

大型透平膨胀机气体轴承设计

辽阳市计委 姜军

【摘要】空分装置中的透平膨胀机，是一种高速机械，目前这种机器上的轴承均采用油润滑。为避免润滑油对工质的污染，提高膨胀效率，更新传统的油轴承是有意义的。为此，我们研究了国产6000m³/h制氧装置中透平膨胀机的轴承系统，肯定了在这种机械上应用气体轴承的可行性。

主题：透平膨胀机 气体轴承

一、有关热力参数及转子受力计算

1. 风机轮端

几何尺寸见图1

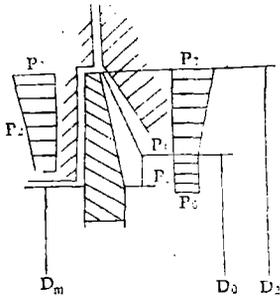


图1 风机轮

$D_2 = 270\text{mm}$ $D_0 = 166\text{mm}$ $D_m = 50\text{mm}$

热力参数：

$P_0 = 0.99\text{ata}$ (空气出口压力)
 $r_m = 1.48\text{kg/m}^3$ (风机轮端空气平均密度)

$P_2 = 1.4\text{ata}$ (空气入口压力)

$C_0 = 190\text{m/s}$ (空气出口速度)

$G = 4.3\text{kg/s}$ (空气流量)

$u_2 = 269\text{m/s}$ (空气入口速度)

受力计算结果：

$P_0 = 297.5(\text{kg})$ $P_1 = 343.5(\text{kg})$

向左的轴向力

$P_0 + P_1 = 641.0(\text{kg})$ $P_2 = 737.7(\text{kg})$

(向右)

$P_{\text{风}} = P_2 - (P_0 + P_1) = 737.7 - 641.0$
 $= 96.7(\text{kg})$ (向右)

2. 工作轮端

几何尺寸见图2

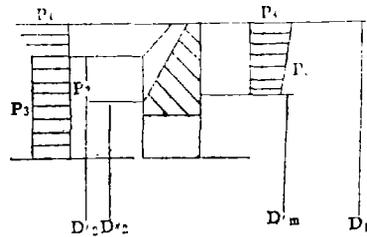


图2 工作轮

$D_1 = 190\text{mm}$ $D_2' = 129.2\text{mm}$

$D_2'' = 55\text{mm}$ $D_m' = 48\text{mm}$

其它参数：

$n = 19000\text{rpm}$ (转子转速)

$\omega = 1990\text{rad/s}$ (转子角速度)

$p_3 = 1.32\text{ata}$ (膨胀空气出口压力)

$p_4 = 2.86\text{ata}$ (膨胀空气入口压力)

$u_1 = 189\text{m/s}$ (膨胀空气进口速度)

$c_2 = 53.5\text{m/s}$ (膨胀空气出口速度)

$r_1 = 9.53\text{kg/m}^3$ (膨胀空气入口密度)

$r_2 = 5.14\text{kg/m}^3$ (膨胀空气出口密度)

$G_z = 2.52\text{kg}$ (空气流量)

受力计算结果：

$P_3 = 186.8(\text{kg})$ $P_4 = 318.8(\text{kg})$

$P_5 = 705.2(\text{kg})$

工作轮所受轴向力为

$P_{\text{工}} = P_3 + P_4 - P_5 = 186.8 + 318.8 -$

$705.2 = -199.6(\text{kg})$ (向左)

3. 转子受的轴向力

$P_{\text{转}} = P_{\text{工}} - P_{\text{风}} = -199.6 - (-96.6) =$
 $-103.0(\text{kg})$ (向左)

二、转子主轴支反力计算

1. 静载前引起的支反力 (图3)

各段载荷值(包括各段上的附件)

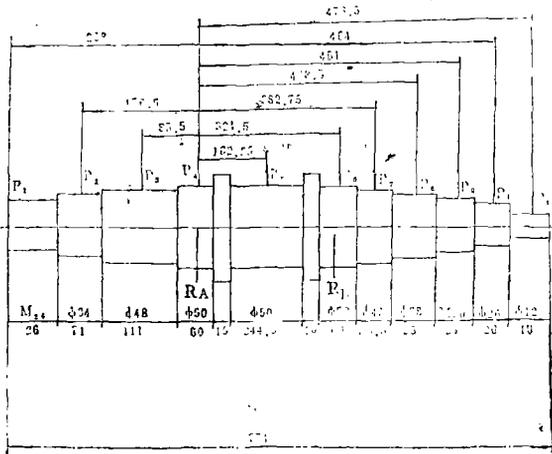


图3 主轴

$$P_1 = 0.093 + 0.125 = 0.218(\text{kg})$$

$$P_2 = 1.745(\text{kg}) \quad P_3 = 1.586(\text{kg})$$

$$P_4 = 0.930(\text{kg}) \quad P_5 = 5.237(\text{kg})$$

$$P_6 = 0.930(\text{kg}) \quad P_7 = 0.807(\text{kg})$$

$$P_8 = 3.324(\text{kg}) \quad P_9 = 0.453(\text{kg})$$

$$P_{10} = 0.109(\text{kg}) \quad P_{11} = 0.017(\text{kg})$$

$$\sum_{i=1}^{11} P_i = P_1 + \dots + P_{11} = 15.356(\text{kg})$$

$$\begin{aligned} \text{由 } \sum M_A = R_B + P_1 \times 238 + P_2 \times 176.5 \\ + P_3 \times 85.5 + P_4 \times 10 - P_5 \times 162.25 - P_6 \times \\ 324.5 - P_7 \times 382.75 - P_8 \times 438.85 - P_9 \times \\ 451 - P_{10} \times 464 - P_{11} \times 473.5 = 0 \end{aligned}$$

得 $R_B = 8.275(\text{kg})$

$$\therefore R_A = \sum_{i=1}^{11} P_i - P_B = 15.356 - 8.275 = 7.081(\text{kg})$$

2. 动载荷引起的支反力

假设: (1) 转子的不平衡偏移量为 μ ;
即 $e = 10^{-6} \text{ m}$;

(2) 轴没有不平衡偏移量, 不平衡偏移量在两边轮盘上。

在上述假设下, 风机轮上产生的离心力为

$$F_{\text{工}} = m_{\text{工}} \cdot \rho \cdot \omega^2 / g = \frac{2.797}{9.8} \times 1 \times$$

$$\rightarrow 10^{-6} \times 1990^2 = 1.129(\text{kg})$$

工作轮上产生的离心力为

$$F_{\text{工}} = m_{\text{工}} \cdot \rho \cdot \omega^2 / g = \frac{1.219}{9.81} \times 1 \times 10^{-6}$$

$$\rightarrow \times 1990^2 = 0.492(\text{kg})$$

以上两式中

$$m_{\text{风}} = 2.797 \text{ kg (风机轮质量)}$$

$$m_{\text{工}} = 1.219 \text{ kg (工作轮质量)}$$

则动载荷引起的支反力

$$R_{\text{B动}} = \frac{1}{1} (F_{\text{风}} \cdot l_{\text{风}} - F_{\text{工}} \cdot l_{\text{工}}) = \frac{1}{324.5}$$

$$\rightarrow (1.129 \times 438.5 - 0.492 \times 176.5) =$$

$$\rightarrow 1.258(\text{kg})$$

$$R_{\text{动}} = F_{\text{风}} + F_{\text{工}} - R_{\text{B动}} = 1.129 + 0.492 - 1.258 = 0.363(\text{kg})$$

3. 轴承受的径向力

$$\begin{aligned} \text{工作轮端 } R_{A_i} = R_A + R_{A\text{动}} = 7.081 + \\ 0.363 = 7.444(\text{kg}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{风机轮端 } R_{B_j} = R_B + R_{B\text{动}} = 8.275 + \\ 1.258 = 9.533(\text{kg}) \end{aligned}$$

三、气体轴承设计计算

1. 径向轴承

根据转子的尺寸要求, 轴承内径 $D = 50 \text{ mm}$, 轴承长 $L = 60 \text{ mm}$, 其长径比则为 $\frac{L}{D} = \frac{60}{50} = 1.2$ 。假设直径间隙总几何误差允许达 0.008 mm , 直径间隙为加工误差的5倍, 则直径间隙

$$2h_0 = 5 \times 0.008 = 0.04 \text{ mm}$$

空压机压力通常保证 5 ata , 故取供气压力 $P_{\text{供}} = 5 \text{ ata}$ 。根据资料, 在 $D = 50 \text{ mm}$ (1.97吋), $L = 60 \text{ mm}$ (2.36吋) 及 $P_{\text{供}} = 5 \text{ ata}$ 时, 这种简单孔进气的径向轴承承载能力为 $W_j = 35.5 \text{ kg}$, 资料介绍, 对环形孔, 其承载能力要比简单孔少30%, 即

$$W_h = 35.5 \times (1 - 30\%) = 24.85(\text{kg})$$

可见这种环形孔的承载能力远大于轴承所受最大径向力 R_{B_j} ($= 9.533 \text{ kg}$)。其径向刚度

$$K = \frac{2W_h}{h_0} = \frac{2 \times 24.85}{0.02} = 2485 (\text{kg/mm})$$

根据资料,在 $P_{供}=5\text{ata}$ 、 $2h_0=0.04\text{mm}$ 、表压比 $K_{g_0}=0.4$ 及偏心率 $\varepsilon=0.5$ 的条件下,应用插值法求得该轴承的空气用量为

$$M' = 0.007925 \times \left(0.65 - \frac{0.65 - 0.27}{75 - 50}\right) \times (75 - 71.1) \times \left(\frac{0.00157}{0.001}\right)^3 = 0.0181 (\text{m}^3/\text{min})$$

保守设计,取 $K_{g_0}=0.6$,由图4

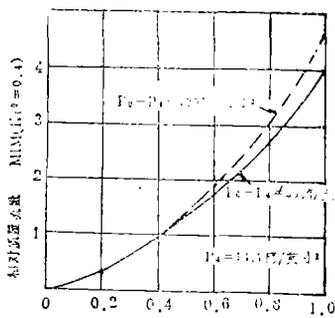


图4 质量流量随表压比的变化

设 $M/M' = 1.95$

$$\text{故 } M = 1.95M' = 1.95 \times 0.0181 = 0.353 (\text{m}^3/\text{min}) = 2.118 (\text{m}^3/\text{h})$$

根据资料,在长径比为1,直径间隙为 0.04mm 的条件下,进气孔直径 $d^* = 30 \times 10^{-3}$ 时(0.762mm)。根据资料进行修正,在长径比 $L/D = 1.2$,供气表压 $P_{供} = 5\text{ata}$ 情况下,进气孔直径应为

$$d = 1.3 \times 0.8 \times 0.762 = 0.792\text{mm}$$

取 $d = 0.80\text{mm}$ 。

综上,径向轴承的设计结果如下:

轴直径 $D = 50\text{mm}$ 、长度 $L = 6\text{mm}$
直径间隙 $2h_0 = 0.04\text{mm}$ 进气方式 $1/4$ 位置
进气,双排8孔,环形孔 $d = 0.80\text{mm}$
供气压力 $P_{供} = 5\text{ata}$ (表)
表压比 $K_{g_0} = 0.6$

偏心率 $\varepsilon = 0.5$

径向承载能力 $W_h = 24.85\text{kg}$

径向刚度 $K = 2485\text{kg/mm}$

空气流量 $2M = 2 \times 2.118 = 4.236 (\text{m}^3/\text{h})$

2. 止推轴承

根据转子要求,推力盘外径 $2b = 110\text{mm}$,内径 $2a = 55\text{mm}$ 。设计轴承间隙 $h = 0.03\text{mm}$,选喷嘴环形槽进气,取表压比 $K_{g_0} = 0.69$,则由资料可查得在供气压力为 5ata 时的承载能力

$$W^* = 370 \times \frac{71.1}{100} = 26.31 (\text{磅})$$

即 $W^* = 119.5\text{kg}$ 。

对两个止推轴承的组合,最大承载能力要比上面的设计载荷 W^* 高25%,因此,一对组合止推轴承的最大承载能力为

$$W = 1.25W^* = 1.25 \times 119.5 = 149.4 (\text{kg})$$

显见 $W > P_{转} = 103.0\text{kg}$,满足承载要求。

再由资料介绍,求空气流量为

$$M = 1.17 \times \left(0.625 - \frac{0.625 - 0.325}{75 - 50}\right) \times (75 - 71.1) \times \left(\frac{2 \times 0.00118}{0.001}\right)^3$$

$$= 8.7 (\text{英尺}^3/\text{分})$$

$$\text{即 } M = 14.8\text{m}^3/\text{h}$$

$$\text{轴向刚度 } K_A = \frac{2.88W^*}{h} = \frac{2.88 \times 119.5}{0.03}$$

$$= 11472 (\text{kg/mm})$$

综上,止推轴承有如下设计结果:

推力盘外径 $2b = 110\text{mm}$; 推力盘内径, $2a = 55\text{mm}$,设计间隙; $h = 0.03\text{mm}$;进气方式;单槽环形16孔进气。

进气孔直径: $d = 0.53\text{mm}$; 供气压力: $P_{供} = 5\text{at}$; a表压比: $K_{g_0} = 0.69$; 最大承载能力 $W = 149.4\text{kg}$; 组合轴向刚度 $K_A = 11472\text{kg/mm}$; 空气流量 $2M = 2 \times 14.8 = 29.6\text{m}^3/\text{h}$ 。