

# 燃气轮机入口降温的研究及实际应用经济效益

赵艳辉 李舸 (中原油田分公司, 河南濮阳 457000)

**摘要:** 燃气轮机是一种可靠、稳定的动力设备, 广泛用于航空航天、船舶、能源、石油石化等行业。研究其功率的影响因素及采取相应的优化措施对于提高能源的利用率以及设备运行的稳定性、经济性很大意义。本文先通过系统分析压气机入口空气温度对燃机功率的影响机理, 以及国内外同行业的研究现状, 其次结合实际生产装置, 对燃机进行入口喷雾空气降温改造, 在长期的运行中取得不错的效果。

**关键词:** 燃气轮机; 压气机; 入口温度; 实际应用; 经济效益

中图分类号: TK47 文献标识码: A 文章编号: 1674-5167(2025)034-0067-03

## Research on Cooling the Inlet of Gas Turbines and the Economic Benefits of Practical Application

Zhao Yanhui, Li Ge (Sinopec Zhongyuan Oilfield Company, Puyang Henan 457000, China)

**Abstract:** Gas turbines are reliable and stable power equipment, widely used in aerospace, shipping, energy, oil and petrochemical industries. Studying the influencing factors of their power and taking corresponding optimization measures is of great significance for improving energy utilization and the stability and economy of equipment operation. This paper first systematically analyzes the influence mechanism of the inlet air temperature of the compressor on the power of the gas turbine and the research status at home and abroad in the same industry. Then, combined with the actual production equipment, the inlet air temperature reduction transformation of the gas turbine is carried out, and good results have been achieved in the long-term operation.

**Key words:** Gas turbine; Compressor; Inlet temperature; Practical application; Economic benefits

### 1 前言

我国燃气轮机发展起源于上世纪 50 年代, 随着技术和材料的进步, 自主研发燃气轮机的输出功率、透平温度不断得到提高, 2024 年 10 月, 我国研制的 F 级 300MW 重型燃机在上海点火成功。某油田公司运行着两台燃气轮机, 用于原料气增压, 工作过程及基本结构如下图所示, 空气经进气流道进入压气机, 增压后与燃料进入燃烧室燃烧, 产生的高温高压燃气推动透平, 后经排气流道排出。

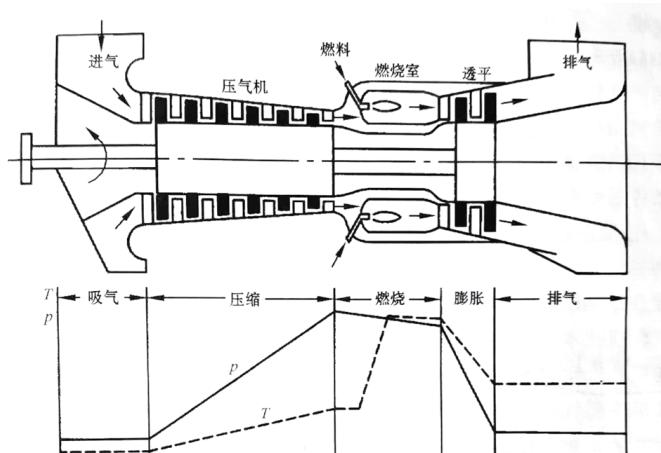


图 1 燃气轮机工作原理简图

燃机输出功率与环境温度联系紧密, 两台机组输出功率与环境温度的关系见表 1、表 2。表 1、表 2 为

表 1 A 机组功率与环境温度的关系

环境温度 /℃	输出功率 /KW
-10	5650
20	4547
30	4151

表 2 B 机组功率与环境温度的关系

环境温度 /℃	输出功率 /KW
-10	5300
32	3970
42	3675

机组随机资料, 由此可知, 燃机输出功率受环境温度影响很大, 夏季气温较高, 两台机组的做功能力大幅度削弱, 原料气处理量的减少直接影响着工厂效益。下文对此项因素的影响机理进行分析, 提出了改善机组运行工况的改造措施。

### 2 影响机理分析

燃气轮机的实际循环效率  $\eta$  表达式如下:

$$\eta = \frac{\left(1 - \frac{1}{\pi^{\frac{K-1}{K}}}\right)\eta_T - \frac{1}{\tau\eta_c\eta_m}\left(\pi^{\frac{K-1}{K}} - 1\right)}{1 - \frac{1}{\tau} - \frac{1}{\tau\eta_c}\left(\pi^{\frac{K-1}{K}} - 1\right)}\eta_B$$

其中:  $\tau$ : 透平入口温度与压气机进口温度的比值;  $\eta_c$ : 压气机效率;  $\pi$ : 升压比;  $\eta_m$ : 机械效率;  $K$ : 空气绝热系数;  $\eta_B$ : 燃烧室效率;  $\eta_T$ : 透平效率。

由上式可知，保持其他条件不变的情况下，降低压气机入口温度或提高透平入口温度，均有助于提升燃机循环效率，但压气机入口温度对循环效率的影响比透平入口温度更显著，实验表明，压气机入口温度降低3℃对效率的提升效果，约相当于透平入口温度提高24℃所带来的增益。机组做功能力受进入透平工质的温度、流量所影响，正常工作时，同一时间段内吸入空气的量是基本不变的，因此很大程度受限于工质的密度，环境温度的升降影响着密度、机组的做功能力，根据表1、2的机组数据，环境温度上升1℃，燃机的输出功率下降约0.59%–0.87%，所以降低压气机入口温度是提高燃机输出功率的一项重要措施。

### 3 降低入口空气温度的方法

#### 3.1 引入外部冷源

某些工厂具有制冷机组，可以考虑在压气机的入口或内部通过不同的形式从制冷机组引入冷源，对入口空气进行降温。

#### 3.2 压气机内部冷却

可从压气机级间作为出发点，对压气机进行改造为多级压缩，设置级间冷却器，进而降低工质的温度<sup>[1]</sup>。

#### 3.3 进气喷雾冷却

对压气机进口安装喷雾系统，将水以雾状混合空气进入压气机内部，利用水的汽化潜热对空气进行降温，较小雾化量可以保证水雾接触到叶片之前以气态形式存在，增加了工质流量。

方案1降温效果理论上是最佳的，缺点比较明显，如制冷剂发生泄露，存在着爆炸风险，其次入口布置过多设备不利于空气通过，与提高空气流量的本意背道而驰；方案2涉及的改造多、工期长，部分内容甚至涉及到对机组本身构造改动，完成难度较大；方案3优点在于改造成本低，维护内容少，关键在于喷雾系统的实际运行情况。

### 4 进气喷雾冷却的国内外研究

压气机吸气的过程中，通过喷雾的方式将水与空气混合，流动过程中水分发生相变，降低空气温度，水分参与后续的压缩、燃烧过程，因此空气的热量并没有被丢失在系统外，热量由水蒸气携带，当气流到达压气机前成为饱和状态，这种属于“饱和喷雾”冷却；当喷雾量较大存在少量液体形态的水进入压气机级间蒸发冷却，这种属于“过喷雾冷却”，如美国通用公司研发的SPRINT技术。此类进气加湿降温技术，能够显著增强燃气轮机装置的输出功率并改善其热效率<sup>[2]</sup>。

Bhargava对多台采取进气加湿的燃机进行多项参数分析，参数对象包含单位功提升的喷雾量、功率的

提升量等。同时提出当航空燃气轮机与工业燃气轮机都进气喷雾加湿的运行情况下，航空燃机性能提升更加明显，喷入量到达一定值后，比耗功降低、功率明显提升、热耗得到改善。相比于常规环境，当环境温度较高、空气湿度偏低时，燃机进气喷雾加湿更能提高装置的性能<sup>[3]</sup>。

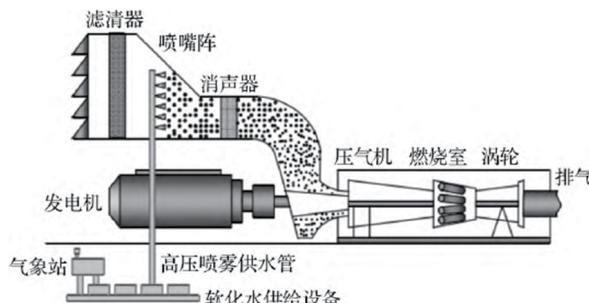


图2 MEE公司燃机进气道改造图

如图2所示，美国MEE公司对燃机的进气道进行了系统改造，介质采用软化水，对软化水进行精细化雾化形成水雾，小直径能够缩短蒸发速度，其次也避免了对叶片产生影响。雾化系统可结合生产实际调整所需的雾化量，在进气加湿降温和过量喷雾的选择上灵活性更高。自20世纪80年代末以来，进气喷雾技术在全球范围内得到广泛研究与应用。为提升燃气轮机性能，美国Atlas联合循环电厂对多台机组实施了压气机进气喷雾改造，开发出了高压雾化系统及级间喷雾冷却技术。

Bagnoli等通过研究得出在压气机上游实施饱和喷雾或过喷雾要比与在压气机级间设置喷雾点能够获得更大的功率提升，但是关键点在于喷雾的最大量受影响的因素较多，包括压气机的喘振极限、燃气轮机所被允许的功率最大输出值以及环境因素。机组功率的所被允许的最大输出值一般不高于设计值的30%左右，压气机的末级可能会因为喷雾量的逐步增大贴近喘振边界，这是要值得注意的。作者还指出，在空气温度40℃、相对湿度40%时，喷入流量比约1.2%的水雾，就能够恢复机组因环境高温损失的功率输出，继续提高喷雾量达到约1.5%时可弥补热效率损失功率<sup>[4]</sup>。

进气喷雾技术虽能有效提升燃气轮机输出功率与循环效率，但其性能改善效果与液滴直径密切相关，过大的液滴直径会显著削弱技术效益，因此实现高质量雾化是发挥此项技术潜力的关键所在。孙兰昕对压气机在额定工况下，喷雾系统产生不同直径的液滴对燃机性能的影响进行充分研究<sup>[5]</sup>。

通过孙兰昕开展喷雾直径、喷雾量对比试验，可以得知：①喷雾量一定时，出口流量与平均直径负相关，15 μm低于10 μm低于5 μm下出口流量；②液

滴直径越小相变时间越短，出口气流温度降低更加明显，但喷雾量对出口气流温度的影响力要大于液滴直径；③液滴直径减小，压气机内部气流的温降增大，比压缩功减少。综上，若维持机组的压缩比恒定不变的情况下，液滴直径减小、喷雾流量提高，越利于出口温度降低、流量增加，因此较小的喷雾直径是提升机组综合性能的关键因素。

进口喷雾空气压缩系统有以下特性：①吸气压缩过程中，水与气流混合，水分在蒸发过程中与空气发生传质传热，气流在流动过程中温度逐渐得到降低；②空气温度降低，热量由水分吸收，水分蒸发为气体与混合，能量仍然保持在工质内；③水蒸发进入气流中使流量增加，利于透平做功；④相变吸热空气温度降低，其次水分参与燃烧，因此对于  $\text{NO}_x$  的形成有一定的抑制作用<sup>[5]</sup>。

## 5 实际应用及经济效益

### 5.1 实际应用效果

通过上述内容的分析及研究，方案三即进气喷雾冷却具有很高的实际应用价值。该公司参考图 2 改造方案对一台机组进行了改造，改造分为两部分内容进行对照试验，第一部分为在压气机的入口过滤器前进行喷雾改造，布置了六行九列雾化喷头，雾化介质为工厂公用工程系统生产的软化水，为保险起见，喷雾量与进气空气质量比控制的较低，参考孙兰昕的研究内容确定质量流量比为 1: 100；方案二为与图 2 改造方案基本一致，在压气机空气过滤器的下游进行喷雾改造，布置了五行五列的雾化喷头，喷雾质量流量比仍采用 1: 100。方案及效果对比如下表：

表 3 两种改造方案对比

	喷雾位置	喷头数量	喷雾量：空气流量
方案一	压气机过滤器上游	54	1: 100
方案二	压气机过滤器下游	25	1: 100

表 4 效果对比

	环境温度 /℃	进气温度 /℃	输出功率 /KW
未改造	45/40	46/42	3570/3670
方案一	45/40	38/36	3790/3850
方案二	45/40	35/33	3880/3950

由上可知，两种方案对降低入口温度都有一定效果，进行方案一试验的理由是：对压气机过滤器下游进行改造具有一定的风险性，是否会对进气量产生较大的阻碍作用以及雾化系统零部件在运行过程中对机组潜在的机械伤害，其次若方案一产生的实际效果不大幅度弱于方案二，在基于安全的前提下应充分考虑方案一。方案一的整体效果类似于营造出雨天的环境，入口温度得到一定的降低，但也有一定的弊端，雾化量过大或雾化时间过长，压气机的前端过滤器存在着吸水饱和的隐患，这对于提高进气的质量流量是不利

的，因此要严格控制喷雾量以及使用时间。该机组进行方案一试验时，按照以下要求进行，当白天环境温度逐渐上升，机组输出功率下降时，启动喷雾系统进行降温，实际运行过程中观察到，大部分水雾在接触进口过滤器前基本吸热气化，均以气态形式通过过滤器，机组过滤器前后的压差值及实际巡检情况未发现异常。方案二的实际效果与预期效果相近，在过滤器下游布置，直接对空气进行喷雾降温，细化的水雾充分吸收空气的热量以气态形式存在，提高了进气的质量流量，在输出功率的提高上表现优异。

### 5.2 经济效益

工厂日均原料气处理量设计值  $100 \times 10^4 \text{Nm}^3$ ，实际为  $80 \times 10^4 \text{Nm}^3$  左右，装置操作弹性为 50%–110%，两种改造方案的功率提升 6.0%–8.5%，原料气日均处理量可增加  $4.8\text{--}6.9 \times 10^4 \text{Nm}^3$ ，产量增加约 12t/ 天，产品市场价格取均值 4900 元/t，本机组在使用地区每年因高温触发温控程序天数约 40 天，若仅为弥补高温功率损失，则总效益： $12\text{t}/\text{天} \times 4900 \text{元}/\text{t} \times 40 \text{天} = 2352000 \text{ 元}$ ；若为进一步提高机组输出功率增加产量，则减去每年机组检修时长后预计总效益： $12\text{t}/\text{天} \times 4900 \text{ 元}/\text{t} \times 333 \text{ 天} = 19580400 \text{ 元}$ 。

### 6 总结

前期通过对进气喷雾冷却技术国内外的研究来看，国内对该方面实际应用较少。本文所涉及的改造是严格基于安全运行的前提下开展的，改造实施及应用相对保守，如雾化量控制较低及每日使用时间较短，初次改造目的是为弥补机组在夏季因高温损失的经济效益，通过实际应用取得的实际效果还是令人满意的，改进后经济效益得到显著的增长。本次改造中也存在着一些不足之处，后续的研究内容会集中在进一步提高机组功率以及喷雾系统长时间使用的方向进行。

### 参考文献：

- [1] 陈满元, 姚光前, 谢富良. 燃气轮机入口空气系统的冷却改造 [J]. 大氮肥, 2003(05):350-352.
- [2] LM6000 Sprint Design Enhanced to Increase Power and Efficiency. Gas Turbine World:July-August 2000:16-19P.
- [3] Bhargava R and Meher-Homji C B. Parametric analysis of existing gas turbines with inlet evaporative and overspray fogging [J]. ASME Paper No: GT2002-30560, 2002.
- [4] Bagnoli M, Bianchi M, Melino F, Peretto A, Spina P R, Bhargava R and Ingistov S. A parametric study of inter-stage injection on GE frame 7EA gas turbine [J]. ASME PaperNo: GT2004-53042, 2004.
- [5] 孙兰昕. 燃气轮机湿压缩性能与水滴运动研究 [D]. 哈尔滨：哈尔滨工程大学, 2012.