

抽凝式、凝汽式汽轮机改为背压机的优势

——一种新型的背压机、有低压回热加热补水

刘 屹¹，邱瑞章²，王明家³，曹祖庆⁴

(1.无锡全邦能源科技有限公司，江苏 无锡 214028；2.南京师范大学动力学院，江苏 南京 210042；
3.华能南京电厂，江苏 南京 210035；4.东南大学动力系，江苏 南京 210096)

摘 要：现在我国有些热电厂拆除原有的凝汽式或抽凝式汽轮机，代之以背压式汽轮机，以期提高其经济性。背压机组因没有低压回热加热系统，只有用高压排汽在除氧器加热补水，引起甚大的热经济损失，因而应考虑设计一种新型背压机，有低压级可用低压回热抽汽及排汽来加热补水，提高机组经济性。若将原有的抽凝式、或者凝汽式机组改造为既可向外部供气，又可用低压回热抽汽及排汽加热补水；因凝汽器改造为第一级补水加热器，没有冷端放热损失，成为一种新型背压机，具有较好的经济性，节省大量投资，是一种可行的、更经济方法。

关键词：背压式汽轮机；抽凝式汽轮机；凝汽式汽轮机；补水；回热抽汽

0 引言

为着响应国家节能减排的号召与指示，最近有些地方、有些热电厂认为原装的抽凝式机组、凝汽式机组，有凝汽部分，有冷端损失，热经济性差，故认为应当拆除。为着仍保证原有的供热、或者外界新增加供热要求；在这种情况下，便在拆除原有的抽凝式或者凝汽式机组后，再安装新型的背压机。

现场一般都认为背压式汽轮机没有冷端损失，热效率高，可近似认为等于 1。实际上，这种认识是片面的，没有认识到背压机组，在运行中因没有低压回热系统，只有用其压力较高的背压级的排汽，进入除氧器加热补水，产生较大的热经济损失，减少了做功。若将电中原有的抽凝式机组或者凝汽式机组，改造成为抽汽供热式机组，同时用其低压回热抽汽和排汽，在机内做功后再用来加热补水，可以解决背压机存在的这个问题，其经济性可高于新装背压机组，应当引起注意并加以推广。

2 背压机组在应用中存在的问题

背压式汽轮机因名义上没有冷凝损失，热效率较高，近似等于 1，故常被推广，优先采用。实际在应用中除不宜用于低负荷外，还存在下列问题。

[1]

(1) 轴封系统

背压式汽轮机高、低压两端轴封内外压差均较大，又因为没有低压回热系统，无法将轴封漏汽由轴封中间抽出，供低压回热系统利用，减小轴封漏汽损失。同时，为防止轴封向外漏汽流向相邻的轴承，使油质变坏，影响轴承运行的安全；故在近轴封出口处设计有一个微负压腔室，将轴封漏汽由此抽出，而不向外漏向大气及相邻的轴承，而只有少量空气漏入。因背压机组没有低于大气压力的回热抽汽，故须用抽气器将漏汽抽出，经轴封冷却后剩余的空气排出，抽出的轴封漏汽经轴封冷却器冷却后生成的凝结水，还得用水泵打至除氧器，使系统复杂，还消耗一定的功率。

又因高、低压两端轴封漏出的蒸汽的温度均较高，为防止有大量的热量经主轴传至相邻的轴承，故多在轴封内微负压腔室的内侧、设计一个引入一股微正压的低温蒸汽的腔室，向外流向微负压腔室，及向内流向一个负压的腔室，后流向负压的回热系统，既防止高温蒸汽外漏，并可对主轴段进行冷却，防止过多的热量传递到轴承，保证相邻轴承正常运行。对于背压式机组，因自身没有低压低温蒸汽可利用，为保证轴承的冷却，须增加轴承冷却油量，以及加大冷油器的热容量和及其冷却水流量。

(2) 补水加热

对于背压式汽轮机，在独立设计时不能考虑其他机组存在，为着将其大量的补水加热达到锅炉要

求的给水温度和必须的加热除氧，只有用自身的排汽（背压汽）来加热补水，这加热用汽量可占背压级排汽一个不小份额。对不同的初参数的机组，锅炉的进水温度要求不同，背压机组向外供汽的背压不同，使加热补水所用蒸汽的份额亦不相同。一般高达在 20% 左右。这部分加热用的蒸汽原可在汽轮机内作功后再用来加热。这部分蒸汽做功的能力不可以轻视，可占机组发电量的 7~15% 或更高，使背压机的热经济性变低。

3 凝汽式机组改造要点

3.1 机组可改造的条件

原凝汽式汽轮机能改为背压机向外供汽的基本条件为：1) 机组状况良好；2) 机组最大的进汽量能够保证向外供汽以及加热补水所需的最大需要用量；3) 所需的向外供汽的压力。对抽凝式机组与原有供汽压力相近；对凝汽式机组与正常运行时允许的调节级后压力、或回热抽汽压力相近。

3.2 改造指导思想

对于将原抽凝式或凝汽式汽轮机改为背压式机组，既向外大量供汽，同时又没有凝汽损失，不能简单地认为原汽轮机的后汽缸是有生铁铸成的，不能承受高温，故将供汽压力后的各级及后汽缸等都拆除便可。因这样的改造便使得汽轮机与发电机分别缺少了后轴承及前轴承，不成为完整的机组，无法运行；同时也没有低压回热抽汽可用来加热补水，热经济性也不好，故不能这样改造。

合理的改造方案是：保留原汽轮机新供汽口以后的各级，让加热补水用的蒸汽，在保留的级中流过，降压降温，到原来的回热抽汽口处，以适当的压力引出，利用机组原有的回热系统，依次加热补水，最后进入凝汽器，凝汽器改作为补水的第一级加热器。这样改造好的机组也不用冷却水，也就没有冷端损失，相当于背压式机组，一种新型的背压式机组。

这样的改造方案只是在汽缸上增开供汽孔、焊接供汽管；将供汽口后各级的通流面积及凝汽器适当改造即可。改造工作量小，改造所需时间短，热经济性好，原有设备—包括电气部分都能充分发挥作用，投资省，并能保证安全经济运行。这样的改造工作在国内早有成功的经验，不过当时没有明确说明是改为背压机。^{[2][3]}

4 机组改造工作

4.1 扩大供汽口

对原为抽凝式机组，可利用原有的向外供汽口向外供汽；对原为凝汽式机组，当原来的回热抽口处的汽压力与现在要求的供汽压力相近时，可利用原有的抽汽口向外供汽。但因原来的抽汽口只是供回热抽汽用，抽汽量较少，改为向外供汽时供汽量增大很多，原有抽汽口的面积当然不够大，故应在汽缸上原抽汽口轴向位置处，新增开抽汽口，并焊接向外供汽管道。在汽缸上增开供汽口后，当须对汽缸的强度进行核算，焊接方法进行研究。不过在国内这种改造已进行过多台，有丰富的实践经验，能确保机组的安全。

4.2 供汽口后各级通流面的积改造

根据热力系统计算及热经济比较后，确定补水依次加热后的温升及相应的抽汽压力，然后根据加热器（包括改造后作为补水第一级加热器的凝汽器）的热平衡计算，求出依次加热补水所需要的抽汽量，也就求出在供汽口后各级的流量，这蒸汽流量当然远小于原蒸汽流量，为着使抽汽口处蒸汽压力基本上等于预定值，保留级的效率及循环效率较高，故应对保留级的通流面积改造方案进行计算，不同方案的比较。最后确定所需要的通流面积，将各级多余的喷嘴堵掉。

4.3 凝汽器改造^[4]

因为是将原凝汽器改作为补水的第一级加热器，现在的补水相当于原来凝汽器的冷却水，在流量上当然较原冷却水少得多，使得在铜管中的流速变慢，一方面是影响传热（传热系数近似比例于流速的平方）；另一方面因流速过慢，会使原水中悬浮物会沉淤在铜管面上，既影响传热，更危险的是可能引起沉积腐蚀，使铜管损坏，故在补给水量不变条件下应设法增加其流速。如原为对分制的凝汽器只用一侧，更可将原二流程改为四流程，则可将流速增大四倍。另有部分补给水可在喉部喷出作为直接冷却^[4]。

当邻机只有一级低压加热器，其温升较大，亦可将其凝结水先到这凝汽器中先进行一次加热（对此凝汽器亦增加了冷却水），可提高全厂热效率，同时也改善此凝汽器的工作。

4.4 末级工作

对于保留的原末级，因改造后的蒸汽流量只为

第一级加热补水所需要的蒸汽，流量很小，加上其背压（对应补水第一级加热后温度、加上传热端差后求得排汽温度的饱和压力）较原凝汽器内的压力高出很多，比容变小，容积流量变小的很多，因而须将通流面积变小的很多，效率变坏较多。为保证较好的效率，可考虑拆除末一、二级，使保留的最后一级级后压力等于补水第一级加热器内压力，效率比较好，但工作量较大^{[4][5]}。

4.5 校中心

凝汽式机组在改造后运行时，因背压较原运行时背压为高，排汽缸温度亦较原来升高，除应注意中间轴承温度外，应考虑中间轴承中心线向上膨胀增大，使中间联轴节上开口有增大趋势，故在机组改造后安装时应当注意，不再允许有上开口。

5 改造后机组的运行

5.1 供汽压力是可调的

在将抽凝式或凝汽式机组改造后向外供汽时，当外界用汽量改变，引起供汽压力改变时，可由压力自动调节系统来自动调节，亦可由运行人员根据压力变化进行调节，即调节进汽阀的开度，调节进汽量，使供汽压力维持稳定。

5.2 运行中补水量改变时应对措施

对将抽凝式机组改造时，可用低压进汽调节阀调节低压段进汽、亦即调节加热补水的蒸汽量，可适应补水量的变化，满足运行要求。对原为凝汽式机组，因为原机组低压段的前面没有进汽调节阀，对供汽后加热补水的蒸汽量，因供汽口后面各级的通流面积固定不变，供热压力亦基本不变；亦即在供汽口后流向保留的各级的蒸汽流、亦即供加热补水的蒸汽量基本不变，因而要求补水量亦保持基本不变。但在运行中，因热负荷不可能不变，需要的补水量亦因而随之变化，这便与前要求补水量与基本不变的加热蒸汽量不相配合。在这种条件下，为着解决这个矛盾，可采用下列措施：1) 与除氧器水箱储存容积来调节：当供汽量大时，需要的补水量大，大于补水加热系统能保证的补水量时，则由除氧器水箱中的存水来补上不足的量；2) 用进入除氧器蒸汽量调节：若仍通过需要的补给水量，因为原来设计的加热蒸汽量不够，进入除氧器的水温会偏低，以及供给除氧器的蒸汽量不够；这时可用一些高压排汽进入除氧器补充，满足给水加热要

求。与之相反，当热负荷较小，只需要较小的补水量时，则仍维持原补水量，可临时储存在除氧器水箱中，供以后补水不足时用；亦可只通过变小的补水量，同时适当关小一些进汽阀。至于在设计时取定的补水量，以及运行中采用措施 1、2 或者两者联合采用，应根据电厂设备和运行的具体条件仔细研究后决定。

若厂内尚有其他供热机组时，也可考虑由其他机组调节供热量，亦可调节加热的补水量。

5.3 运行中的安全要点

(1) 汽轮机后轴承温度

由于现在将凝汽器改作为补水的第一级加热器，排汽压力和温度当较原凝汽运行时升高，由主轴及排汽缸、后轴承座传给汽轮机后轴承及发电机前轴承的热量增多。为保证轴承维持正常温度，除应适当增大供油的节流孔孔径增加供油量外，在运行中，特别当冷却水温度较高时，或者当热负荷较小、汽轮机效率变坏、排汽到过热区时，应特别注意轴承温度，必要时可开启后汽缸喷水，降低排汽和后汽缸温度，或增加冷油器的冷却水量，或增开一台冷油器。

(2) 机组的震动

由于现在运行中排汽温度变高，中间轴承中心因排汽缸自基础台板向上膨胀增大，由联轴节校好的中心会改变；以及中间轴承油温可能升高，改变轴承运行特性，都有使机组有增大震动趋势，故在运行中应对机组振动加强监视。

(3) 推力轴承与轴向位移监视

对排汽口以后保留的各级通流面积变小、排汽压力变高，对轴向推力的计算中有些系数取定不一定完全正确，都可能引起级的反动度的改变，故在运行中应对推力轴承乌金温度及转子的轴向位移加强监视，以防意外。

6 经济分析

6.1 机组效率

一台新设计、制造、安装的背压机组，其效率要比原有旧机组高压段的效率要高些，应是肯定的（若新采用的背压机组，为使结构简化、降低机组造价，只采用一个速度级，则其效率也不会太高）。对旧机组有老化因素，使其效率降低，而采用新背压机组的效率可能高出 3~5% 左右。

对于将原有的抽凝式或凝汽式机组改为背压机向外供汽时，因可将原供除氧器用来加热补水的蒸汽，改为现在机内依次做功后再用来加热，则加热用的蒸汽可以多做功，使机组循环效率提高，热经济得到补偿。

机组改造后能多做多少功，及其得益的多少，与机组进汽参数和供汽压力有关。为着考虑决定采用和方案时有一个数量上概念，曾对高、中压机组及其典型机组的回热系统、供热压力为 1MPa 为例进行计算，其结果为：对中压凝汽式机组，补水在高压加热器与背压机相采用的方法同，仍用压力较高的供热汽加热，除氧器及低压加热器用低压回热抽汽加热，凝汽器改造后作为补水第一级加热器（加热器内的压力计算时取 0.02MPa，其饱和温度约为 60℃），用最后一级的排汽加热，加热蒸汽在机内做功使总功率增加 12% 以上。对高压凝汽机组：高压加热器和除氧器与背压机加热方法相同，都仍用压力较高的供热汽加热，四级低压加热器用低压回热抽汽加热，凝汽器亦改造为补水第一级加热器（背压约为 0.01MPa 左右，饱和温度约为 45℃），用最后一级的排汽加热，加热用的蒸汽在机内多做功 7% 以上。加热蒸汽，在中压机组多做功的百分数较在高压机组的大，这是由于进汽在高压段内的理想焓降与加热补水蒸汽在低压段内的理想焓降之比约为 1:2，对高压机组，这比例约为 1:1。这使得加热蒸汽在高压机组内多做功的比例较在低压机组的较少。由上计算结果可以看出：加热用的蒸汽在机内多做的功完全可以补足用原来机组因高压段效率较低产生的损失，使改造后机组的热效率反而高于新的背压机的效率，使运行费用较低。

6.2 投资

对于购买、安装新的背压机组方案，除汽轮机组及其附属设备外，因原有的发电机的前轴承与汽轮机整体相连，亦不能采用，故发电机组必须同时购买；原来的汽轮发电机组的基础，因新装的背压机的轴向长度较短，中间两个轴承与原来的完全不同，亦不能应用，须拆掉重做，使安装工作量及投资较大，基建时间长，投运后其折旧、大修及利息等费用较大，亦增加了运行费用。

当采用现有的抽凝式或凝汽式机组改造方案时，只须花费汽轮机改造设计费。改造及施工费用，估计可能只有购买、安装新的背压机费用的十分之

一左右，投资可以很大的节约，所需的时间亦可大大地缩短。

由上述可知：利用现有抽凝机组改造为背压机组供汽，投资节省得很多。热效率更高，或者说至少可以说不会低。对于运行费用，若考虑到折旧、投资利息等费用时则是更省，应优先考量采用。

7 设计生产一种新型的背压机组

7.1 重视常规背压机存在的问题

现有的背压机因补水缺少低压回热加热系统，常是直接排汽加热补水，使热经济性较差；轴封漏汽损失较大，轴封处没有低温蒸汽可供冷却用，由主轴传到轴承的热量较多，轴封系统较复杂等问题，故最好能改进机组的设计，新设计、生产一种新型的背压机。

7.2 对新型背压机设想

新型的背压机，在其高压段后大量向外供汽，供汽后仍有低压段、有低压回热抽汽及排汽用来加热补水的系统，经济性较好，又因没有凝汽器，没有冷凝损失，故仍可以算是一种背压机。

关于进入低压段用以加热补水的蒸汽，可以有低压段进汽调节阀调节。高压调节阀调节新汽进汽量，调节热负荷；低压段进汽调节阀调节加热补水的蒸汽量。亦可认为背压机运行时热负荷通常较稳定，或者常有一台抽凝式机组调节热负荷，或承担补水量的变化，则亦可没有低压进汽调节系统，以减小投资；同时还可适当增大除氧器水箱及补水箱容积，以适应补水量的变化，满足运行要求。

轴封系统可和凝汽式机组相同。

8 结论

(1) 当背压机组用其背压排汽来加热补水时，则热经济性下降，宜生产一种新型背压机，具有低压回热加热补水系统，以提高其经济性，加热蒸汽进气量可以是自动调节或者是不可调节式。

(2) 当考虑采用新背压机组时，应其补水加热系统，轴封系统等问题慎重后采用

(3) 将原有的抽凝式或凝汽式机组改为背压机向外供汽，并保留低压回热加热补水系统，凝汽器改造为补水第一级加热器，热效率较高，投资省，施工时间短，是一个可以推广采用的方案。

参考文献:

- [1] 葛斌, 陈行庚, 曹祖庆. 采用背压机排汽供热应注意的问题[a]. 江苏电机工程学会火力发电专委会, 江苏方天电力技术有限公司. 2011 年鄂、苏、皖、冀汽轮机学术年会论文集（江苏分册）[C].南京:江苏省电机工程学会,2011.14-17.
- [2] 南京工学院等.31-6 型汽轮机改为供热、低真空供热补水运行方式[A]. 集中供热与节能—全国集中供热学术会议论文选编[C].北京: 机械工业出版社, 1984.
- [3] 江苏华能集团总公司, 东南大学动力系, 南京师范大学动力学院. C12-3.43/0.98 型抽凝式机组节能技术改造技术说明[Z]. 2010.
- [4] 沈春梅, 陈行庚, 曹祖庆. 凝汽式汽轮机恶化真空运行时应注意的几个问题-凝汽器作为热水加热器[A]. 动力工程学会透平专委会, 动力工程学会透平专委会 2010 学术研讨会论文集[C]. 上海.2010.
- [5] 朱奇, 陈鹏帅, 侯国栋. 地真空循环水供热改造[J]. 热力发电, 2013 (3): 95-97.