水泥行业纯低温余热发电技术及现状

张 富，张福滨 （天津水泥工业设计研究院有限公司，天津 300400）

0 前言

目前全国共有 20 座（不含台湾地区）低温余热电站投入运行，共有 40 多座低温余热电站正在设计或施工。在已投运的的余热电站中，全部采用常规余热发电热力系统。对于常规扩展余热发电系统以及非常规余热发电系统，目前在国内还没有投产的业绩。本文对目前在水泥窑纯低温余热发电领域已经应用的或可能应用的技术做一总结。

1 目前常规余热发电系统

1.1 常规余热发电系统分类

目前在水泥行业纯低温余热发电技术领域中，主要有以下 3 种热力系统：

（1）单压系统；

（2）热水闪蒸双压系统，简称闪蒸系统；

（3）双压锅炉双压系统，简称双压系统。

1.2 单压余热发电热力系统的概念

目前普遍采用的单压系统热力流程如图 1 所示。本热力系统中，窑头余热锅炉和窑尾余热锅炉生产相同或相近参数的主蒸汽，混合后进入汽轮机，主蒸汽在汽轮机内作功后经除氧，由给水泵为窑头余热锅炉供水，窑头余热锅炉生产的热水再为窑头余热锅炉蒸汽段和窑尾余热锅炉供水，两台余热锅炉生产出合格的主蒸汽，从而形成一个完整的热力循环。

这个热力系统的特点是汽轮机只设置一个进汽口，窑头余热锅炉和窑尾余热锅炉只生产参数相同或相近的主蒸汽。那么考虑水泥窑废气余热的调配及利用、余热锅炉的设计、电站热力系统的配置等因素的唯一的目的，就是提高主蒸汽品质及产量。主蒸汽品质及产量在外部条件确定的情况下，完全决定了余热发电系统的发电功率。

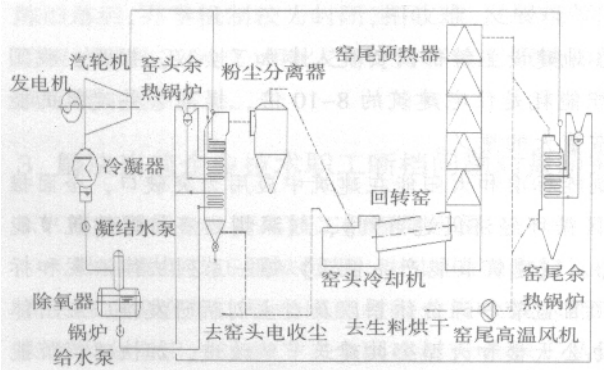

图 1 单压系统热力流程

1.3 闪蒸余热发电热力系统的概念

闪蒸余热发电系统就是在发电热力系统配置中应用了闪蒸机理，即：根据废气余热品质的不同而生产一定压力的主蒸汽和及热水，主蒸汽进入汽轮机高压进汽口，而热水经过闪蒸，生产出低压的饱和蒸汽，补入补汽式汽轮机的低压进汽口，主蒸汽及低压蒸汽在汽轮机内作功，推动汽轮机转动，共同生产电能。低压蒸汽发生器内的饱和水进入除氧器，与冷凝水一起经除氧后由给水泵供给锅炉。图 2、图 3 为两种含有一级闪蒸配置的发电系统。

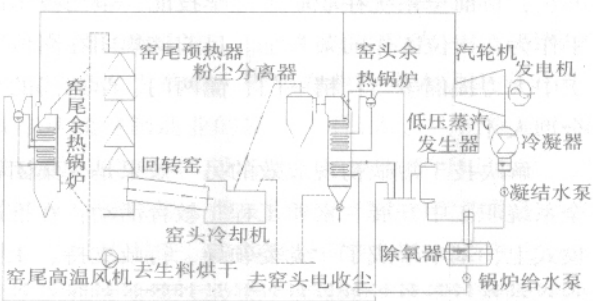

图 2 一级闪蒸发电系统

（窑头余热锅炉生产闪蒸热水）

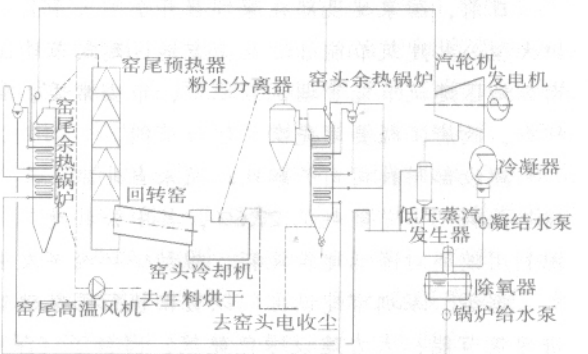

图 3 一级闪蒸发电系统

（窑头窑尾余热锅炉生产相同参数的热水）

上述两种含有闪蒸配置的发电系统，是根据废气余热的不同，尤其是余热锅炉允许的排烟温度

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

的不同而进行设计的，图 2 系统用于窑尾排烟温度较高的情况；图 3 系统是一种比较灵活的配置方式，窑头和窑尾锅炉汽水系统相对独立，可以适应窑尾废气不用于物料烘干或者物料烘干温度可以降得很低的情况。

1.4 双压余热发电热力系统的概念

双压技术是根据水泥窑废气余热的品位的不同，余热锅炉分别生产较高压力和较低压力的两路蒸汽。较高压力的蒸汽作为主蒸汽进入汽轮机主进汽口推动汽轮机转动作功发电。余热锅炉生产出较高压力的蒸汽后，烟气温度降低，余热品位下降，那么根据低温烟气的品位，再生产较低压力的低压进汽，进入汽轮机的低压进汽口，辅助主蒸汽一起推动汽轮机作功发电。

根据水泥窑余热条件，尤其是窑尾排烟温度的限制，水泥窑纯低温余热发电双压系统主要有以下两种基本构成方式，如图 4、图 5 所示。

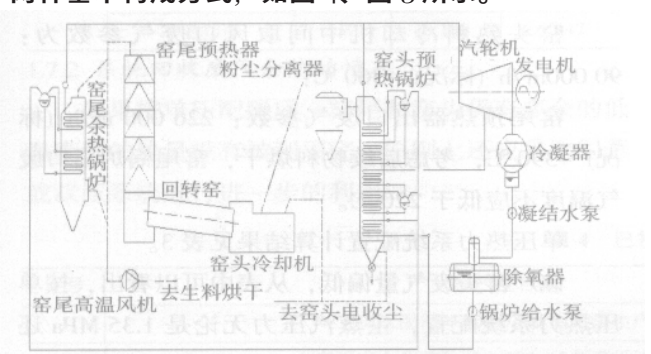

图 4 双压系统

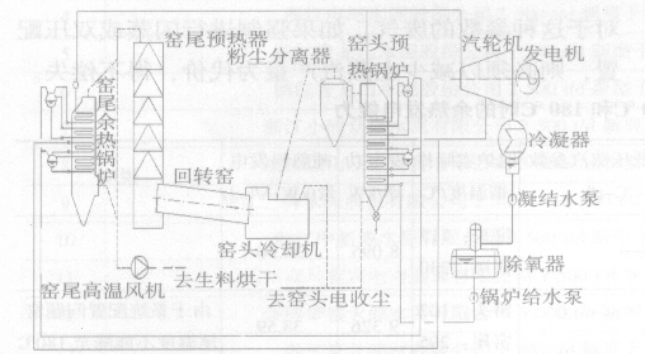

图 5 双压系统

以上图 4、图 5 两种系统是相对简化的双压热力系统，图 4 系统用在窑尾排烟温度高（即后续物料烘干温度高）的情况。图 5 是在图 4 系统基础上扩展的热力系统，图 5 系统中，窑尾余热锅炉的排烟温度可以降得很低。

1.5 不同热力系统的发电能力的比较分析

以某厂为例，该厂水泥窑熟料设计产量为 5 000 t/d，实际运行产量为 5 800 t/d，其余热条件如下：

窑尾进口废气量： 389 000 Nm³/h

窑尾进口废气温度： 325 ℃

窑尾出口废气温度： 200 ℃

窑头冷却机中部取风废气量： 206 250 Nm³/h

窑头进口废气温度： 360 ℃

根据上述废气余热条件，采用天津院的余热发电技术，3 种热力系统配置下，计算结果汇总如表 1 所示。

表 1 3 种热力系统配置下计算结果

热力系统配置	单压	闪蒸	双压
主蒸汽参数 (MPa-℃-t/h)	窑头：1.35-345-17.16	窑头：1.35-345-17.16	窑头：1.35-345-17.16
	窑尾：1.35-305-28.87	窑尾：1.35-305-28.87	窑尾：1.35-305-28.09
闪蒸系统低压蒸汽参数 (MPa-℃-t/h)	——	窑头：0.137-108.7-2.37	——
		窑尾：0.137-108.7-0.71	
双压系统低压蒸汽参数(MPa-℃-t/h)	——	——	窑头：0.15-140-4.92
锅炉实际排烟温度/℃	窑头：102 窑尾：205	窑头：80 窑尾：200	窑头：77 窑尾：200
发电功率/kW	9 326	9 643	9 705
吸收烟气的热量/($\times10^4$kJ/h)	13 980	14 868	14 950
效率/%(即发电量与吸收的烟气热量的比值)	24.02	23.35	23.37
吨熟料余热发电量/[kW·h/(t·cl)]	38.59	39.90	40.16
说明	按图 1 热力系统	按图 3 热力系统	按图 4 热力系统

注明：

(1) 以上计算考虑了锅炉本体 2%的散热。

(2) 以上计算发电能力按汽轮机和发电机的整体效率 80.5%考虑（按汽轮机和发电机设备厂家最新的数据计算），汽轮机排汽压力、排汽温度按 0.00573 MPa、35.5 ℃计算。

1.6 计算结果分析

从以上计算表格中可以看出：

(1) 排烟温度：

窑头余热锅炉：双压低于闪蒸，闪蒸低于单压系统；

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

窑尾余热锅炉：单压系统最高，且不能降得很低。

(2) 吸收热量：双压高于闪蒸，闪蒸高于单压系统。

(3) 发电量：双压高于闪蒸，闪蒸高于单压系统。

(4) 发电效率：单压高于双压，双压高于散蒸系统。

即：双压系统窑头余热锅炉排烟温度最低，因此它吸收了更多量的废气余热，这是双压系统可能具有较高发电能力的主要原因之一。虽然单压系统吸收的烟气热量少，但是它吸收了较高温度的废气余热，较高温度的废气作功能力强于较低温度的废气，因此单压系统的发电量与其吸收的烟气热量比值最大，即效率最高。因此可以推测出，对于给定的废气余热条件，要利用它首先生产尽可能多的主蒸汽，然后在利用生产主蒸汽不能完全被利用的低温废气生产热水或低压蒸汽，作为主蒸汽发电的补充，来提高发电能力。

根据上面的理论以及笔者多年从事设计的经验推测，只要单压系统能够将窑头的废气温度降低到85 ℃以下时（且窑尾物料烘干温度较高时），就没有必要采用闪蒸和双压系统

低温废气的作功能力弱，因此闪蒸和双压热力系统中，虽然余热锅炉的排烟温度可降得很低，可尽可能的多利用低温废气的余热，但是这两种热力系统整体效率确是略低单压系统。

以上计算结果仅仅是按某厂的余热条件进行分析的结果，其结果仅仅是反映出发电量不同的一种大概趋势。对于同样的余热条件下，各别厂的具体要求不同（比如窑尾生料磨型式不同、窑尾收尘器是电收尘或袋收尘、生料水分不同等因素导致烘干温度不同），会影响各热力系统的发电能力，上述某厂的废气余热，如果窑尾排烟温度分别为 230℃和 180 ℃时，具有的余热发电能力见表 2。

1.7 具体工程热力系统的选择

一般具体工程从技术角度考虑，选择热力系统主要从如下几方面考虑：

1.7.1 系统的余热情况

主要考虑水泥窑自身特点决定的烟气量和烟气温度，以及烟气用于物料烘干温度的高低。对于已经确定的余热状况，应首先进行单压系统的配置计算，如果单压系统能够满足最大限度的利用余热，就没有多余的余热去生产热水或低压蒸汽，就没有必要去考虑双压、闪蒸以及采暖等方案了。如河北某企业，窑尾配置四级预热器，它的废气参数如下：

窑头熟料冷却机中间取风口废气参数为：90 000m³/h (标况) - 360 ℃;

窑尾预热器出口废气参数：226 000 m³/h (标况) - 390 ℃，考虑后续物料烘干，窑尾锅炉出口废气温度不应低于 220 ℃。

单压热力系统配置计算结果见表 3。

该厂窑头废气量偏低，从表中可以看出，按单压热力系统配置，主蒸汽压力无论是 1.35 MPa 还是 1.5 MPa，均能把窑头废气温度降到 80 ℃，以及把窑尾废气温度降低到满足物料烘干必须的 220 ℃。对于这种参数的废气，如果强制进行闪蒸或双压配置，则必须以减少主蒸汽产量为代价，得不偿失。

表 2 某厂窑尾排烟温度在 230 ℃和 180 ℃时的余热发电能力

热力系统配置	主蒸汽参数 MPa-℃-t/h	闪蒸系统低压蒸汽参数 MPa-℃-t/h	双压系统低压蒸汽参数 MPa-℃-t/h	锅炉实际排烟温度/℃	发电功率/kW	吨熟料发电量(kW·h/t.cl)	说明
单压-230	窑头：1.35-345-17.16 窑尾：1.35-305-22.79	——	——	窑头：115 窑尾：230	8 095	33.50	
单压-180	窑头：1.35-345-17.16 窑尾：1.35-305-28.87			窑头：102 窑尾：205	9 326	38.59	由于系统配置问题窑尾温度不能降至 180℃
闪蒸-230	窑头：1.35-345-17.16 窑尾：1.35-305-22.79	窑头：0.137-108.7-3.20		窑头：85 窑尾：230	8 424	34.86	
闪蒸-180	窑头：1.35-345-17.16 窑尾：1.35-305-28.87	窑头：0.137-108.7-2.37 窑尾：0.137-108.7-3.67		窑头：80 窑尾：180	9 947	41.16	
双压-230	窑头：1.35-345-17.16 窑尾：1.35-305-21.24		窑头：0.15-140-5.38；(汽机低压进汽口参数下同)	窑头：83 窑尾：230	8 366	34.62	
双压-180	窑头：1.35-345-17.16 窑尾：1.35-305-28.87		窑头：0.15-140-4.20 窑尾：0.15-140-4.06	窑头：80 窑尾：180	10 225	42.31	

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 3 单压热力系统配置计算结果

	名称	单位	主蒸汽压力 1.35MPa	主蒸汽压力 1.6MPa
SP余热锅炉	进口废气量	Nm³/h	226 000	226 000
	进口废气温度	℃	390	390
	主蒸汽压力	MPa	1.35	1.6
	主蒸汽温度	℃	370	370
	主蒸汽量	kg/h	24 502	24 978
	给水温度	℃	180	190
	出口废气排烟温度	℃	220.2	220.4
AQC余热锅炉	进口废气量	Nm³/h	90 000	90 000
	进口废气温度	℃	360	360
	主蒸汽压力	MPa	1.35	1.6
	主蒸汽温度	℃	350	350
	主蒸汽量	kg/h	5 640	5 178
	给水温度	℃	40	40
	出口废气排烟温度	℃	79.8	80.0
汽轮机	进汽温度	℃	350	350
	进汽压力	MPa	1.25	1.5
	发电功率	kW	6 188	6 347

1.7.2 系统回收废气余热的情况

如果按单压配置后，窑尾和窑头仍有多余的低温废气的热量没有被利用完，原则上还应采取闪蒸或双压系统进行进一步的利用。

1.7.3 系统的构成、操控、维修性能及员工的配置情况

单压系统的热力系统构成简单，设备数量少，便于操作、运行、管理和维修，同时配置的员工的数量少。大部分水泥企业对发电了解都不多，因此配置单压系统，可减少电站管理和运行的难度。

1.7.4 系统适应水泥窑的波动能力

单压和闪蒸系统对水泥窑的波动适应能力较强，双压系统稍差。

1.7.5 余热电站能够供应厂区的全部或部分范围内的采暖

对于闪蒸系统，在北方地区，冬季可以用余热锅炉生产的热水进行厂区内全部或部分面积的采暖，夏季可以用余热锅炉生产的热水进行闪蒸，闪蒸出的低压蒸汽用于发电。

1.7.6 厂区发电厂房的布置位置

电站主厂房与水泥窑的距离会增加双压系统中低压蒸汽的输送损失。也会增加用于输送大量闪蒸用热的给水泵的功率。

1.8 已投入运行的低温余热电站

到 2006 年 11 月为止，我国（大陆）已投入运行的低温余热系统共 20 家，详见表 4。

表 4 已投入运行的低温余热电站

序号	生产线名称	装机功率	投入运行时间
1	宁国水泥厂 4 000 t/d 新型干法生产线	6.48 MW	1997
2	上海万安企业总公司 1 200 t/d 新型干法生产线	2.5 MW	2003
3	广西柳州水泥厂 3 200 t/d 新型干法生产线	6 MW	2004
4	浙江申河水泥股份公司 2 500 t/d 新型干法生产线	3 MW	2005
5	浙江青龙山水泥股份公司 1 200 t/d 新型干法生产线	2 MW	2005
6	浙江青龙山水泥股份公司 2 500 t/d 新型干法生产线	3 MW	2005
7	浙江小浦众盛水泥有限公司 2 500 t/d 新型干法生产线	3 MW	2005
8	浙江煤山众盛建材有限公司 5 000 t/d 新型干法生产线	6 MW	2005
9	浙江三狮水泥股份有限公司 2 500 t/d+5 000 t/d 新型干法生产线	6 MW+3 MW	2005
10	浙江中新源水泥有限公司 2 500 t/d 新型干法生产线	3 MW	2005
11	四川双马宜宾电力能源有限公司 2 500 t/d 新型干法生产线	3 MW	2006
12	海南华盛天涯水泥有限公司 5 000 t/d 新型干法生产线	6 MW	2006
13	浙江豪龙建材有限公司 1 200 t/d 新型干法生产线	1.5 MW	2005
14	江西泰和玉华水泥有限公司 1 200 t/d 新型干法生产线	2 MW	2006
15	山东东华水泥公司 5 000 t/d 新型干法生产线	7 MW	2006
16	华润水泥（平南）有限公司 5 000 t/d 新型干法生产线	7.5 MW	2006
17	江西水泥厂 1 200 t/d 新型干法生产线	3 MW	1998
18	辽源金刚水泥有限公司 5 000 t/d 新型干法生产线	7 MW	2006
19	宁国水泥厂三线 5 000 t/d 新型干法生产线	9 MW	2006
20	常山虎跃水泥水泥公司 1 200 t/d 新型干法生产线	2 MW	2006

注：（1）统计日期截止到 2006 年 11 月；（2）不含台湾地区。

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

1.9 问题与小结

(1) 主蒸汽参数的选择

主蒸汽温度受烟气温度限制一般要低于烟气温度 10~20 ℃。但是主蒸汽压力可有很大的变化，比如天津院在某钢铁行业纯低温发电系统上，应用了 0.6 MPa 饱和温度的主蒸汽。

(2) 余热锅炉效率问题

余热锅炉的效率有两种表述方式：①以余热锅炉作为研究对象，余热锅炉中汽水吸收的热量与烟气进出口热量差值的比。这种表述方式能更有效和更直接反应余热锅炉本身的效率以及整个发电系统的效率；它与余热锅炉的漏风、散热有关；②以水泥窑废气系统作为研究对象，余热锅炉中汽水吸收的热量与烟气进口热量差值的比。这种表述方式能更有效和更直接反应余热发电系统相对于整个水泥窑烧成系统的效率。

(3) 发电效率问题

很多人认为闪蒸、双压系统的发电效率高，单压发电效率低。其实这种观点是错误的。在低温余热发电系统中，普遍的规律是利用较高废气的热量生产较高参数的主蒸汽，利用较低温度的废气生产热水或低压蒸汽，这样才能提高发电量。原因是较高温度的蒸汽作功能力强、发电能力强、效率高，较低温度的废气作功能力弱、发电能力弱、效率低。闪蒸系统和双压系统之所以比单压发电能力高，不是因为它的效率高，而是因为它吸收了更多的热量。因此单压发电系统虽然吸收低温废气余热的能力较弱，但它是发电效率最高的系统。

(4) 五级预热器新型干法水泥熟料生产线，单压余热发电系统具有约 32~38 kW·h/cl 的余热发电能力，闪蒸系统具有约 34~40 kW·h/cl 的余热发电能力，双压系统具有约 34~42 kW·h/cl 的余热发电能力。

(5) 总体趋势是双压和闪蒸发电能力较高，单压发电能力稍低，但不能单纯否定单压系统，要根据具体的废气参数核算确定。

(6) 双压和闪蒸系统，因为利用了更多低温段的废气余热，即可以把废气温度降得更低，因此具有较高的发电能力。但是当水泥生产不允许废气温度降得很低时，或者单压热力系统配置及计算时，已经能把废气温度降得很低时，就不能勉强采用闪蒸和双压系统。

(7) 由于双压系统设置了两种压力的蒸汽，使得系统更为复杂，双压系统虽然具有较高的发电能力，但是余热锅炉，尤其是余热锅炉低压蒸汽段的运行工况以及汽轮机的运行工况不稳定，调节频繁，要慎重考虑双压方案。

2 常规扩展余热发电系统

常规扩展余热发电系统即在常规的发电系统中考虑一些扩展因素，从而提高取热质量。目前主要有如下几种方法：

2.1 窑头冷却机设两个或多个中部取风口回收不同品位的余热[1]

改变传统的抽取窑头熟料冷却机废气方式，即在靠冷却机进料端 (热端) 设置一抽取 400~600 ℃废气的抽废气口，同时在冷却机中部设置抽取 250~400 ℃废气的抽废气口。根据废气温度利用 AQC 炉生产 1.6~3.82 MPa 次中压或中压饱和温度至 450 ℃的过热蒸汽，也可同时生产 0.1~0.5 MPa 饱和温度至 180 ℃的低压低温蒸汽、85~200 ℃热水。

2.2 回收 C1 和 C2 之间连接风道的热量[1]

在利用窑尾预热器系统最终 (C1 级旋风筒出口) 排出的 250~400℃废气的同时，利用 C2 级旋风筒内筒至 C1 级旋风筒入口的 450~600 ℃废气的 20~25 ℃温度降所含有的废气热量，通过 SP 炉生产 1.6~3.82 MPa 次中压或中压饱和温度至 450 ℃的过热蒸汽。

2.3 窑尾废气分流[2]

提高余热发电量的关键是提高余热的 “质”，其途径是将原废气中供发电这部分热能转移至比之较高温度的烟气中，即将较低温度的热能转化为较高温度的热能，提高其做功能力即热气体分流是本文所介绍的预分解窑余热中温发电方法的技术核心。

热能转移的具体方法是将预热器系统进气端或中部的气体予以分流。一部分气体入预热器系统以预热物料，由于气固比的降低，提高了该部分气体在预热系统内的热效率，降低了预热器出口废气温度，加之气体量减少，因所含的热能大幅度降低，该部分热能仅作为原料烘干的热源之一。分流出的另一部分气体，其温度高于预热器出口气体，例如从入窑级预热器出口分流时，其气体温度约 870 ℃，进入余热锅炉用于发电。锅炉出口烟气的余热也作为原料烘干的热源组成部分。显然分流出气体中的

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

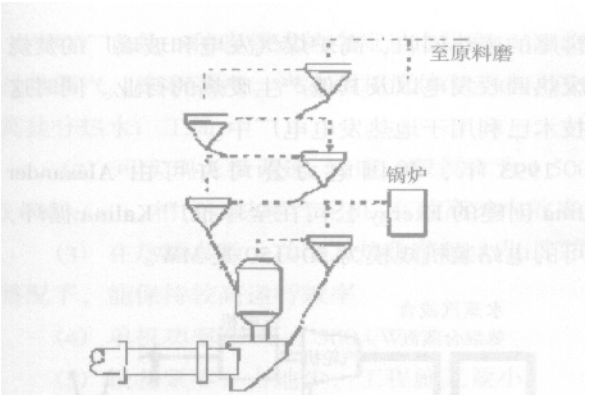

图 6　烟气分流流程图

热能是来自未分流时的预热器出口的废气，即通过气体分流达到热能转移的目的，其流程见图 6。

2.4　回收水泥窑筒体或三次风管外表面的辐射热

这种方法与 2.2 中所述相同，用窑胴体或三次风管的外表辐射热对发电的循环工质进行过热，从而提高发电用的蒸汽品质，提高发电能力。

2.5　常规扩展发电系统应用分析

对于 2.1 所述，这种方法符合能量分级利用的原理，能够减小烟气与发电工质的换热温差，减小火用损从而提高发电能力，但此系统有如下问题需要仔细斟酌：

(1) 根据以往经验，当冷却机取风口温度超过 450 ℃时，余热发电冷却机中部取风将可能对三次风管的风温产生影响。

(2) 窑头冷却机的风温变化速度快，变化幅度大，因此过于复杂的取风方案将带来系统调节上的困难。

对于窑头冷却机余热利用的最好方法是将冷却机和余热锅炉进行机炉一体化。在冷却机内部布置受热面，即充分利用对流传热，也可利用熟料的辐射热。

对于 2.2，由于烟气温度提前被发电工质吸收一部分，因此进入 C1 筒的温度降低，直接导致生料预热温度降低，会增加能耗。对于 2.3，也会增加水泥熟料的热耗。对于 2.4，水泥窑胴体散热量大约为 150~180 kJ/kg，如果能把这部分热量利用好，将也是对余热回收的重大贡献。但在利用过程中，不应改变原有的保温结构，也不应以增加熟料热耗为代价。

目前还没有应用以上常规扩展余热发电系统建设的电站投入运行。由于我国纯低温余热发电起步较晚，因此投入研究的人力物力很少，对于常规扩展余热发电系统，仅仅是停留在理论阶段、实践起来有诸多问题，尤其是水泥窑热耗是否增加成为人们关注的要点。由于一次能源将越来越紧张，过去通过技术经济比较，只要能使企业获得经济利益的事就可以去做，但是现在考虑问题，必须把是否节约能源放在首位。

3　非常规余热发电系统

3.1　导热油及有机工质循环

3.1.1 以色列 ORMAT 公司有机工质透平机组[3]

以色列 ORMAT 公司生产一种利用有机烷类为工质的透平机组，以异戊烷最常用。异戊烷一般为无色液体，能与醚、烃类和油类任意混溶，难溶于醇，不溶于水，沸点为 36 ℃。用异戊烷作工质的透平机组有如下优点：

(1) 有机工质沸点低，易产生蒸汽，因此可以回收低温余热。

(2) 有机工质蒸汽密度比水蒸汽密度大得多，因此透平机转速可降低，效率高，体积小。

(3) 冷凝压力接近或稍大于大气压，工质泄漏小。

(4) 有机工质耐低温，不受冰冻的影响。

(5) 由于转速低，因此噪声小。

(6) 系统的工作压力低，约 1.5 MPa。

(7) 无湿蒸汽产生，始终保持干燥，不受腐蚀，透平寿命长。

3.1.2 导热油热载体及余热锅炉

近 20 多年来，以导热油为热载体的间接供热技术，在石油、化工、纺织、制药、橡胶等行业得到了发展和日益广泛的应用。

导热油是一种良好的有机热载体传热介质，具有较高的热容量和较低粘度，在常压下导热油的初馏点比水的蒸发温度要高出数倍。高温导热油在 300 ℃的条件下仍不气化而保持常压，此时饱和压力的水蒸汽已高达 8.5 MPa。因此在中、高温传热的条件下，用导热油代替传统的水蒸汽热载体，就能以低压管道系统代替高压管道系统。可降低管道的投资，使运行的安全性和可靠性得到保障。此外导热油还具有传热均匀，热稳定性好以及优良的导热特性。例如在 100 ℃时，饱和水蒸汽的导热系数为 0.0237 W/(m℃)，而 Mobiltherm 605# 导热油在 100 ℃时的导热系数为 0.127 W/(m℃)，是水蒸汽的 5.35 倍，传输距离远、热损失小，能在多种不同温度下获得热量。导热油对普通的碳钢设备和管道基

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

本上无腐蚀作用，不需要采用类似蒸汽系统的给水脱盐、除氧等复杂的处理过程，因此具有系统简单输送方便等优点。因此用导热油作工质的机组传热效率高。因此纯低温余热发电系统可选用以导热油作工质的余热锅炉。

3.1.3 有机工质透平机组和导热油热载体余热锅炉组成的余热回收系统

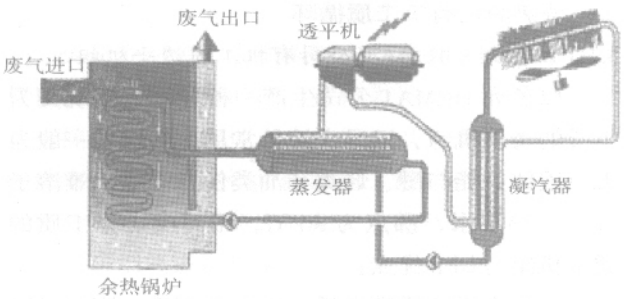

图 7 有机工质及导热油余热发电系统简图

以有机烷类透平机组和导热油组成的余热发电系统的系统构成如图 7 所示。

经调查，目前国内汽轮机厂都没有开发此类设备的计划，因此目前透平机组只能外购，价格高。2002 年和 2005 年，天津水泥院、中国联合水泥有限责任公司先后与以色列 OMATA 公司进行了技术交流，但最终因设备造价问题而没有得到推广。

德国，在 1999 年在 3000t/d 新型干法窑的篦式冷却机上，采用低沸点工质实现余热发电，这是工业试验生产线，吨熟料余热发电量达 10.5 kW·h。如以此推算，同时将窑尾预热器的废气余热也采取相同措施回收，预计吨熟料余热发电量可达 45~50 kW·h。但由于德国水泥市场不景气，总是负增长，余热电站投资又较大，试验没有继续下去，但 6 年来该冷却机的余热发电装置一直在正常运行。

3.2 Kalina 循环

卡力纳循环是由生活在美国的前苏联科学家 Alexander Kalina 发明的。在这种循环中，氨、水混合液取代了常规的水蒸汽作为汽轮机的工作介质。由于氨，水混合液的沸点远低于会的沸点，因此在较低的温度时就可以产生高压蒸汽对汽轮机做功，从而将热能转换为电能。同时这种介质并非像水一样在一固定温度点沸腾，而是在一个温度区间都能保持沸腾。也就是说在一定温度上升范围内，始终是保持沸腾的。这样就能保证在较大的温度空间内都会对汽轮机做功。这两个特性特别适用于低热值低温度的工业废气回收领域。比如水泥厂的窑头窑尾的废热回收，高炉煤气发电和玻璃厂的焚烧炉废热回收发电以及其他产生废热的行业。同时这项技术已利用于地热发电电厂中。

1993 年，美国电力公司许可由 Alexander Kalina 创建的 Exergy 公司在全球推广 Kalina 循环，许可的电站装机规模为 50~150 是 MW。

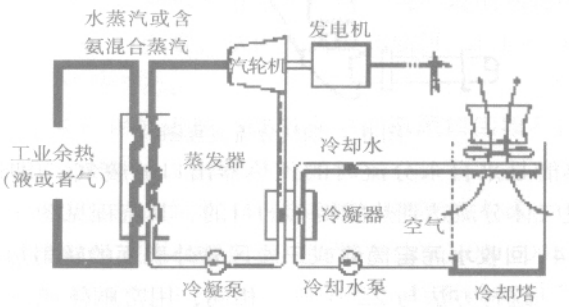

图 8 Kalina 循环流程简图

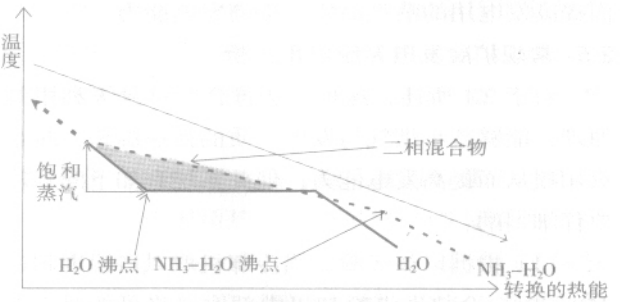

图 9 Kalina 循环传热简图

图 8 为 Kalina 循环流程简图，图 9 为传热简图。

图 9 中的虚线代表卡力纳循环，实线代表常规的水蒸汽循环。可见两种循环间的差别就在于中间的灰色区域。这部分多转换的热能取决于氨、水混合液低沸点和一个较大的沸腾温度区间。氨、水的比例会根据项目的具体情况进行调整。

3.3 螺杆膨胀动力机发电

螺杆膨胀动力机基本构造由一对螺杆转子和机壳组成。流体在螺杆齿槽中降压膨胀做功，推动螺杆转动，实现能量转换，见图 10。

螺杆膨胀动力机有以下主要技术特点：

图 10 螺杆膨胀动力机工作原理

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

(1) 它是一种容积式的全流动力设备，能适应过热蒸汽、饱和蒸汽、汽水两相流体和热水（包括高盐分热水）工质。

(2) 可实现无级调速，转速一般设计为 1 500～3 000 r/min，相比同功率汽轮机，有较高的内效率。

(3) 在热源参数、功率及热负荷较大范围变化情况下，能保持较高运行效率。

(4) 单机功率在 50~1 500 kW。

(5) 设备紧凑，占地少，工程施工量小。

(6) 操作方便，运行维护简单，而且具有除垢自洁能力，大修周期长。

(7) 起动不需盘车、暖机[4]。

螺杆膨胀动力机余热发电是国家八五科技攻关课题之一，以天津大学为主要研究单位，以中国建材研究院参与的螺杆发电系统，曾经制作 100 kW 的试验机组，后因诸多问题没有得到应用，另外装机规模扩大是个难题。

3.4 以日方的实践为基础的氟龙类有机工质的发电系统

该方案也是利用有机工质进行朗肯循环的发电系统，早些时侯日本赤惠水泥厂以及三菱气体化学公司水岛化工厂建设了此类电站，但是迫于环保压力，目前已不在使用和研究。

4 结语

随着能源的匮乏和价格的上涨，中国从 2000 年以后大力开展节能工作，这比日本晚了 20 多年（日本于 1979 年就颁布了《关于能源使用合理化法律》，通常称为“节能法”）。

通过对我国目前存在的主流及非主流水泥窑纯低温余热发电技术的简单介绍，希望大家积极参加此项节能工作的研究与实践，为我国节能事业的发展共同贡献力量。

参考文献：

[1] 唐金泉，曲业龄，唐兆伟. 几种水泥窑纯低温余热发电技术发电能力及存在问题的比较分析. 中国水泥网

[2] 孙义燊. 水泥预分解窑余热中温发电技术. 水泥技术，2006，(03)：81~82

[3] 张福滨. 水泥窑纯低温余热发电有机工质循环技术的应用探讨. 节能技术，2003，(04)：23~25

[4] 蒋祥军，胡达，胡亮光等. 采用螺杆膨胀动力机技术有效降低发电厂的厂用电率.热力发电，2006，(09)：75~76

收稿日期：2007 年 2 月

（责任编辑：何 彬）

综合短信

建筑节能造房可以不用砖而用玻璃

近日，南京市有关方面已经下发了《南京市建筑节能工作的意见》。意见明确，2010 年城区要有 10%的新建建筑采用节能 65%的标准，并逐步限制粘土空心砖的使用。

据南京大学工业矿物岩石材料研究室的陈克荣教授说介绍，以后从废玻璃里提取的物质很可能成为家庭住宅墙体材料的首选。”

据了解，陈教授所在的研究中心就研制了一块不用一点土壤的特殊“砖”。它的基本原料是经常能见到的废玻璃和粉煤灰。这“砖头”重量仅有现在普通砖的 1/3，而且能浮在水面上。陈教授说，“砖”里面全是化学反应“培养”出的晶体，将“砖”紧紧粘合在一起，比现在的混凝土还要结实。

据悉，新型墙体材料的成本比普通砖头要贵 1/4，但是由于重量较轻，因此，房屋建筑的整体成本与现在却相差无几。陈教授说，他们正在寻找合作伙伴，也许不久这种新型材料就能进入市场。

（摘自中国轻工业信息网）

世界建材圣戈班看好中国市场

名列世界建材业百强榜首位的法国圣戈班集团加快了进入中国市场的步伐。1 月中旬，该集团在中国的第二家玻璃棉工厂在宜兴正式开工；随后，其旗下的大型建材销售品牌美颂巴黎将在浦东开出上海的第二家大型门店。宜兴工厂的开业，表明圣戈班看好中国华东地区尤其是上海的节能建筑市场。

（摘自新消息报）

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net