

柴油机排气余热的有机朗肯循环发电系统

张红光, 刘彬, 梁虹, 陈研, 杨凯, 吴玉庭, 王伟
(北京工业大学 环境与能源工程学院, 北京 100124)

摘要: 针对柴油机排气余热的特点设计了有机朗肯循环(organic Rankine cycle, ORC)系统. 在该系统中, 采用R245fa(1,1,1,3,3-五氟丙烷)作为循环工质, 针对其不同蒸发温度以及冷凝温度, 通过模拟计算研究了最终排气温度、系统净输出功率和朗肯循环实际效率的变化规律. 研究表明, 当蒸发温度低于367.46 K时应采用一级膨胀系统; 当蒸发温度高于367.46 K低于404.6 K时应采用二级膨胀系统; 冷凝温度恒定时, 最终排气温度随蒸发温度的升高而降低, 系统净输出功率和朗肯循环实际效率随蒸发温度的升高而升高; 蒸发温度恒定时, 最终排气温度随冷凝温度的降低而降低, 系统净输出功率和朗肯循环实际效率随冷凝温度的降低而升高.

关键词: 余热; 有机朗肯循环; 柴油机

中图分类号: TK 406

文献标志码: A

文章编号: 0254-0037(2012)09-1431-05

Power System of Diesel Engine Waste Heat Recovery With a ORC System

ZHANG Hong-guang, LIU Bin, LIANG Hong, CHEN Yan, YANG Kai, WU Yu-ting, WANG Wei
(College of Environmental and Energy Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: To reuse the diesel engine of waste heat in exhaust, organic Rankine cycle (ORC) was proposed. R245fa (1, 1, 1, 3, 3-pentafluoropropane) was used as the working fluid in the ORC system. Final exhaust temperature, net work and actual efficiency of ORC were studied under different evaporating temperature and cooling temperatures. The results show that primary expansion system should be selected when the evaporating temperature is lower than 367.46 K. However, when the evaporating temperature is higher than 367.46 K but lower than 404.6 K, two-level expansion system is recommended. For a fixed cooling temperature, final exhaust temperature is decreased, but net work and actual efficiency of ORC are increased with the increase of the evaporating temperature. Under a given evaporating temperature, final exhaust temperature is decreased, but net work and actual efficiency of ORC are increased with the decrease of cooling temperature.

Key words: waste heat; organic Rankine cycle; diesel engine

相关研究表明, 发动机转变为有效功的热当量占燃料燃烧发热量的30%~45% (柴油机) 或20%~30% (汽油机). 以废热形式排出车外的能量占燃烧总能量的55%~70% (柴油机) 或70%~80%

(汽油机)^[1]. 汽车燃料燃烧所发出的能量只有1/3左右被有效利用, 大部分的能量损失则通过发动机的冷却水散热和高温尾气排热^[2-3]. 随着能源供应日益紧张, 节能、降耗、提高能源利用率越来越引起

收稿日期: 2011-02-18.

基金项目: 国家“863”计划资助项目(2009AA05Z206); 国家“973”计划资助项目(2011CB707202); 北京工业大学第九届研究生科技基金资助项目(ykj-2011-4842).

作者简介: 张红光(1970—), 男, 教授, 主要从事内燃机污染控制、燃烧与节能技术方面的研究, E-mail: zhg5912@263.net.

人们的重视,所以发动机排气余热的利用是必然趋势.

利用排气能量发电的方法基本有3种,分别为半导体温差发电、废气涡轮发电和氟里昂透平发电.其中半导体温差发电经研究表明,其热电转化效率为3.3%,最高只能达到7%^[4],热电转换效率低,只能利用发动机废气余热的小部分,有待于进一步提高热电转换效率和寻找具有更高热电转换效率的材料;废气涡轮发电这种装置结构简单,易于安装,但会对发动机工作性能产生影响,需要进一步研究;利用发动机排气余热的氟里昂汽轮机发电装置是由日本的一色尚次首先提出的^[5],此种装置在利用低品位热能方面有优势,但此系统的缺陷是较为复杂笨重且无工质回收装置.因此,本文提出一种适用于车用发动机排气余热回收的热力循环系统,以493ZLQ3柴油机为基础,对排气流量不变、最高温度为550℃的涡轮后排气余热进行回收,采用R245fa作为循环工质,并通过单螺杆膨胀机输出机械功.

1 低温余热发电有机朗肯循环系统

采用有机朗肯循环(organic Rankine cycle, ORC)来回收车用发动机排气余热,循环中主要装置包括蒸发器、冷凝器、单螺杆膨胀机、工质泵和电涡流测功机.本文提出的车用发动机排气余热回收热力循环温熵图如图1所示,构型图如图2所示.

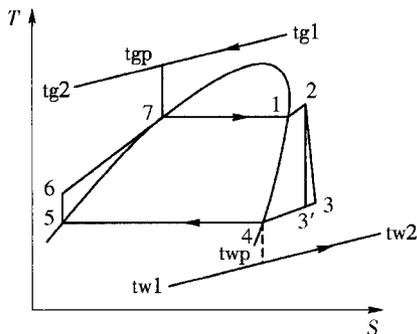


图1 R245fa工质温熵图

Fig. 1 Temperature-entropy diagram of R245fa

1.1 系统工作原理

排气侧:排气从发动机涡轮出来后其状态为tg1进入蒸发器,排到环境中其状态为tg2.冷却水侧:冷却水从冷却塔出来后其状态为tw1进入冷凝器,出口状态为tw2.工质侧:循环工质从储液罐出来后其状态为5,被工质泵加压至设计的蒸发压力,其状态为6,工质在蒸发器中吸收发动机排气的热量后,在蒸发器中被加热到过热,其状态为2,工质蒸汽在

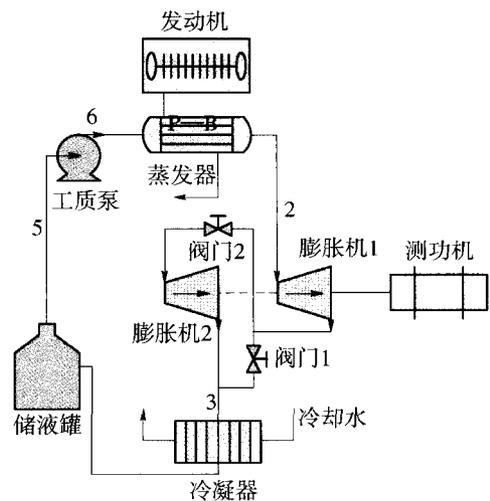


图2 有机朗肯循环余热回收系统

Fig. 2 Diagram of the ORC waste heat recovery system

膨胀机中膨胀输出功量,从膨胀机出来后其状态为3,如果采用一级膨胀系统则关闭阀门2,打开阀门1,工质进入冷凝器中;如果采用二级膨胀系统,打开阀门2,关闭阀门1,工质进入冷凝器中被冷却,然后回到储液罐,其状态为5,重新进行下一次循环.

1.2 系统热力学分析

假定系统处于稳定工况下:

1) 工作过程5—6可假定为绝热加压过程,不可逆性相对很小.工质泵所需的实际比轴功为

$$w_p = \frac{\int_{p_5}^{p_6} v dp}{\eta_{pump}} \quad (1)$$

式中: P_5 为工质泵进口压力(Pa); P_6 为工质泵出口压力(Pa); η_{pump} 为工质泵在工作点的总效率,与工质泵的结构、性能、机械传动效率有关; v 为工质的比容积(m^3/kg).

2) 工作过程6—2为等压加热过程,输入系统的排气热量为

$$\phi_1 = q_m (h_6 - h_2) \quad (2)$$

朗肯循环实际效率为

$$\eta = \frac{w_1 - w_p}{\phi_1} \quad (3)$$

式中: q_m 为工质的质量流量(kg/s); h_6 为工质在工质泵出口焓值(kJ/kg); h_2 为工质在蒸发器的出口焓值(kJ/kg).

3) 工作过程2—3为膨胀过程,理想状态下,为等熵过程2到3'.实际过程中,膨胀时的能量转化不可能达到100%,如图1中点3所示.膨胀中的等熵效率为

$$\eta_T = \frac{h_2 - h_3}{h_2 - h_3} \quad (4)$$

膨胀机对外输出功为

$$w_i = q_m (h_2 - h_3) \eta_m \quad (5)$$

式中: h_3 为工质经单螺杆膨胀机后实际焓值 (kJ/kg); h_3 为工质经单螺杆膨胀机后理想焓值 (kJ/kg); η_m 为膨胀机及发电机组的机械总效率。

4) 工程过程 3—5 为等压冷凝过程, 冷凝器的制冷量为

$$\phi_2 = q_m (h_3 - h_5) \quad (6)$$

1.3 工质选择

通过对比多种有机工质, 选用 R245fa 作为有朗肯循环工质。此工质是一种新的不易燃、低压 HFC 制冷剂, 它属于等熵工质。其部分特性如表 1 所示。有机工质 R245fa 具有如下优点: 1) 良好的环境友好性; 2) 较低的临界温度和压力, 较小的比热容, 低黏度和表面张力, 高气化潜热, 高热导率, 热稳定性好; 3) 无毒、不易燃、不爆炸且与设备材料和润滑具有良好的兼容性^[6]。基于以上优点, R245fa 能较好满足发动机排气余热回收热力性及环境友好性, 在上海交通大学与日本鸟取大学设计的 ORC 系统中也选用 R245fa 为工质^[7]。

表 1 R245fa 特性

Table 1 Characteristics of R245fa

参数名称/单位	参数值
分子式	CF ₃ CH ₂ CHF ₂
临界温度/°C	154.01
临界压力/MPa	3.651
沸点/°C	15.14
臭氧层破坏潜能值	0
分子量/(kg·kmol ⁻¹)	134.05
毒性	低毒
全球变暖潜值	820
可燃性	不可燃
腐蚀性	—
溶解性	—

2 ORC 系统性能分析

根据柴油机的性能试验结果, 确定了发动机的排气温度和质量流量, 据此对蒸发温度、冷凝温度 2 个变量下的余热回收系统循环变化规律进行了计算和分析。所研究的 ORC 系统的额定功率为 10 kW, 排气质量流量控制在 110 g/s, 工质流量控制在

0.236 3 kg/s。工质 R245fa 的物性参数来自美国 NIST(National Institute of Standards and Technology) 实验室所开发的物性软件 REFPROP 6.0。

2.1 一级膨胀系统

冷却水侧: 取年平均水温 $t_e = 15$ °C, 窄点温差 (最小传热温差) Δt 通常取 3~7 °C, 冷却水温升 δt 通常取 5~8 °C, 工质冷凝温度 $t_c = t_e + \Delta t + \delta t$, 则最小冷凝温度为 23 °C, 最大冷凝温度为 30 °C; 当取最小冷凝温度时对应的最低冷凝压力 0.138 72 MPa, 采用一级膨胀系统时对应的蒸发压力最高为 1.1 MPa, 蒸发温度为 367.46 K, 过热 30 K 后对应的膨胀机入口温度 397.46 K。当蒸发温度大于 367.46 K 时应采用二级膨胀。冷却水的温度受环境的影响而有所变化^[8]。

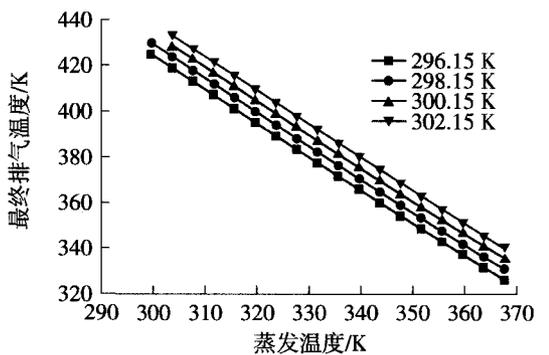
图 3(a) 显示了在不同冷凝温度下蒸发温度与最终排气温度的关系。可见, 在同一冷凝温度下最终排气温度随蒸发温度的增大而显著降低, 而且在同一蒸发温度下, 最终排气温度也随冷凝温度的降低而显著降低, 均呈线性关系, 这是由于蒸发温度和冷凝温度的差值不断增大的原因。因此, 应根据工质的特性, 尽可能充分利用排气余热, 以提高工质的蒸发温度, 不但提高了尾气余热的利用率, 而且进一步减少了尾气对环境的热污染。需要注意的是, 最终排气温度不能降得太低, 如果太低将影响排气背压, 将使整个系统的性能恶化, 甚至无法正常工作。

图 3(b) 显示了在不同冷凝温度下蒸发温度与系统净输出功率的关系。可见, 在同一冷凝温度下系统净输出功率随蒸发温度的升高而显著升高, 在同一蒸发温度下系统净输出功率随冷凝温度的降低而显著升高, 均呈线性关系。这是因为工质泵压缩功很小, 系统净输出功率主要受蒸发温度和冷凝温度的差值的影响。

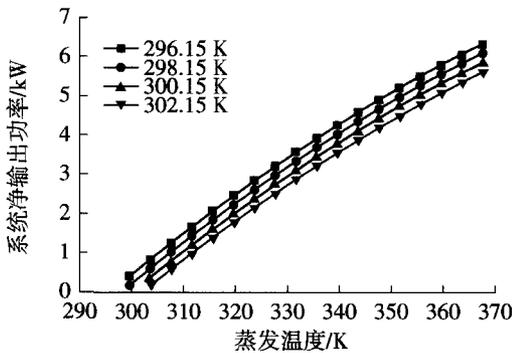
图 3(c) 显示了在不同冷凝温度下蒸发温度与朗肯循环实际效率关系。可见, 在同一蒸发温度下朗肯循环实际效率随冷凝温度的降低而显著升高, 较高的蒸发温度有助于系统性能的提高; 在同一冷凝温度下朗肯循环实际效率随蒸发温度的升高而显著升高, 此图的变化趋势和图 3(b) 相似, 系统的吸热量是有限的, 所以朗肯循环实际效率主要随系统净输出功的变化而变化。

2.2 二级膨胀系统

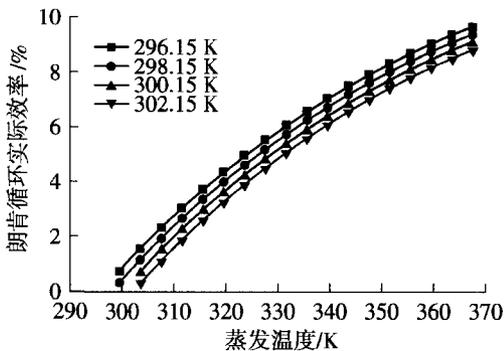
当采用一级膨胀系统时对应的最高蒸发压力为 1.1 MPa, 蒸发温度为 367.46 K, 当蒸发温度大于这个温度时一级朗肯循环实际效率不能再提高。原因



(a) 不同冷凝温度下蒸发温度与最终排气温度的关系



(b) 不同冷凝温度下蒸发温度与系统净输出功率的关系

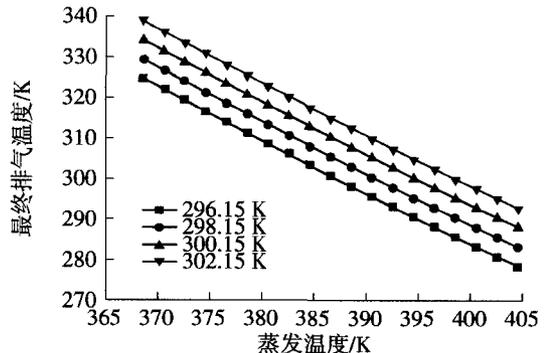


(c) 不同冷凝温度下蒸发温度与朗肯循环实际效率的关系

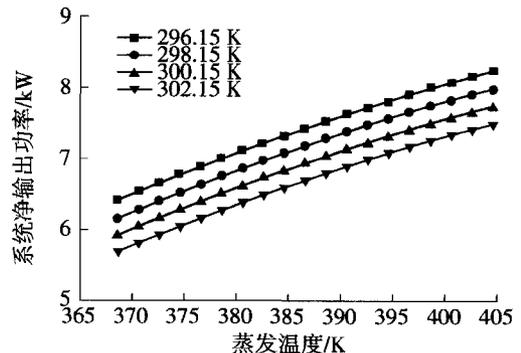
图3 不同冷凝温度下蒸发温度与最终排气温度的关系(一级系统)

Fig.3 Effect of cooling temperature on final exhaust temperature, net work, actual efficiency of ORC with different evaporating temperatures (primary expansion system)

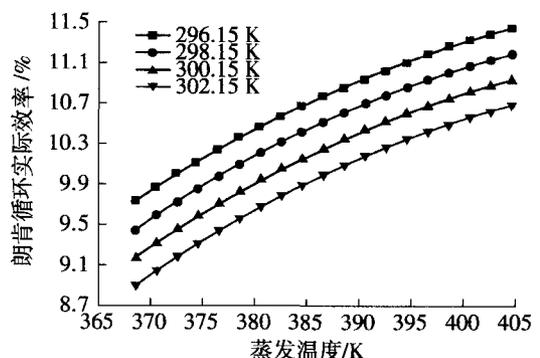
通过图3(a)与图4(a)进行对比,在同一冷凝温度下二级膨胀系统能进一步提高尾气余热利用率;图3(b)与图4(b)进行比较可以看出二级膨胀系统在同一冷凝温度下能输出更多的净功,相应地在图1中,点2与点3间的距离有所增大;通过图3(c)与图4(c)比较可以看出当蒸发温度超过一定值时,采用二级膨胀系统能更好地提高整个系统的朗肯循环实际效率.



(a) 不同冷凝温度下蒸发温度与最终排气温度的关系



(b) 不同冷凝温度下蒸发温度与系统净输出功率的关系



(c) 不同冷凝温度下蒸发温度与朗肯循环实际效率的关系

图4 不同冷凝温度下蒸发温度与最终排气温度的关系(二级系统)

Fig.4 Effect of cooling temperature on final exhaust temperature, net work, actual efficiency of ORC with different evaporating temperatures (two-level expansion system)

是单螺杆膨胀机的最大膨胀比为8,当蒸发温度升高,蒸发压力也随着升高,而冷凝压力基本维持恒定,所以膨胀比已经超过膨胀机的上限,导致部分热量被冷却水带走,造成了能量的浪费.基于上述原因,设计了二级膨胀系统.由于所选用的蒸发器额定压力为2.4 MPa,蒸发温度的上限为404.6 K,所以当蒸发温度大于367.46 K而小于404.6 K时选用二级膨胀系统.

3 结论

1)在不同冷凝温度下,最终排气温度随蒸发温度的升高而降低,系统净输出功率和朗肯循环实际效率随蒸发温度的升高而升高;在不同蒸发温度下,最终排气温度随冷凝温度的降低而降低,系统净输出功率和朗肯循环实际效率随冷凝温度的降低而升高。

2)在本文中当蒸发温度小于 367.46 K 时采用一级膨胀系统,当高于 367.46 K 低于 404.6 K 时采用二级膨胀系统,这样会使排气最终温度进一步降低,朗肯循环实际效率、系统对外净输出功率均有较大提高,不但减少了能源的浪费及对环境的热污染,而且有利于系统性能的提高。

3)如果能进一步提高单螺杆膨胀机的膨胀比,不但能提高整个系统的有机朗肯循环实际效率和对外净输出功率,还能实现整个系统的小型化和紧凑化。

参考文献:

- [1] 朱智富. 汽车废热利用的有效途径[J]. 黑龙江工程学院学报, 2005, 19(2): 52-53.
ZHU Zhi-fu. Discussion on the effective way of automobile waste heat utilization[J]. Journal of Heilongjiang Institute of Technology, 2005, 19(2): 52-53. (in Chinese)
- [2] 周龙保. 内燃机学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009: 272.
- [3] CHUANG Y, CHAU K T. Thermoelectric automotive waste

heat energy recovery using maximum power point tracking [J]. Tracking-Energy Conversion and Management, 2009, 50(6): 1506-1512.

- [4] 汪玉林. 低温余热能源发电装置综述[J]. 热电技术, 2007(1): 1-4.
WANG Yu-lin. Summary of low temperature waste heat power generation unit [J]. Cogeneration Power Technology, 2007(1): 1-4. (in Chinese)
- [5] 一色尚次. 余热回收利用系统实用手册(下)[M]. 北京: 机械工业出版社, 1989: 27.
- [6] DRESCHER U, BRUGGEMANN D. Fluid selection for the organic Rankine cycle (ORC) in biomass power and heat plants[J]. Applied Thermal Engineering, 2007, 27(1): 223-228.
- [7] 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, 29(5): 609-612.
GU Wei, WENG Yi-wu, WANG Yan-jie, et al. Thermodynamic analysis of power generation system based on closed organic Rankine cycle (ORC) [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2008, 29(5): 609-612.
- [8] 魏东红, 陆震, 鲁雪生, 等. 废热源驱动的有机朗肯循环系统变工况性能分析[J]. 上海交通大学学报, 2006, 40(8): 1398-1402.
WEI Dong-hong, LU Zhen, LU Xue-sheng, et al. Performances analysis of the organic Rankine cycle driven by exhaust under disturbance conditions [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2006, 40(8): 1398-1402.
- (责任编辑 张 蕾)