

YL3000 型烟气透平变工况特性 计算与分析

中国科学院力学研究所 厉树廉

一、引言

在设计透平级时，透平的几何尺寸总是根据某一特定的工况参数计算出来的，这一工况通常称为设计工况。

但是任何透平级总是不可能稳定在设计工况下工作，随着外界参数的变化，流经透平的工质流量 G 、初温 T_0^* 、初压 P_0^* 以及膨胀比 π_T 都会相应地变化，最终结果将会引起透平功率 N 和效率 η_T 随之变化。因此，透平的变工况特性计算已广泛地受到重视，尤其在生产实践中，需要确切地知道它们在不同工况下效率和通流能力的变化规律，以寻求最理想的设计。

在炼油厂催化裂化装置能量回收系统中(见图 1)，烟气透平是与主风机、电动机串联起来工作的，同时进入烟气透平的烟气压力、温度、流量等与装置工艺操作条件密切相关。根据装置中再生器和反应器的二器平衡、操作调节等某些特点的要求，烟气透平在运行时，需不断地调节入口的控制蝶阀和双动滑阀，以获得符合装置要求的合理工况。至使烟气透平进口气体参数随着工艺操作的变化而变化。因此需要分析烟气透平在非设计状态下工作时参数的变化对其性能和特性的影响，以提供操作上的合理依据。同时对既定工艺操作条件下如何设计烟气透平提供了依据。为了达到这些目的，就必须对烟气透平变工况特性进行分析计算，否则就难以设计出性能良好的烟气透平。

此外，为了适应各种不同生产能力的催化裂化装置能量回收的需要，根据处理量和运行参数(即流量、压力、温度)的不同，可以在已有经验的基础上进行新机组的设计，也可以在

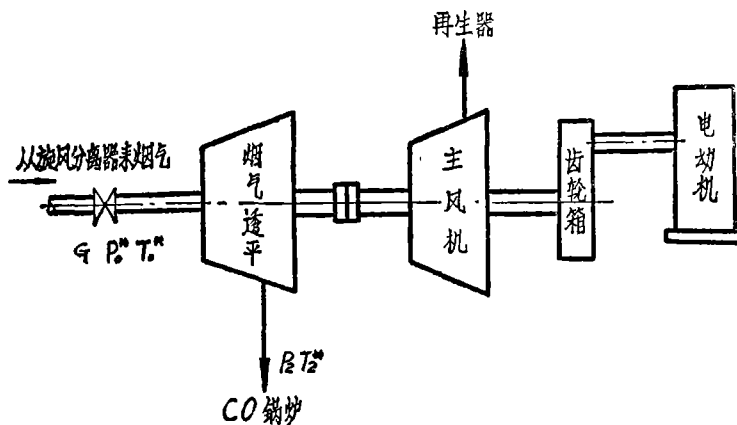


图 1 催化裂化装置能量回收系统示意图

满足一定效率、流量和磨损寿命的情况下对已设计运行成功的烟气透平进行修改,通过调整个别零件的几何尺寸来改变烟气透平的通流量,以满足生产的要求。为此可以采取如下措施:

1. 加长或者切短动叶、导叶的叶高;
2. 改变导叶或动叶的安装角度;
3. 改变导叶、动叶叶片数目以改变通流面积(可以使喉部面积变化以改变流量)。

因此,研究改变烟气透平某些零件几何尺寸的变工况特性是很有必要的,以便于进行分析比较,选取较佳方案。

二、计算方法简介

下面对 YL3000 型烟气透平进行变工况计算的方法进行简单的介绍。

YL3000—I 型烟气透平的设计参数如下:

- | | |
|--------------------------------|-------------------------|
| 1. 烟气进气温度 t_0^* | 600~640°C |
| 2. 烟气进气滞止压力 p_0^* | 2.45 公斤/厘米 ² |
| 3. 烟气排气压力 p_2 | 1.1 公斤/厘米 ² |
| 4. 烟气体积流量 Q | 16.2 标米 ³ /秒 |
| 5. 烟气重量流量 G | 20.03 公斤/秒 |
| 6. 膨胀比 π_T | $p_0^*/p_2=2.237$ |
| 7. 绝热焓降 H_0^* | 47.8 大卡/公斤 |
| 8. 烟气透平转速 n | 6320 转/分 |
| 9. 速比 u/C_0 | 0.398 |
| 10. 烟气平均定压比热 $C_p^{\text{平均}}$ | 0.2985 大卡/公斤·度 |
| 11. 烟气气体常数 R | 30.6 公斤·米/度 |
| 12. 烟气比热比 K | 1.315 |
| 13. 要求烟气透平效率 η_T | $\leq 70\%$ |

烟气透平用一元分析的计算方法已比较成熟^[1],计算中只考虑了平均直径上参数的变化,用以代表整个级特性,因而带有一定的近似性。在几何条件给定的情况下,透平级压比逐渐增高时,级内有可能出现超音速的现象(和选择导、动叶面积比有关),或是在导叶先出现超音速,或是在动叶先出现超音速。当出现超音速流动后,由于气体在斜切口的偏折、流量的阻塞以及超音速时气流的特点等,单用一元简化方程组分析计算已不能全面反映通流特性,而且在各种工况下,沿叶高反动度和冲角都是变化的,因此为了更准确地估算性能、分析磨损情况,我们应用了二元变工况(带跨音)计算及其程序^[2],并在电子计算机上进行了大量的计算。

文献[1]的二元跨音计算中考虑了叶型损失、二次流损失、叶片端部泄漏损失和激波损失,同时也考虑了叶栅尾部三角区的气体流动特点,进行了效率迭代与气流角迭代,并在计算中假定了气流绝热、稳定。

计算用的基本方程如下:

1) 连续方程:

$$\text{绝对坐标} \quad \nabla \cdot (\rho \vec{c}) = 0$$

相对坐标 $\nabla \cdot (\rho \vec{w}) = 0$

2) 力学方程:

绝对坐标 $\frac{d\vec{c}}{dt} = -\frac{1}{\rho} dp$

相对坐标 $\frac{d\vec{w}}{dt} - \omega^2 \vec{r} + 2\vec{\omega} \times \vec{w}$

3) 能量方程组:

绝对坐标 $dH = 0$

相对坐标 $dI = 0$

4) 状态方程: $p = \rho RT$

5) 热力学方程: $T ds = dh - \frac{1}{\rho} dp$

6) 损失关系式:

$$\Delta S = R \ln \left\{ 1 + (Y_P + Y_S + Y_K) \left[1 - \left(1 + \frac{K-1}{K} M_2^2 \right)^{\frac{1}{1-K}} \right] \right\}$$

式中 Y_P ——叶型损失;

Y_S ——二次流损失;

Y_K ——叶片顶部或根部泄漏系数。

7) 出口气流角关系式:

$$\beta_2 = \alpha_2 - \sum_{i=1}^3 C_i M_2^{i-1} + 4t/e$$

其中

$$C_i = \sum_{j=1}^3 C_{ij} \alpha^{j-1}$$

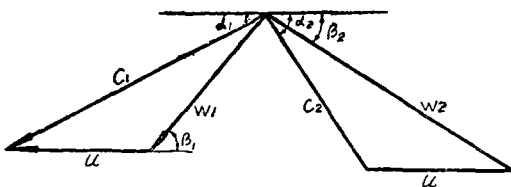


图 2 烟气透平速度三角形平面图

以上方程组用来解亚临介条件下气流参数,也可以解临介和超临介条件下气流参数,不过在临介和超临介时,需另立方程组与以上方程联立求解,尤其在超临介状态时,尚需对尾部三角区列出方程组与前面方程组联立求解。其计算用的速度三角形如图 2 所示。

三、计算内容及结果

根据烟气成份计算得烟气气体常数 $R = 30.6$, 烟气比热比 $K = 1.315$ 。其中没有考虑催化剂粒度和浓度对烟气透平热力性能的影响,因而可能会有一定的误差。

下面对 YL3000—I 和 YL3000—II 烟气透平在导叶与动叶不同安装角和不同叶高下作了变工况计算。现将变工况计算结果归纳如下:

1. YL3000—I 烟气透平在安装角 α_y 为 41° , 46° 和 47.3° 时的变工况计算结果列于表 1。

表 1

导叶安装角 $\alpha_y = 41^\circ$

$\bar{G} = \frac{G\sqrt{T_0^*}}{P_0^*}$	π_T	u/C_0	η_T	\bar{N}
0.021212	1.43	0.6320	0.8052	0.0837
0.021818	1.48	0.6032	0.8112	0.0923
0.022443	1.56	0.5726	0.8076	0.1027
0.023059	1.67	0.5373	0.7952	0.1160
0.023671	1.83	0.4978	0.7791	0.1334
0.023859	1.93	0.4822	0.7678	0.1378
0.02392	1.97	0.4757	0.7632	0.1450
0.02398	2.02	0.4682	0.7573	0.1488
0.024105	2.19	0.4476	0.7399	0.1599
0.02416	2.41	0.4246	0.7186	0.1727
0.024191	2.56	0.4119	0.7041	0.1793
0.024179	2.72	0.4003	0.6908	0.1846

导叶安装角 $\alpha_y = 46^\circ$

$\bar{G} = \frac{G\sqrt{T_0^*}}{P_0^*}$	π_T	u/C_0	η_T	\bar{N}
0.024007	1.40	0.6754	0.7230	0.0713
0.024622	1.44	0.6478	0.7283	0.0775
0.025238	1.49	0.6214	0.7328	0.0840
0.025853	1.51	0.6006	0.7498	0.0897
0.026459	1.57	0.5742	0.7485	0.0975
0.027084	1.65	0.5475	0.7461	0.1061
0.027700	1.74	0.5194	0.7416	0.1162
0.028377	1.91	0.4799	0.7281	0.1321
0.028439	1.94	0.4748	0.7251	0.1399
0.028500	1.97	0.4689	0.7185	0.1364
0.028552	2.02	0.4613	0.7129	0.1396

导叶安装角 $\alpha_y = 47.3^\circ$

$\bar{G} = \frac{G\sqrt{T_0^*}}{P_0^*}$	π_T	u/C_0	η_T	\bar{N}
0.02630	1.496	0.6312	0.7250	0.0844
0.027029	1.563	0.5988	0.7246	0.0930
0.027751	1.648	0.5656	0.7217	0.1030
0.028472	1.777	0.5269	0.7115	0.1158
0.028616	1.816	0.5174	0.7075	0.1192
0.028689	1.839	0.5122	0.7050	0.1211
0.028761	1.865	0.5064	0.7021	0.1233
0.028833	1.897	0.4999	0.6985	0.1257
0.028905	1.940	0.4918	0.6935	0.1288
0.028977	2.024	0.4774	0.6830	0.1343
0.029049	2.123	0.4628	0.6709	0.1396

相应的特性计算曲线见图 3, 图 4和图 5。

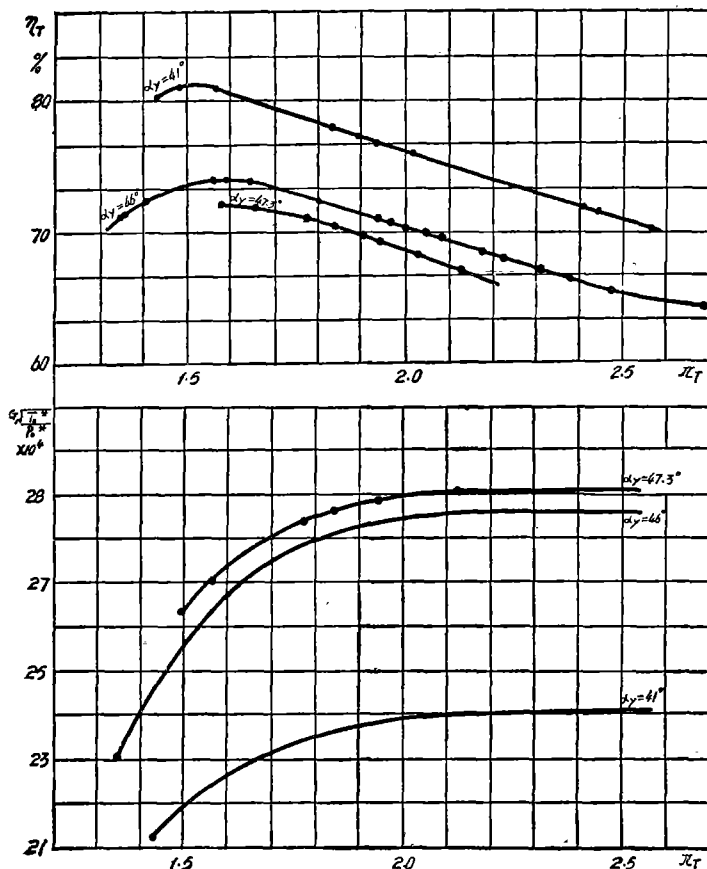


图 3 YL3000—I 烟气透平特性计算曲线

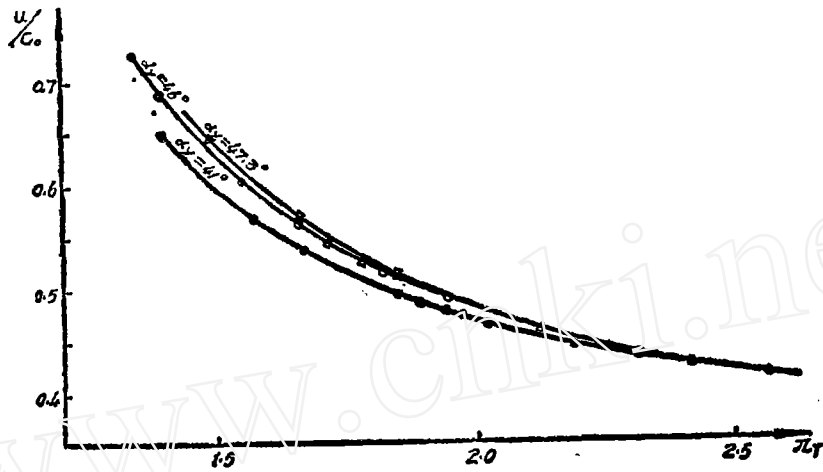


图 4 YL3000—I 烟气透平特性计算曲线

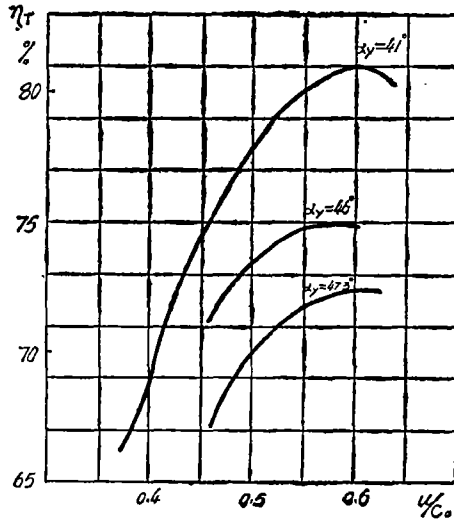


图 5 YL3000—I 烟气透平特性计算曲线

2. YL3000—I 烟气透平考虑制造误差，即导叶实测面积比设计计算面积($\alpha_T=46^\circ$)大 8.1%，动叶实测面积减小 4.7% 的计算结果和当动叶安装角增加 1.5° ， 4° 时的计算结果(表略)见图 6。

3. YL3000—II 烟气透平在安装角 α_T 为 38° ， 38.5° ， 39° ， 40° 时的变工况计算结果列于表 2。

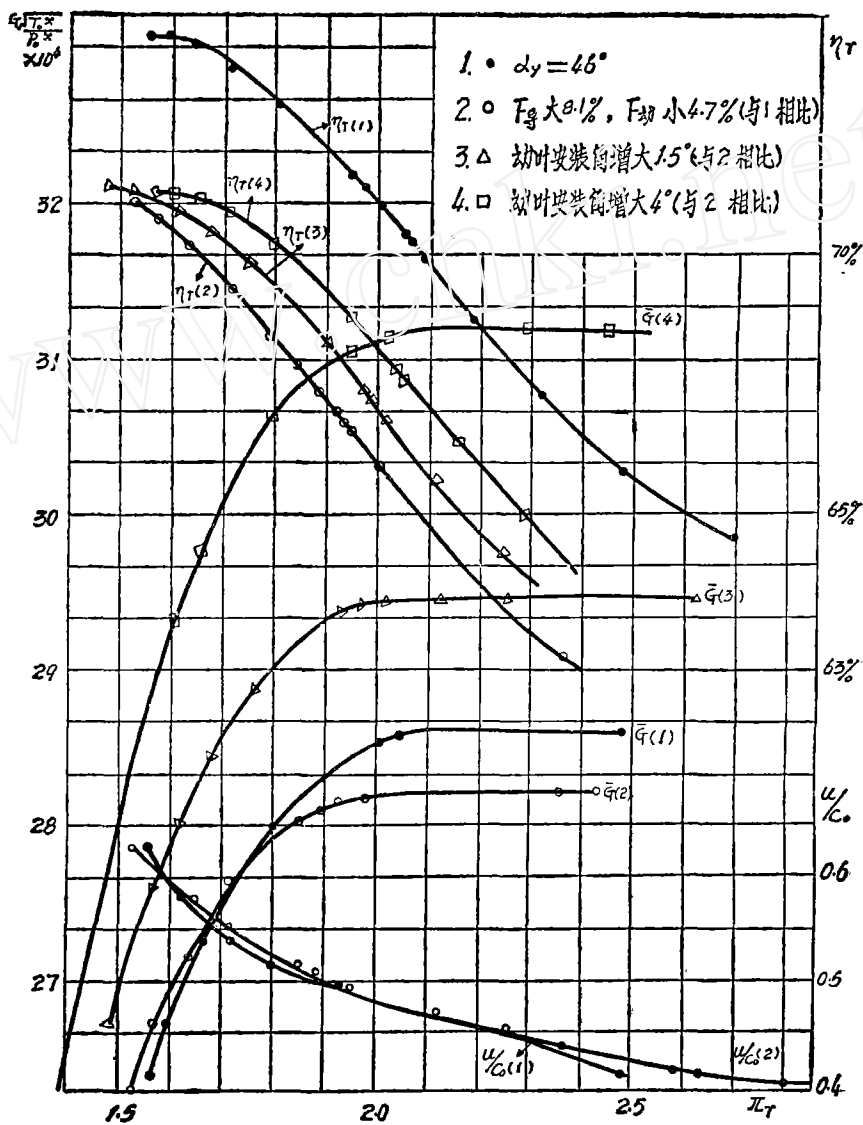


图 6 YL3000-I 烟气透平在四种导、动叶面积下的特性计算曲线

表 2

导叶安装角 $\alpha_y = 38^\circ$

$\bar{G} = \frac{G\sqrt{T_0^*}}{P_0^*}$	π_T	u/C_0	η_T	\bar{N}
0.013312	1.294	0.7485	0.7351	0.0557
0.013901	1.343	0.7041	0.7546	0.0652
0.014490	1.407	0.6615	0.7647	0.0759
0.015079	1.486	0.6196	0.7719	0.0883
0.015668	1.598	0.5760	0.7735	0.1040
0.016257	1.806	0.5197	0.7726	0.1291
0.016327	1.989	0.4828	0.7803	0.1500
0.016327	2.067	0.4705	0.7815	0.1579
0.016327	2.146	0.4592	0.7828	0.1656
0.016327	2.228	0.4487	0.7836	0.1732
0.106327	2.315	0.4388	0.7840	0.1807

导叶安装角 $\alpha_y = 38.5^\circ$

$\bar{G} = \frac{G\sqrt{T_0^*}}{P_0^*}$	π_T	u/C_0	η_T	\bar{N}
0.01475	1.39	0.6730	0.7668	0.0729
0.015319	1.45	0.6346	0.7728	0.0815
0.015874	1.54	0.5957	0.7753	0.0966
0.016489	1.67	0.5527	0.7728	0.1136
0.016984	1.96	0.4889	0.7725	0.1455
0.017040	2.01	0.4811	0.7710	0.1501
0.017095	2.07	0.4718	0.7699	0.1558
0.017151	2.18	0.4563	0.7685	0.1655
0.017152	2.10	0.4559	0.7682	0.1664
0.017173	3.57	0.3552	0.7409	0.2735

导叶安装角 $\alpha_y = 39^\circ$

$\bar{G} = \frac{G\sqrt{T_0^*}}{P_0^*}$	π_T	u/C_0	η_T	\bar{N}
0.013312	1.257	0.8163	0.6662	0.0445
0.013901	1.288	0.7702	0.7045	0.0525
0.014490	1.315	0.7296	0.7497	0.0603
0.015079	1.357	0.6901	0.7753	0.0691
0.015668	1.418	0.6504	0.7817	0.0794
0.016257	1.50	0.6109	0.7814	0.0915
0.016846	1.610	0.5699	0.7780	0.1125
0.017435	1.855	0.5067	0.7741	0.1361
0.017612	1.902	0.4988	0.7701	0.1391
0.017670	1.926	0.4944	0.7694	0.1415
0.01772	2.007	0.4813	0.7656	0.1490
0.01788	2.046	0.4756	0.7636	0.1523

导叶安装角 $\alpha_y = 40^\circ$

$\bar{G} = \frac{G\sqrt{T_0^*}}{P_0^*}$	π_T	u/C_0	η_T	\bar{N}
0.015874	1.34	0.7103	0.7533	0.0651
0.016429	1.38	0.6773	0.7814	0.0727
0.016984	1.42	0.6442	0.7955	0.0815
0.017539	1.46	0.6098	0.7958	0.0918
0.018094	1.59	0.5730	0.7856	0.1046
0.018649	1.74	0.5323	0.7728	0.1212
0.019204	2.04	0.4744	0.7549	0.1504
0.019225	2.08	0.4698	0.7523	0.1529
0.019237	2.10	0.4671	0.7507	0.1546
0.019249	2.21	0.4533	0.7420	0.1627
0.019237	2.49	0.4256	0.7221	0.2002

相应的特性计算曲线见图 7, 图 8 和图 9。

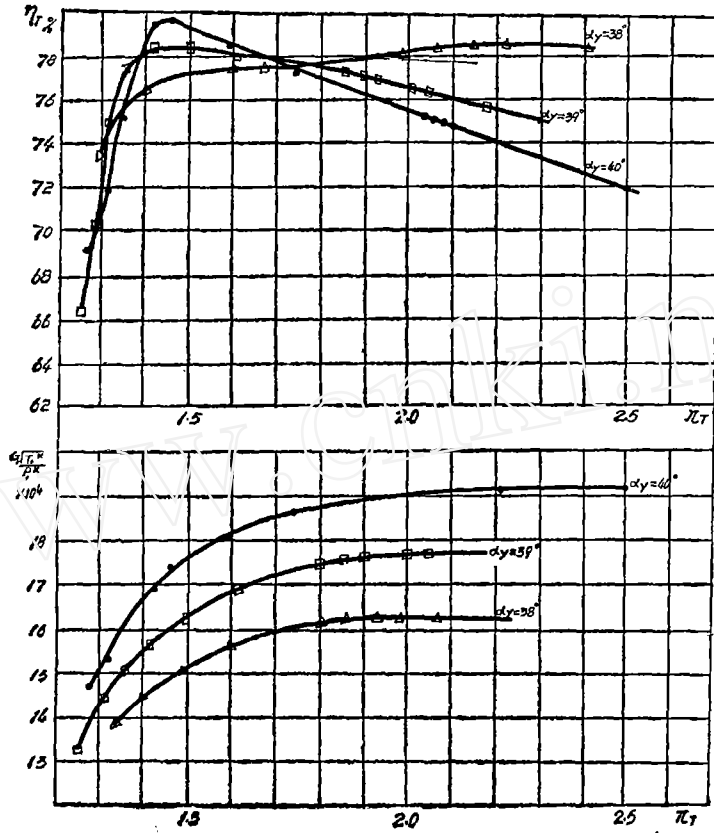


图 7 YL3000—II 烟气透平特性计算曲线

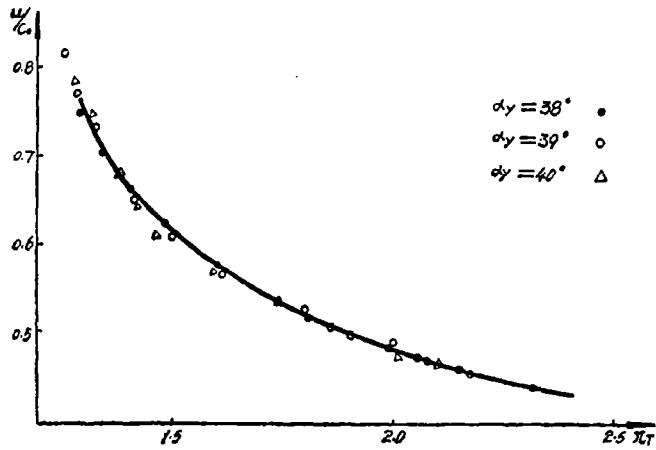


图 8 YL3000—II 烟气透平特性计算曲线

4. YL3000—I 烟气透平在 $\alpha_y = 41^\circ$ 时叶高由 $l = 96$ 毫米减小到 $l = 84$ 毫米的变工况计算结果列于表 3。

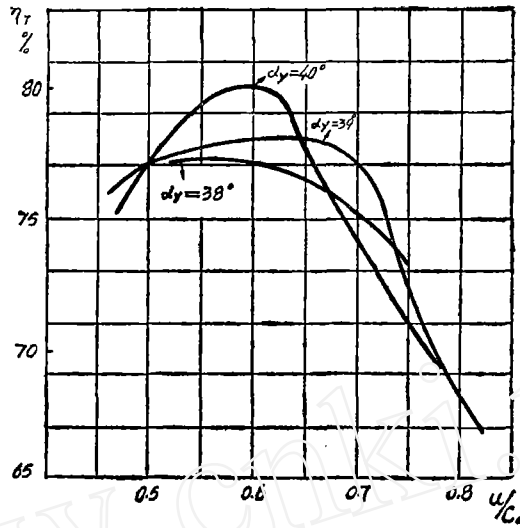


图 9 YL3000-II 烟气透平特性计算曲线

表 3

$\bar{G} \approx \frac{G\sqrt{T_0^*}}{P_0^*}$	π_T	u/C_0	η_T	\bar{N}
0.015668	1.287	0.7838	0.6939	0.0528
0.016021	1.308	0.7595	0.7074	0.0558
0.016375	1.329	0.7364	0.7206	0.0601
0.016728	1.352	0.7143	0.7328	0.0646
0.017081	1.374	0.6939	0.7456	0.0692
0.017435	1.395	0.6739	0.7608	0.0737
0.017788	1.415	0.6553	0.7772	0.0785
0.018142	1.439	0.6367	0.7902	0.0836
0.018495	1.470	0.6177	0.7987	0.0920
0.018848	1.509	0.5982	0.8025	0.0953
0.019202	1.560	0.5775	0.8014	0.1024
0.019555	1.628	0.555	0.7949	0.1096
0.019909	1.727	0.5292	0.7820	0.1215
0.020262	1.839	0.5031	0.7765	0.1336
0.020330	1.878	0.4961	0.7720	0.1366
0.020368	1.899	0.4924	0.7695	0.1387
0.020403	1.923	0.4884	0.7665	0.1409
0.020439	1.950	0.4841	0.7637	0.1428
0.020474	1.979	0.4796	0.7606	0.1452
0.020510	2.013	0.4745	0.7568	0.1478
0.020545	2.054	0.4690	0.7523	0.1507

相应的特性计算曲线见图 10。

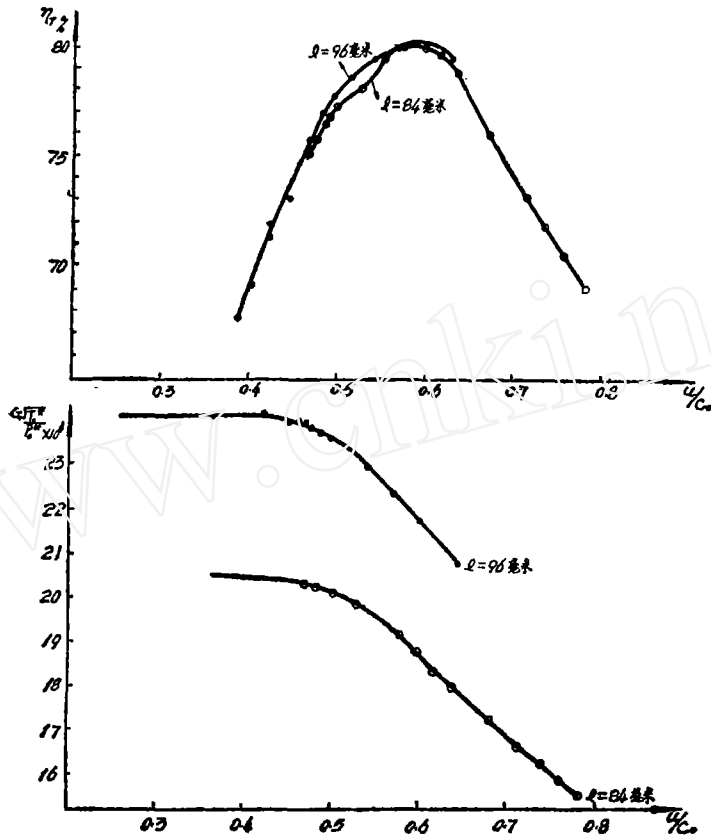


图 10 YL3000—I (叶高 $l=96$ 毫米)和 YL3000—II (叶高 $l=84$ 毫米)特性计算曲线(导叶安装角 $\alpha_y=41^\circ$)

5. 综合以上计算可以整理出烟气透平随导叶安装角度的增加其堵塞流量的变化规律和 $\pi_T=2.0$ 左右的效率变化规律, 详见图 11、12。

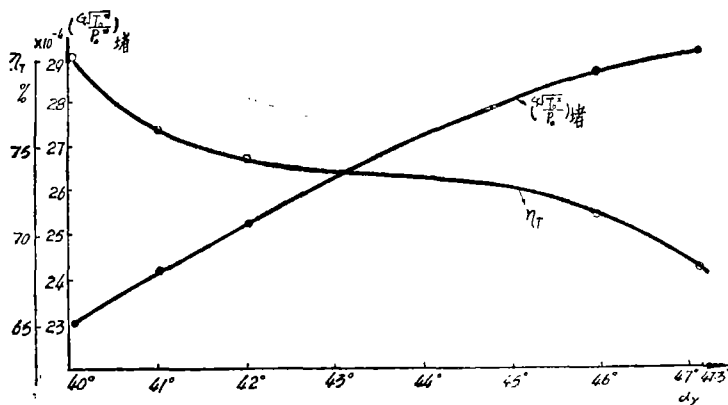


图 11 YL3000—I 烟气透平几种导叶安装角的堵塞流量和 $\pi_T=2.02$ 下的效率参考曲线

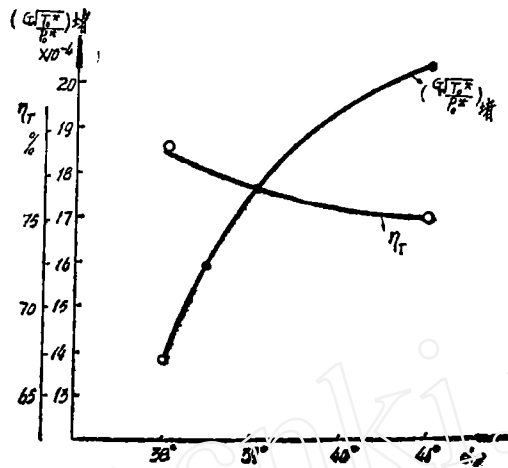


图 12 YL3000— I 烟气透平几种导叶安装角的堵塞流量和 $\pi_T=2.01\sim 2.06$ 时的效率参考曲线

四、对计算结果的分析

1. 在烟气透平转速不变的条件下, 流量是随着膨胀比的变化而变化的。若膨胀比增加, 则 λ_c 随着增加, 从而使得 $q(\lambda_c)$ 的增长速度逐渐缓慢。在低膨胀比下, λ_c 值不大, 相应的 $q(\lambda_c)-\lambda_c$ 的曲线变化较陡, 所以此时膨胀比稍有增加, 就会引起流量的显著增加。从图 3、图 7 中可以看出, 在 π_T 小于 1.7 以前, 随着 π_T 的增加, 流量的增加速度是比较快的。而在 π_T 大于 1.7 后, 当 π_T 进一步提高时, 流量的增加就显得缓慢, 直到 λ_c 接近 1 时, 烟气透平叶片槽道喉部截面速度达到了音速, 其通流能力也将达到了某个极限值, 出现了所谓“堵塞”现象, 这时流量就不能随着膨胀比的增加而继续增大了。

2. 本文对 YL3000— I 型和 YL3000— II 型烟气透平采用了三种导叶安装角的计算, 以寻求与装置通流能力相匹配的烟气透平。流量调整的手段之一是改变导叶或动叶的安装角。改变导叶安装角往往比改变动叶安装角流量变化显著, 工艺简单而经济。当 α_γ 增加, 其通流能力也增加。但此时需考虑由于 α_γ 的变化而引起反动度 ρ 的变化对效率的影响。在本烟气透平设计工况范围内, 其 α_γ 增加, 效率 η_T 却普遍下降, 见图 11, 12, 其主要原因是随着 α_γ 的增加, 喉部面积发生了变化, 导动叶之间的跨音就从大于 1 向小于 1 变化, 导致余速损失急剧增加而致。因此今后为适应不同进口参数的烟气透平, 采取改变导叶安装角的办法需要加以限制以保证烟气透平的效率。

3. 烟气透平效率与很多因素有关, 膨胀比 π_T 也是其中之一, 从图 3, 图 7 可以看出, 在烟气透平定转速下, 随着 π_T 的增加, 有一个最佳效率点, 超过这个点效率就又会下降。它的影响主要是随着 π_T 的增加, 余速损失也就相应增加。还有反动度的提高使 u/C_0 最佳的配合改变以及流动损失增加(包括叶型损失, 二次流损失), 这些都致使效率下降。

图 3 中, YL3000— I 烟气透平在导叶安装角 $\alpha_\gamma=47.3^\circ$ 时, 其最高效率值在 $\pi_T=1.5$ 时所对应的效率上, 即 $\eta_T=0.7250$; 而当 π_T 大约增加到 2.0 时, 其效率下降到 0.6830, 效率下降了 4.2%。可以看到当在高膨胀比下, 效率对各项因素就更为敏感。因此参数的选择就应更为慎重。

又如 YL3000—Ⅰ型烟气透平，在导叶安装角 α_y 为 39° 尤其是 38.5° 时，其效率曲线在较宽的工况范围内较平坦，这是很有利的(参看图 7)。

4. u/C_0 对效率也有着极其重要的影响。随着 u/C_0 的变化，有一个最佳效率。由于本烟气透平转速受主风机限制，是一个大负荷、小 u/C_0 的透平级，在模拟 L—1 叶型时，如果要求余速损失最小，宜取较小的反动度与之匹配以保持效率不变。但考虑烟气带催化剂粒子冲蚀叶片这一流动特点，为延长叶片寿命、减小冲蚀，设计中取了较大的反动度 (ρ 接近等反动度约为 0.5)，致使烟气透平没有能在 $(u/C_0)_{最佳}$ 下工作，与最佳效率点相比，效率损失是很可观的。因此，建议以后在新设计烟气透平时，为回收更多的能量，在条件允许的情况下尽量将三机(烟气透平、主风机、电机)统一考虑为好。

5. 导、动叶面积的配比是透平设计中一个很重要的参数，不仅对反动度有着极其显著的影响，而且对通流特性和临界流动也有很大的关系。

本文对 YL3000—Ⅰ型烟气透平在四种不同的导、动叶面积下作了变工况计算，并进行了趋向性对比，见图 6。

由计算可知(表略)，这四种计算有一共同特点就是首先在动叶内流量堵塞，如在(1)基础上再减小动叶面积，其流量、效率都下降，参看图 5 中曲线(1)和(2)。当在(2)基础上使动叶安装角增加(即动叶面积增加)时，流量、效率都上升。

另外为什么在导叶安装角 $\alpha_y=41^\circ$ 时，其流量在导叶先堵塞(表 1)，而 $\alpha_y=46^\circ$ 时，流量先在动叶堵塞呢？这就是 $F_{导}/F_{动}$ 的对比对临界流动有着很大影响的缘故。当膨胀比增高时，在级内就会出现临界流动，至于究竟在导叶还是在动叶中首先出现临界，以及在什么膨胀比下出现，主要决定于面积比的大小。当采用小面积比时(如 $\alpha_y=41^\circ$)，首先在导叶中出现临界，而选用大面积比时(如 $\alpha_y=46^\circ$)，首先会在动叶中达到临界，如果面积比选择合适，还会延迟临界，即在较高膨胀比下仍保持亚临界流动。

从以上的分析可以简单的归结出如下的趋势(在设计参数和叶片几何形状不变时)：

(1) 当导叶流量先阻塞时，效率 $\eta_T \uparrow$ ；

(2) 当动叶流量先阻塞时，效率 $\eta_T \downarrow$ ；

(3) 当动叶先堵塞时，增大动叶安装角(即适当加大动叶进口面积)，可使流量 \uparrow ，效率 $\eta_T \uparrow$ 。

YL3000—Ⅰ型烟气透平的叶片是叶高由 $l=96$ 毫米切短至 $l=84$ 毫米，以适应烟气透平进口前参数的变化。由图 10 可以看出，其通流能力普遍下降，而效率相差不大，因此用加长(在保证叶片强度下)或者顶切叶高来调整烟气透平也是较好的措施之一。

五、符号

t——温度或时间；

u——圆周速度；

c——绝对速度；

w——相对速度；

ω ——角速度；

C_0 ——理想速度或者导叶进口速度；

C_p ——定压比热；

K——比热比;
R——气体常数;
 ρ ——密度或反动度;
H——绝对滞止焓;
I——相对滞止焓;
h——静焓;
M——马氏数;
 β_2 ——动叶出气角;
i——攻角;
r——半径;

\bar{N} ——折合功率, $\bar{N} = \frac{N}{GT_0^*}$;

\bar{G} ——折合流量, $\bar{G} = \frac{G\sqrt{T_0^*}}{P_0^*}$;

$\eta_{\text{总}}$ ——包括泄漏损失在内的总静压效率。

参 考 文 献

- 〔1〕 C. 3柯别列夫、H. 兀吉洪诺夫, 航空发动机涡轮计算。
- 〔2〕 葛满初, 跨音变工况计算, 中国科学院力学研究所报告, 1978年。
- 〔3〕 凌志光、厉树廉, YL3000—I 烟气轮机的气动热力设计与计算, 中国科学院力学研究所报告, 1976年。
- 〔4〕 凌志光、厉树廉、葛满初, 烟气透平的设计试验与内部二相流动的初步分析, 中国科学院力学研究所报告, 1979年。