

复合分子泵牵引级螺旋槽深对压缩比的影响

王晓冬¹,张 磊¹,巴德纯¹,陶继忠²
(1. 东北大学 机械工程与自动化学院,辽宁 沈阳 110819;2. 中国工程物理研究院 机械制造工艺研究所,四川 绵阳 621900)

摘 要:建立了描述复合分子泵牵引级抽气性能的理论模型.依据该理论模型,在牵引级不同螺旋升角、转子-定子间隙、转子转速、被抽气体流动状态条件下,对牵引级螺旋槽深与压缩比的关系进行了研究.结果表明:压缩比随螺旋槽深的减小,先增加后减小,存在最优螺旋槽深,使牵引级的压缩比达到最大,螺旋升角对最优螺旋槽深影响较小,最优螺旋槽深随转子-定子间隙减小而减小,随转子转速的增加而增加,当被抽气体为黏滞流时,最优槽深值更小.

关 键 词:复合分子泵;牵引级;理论模型;压缩比;最优槽深

中图分类号:TB 752 文献标志码:A 文章编号:1005-3026(2016)10-1437-04

Effect of Spiral Groove Depth of Compound Molecular Pump 's Drag Stage on Compression Ratio

WANG Xiao-dong¹,ZHANG Lei¹,BA De-chun¹,TAO Ji-zhong²
(1. School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China;
2. Institute of Machinery Manufacturing Technology, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China. Corresponding author: WANG Xiao-dong, E-mail: xdwang@mail.neu.edu.cn)

Abstract: A theoretical model for describing the pumping performance of compound molecular pump 's drag stage was established. According to the theoretical model, the relationship between the depth of drag stage 's spiral groove and compression ratio was studied under different spiral angles, rotor-stator clearances, rotor speeds and gas flows. The results showed that compression ratio firstly increases and then decreases with the decrease of spiral groove 's depth. There exists the optimal groove depth, which result in the maximum compression ratio of drag stage. The spiral angles have little effect on the optimal groove depth which decreases with the decrease of the rotor-stator clearances, and increases with the increase of the rotor speed. The optimal groove depth is smaller when the gas flow is viscous.

Key words: compound molecular pump; drag stage; theoretical model; compression ratio; optimal groove depth

复合分子泵具有大抽速、高压压缩比的特点,随着医药、半导体等行业的迅速发展,其应用日益广泛.目前,主流复合分子泵结构为涡轮级与筒式牵引级(以下简称牵引级)的组合^[1-2].涡轮级具有较大的抽速,而牵引级是实现复合分子泵高压压缩比的关键部分^[3].牵引级高的压缩比会造成转子-定子间隙内气体的泄漏,降低泵的抽气性能,因此牵引级转子-定子之间的间隙一般很小(0.1 mm量级),这对牵引转子加工、装配、动平衡提出了更高要求,也是对牵引级工作可靠性的挑战.设计者在保证牵引级安全工作的前提下,致力于提高牵引级的压缩比.

影响牵引级压缩比的主要因素有螺旋槽深、螺旋升角、螺旋槽宽、转子-定子间隙、转速等^[4],螺旋槽深是其中一重要参数^[5].有研究表明,优化设计螺旋槽结构能够减少气体的泄漏^[6-8],优化设计螺旋槽深能够提升牵引级对气体的压缩作用^[9].本文通过建立描述牵引级抽气

性能的计算模型,以国家仪器重大专项开发的复合分子泵为例,分析了在特定螺旋升角、转子-定子间隙、转子转速、被抽气体流态条件下,牵引槽深对压缩比的影响,并得出最优槽深与上述参数之间的变化规律,为复合分子泵牵引级螺旋槽深优化设计提供理论依据。

1 理论模型

多槽螺旋式牵引级结构沿轴向展开如图 1 所示。转子与定子的间隙为 h' ,螺旋槽深为 h 。沿轴 AA' 建立坐标系,在相邻螺旋槽的中点处取三个点 B_1 、 B_0 和 B_2 作为分析对象,考虑多螺旋槽的间隙泄漏,建立牵引级的抽气理论模型。

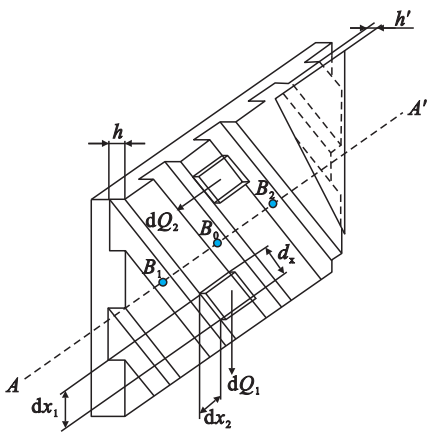


图 1 多槽螺旋式牵引分子泵结构示意图
Fig. 1 Structure diagram of multi spiral groove molecular drag pump

牵引级工作时,由于转子的携带作用,会造成相邻槽间气体沿间隙的周向牵引泄漏,泄漏量设为 dQ_1 ,其方向垂直于转轴 AA' ;由于相邻槽间存在压力差,会造成相邻槽间气体沿间隙的轴向压差泄漏,泄漏量设为 dQ_2 ,其方向为转轴 AA' 方向。

设由 B_2 点到 B_0 点的泄漏量为 dQ' ,有
$$dQ' = dQ_1' + dQ_2' \quad (1)$$

设由 B_0 点到 B_1 点的泄漏量为 dQ'' ,有
$$dQ'' = dQ_1'' + dQ_2'' \quad (2)$$

设在 B_0 点处气流的净增长量为 dQ ,有
$$dQ = dQ' - dQ'' \quad (3)$$

当牵引槽抽走的气流量与 B_0 点处气流的净增加量相等时,可以推导出两个相邻螺旋槽之间压力比 k 的计算公式^[10]:

$$\frac{(2\pi r)^2 h'^2}{\alpha l' h^2 (2\pi r - \gamma l) \gamma} \cdot \frac{(1 + s^2)}{s} \cdot \frac{(k - 1)^2}{k} + \frac{(2\pi r)^3 h' n \theta}{2 h^2 (2\pi r - \gamma l) \gamma} \cdot (1 + s^2) \cdot \frac{(k^2 - 1)}{k} -$$

$$\frac{(2\pi r)^2 \theta n}{h \gamma} \ln k + \ln^2 k = 0 \quad (4)$$

其中 h 为螺旋槽深; h' 为转子与定子间隙; l 为槽间凸台端面宽度; l' 为槽间凸台轴向宽度, $l' = l \tan \varphi$; α 为修正系数, $\alpha = B_0 B_2 / l'$; γ 为螺旋槽头数; n 为转子转速; r 为转子半径; $s = \tan \varphi$; φ 为螺旋升角; θ 为外黏滞系数,对 293 K 空气, $\theta = 1.61 \times 10^{-3}$ s/m。

若螺旋牵引级的高度为 H ,则分子流态多槽牵引级压缩比:

$$K = k^{H\gamma/2\pi rs} \quad (5)$$

采用相同的分析方式^[10],可得黏滞流态牵引级螺旋槽单位槽长压力 m' :

$$m' = 12\pi r n \eta \alpha \gamma l s^2 \times \frac{(2\pi r - \gamma l)h - 2\pi r h'(1 + s^2)}{(2\pi r \sqrt{1 + s^2})^2 h'^3 + (2\pi r - \gamma l)h^3 \alpha \gamma l s^2} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + s^2}} \quad (6)$$

黏滞流态时,多槽牵引级压缩比计算式为

$$K = \frac{H}{p_s \cdot \sin \varphi} m' + 1 \quad (7)$$

式中: η 为动力黏性系数; α 为修正系数; p_s 为特征压力。

2 结果与分析

以科技部重大仪器专项开发的复合分子泵牵引级为计算实例,具体参数如表 1 所示。依上节理论模型,采用 MATLAB 进行计算机编程,获得如下计算结果。

表 1 复合分子泵牵引级参数
Table 1 Parameters of compound molecular pump's drag stage

h/mm	h'/mm	γ	$n/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	d/mm	H/mm	b/mm
4~0.8	0.25	9	60 000	68	50	6

2.1 不同螺旋升角时螺旋槽深对压缩比的影响
螺旋升角分别为 25° 及 20° 时,分子流态下螺旋槽深对压缩比的影响如图 2 所示,黏滞流态下螺旋槽深对压缩比的影响如图 3 所示。

由图可知,不同螺旋升角时,随着螺旋槽深的变小,压缩比均呈现先变大后变小的特征,存在最大压缩比。螺旋升角为 25° 、 20° 时,分子流态条件下最大 K 值对应的螺旋槽深分别为 2.2 和 2 mm。黏滞流态时,最优螺旋槽深均出现在 1.5 mm 处,表明黏滞流态时,需要更小的槽深,以获得较高的压缩比。从图中可见,较小的螺旋升角有利于牵引

级压缩比的提高,其原因在于螺旋升角变小时,抽气通道变长,对气体的压缩作用增强.分子流态下,螺旋升角对压缩比影响明显,螺旋升角由 25°

变为 20°时,最大压缩比增加近 3 倍.因此,合理的螺旋升角和螺旋槽深选取对牵引级获得高压比至关重要.

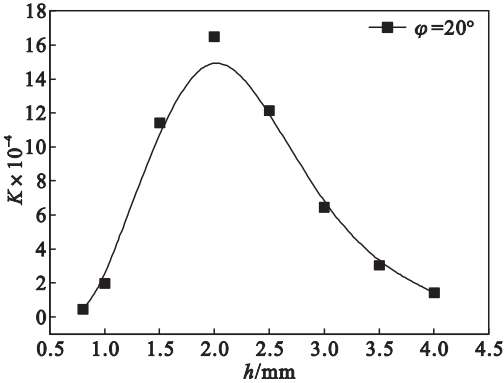
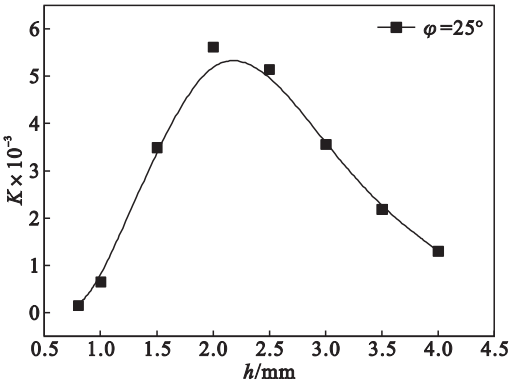


图 2 分子流态下螺旋槽深对压缩比的影响

Fig. 2 Effect of spiral groove depth on compression ratio in molecular flow

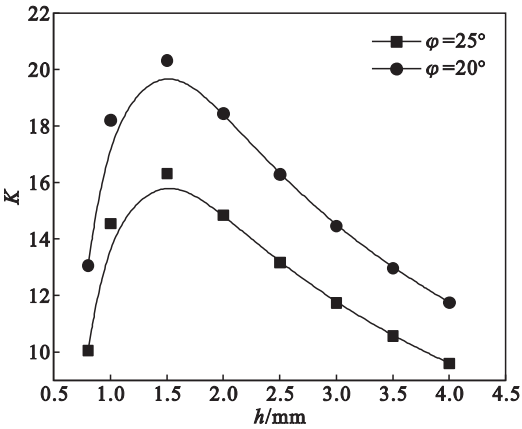


图 3 黏滞流态下螺旋槽深对压缩比的影响

Fig. 3 Effect of spiral groove depth on compression ratio in viscous flow

2.2 不同转子-定子间隙时螺旋槽深对压缩比的影响

分子流及黏滞流态下螺旋升角为 25°,转子-定子间隙分别为 0.25、0.2 mm 时,螺旋槽深

对压缩比的影响如图 4 所示.

由图 4 可知,不同转子-定子间隙时,随着螺旋槽深的变小,压缩比均呈现先变大后变小的特征,存在最大压缩比.分子流条件下,转子-定子间隙为 0.25、0.2 mm 时,最大压缩比对应的最优螺旋槽深分别为 2.3 和 1.9 mm;黏滞流态时,最优螺旋槽深分别为 1.5 和 1.1 mm.最优螺旋槽深随转子-定子间隙变小而变小.间隙变小,有效抑制了间隙泄漏,压缩比明显提高.

2.3 不同转子转速时螺旋槽深对压缩比的影响

分子流及黏滞流态下,螺旋升角为 25°,转子-定子间隙为 0.25 mm,转子转速分别为 60 000、72 000 r/min 时,螺旋槽深对压缩比的影响如图 5 所示.

由图 5 可知,不同转子转速时,随着螺旋槽深的变小,压缩比均呈现先变大后变小的特性,存在最大压缩比.分子流态条件下,转子转速为 72 000、60 000 r/min 时,最大压缩比对应的最优

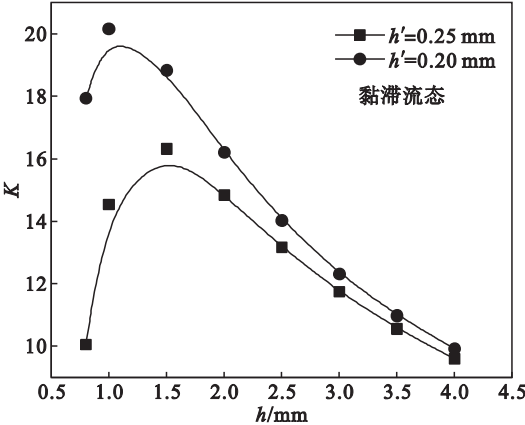
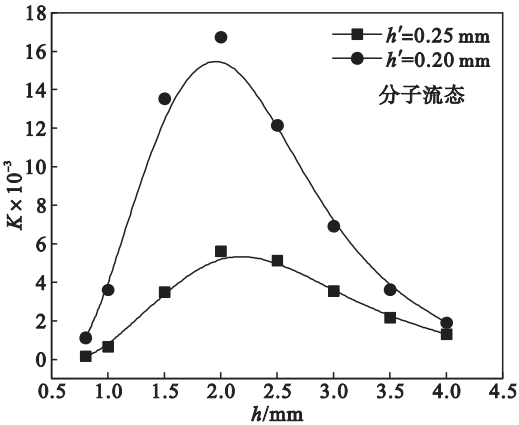


图 4 不同间隙时螺旋槽深对压缩比的影响

Fig. 4 Effect of spiral groove depth on compression ratio with different gaps

槽深分别为 2.4 和 2.1 mm. 转子转速变大有利于压缩比的提高,同时最优槽深又适度放宽,可提高牵引级的工作可靠性.黏滞流态时,最优槽深均出

现在 1.5 mm 处,小于分子流态时的对应值,表明黏滞流态下需要更浅的螺旋槽深以保证一定的压缩比.

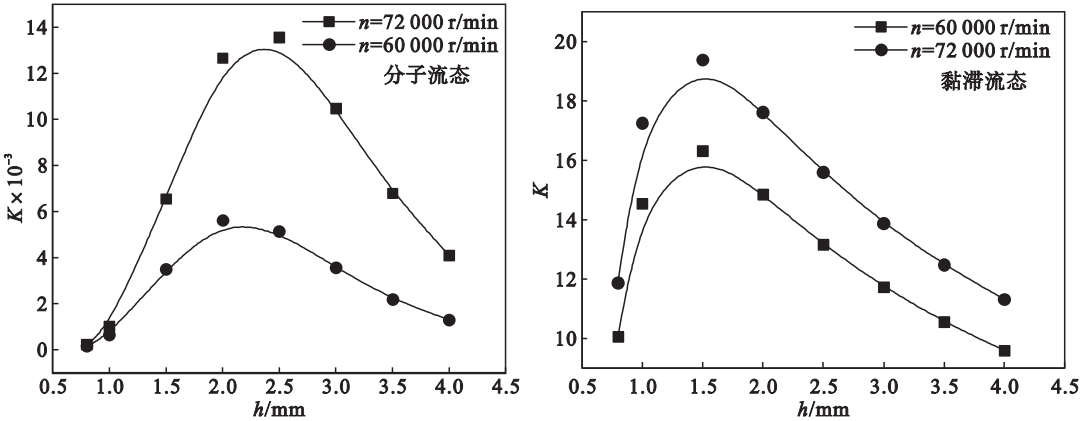


图 5 不同转子转速时螺旋槽深对压缩比的影响
Fig. 5 Effect of spiral groove depth on compression ratio with different rotor speeds

3 结 论

- 1) 复合分子泵牵引级的压缩比与螺旋槽几何参数、转子-定子间隙、转速、被抽气体流动状态等因素有关,螺旋槽深是其中一重要结构参数.随着牵引槽深的变小,压缩比均呈现先变大后变小的特性,存在最优螺旋槽深使压缩比达到最大.
- 2) 牵引级压缩比随着螺旋升角减小而增大,对最优螺旋槽深值影响不大;牵引级压缩比随着转子-定子间隙减小而增大,最优螺旋槽深值随之减小;牵引级压缩比随着转子转速增大而增大,最优螺旋槽深值亦增大.
- 3) 黏滞流态下牵引级压缩比远小于分子流态对应值,最优螺旋槽深值比分子流态更小.

参考文献:

[1] 王晓冬,巴德纯,杨乃恒,等. 新型复合分子泵的结构设计理论研究[J]. 真空,1993(3) 26-31.
(Wang Xiao-dong, Ba De-chun, Yang Nai-heng, et al. Study on the structure design theory of new type compound molecular pump[J]. Vacuum, 1993(3) 26-31.)

[2] Hwang Y K, Heo J S. Molecular transition and slip flows in rotating helical channels of drag pump[C]// Rarefied Gas Dynamics :22nd International Symposium. New York :AIP

Publishing 2001 893-899.

[3] Heo J S, Hwang Y K. Molecular transition and slip flows in the pumping channels of drag pumps[J]. Journal of Vacuum Science & Technology 2000, 18A: 1025-1034.

[4] Hwang Y K, Heo J S. Three-dimensional rarefied flows in rotating helical channels[J]. Journal of Vacuum Science & Technology 2001, 19(2) 662-672.

[5] 王晓冬,巴德纯,杨乃恒. 矩形截面槽牵引分子泵分子流态下抽气特性的研究[J]. 真空,1994(4) 9-11.
(Wang Xiao-dong, Ba De-chun, Yang Nai-heng. Study on gas pumping characteristics of drag molecular pump in rectangular cross section[J]. Vacuum, 1994(4) 9-11.)

[6] Kim D H, Kwon M K, Huang Y K. A study on the pumping performance of a helical-type molecular drag pump[C]// Rarefied Gas Dynamics :26th International Symposium. New York 2001 1141-1146.

[7] Heo J S, Hwang Y K. Direct simulation of rarefied gas flows in rotating spiral channels[J]. Journal of Vacuum Science & Technology 2002, 20A: 906-910.

[8] Tsui Y Y, Kung C P, Cheng H P. Modeling of the slip flow in the spiral grooves of a molecular pump[J]. Journal of Vacuum Science & Technology 2001, 19A: 2785-2790.

[9] Duval P, Raynaud A, Saulgeot C. The molecular drag pump: principle, characteristics, and applications[J]. Journal of Vacuum Science & Technology, 1988, 6A: 1187-1191.

[10] 王晓冬,巴德纯,张世伟,等. 真空技术[M]. 北京:冶金工业出版社 2006 147-154.
(Wang Xiao-dong, Ba De-chun, Zhang Shi-wei, et al. Vacuum technology [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press 2006 147-154.)