

平动回转式压缩机的几何理论

胡 旭¹ 屈宗长¹ 于漠南² 孙金菊¹

1. 西安交通大学, 西安, 710049

2. 清华大学, 北京, 100084

摘要:为了解决压缩机摩擦能量损失大和结构磨损严重的问题,提出了一种全新结构的平动回转式压缩机,它由固定的气缸、摆动的滑板和平动的转子等组成。由气缸的内表面、滑板和转子的外表面形成的工作腔在工作循环中进行连续的进气、压缩及排气动作,使压缩机工作状态极为平稳。介绍了该压缩机的工作原理、结构特点及几何理论,并详细推导了行程容积、气腔压力及热力学计算的有关公式。分析结果表明,该压缩机结构简单、无易损件、易于密封、摩擦磨损小、成本低,适用于各种流体。

关键词:平动回转压缩机;滑板;摩擦功耗;行程容积

中图分类号: TB652; TH455

文章编号: 1004—132X(2011)16—1896—05

Geometric Theory for a Translational Rotary Compressor

Hu Xu¹ Qu Zongchang¹ Yu Monan² Sun Jingju¹

1. Xi'an Jiaotong University, Xi'an, 710049

2. Tsinghua University, Beijing, 100084

Abstract: This paper presented a new frame rotary type compressor, named translational rotary compressor to overcome the large friction energy loss and the sever wear of structure of other compressor. The compressor was made up of fixed cylinder, swing vane and translational rotor. During the whole cycle, the procedure of inflow, compress, air discharge operated continuously in the working chamber formed by the inside surface of cylinder, vane and the outside surface of bladed rotor. Thereby, the working state is smooth. The operation principles, structure characteristics and geometric theory of this mechanism were formulated and analyzed, and the calculation formulae for displacement volume, chamber pressure and thermodynamic properties were deduced. The analysis results show that this mechanism is of simple structure, no wearing parts, easily airtight, slight friction and lower cost; and fits for various fluids.

Key words: translational compressor; vane; friction power loss; stroke volume

0 引言

旋转式压缩机问世后,完全克服了往复式压缩机易损件多、体积大和可靠性差的缺点,在常压使用领域中使用户有了更大的选择余地。旋转式压缩机虽然没有往复运动的传动结构,不需要吸气阀,具有结构简单、易损件少、往复惯性力小、振动噪声低的优点,但是其较大的摩擦磨损却不容忽视,如滑板式压缩机完全依靠滑板的离心力与气缸的紧密贴合来保证压缩机较高的容积效率,这就使得滑板与转子、滑板与气缸的机械摩擦比较严重,产生的磨损和能量损失也较大;滚动活塞式压缩机则是依靠滑板背面的弹簧来保证滑板在任何瞬间都与滚动活塞紧密贴合,以密封被压缩的介质,如果要提高其密封效果,那么摩擦磨损就大。另外该压缩机的泄露通道由滚动活塞的径向间隙、端面间隙、滑板的侧面间隙及滑板与滑槽的间隙构成,这些间隙的严格控制导致了滚动活塞

压缩机的加工、安装比较复杂,同时检修也不大方便^[1]。由此可见,解决旋转式压缩机的摩擦磨损问题是压缩机研究领域的重要课题。本文提出了一种平动回转式压缩机,该压缩机将高速的旋转运动线速度转化成了低速平动和转动,有效地减少了摩擦磨损。另外该压缩机采用了独特的密封方式,完全不依靠滑板的背压或者滑板本身的离心力来密封被压缩的介质,其密封性能也大大提高,摩擦磨损有了显著的改善,有效地降低了功率损耗。

1 工作原理和结构特点

平动回转式压缩机工作原理如图 1 所示,该压缩机由固定的气缸体 1、平动回转的转子 2、偏心轴 3 及滑板 5 等主要部件组成。转子套在主轴的偏心轮上,主轴的旋转中心与气缸的几何中心重合。滑板绕滑板头圆心自由左右摆动并在转子的滑板槽中上下移动。气缸体内表面和转子外表面之间月牙形空间被滑板分成了 A、B 两个气腔,即进气腔和压缩腔,构成了基元容积,滑板两侧气

缸体上分别配置有吸气孔 4、排气孔 6。进气腔与吸气孔 4 相通,压缩腔与排气孔 6 相通。当主轴按逆时针转动时,转子沿气缸内表面滚动,此时进气腔容积逐渐增大,气体不断吸入,而压缩腔的容积则逐渐地减小,由此基元容积中的气体被压缩,压力不断升高,当压力升高到一定值时,排气孔的排气阀打开并开始排气。当转子处于气缸内表面上止点位置时,进气腔容积最大,而压缩腔在完成排气后瞬时消失,这时整个月牙形空间充满吸入的气体。当转子再继续转动时,随着转子与气缸的密封点逆时针移动,压缩腔再次出现,且容积不断缩小,使上一转吸入的气体受到压缩,而进气腔容积则不断扩大使气体再次吸入,完成一个工作循环。由于进气腔、排气腔同时工作,因此主轴每转一转,压缩机就完成一个工作循环。

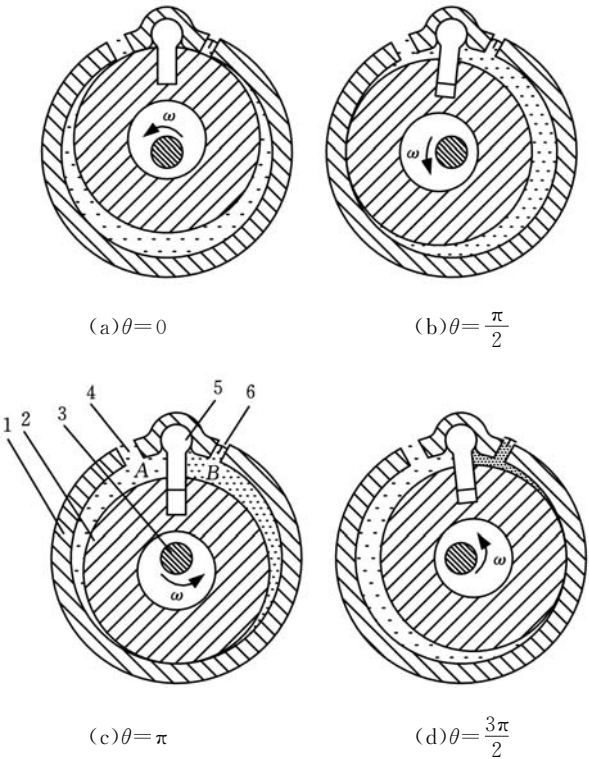


图 1 平动回转式压缩机工作原理示意图

平动回转式压缩机有以下独特的优点:

- (1)流动损失小。对于一个压缩腔来说,气体吸入、压缩和排气在转子旋转两周内完成,但吸气和压缩是在滑板两侧的工作腔同时进行,因此对整机来说仍然是每转完成一个工作循环,这样不仅机器运转平稳,而且气体在吸气和排气口的流速低,流动损失小。
- (2)密封性好、摩擦磨损小。平动旋转式压缩机采用了滑板插入转子的密封方式,压缩腔的气体通过滑板的泄露,必然经过一个迷宫式的密封途径,所以泄露会大大减少。无需像滚动活塞式

压缩机和滑板压缩机那样,必须依靠滑板的弹簧力和滑板的离心力来压紧密封,所以摩擦磨损小。

(3)滑板一端嵌入气缸体,一端插入转子,两侧支撑,可以承受较大的压力;同时又可绕滑板顶部转动,减小了滑板的侧向力,使压缩机的机械效率有所提高。

(4)无液击现象。由于该压缩机的压缩腔随时保持与排气通道相通,因此即使压缩介质中含有液体,也不会发生液击现象。

(5)转子的受力不会因气缸的直径或主轴偏心距的增大而增加,因而这种压缩机可以采用较小的气缸高度,使其内部最严重的泄漏部位—转子与气缸切点处径向间隙的面积减小。也就是说平动回转式压缩机结构本身有利于减少内部泄漏,提高容积效率。

(6)相对运动速率低,摩擦磨损小。相对滑板式压缩机与滚动活塞式压缩机,平动回转式压缩机把以往高速的滑动摩擦转化成转子与气缸的滚动摩擦和滑板与转子槽之间的低速滑动摩擦,降低了滑板的绝对运动速度,摩擦磨损改善效果明显。

(7)结构简单,容积效率高。平动回转式压缩机吸气腔直接吸气,无需进气阀,因此不存在吸气过热的现象。余隙容积接近为零,所以容积效率高。该压缩机零部件少,又无易损件,体积较往复压缩机小50%~60%,质量约轻60%左右^[2]。

(8)易于加工,成本低。平动回转式压缩机的主要零部件表面形状为圆形,易于加工和检修,加工成本低廉。

2 行程容积和热力学计算

2.1 行程容积计算

平动回转式压缩机行程容积^[3]如图 2 所示。图 2 中 a 点为滑板顶部圆心, b 为转子与气缸内切点。阴影部分面积即转子转角为 θ 时吸气腔体积,即

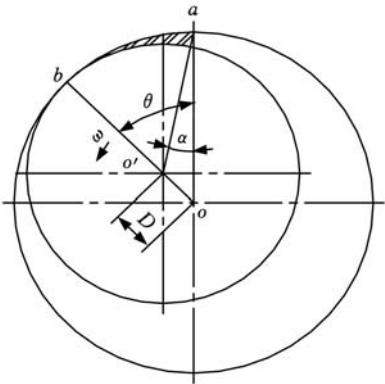


图 2 形成容积示意图

$$V_{suc}(\theta) = S_{suc}(\theta) H = [\frac{R^2}{2}\theta - \frac{R_{ro}^2}{2}(\alpha + \theta) - \frac{D}{2}R\sin\theta - L_o \frac{b_o}{2}]H \tag{1}$$

式中, V_{suc} 为压缩工作腔体积; S_{suc} 为工作腔面积; H 为转子轴向长度; R 、 R_{ro} 分别为气缸和转子的半径; α 为以转子处于上止点为起始时刻, 滑板的转角; θ 为转子绕主轴的旋转角; D 为气缸中心轴和转子中心轴的偏心距; L_o 为滑板在工作腔中的长度; b_o 为滑板厚度。

根据三角形正弦定理和余弦定理, 有

$$L^2 = R^2 + D^2 - 2RD\cos\theta \tag{2}$$

$$\frac{L}{\sin\theta} = \frac{D}{\sin\alpha} \tag{3}$$

$$L_o = L - R_{ro} \tag{4}$$

式中, L 为滑板顶部圆心到转子圆心的距离。

联立式(1) ~ 式(4), 可得

$$V_{suc}(\theta) = H[\frac{R^2}{2}\theta - \frac{R_{ro}^2}{2}(\theta + \arcsin \frac{D\sin\theta}{\sqrt{R^2 + D^2 - 2RD\cos\theta}}) - \frac{DR}{2}\sin\theta - \frac{b_o}{2}(\sqrt{R^2 + D^2 - 2RD\cos\theta} - R_{ro})] \tag{5}$$

排气腔的容积 $V_{com}(\theta)$ 也很容易由上式推导出来:

$$V_{com}(\theta) = [\pi(R^2 - R_{ro}^2) - (\sqrt{R^2 + D^2 - 2RD\cos\theta} - R_{ro})b_o]H - V_{suc}(\theta) \tag{6}$$

2.2 气缸中压力的计算

平动回转式压缩机中不存在吸气阀, 所以吸气损失很小, 认为气缸中的进气压力近似等于吸气管道中压力 p_{suc} 。而压缩腔相应转角下的压力 p_{com} 为

$$p_{com}(\theta) = p_{suc} \{V_{com}(\theta) / [\pi(R^2 - R_{ro}^2) - (\sqrt{R^2 + D^2 - 2RD\cos\theta} - R_{ro})b_o]H\}^m \tag{7}$$

式中, p_{suc} 为进气压力; m 为压缩的过程指数。

2.3 平动回转压缩机的功率和效率计算

绝热指示功率 N_i 为^[4]

$$N_i = \frac{1}{60} n p_{suc} \lambda_v V \frac{m}{m-1} \{ [\epsilon_i (1 + \delta)]^{\frac{m-1}{m}} - 1 \} \tag{8}$$

$$\epsilon_i = \frac{p_{com}(\theta)}{p_{suc}} =$$

$$\left[\frac{S_{com}(\theta)}{\pi(R^2 - R_{ro}^2) - (\sqrt{R^2 + D^2 - 2RD\cos\theta} - R_{ro})b_o} \right]^m \tag{9}$$

式中, n 为转子转速, r/min; δ 为进气和排气过程的相对压力损失之和, 即 $\delta = \delta_{suc} + \delta_{com}$; λ_v 为容积系数; V 为压缩机行程容积。

压缩机的轴功率 N_z 为

$$N_z = \frac{N_i}{\eta_m} \tag{10}$$

式中, η_m 为机械效率。

2.4 滑板受力分析

在平动回转式制冷压缩机中, 滑板做摆动运动。滑板顶部与气缸、滑板与转子之间的相对运动速率和摩擦力大小影响压缩机的功率。滑板顶部与气缸、滑板与转子之间的间隙影响压缩机气体的泄漏损失、运动部件的摩擦磨损以及运转的平稳性^[5], 因此研究滑板的运动对压缩机整体的性能意义重大。如图 3 所示, 平动回转式压缩机在工作过程中, 忽略滑板顶部的摩擦阻力矩, 根据力和力矩平衡公式可知:

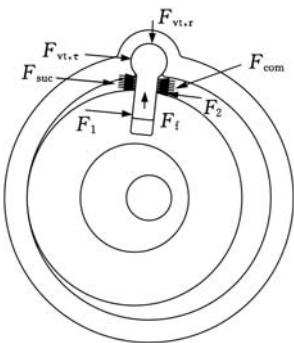


图 3 滑板受力简图

$$F_{vt,\tau} + F_1 + F_{suc} = F_2 + F_{com} \tag{11}$$

$$(F_{suc} - F_{com}) \frac{L_o}{2} + F_1 - F_2 L_o = J\alpha \tag{12}$$

$$\mu(F_1 + F_2) = F_f = F_{vt,r} \tag{13}$$

式中, $F_{vt,\tau}$ 为气缸对滑板顶部的切向力; F_1 为转子对滑板侧面的作用力; F_{suc} 为进气腔侧气体对滑板作用力; F_2 为转子切口对滑板的作用力; F_{com} 为排气腔侧气体对滑板作用力; μ 为滑板顶部与气缸、滑板与转子槽之间摩擦因数; J 为滑板绕滑板顶部圆心的转动惯量; α 为滑板的转动角加速度; F_f 为转子与滑板之间摩擦力; $F_{vt,r}$ 为气缸对滑板顶部径向力。

根据转子力矩平衡方程, 可以得到

$$T + F_1(D\cos\alpha + R_{ro}^2 - L_o) = 2DH(P_{com} - P_{suc})R_{ro}^2 \sin^2 \frac{\alpha}{2} + F_2 R_{ro}^2 \tag{14}$$

式中, T 为主轴的转矩, T 可先根据式(8) 计算求得压缩机所需的压缩功率, 再求出所需的轴功率, 选配电机后得到电机输出给主轴的转矩。

为了分析和比较平动回转式压缩机与传统压缩机滑板摩擦磨损情况, 表 1 给出了平动回转式压缩机样机和旋叶式压缩机样机的基本结构参数

表 1 压缩机运行参数和结构参数

机型	转子直径 (mm)	汽缸长轴长度 (mm)	滑板数	转子高度 (mm)	进气压力 (MPa)	排气压力 (MPa)	排气量 (cm ³ /r)
平动回转式压缩机	36.0	42.0	1	27.0	0.30	1.45	96.0
旋叶式压缩机	50.2	67.1	5	38.4	0.30	1.45	96.0

以及设计参数。从表 1 可以看出,平动回转式压缩机容积利用率比双工作腔的旋叶式压缩机利用率高54.02%,由此,在相同排量的情况下,平动回转式压缩机结构更为紧凑。

旋转压缩机的摩擦功耗一般包括以下几个方面:滑板侧面与滑槽之间的摩擦功耗、滑板顶部与气缸之间的摩擦功耗、转子与气缸之间的摩擦功耗、主轴与机架之间的摩擦功耗等,在上述这些摩擦功耗中,滑板与滑槽以及气缸之间的摩擦功耗占主要部分^[6-8]。

图 4 所示为滑板侧面与转子滑槽口处的摩擦力随转子转角变化的关系曲线,图 5 所示为滑板尾部与转子滑槽接触摩擦力随转子转角变化的关系曲线,图 6 所示为滑板头部与气缸接触力随转子转角变化的关系曲线。

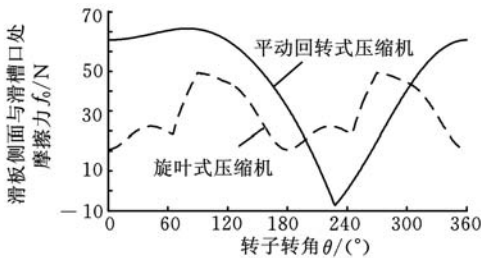


图 4 滑板侧面与转子滑槽口处的摩擦力随转子转角变化

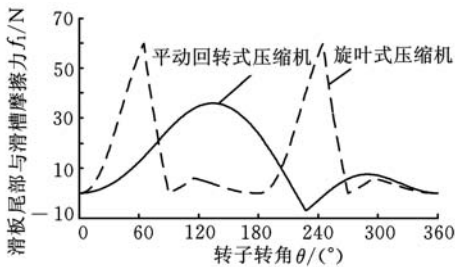


图 5 滑板尾部与转子滑槽接触摩擦力随转子转角变化

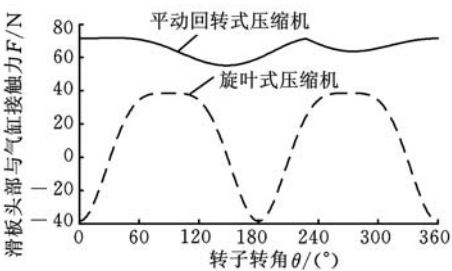


图 6 滑板头部与气缸接触力随转子转角变化

从图 4 可以看出,当转子转角在 200°至 310°之间时,平动回转式压缩机的滑板侧面与转子滑槽口处摩擦力略小于旋叶式压缩机滑板侧面与转子滑槽口处摩擦力,当转子转角处于其他区间时,平动回转式压缩机的滑板侧面与转子滑槽口处摩擦力略大于旋叶式压缩机滑板侧面与转子滑槽口

处摩擦力。从图 5 可以看出,当转子转角在 0°至 80°之间及 200°至 270°之间时,平动回转式压缩机滑板尾部与转子滑槽接触摩擦力小于旋叶式压缩机滑板尾部与转子滑槽接触摩擦力,在转子转角处于其他区间时大于旋叶式压缩机滑板尾部与转子滑槽接触摩擦力。从图 6 可以看出,平动回转式压缩机的滑板头部与气缸接触力大于旋叶式压缩机滑板头部与气缸接触力。由此可见,平动回转式压缩机的滑板与旋叶式压缩机的单个叶片受力情况类似,但是滑板的摩擦功不仅与作用在滑板上的摩擦力大小有关,还受到滑板数量的影响,其消耗的整体摩擦功率需要综合考虑上述因素。表 2 给出了平动回转式压缩机和旋叶式压缩机的滑板侧面以及头部的最大摩擦力和摩擦功耗的比较。

表 2 滑板最大摩擦力和摩擦功耗

机型	槽口最大摩擦力 (N)	滑板尾部最大摩擦力 (N)	侧面摩擦功耗 (W)	头部最大摩擦力 (N)	头部摩擦功耗 (W)
平动回转式压缩机	83.03	35.87	24.96	71.82	21.75
旋叶式压缩机	38.56	59.93	13.41	38.56	44.73

从表 2 中可以看出,平动回转式压缩机滑板侧面摩擦功耗大于旋叶式压缩机单个滑板侧面摩擦功耗,由于旋叶式压缩机是多滑板结构,故平动回转式压缩机滑板侧面总摩擦功耗小于旋叶式压缩机滑板侧面总摩擦功耗。平动回转式压缩机头部摩擦功耗小于旋叶式压缩机单个滑板头部摩擦功耗,也小于旋叶式压缩机滑板头部总摩擦功耗。这是由于平动回转式压缩机滑板均有支撑,受力结构好,滑板两端同时分担气体压力,所以可以承受较大的压力差。旋叶式压缩机单个滑板总摩擦功耗为58.14W,而平动回转式压缩机滑板的总摩擦功耗只有46.71W,相比旋叶式压缩机的单个滑板摩擦功耗降低了19.66%,相比旋叶式压缩机总的滑片摩擦功耗降低了83.93%,大大提高了压缩机的机械效率。

3 结语

平动回转式压缩机是一种最新提出的全新结构的压缩机,本文详细介绍了其工作原理和基本结构,讨论了该压缩机的几何理论、结构特点,并详细推导了行程容积、功率和效率的计算公式,并针对所开发的样机参数计算了基元容积中的压力随转角的变化关系。由于该机具有摩擦磨损小、噪声低、结构简单等优点,可望成为空气动力、空调制冷等领域的一种新的机型。

一种新型五自由度混联机械手的概念设计及尺度综合

李 彬^{1,2} 黄 田¹ 张利敏¹ 赵新华²

1. 天津大学, 天津, 300072

2. 天津理工大学, 天津, 300384

摘要:研究了一种新型的五自由度混联机械手, 该机械手由一个三自由度并联机构和一个二自由度旋转头串接而成。在建立三自由度并联机构全雅可比矩阵的基础上, 考察机构外力、外力矩对支链驱动力及约束力的映射关系, 提出在给定载荷下, 支链驱动力及约束力全域最大值均值最小的机构传动性能评价指标。给定机构期望工作空间, 并以全局条件数、速度、精度为机构的操作性能指标, 研究三自由度并联机构的尺度综合问题。通过单调性分析得到机构尺度参数对上述各指标的影响规律图谱, 获得其优化设计区域, 根据实际设计要求确定了参数变量。最后给出一组算例, 验证了该尺度综合方法的有效性。

关键词:混联机械手; 概念设计; 尺度综合; 全雅可比矩阵

中图分类号:TH112

文章编号:1004—132X(2011)16—1900—06

Conceptual Design and Dimensional Synthesis of a Novel 5-DOF Hybrid Manipulator

Li Bin^{1,2} Huang Tian¹ Zhang Limin¹ Zhao Xinhua²

1. Tianjin University, Tianjin, 300072

2. Tianjin University of Technology, Tianjin, 300384

Abstract: A novel 5 degree-of-freedom(DOF) hybrid manipulator were presented. The manipulator was composed of a 3-DOF parallel mechanism which was serially connected with a 2-DOF rotating head. On the basis of the formulation of the overall Jacobian matrix of the parallel mechanism, the mapping characteristics among the external force and moment applied on the moving platform and actuation and constraint forces of the links were investigated, and a transmission capability index was proposed for minimizing the maximum actuation and constraint forces of the links for a given set of external force and moment. Dimensional synthesis of the 3-DOF parallel mechanism was carried out under various geometrical and performance constrains in term of global conditioning index, linear velocity and accuracy for a given task space. The results of the optimal kinematic design were given via examples.

Key words: hybrid robot; conceptual design; dimensional synthesis; overall Jacobian matrix

0 引言

近年来, 随着对串并联式机械手理论研究的深入和其工程应用的增多, 基于混联拓扑结构的

新型机床在实现技术上取得了重大突破, 这种拓扑结构继承了串联和并联拓扑结构的优点, 具有结构紧凑、工作空间/占地面积比大、刚度高、可重构能力强等特点, 可广泛应用于大型结构件高速高精度数控加工单元中^[1-5]。目前, 这类混联式机械手的典型代表为 Neumann^[6-7]发明的混联机械手模块 Tricept, 该模块为一种带有三条无约束主

收稿日期: 2010—09—29

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2009AA04Z219)

参考文献:

- [1] 马国远, 李红旗. 旋转压缩机[M]. 1 版. 北京: 机械工业出版社, 2001.
- [2] 屈宗长, 樊灵, 王迪生. 通用型线涡旋压缩机的几何理论[J]. 西安交通大学学报, 1999, 34(11): 39-42.
- [3] 冯诗愚, 高秀峰, 刘卫华, 等. 内啮合转子压缩机工作腔容积计算及分析[J]. 中国机械工程, 2008, 19(16): 1904-1908.
- [4] 郁永章, 孙嗣梅, 陈宏俊. 容积式压缩机技术手册[M]. 1 版. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- [5] 杨骅, 屈宗长, 周慧, 等. 同步回转式制冷压缩机的运动分析[J]. 西安交通大学学报, 2008, 42(5): 565-567.
- [6] 吴立志, 马国远. 双层滑片压缩机滑片摩擦及磨损

分析[J]. 流体机械, 2003, 31(1): 13-16.

- [7] 马国远, 彦启森, 郁永章. 双层滑片回转运动机构的力学特性[J]. 应用力学学报, 2001, 18(2): 69-73.
- [8] 杨骅, 屈宗长, 周慧, 等. 同步回转式压缩机滑片摩擦特性研究[J]. 西安交通大学学报, 2008, 42(7): 843-847.

(编辑 王艳丽)

作者简介: 胡 旭, 男, 1986 年生. 西安交通大学能源与动力工程学院博士研究生。主要研究方向为平动回转式压缩机性能。
屈宗长, 男, 1952 年生. 西安交通大学能源与动力工程学院教授。
于洪南, 男, 1989 年生. 清华大学机械工程学院本科生。
孙金菊, 女, 1962 年生. 西安交通大学能源与动力工程学院教授、博士研究生导师。