

# CO<sub>2</sub> 跨临界热泵循环与朗肯循环耦合系统性能分析

王洪利, 田景瑞, 刘慧琴, 邓 闯  
(河北联合大学, 河北 唐山 063009)

**摘 要:** 提出跨临界 CO<sub>2</sub> 热泵和朗肯循环耦合实现凝汽器余热回收的方式。分别对朗肯循环、再热循环及跨临界 CO<sub>2</sub> 热泵和朗肯循环的耦合循环进行了热力学分析, 分析表明: 随着主蒸汽温度增加或乏汽温度降低, 3 种循环的效率均增加, 朗肯循环平均效率为 31.5%, 耦合循环平均效率为 35.5%, 再热循环平均效率为 33.5%; 随着主蒸汽压力增加或乏汽压力降低, 3 种循环的效率均呈增加趋势。相同对比条件下, 耦合循环效率最高, 朗肯循环效率最低, 再热循环介于二者之间。

**关 键 词:** 跨临界 CO<sub>2</sub> 热泵; 朗肯循环; 再热循环; 耦合循环; 热力学

中图分类号: TK123 文献标识码: A

## 引 言

电站运行时不仅大量的冷凝热从凝汽器被循环水带走, 而且向大气排放大量的 CO<sub>2</sub>。朗肯循环中大约 55% ~ 70% 的热量由凝汽器耗散在环境中, 且汽轮机排气温度接近环境温度, 凝汽器冷凝水因与环境温差小, 采用传统的余热回收方式具有一定的局限性。热泵循环在小温差下的效率较高, 可以将热泵从凝汽器冷凝水中回收的热量加热锅炉给水, 提高其温度, 进而提高耦合系统效率。CO<sub>2</sub> 属于环境友好性的制冷剂, 单位容积制冷量大, 其用于跨临界循环时不仅温度滑移大, 而且排气温度较高, 特别适宜热泵循环。

本研究提出跨临界 CO<sub>2</sub> 热泵和朗肯循环耦合实现凝汽器的余热回收<sup>[2-5]</sup>。其原理是利用汽轮机的一部分功供给压缩机来驱动热泵循环, 并把从凝汽器回收的热能用于提高锅炉给水温度, 进而提高耦合系统的效率。CO<sub>2</sub> 热泵循环不仅实现了回收凝汽器的余热, 同时也减少了 CO<sub>2</sub> 的排放。对朗肯循环、

再热循环和耦合系统进行了热力学分析, 为最大限度的提高电厂效率提供理论依据。

## 1 跨临界 CO<sub>2</sub> 热泵循环和朗肯循环耦合系统组成及热力学分析

### 1.1 系统组成

朗肯循环、再热循环及耦合循环主要包括锅炉、汽轮机(高、低压)、冷凝蒸发器、气液分离器、除氧器、水泵、压缩机、气体冷却器、节流阀。图 1 ~ 图 3 给出了朗肯循环、再热循环和耦合循环的原理和  $T-s$  图。

#### 1.1.1 朗肯循环

图 1 为朗肯循环的原理图和  $T-s$  图。

#### 1.1.2 再热循环

新蒸汽体积膨胀使蒸汽压力升高, 达到某一中间压力值后, 部分蒸汽被抽出汽轮机, 导入锅炉中的再热器或其它换热设备中, 使之再加热, 然后返回到汽轮机继续膨胀直至蒸汽压力达到背压。

#### 1.1.3 耦合循环

耦合循环是 CO<sub>2</sub> 跨临界热泵循环与朗肯循环耦合而成, 利用 CO<sub>2</sub> 跨临界热泵将朗肯循环中乏汽冷凝释放出的热量回收, 用来加热锅炉给水, 提高给水温度, 从而提高循环的效率。

## 2 3 种循环的热力学计算

### 2.1 循环效率计算方法

#### (1) 朗肯循环

$$\eta_1 = \frac{h_1 - h_{2,act}}{h_1 - h_4} \quad (1)$$

收稿日期: 2012-03-12; 修订日期: 2012-04-01

基金项目: 河北省高等学校科学技术研究重点基金资助项目(ZD2010105)

作者简介: 王洪利(1976-) 男, 河北乐亭人, 河北联合大学教授, 博士。

式中:  $h_1$ —1 点的焓值;  $h_{2,act}$ —2 点的实际焓值;  $h_4$ —4 点的焓值。

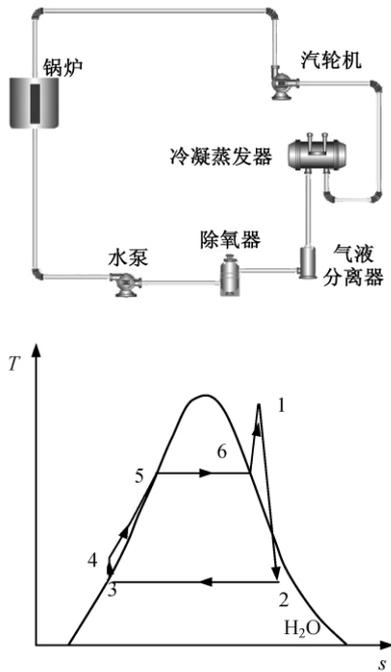


图 1 朗肯循环系统原理和  $T-s$  图  
Fig. 1 Principle and  $T-s$  diagram of a Rankine cycle system

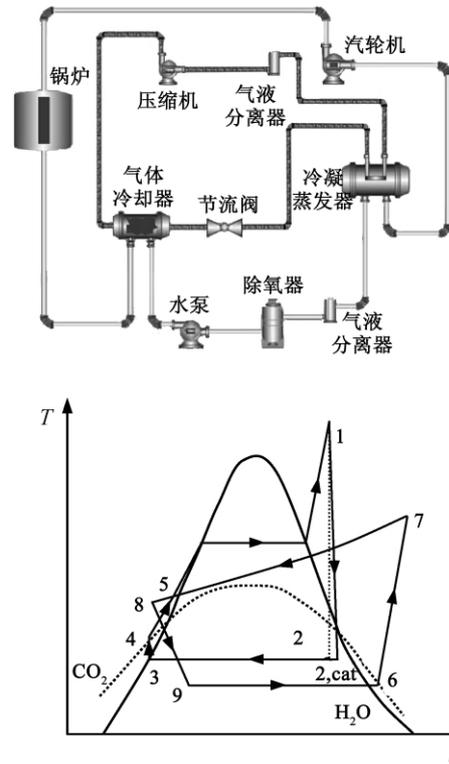


图 3 耦合循环系统原理和  $T-s$  图  
Fig. 3 Principle and  $T-s$  diagram of a coupling cycle system

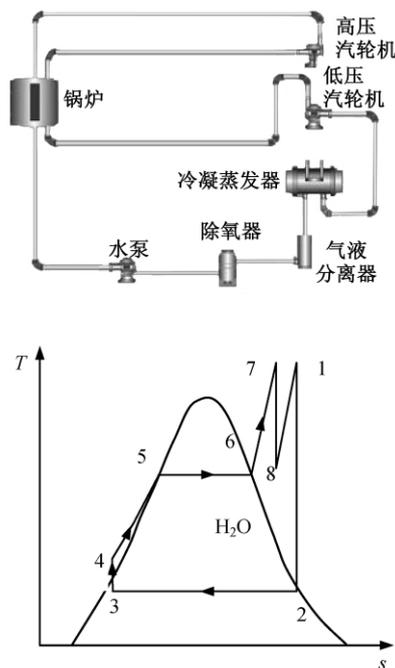


图 2 再热循环系统原理和  $T-s$  图  
Fig. 2 Principle and  $T-s$  diagram of a reheat cycle system

(2) 再热循环

$$\eta_t = \frac{(h_7 - h_{8,act}) + (h_1 - h_{2,act})}{(h_7 - h_3) + (h_1 - h_{8,act})} \quad (2)$$

式中:  $h_3$ 、 $h_7$ —3 点、7 点的焓值;  $h_{8,act}$ —8 点的实际焓值。

(3) 耦合循环

内部热泵侧性能系数:

$$COP = \frac{h_{7,act} - h_8}{h_{7,act} - h_6} \quad (3)$$

式中:  $h_6$ 、 $h_8$ —耦合循环内热泵循环 6 点、8 点的焓值;  $h_{7,act}$ —7 点的实际焓值。

外部朗肯循环效率:

$$\eta_t = \left[ (h_1 - h_{2,act}) - \frac{h_5 - h_4}{COP} \right] / (h_1 - h_5) \quad (4)$$

式中:  $h_5$ —5 点的焓值;

2.2 跨临界 CO<sub>2</sub> 热泵和朗肯循环耦合系统计算工况

(1) 内部热泵侧计算工况: 压缩机效率为 0.75; 压缩机排气压力 7 ~ 15 MPa; 气体冷却器出口温度为 28 ~ 38 °C; 蒸发温度分别选取 5 和 10 °C;

(2) 外部朗肯循环计算工况: 主蒸汽参数 3.9 MPa/450 °C, 背压(排汽) 3 kPa/24 °C; 燃料发热值  $Q_{dw} = 18\ 359\ \text{kJ/kg}$ ; 锅炉热效率  $\eta_{ig} = 0.9$ , 汽轮机效率  $\eta_T = 0.9$ ; 经热泵作用, 锅炉给水加热温度从 50 °C 升至 100 °C;

除以上计算工况外, 还需假设:

- (1) 系统在稳态条件下运行;
- (2) 忽略换热器及其它管道压降和热损失;
- (3) 忽略水泵耗功。

### 3 循环性能分析

利用通用软件 Visual Basic 开发了性能计算软件平台, 对各循环进行了性能分析。

#### 3.1 各循环性能分析

图 4 给出了再热循环效率和中间压力变化情况。图中数据点的拟合曲线表明, 在中间压力范围内, 再热循环存在最优中间压力, 在 0.2 ~ 0.3 倍的主蒸汽压力处再热循环效率最大。原因是中间压力是协调高、低压级汽轮机工况的主要参数, 对应最优中间压力, 高、低压级汽轮机输出功最大, 进而提高再热循环效率。

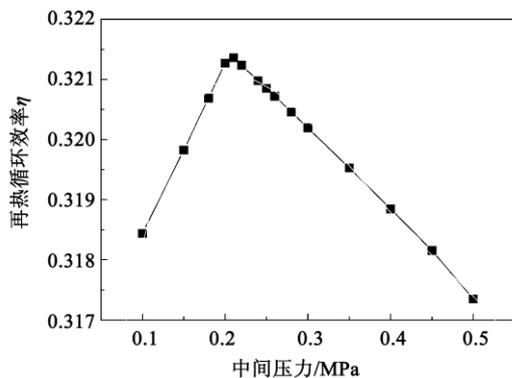


图 4 再热循环效率随中间压力变化  
Fig. 4 Change of the reheat cycle efficiency with the intermediate pressure

图 5 给出了耦合循环效率随压缩机排气压力的变化。随着排气压力增加, 耦合循环性能先增加后下降, 压缩机最优排气压力对应耦合循环最大性能。图中数据点的拟合曲线也表明了这种规律。内部 CO<sub>2</sub> 热泵循环性能最优时, 外部朗肯循环冷凝余热回收效果最好。给定计算条件下, 压缩机最优排气压力为 9.5 MPa, 耦合循环最高效率为 34.9%。

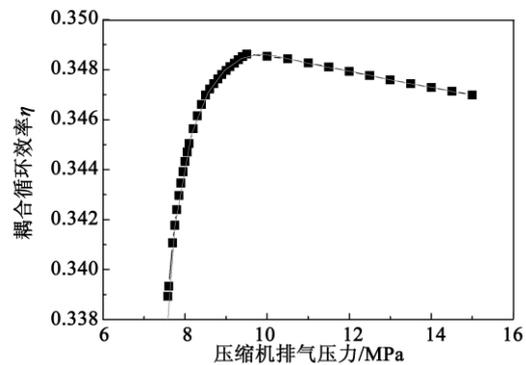


图 5 耦合循环效率随压缩机压力变化  
Fig. 5 Change of the coupling cycle efficiency with the intermediate pressure

朗肯循环、再热循环和耦合循环 3 种循环主蒸汽温度对循环效率的影响如图 6 所示。主蒸汽温度由 450 °C 增加到 550 °C, 3 种循环的效率均呈增加趋势, 原因是蒸汽温度的提高使循环平均吸热温度增加, 进而提高了循环效率。其中, 朗肯循环效率最低, 平均值为 31.5%; 耦合循环效率最高, 平均值为 35.5%; 再热循环平均值为 33.5%。

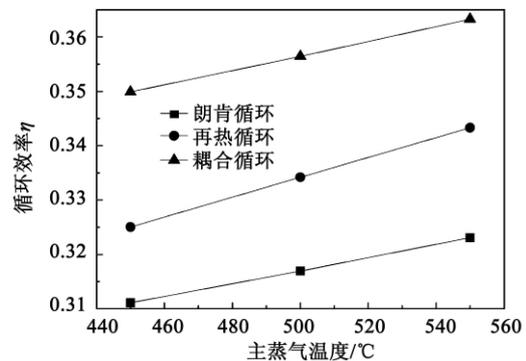


图 6 循环效率随主蒸汽温度变化曲线  
Fig. 6 Curves showing change of the cycle efficiency with the main steam temperature

#### 3.2 对比分析

乏汽温度对 3 种循环效率的影响如图 7 所示。乏汽温度由 18 °C 增加到 33 °C, 3 种循环的效率均呈下降趋势, 原因是乏汽温度的提高使循环平均放热温度增加, 进而降低了循环效率。朗肯循环效率最低, 耦合循环效率最高, 再热循环居中。

主蒸汽压力对朗肯循环、再热循环和耦合循环效率的影响如图 8 所示。主蒸汽压力由 3.9 MPa 增加到 4.10 MPa, 3 种循环的效率均呈增加趋势, 其变

化情况与图 6 相似。朗肯循环效率最低, 耦合循环效率最高, 再热循环介于中间。

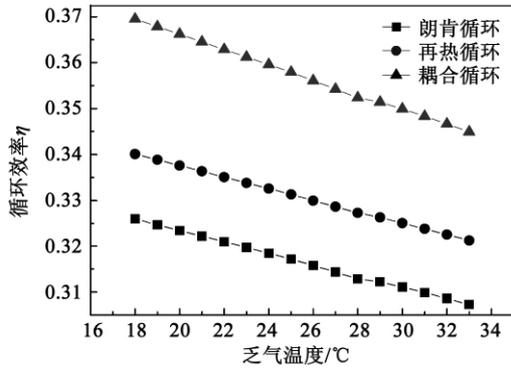


图 7 循环效率随乏汽温度变化曲线

Fig. 7 Curves showing change of the cycle efficiency with exhaust steam temperature

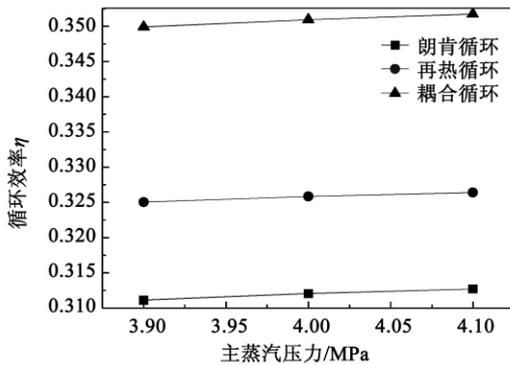


图 8 循环效率随主蒸汽压力变化曲线

Fig. 8 Curves showing change of the cycle efficiency with the main steam pressure

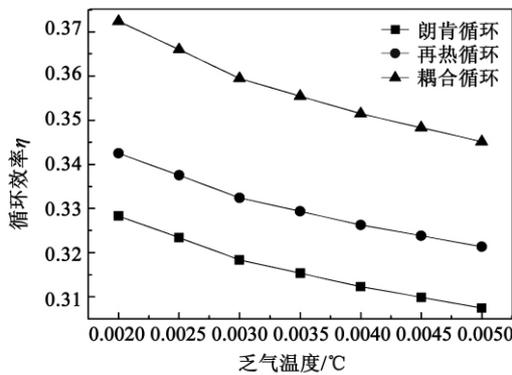


图 9 循环效率随乏汽压力变化曲线

Fig. 9 Curves showing change of the cycle efficiency with the exhaust steam pressure

图 9 给出了乏汽压力对朗肯循环、再热循环和耦合循环效率的影响。随着乏汽压力的增加, 3 种循环效率均下降。耦合循环的效率最高, 朗肯循环的效率最低。

分析表明, 相同对比条件下, 耦合循环的效率高于再热循环, 朗肯循环效率最低。

#### 4 结 论

(1) 再热循环存在最优中间压力为 9.5 MPa, 对应最优中间压力, 再热循环效率最高为 34.9%; 随着压缩机排气压力增加, 耦合循环性能先增加后下降, 压缩机最优排气压力对应耦合循环最大性能。

(2) 随着主蒸汽温度增加或乏汽温度降低, 3 种循环的效率均呈增加趋势, 朗肯循环效率最低, 平均数值为 31.5%; 耦合循环效率最高, 平均数值为 35.5%; 再热循环介于两种循环之间, 平均数值为 33.5%。

(3) 随着主蒸汽压力增加或乏汽压力降低, 3 种循环的效率均呈增加趋势, 朗肯循环效率最低, 耦合循环效率最高, 再热循环介于两种循环之间。

#### 参考文献:

- [1] White S D, Yarrall M G, Cleland D J, et al. Modeling the performance of a transcritical CO<sub>2</sub> heat pump for high temperature heating [J]. International Journal of Refrigeration, 2002, 25 (4): 479 - 486.
- [2] Chen Y, Lundqvist P, Johansson A, et al. A comparative study of the carbon dioxide transcritical power cycle compared with an organic rankine cycle with R123 as working fluid in waste heat recovery [J]. Applied Thermal Engineering, 2006, 26 (17 - 18): 2142 - 2147.
- [3] Emmanuel Cayer, Nicolas Galanis, Martin Desilets, et al. Analysis of a carbon dioxide transcritical power cycle using a low temperature source [J]. Applied Energy, 2009, 86 (7 - 8): 1055 - 1063.
- [4] Amlaku Abie Lakew, Olav Bolland, Yves Ladam. Theoretical thermodynamic analysis of Rankine power cycle with thermal driven pump [J]. Applied Energy, 2011, 88 (9): 3005 - 3011.
- [5] WANG Hong-li, MA Yi-tai, JIANG Yun-tao. Theoretical analysis and experimental research on Transcritical CO<sub>2</sub> single compression cycle with and without internal heat exchanger [J]. Journal of Tianjin University, 2009, 42(2): 137 - 143.

(丛敏编辑)

from the air film holes will force the heat exchange intensification factor of the wall surfaces with ribs to first increase and then decrease while the smooth surface heat exchange intensification factor of the smooth wall surfaces will first keep constant and then decrease. **Key words:** rib ,air film hole ,internal cooling passage ,heat exchange , numerical calculation

CO<sub>2</sub>跨临界热泵循环与朗肯循环耦合系统性能分析 = **Analysis of the Performance of a Transcritical CO<sub>2</sub> Heat Pump Cycle and Rankine Cycle Coupled System** [刊, 汉] / WANG Hong-li , TIAN Jing-rui , LIU Hui-qin , DENG Chuang ( College of Metallurgical and Energy Source , Hebei United University , Tangshan , China , Post Code: 063009 ) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2012 27( 6 ) . - 660 ~ 663

Proposed was a method for realizing a waste heat recovery from a condenser in a transcritical CO<sub>2</sub> heat pump coupled with a Rankine cycle and thermodynamically analyzed were a Rankine cycle , reheat cycle and a coupled cycle of a transcritical CO<sub>2</sub> heat pump Rankine cycle. The analytic results show that with an increase of the main steam temperature or a decrease of the exhaust gas temperature , the efficiencies of three types of cycles will increase. The average efficiency of the Rankine cycle reaches 31.5% , that of coupled cycle hits 35.5% and that of the reheat cycle is 33.5% . With an increase of the main steam temperature or a decrease of the exhaust gas temperature , the efficiencies of the three types of cycles assume an ascending tendency. Under the same contrast conditions , the efficiency of the coupled cycle is highest while that of the Rankine cycle is lowest and that of the reheat cycle is between them. **Key words:** transcritical CO<sub>2</sub> heat pump , Rankine cycle , reheat cycle , coupled cycle , thermodynamics

对流热采油页岩过程低温余热 ORC 系统热力分析 = **Thermodynamic Analysis of a Low Temperature Waste Heat Organic Rankine Cycle System in the Process of the Convection Heat-based Oil Shale Exploitation** [刊, 汉] / YANG Xin-le , DAI Wen-zhi ( College of Mechanical Engineering , Liaoning University of Engineering Technology , Fuxin , China , Post Code: 123000 ) , ZHAO Yang-sheng , FENG Zeng-chao ( Mining Technology Research Institute , Taiyuan University of Science and Technology , Taiyuan , China , Post Code: 030024 ) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2012 27( 6 ) . - 664 ~ 669

To recover the low temperature waste heat steam produced during the convection heat - based oil shale exploitation , presented and designed was an organic Rankine cycle system for power generation. Under the condition of specific waste heat steam parameters , based on the working medium R245fa for the cycle , a calculation program was prepared to simulate and analyze the law governing the influence of the off - design condition parameters of the ORC