

能量回收烟气透平气动设计的几个问题

中国科学院力学研究所 凌志光

本文分析了能量回收烟气透平工作过程的特点,在此基础上提出了一组适合于气—固二相三元流动方程组,指出当浓度及粒度十分小时,近似采用单一速度模型后,即类同于现有叶轮机气动方程组。在烟气透平具有大焓降、小速比(u/C_0)特点和二相介质中固体微粒对叶片产生磨损的条件下,为提高效率和延长使用寿命,提出并讨论了气动设计中参数选择及叶型造型方面所宜遵循的一些原则和问题。

一、引言

在催化裂化装置和高炉装置上利用烟气透平实现能量回收已在国内外进入了工业试验和实用阶段。五十年代初期,在研究使用固体燃料(煤粉)燃气轮机时,已经考虑带粉尘的高温烟气进入透平通流部份能否长期工作的问题。这里因磨损和腐蚀同时存在,对烟气透平的研究工作曾知难而退,转入了封闭循环燃气轮机。但是随着石油催化裂化装置的发展,又由于其余气能量回收经济效益引人注目,同时考虑到分离器技术的发展和带催化剂粉尘烟气对透平主要是磨损的作用,六十年代以来,开展了对催化裂化能量回收烟气透平的研制试验。根据资料分析和实践检验,采用先进的分离技术,在一定的粉尘浓度和粒度下,如果采用耐磨涂层并合理的设计烟气透平,可以使烟气透平获得3~5年的使用寿命。从而极大地促进了催化裂化能量回收装置的使用,并在高炉炉顶余气的利用上得到了推广。

从进一步节约能源和提高经济效益方面考虑,仍然存在着继续提高使用寿命和提高透平效率的问题。除需要研究应用更好的耐磨涂层以外,还必须深入研究了解透平内部二相流动规律,合理设计通流部份,达到既能提高效率,又能改善磨损的目的。可以深信,在这方面存在很大的潜力并且有大量的分析试验工作需要去做。

二、烟气透平内部工作过程特点

带有固体微粒(粉尘)的气流进入烟气透平,在静止与旋转叶列槽道内,除极细小的颗粒基本上随着气流一起运动,造成比单纯燃气有较大的粘性作用与粘性损失外,一些较大的颗粒,

由于惯性较大,必然会有明显的不同于主气流的速度,在叶片槽道内有自己特定的三元运动轨迹,通过动量以至热量交换,影响气流做功能力,并且由于在槽道内碰撞弹跳,将对叶片和壳体进行冲蚀磨损,见图1。

叶片的冲蚀磨损速率和许多因素有关,如机体与固体微粒材料性质,颗粒大小、形状、浓度和速度,碰撞弹跳方向与撞击几率等。总的说来,若气流中微粒分布愈均匀以及叶面受弹撞愈均匀,则磨损

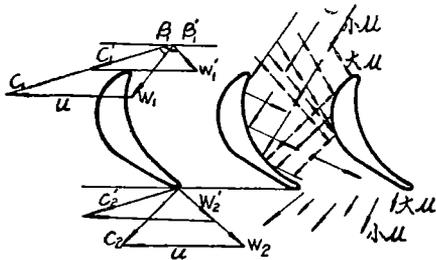


图1 气流中微粒速度三角形及在叶片槽道内的运动

也会均匀, 叶片使用寿命可更长一些。反之, 如果微粒运动轨迹使叶片某一部位有最大撞击几率, 这一部份的冲蚀磨损会加剧。因此气动设计时要尽量用气动力来调整固体微粒的运动轨迹, 当调整气动力尚不能控制局部磨损的加剧时, 就要在成型时, 重点加厚某些部位。

另一现象是随着叶片通道中气流的转弯、加速, 二次流和涡流的产生, 冷却空气(或蒸汽)的渗混以及离心力场的作用, 激波的作用等等, 颗粒将趋于集中成团, 其流动机理就更复杂。成团的微粒会对叶片起更大的冲蚀破坏作用。此外如果使用多级透平, 微粒集中成团现象会在逐级叶轮绕流中不断加剧, 造成后面级叶轮的叶片很快磨损, 因此在一定气流速度下, 烟气透平以选用单级为宜。

烟气透平中工作过程特点是气流流动效率受固体微粒存在和运动的影响, 叶片和壳体的磨损又与微粒运动轨迹有关, 后者又受到气流场的制约。因此, 一方面要统一考虑气—固二相流动的流场和各种损失的成因, 争取较好的效率; 另一方面有必要详细了解微粒的运动轨迹, 明确主要受旁部位或采取措施控制运动轨迹, 最后达到延长使用寿命的目的。

三、内部二相流动基本方程组

考察流动工质, 实际情况是高温烟气中固体微粒粒度大小不等, 有一定的分布比例, 其重量百分比随微粒直径减少而增加。结合叶轮机器的特点, 我们采用如下的假设和模型: 假定流体为可压缩, 不计本身的粘性影响(因为相对于固体微粒的作用来说, 这一影响要小得多), 微粒直径为 d_p 的球体, 微粒之间相距足够远, 其运动互不影响。在此前提下, 若先忽略热交换, 可直接写出微粒的运动方程如下:

$$m_p \frac{D\vec{V}_p}{Dt} - \vec{f}_p - \vec{f}_D = 0 \quad (1)$$

其中 m_p 为微粒质量, 微粒为球体时 $m_p = \frac{1}{6}\pi d_p^3 \rho_p$, \vec{f}_p 为流场中压力梯度对粒子产生的力, $\vec{f}_p = -m_p \frac{\nabla p}{\rho_p}$, ∇p 为气流流场压力梯度, 在简化情况下, 由稳定流动的欧拉方程可得:

$$\vec{f}_p = m_p \frac{\rho_g}{\rho_p} \vec{V}_g \cdot \nabla (\vec{V}_g)$$

式(1)中第三项 \vec{f}_D 为由粘性产生的气流对微粒的气动力(这里设微粒的惯性力比较小)。若将微粒视为球体, 这一项的确定已有很多基本研究工作可参考, 例如对于小 Re 数($Re < 1$), 球体绕流已有解析解。这里 $Re_p = \frac{d_p \rho_g}{\mu_g} (V_g - V_p)$, 当 Re 数大时(较大 d_p 或相对速度), 就需数值求解纳维—斯托克斯方程或用试验归纳公式。总的说来, 可按已发表的有关的

$$\vec{f}_D = f(\mu_g, C_D, d_p, \rho_p)$$

公式进行计算, 而 C_D 为阻力系数 $C_D = f(Re_p)$ 。

对于单纯寻求固体微粒的运动轨迹(在叶轮槽道内的微粒流场), 可以由常规的单气体的气动力学公式或程序先求出气流流场, 然后按规定的座标轴系解出粒子速度, 求出运动轨迹。但困难的是微粒与叶片壁面的撞击反弹, 也即边界条件的确定, 在文献[5, 6]中已报导了这方面的实验工作, 总结了经验公式, 可资利用。看来这方面的工作十分重要, 有待进一步深入。因为撞击反弹是导致磨损的主要因素。图 2, 3 为 Hussein 和 Tabakoff 对在叶栅槽道内

微粒流动轨迹的计算结果^[8]。

对于合理进行烟气透平流道设计及提高性能而言,还必须致力于求解悬浮体二相流场及有关参数。鉴于气体与微粒间存在相对运动,相对性随粒子而异,若对气体运动通常用欧拉坐标系,则对分散运动的微粒流场的求解最好用拉格朗日坐标系。为便于统一求解,我们试取这样的流动模型,将离散的粒子流,看作为均匀分布的连续介质,与主气流有不同的速度,

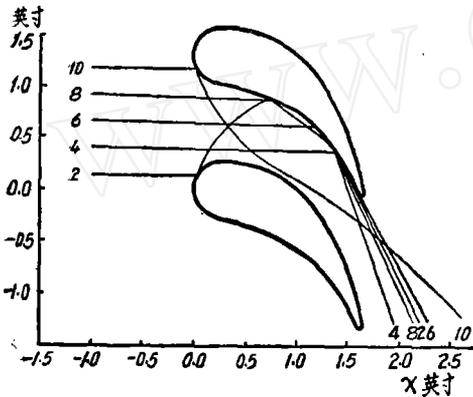


图 2 微粒在静叶中运动轨迹^[8]

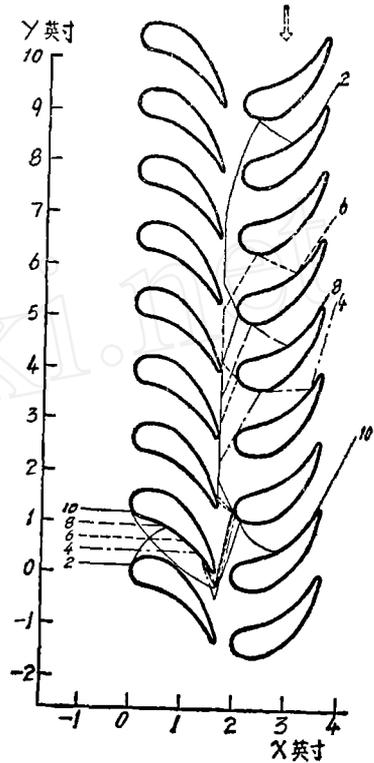


图 3 微粒在动叶中的相对运动轨迹^[8]

但是有同一压力场。当微粒浓度不大时,这一假设是可取的,这意味着对微粒场引入一个颗粒分布密度 $\bar{\rho}_P$ 的物理量。对于一定的通流截面 A ,可写成:

$$\bar{\rho}_P = \frac{\dot{M}_P}{\bar{V}_P \cdot A}$$

这样做后,若不考虑气体之间的粘性力,对于静止和旋转叶列中的绝对运动基本方程组可写成下式(推导从略):

对粒子流

$$\text{连续方程} \quad \frac{\partial \bar{\rho}_P}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\rho}_P \bar{V}_P) = 0 \quad (2)$$

$$\text{运动方程} \quad \frac{\partial \bar{V}_P}{\partial t} + (\bar{V}_P \cdot \nabla) \bar{V}_P + \frac{1}{\rho_P} \nabla p - \bar{f}_D' = 0 \quad (3)$$

$$\text{能量方程} \quad \frac{Dh_P}{Dt} + \frac{D\left(\frac{\bar{V}_P^2}{2}\right)}{Dt} - \frac{1}{\rho_P} \frac{\partial p}{\partial t} - (\bar{V}_P - \bar{V}_g) \cdot \bar{f}_D = B_P(T_g - T_P) \quad (4)$$

$$\text{状态方程} \quad T_P = f(h_P) \quad (5)$$

对气流

$$\text{连续方程} \quad \frac{\partial \rho_g}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_g \cdot \vec{V}_g) = 0 \quad (6)$$

$$\text{运动方程} \quad \frac{\partial \vec{V}_g}{\partial t} + (\vec{V}_g \cdot \nabla) \vec{V}_g + \frac{1}{\rho_g} \nabla p + \vec{f}_D' \frac{\bar{\rho}_p}{\rho_g} = 0 \quad (7)$$

$$\text{能量方程} \quad \frac{Dh_g}{Dt} + \frac{D\left(\frac{\vec{V}_g^2}{2}\right)}{Dt} - \frac{1}{\rho_g} \frac{\partial p}{\partial t} + (\vec{V}_p - \vec{V}_g) \cdot \vec{f}_D' \frac{\bar{\rho}_p}{\rho_g} + \frac{f_p}{\rho_g} B_p (T_p - T_g) \quad (8)$$

$$\text{状态方程} \quad p = \rho_g R_g T_g \quad (9)$$

$$h = f(\rho_g \cdot p) \quad (10)$$

上面式(3)中 f_D' 为单位颗粒质量的粘性气动力, 式(4)中 $B = f(N_u, P_r, C_p, d_p, \rho_p)$ 为气体与固体微粒间热交换系数。

式(2)~(10)共九个方程, 可解出 $\vec{V}_p, \vec{\rho}_p, h_p, T_p, p, \vec{V}_g, \rho_g, h_g, T_g$ 九个参变量, (\vec{V} 三个分量, 运动方程也有三个分方程)。

以上考虑了动量交换与热交换的方程组, 结合通常的叶轮机械边界条件, 可进行数值求解。关于方程的变换及求解方法将在另文讨论。总之是相当复杂的, 为此对方程组建议可作以下两种进一步的简化。

(1) 对于能量回收烟气轮机, 由于微粒浓度受到控制, 所以浓度很小 (~ 0.2 克/米³), 烟气与颗粒温差也不大, 催化剂导热性差, 热交换系数小, 则近似忽略热交换后, 式(8)可改写成:

$$\frac{Dh_g}{Dt} + \frac{D\left(\frac{\vec{V}_g^2}{2}\right)}{Dt} - \frac{1}{\rho_g} \frac{\partial p}{\partial t} + (\vec{V}_p - \vec{V}_g) \cdot \vec{f}_D' \frac{\bar{\rho}_p}{\rho_g} = 0 \quad (11)$$

再用方程(2)、(3)、(6)、(7)、(9)、(10)解 $\vec{V}_p, \bar{\rho}_p, p, \vec{V}_g, \rho_g, T_g, h_g$ 即可。

(2) 当微粒直径极小时, 粒子惯性很小, 并当浓度不大时, 可设微粒与气体基本上以同一速度运动, 即二速度模型变为单一速度模型, 悬浮粒子气流可以看作为假想的“均匀混合气”。此时, 引入一个统一的当量密度 $\rho_{\text{当}}$ 。

$$\rho_{\text{当}} = \frac{\dot{M}_p + \dot{M}_g}{\vec{V} \cdot A} = \rho_g + \bar{\rho}_p = \rho_g (1 + \alpha) = \bar{\rho}_p \left(\frac{\alpha}{1 + \alpha} \right) \quad (12)$$

α 是微粒重量比浓度, 并且将方程(6)、(7)、(8)、(9)、(10)改写成:

$$\frac{\partial \rho_{\text{当}}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_{\text{当}} \vec{V}) = 0 \quad (6')$$

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} + \frac{1}{\rho_{\text{当}}} \nabla p = 0 \quad (7')$$

$$\frac{Dh}{Dt} + \frac{D\left(\frac{\vec{V}^2}{2}\right)}{Dt} = \frac{1}{\rho_{\text{当}}} \frac{\partial p}{\partial t} \quad (8')$$

$$p = \rho_{\text{当}} R_{\text{当}} T \quad (9')$$

$$h = f(\rho_{\text{当}} \cdot p) \quad (10')$$

其中当量气体常数 $R_{\text{当}}$ 可以这样考虑：气体常数 $R = 848/\mu$ ， μ 是气体的分子量，现作为假想的当量均匀混合气，可取： $\mu_{\text{当}} = \mu_g + \mu_p \frac{m_p}{m_g}$ ，因而 $R_{\text{当}} = \frac{848}{\mu_{\text{当}}}$ 。当粒子浓度很小时，可近似采用 $R_{\text{当}} = R_g$ ，求解较为方便。上述方程组类同于现有叶轮机械气动方程组，只需将 ρ_g 改成 $\rho_{\text{当}}$ ，因此可搬用现有叶轮机械气动计算程序进行初步计算设计。即浓度小时，第一步可近似应用现有单相气动方程组。

四、基本气动参数的选择和评定

进行一个具体透平的气动设计计算，必须根据使用条件或给定的初参数，根据内部流动的基本物理过程，相应选定一些基本气动参量及评定一些设计准则。即使完全三元的设计，也需依据反问题的性质，给定某些流动参量的关系和分布。在简化的计算或初步设计时，常在特征半径上先进行一元的气动热力分析，这时也要先选定一些准则参数，例如 u/C_0 、 ρ_T 或

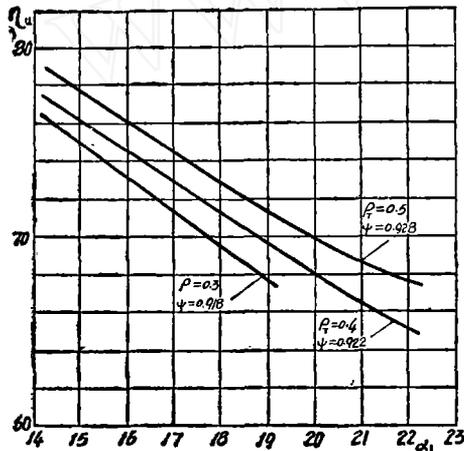


图 4 η_u 与 α_1 和 ρ 的变化关系

α_1 、 β_2 等，总之对烟气透平而言一定要结合到气流中带粉尘微粒，并希望减少磨损的特点来选定参数。目前，能量回收烟气透平的初参数和工质物性有如下特点：它的焓降约为 40~55 大卡/公斤，根据鼓风机型式（离心或轴流）及转速的情况不同，常用的透平无因次速比约在 0.38~0.44 的范围内。焓降大速比低，在气动设计上是较难获得与常规参数燃气透平同样的效率。此外应注意到比热比 $K = 1.28 \sim 1.32$ 左右，它是随温度而变化的。故而对于气动参数的选择要特别谨慎。

例如对于 YL3000-I 的设计，从减少磨损出发，而磨损率又与气流速度大小及方向有关。这样分析：导叶和动叶槽道内速度都不宜过大，从平分的概念可取反动度 $\rho_T \cong 0.5$ 。但是尚要兼顾效率，在焓降大、 u/C_0 值小时，为提高效率 ρ_T 宜

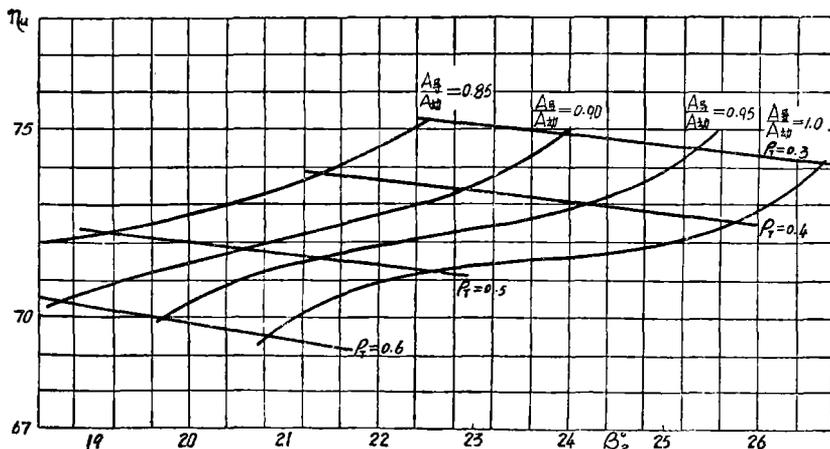


图 5 η_u 随不同 ρ_T 和 A_s/A_d 的变化关系

取小值。究竟以多少为合适？这对二元三元分析也是必要的。通过一元分析，兼顾效率与流速两个方面，取 $\rho_T=0.4$ ， $\alpha_1=16^\circ$ 为宜（见图 4、5）。尽管如此，试验表明，在这样的反动度下，导叶的磨损明显地比动叶少，主要叶面没有磨损，所取 ρ_T 是合适的。但是否可以进一步加大导叶中速度，减小 ρ_T ，从而既减少动叶磨损，又可提高级效率呢？从叶栅中微粒流动轨迹（图 2、3）来看，导叶中微粒与叶面碰撞几率要比动叶中小得多，因此似乎还是可以考虑的。

沿叶高气动参数分布的选定，或说流型的选择，直接影响到通流部份流线形状及效率，同时也影响到微粒所受气动力以及微粒轨迹。微粒在离心力场作用下本有向外径向流动的倾向，根据气流径向流动方向和大小不同，可以加剧或减缓这种倾向，目前看来总希望沿叶高均匀一些，似乎反向扭的控制涡流型更为合适，兼可保持沿叶高较合适的反动度分布。再则叶片特别是导叶的周向倾斜度也影响径向流动，这些均是在二元或准三元设计中可考虑利用的。

透平的外特性（效率、功率及流量特性）直接与回收能量的经济效益有关。由于能量回收烟气透平实际上与主风机配合共同工作，而流程工艺上允许流量变化范围较大，为了减少磨损（减少冲角及流场变化）保证较好的效率和减少进气阀节流损失，运行中烟气透平的折合流

量 $\frac{G\sqrt{T_0 X}}{P_0 X}$ 值最好保持不变。因此一方面在运行条件允许的情况下，尽可能节流调节鼓风机流量以适应工艺流程的需要，同时，烟气透平的流量特性，以设计在接近阻塞（但不宜达到阻塞，以免出现微波工况）为好（见图 6）。因此要合理选择导叶动叶有效通流面积之比（ $A_{导}/A_{动}$ ），即应使导叶出口速度在设计参数下接近或稍低于临界速度为好。而动叶出口不能为临界状态。这样做另一好处是：即使运行一段时间以后，动叶有若干磨损，出口喉部面积 $A_{动}$ 加大，使得反动度进一步下降，导叶先行堵塞，从而对效率和通流特性的影响较小。

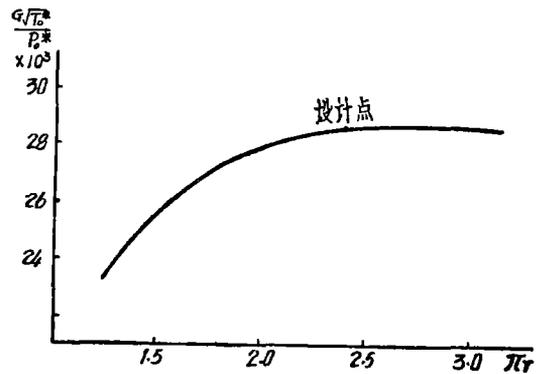


图 6 烟气透平通流特性

五、叶型设计中的一些问题

对于透平叶型设计已有较成熟的方法和大量叶栅试验数据。结合能量回收烟气透平，需要着重考虑的是高叶片负荷和适应二相流绕流的特点。

(1) 对于带微粒的气流而言，绕流叶栅前缘冲角的变化，不仅仅是影响一些效率和出气角的问题（在某些负冲角下尚能改善叶栅效率），而且直接影响前缘的磨损冲蚀。烟气透平能量回收装置运行工况的变化必然导致叶栅需在一定进口气流角范围内工作。由于烟气透平转速不变，圆周速度 u 也不变，对设计参数下为零冲角设计的叶型，在小于设计值的流量 G_T 和压比 π_T 下，会形成负冲角进气（见图 7a）。因此在这里，认为设计较大半径的前缘或许好一些的看法并不成立。不仅因为它带来叶栅设计效率的降低，以及绕流计算的困难，还因为实际上它并不能避免磨损。试验表明^[2]，固体表面的磨损率与气流入射角度有关，而对微

粒流来说,只有与叶栅前缘气流滞止点相遇的微粒才是零冲角,而与前缘圆弧面上其他点上相遇微粒来说,即不是零冲角了。因而总归要冲刷磨损一部份,特别是工况变化时,气流角也变化,再则一部份磨损后,滞止点也就变化(见图 7b, c),因此经过一段时间以后,前缘总要全面磨去一层,若设计冲角大一些,则某一方向磨去更多一些,故微粒流的冲角与纯气流冲角仅牵涉绕流好坏影响效率的情况不完全一样。我们在设置烟气透平叶栅初始冲角时,宜着眼于均匀全面磨损(在不能排除磨损情况下)。例如可在以最大工况作为设计点下,稍取一些正冲角是否更为相宜。

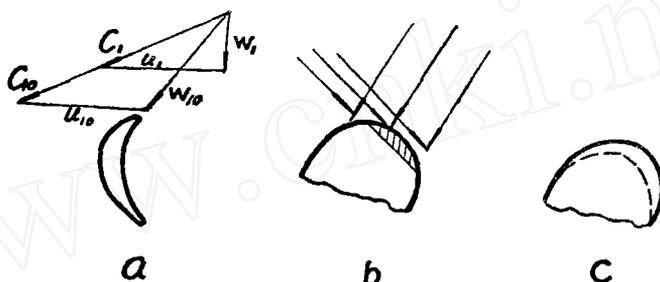


图 7 动叶冲角变化和磨损示意图

(2)如前所述,对于某些撞击弹跳几率较大部位如尾缘、内弧后半部等磨损较集中,目前在设计叶型时应比普通单纯燃气叶型适当加厚以延长使用周期,但通过试验也观察到由于在尾迹中气流速度减慢,可能会形成微粒集中成团,在与固体壁面交界处(内外壳)实际现象是加剧冲蚀磨损。看来,对于尾缘,考虑到效率的降低,也不能过份加大。

(3)鉴于固体微粒的存在必然会影响到叶型表面上压力分布和边界层的发展和分离,初步估算看来会增加比单纯燃气更多的叶型绕流损失,故而要设计好烟气透平,气动方面第一步工作还需研究气—固二相气流绕流叶型的工程计算方法,以及损失的评定,设计出较合适的基元叶型。

六、符 号

- p——压力;
- ρ ——密度;
- T——绝对温度;
- h——静焓;
- K——比热比;
- V——绝对速度;
- Q——烟气容积流量;
- G——烟气重量流量;
- ρ_T ——反动度;
- f——力;
- f'——单位质量的力;
- α ——浓度;

d —— 微粒直径,
 π_T —— 透平膨胀比,
 m —— 单颗微粒质量,
 M —— 烟气中微粒质量,
 A —— 通流面积,
 η_T —— 透平效率,

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

u/C_0 —— 透平速比。

以下为角注

0 —— 透平进口,
 1 —— 导叶出口,
 2 —— 透平出口,
 p —— 微粒,
 g —— 气体,
 $()^*$ —— 总参数,
 $()^\circ$ —— 单位时间的量。

参 考 文 献

- [1] M. F. Hussein, W. Tabakoff, Calculation of the three dimensional particle trajectories in a turbine stage, AD-753364.
- [2] W. Tabakoff, G. Gant, R. Ball, An experimental investigation of certain aerodynamic effects on erosion AIAA Paper No.
- [3] M. F. Hussein, W. Tabakoff, Computation and ploffing of solid particle flow in Rotating Cascades Computer & Fluids Manh 1974.
- [4] M. J. Zucrow, J. D. Hoffman, Gas Dynamics Vol II.
- [5] 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, 1976。
- [6] 凌志光、厉树廉、葛满初, 烟气透平的气动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, 1979。