态进入汽轮机而造成汽轮机转速降低。同时实验发现汽轮机转速随热源温度的升高也逐渐增加,这是由于较高热源传递给蒸发器的热量更多,导致进入汽轮机做功的工质流量得到提

升,但对于低温余热蒸汽,提高热源温度仅增加其显热值,热值较小导致进入汽轮机的工质流量增量不大,从而对汽轮机转速提升不大。

实验过程中发现,在空载情况下,汽轮机最高转速可以达到 2 550 r/min,基本上达到了汽轮机的出厂额定转速。在带动发电机运行后,汽轮机转速大幅下降,在较低压力时,汽轮机输出转速极低,如 0.4 MPa 时仅能达到 200 r/min,实验达到的最高蒸发压力下,其转速最高可达到 1 205 r/min(热源 130 °C),这一转速与同步发电机的额定转速基本能够匹配。造成汽轮机转速大幅度降低主要原因一方面是由于采用皮带传动和带负载运行造成汽轮机输出转速下降;另一方面在较低的工质蒸发压力和蒸发温度下,由于汽轮机炭精密封环热膨胀较小,导致汽轮机动静密封存在较大间隙而造成一定的泄漏,工质蒸发温度越低,这种泄漏现象越明显,当提升工质蒸发温度和蒸发压力,这一现象逐渐改善至消失。因此,对于采用汽轮机为原动机的低温余热蒸汽 ORC 系统,在实际运行过程中,为保证汽轮机稳定运行以及防止工质泄漏,系统应以较高蒸发温度和蒸发压力进入汽轮机做功。

对于本实验系统的小型背压式汽轮机,在不同热源温度条件下拖动 3 kW 发电机运行时,汽轮机相对内效率随工质蒸发压力的提升呈现不断增加及增幅减小的趋势,如图 6 所示。汽轮机在低压情况时,由于温度和压力较低,汽轮机密封性能较差,导致汽轮机效率较低,在 0.5 MPa 时最大为 13.6%。随蒸发压力和蒸发温度的不断增加,汽轮机相对内效率不断增加,汽轮机进出口膨胀比逐渐接近理论膨胀比,蒸发压力达到到 0.7 MPa 后,汽轮机相对内效率最高可达到 34.7%,此后继续提升工质蒸发压力,汽轮机相对内效率逐渐趋于一个定值。由图 6 也可以看出,热源温度的增加能够增大汽轮机的相对内效率,这是因为热源温度的增加一方面可提高进入汽轮机工质蒸发温度,增加炭精密封环热膨胀量,减小泄漏间隙,另一方面热源温度的增加使得进入汽轮机工质流量增大,提高汽轮机做功效能。

2.2.3 系统输出功率实验结果

图 7 为不同热源温度下汽轮机输出功率随工质蒸发压力的变化规律。由图可以看出,在不同热源温度条件下,当工质以过热状态进入到汽轮机做功时,输出功率均随着工质蒸发压力的不断上升呈现不断增加的趋势。随热源温度的增加,系统输出功

率得到了提升。这是因为热源温度增加导致换热量增大,工质获得更多的热量使得工质在蒸发器出口体积流量增加并且焓值增大,从而导致输出功率的进一步增加。因此,在矿藏热采开发过程尾端 ORC 系统应用中,在条件允许的情况下尽可能提升尾端余热热源温度。

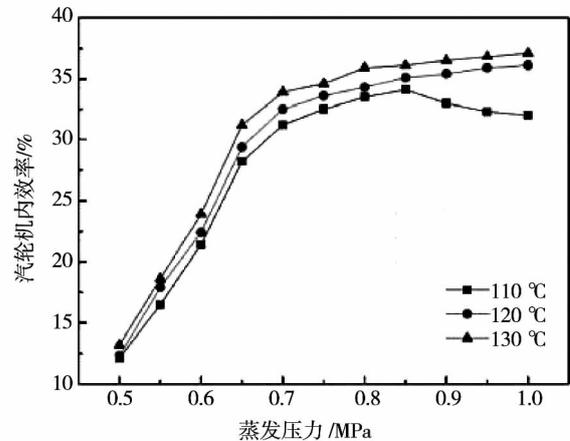


图 6 汽轮机相对内效率随蒸发压力变化规律
Fig. 6 Law governing the changes of the relative inner efficiency of the steam turbine with the evaporation pressure

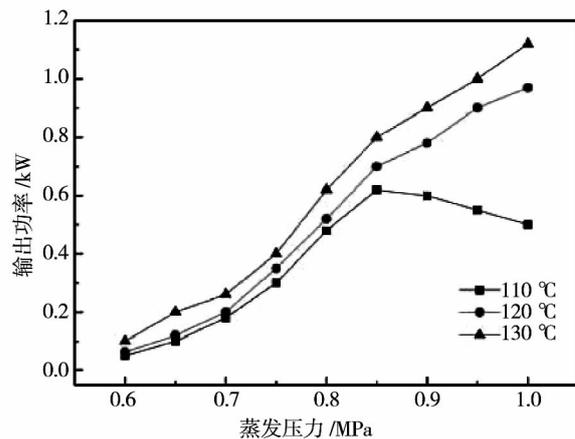


图 7 系统输出功率随蒸发压力变化规律
Fig. 7 Law governing the changes of the output power of the system with the evaporation pressure

实验过程中发现,对于 110 °C 热源温度,系统蒸发压力达到 0.85 MPa 左右后,净输出功率呈现明显下降的趋势,这是因为蒸发器的换热面积有限同时存在窄点温差导致在较大蒸发压力时进入汽轮机的

工质并未达到过热状态,工质存在气液两相状态,从而使得系统输出功率降低,而气液两相状态在汽轮机高速运行过程中是必须避免的现象,因此在 ORC 系统运行过程中,根据热源温度、换热器换热面积确定工质进入汽轮机的最高允许蒸发压力是保证 ORC 系统稳定运行的关键问题之一。

由实验数据分析可知,提升热源温度,工质进入汽轮机的允许蒸发压力可得到提升,随着热源温度提升,汽轮机输出功率也得到提升,在整个实测数据中,系统输出功率最高可达到 1.12 kW。这一功率值较理论分析值低,经过分析认为造成较低输出功率的原因为:(1) 汽轮机由于背压的存在导致相对内效率偏低,在最佳运行工况时,汽轮机效率最高仅为 37.1%,这大大制约了汽轮机的做功效能;(2) 蒸发器换热效率低及换热温差较大、皮带传动效率低。因此提升汽轮机的相对内效率、改善蒸发器换热性能以及采用传动效率高的传动方式(如采用 3 000 r/min 同步发电机实现联轴器直连)均是提升 ORC 系统热力性能的有效途径。

2.2.4 系统热效率实验结果

图 8 为系统热效率随工质蒸发压力和热源温度变化情况。由实验数据分析计算后可知,在考虑泵功的情况和热源温度为 130℃ 条件下,当工质蒸发压力为 1.0 MPa 时,系统热效率最大达到 4.92%。在热源温度为 110℃ 条件下,当工质蒸发压力超过 0.85 MPa 后,热效率呈明显下降,这主要是由于超过这一压力时汽轮机做功效能降低。

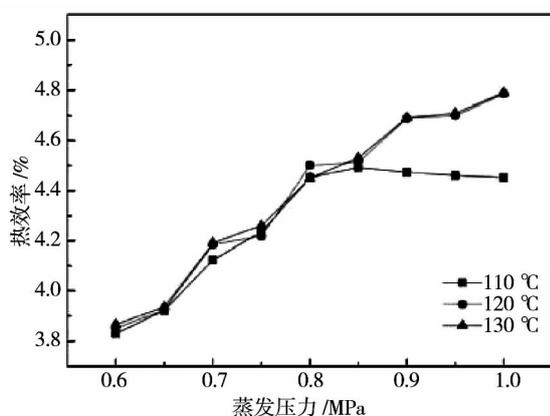


图 8 系统热效率随蒸发压力变化规律

Fig. 8 Law governing the changes of the thermal efficiency of the system with the evaporation pressure

由图 8 可以看出,在某一热源温度条件下,一方面,系统热效率随工质蒸发压力的提升呈现不断增加的趋势,这主要是因为提升蒸发压力可有效提高汽轮机的做功能力,从而进一步提高系统净输出功率;另一方面,系统热效率随蒸发压力的升高其增幅呈现不断下降的趋势,这是因为随着蒸发压力的升高,尽管汽轮机进出口焓差不断增加,但是进入汽轮机的工质流量下降,最终导致系统输出功率和热效率增幅的不断降低。

由图 8 也可以知道,在不同的热源温度下,系统热效率随热源温度的变化趋势并不明显,这是因为热源温度的提升虽然一方面可以提升汽轮机输出功率,但另一方面,系统吸收的热量也随着热源温度的增加而增加,这样系统热效率并未随热源的温度得到提升。同时虽然提高热源温度能够提高进入汽轮机工质的过热度,但过热度对 ORC 系统热效率影响并不明显。

实验测定 ORC 系统热效率并不是很高,主要是因为实验系统存在以下局限性:(1) 汽轮机在低温低压工作条件下气密性较差,汽轮机相对内效率偏低;(2) 工质泵效率偏低;(3) 机械传动及发电机效率低。改善汽轮机密封性以及提高各设备及传动机构效率是提升系统热效率的重要保证。

3 结 论

(1) 搭建的低温余热蒸汽 ORC 发电实验系统能够稳定运行,采用工质 R11 实验测得系统最大热效率达到 4.92%,最大净输出功率达到 1.12 kW,该实验系统为进一步研究不同工质下 ORC 系统热力性能试验及优化提供实验平台和测试方法;

(2) 背压式汽轮机由于背压存在效率较低,以低压低温运行时,泄漏量较大导致更低的转速及做功能力,提升工质蒸发压力可进一步改善泄漏及提升汽轮机相对内效率;

(3) 低温余热蒸汽作为热源的 ORC 系统,由于潜热值大,蒸发器换热能力强,在实验蒸发压力范围内,以过热态进入汽轮机做功的工质,系统热效率和输出功率随蒸发压力的提升呈现不断增加的趋势,在系统设计时应尽量提升系统蒸发压力;

(4) 随热源温度升高,进入汽轮机做功工质流量增加,焓值和过热度增大,系统输出功率增加,而热效率未发生明显变化。

参考文献:

[1] 杨新乐,赵阳升,冯增朝,等. 对流热采油页岩过程低温余热 ORC 系统热力分析 [J]. 热能动力工程. 2012, 27(6): 664 - 669.
 YANG Xin-le, ZHAO Yang-sheng, FENG Zeng-chao, et al. Thermodynamic analysis of a low temperature waste heat organic Rankine cycle system in the process of the convection heat-based oil shale exploitation [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy, 2012, 27(6): 664 - 669.

[2] Badr O Callaghan. Thermodynamic and thermophysical properties of organic working fluids for Rankine cycle engines [J]. Applied Energy, 1985, 19(1): 1 - 40.

[3] Saleh B, Koglbauer G, Wendland M, et al. Working fluids for low temperature Organic Rankine Cycles [J]. Energy, 2007, 32(7): 1210 - 1221.

[4] Dai Yiping, Wang Jiangfeng, Gao Lin. Exergy analysis, parametric analysis and optimization for a novel combined power and ejector refrigeration cycle [J]. Applied Thermal Engineering, 2009, 29(10): 1983 - 1990.

[5] Bertrand Fankam Tchanche, George Papadakis, Gregory Lambrinos et al. Fluid selection for a low-temperature solar organic Rankine cycle [J]. Applied Thermal Engineering, 2009, 29(11 - 12): 2468 - 2476.

[6] Perterson R B, Wang H, Herron T. Performance of a small-scale regenerative Rankine power cycle employing a scroll expander [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy, 2008, 222(3): 271 - 282.

[7] Mathias J, Johnston J, Cao J, et al. Experimental testing of gerotor and scroll expanders used in , and energetic and exergetic modeling of an organic rankine cycle [J]. Journal of Energy Resources Technology, Transactions of the ASME, 2009, 131(1): 1 - 9.

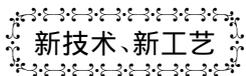
[8] 江 龙, Eichard A. Groll. 有机朗肯循环的发电系统的实验研究 [J]. 制冷学报. 2012, 33(1): 18 - 21.
 JIANG Long, Eichard A. Groll. Experimental study of an organic Rankine cycle power generation system [J]. Journal of Refrigeration. 2012, 33(1): 18 - 21.

[9] 顾 伟, 孙绍芹, 翁一武, 等. 采用涡旋膨胀机的低品位热能有机物朗肯循环发电系统实验研究 [J]. 中国电机工程学报. 2011, 31(17): 20 - 25.
 GU Wei, SUN Shao-qin, WENG Yi-wu, et al. Experimental study of a low grade heat energy organic Rankine cycle system equipped with a vortex expander [J]. Proceedings of China Electric Machinery Engineering, 2011, 31(17): 20 - 25.

[10] 王志奇, 周乃君, 罗 亮, 等. 几种低沸点工质余热发电系统的热力性能比较 [J]. 中南大学学报(自然科学版). 2010, 41(6): 2424 - 2429.
 WANG Zhi-qi, ZHOU Nai-jun, LUO Liang, et al. Comparison of the thermodynamic performance of waste heat power generation systems provided with several working media at low boiling points [J]. Journal of Central South University (Natural Science Edition). 2010, 41(6): 2424 - 2429.

[11] Moffat R J. Describing the uncertainties in experimental results [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 1988, 1(6): 3 - 17.

(辉 编辑)



M501J 的验证试验和首次销售情况

据《Gas Turbine World》2013 年 3 - 4 月刊报道, 被安装在三菱公司 T 点验证装置上的第一台 M501J 燃气轮机已超过 10 000 燃烧运行小时和 100 多次启动。

无故障和严格的批准过程已被 16 台机组的成功销售所证明。

三菱重工报告, 几台 M501J 燃气轮机目前正在运行试验或正被安装, 用于在今后几个月接下来的交工试运转。

对于简单循环生产, 在 15 °C 海平面 ISO 条件下, 60 Hz M501J 额定的输出功率为 327 MW, 效率为 41.0%。

具有 38.1 mm 汞柱的冷凝汽压力, 保守设计的 1 × 1 联合特循环装置的额定净输出功率为 470 MW, 效率为 61.5%。

(吉桂明 摘译)

Nozzle [刊, 汉] ZENG Qing-hua, KONG Wen-jun, SUI Chun-jie (Chinese Academy of Sciences Key Laboratory on Light-duty Type Power Devices, Engineering Thermophysics Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing, China, Post Code: 100190), FAN Hui-jie (National Key Laboratory on Robotics, Shenyang Automation Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Shenyang, China, Post Code: 110016) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2013, 28(5). - 461 ~ 464

In the light of the difficulty existing in accurately measuring the atomization characteristics of a micro flow nozzle, established were an atomization system and a method for studying the measurement. The volumetric method was used to measure the flow characteristics of the nozzle and the active contour model (ACM) was utilized to capture the atomization boundary and figure out the atomization cone angle. Furthermore, by using a laser particle size analyzer, an experimental study of the sizes and distribution characteristics of the atomized droplets was completed. The volumetric method can overcome the measurement error caused by a small flow rate and lead to a low measurement cost. The ACM method can theoretically guarantee the uniqueness of the atomization boundary captured and optimum credibility, eliminating the objective factors involved in the threshold value method, especially the direct measurement method, thus enhancing the accuracy of the test results. **Key words:** test method, test data, atomization characteristics, active contour algorithm, micro flow nozzle

低温余热蒸汽 ORC 发电系统热力性能实验研究 = **Experimental Study of the Thermal Performance of a Low Temperature Waste Heat Steam ORC Power Generation System** [刊, 汉] YANG Xin-le, HUANG Fei-fei (College of Mechanical Engineering, Liaoning Engineering Technology University, Fuxin, China, Post Code: 123000), ZHAO Yang-sheng, FENG Zeng-chao (Mining Process Research Institute, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan, China, Post Code: 030024) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2013, 28(5). - 465 ~ 470

To obtain the thermal performance of a low temperature waste heat power generation system and its influencing factors, set up was a low temperature waste heat steam ORC thermal power generation test system. With a 5 kW back pressure steam turbine serving as the driving machine, R11 working medium was used to perform the ORC thermal performance testing experiment. The test results show that under a 110 °C heat source, when the steam pressure has exceeded 0.85 MPa, the working medium exists in gas-liquid two phase state and when the temperature of the heat source has increased to 120 °C, the working medium is in its superheated state. To rise the temperature of the heat source can increase the allowable evaporation pressure of the working medium admitted by the steam turbine and the

rotation speed of the turbine will drop after it has driven the generator to run together. At a given temperature of the heat source the rotation speed and relative inner efficiency of the steam turbine will both assume a continuously ascending tendency with a rise of the evaporation pressure and at the same time the rotating speed of the steam turbine will go up and its relative inner thermal efficiency will rise with an increase of the temperature of the heat source. At various temperatures of the heat source the output power and thermal efficiency of the system will all continuously increase with an increase of the evaporation pressure of the working medium the maximal output power will reach 1.12 kW and the thermal efficiency will hit 4.92%. To increase the temperature of the heat source can increase the superheated degree of the working medium admitted by the steam turbine to enhance the output power of the system but have no big influence on the thermal efficiency of the system. **Key words:** low temperature waste heat steam, ORC, steam turbine, thermal performance, testing

中高温热泵两级循环方式性能分析 = **Analysis of the Performance of a High Temperature Heat Pump in a Two-stage Cycle** [刊, 汉] LIU Zhao-yun, WANG Huai-xin, GUO Dong-qi (College of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin, China, Post Code: 300072) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2013 28(5). -471 ~476

When the condensing temperature is in a range from 70 °C to 130 °C and the temperature rise of the cycle from 40 °C to 65 °C, with HFC245fa serving as the working medium, investigated was the circulation performance of a medium and high temperature heat pump under four modes of a two-stage cycle, namely, incomplete and complete intercooling in a single- and two-stage throttle. It has been found that under the foregoing four modes of the two-stage cycle, the COPs are all obviously higher than that of a single stage cycle, among them, the incomplete intercooling mode in a two-stage throttle can result in a maximal increment in COP, reaching 12.04% - 33.25%. The COP increment will monotonically go up with an increase of the circulation temperature rise, and first decrease and then increase with an increase of the condensate temperature. The two-stage circulation mode can also contribute to lowering the exhaust gas temperature of the compressor and when a wet fluid serves as the working medium, such an effectiveness will be especially remarkable. When the performance benefit and systematic cost are taken into account in a comprehensive way, to introduce the two-stage circulation mode into medium and high temperature heat pumps is feasible. **Key words:** medium and high temperature heat pump, two-stage cycle, COP, exhaust gas temperature

水平管降膜管间流型转变实验研究 = **Experimental Study of the Transition of Flow Patterns Between Horizontal Falling Film Tubes** [刊, 汉] SUN Wen-qian, XU Zhen, LU Yuan, et al (Chinese Academy of Sciences Key