

中压透平膨胀机 在天然气分离装置中的运转试验

四川深冷分离设备研究所 张加雷

摘 要

通过透平膨胀机在天然气分离装置中的长期运转试验,介绍天然气透平膨胀机的特点及PT501型中压小功率透平膨胀机的特性。根据试验结果分析了天然气中混入的固体微粒及液滴对透平膨胀机性能的影响。对流道侵蚀现象进行初步的探讨,并根据试验结果对带液后叶轮叶型改进提出初步的设想。

使透平膨胀机在中压带液工况下长期稳定运转,是当前透平膨胀机试验研究的重要内容之一。特别是带液运转问题,当它一开始出现就引起十分广泛的重视与研究。随着石油、天然气工业的飞速发展,特别是膨胀机制冷的天然气深冷分离流程的发展对透平膨胀机提出更高的要求,为此我们四川深冷设备研究所在1976年开始进行中压天然气透平膨胀机的研制,并于1981年12月开始在四川石油管理局中坝气田进行半工业性试验。

一、膨胀机组的基本结构及其设计参数

我们在中坝气田试验的透平膨胀机组(简称机组)代号为PT501。主要是由膨胀机主机和供油装置两部分组成。试验流程见图1,主机结构见图2。主机主要是由膨胀机蜗壳、导流器、转子、轴承、机身及制动压机蜗壳等主要部件组成。

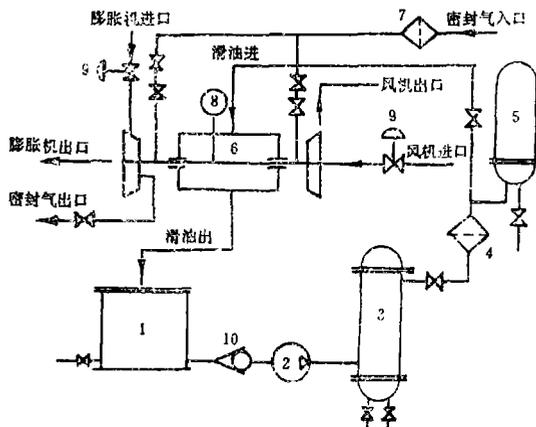


图1 膨胀机试验流程图

- 1-油箱; 2-油泵; 3-冷却器; 4-过滤器; 5-油压力容器; 6-膨胀机;
7-密封器过滤器; 8-转速传感器; 9-气动薄膜调节阀; 10-单向阀

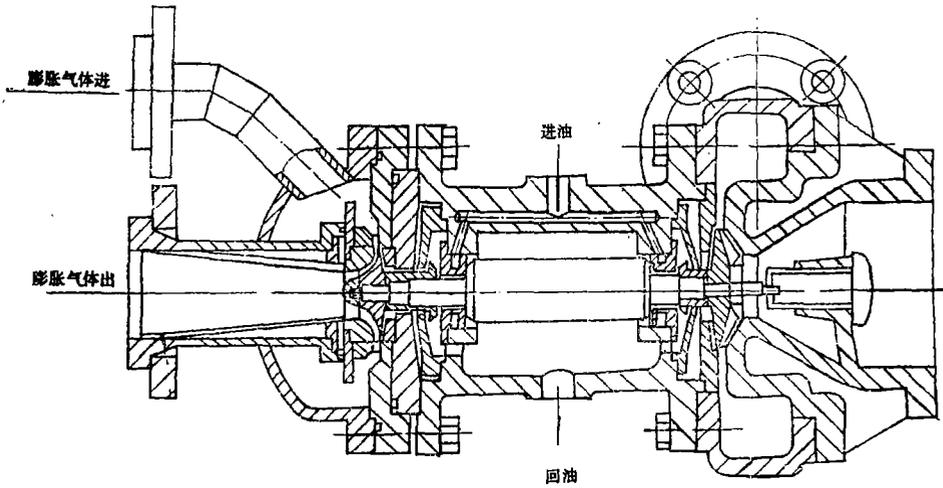


图 2 PT501型透平膨胀机

主要设计参数

工 质	天然气	
进口压力	39.7 kg/cm ²	(绝压, 以下均为绝压)
进口温度	223K	
出口压力	18 kgf/cm ²	
流 量	3000Nm ³ /h	
转 速	53000rpm	
等熵效率	$\eta_s \geq 0.70$ (流程要求 $\eta_s \geq 0.65$)	

二、机组特性，带液与固体微粒对机组性能的影响

机组从1982年11月2日开始到1983年底，长期稳定运转已无故障运转6000多小时。

1. 机组特性

膨胀机的等熵效率是通过 BWRS 方程电算得到，测得的特性曲线见图 3。温度测试误差 $\pm 0.2K$ ，压力测试误差 $0.24 kg/cm^2$ ，由压力、温度测试误差所引起的等熵效率测试误差为

$$\Delta \eta_s = \sqrt{\left(\frac{\partial \eta_s}{\partial T} \cdot \Delta T\right)^2 + \left(\frac{\partial \eta_s}{\partial P} \cdot \Delta P\right)^2} = 0.0268$$

流量测试误差 $\Delta G/G = 0.03$

由图 3 可见，虽然 PT501 机组是高转速、小流量、小功率机组，但运转效率仍达到 70% 以上，当进口压力从 $28 kgf/cm^2$ 到 $40 kgf/cm^2$ 间变化，只要机组在最佳特性比 U_1/C_0 附近范围内运转，等熵效率变化不大，机组的流量在出口压力保持不变时与进口压力呈线性增加，并随转速下降而略有增加。

2. 液滴及固体微粒对透平膨胀机的影响

中坝气田运转的 PT501 机组，当进口压力 $P_0 = 34 kgf/cm^2$ 以下，进口温度 $T_0 = 221K$ 左右时通常出口带液量在 6% 以下（重量%，以下均相同。）但当进口压力 $P_0 > 34 kgf/cm^2$

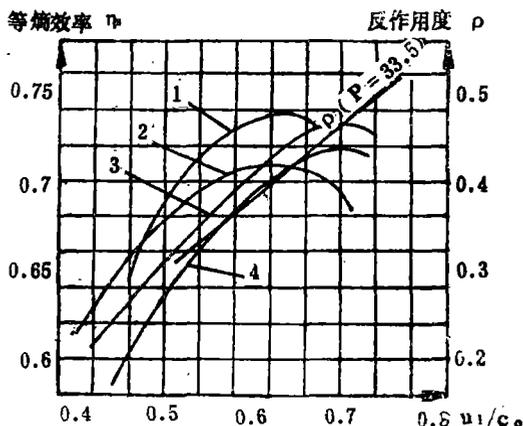


图3 等熵效率 η_s 、反作用度 ρ 与特性比 u_1/c_0 间关系

出口压力 $P_2 = 18 \text{ kgf/cm}^2$ ，进口压力 $P_0 \text{ kgf/cm}^2$ ；最大滞液量 L
 1- $P_0 = 28 \quad L = 0.06$ ；2- $P_0 = 40 \quad L = 0.13$ ；3- $P_0 = 37.5 \quad L = 0.095$ ；
 4- $P_0 = 33.5 \quad L = 0.09$

时带液量迅速增加，如进口压力 $P_0 = 40 \text{ kg/cm}^2$ ，进口温度 $T_0 = 213 \text{ K}$ 时，膨胀机进口处带液量曾达6.7%左右，出口温度 $T_2 = 187 \text{ K}$ 。出口带液量达到13%。此处膨胀机入口气流中还混有相当数量的固体粒子。这些粒子及液滴对膨胀机的正常运转及使用寿命带来很大的影响。

气体中的带液量及固体粒子的数量目前我们尚无适当方法加以精确测定。本文带液量数据是按BWRS方程由电算得到，固体粒子尺寸由万能工具显微镜中放大50倍后测得。

(1) 液滴及固体微粒对机组动力性能的影响

膨胀机入口气流中混入的固体粒子或是气流中含水量过高，在低温下形成冰粒子及固体的烃类水合物，对转子的动力性能将产生很大的影响。

当固体粒子直径大于0.1 mm时，影响特别严重，PT501机组中，由于转速高，体积流量小，膨胀机喷咀叶片高度只有1.2 mm，个别较大颗粒无法顺利通过喷咀流道的喉部，而造成喷咀流道堵塞。我们在拆机中曾几次发现堵塞现象，且常常是相邻几个流道同时被堵，并发现在被堵塞的喷咀叶片附近的叶轮盖板被冲刷特别严重。经测定被堵塞粒子尺寸多数是0.2 mm左右，可见较大粒子进入蜗壳后受离心力作用而沿蜗壳外沿运动至蜗壳某一处（常常是尾部）进入喷咀，这样会造成机组动力性能变坏，严重时甚至会造成喷咀出口压力波动。较大粒子集中在相邻几个喷咀流道出口还会冲击叶轮，引起轴承油膜不稳定而振荡，加速轴承磨损，更严重的是当固体粒子进入轮盖或轮背间隙处后，不仅引起磨损，影响转子的动平衡精度，还会迫使转子轴向串动，加速止推轴承的磨损。为此，我们在膨胀机进口处加装了一只过滤器，滤除这些较大的颗粒，使机组运转情况大为改善。在长达4500多小时的正常运转记录中，不再有原因不明的转速波动曲线。从拆车检查中也不再有不正常的磨损痕迹。虽然在膨胀机入口气流中仍含有相当数量的直径为几个 μm 到几十 μm 的固体粒子，但对转子的动力性能已无明显的影响。

机组运转中通常出口带液量都小于6%，其液滴尺寸按文献介绍都小于 $2 \mu\text{m}$ ，这对转子动力性能并无影响。在试验中我们对进口带液量达6%、出口带液量达13%的工况进行三天连续运转。在转速、轴承温度、供油状况及机组运转时的声音都未发现异常。证明如果能

解决液滴对流道的侵蚀问题，机组能在带液量达13%甚至更大的情况下稳定运转。

(2) 液滴及固体粒子对流道表面的侵蚀

a. 侵蚀现象 PT501机组大多是在带液下运转，受到液滴及固体粒子的侵蚀。在经过4000多小时的运转后，拆机检查中发现：喷咀斜切口部分可见明显麻点，侵蚀区有一明显的边界。叶轮进口处叶背部分约有4.8mm长一段被侵蚀，表面呈麻点，特别在进口点叶背根部侵蚀较为严重，该处棱角被磨蚀，磨损量达0.1~0.2mm。叶轮背部靠轮毂约10mm宽的圆环部分也可见细微点痕。工作轮盖板处也可见明显的侵蚀痕迹，其余流道无可见变化。

b. 粒子运动轨迹及其对流道表面的侵蚀

膨胀机入口过滤器基本上滤除了尺寸大于50μm以上的粒子，由于压力降的限制而无法滤除小于50μm尺寸的粒子。当气流进入喷咀在喷咀流道内膨胀而速度逐渐增加时，这些随气流进入喷咀的粒子受到气流的拖泄并被加速。由于气流拖泄力及因流道弯曲而产生的离心力的作用（忽略较小的重力作用），它们将偏离主流道。同时由于粒子的密度远大于气流的密度，使它们的速度只达到主流速度的百分之几到几十。粒子的密度越大，尺寸越大，与主气流的速度相差越大。但由于喷咀内气流加速主要是在喉部前的主体段进行，并在喉部达到最高速度，因此粒子在喷咀流道内偏离并不大。对喷咀叶片的侵蚀并不严重。

在气流进入叶轮入口处时，因粒子速度 C_1' 小于气流的速度 C_1 ，造成粒子进入叶轮时的相对入口角 β_1' 大于气流的相对入口角 β_1 而偏离 90° 的叶片角，见图4。粒子越大速度越小，相对入口角越大。因而这些粒子将被后面的叶片赶上而发生碰撞，造成对叶片背部的侵蚀，而且越接近进口点，碰撞的粒子尺寸越大，数量越多，就造成叶片进口处叶背4.8mm一段被侵蚀，而且越接近入口点，侵蚀越严重。从叶片侵蚀情况大致可推算出造成侵蚀粒子的速度一般小于气流速度的45%。

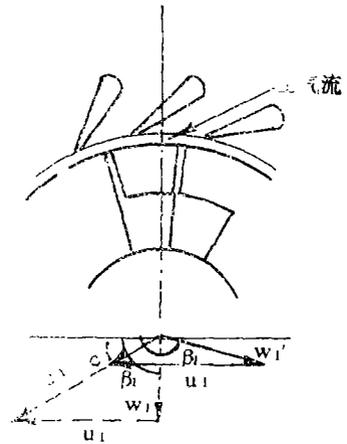


图4 工作轮入口处的速度三角形 虚线为气流速度三角形，实线为粒子的速度三角形

粒子在工作轮入口处与叶片碰撞后，受碰撞力与离心力作用被抛离叶轮，从而撞击喷咀叶片斜切口部分，并被反弹回来，这些粒子经几次碰撞后被气流带走，因此使喷咀叶片斜切口处受到侵蚀。

进入叶轮后的粒子还会受离心力作用而偏离主流道，即偏向流道顶部因而碰撞轮盖，并曲折地通过叶片流道顶部而被带出叶轮，从而侵蚀了轮盖。

在叶轮流道壁面上附着的液体在离心力作用下沿着流道壁面向上爬行，最后被抛离叶轮，再加上气流的冲击及叶背部分涡流影响，促使叶片进口处叶背根部受到严重侵蚀。

但当带液量较小时，其液滴尺寸较小，它们与气流速度基本一致，其轨迹偏离主气流较小，不致对流道造成明显的侵蚀。

(3) 带液及固体粒子对膨胀机等熵效率的影响

表1中列出最佳特性比 u_1/c 。附近运转下的部分参数，从表1及图3都可看出，随带液量的增加，等熵效率曲线逐渐下降。

带液及固体粒子使膨胀机等熵效率下降的主要原因是：a. 粒子及液滴冲击叶轮叶背，产生制动力矩；b. 液滴冷凝时放热与气流间非等熵的传热过程；c. 粒子及液滴与气流产

生摩擦, 以及叶轮中液滴受离心力作用沿叶片流动产生磨擦并减少叶片作功能力等。但当带液量小于6%时, 一般液滴尺寸小于 $2\mu\text{m}$, 因此对效率影响较少。

表1 PT501透平膨胀机性能参数表

转速	进口压力	进口温度	进口带液量	出口压力	出口温度	出口带液量	特性比	等熵效率	流量	功率
rpm	ata	K	Wt%	ata	K	Wt%	$\frac{u_1}{c_0}$		$\frac{\text{Nm}^3}{\text{h}}$	kW
50300	40.2	213.6	0.067	18.5	186.95	0.132	0.685	0.70	3200	26
50000	39.2	213.33	0.067	18.45	187.4	0.129	0.688	0.71	3087	24.9
49000	33.3	219.53	0.0418	18	191.52	0.082	0.684	0.72	2460	18.5
50000	35.8	219.16	0.0177	18.25	193.39	0.0612	0.684	0.74	2460	20.5
45000	32.4	221.91	0.0354	18	200.66	0.0721	0.684	0.71	2390	17.5
4200	28.7	222.23	0.0319	17.4	203.77	0.0612	0.643	0.74	2060	13.95
53000	37.7	218.56	0.0457	18.1	191.42	0.095	0.71	0.74	3070	27
50000	37.5	218.67	0.0455	18.1	191.85	0.094	0.67	0.73	3080	26.6

(4) 带液及含固体粒子后膨胀机流道改进的设想

从中坝试验结果可见, 液滴及固体粒子会对流道表面产生侵蚀, 因此我们对喷嘴叶片及叶轮的材料及加工工艺作了许多改进, 使流道经受到这些侵蚀后, 叶片几何尺寸并无明显变化。为了更好适应带液运转工况, 特别是大于10%的带液工况, 还必须对膨胀机的叶轮的叶片型状按粒子运动轨迹作适当的修正, 并使气流进入叶轮时有一适当的冲角。

四、天然气透平膨胀机的特点

天然气与其它低温透平膨胀机的工质有很大的区别, 它不仅可燃易爆, 饱含水分, 还常常混入相当数量的固体微粒, 因此必须对透平膨胀机组的结构进行一些改进才能适应油气田环境。

1. 轴承 天然气透平膨胀机焓降大, 一般在 $15\sim 35\text{kcal/kg}$ 之间, 机组转速高, 轴承的可靠性及使用寿命常常是机组长期稳定运转的关键。轴承中推力轴承又是最薄弱的环节, 特别是中压机组轴向推力大, 因而必须对轴承结构作相应的改进。同时要加强对转子的监视及轴向推力的调节。PT501机组上使用的是动压油轴承, 其线速度达 70m/s 。这在国内透平膨胀机中是首次尝试, 但经过长期运转证明, 在高速轻载的小型转子中, 动压油轴承能长期运转在线速度为 $65\sim 70\text{m/s}$ 的范围内。

2. 天然气对润滑油的稀释 天然气对润滑油具有稀释作用, 这是国内外均有报导的, 这将严重影响轴承的承载能力及润滑油的使用寿命, 甚至导致机组的损坏。为此我们在结构上采取措施, 尽量减少轻油与润滑油的接触, 采用中低压两种密封气, 并加强油气分离, 减少因天然气溶解于润滑油而造成油的稀释。在试验过程中现场测定了天然气对透平油的稀释而造成的粘度值下降, 发现其稀释作用并不严重, 只要采取适当措施防止轻油混入润滑油及保证轴承的安全供油, 油轴承是可以在油气田透平膨胀机中使用的。

3. 天然气透平膨胀机的调节 天然气透平膨胀机通常用同轴压缩机来吸收功率。为了适应油气田气量,压力的变化工况,如何使机组有良好的调节性能,使膨胀机与压缩机得到良好的匹配使机组工作在最佳工况而达到较高的效率,这是天然气透平膨胀机设计中需要着重考虑的问题。

4. 密封结构及材料 天然气易燃易爆,因此必需选择合适的密封结构及材料,我们对机组及供油装置采用全封闭结构,在轴封上采用中低压两种密封气,既防止润滑油的冻结又调节了转子的轴向力,保证机组的长期稳定运转。为了减少密封气量,我们进一步试验了合适的轴封结构与间隙,使密封气排气量从原来的 $100\text{N m}^3/\text{h}$ 以上减少到 $40\text{N m}^3/\text{h}$ 左右。

5. 气体中的含水量对机组运转的影响 天然气中常常含有饱和水蒸气,如果膨胀机入口气流的水分含量偏高就会对膨胀机组的稳定运转造成很大的威胁。在低温下水不仅会析出,形成固体的冰粒或冻结在流道表面,更严重的是与轻烃形成乳白色的固体水合物,这些将严重地破坏转子的动力性能,并对喷嘴,叶轮叶片造成很大的损害。在试验中机组曾在 $300\sim 400\text{ppm}$ 的含水量中运转几个月,常发现因冻结而使转速不稳定,甚至被冻住;也在含水量高达 2000ppm 以上工况下运转三小时,当时机组明显地出现不正常的运转声,经过长期试验证明,为了保证机组的安全,膨胀机入口气体的水分含量应该控制在 10ppm 以下。

五、结 论

通过6000多小时的试验运转,证明PT501机组完全能适应油气田及带液量小于10%的工况,也证明动压油轴承能够在 $65\sim 70\text{m/s}$ 的线速度下长期稳定运转。通过带液试验初步了解带液对机组性能的影响,为进一步提高机组性能及进行较大带液量的试验打下良好的基础。

参 考 文 献

- [1] 两相流动透平膨胀机译文集,四川空分厂,四川深冷设备研究所,1979。
- [2] 计光华,透平膨胀机,机械工业出版社,1982。
- [3] 透平膨胀机,浙江大学流体力学教研组。
- [4] 计光华,气-液两相透平膨胀机通流部分液滴尺寸的确定,西安交通大学科学技术报告,1979。
- [5] 计光华,气-液两相透平膨胀机径流工作轮中微粒运动轨迹的电子计算模拟,西安交通大学科学技术报告,1980。
- [6] 回归分析方法,中国科学院数学研究所数理统计组编,1974。

OPERATIONAL TEST OF MEDIUM PRESSURE TURBOEXPANDER IN A NATURAL GAS SEPARATION PLANT

Zhang Jialei

Sichuan Cryogenic Equipment Research Institute

Abstract

Features of natural gas turboexpander, especially of type PT501 medium pressure and small output expander, are observed after a long period of its operational test in a natural gas separation plant. The influence of solid particles and liquid droplets mixed in the gas on the performance of the machine is analyzed according to the results of the test. Moreover, a preliminary study is made on the phenomena and mechanism of the flow passage erosion caused by the particles and droplets, and some tentative ideas are also put forward for modifying the shapes of the turbine blades involved with condensing liquids.