

文章编号: 1673 - 9620 (2007) 04 - 0041 - 04

高性能动力系统的整体效率影响因素分析*

陈 辉, 陈修娟, 肖立川

(江苏工业学院 机械与能源工程学院, 江苏 常州 213016)

摘要: 对一种新型燃煤发电技术——高性能动力系统 (HIPPS) 的能量平衡方程式和整体效率进行了研究, 并通过全微分的方式分析了各个设备对整体效率的影响, 描绘出各参量对 HIPPS 整体效率的影响曲线并对其进行分析和讨论。从而得出在选择 HIPPS 系统组成时, 为获得系统高效率所要考虑的因素。

关键词: 高性能动力系统; 整体效率; 高温空气加热炉

中图分类号: TK 123

文献标识码: A

Analyses of the Effect of Ingredients on the Holistic Efficiency of High Performance Power Systems

CHEN Hui, CHEN Xiu - juan, XIAO Li - chuan

(School of Mechanical and Energy Engineering, Jiangsu Polytechnic University, Changzhou 213016, China)

Abstract: This paper described the operating principle of a new kind of technology of coal - fired power station, the high performance power systems (HIPPS). Established the energy balance equation for each equipment and efficiency expression to holistic systems. Construed the effect of ingredients on holistic efficiency by the method of differential coefficient. Described and discussed the influential curve of parameters effect on the holistic efficiency. Then the advantageous diathesis is deduced which can improve the holistic efficiency of HIPPS.

Key words: HIPPS; holistic efficiency; HITAF

近年来, 为了提高燃煤电站的发电效率和降低对环境的污染, 出现了增压流化床 (PFBC)、整体煤气化 (IGCC)、低污染锅炉系统 (LEBS)、高性能动力系统 (HIPPS) 等多种新型燃煤发电技术。其中 HIPPS 是采用间接燃烧、燃气—蒸汽联合循环的现代发电技术, 整个机组效率达到了 47%, 商业化后将超过 50%^[1], 具有较好的发展前景。

HIPPS 有压气机、高温空气加热炉 (HITAF)、燃气动力循环、余热锅炉、蒸汽动力循环等几个主要组成部分, HITAF 是 HIPPS 的一个

特有结构, 压缩空气在其中的温升程度对整体效率有着重要的影响。同时在选择 HIPPS 的系统组成时, 还需了解其他各组成部分对整体效率的影响程度, 以便合理选择系统以获得更高的整体效率。

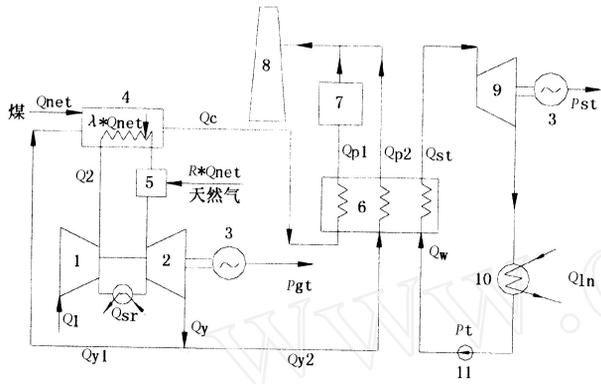
1 HIPPS 的工作原理

高性能动力系统是用间接燃烧将燃气循环和蒸汽循环联合在一起的新型燃煤技术, 其工作原理如图 1 所示。空气在压缩机中被压缩到 1.2 MPa 后, 先进入燃煤的高温空气加热炉 (HITAF) 中吸热,

* 收稿日期: 2007 - 05 - 08

作者简介: 陈辉 (1981 -), 男, 江苏灌南人, 硕士研究生; 联系人: 肖立川。

温度升高到 925 [2]，然后再进入燃气轮机的补燃室与天然气混燃，将温度进一步提高到 1 288 后进入燃气轮机，在燃气轮机中膨胀做功产生整个系统一半以上的功率[3]。从燃气轮机出来的高温乏气一部分进入 HITAF 助燃，另一部分和 HITAF 中出来的烟气一起进入余热锅炉产生蒸汽，推动蒸汽轮机输出大约 40% 的功。烟气从余热锅炉出来后需要经过脱硫、除尘装置由烟囱排入大气。



1- 压气机；2- 燃气轮机；3- 发电机；4- HITAF；5- 补燃室；6- 余热锅炉；7- 除尘器；8- 烟囱；9- 蒸汽轮机；10- 冷凝器；11- 水泵

图 1 HIPPS 的系统示意图

Fig 1 High performance power systems

2 系统中各设备的能量平衡分析

2.1 压气机的输入功

压气机的工作过程为定熵过程，其输入功：

$$W_i = h_2 - h_1 = C_p (T_2 - T_1) = \frac{n}{n-1} R_g T_1 \left[\frac{T_2}{T_1} - 1 \right] = \frac{n}{n-1} R_g T_1 \left(\frac{p_2}{p_1} - 1 \right)$$

式中： n - 绝热系数； C_p - 定压比容； γ - 压缩比 ($\gamma = p_2/p_1$)。

2.2 燃气轮机的能量平衡式

以相对于 1 kg 投入到 HITAF 中的煤的放热量为基准，忽略设备损失的热量，下同。建立能量平衡方程式：

$$Q_1 + Q_{net} + RQ_{net} = P_{gt} + Q_y + Q_{sr}$$

式中： Q_{net} - 投入到 HITAF 中煤的低位发热量； Q_1 - 进入压气机空气所携带的热量； γ - 1 kg 煤在 HITAF 中所放出的热量被压缩空气吸收的份额； R - 以投入到 HITAF 中 1 kg 煤的放热量为基准，补燃室中天然气的补燃率； P_{gt} - 燃气轮机的净输出功； Q_y - 乏气带走的热量； Q_{sr} - 燃气轮机经空

气冷却器散失和燃气泄露所携带的热量。

设燃气轮机的循环效率 η_{gt}^0 ，则

$$\eta_{gt}^0 = \frac{P_{gt}}{(1+R)Q_{net}}$$

2.3 HITAF 的能量平衡式

$$Q_{net} + Q_{y1} + Q_2 = Q_{net} + Q_c$$

式中： Q_{y1} - 进入 HITAF 中燃气轮机助燃乏气所携带的热量； Q_c - 进入余热锅炉烟气所携带的热量； Q_2 - 从压气机来进入 HITAF 空气所携带的热量。

2.4 余热锅炉的能量平衡关系

$$Q_c + Q_{y2} + Q_w = Q_{p1} + Q_{p2} + Q_{st}$$

式中： Q_{y2} - 进入余热锅炉燃气轮机乏气携带的热量； Q_w - 余热锅炉给水所携带热量； Q_{p1} - 进入烟囱烟气携带的热量； Q_{p2} - 进入烟囱燃气轮机乏气携带的热量； Q_{st} - 进入蒸汽轮机新蒸汽携带的热量。

2.5 蒸汽动力循环的能量平衡关系

$$Q_{st} + P_t = P_{st} + Q_{in} + Q_w$$

式中： P_t - 水泵功； Q_{in} - 凝汽器带走的热量； P_{st} - 蒸汽轮机的输出功。

以蒸汽在余热锅炉中的吸热量来定义蒸汽动力循环的循环效率，即

$$\eta_{st}^0 = \frac{P_{st} - P_t}{Q_{st} - Q_w}$$

3 HIPPS 的整体效率表达式

如果忽略水泵功，HIPPS 的整体热效率可由下式表示：

$$\eta_{hipps}^0 = \frac{P_{st}^0 + P_{gt}^0}{Q_{net} (1+R)} = \frac{\eta_{st}^0 (1+R) Q_{net} + \eta_{gt}^0 (Q_{st} - Q_w)}{Q_{net} (1+R)}$$

设余热锅炉的效率为 η_{yr} ，则余热锅炉有效利用的热量：

$$Q_{st} - Q_w = \eta_{yr} (Q_{y2} + Q_c) = \eta_{yr} [(1-X)Q_y + Q_c]$$

其中 X 为燃气轮机乏气进入 HITAF 助燃的份额， $Q_{y2} = (1-X)Q_y$ 。

如果忽略 Q_{sr} ，由上面各个设备能量平衡式，则可推导出 HIPPS 的效率表达式：

$$\eta_{hipps}^0 =$$

$$\frac{(+R)(1 - \gamma_{st}^0) \gamma_{gt}^0 + \gamma_{yr}(1 + R) \gamma_{st}^0 + \gamma_{st}^0 \gamma_{yr}^0 \frac{2Q_1 + W_1}{Q_{net}}}{1 + R}$$

4 整体效率影响因素分析

忽略进入压气机空气携带的热量 Q_1 ，同时令 $= W_t / Q_{net}$ ，则 η_{hipps}^0 的全微分为：
 $d \eta_{hipps}^0 = \frac{\partial \eta_{hipps}^0}{\partial \gamma_{st}^0} d \gamma_{st}^0 + \frac{\partial \eta_{hipps}^0}{\partial \gamma_{gt}^0} d \gamma_{gt}^0 + \frac{\partial \eta_{hipps}^0}{\partial \gamma_{yr}^0} d \gamma_{yr}^0 + \frac{\partial \eta_{hipps}^0}{\partial R} dR + \frac{\partial \eta_{hipps}^0}{\partial C} dC + \frac{\partial \eta_{hipps}^0}{\partial C_{st}} dC_{st} + \frac{\partial \eta_{hipps}^0}{\partial C_{gt}} dC_{gt} + \frac{\partial \eta_{hipps}^0}{\partial C_{yr}} dC_{yr} + \frac{\partial \eta_{hipps}^0}{\partial C_{CR}} dC_{CR} + \frac{\partial \eta_{hipps}^0}{\partial C_C} dC_C$ ，其中：
 $C_{st} = \frac{[1 + R + \frac{1}{\gamma_{gt}^0} (+R)] \gamma_{yr}^0}{1 + R}$ ，
 $C_{gt} = \frac{(+R)(1 - \gamma_{st}^0 \gamma_{yr}^0)}{1 + R}$ ，
 $C = \frac{(1 - \gamma_{st}^0 \gamma_{yr}^0) \gamma_{gt}^0}{1 + R}$ ，
 $C_{yr} = \frac{[1 + R - \frac{1}{\gamma_{gt}^0} (+R)] \gamma_{st}^0}{1 + R}$ ，
 $C_{CR} = \frac{(1 - \gamma_{st}^0 \gamma_{yr}^0) \gamma_{gt}^0 + (1 - \gamma_{st}^0 \gamma_{yr}^0) \gamma_{st}^0}{(1 + R)^2}$ ，
 $C_C = \frac{\gamma_{st}^0 \gamma_{yr}^0}{1 + R}$

C_i 表示的是第 i 个参量对 η_{hipps}^0 的影响因子，其大小表示第 i 个参量对 η_{hipps}^0 影响程度的大小。根据目前燃气动力循环、蒸汽动力循环和余热锅炉的技术水平，各种效率的取值范围为： $\gamma_{gt}^0 = 0.28 \sim 0.43$ ， $\gamma_{st}^0 = 0.28 \sim 0.34$ ， $\gamma_{yr}^0 = 0.65 \sim 0.9$ ^[4]，这里取 $\gamma_{gt}^0 = 0.38$ ， $\gamma_{st}^0 = 0.32$ ， $\gamma_{yr}^0 = 0.80$ 。、 R 和 C 的取值是由压缩空气的工作过程决定的，在当前技术参数条件下取 $= 0.5$ ， $R = 0.3$ ， $C = 0.25$ 。将上面各值代入 HIPPS 的效率表达式和各个影响因子，其计算结果见表 1。

表 1 HIPPS 整体效率影响因子数值

Table 1 Numerical value of the effects of ingredients on holistic efficiency

项目	η_{hipps}^0	C_{st}	C_{gt}	C_{yr}	C	C_{CR}	C_C
计算值	0.478	0.767	0.458	0.307	0.217	0.122	0.197

在压缩机的压缩比一定的情况下，压缩空气在 HITAF 中的吸热量取决于压缩空气的出口温度，而压缩空气两个升温过程中吸热量的比例决定 γ_{st} 和 R 的值，所以压缩空气在 HITAF 中的出口温度和天然气的补燃率对 HIPPS 的整体效率有着较大的影响。在压缩比确定和燃气轮机入口温度不变的情况下，以上面 γ_{st} 、 R 的取值为基准， γ_{st} 和 R 的值随压缩空气在 HITAF 的出口温度变化情况见表 2。

表 2 γ_{st} 和 R 取值随压缩空气在 HITAF 的出口温度变化

Table 2 Numerical value of γ_{st} and R in terms of the compressed air temperature out of HITAF

出口温度/	900	950	1 000	1 050	1 100
γ_{st}	0.478	0.522	0.565	0.608	0.651
R	0.321	0.279	0.238	0.196	0.154

根据上表中 γ_{st} 和 R 的值，利用式 (9) 可以得到 HIPPS 的整体效率随压缩空气在 HITAF 的出口温度和补燃率的变化规律，见图 2，图 3。

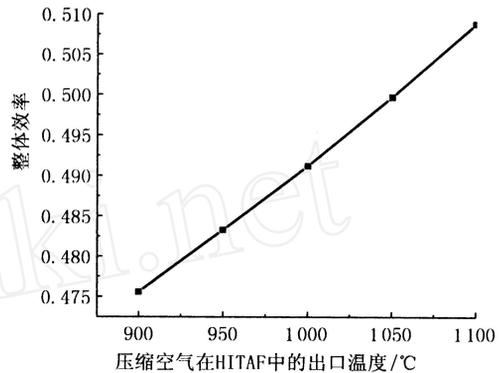


图 2 压缩空气在 HITAF 中出口温度对整体效率的影响曲线

Fig 2 Influential curve of holistic efficiency in terms of the compressed air temperature out of HITAF

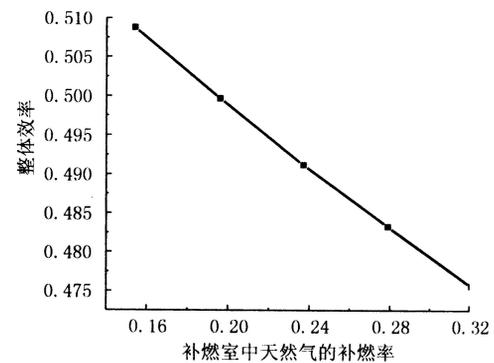


图 3 补燃室中天然气的补燃率对整体效率的影响曲线

Fig 3 Influential curve of holistic efficiency in terms of the afterburning ratio of gas

虽然补燃率的影响因子 C_{CR} 是正值，但是从图 3 中可以看出，整体效率是随着补燃率的增加而降低的，这是因为在压缩比和燃气轮机进口温度确定的情况下， γ_{st} 和 R 的取值是相互关联的， R 的取值越大， γ_{st} 的取值则会越小，而 $C > C_{CR}$ ，从而使得整体效率降低。如果取 γ_{st} / R 作为一个影响因子，其对整体效率的影响曲线如图 4 所示。同时燃气和蒸汽动力循环效率、余热锅炉效率、压缩机的压缩比对整体效率的影响曲线分别见图 5 ~ 图 7。

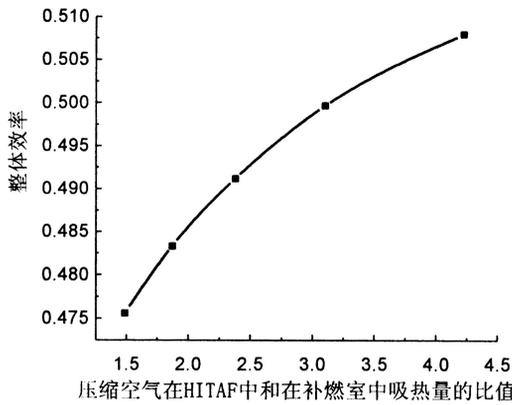


图4 压缩空气在 HITAF 中和在补燃室中吸热量的比值对整体效率的影响曲线

Fig 4 Influential curve of holistic efficiency in terms of the numerical value of / R

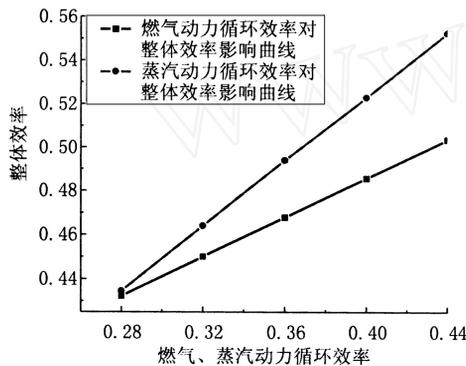


图5 燃气、蒸汽动力循环效率对整体效率的影响曲线

Fig 5 Influential curve of holistic efficiency in terms of the efficiency of gas and steam power system

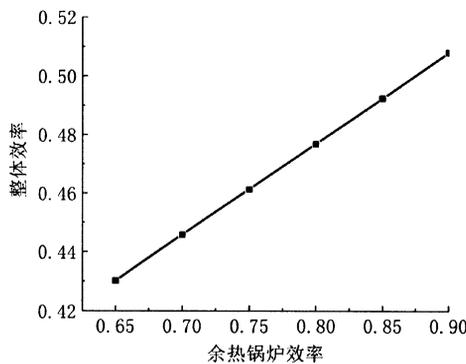


图6 余热锅炉效率对整体效率的影响曲线

Fig 6 Influential curve of holistic efficiency in terms of the efficiency of afterheat boiler

5 结论

(1) 压缩空气在 HITAF 中的出口温度对整体效率有着重要的影响，整体效率随着出口温度的增加而提高。所以为了提高 HIPPS 的整体效率，要尽可能的提高压缩空气在 HITAF 中的出口温度，降低天然气的补燃率。但是出口温度受到当前材料

科学所能达到的水平限制，目前只能稳定在 925 ，这也是制约 HIPPS 技术发展的关键所在。但已有资料表明，使用最新材料可以将空气出口温度提高到 950 ~ 1 000 [5] ，使整体效率更为提高。

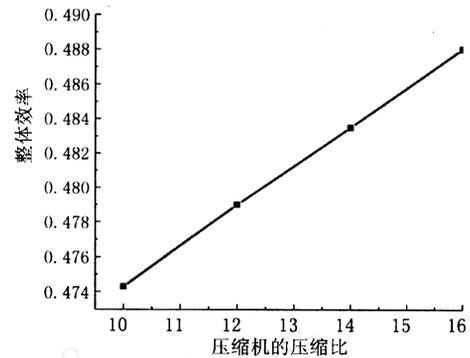


图7 压缩机的压缩比对整体效率的影响曲线

Fig 7 Influential curve of holistic efficiency in terms of the compression ratio

(2) 压缩机的压缩比越大，HIPPS 的整体效率越高，但从总体上看压缩比对整体效率的影响不是很大，所以使得空气的压缩程度达到最佳压缩比即可，以保障燃气循环有最大的输出净功。

(3) 各个参数对总效率影响程度的大小依次为： $C_{st} > C_{gt} > C_{yr} > C > C > C_R$ ，蒸汽循环效率对总效率影响程度最大，所以提高整体效率最为有效的方式是提高蒸汽动力循环的效率。因此在 HIPPS 系统中，应尽可能的采用高效率的蒸汽动力循环。

(4) 高性能动力系统整体效率超过了 47 % ，随着该系统中核心部位 HITAF 的完善和材料科学的发展，整体热效率还将进一步提高。

参考文献；

[1] Ruth L A. The U. S. department of energy combustion 2000 program: clean, efficient, electricity from coal [J]. Energy Convers Mgmt, 1997, 38 (10- 13): 1 249 - 1 257.

[2] 蔡本虎, 钱秉琦. 一种高性能的燃煤联合循环系统 [J]. 燃气轮机技术, 1994, 7 (1): 79 - 80.

[3] 肖立川, 陈宏, 薛国新. 美国燃煤电厂的技术进展 [J]. 江苏工业学院学报, 2005, 17 (3): 60 - 63.

[4] 焦树建. 燃气 - 蒸汽联合循环 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.

[5] Wu S F, Mckinseyz R. Performance prediction of a repowering application derived from a high - performance power system (HIPPS) [J]. Energy Convers Mgmt, 1997, 38 (10): 1 275 - 1 282.