

钢铁企业中低温烟气发电系统的比较和优化

张历华 吴俐俊 胡颢然 高秀晶

(同济大学 机械与能源工程学院热能与环境工程研究所, 上海 201804)

摘 要: 为高效利用钢铁厂 200 ~ 450℃ 烟气余热, 利用 EES 软件模拟计算了水蒸气朗肯循环 (SRC) 4 种有机朗肯循环 (ORC) 和水蒸气-有机物联合双循环 (S-ORC) 的热效率、烟效率和单位质量工质的发电能力。通过比较各发电系统的性能, 探讨了低温发电系统的优化措施。为进一步利用 ORC 系统透平机乏汽余热, 针对 300℃ 以上的热源设计了梯级有机朗肯循环 (CORC)。综合考虑各发电系统的性能, 得出: 对于 200 ~ 300℃ 的烟气, 可采用以 R141b 为工质的 ORC 发电系统; 对于 300 ~ 450℃ 的烟气, 可采用 CORC 发电系统。由于 S-ORC 的热效率、烟效率、发电功率比传统 SRC 的高, 且能有效减小工质在冷凝器的负压, 对于 450℃ 以上的热源, 可用 S-ORC 代替传统的 SRC。

关 键 词: 中低温; 朗肯循环; 发电系统; 有机工质

中图分类号: TM617 文献标识码: B

引 言

钢铁企业是我国的耗能大户, 其总能耗约占全国总能耗量的 15% 左右, 而各种余热消耗约占钢铁生产能耗的 68%。这些余热资源主要来自烧结机、高炉、转炉及热轧加热炉等排放的烟气和蒸汽, 其中烟气温度在 200 ~ 450℃ 范围内^[1], 属于中低温余热范畴。目前, 对中低温余热的回收方式有热回收和热电回收两种途径, 由于热回收的热量不易储存, 且受输送距离的限制, 因而热电回收受到了更多的青睐。中低温余热发电技术主要有水蒸气朗肯循环 (Steam Rankine Cycle, 简称 SRC)、有机朗肯循环 (ORC) 和水蒸气-有机物联合循环 (S-ORC)。ORC 一般应用于 200℃ 以下的热源, 主要优点是热效率高, 系统结构简单紧凑, 适用热源广, 能有效回收低温热能^[2]。国内外学者对 ORC 研究还处于理论研究和小规模实验阶段, 工程应用较少。Florian Heberle 等人基于焓分析方法, 针对 80 ~ 180℃ 的地热水, 指出异丁烷和 R227ea 比较适合作为 ORC 热

电联产系统的工质^[3]。Dariusz Mikielewicz 等人提出了 ORC 工质选择的热力标准, 并选用 20 种有机工质在 170 和 200℃ 蒸发温度下对亚临界和超临界 ORC 系统进行计算, 指出乙醇、R123 和 R141b 是比较适合的工质^[4]。传统的水蒸气朗肯循环发电技术已经比较成熟, 主要应用于 500℃ 以上的热源。水蒸气-有机物联合循环是从能量梯级利用的角度, 将 SRC 和 ORC 运用于一体的复合发电技术。黄金等人针对轧钢厂 160℃ 的饱和蒸汽^[5], 利用水蒸气-低沸点介质联合双循环余热发电系统, 总发电效率可达 5.35%, 并与文献 [6 ~ 7] 中的 ORC 进行比较, 提出联合循环的发电效率比 ORC 的高。本研究针对某钢铁企业 200 ~ 450℃ 烟气余热, 在相同的冷热源工况下, 利用 EES (Engineering Equation Solver) 模拟软件对 ORC、SRC 和 S-ORC 3 种发电系统进行了模拟计算。其中 ORC 的工质选用 R123、R141b、R245ca、R601a (异戊烷) 4 种常用的有机物。通过比较各发电系统的热效率、烟效率和发电功率, 探讨了低温发电系统的优化措施。为进一步利用 ORC 系统透平机乏汽余热, 针对 300℃ 以上的热源, 设计了 CORC 优化系统。

1 系统模型

1.1 工作原理

SRC、ORC 和 S-ORC 发电系统的基本设备包括蒸发器、透平机、冷凝器和工质泵。SRC 中水蒸气需要过热, 在蒸发器里边设有过热段。另外, 为了除去给水中的氧气和其它不凝结气体, 减少水对系统的金属腐蚀, 增强蒸发器换热效果, SRC 中还应有除氧器。S-ORC 由 SRC 和 ORC 联合组成, 其 I 级循环为 SRC, II 级循环为 ORC, 两级之间用二级蒸发器连接, 用一级循环透平机乏汽加热二级循环的有机工质, 其工作原理如图 1 所示。

收稿日期: 2012-07-16; 修订日期: 2012-09-21

基金项目: 江苏省科委基金资助项目 (BA2010035)

作者简介: 张历华 (1986-), 男, 山东临沂人, 同济大学硕士研究生。

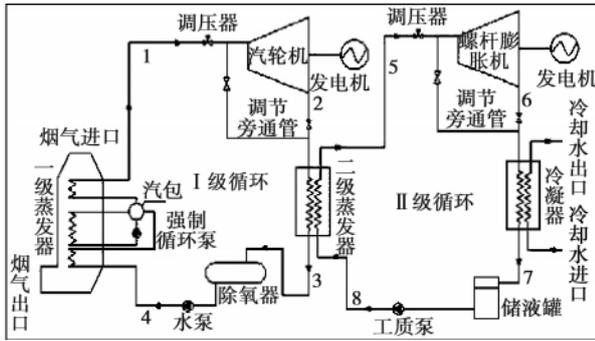


图 1 S-ORC 原理图

Fig. 1 Schematic diagram of a S-ORC system

I 级循环中,过程 1-2 为工质在透平机中膨胀做功过程;2-3 为工质在二级蒸发器中的凝结放热过程;3-4 为工质在工质泵绝热加压过程;4-1 为工质在蒸发器等压吸热过程。II 级循环的原理与 I 级的相同,两者之间用二级蒸发器相连,它作为 I 级循环的冷凝器和 II 级循环的蒸发器,不但能够提高 I 级循环中汽轮机出口乏汽的温度和干度,减小水蒸气乏汽的负压,还可以有效利用 I 级乏汽的余热加热 II 级循环的工质,提高热能利用率。

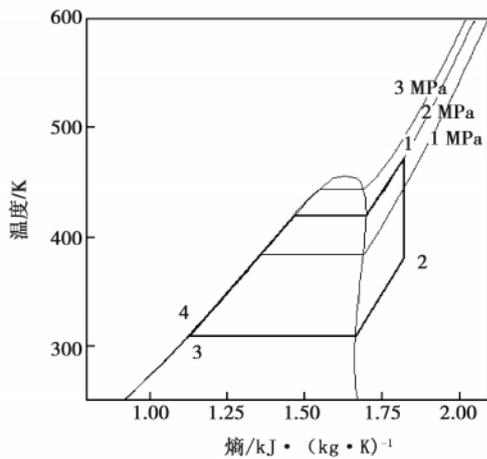


图 2 工质 T-s 图

Fig. 2 T-S diagram of the working fluid

1.2 数学模型

为简化计算,设定系统运行时处于稳定状态,并忽略工质在管道和换热器中的压力损失和散热。根据工质在图 2 上各状态点的物性参数,可得 ORC 和 SRC 工质在螺杆膨胀机中输出的比功率 w_1 为:

$$w_1 = (h_1 - h_2) \eta_t \tag{1}$$

过程 2-3 为工质在冷凝器中等压发热过程,放出的热量 Q_c 为:

$$Q_c = m_f(h_2 - h_3) \tag{2}$$

过程 3-4 为工质在工质泵中等熵压缩过程,工质泵消耗的功率 W_p 为:

$$W_p = m_f(h_4 - h_3) / \eta_p \tag{3}$$

过程 4-1 为工质在蒸发器等压吸热过程,工质在蒸发器吸收的热量 Q_e 为:

$$Q_e = m_f(h_1 - h_4) \tag{4}$$

单位质量工质的发电能力 P 为:

$$P = E / m_f, E = m_f w_1 \eta_g \tag{5}$$

系统的热效率 η_e 为:

$$\eta_e = (W_t - W_p) / Q_e \tag{6}$$

系统焓效率 η_{ex} 为:

$$\eta_{ex} = (W_t - W_p) / E_{in} \tag{7}$$

$$E_{in} = Q_e(T_H - T_L) / T_H$$

对于 S-ORC,一级循环的热力计算与上述相同,对于二级循环,工质从二级蒸发器吸收的热量 Q_{e2} 为:

$$Q_{e2} = m_{f2}(h_2 - h_3) \tag{8}$$

S-ORC 二级循环所需有机工质的流量为:

$$m_{f2} = \frac{Q_{e2}}{h_5 - h_8} \tag{9}$$

二级循环的热效率 η_{e2} 为:

$$\eta_{e2} = [m_{f2}(h_5 - h_6 - h_8 + h_7)] / Q_{e2} \tag{10}$$

S-ORC 总热效率 η_{ee} 为:

$$\eta_{ee} = (Q_{e1}\eta_{e1} + Q_{e2}\eta_{e2}) / Q_{e1} \tag{11}$$

式中: h_{1-8} —各状态点的比焓值, kJ/kg; W_t 、 W_p —透平机输出的净功和工质泵消耗的功率, kW; η_t 、 η_g 、 η_p —透平机的内效率、发电效率和工质泵效率; E —系统的发电功率, kW; T_H 、 T_L —热源温度、冷源温度, K; E_{in} —理想状态下系统获得的最大焓, kJ。

1.3 ORC 工质的选择

根据文献 [4, 8~11] 中总结的 ORC 工质选择的原则,钢铁厂排烟温度的波动范围,以及工质的临界温度和安全环保性,选用 R141b、R123、R601a、R245ca 4 种常用有机物作为 ORC 的工质。在 S-ORC 中,根据 I 级循环汽轮机乏汽的温度和工质临界温度,以及文献 [12~13] 的研究,选用 R245fa 作为 S-ORC II 级循环的工质。

2 模拟计算及结果分析

2.1 计算工况

以某钢铁厂烧结烟气和冷却机排烟为研究对

象, 烟气流量为 $80\,000\text{ m}^3/\text{h}$, 烟气温度波动范围 $200\sim 450\text{ }^\circ\text{C}$ 。系统蒸发器和冷凝器采用管翅式换热器, 烟气出口温度为 $130\text{ }^\circ\text{C}$, 烟气与工质在蒸发器中的夹点温差取 $50\text{ }^\circ\text{C}$ 。冷凝器采用板式换热器, 根据钢铁厂当地气候条件, 冷凝温度取 $37\text{ }^\circ\text{C}$ 。在相同冷热源工况下, 3 种系统的设计参数如表 1 所示。

表 1 计算工况
Tab. 1 Calculation conditions

循环名称	透平机进口温度/ $^\circ\text{C}$	透平机进口压力/ MPa	冷凝温度/ $^\circ\text{C}$	η_i	η_g	η_p
SRC	150~400	0.2~1.5	37			
ORC	150~400	1.5~3	37			
I 级 S-ORC	150~400	0.2~1.5	-	0.85	0.7	0.8
II 级 S-ORC	90	1.0	37			

考虑设备的耐压能力和成本, ORC 系统的最大压力设为 3 MPa 。为避免冷凝器内负压过低, SRC 系统最小冷凝压力设为 10 kPa 。计算过程中, 工质在 $T-s$ 图上各状态点的物性参数可以根据已知工况和过程特性(如等压蒸发, 等熵压缩), 在制冷剂物性查询软件 REFPROP9.0 中查出。根据系统热力过程特性和计算公式, 在 EES (Engineering Equation Solver) 模拟软件中编写相应的子程序, 计算时输入工质设定工况和相应状态点的物性参数, 可得到发电系统性能模拟结果, 如图 3~图 6 所示。

2.2 结果比较与分析

2.2.1 热效率

热源温度在 $200\sim 450\text{ }^\circ\text{C}$ 范围内, 各系统的热效率如图 3 所示。SRC 和 S-ORC 的热效率随着热源温度的升高而增加, 而 ORC 存在一个最佳蒸发温度点, 且 S-ORC 的热效率始终高于 SRC, 并且两者之间的热效率差距随着蒸发温度的升高而减小。在热源温度为 $250\text{ }^\circ\text{C}$ 时, SRC 和 S-ORC 的热效率分别为 9.39% 和 16.11% , 两者之间相差 6.72% ; 在蒸发温度为 $400\text{ }^\circ\text{C}$ 时, SRC 和 S-ORC 的热效率分别为 21.90% 和 27.89% , 两者之间相差 5.99% 。可见蒸发温度越低, S-ORC 比 SRC 的优势越明显。

对于 ORC, 在所选的 4 种工质中, 临界温度最高的 R141b 的热效率最高, 而临界温度最低的 R245ca 热效率最低。当热源温度高于 $375\text{ }^\circ\text{C}$ 以后, S-ORC 的热效率高于 ORC 的, 并且随着热源温度的继续增加, 两者之间的差距变大。这说明对于 $300\text{ }^\circ\text{C}$ 以下的热源, ORC 系统更能发挥优势。在蒸发压力一定情况下, ORC 系统存在最佳蒸发温度,

当蒸发温度超过该最佳值, 系统的热效率反而降低。在系统设计最大压力下, R141b 的蒸发温度最高, 可达 $181.58\text{ }^\circ\text{C}$, 由于蒸发换热器的夹点温差 ($50\text{ }^\circ\text{C}$) 已设定, 当热源温度超过 $232\text{ }^\circ\text{C}$, 有机工质在蒸发器出口温度便会大于最大设计压力下的蒸发温度而处于过热状态。从图 3 可以看出, 对于 ORC, 在系统设计最大压力 3 MPa 下, 所选工质的热效率最大点在其饱和蒸发温度点附近, 随着热源温度继续增加, 工质的过热度增大, 系统的热效率降低。况且工质过热过程的传热系数明显低于蒸发过程, 增加工质的过热度也会增加蒸发器的换热面积。因此, 在实际应用中, 对于干性工质来说, 为保证工质全部蒸发, 过热度保持在 $5\text{ }^\circ\text{C}$ 左右为好。

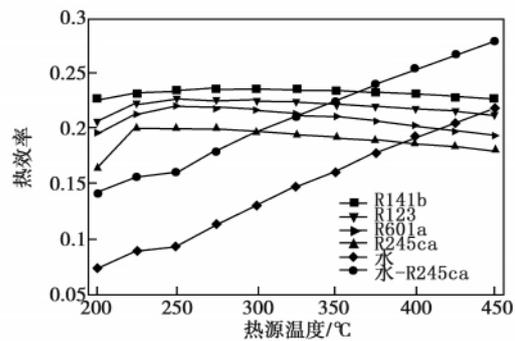


图 3 系统热效率

Fig. 3 Thermal efficiency of the system

2.2.2 焓效率

焓效率充分考虑了热量的数量和能级, 是热量利用质的指标, 为热力系统的改善和优化提供指导^[14]。各系统的焓效率如图 4 所示。

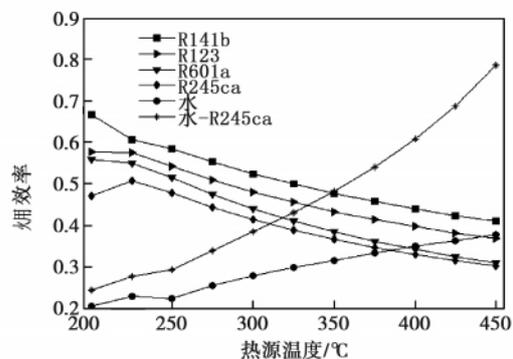


图 4 系统焓效率

Fig. 4 Exergy efficiency of the system

ORC 系统的焓效率随着热源温度的增加而减小, 而 SRC 和 S-ORC 系统的焓效率与之相反。这

是由于有机工质的临界温度较低,在设计最大压力 3 MPa 下,有机工质的蒸发温度低且潜热小。在相同的热源温度下,有机工质的过热度大于水蒸气的过热度,使得在 $T-s$ 图中,热源温度的变化曲线与有机工质在蒸发器中的温度变化曲线的匹配关系较差,从而增加的系统的不可逆损失,降低了 ORC 系统焓效率。而在 SRC 和 S-ORC 系统中,随着热源温度升高,水的蒸发温度也相应增加,从而可减小热源与水在蒸发器里边的温差,改善两者温度曲线的匹配关系,减小系统的不可逆损失,使得 SRC 和 S-ORC 系统的焓效率升高。

S-ORC 的焓效率波动范围最大,为 24.48% ~ 78.78%。在 ORC 中,R141b 焓效率最高,变化范围为 66.81% ~ 41.10%,R245ca 的焓效率最低,变化范围为 50.96% ~ 30.36%。当热源温度大于 350 °C 时,S-ORC 的焓效率高于 ORC 的,并且随着热源温度的增加两者之间的差距增大。

2.2.3 单位质量工质的发电能力

由式(1)、式(2)和式(6)可得,在透平机效率相同的情况下,工质在透平机中的焓降越大,系统单位质量工质的发电能力(P)越大。并且在系统发电量 E 相等时, P 越大,系统所需的工质流量越小。工质的流量是工质泵选型的重要参数,为减少工质泵数量,降低系统设备成本,应尽量选择发电能力强的工质。

各发电系统工质的发电能力如图 5 所示。各工质的 P 随着热源温度的升高呈增大趋势,这是由于热源温度越高,工质在膨胀机入口的比焓值越高,当冷凝温度不变的情况下,单位质量的工质在膨胀机中的焓降越大,工质做功能力增强。水蒸气的 P 最大,且增加较快,在 350 °C 热源条件下,可达 403.13 kJ/kg; II 级 S-ORC 中 R245fa 的发电能力最差,在设计条件下,只有 17.06 kJ/kg; 对于 ORC,R601a 的 P 最大,R123 的 P 最小,在 350 °C 热源条件下,分别为 124.77 和 56.97 kJ/kg。由此可知,单位质量的水蒸气在透平机中的焓降要比有机工质的大,在系统发电量相同的条件下,系统所需工质的流量较小。

3 系统优化

3.1 热效率提高措施

提高透平机进口工质的温度、压力和降低乏汽温度是提高朗肯循环效率的基本途径^[14]。随着热源温度升高,工质在蒸发器平均吸热温度增加,但在

热源温度高于 300 °C 后,ORC 系统的热效率反而降低。这是由于工质的乏汽温度引起的。ORC 系统透平机的乏汽温度随着热源温度增加而升高,其中 R601a 的最高,在 450 °C 热源条件下,可达 319.8 °C; 而 SRC、S-ORCI(一级 S-ORC) 和 S-ORCII 透平机排汽温度较低,设定工况下分别为 42、110 和 50.58 °C。在热源温度超过 300 °C 时,ORC 系统透平机乏汽温度均超过 120 °C。这部分乏汽还能继续回收利用,考虑到 ORC 能够有效回收低温热能优点,可以采用梯级有机朗肯循环(Cascade ORC,简称 CORC),用较低沸点的有机工质构成二级 ORC 发电系统,进一步利用一级 ORC 系统乏汽的余热。

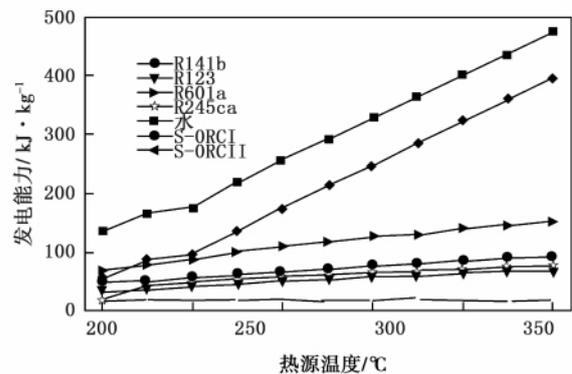


图 5 工质的发电能力

Fig. 5 Power generation capacity of the working medium

3.2 梯级有机朗肯循环系统(CORC)

CORC 的原理与 S-ORC 的原理相同,都属于联合循环,只将把 S-ORC 中一级水蒸气朗肯循环换成有机物朗肯循环。当热源温度大于 300 °C 时,R141b 在透平机出口温度可达 120 °C 以上。因此,针对 300 °C 以上的热源,设计了以 R141b 为一级循环工质、R245fa 为二级循环工质工质的 CORC。图 6 将 CORC 的热效率与 SORC 的进行对比。从图中结果可以看出,CORC 的总热效率明显高于 SORC 的,在热源温度为 375 °C 时,最高可达 36.81%。主要原因是 I 级 CORC(CORCI) 中 R141b 的热效率高于 SORCI 级中水蒸气的热效率,并且 CORC II 级循环 R245fa 的热效率在热源温度 320 ~ 380 °C 内增加较快,在热源温度 375 °C 时可达 18.94%,而 S-ORC II 级的热效率只有 11.44%。

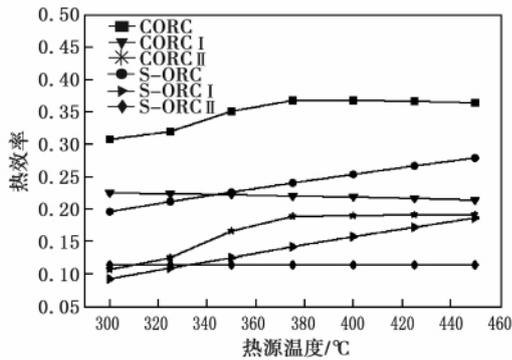


图 6 联合循环热效率

Fig. 6 Thermal efficiency of a combined cycle system

表 2 列出了 CORC 的焓效率、发电功率和各级发电能力的计算结果。在相同热源条件下,与 ORC、SRC 和 S-ORC 相比,CORC 焓效率最高,这说明 CORC 在梯级利用余热资源时更能有效地提高热能的回收品质;CORC 的发电功率较大,在 450℃ 热源温度下,可达 2 544.64 kW,比 S-ORC 高 30.32%;CORC 单位质量工质的发电能力与 ORC 和 S-ORC 相比也有所改善。在相同热源温度下,CORC II 级循环单位质量的平均发电能力比 S-ORC II 级的高 72.82%。因此 CORC 在梯级利用中低温余热方面比 S-ORC 性能更佳。

表 2 CORC 计算结果

Tab. 2 Calculation results of a CORC system

热源温度/°C	焓效率	发电功率/kW	一级工质的发电能力/kJ·kg ⁻¹	二级工质的发电能力/kJ·kg ⁻¹
300	0.53	1140.52	59.02	15.99
325	0.55	1362.48	63.27	19.19
350	0.61	1685.44	67.35	27.47
375	0.64	1966.69	71.25	32.39
400	0.67	2164.83	75.10	34.11
425	0.73	2358.87	78.81	36.65
450	0.79	2544.61	82.50	40.57

4 结 论

(1) 热源温度在 200 ~ 375 °C 范围内,ORC 的热效率、焓效率和发电功率较高,而对于 375 ~ 450 °C 的热源 S-ORC 更具优势;

(2) 在系统设计最大压力 3 MPa 下,ORC 系统热效率的最大值处在饱和蒸发温度点附近。随着热源温度继续增加,工质的过热度增大,透平机排汽温

度升高,系统的热效率反而降低;在所选的 4 种工质中 R141b 的热效率、焓效率最大;

(3) 热源温度大于 300 °C 时,CORC 系统的热效率最高可达 36.81%,而焓效率和发电功率也比 ORC、S-ORC 的高。CORC 在梯级利用余热资源时更能有效提高热能的回收效率和品质;

(4) 综合考虑各发电系统的性能,为有效回收钢铁厂中低温烟气余热,对于 200 ~ 300 °C 的烟气可采用以 R141b 为工质的 ORC 发电系统;对于 300 ~ 450 °C 的烟气可采用 CORC 发电系统;由于 S-ORC 的热效率、焓效率和发电功率比传统 SRC 的高,对于 450 °C 以上的热源,用 S-ORC 代替 SRC 更能提高发电系统的性能。

参考文献:

- [1] 丁毅,史德明. 钢铁企业余热资源高效利用[J]. 钢铁 2011, 46(10): 89-98.
DING Yi, SHI De-ming. High efficiency utilization of waste heat resources in iron and steel enterprises [J]. Iron and Steel 2011, 46(10): 89-98.
- [2] 冯 驯,徐 建,王墨南,等. 有机朗肯循环系统回收低温余热的优势[J]. 节能技术 2010 28(5): 387-391.
FENG Xun, XU Jian, WANG Mo-nan, et al. Advantages of an organic Rankine cycle system in recovering waste heat at a low temperature [J]. Energy Conservation Technology 2010 28(5): 387-391.
- [3] Florian Heberle, Dieter Brüggemann. Exergy based fluid selection for a geothermal Organic Rankine Cycle for combined heat and power generation [J]. Applied Thermal Engineering, 2010, 30: 1326-1332.
- [4] Dariusz Mikielewicz, Jaroslaw Mikielewicz. A thermodynamic criterion for selection of working fluid for subcritical and supercritical domestic micro CHP [J]. Applied Thermal Engineering 2010, 30: 2357-2362.
- [5] 黄金,朱冬生,李元希,等. 水蒸汽-低沸点介质联合双循环余热发电系统分析[C]//青岛:中国工程热物理学会会议 2008. HUANG Jin, ZHU Dong-sheng, LI Yuan-xi, et al. Analysis of a steam-low boiling point medium combined dual cycle waste heat power generation system [C]//Qingdao: Proceedings of China Engineering Thermophysics Society 2008.
- [6] 耿春景,李 汛,朱 强. 高炉冲渣水发电项目的可行性研究[J]. 节能技术 2005 23(3): 228-231.
GENG Chun-jing, LI Xun, ZHU Qiang. Feasibility study of a power generation project using water for flushing slags in a blast furnace [J]. Energy Conservation Technology 2005 23(3): 228-231.
- [7] Bai Feifei, Zhang Zaoxiao. Integration of low-level waste heat recovery and liquefied nature gas cold energy utilization [J]. Chinese Journal of Chemical Engineering 2008, 16(1): 95-99.
- [8] Mago P J, Louay M, Chamra, et al. An examination of regenerative organic Rankine cycles using dry fluids [J]. Applied Thermal Engineering 2008 28: 998-1007.
- [9] Drescher U, Brüggemann D. Fluid selection for the organic Rankine cycle (ORC) in biomass power and heat plants [J]. Applied Thermal Engineering 2006 27(1): 221-228.

(丛 敏 编辑)

基于射线法超临界流体在拟临界点处热物性研究 = **Study of the Thermophysical Characteristics of a Super-critical Fluid at the Quasi-critical Point Based on the Ray Method** [刊, 汉] ZHAO Yu, BI Qin-cheng, HU Ri-cha (National Key Laboratory on Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2013 28(3). -252 ~ 256

When $P = 22$ to 25 MPa and the mass flow speed inside a tube $G = 1\ 000$ to $1\ 500$ kg/(m^2s) and the temperature of the fluid $t = 200$ to 420 °C, experimentally studied in a comparatively systematical way were the physical characteristics of the fluid in a critical flow inside a vertical riser by making use of a single beam of gamma ray and adopting the dynamic measurement method. On the basis of the test and in the light of the characteristics of the radioactive ray having a relatively high sensitivity, the influence of two characteristic parameters, i. e. the ambient temperature and distance between the test section and the radioactive source, on the radioactive ray count rate of the fluid was obtained. The former has little influence on the count rate in a relatively small variation range and the distance also reflects that the energy attenuation will follow a variation law of a negative exponent. The variation laws of both count rate curves with the temperature when the mass flow speed is $1\ 000$ kg/(m^2s) and $1\ 500$ kg/(m^2s) respectively at 23 MPa are very similar and the values thus obtained from the curves are in very good agreement with the theoretical ones. The measurements at 23 MPa and 25 MPa respectively show that the pressure has little influence on the measurements by making use of the gamma ray. **Key words:** critical fluid, gamma ray densitometer, count rate, radioactive source, critical pressure zone

钢铁企业中低温烟气发电系统的比较和优化 = **Comparison and Optimization of Low Temperature Flue Gas Power Generation Systems in Iron and Steel Enterprises** [刊, 汉] ZHANG Li-hua, WU Li-jun, HU Hao-ran, GAO Xiu-jing (Thermal Energy and Environment Engineering Research Institute, Tongji University, Shanghai, China, Post Code: 201804) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2013 28(3). -257 ~ 261

To make use of the flue gas waste heat at 200 to 450 °C from iron and steel works with a high efficiency, simulated and calculated were the thermal efficiency, exergy efficiency and power generation capacity of the working medium in unit mass of an organic Rankine cycle (ORC) and a steam-organic combined dual Rankine cycle (S-ORC) by using the software EES. Through a comparison of the performance of various power generation systems, the measures for optimizing the low temperature power generation systems were investigated. To further utilize the exhaust steam waste heat from the turbines of an ORC system, a cascade organic Rankine cycle was designed for heat sources at 300 °C and above. When the performance of various power generation systems is taken into account in a comprehensive way, it has been concluded that for flue gases at 200 to 300 °C, an ORC power generation system can be adopt-

ed with R141b serving as the working medium for flue gases at 300 to 450 °C a CORC power generation system can be adopted. Due to the thermal efficiency ,energy efficiency and power of a steam organic Rankine cycle being higher than those of the traditional steam Rankine cycle and such a cycle capable of effectively lowering the negative pressure of the working medium in the condenser for heat sources at a temperature higher than 450 °C a steam organic Rankine cycle can be used to replace the traditional steam Rankine cycle. **Key words:** intermediate and low pressure Rankine cycle ,power generation system ,organic working medium

480 t/h 循环流化床锅炉飞灰特性的试验研究 = **Experimental Study of the Fly Ash Characteristics of a 480 t/h Circulating Fluidized Bed Boiler** [刊, 汉] LIU Xing-guo ,LIU Hai-yu ,JIN Yan (College of Electrical and Power Engineering ,Taiyuan University of Science and Technology ,Taiyuan ,China ,Post Code: 030024) ,ZHANG Zong-heng (China Coal Pingshuo Electric Power Engineering Co. Ltd. ,Shuozhou ,China ,Post Code: 036800) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2013 28(3) . -262 ~266

With a 480 t/h circulating fluidized bed boiler serving as the object of study ,through various tests ,investigated was the influence of coal feed characteristics ,total air quantity ,primary air quantity and the pressure in the air chamber on the flying ash characteristics and microscopically analyzed were the flying ash characteristics. The test results show that the carbon content of the flying ash will exhibit the peak value characteristics with the distribution of the particle diameters and when the particle diameter of the flying ash is 37 μm ,the carbon content of the flying ash will attain its maximum value. At a load below 100 MW ,when the oxygen content at the outlet of the economizer increases from 3.5% to 4.5% ,the carbon content of the flying ash will decrease by about 3% . When the primary air quantity decreases from $15 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{h}$ to $14 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{h}$,the carbon content of the flying ash will decrease by around 2% . When the air pressure goes up from 8 kPa to 12 kPa ,the carbon content of the flying ash will decrease by about 4% . The characteristic results of the surface structure and pore structure of the flying ash obtained by using a scanning electronic microscope (SEM) show that the pore characteristics of the flying ash in various particle diameter sections display gradual change characteristics ,which is in agreement with the particle diameters and carbon content distribution characteristics of the flying ash. **Key words:** circulating fluidized bed boiler ,operating parameter ,flying ash ,particle diameter distribution ,pore structure

基于钙基的吸收增强式水气变换反应实验研究 = **Experimental Study of the Absorption Intensified Type Water-gas Conversion Reaction Based on a Calcium-base Absorbent** [刊, 汉] LIU Yang ,LI Zhen-shan ,CAI Ning-sheng (Department of Thermal Energy Engineering ,Tsinghua University ,Beijing ,China ,Post Code: 100084) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2013 28(3) . -267 ~271