

# 气 波 换 能 器

## ——一种新型的能量回收装置

陈 铭 涛    门 振 家

(中国科学院力学研究所)

扼要叙述了气波换能器的工作原理、理论计算、模型试验以及在动力机械中的实际应用效果。在模型试验结果中选取和烟气轮机基本相同的热力参数来讨论作为在技术上可以实现的石油催化裂化余气能量回收的技术方案和参数,指明其优缺点。

### 前 言

在石油化工某些工艺流程中产生大量余气,而这些余气中,往往具有一定的温度和压强,即具有一定的焓值。把这部份余气中的有用物质和能量加以回收,会获得一定的收益,这在生产中已为人们所重视。例如,石油的催化裂化能量回收,在国内外都已成功地采用了烟气轮机。在抚顺化工二厂运行的一台由我国自行设计和制造的烟气轮机所回收的能量,可提供主风机所需功率的70%左右。

这里介绍一种和烟气轮机工作原理不同的另一种能量回收装置——气波换能器。烟气轮机是烟气介质的焓降通过透平机械转变为机械功,用以驱动(或与电机共同驱动)离心式鼓风机。经过离心式鼓风机再把机械功转变为所需压缩空气的压头,用以提供化工工艺流程中所需要的压缩空气。即对于所需的压缩空气来讲,是经过烟气的焓降—机械功—压缩空气的焓升,分别在两个转子中作两次能与功的转换过程。而气波换能的原理则是把烟气与空气在同一转子中直接接触,以一定的规律组织进、排气,通过一系列的压缩波和膨胀波在转子中两种不同气体中的传播,使烟气的能量传递给空气。经过这样的过程,烟气膨胀后,由烟道

排出,同时又把大气中的空气吸入转子,经过压缩,提高压头后再利用。

我们对气波换能器作了理论分析和计算工作,并在此基础上进行了模型模拟实验,取得了一定的结果。

### 工 作 原 理

气波换能器的工作原理可用图1来说明。图1a的转子是在环形圆管中用沿径向分布的隔片分成若干个直通槽道(一般为50个左右),以等速旋转。在转子的一端的固定壁面上有烟气的出、入口,另一端的固定壁面上有空气的出、入口。转子由外部的原动机驱动,驱动功率仅用以克服摩擦损失。图1b是转子平均半径的平面展开图,图中等距离的横线代表由隔片分成的直通槽道。

转子的旋转在平面展开,图中是槽道由下向上的周而复始的等速运动,图中的顶部和底部是衔接的。

在以1表示的区域是上次循环过程中吸入的新鲜空气保留在两端固壁之间的部份。因此这部份槽道中的气体因两端封闭而静止不动。随着转动(即由下向上移动),当槽道中的空气

1979年8月13日收到。

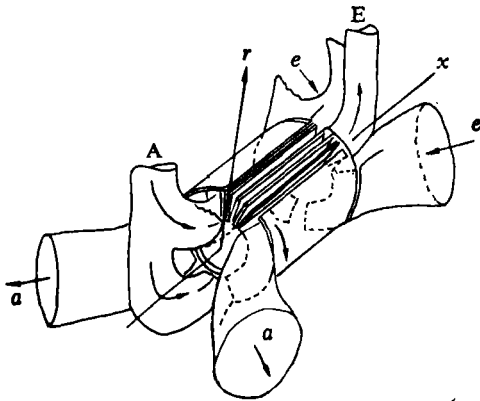


图 1a

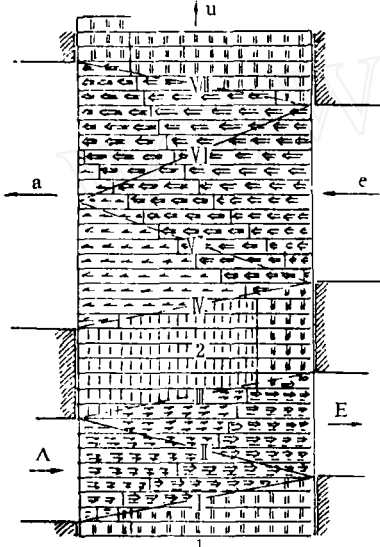


图 1b

A. 高压、高温烟气入口； a. 膨胀后低压烟气排出口；  
E. 压缩后空气出口； e. 空气吸入口；画以阴影线处  
为固壁边界。

接通 A 口，高压的烟气与低压空气相遇，就会在槽道中的低压空气部份产生一个压缩波，并以声速的速度向槽道右方传播，压缩波扫过后，空气被压缩，并开始以一定的速度向右运动。由于槽道的不断运动，这个压缩波的轨迹在平面图上是以 I 表示的斜线。压缩波走到右边界时，正好是压缩空气出口的开始，由于压缩空气的边界条件，使得又产生一个向左运动的压缩波 II，经过这个压缩波扫过之后的空气又进一步提高压强，并以较低的速度流出槽道。图

中折线的部份表示为烟气和空气的交接面，在交接面两边，两种气体的静压和速度是相同的。由此看出，A 口处的烟气压强是等于经过压缩波 I 之后的空气压强，而 E 口空气的压强是再经过压缩波 II 的压强，因此获得了高压空气的压强高于进入烟气的压强的结果。

当压缩波 II 走到右端边界时，正好 A 口关闭，使槽道内的气体不可能再向右运动而必须停下来，于是由此产生一个膨胀波 III，膨胀波 III 扫过的气体都停下来并降低了压强。当波 III 走到右端过界，正好是 E 口关闭。这样槽道的两端又都封闭，2 区内的气体静止下来。当槽道运动至左边界打开，由于 2 区中的压强高于 a 口处的压强（a 口联通大气），于是产生一个膨胀波 IV，波 IV 扫过的区域，气体膨胀到 a 口的压强，并向左运动，当波 IV 走到右边界时，正好是 e 口打开，由于进口静压低于一个大气压，所以又由此产生一个膨胀波 V，槽道中波 V 扫过的区域进一步膨胀，并以较低的速度向左运动。当波 V 走到右边界处，由于 a 口的边界条件，产生一个压缩波 VI，向右传播，波 VI 扫过的区域，气体压强又提高。由此看出，在波 V 和 VI 右边部份气体的压强是低于左边区域中气体压强，亦即 e 口的压强低于 a 口，这就是为什么能把空气吸入到转子中来的理由。最后经过膨胀波 VII，气体中压强进一步下降，并在两端为固壁之间的区域停下来，完成了一个循环。

当然，两种不同气体直接接触，尽管压强、速度相同，但交接面处的气体分子运动还会造成局部掺混。交接面实际上是代表掺混区的一个几何面。不过交接面处气体分子掺混速度是远低于波的运动速度。为了避免掺混的气体进入被压缩空气中，安排波系使在 a 口出去的交接面不要正好交到 a 口的上端，而是要使交接面在 a 口中间某处排出，即在 a 口中有一部份空气包括掺混区在内，随同低压烟气一起排出。这样也必需同时安排 e 口空气的吸入量要多于 E 口压缩空气的排出量。这多余的部份正好是 a 口排出比 A 口进入多余的部份。以上叙

述仅为原理性说明，实际过程中波的情况要复杂的多。

### 理论计算

由工作原理可知，必须使转子两端的各个气口安排的很恰当，以组织一系列的波在两种气体中运行，完成能量交换，又能使两种气体各自流入流出。气波机的转子以等角速度旋转，我们对其取相对圆柱坐标，如图1a所示，当气波机转子的槽道是直通道，且与旋转轴x平行时，由于槽道宽度比较窄，槽道高度相对于转子平均半径比较小，沿x方向，从气动热力学上来说，可以简化为一维管道的非定常运动。应用连续方程、动量方程、能量方程，可把这一物理过程以双曲型偏微分方程描述。再结合一定的初始条件和边界条件可以求解整个流场。三个守恒方程写成向量形式为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\bar{D}) + \frac{\partial}{\partial x}[\bar{F}(D)] = \bar{B}$$

$$\bar{D} = \begin{pmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \rho \\ \rho w \\ \frac{p}{r-1} + \frac{\rho w^2}{2} \end{pmatrix}$$

其中 x 沿轴向坐标  
 t 时间  
 ρ 密度  
 w 相对速度  
 p 压强  
 r 比热比

$$\bar{F} = \begin{pmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} D_2 \\ \left(\frac{3-r}{2}\right)\left(\frac{D_1^2}{D_1} + (r-1)D_3\right) \\ \frac{rD_2D_3}{D_1} - \left(\frac{r-1}{2}\right)\left(\frac{D_1^2}{D_1}\right) \end{pmatrix}$$

$$\bar{B} = \begin{pmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ -\rho F_M \\ \rho q \end{pmatrix}$$

其中  $F_M$  摩擦力  
 q 传热率

上述参数可用无量纲表示。

当然同样的方程式用于两种不同气体，各有不同的参数值，并且以交接面两边气体的静

压和速度相同为条件互相联系，以解决波的反射和折射的各种情况的计算。因此是很繁杂的计算过程。

考虑最基本的过程，简化为定熵运动，可以用特征线法进行计算。在此基础上我们提出了“气波机一维非定常定熵流动图解法”<sup>[1]</sup>一整套的设计计算方法，以无量纲参数的计算得出气波机的几何尺寸，从而大大简化大量繁琐的手算工作。Zehder<sup>[2]</sup>首次用Lax-Wondro<sup>1</sup>守恒型的差分格式用电子计算机来计算气波机的流动过程（考虑到摩擦和传热）。但这篇文章仅是提要性的介绍，没有述及在计算过程中详细的处理方法。我们也完成了该种方法的计算工作<sup>[3]</sup>，目前还在进行“特征线网格数值解法”的计算工作（考虑到摩擦和传热）。该法的优点是能计算出物理面上波系形状，可以有清晰的物理概念，并且可直接用以计算设计问题。

### 模型试验结果与应用

根据我们的理论工作，设计了多种试验用的模型样机，前后进行了二百多次试验。取得大量的试验数据。

气波机的一个具体应用是作为柴油机排气能量的利用，用以强化柴油机的输出功率，称为气波增压器。瑞士B. B. C. 公司在1975年登出广告，有产品出售，并拥有专利权。目前美、日、西德、英等国家都已向B. B. C. 购买气波增压器的样品与本国柴油机作匹配实验。

我们与江苏省南通地区工业局、南通柴油机厂协作，把我们的理论与试验结果应用于该厂制造的6135-Z型柴油机。根据柴油机的性能，设计并制造了气波增压器。与柴油机匹配运行的初步结果是柴油机的功率由原来的120马力提高到210马力。即在生产中的应用已初步见到效果。

#### 1. 作为石油化工能量回收装置

为了说明在技术上应用的现实性，不是用理论计算，而是用气波机的模型试验结果，等比例放大到石油催化裂化能量回收装置上作参

数及性能的讨论。为此我们在模型试验数据中，找出和抚顺化工二厂的烟气轮机能量回收装置某一次试验数据中热力参数性能基本相同的数据来比较计算。我们是以煤油和空气的燃烧产物作为介质来模拟烟气的热力状态参数。选用的该模拟试验样机的转子基本尺寸为：平均半径130毫米；槽道高40毫米；长度191毫米。试验数据见表 1、表 2。

表 1

| 燃气入口温度 $T_A$ (°C) | 流量 $G_E$ (公斤/秒) | 压缩空气压比 $P_E/P_0$ | 压缩空气密度比 $\rho_E/\rho_0$ | 压缩空气温度 $T_E$ (°C) | 压缩空气温升 $T_E - T_0$ (°C) |
|-------------------|-----------------|------------------|-------------------------|-------------------|-------------------------|
| 580               | 0.344           | 1.98             | 1.35                    | 148               | 134                     |
| 590               | 0.363           | 2.0              | 1.35                    | 148               | 124                     |

表 2

| 压缩空气压强<br>燃气入口压强 $P_E/P_A$ | 燃气出口温度 $T_a$ (°C) | CO <sub>2</sub> 含量 (%) | 大气温度 $T_0$ (°C) | 大气压强 $p_0$ (公斤/米 <sup>2</sup> ) | 转速 $n$ (转/分) |
|----------------------------|-------------------|------------------------|-----------------|---------------------------------|--------------|
| 1.08                       | 410               | 0.08                   | 14              | 10170                           | 7000         |
| 1.067                      | 425               | —                      | 24              | 10255                           | 6900         |

表 1 和表 2 中下标：E. 压缩空气；e. 大气；A. 燃气入口；a. 燃气出口。

其中一项燃气掺混量，我们是用红外线 CO<sub>2</sub> 分析仪来测量压缩空气中 CO<sub>2</sub> 的含量，用以了解通过交接面处的掺混过程中燃气有多少量混入压缩空气中。实验结果说明仍有少量燃气混入（相当于对烟气来讲有 1—2% 的容积比率混入压缩空气中）。对石油化工的能量回收说来这是气波换能器的一个缺点。能量回收装置如图 2 所示。由图 2 可知，主风机的功率由烟气轮机和电机并联同轴驱动来提供。为达同样目的，在烟气热力参数基本相同的条件下，气波换能器的形式可以如图 3 所表示。图 3 的方案是采用气波换能器与鼓风机及电机是分开驱动，在气路上是串联的方式。空气由气波换能器作为第一次压缩（由模型试验结果用烟气的热力状态参数来换算）压比为 2，然后由电机

带动的鼓风机作第二次压缩，压比为 1.47 来达到所需的压缩空气压强。这样气波机所提供压缩空气所需总功率的 56—60%（相当于该实验点，烟气轮机为 65%）。这是以原来烟气轮机

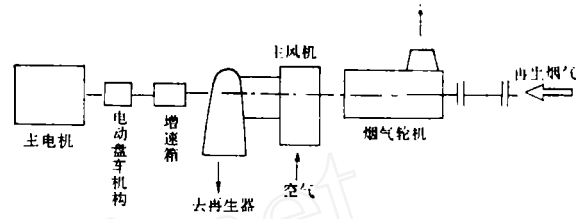


图 2 烟气轮机能量回收装置

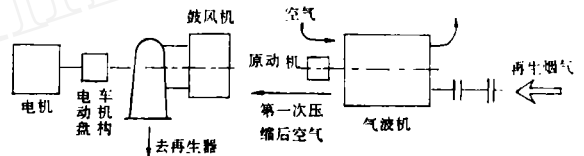


图 3 气波换能器（原动机可用电机或柴油机）

鼓风机（压比为 2.947）的效率和这个方案中鼓风机压比 1.47 的效率认为一样来计算的。如果考虑到高压比和低压比鼓风机效率不同以及采用中冷的方法，则气波换能器基本上与烟气轮机是相当的。此外气波机所需的驱动功率为 120 千瓦左右。

### 2. 气波换能器的优点

(1) 转子结构简单，如前所述转子为一圆筒，中间加隔片，没有像烟气轮机叶片那样的复杂的型线要求，因此加工简单。

(2) 转速、线速低。按模型等比例放大，与烟气轮机相同流量，转子外径为 1.36 米、长 1.48 米、转速 889 转/分、最大线速度 63.2 米/秒。而烟气轮机的转速为 6300 转/分，最大线速度为 328 米/秒。转速低会带来一系列好处，如转子材料的负荷低、轴承系统要求低、运行维护都比较方便。

(3) 转子温度较低，不需用耐热合金材料。因为气波机转子中为冷热气体交替通过，因此热稳态下的转子温度低于燃气温度。我们在模型试验上以变色漆作转子表面温度试验。

转子的温度自热端向冷端沿轴向下降。当燃气温度为550℃时,转子最高温度为510℃左右,最低温度为365℃左右。在620℃以下的工作条件下,我们的转子是用低碳钢材料。

(4) 烟气中固体颗粒对转子的冲刷或附着物对转子的影响小。因为气流与转子的相对速度低,固体颗粒的冲刷力小。此外气波机转子无型线要求,隔片上积存附着物或磨损对效率影响不大,而烟气轮机叶片型线的破坏对效率很敏感。这在设备的寿命上是一个优点。

(5) 鼓风机改成低压鼓风机,转速低。线速度可为原来的0.66倍。这样齿箱简化,运转可靠。

### 3. 气波换能器的缺点

- (1) 与烟气轮机相比,体积大,噪音大。
- (2) 需由其他原动机作驱动。
- (3) 压缩空气中有少量烟气掺混。

(4) 热效率低于烟气轮机。(提高温度,可提高效率)。

### 小 结

气波能量交换器(简称气波机)可以和烟气轮机的作用相当,作为石油催化裂化的能量回收装置。理论分析计算和模型模拟实验的结果以及气波增压器的应用表明,气波机可以达到烟气和空气能量交换的目的,气波换能器应用到生产上是有可能的。

### 参 考 文 献

- [1] 中国科学院力学研究所气波机组,气波机—维非定常定熵流动图解法,力学情报,[6],1(1973)。
- [2] G. Zehnder, *Brown Boveri Rev.* 58 [4/5], 172 (1971)。
- [3] 中国科学院力学研究所气波机组,研制气波增压器的一些理论分析计算和实验研究结果,全国第二届工程热物理学术会议论文,1978年。

(上接第99页)

### 参 考 文 献

- [1] 湘潭市化工研究所、湘潭市第二化工厂,石油化工,4[4],352(1975)。
- [2] 施其宏、谭安国,石油化工,4[4],357(1975)。
- [3] 同[1],分离二甲苯的新晶体材料—KBaY型分子筛,200吨/年模拟移动床分子筛吸附分离对二甲苯技术鉴定会材料,1978年。
- [4] 同上。
- [5] D. W. Breck, *Zeolite Molecular Sieves*, John Wiley and Sons., Vol. 1, p. 333, p. 365, 1974.
- [6] Hansen, R. D. and R. S., *J. Colloid Sci.*, [9], 1 (1954)。
- [7] 物理化学杂志(日),[57],106(1953)。
- [8] B. J. Mair, *Ind. Eng. Chem.*, [42], 1279 (1950)。
- [9] A. E. Hirschler, et al., *Ind. Eng. Chem.*, [47], 193 (1955)。
- [10] U. S. P., 3,558,732 (1971)。
- [11] U. S. P., 3,558,732 (1971)。
- [12] Д. П. Тимофеев и дру., *Синтетические Цеолиты*, стр.24, 1962.
- [13] D. C. Jones. et al., *J. Chem. Soc.*, 1574 (1930)。
- [14] A. В. Киселев. *Изв. АН. СССР, ОХН*, 664 (1958)。
- [15] 施其宏,湘潭大学学报,[1],101(1978)。
- [16] Satterfield, C. N., et al., *AIChE. J.*, [18], 723 (1972)。
- [17] *ibid*, [20], 618 (1974)。
- [18] D. W. Breck, et al., *Molecular Sieves, Soc. Chem. Ind.*, [50], 52 (1968)。
- [19] U. S. P., 3,639,099 (1972)。
- [20] U. S. P., 3,671,191 (1972)。
- [21] 白崎高保,小林正弘等,工业化学杂志(日),[5],1041(1972)。