

文章编号: 1000-6761(2009)09-0885-06

中图分类号: TQ172.6+22.22

文献标识码: A

学科分类号: 610.30

水泥窑余热发电技术的分析及优化

张邓杰¹, 王江峰¹, 王家全², 戴义平¹, 彭岩², 王继生²

(1. 西安交通大学 能源与动力工程学院, 西安 710049;

2. 中信重工机械股份有限公司, 洛阳 471003)

摘要: 以新型干法水泥生产过程中产生的废气为热源, 建立了 3 种常规余热发电系统模型, 分析了采用单压、双压、闪蒸系统回收水泥生产余热的性能。采用遗传算法对各种余热发电系统进行优化, 得出了循环系统对外输出的最大功率及最优参数。研究了热力参数对系统性能影响的规律。对各种余热发电系统进行了焓分析, 指出了提高焓效率的方向。结论: 在给定的余热条件下, 双压系统对外输出功率最大, 具有最大发电量; 采取措施减少余热锅炉中的不可逆损失, 可以大大提高余热发电系统的性能。

关键词: 水泥窑; 余热发电; 单压循环; 双压循环; 闪蒸循环; 遗传算法; 焓分析

Analysis and Optimization on Waste Heat Recovery Power Generation Technology in Cement Kilns

ZHANG Deng-jie¹, WANG Jiang-feng¹, WANG Jia-quan²,
DAI Yi-ping¹, PENG Yan², WANG Ji-sheng²

(1. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. CITIC Heavy Industries Co., Ltd., Luoyang 471003, China)

Abstract: Taking the waste gas from the new dry-process cement production as the heat source, three models of the conventional waste heat recovery power generation system were established. The performance of the single-pressure, dual-pressure and flash system for waste heat recovery from cement production was analyzed and investigated. Genetic algorithm was used to optimize the various heat recovery power generation systems to get the maximum power output and the optimum parameters of the cycle system. Influence of the thermal parameters on the performance of the systems was studied. Exergy analysis was also made for each waste heat recovery power generation system, and ways to improve exergy efficiency were pointed out. Results show that the dual-pressure system has the maximum power output and maximum power generation in the given waste heat condition. In addition, the performance of the waste heat recovery power generation system can be greatly improved by reducing the irreversible loss in the waste heat boiler.

Key words: cement kiln; waste heat power generation; single-pressure cycle; dual-pressure cycle; flash cycle; genetic algorithm; exergy analysis

收稿日期: 2009-03-05 修订日期: 2009-04-16

基金项目: 国家 863 资助项目(2007AA05Z251)

作者简介: 张邓杰(1986-), 男, 陕西汉中, 硕士研究生, 主要从事中低温余热利用方面的研究。电话(Tel.): 13679201149;

E-mail: d.j.zhang@stu.xjtu.edu.cn.

在水泥工业生产过程中会产生大量的废热,若将这部分余热资源加以回收利用,则可以大大节省能源,提高能源利用率.文献[1]主要以水平旋转水泥窑系统的能量分析为基础,阐述了干法水泥窑主要的热源损失有水泥窑废气(19.15%)、冷却机出来的热空气(5.61%)、窑表面的对流及热辐射(10.47%),并分析了回收这些废热的可行方法.文献[2-4]阐述了水泥窑的能量平衡关系、能量利用效率以及提高余热利用效率的措施.文献[5-7]阐述了在常规的单压、双压、闪蒸余热回收发电系统中,系统性能和参数的选取、优化及其影响因素.

上述文献对水泥窑中低温余热利用进行了相关研究,指出了废热来源,提出了利用能量平衡关系进行研究的方法,并介绍了实际应用于水泥窑余热回收利用的有机工质循环和常规循环.对于卡林纳循环,它的应用只限于示范运行阶段,尚未进入商业化阶段,因此相对于单压、双压、闪蒸 3 种常规循环还存在一定的问题,所以对于水泥窑中的低温余热,常采用常规循环进行回收,在技术上更为成熟.但是,大部分文献对于单压、双压、闪蒸 3 种常规循环进行的研究仅停留在单一系统,而未曾对 3 种余热发电方案在水泥窑中低温余热利用中的优劣进行分析比较.另外,大部分文献也只进行了热力学第一定律下的计算,得到了功率、效率等经济性指标,却未曾进行系统的焓分析.由热力学第二定律可知,没有进行焓分析的系统分析方法是不完整的,因此尚需对 3 种系统及其焓效率进行详细的对比分析与研究.

笔者以 5 000 t/d 级水泥窑为研究对象,通过分析单压、双压、闪蒸循环系统的热力平衡关系建立了系统的热力学模型,采用遗传算法分别优化各模型的蒸汽压力、流量等热力参数,得出了优化结果;研究系统参数与系统性能之间的基本规律,得到了参数对系统性能的具体影响;运用焓单元分析法对各系统进行详细的焓损失计算,并对各种模型进行了比较.

1 余热发电系统模型

以目前国内比较先进的窑外分解窑水泥熟料生产技术为例,此种窑的废气有 2 股,分别来自窑头冷却机和窑尾预热器,一般温度在 300~400 °C,且随生产工况的不同而有所波动,其具体的余热条件示于表 1.

在上述余热条件中,窑头冷却机的中温端废气可全部用于发电,低温端废气因废气温度太低且波动范围相对太大、同时考虑水泥熟料冷却调整风量

表 1 水泥窑余热条件

Tab. 1 Waste heat conditions in cement kilns

	窑头冷却机		窑尾预热器
	中温端	低温端	
废气量/(m ³ ·h ⁻¹)	171 000	110 250	317 000
废气温度/°C	340~360~380	100~120~180	320~340~380

的需要,可暂不再考虑回收利用.窑尾预热器废气经余热锅炉后温度降至 210~220 °C 后,可用于水泥原料烘干.

对窑头冷却机的中温端余热和窑尾预热器排出的余热进行了计算和优化.以空气为标准近似算出余热废气,密度取空气的密度(1.293 kg/m³).在水汽流程中,水和水蒸气的热力性质采用 IF-97 标准,该标准具有计算速度快、结果准确等优点,工况点的计算误差均在 0.5% 以内,能满足工程实际需要.

在上述给定的余热条件下,笔者分别采用 3 种典型的常规系统进行回收,即单压、双压和闪蒸系统.各系统的简图分别示于图 1、图 2 和图 3.

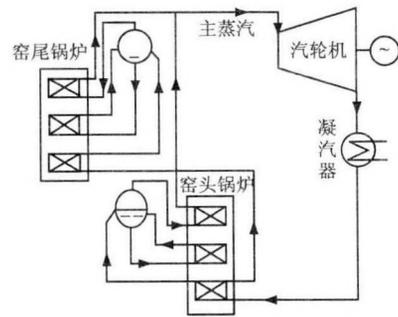


图 1 单压系统简图

Fig. 1 Schematic of single-pressure system

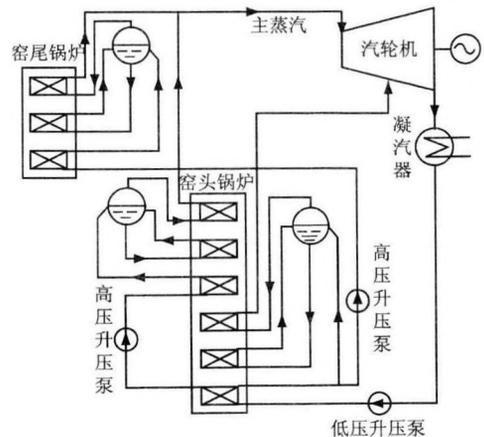


图 2 双压系统简图

Fig. 2 Schematic of dual-pressure system

在 3 种系统中,单压发电系统具有结构简单、主机设备成熟可靠、电站运行维护简单、适应水泥窑的强波动、投资低、发电成本低及操作运行人员少等优点.在该热力系统中,窑头余热锅炉和窑尾余热锅炉

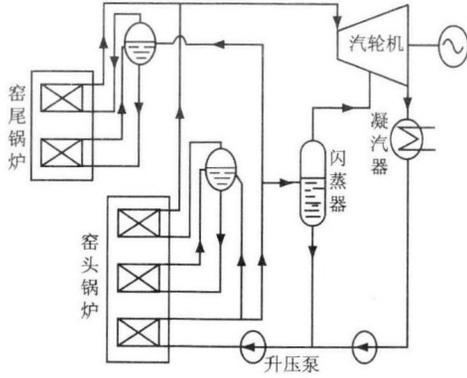


图 3 闪蒸系统简图

Fig. 3 Schematic of flash system

生产相同参数的主蒸汽,经混合后进入汽轮机做功。

双压系统在余热锅炉中有 2 组不同工作压力的水循环,产生 2 股不同压力的新蒸汽,采用补气式汽轮机引入高压和低压部分做功。在双压锅炉中,增设另一组温度、压力较低的水循环,因其蒸发温度低,所以能有效降低烟气的排放温度,增大汽轮机输出功率。

闪蒸是水的相变过程,即在一定温度压力下的不饱和水,当将压力降低到某温度的饱和压力时,就会进入水饱和区而开始汽化,随着压力的下降,汽化程度不断提高。闪蒸余热发电技术,即在单压余热锅炉的条件下增设闪蒸设备,从省煤器集箱中抽取一定数量的未饱和水,通过闪蒸扩容使之变成一部分低压饱和二次蒸汽以供汽轮机做功,它可使流过省煤器的流量大幅度增加,使余热锅炉的排气温度降低,汽轮机的输出功率增大。

系统中的主要计算公式为:

蒸汽流量

$$G = \frac{G_g \cdot (h_{g_1} - h_{g_2})}{h_{s_1} - h_{s_2}} \quad (1)$$

式中: G 为蒸汽流量, kg/s ; G_g 为锅炉废气流量, kg/s ; h_{g_1} 为过热器出口处废气焓, kJ/kg ; h_{g_2} 为节点处废气焓, kJ/kg ; h_{s_1} 为主蒸汽焓, kJ/kg ; h_{s_2} 为进入汽包前水焓, kJ/kg 。

汽轮机输出功率

$$\omega = G_x \cdot (h_1 - h_2) \quad (2)$$

式中: G_x 为汽轮机进汽流量, kg/s ; h_1 为汽轮机进汽焓, kJ/kg ; h_2 为汽轮机实际排汽焓, kJ/kg 。

排汽干度

$$x = \frac{h_2 - h_b}{h_b - h_a} \quad (3)$$

式中: x 为排汽干度; h_a 为排汽压力下饱和水焓, kJ/kg ; h_b 为排汽压力下饱和蒸汽焓, kJ/kg 。

闪蒸流量

$$G_{fb} = G_f \cdot \frac{h_f - h_{fa}}{h_{fb} - h_{fa}} \quad (4)$$

式中: G_{fb} 为闪蒸蒸汽流量, kg/s ; G_f 为进入闪蒸器水流量, kg/s ; h_f 为进入闪蒸器水焓, kJ/kg ; h_{fa} 为闪蒸压力下饱和水焓, kJ/kg ; h_{fb} 为闪蒸压力下饱和蒸汽焓, kJ/kg 。

2 余热发电系统的参数优化

在余热回收利用中,期望能够将余热所带的热量最大程度地转化为有用功,从而达到节约能源的目的。所以在中低温余热利用中,动力循环就存在一个最优化问题,即调整动力循环的各个参数,使动力循环的输出功率达到最大。笔者采用遗传算法对余热发电循环的参数进行了优化,得出在给定余热条件下循环系统所能输出的最大功率与最优参数取值。

遗传算法的优化是以适应度函数的极大值作为优化的目标,而且子代的进化都是以适应度函数作为选择的基础,因此适应度函数的设计直接影响遗传算法的性能。在本文的参数优化过程中,采用如下的适应度函数值:

$$\text{fitness} = \begin{cases} (\omega - \text{const})^2, & \omega > \text{const} \\ 0, & \omega \leq \text{const} \end{cases} \quad (5)$$

式中: fitness 为适应度函数值; ω 为功率; const 为一常数,可以选为在优化的参数范围内汽轮机发出的功率最小值或低于最小值的某一常数。

实践证明,这种适应度函数值的选取方法与直接以输出功率作为适应度函数值相比,其结果收敛得更快,而且对上一代最优值的保存效果也更好。

笔者采用 SGA 算法,编码方式采用二进制编码,选择算子采用比例选择方法,交叉算子采用单点交叉,而变异算子则采用随机变异。

在用遗传算法进行优化以前,必须确定几个关键的参数,这些参数选取的适当与否,将直接影响最后的优化结果。在本文的参数优化过程中,根据多次尝试,将遗传算法中的关键控制参数选取如下:种群规模为 100,交叉概率为 0.8,变异概率为 0.01,终止条件为 300 代。

因余热利用循环中的参数较多,不可能对每一个参数都进行优化,因此忽略次要参数,选取对整个循环系统输出功率影响较大的几个参数,以系统输出功率最大为目标对系统进行优化。为了使结果便于比较,将各系统除了优化变量以外的其他参数均选为相同。对于单压系统,优化参数选为主蒸汽压力;对于双压系统,优化参数选为主蒸汽压力及二次蒸汽压力;而对于闪蒸系统,优化参数则选为主蒸汽

压力、闪蒸压力与闪蒸汽水流量。

通过编制的遗传算法程序,对 3 个系统分别进行优化,并将最终的优化结果列于表 2。

表 2 3 种系统的优化结果比较

Tab. 2 Comparison of the optimized results of the three systems

	单压系统	双压系统	闪蒸系统
主蒸汽压力/MPa	2.13	2.56	1.90
二次蒸汽压力/MPa		0.57	
闪蒸压力/MPa			0.33
闪蒸流量/(kg·s ⁻¹)			2.72
输出功率/kW	8 485.32	9 231.53	9 016.74
余热利用效率/%	7.70	8.38	8.18

从表 2 可以看出:在给定的相同余热条件下,双压系统的功率最大,其次是闪蒸系统,而单压系统的功率最小。从余热利用的角度看:余热发电系统的电功率越大,则说明余热发电系统将废气中的余热更多地转化成了有用功。通过对结果进行详细比较后,得出:双压系统功率比单压系统大 746.21 kW,而双压系统功率则比闪蒸系统大 214.79 kW。因此,在给定的余热条件下,双压系统具有最大的发电量。另外,从系统余热利用效率的角度看:双压系统的余热利用效率高于闪蒸和单压系统,分别比闪蒸和单压系统的余热利用效率高 0.2% 和 0.68%,这与双压系统具有最大发电量的结论是一致的。对于确定的水泥窑可利用余热,余热利用效率越高,则发电功率也越大。

3 余热发电系统参数对功率的影响规律

对于给定的余热条件,余热发电系统的功率越大,说明余热被更多地转化成了有用功,因而余热利用效率也越高。为进一步详细了解在具体的余热发电系统中影响功率输出的主要因素及其原因,笔者对单压、双压、闪蒸 3 种系统的主要参数进行了研究,得出了系统主要参数对输出功率的影响规律。

图 4 为单压系统主蒸汽压力对汽轮机输出功率的影响规律。对于单压系统,当其他参数一定时,汽轮机的输出功率随主蒸汽压力的升高而增大。但是,主蒸汽压力不可能无限增大,这是因为主蒸汽压力过高,会使窑尾锅炉气水换热温差减小,为了交换相同的热量,就需要增大换热面积,但这样会增加锅炉成本;另外,排汽干度随着主蒸汽压力的升高而下降,会带来湿气损失及汽轮机的水蚀问题。因此,主

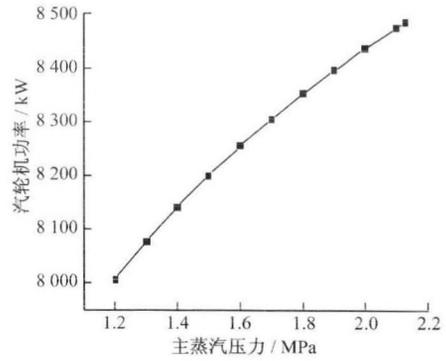


图 4 单压系统中汽轮机功率随主蒸汽压力变化的曲线
Fig. 4 Turbine power vs. main steam pressure in single-pressure system

蒸汽压力的升高也会受到限制,最终导致系统输出功率的增大受到限制。

在双压系统中,影响汽轮机输出功率的主要参数有主蒸汽压力及二次蒸汽压力。图 5 给出了双压系统主蒸汽压力对透平功率的影响规律。从图 5 可知:主蒸汽压力越高,汽轮机输出功率越大。但是,双压系统主蒸汽压力也不可能无限升高,因为主蒸汽压力的升高要受到窑尾锅炉工质换热温差、汽轮机排汽干度以及窑头锅炉排烟温度的限制。

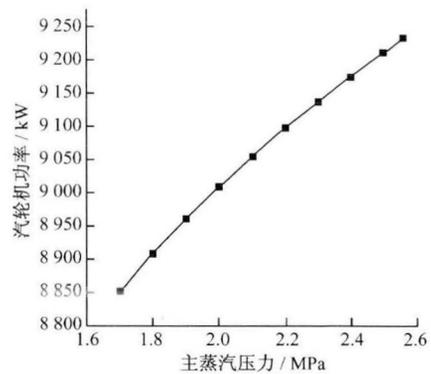


图 5 双压系统中汽轮机功率随主蒸汽压力变化曲线
Fig. 5 Turbine power vs. main steam pressure in dual-pressure system

图 6 为双压系统二次蒸汽压力对汽轮机功率的影响规律。从图 6 可知:双压系统的汽轮机功率随二次蒸汽压力的升高而增大。但是,随着二次蒸汽压力的升高,二次蒸汽排汽干度会下降,因此二次蒸汽压力的升高会受到限制,进而限制了系统功率的增大。

在闪蒸系统中,对汽轮机输出功率影响较大的系统参数有主蒸汽压力、闪蒸压力和闪蒸流量,其影响规律示于图 7。从图 7 可知:闪蒸系统的汽轮机输出功率随主蒸汽压力的升高而增大,这与单压系统类似。同样,闪蒸系统主蒸汽压力的升高也会受到工质换热温差与排汽干度的限制,不能无限增大。

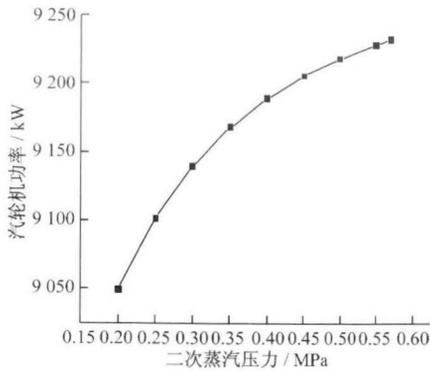


图6 双压系统中汽轮机功率随二次蒸汽压力变化的曲线
Fig. 6 Turbine power vs. the secondary steam pressure in dual-pressure system

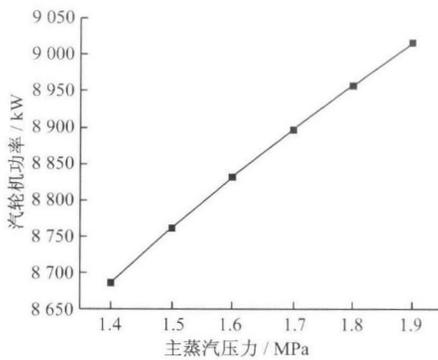


图7 闪蒸系统中汽轮机功率随主蒸汽压力变化的曲线
Fig. 7 Turbine power vs. main steam pressure in flash system

图8为闪蒸系统汽轮机功率随闪蒸蒸汽流量的变化曲线图。从图8可看出,随着闪蒸系统压力的提高,汽轮机的输出功率有所下降;另一方面,随着闪蒸压力的提高,闪蒸蒸汽的排汽干度不断减小,低到一定程度,会对汽轮机造成水蚀,而且湿气损失也会增加。所以,闪蒸压力不宜取得过高。闪蒸压力较低,有利于提高闪蒸蒸汽流量及排汽干度,但闪蒸压力过低,则导致排烟温度下降太多,这样会造成腐蚀,而且还会受到除氧器压力(0.12 MPa)的限制,所以闪蒸压力也不能取得太低。通常,闪蒸压力选在0.3~0.4 MPa。

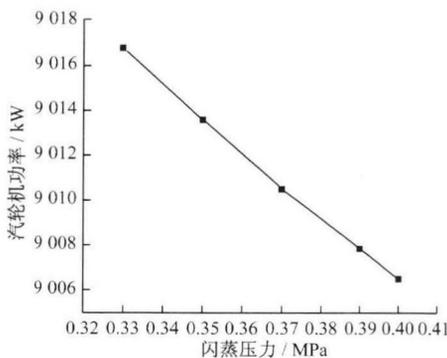


图8 闪蒸系统中汽轮机功率随闪蒸压力的变化曲线
Fig. 8 Turbine power vs. the flash steam pressure in flash system

图9为闪蒸系统汽轮机输出功率随闪蒸蒸汽流量的变化曲线图。从图9可知:闪蒸系统汽轮机输出功率随闪蒸蒸汽流量的增加而增大。但是,闪蒸流量不可能无限增加,闪蒸流量越大,经过窑头锅炉省煤器的总汽水流量越大,这样会导致排烟温度降低,带来严重的腐蚀问题。所以,在排烟温度允许的范围,适当增大闪蒸蒸汽流量,可以增大汽轮机功率。

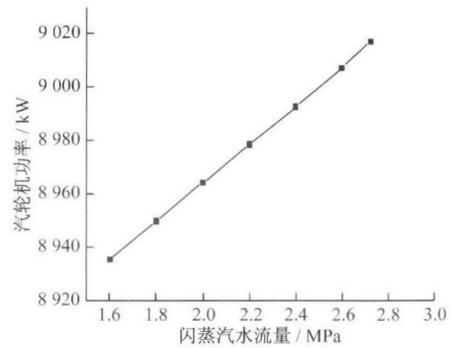


图9 闪蒸系统中汽轮机功率随闪蒸蒸汽流量的变化曲线
Fig. 9 Turbine power vs. flow rate of the flash steam in flash system

4 余热发电系统的焓分析

为了对余热发电系统作出完善的热力学评价,需要对系统进行焓分析。笔者采用焓单元分析法,即将1个独立的能量系统分成若干个单元,并对每一个单元逐一进行焓损失计算与分析,这样可以详细探寻组成能量系统所有环节的焓损失大小,以及它在总损失中所占的地位,从而确定最大损失的存在部位,找出提高系统热经济性的方向^[8]。

在本文研究的余热发电系统中,造成焓损失的部件主要有余热锅炉、汽轮机、凝汽器和闪蒸器;以及混合过程中产生的焓损失。在优化结果的基础上,运用焓单元分析法,分别对3种余热发电系统内部的各个部件列出了焓平衡方程,并得到了系统的焓损失情况(表3)。从表3可以看出:在各个系统内部,余热锅炉的焓损失所占比重最大,因此余热锅炉是系统的最大焓损失点,要提高系统整体性能,应该首先从余热锅炉着手,改进余热锅炉的结构,并尽量使余热锅炉工质换热过程中的不可逆减少。除余热锅炉外,汽轮机的焓损失也比较大,因此可以通过改进汽轮机结构,比如设计更合理的叶型,采用长叶片、扭叶片,减少漏气损失、湿气损失等,以降低汽轮机做功过程中的不可逆,从而提高系统焓效率。从3种系统余热锅炉焓损失的大小比较看:双压系统余热锅炉焓损失最小,其次是闪蒸系统,单压余热锅炉的焓损失为最大,这是因为双压锅炉更好地实现了

能量的梯级利用,因而减少了不可逆损失.在闪蒸系统内部,闪蒸器以及混合过程的焓损失比较小是因为闪蒸流量较小,带来的焓损失也比较小.从系统的焓效率看:双压系统的焓效率最高,闪蒸系统次之,单压系统焓效率最低,这说明双压系统能有效地利用余热,尽管其结构复杂,但在相同的余热条件下,焓效率却更高,从另一个角度也说明了双压系统做功比单压系统大,体现了双压系统的优越性.由此认为:双压系统余热利用最充分.

表 3 3 种系统的焓分析结果比较
 Tab. 3 Comparison results of exergy analysis of the three systems

	单压系统	双压系统	闪蒸系统
窑尾锅炉焓损失/(kJ·s ⁻¹)	850.26	771.38	921.88
窑头锅炉焓损失/(kJ·s ⁻¹)	1 357.44	1 033.52	961.26
余热锅炉总焓损失/(kJ·s ⁻¹)	2 207.70	1 804.90	1 883.14
蒸汽轮机焓损失/(kJ·s ⁻¹)	1 409.95	1 533.94	1 498.25
凝汽器焓损失/(kJ·s ⁻¹)	1 240.91	1 359.63	1 362.85
闪蒸器焓损失/(kJ·s ⁻¹)			46.04
混合过程焓损/(kJ·s ⁻¹)			98.03
系统焓效率/%	63.59	66.27	64.84

5 结 论

(1) 在给定的余热条件下,与单压系统和闪蒸系统相比,双压系统具有最大发电量.

(2) 主蒸汽压力、二次蒸汽压力、闪蒸压力以及

闪蒸汽水流量对各系统汽轮机输出功率均有较大影响,并得到了其对系统的具体影响规律.

(3) 在系统组成部件中,余热锅炉的焓损失最大.为了提高系统的整体性能,首先应该改进余热锅炉,并尽量减少余热锅炉换热过程中的不可逆损失.

参考文献:

[1] TAHSIN E, VEDAT A. Energy auditing and recovery for dry type cement rotary kiln systems - A case study[J]. *Energy Conversion and Management*, 2005, 46(4):551-562.

[2] LIU F, ROSS M, WANG S. Energy efficiency of China's cement industry[J]. *Energy*, 1995, 20(7): 669-681.

[3] KHURANA S, BANERJEE R, GAITONDE U. Energy balance and cogeneration for a cement plant [J]. *Appl. Therm. Eng.*, 2002, 22(5):485-494.

[4] PAHUJA A. Energy auditing and monitoring in the cement industry[J]. *Cement Industry*, 1996, 81(7): 670-694.

[5] 张福滨,赖铁刚.单压余热发电系统主蒸汽参数的选择[J]. *水泥*, 2006, 10(4):32-35.

[6] 岳伟挺,李素芬.联合循环余热锅炉蒸汽参数的优化分析[J]. *动力工程*, 2002, 22(6):2064-2066.

[7] 王国顺.单压余热锅炉闪蒸技术的研究[J]. *电站系统工程*, 2005, 21(5):19-21.

[8] 王加璇,张树芳.焓方法及其在火电厂中的应用[M].北京:水利电力出版社,1993.

(上接第 879 页)

[8] 胡书举,赵栋利,李建林,等.基于永磁同步发电机的直驱风电双脉宽调制变频器的研制[J]. *动力工程*, 2009, 29(2):195-200.

[9] 赵争鸣,张海涛,袁立强,等.基于 IGCT 的高压三电平变频器失效机理及保护策略[J]. *中国电工技术学报*, 2006, 21(5):1-7, 18.

[10] 刘文华,宋强,严干贵,等.基于三电平中点箝位逆变器的高压变频调速器[J]. *清华大学学报:自然科学版*, 2003, 43(3):357-360.

[11] 冬雷. DSP 原理及电机控制系统应用[M].北京:北京航空航天大学出版社, 2007.

[12] 刘文华,宋强,严干贵,等.基于零序电压注入的三电

平 NPC 逆变器中点电位平衡控制方法[J]. *中国电机工程学报*, 2004, 24(5):57-62.

[13] 何湘宁,陈阿莲.多电平变换器的理论和应用技术[M].北京:机械工业出版社, 2006.

[14] MCGRATH B P, HOLMES D G, LIPO T A. Optimized space vector switching sequences for multilevel inverters[J]. *IEEE Transaction of Power Electronics*, 2003, 18(6):1293-1301.

[15] 王群京,陈权,姜卫东,等.中点钳位型三电平逆变器通态损耗分析[J]. *电工技术学报*, 2007, 22(3): 82-87.