

# 国内螺杆式制冷压缩机行业现状与发展趋势

陈文卿 沈九兵 邢子文

(西安交通大学能源与动力工程学院)

**摘要** 螺杆式制冷压缩机进入国内市场已有30多年,如今已逐步取代其他型式压缩机,成为中、大容量制冷空调系统的优势选择,市场份额逐年增加。本文从转子型线、转子加工、喷油及补气技术和控制调节技术等多个方面阐述我国螺杆式制冷压缩机行业所取得的技术进步,介绍螺杆式制冷压缩机在热泵及冷冻冷藏行业中的应用,指出目前国产螺杆式制冷压缩机在生产制造及控制系统方面存在的几点不足,预测螺杆式制冷压缩机的未来发展趋势,力求为我国螺杆式制冷压缩机的自主研发创新起到指导性作用。

**关键词** 螺杆式压缩机;制冷;转子;型线;容量调节;发展趋势

## Current situation and development trend of screw refrigeration compressor in China

Chen Wenqing Shen Jiubing Xing Ziwen

(School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University)

**ABSTRACT** Screw compressor entered domestic market 30 years ago, and substituted other style compressors gradually and is becoming the superior selection in refrigeration and air-conditioning system of medium and high capacity with its market share increasing year by year. The technology improvement of the screw refrigeration compressor industry in China is elaborated from the aspects such as rotor profile line, rotor processing, injection technology and capacity control and so on. The application of screw compressor into heat pump and freeze and cold storage is also briefly introduced. However, there are still some deficiencies requiring more efforts to be overcome in manufacture and control system for domestic screw compressor. The development trend of screw compressor is cautiously predicted. The study is hoped to provide some actual guidance for independent research and innovation.

**KEY WORDS** screw compressor; refrigeration; rotor; profile line; capacity control; development trend

通常所称的螺杆式压缩机是指双螺杆式压缩机,其发展史可以追溯到1878年德国人H. Krihar最先提出的无内压缩螺杆式压缩机以及1934年瑞典皇家理工学院教授Alf Lysholm设计的螺杆式压缩机及其转子齿型。如图1所示,它主要由机体以及包含在机体中的一对平行配置的螺旋转子组成。在电动机的驱动下,阳、阴转子像齿轮一样啮合旋转,由转子齿顶与机体内壁围成的工作容积周期性扩大和缩小,只需在机体上合理布置吸、排气孔口即可实现吸气、压缩和排气过程。

自螺杆式压缩机问世以来,工程师及科研人员就转子型线设计及加工制造技术进行了大量研究与探索,新型高效双边不对称型线的提出,转子精密快速加工技术的成熟以及喷油技术的引入使得螺杆式压缩机已具备结构紧凑、可靠性高、动力平衡性好和适应性强等优点,广泛应用于空气动力、制冷空调及各种工艺流程中。从20世纪60年代开始,螺杆式制冷压缩机在国外逐渐大量生产和应用,在宽广的容量和工况范围内逐步取代了活塞式制冷压缩机等其他种类的压缩机<sup>[1]</sup>。一般

收稿日期:2011-12-14

作者简介:陈文卿,在读博士研究生,研究方向为螺杆式制冷压缩机流动与换热。

地,螺杆式制冷压缩机容积效率可达到 90% 以上,阳转子外径在 75~620 mm 之间,使得压缩机排气量可以完全覆盖 0.6~600 m<sup>3</sup>/min 的范围,正常吸排气压差大约为 1.5 MPa,最高可达 4.0 MPa<sup>[2]</sup>,在中等容积流量的空气动力装置及中等制冷量的制冷装置中占据了市场的优势份额。

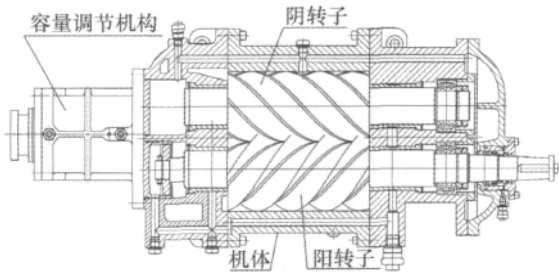


图 1 螺杆式制冷压缩机结构示意图

## 1 国内螺杆式制冷压缩机行业进展

1976 年,在参考国外进口样机结构的基础上以单边不对称摆线-销齿圆弧型线为核心,国内联合设计生产出第一台喷油螺杆式制冷压缩机。经过 35 年的技术改造与自主创新,国内螺杆式制冷压缩机在转子型线、加工装配精度以及调节控制等方面的技术水平有了很大提高,逐步缩小了与国际品牌的差距,涌现出烟台冰轮集团有限公司、大连冷冻机股份有限公司、武汉新世界制冷工业有限公司等一大批螺杆式制冷压缩机生产制造企业,与高等院校、科研事业单位一起不断研究开发新型高效、环保螺杆式制冷压缩机,传统国际品牌垄断冷水机组和空气源热泵机组螺杆机头供应的局面正在改变。

### 1.1 整体技术水平的提高

#### 1.1.1 转子型线

螺杆式制冷压缩机中,转子齿面与转子轴线垂直面的截交线称为转子型线。转子型线是螺杆式制冷压缩机设计中的核心技术。转子型线的好坏,直接决定了螺杆式制冷压缩机的泄漏特性、动力特性的优劣。而螺杆式制冷压缩机的泄漏是螺杆式制冷压缩机工作过程中存在的主要问题之一,对螺杆式制冷压缩机的容积效率和绝热效率具有重要的影响,从而影响螺杆式制冷压缩机的热力性能;螺杆式制冷压缩机的动力特性对压缩机的振动、噪声、机械效率及装配间隙会产生一定的影响,这些也是评价螺杆式制冷压缩机性能好坏的重要指标。

在全面比较国际知名型线的基础上,国内科

研机构凭借大量的理论与试验研究,从影响热力性能的因素出发,更进一步注意到有关型线参数对转子间力矩分配的影响,开发了在热力性能、动力特性以及批量加工方面具有更大优越性的新一代高效螺杆式制冷压缩机双边不对称圆弧型线<sup>[3-6]</sup>,如图 2 所示。型线的各个组成齿曲线全部采用圆弧及其包络线以形成比较短的接触线,实现转子的稳定啮合,当润滑油进入接触线之间时,很容易产生流体动力润滑油膜以增强曲线密封效果,提高机器的运转效率。各组成齿曲线之间的连接比较平滑,型线上不存在任何尖点,可以很方便地选取磨削方法加工转子,避免了在尖点处形成的应力集中,并且工质在转子内流动过程中受到的阻力较小,降低了因流动而产生的噪声。双边型线还可以恰当地安排阴阳转子之间的力矩,减少压缩机工作过程中由于力矩分配不均匀而产生的振动,提高压缩机的特性。目前,国内大多数螺杆式制冷压缩机生产厂家已采用新一代双边不对称型线使机器性能较以往有了很大提高,甚至达到国际先进水平,从根本上改变了机头全部依赖进口的局面。

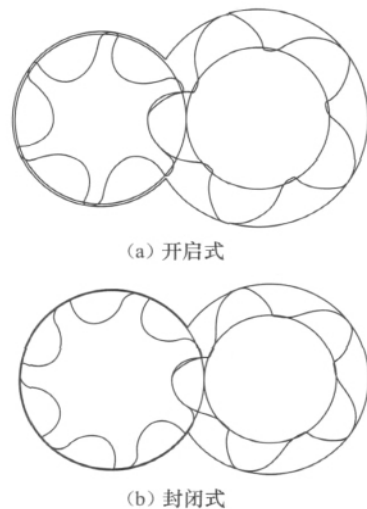


图 2 典型螺杆式制冷压缩机转子型线

#### 1.1.2 转子加工

转子加工一般要经过车削、铣削和磨削 3 道基本工序。为了补偿加工误差和转子工作时的变形,需要在理论型线的基础上,设定各点间隙,并根据由此得到的实际型线进行铣刀与砂轮刃形设计。由于型线各部分变形量的不同,应在对型线各部分的变形进行具体分析和计算的基础上,采用“不等距法”设计啮合间隙,并将此方法应用于

刀具刃形的设计。此外,为了保证阴、阳转子在节圆附近以纯滚动的方式接触和传递力矩,在刀具刃形设计中应在节圆附近设置宽度为 2~4 mm 的驱动带。国内螺杆式制冷压缩机生产厂家大批引进了专门用于转子磨削加工的高精度、高自动化数控磨床,主要是英国的 Holroyd,德国的 Kapp 和 Klingelnber 精密转子研磨机,并与这种“不等距法”设计啮合间隙和在节圆附近设置驱动带的转子刀具刃形设计技术相结合,大幅提高了转子加工的精度和效率,改善了压缩机的性能与可靠性。

### 1.1.3 喷油、补气技术

在螺杆式制冷压缩机工作过程中,喷油可以起到冷却、润滑、密封和降噪等作用,喷油技术的引入极大促进了螺杆式制冷压缩机的发展。喷油孔口的大小、位置、喷油量、油的雾化程度以及油在工作腔内滞留的时间等参数对压缩机的特性都具有重要的影响,早就引起了大批国外螺杆式制冷压缩机从业人员的高度关注<sup>[7-8]</sup>。以西安交通大学为代表的国内科研机构与生产厂家也开展了螺杆式制冷压缩机喷油特性的研究工作,建立了喷油螺杆式制冷压缩机工作过程的数学模型,测试了螺杆式制冷压缩机在不同工况下的性能以检验数学模型的正确性,并研究了油在螺杆式制冷压缩机工作过程中的分布问题以及喷油对螺杆式制冷压缩机泄漏的影响,形成了一套完整的喷油技术理论<sup>[9]</sup>。

利用螺杆式制冷压缩机吸气、压缩和排气过程处于不同空间位置的特点,在压缩机吸气结束后的某一位置增开补气孔口,吸入来自经济器的制冷剂气体使进入蒸发器的液体过冷度增加,以提高系统制冷量与性能系数 *COP*。通过试验获取螺杆式制冷压缩机在补气过程中的 *p-V* 指示图,并以此分析使用经济器对压缩机补气时压缩机的性能参数变化情况<sup>[10]</sup>,我国螺杆式制冷压缩机业内人员已基本掌握了压缩机功率及效率随补气压力及补气孔口形状大小的变化规律和最佳补气压力的选定原则。

### 1.1.4 容量调节与内容积比调节

螺杆式制冷压缩机在实际运行过程中,外界使用工况多变,为了保证压缩机的运行效率,必须调节其自身运行工况。根据螺杆式制冷压缩机容量调节和内容积比调节的机制,图 3 所示的仅通过控制相关油路上的电磁阀,即可同时调节压缩机能量和内容积比的能量调节机构已被国内螺杆式

制冷压缩机生产厂家广泛使用,解决了在变工况时由于内容积比不匹配造成的过压缩或欠压缩带来的损失,保证压缩机运行功耗最小化,使螺杆式制冷压缩机在正常工况、高温工况、低温工况和最大压差工况下运行时都能保持较高的效率。合理地布置滑阀机构的增减载油路,容易实现有级或无级容量调节。两者相对而言,有级容量调节比较稳定,但调节范围有限;无级容量调节范围比较灵活,却容易出现载位漂移现象。此外,采用变频调速技术也可以实现螺杆式制冷压缩机这种回转机械的容量调节,节能效果显著,但制造成本高。因此还需要根据具体应用场合选择合理的容量调节方式。

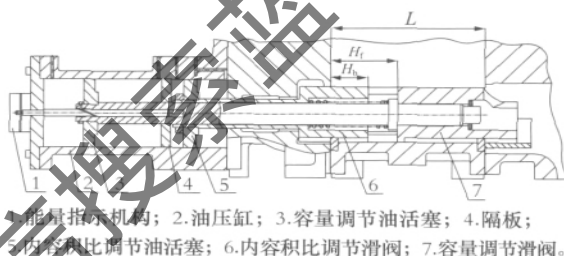


图 3 螺杆式制冷压缩机能量调节机构示意图

## 1.2 市场份额的增加

在制冷空调领域,活塞式制冷压缩机单机制冷量在 3~100 kW 之间,在大范围的制冷或空调工况下必须多台机器相连才能达到效果,而螺杆式制冷压缩机单机的制冷量(30~1 500 kW)足以应对各种制冷范围且易于调节。此外,螺杆式制冷压缩机具有结构简单、运行可靠高效等一系列独特优点,正快速取代活塞式制冷压缩机,占据了中、高容量的制冷空调应用场合的大部分比例。随着国内经济的增长,人们对于生活、工作环境舒适性的要求不断提高,给中央空调提供了广阔的发展空间。仅 2004 年一年时间我国中央空调市场增长率就达到 48%。在房地产开发、百货仓储物流和大型公共建筑建设等众多需要空气调节配套设备的产业带动下,2005 年至今中央空调的年平均销售额均保持在 20% 左右的增长速度,大大推进了螺杆式制冷压缩机市场份额的上升,吸引了大批外资企业到我国建造生产基地,如开利、比泽尔、江森自控、神户制钢、莱福康、富士豪和顿汉布什,国内烟台冰轮、大连冰山、台湾地区的复盛和汉钟也是重要的螺杆式制冷压缩机制造商。如今,我国已成为全球最大的螺杆式制冷压缩机生

产基地,同时也是发展最快的地区。

### 1.3 应用范围的拓宽

随着能源和环境问题的日益突出,如何高效地使用能源、回收各种余热和减小对环境的污染已成为世界范围内关注的焦点,也是我国建设节约型社会的基本。热泵作为一种高效节能产品,将低温热能转换成高温热能,是一种用来解决能源和环境方面问题的极为有效的技术,尤其是其节能和环保的特性,十分符合我国能源战略发展的需求。蒸气压缩式热泵循环同样由压缩机、冷凝器、节流装置和蒸发器四大基本部件组成,凭借结构、性能方面的优势,螺杆式制冷压缩机成为热泵循环核心部件的上乘选择之一,国内已有大连冷冻机股份有限公司等多个厂家相继推出高效螺杆式热泵产品,进一步促进了螺杆式制冷压缩机的发展。

中国社会经济的发展吸引很大一部分人口必然从农村进入城市生活,加速了中国城市化水平的进程。为城市居民提供安全的食品对提高人们的生活质量具有举足轻重的地位。目前,我国冷冻冷藏行业占整个制冷行业的比例约为24%,远低于国际成熟市场40%的比例,这表明国内冷冻冷藏行业具有很大的市场潜力。2008年9月JARN的研究报告指出,在2009年到2017年期间,为保障国家食品安全,我国在工商业用大中型冷库、车辆运输用冷库等食品冷链建设方面将会花费上千亿美元。螺杆式制冷压缩机适合持续长期运转的特性以及整体技术水平的提高,使其正逐步成为国内低温冷冻冷藏系统的标准配置,如烟台冰轮已成功研发出可提供 $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 低温的 $\text{NH}_3/\text{CO}_2$ 螺杆复叠制冷系统。

## 2 存在的问题

作为全球最大的螺杆式制冷压缩机生产基地,35年来我国的螺杆式制冷压缩机生产制造水平得到了很大提高,以往阻碍国内企业进军螺杆式制冷压缩机市场的技术壁垒正在逐渐被打破,涌现出一批在世界范围内具有一定影响力的螺杆式制冷压缩机制造企业。但是,螺杆式制冷压缩机行业技术密集程度高,对生产工艺流程及加工精度要求都比较苛刻,并且需要从研发设计人员到加工制造一线的车间工人都具备较高的技术水平与丰富的实践经验,国内螺杆式制冷压缩机产品较国际领先企业还有一定差距。

1) 转子加工设备落后。转子齿面是比较复杂的三维螺旋齿面,加工精度直接影响压缩机性能,这就对转子铣床和转子磨床提出了很高的精度控制要求。国内螺杆转子精密加工设备还几乎全部依赖高价进口几家国际知名公司的精密数控转子磨齿机。近10年我国机床行业在数控机床生产方面有突飞猛进的发展,但目前仍然无法达到螺杆转子的精度与生产效率的要求,需要制冷空调行业与机床行业进行合作共同研究与开发,以求在精密转子研磨机制造上取得技术突破。

2) 轴承与机械密封可靠性差。滚动轴承寿命对螺杆式制冷压缩机运行时间长短有着决定性的影响,开启式螺杆式制冷压缩机检修周期还取决于轴封可靠性。要实现螺杆式制冷压缩机全部部件国产化,滚动轴承与机械密封设计制造水平亟待提高。

3) 噪声控制技术需要加强。螺杆式制冷压缩机的振动与噪声主要由排气压力脉动引起。虽然螺杆式制冷压缩机没有排气阀,但由于在压缩机的排气过程中,排气孔口的面积是变化的,在不同时刻通过排气孔口的气体流量不同,因而不可避免地会产生排气流量脉动。另外,由于不设排气阀,当设计工况与实际工况不一致时,在工作容积与排气孔口连通的瞬间会出现等容压缩或膨胀现象,导致排气孔口处气体流量的瞬时突变,这些气流流量的脉动均会产生压力的脉动。因此,需要进一步加强排气压力脉动的研究,优化螺杆式制冷压缩机结构设计,降低机身振动与噪声。

4) 机电一体化程度低。实时监控压缩机的运行状态,根据设定参数进行自动调节以降低对用户专业技术水平的要求,实现螺杆式制冷压缩机的智能控制,就必须提高机电一体化程度,在螺杆式制冷压缩机设备中集成智能计算机控制系统。而国产螺杆式制冷压缩机至今大都是人工操作或采用功能简单的继电保护控制,机电一体化程度需要大幅提高。

## 3 未来发展趋势

节能和环保是制冷空调行业发展的主要方向。螺杆式制冷压缩机从业人员应该牢牢把握行业的发展方向,研究开发更多的节能环保产品,满足日益迫切的市场需求。

1) 加快变频螺杆式制冷压缩机的开发,研究压缩机、电动机在变频调速工况下的工作特性,选

择相匹配的变频控制、压缩机结构和轴承布置方案,同时将变频调速与内容比调节结合,实现部分负荷下的高能效。

2) 针对节能减排的宏观政策导向,能源成本的提高以及企业低投入高回报的要求,研究压缩机或膨胀机在余热回收利用、自然资源或者可再生资源利用中的应用空间,开发应用于有机朗肯循环的螺杆式膨胀机、应用于油气田低压余气提取的天然气管式制冷压缩机以及应用于高温热泵的水蒸气螺杆式制冷压缩机,拓宽螺杆式制冷压缩机的运行范围,促使其向大容量应用场合进军。

3) 结合制冷工质替代的严峻形势,开发可采用新型制冷工质的压缩机,例如 R290, R32, R1234yf, CO<sub>2</sub> 和 NH<sub>3</sub> 的螺杆式制冷压缩机。

4) 将最新的流动换热理论、工质热物性及力学特性等基础理论研究成果应用到螺杆式制冷压缩机开发中,提高螺杆式制冷压缩机单机运行的效率与可靠性。

#### 4 结论

在制冷空调领域得到广泛应用的螺杆式制冷压缩机在国内取得了重要发展,整体技术水平与市场份额都得到了很大提高,并逐步成为热泵系统与冷冻冷藏系统的标准配置。作为技术密集型产品,螺杆式制冷压缩机还需要国内从业人员在转子加工设备制造、轴承与机械密封可靠性、噪声控制与机电一体化等方面做出更大的努力,牢牢把握节能和环保 2 个主要方向,加快开发新型高效螺杆式制冷压缩机产品的步伐,进一步缩小与国际领先水平的差距,为国家能源建设与国民经济发展做出更大的贡献。

#### 参考文献

[1] Stosic N. Screw compressors in refrigeration and air conditioning[J]. HVAC&R Research, 2004, 10 (3): 233-263.

[2] Stosic N, Smith IK, Kovacevic A. Screw compressors: mathematical modeling and performance calculation[M]. New York: Springer, 2005.

[3] 邢子文,彭学院,束鹏程. 螺杆压缩机新型线的研究与设计[J]. 压缩机技术, 1997 (1): 9-12.

[4] 邢子文,彭学院,束鹏程. 螺杆压缩机设计计算软件的研究与开发[J]. 西安交通大学学报, 1999 (11): 38-42.

[5] 邢子文,吴华根,束鹏程. 螺杆压缩机设计理论与关键技术的研究和开发[J]. 西安交通大学学报, 2007 (7): 755-763.

[6] 陈文卿,马元,彭学院,等. 制冷压缩机基础理论研究及关键技术开发[J]. 制冷学报, 2010 (4): 14-21.

[7] Stosic N, Milutinovic L, Hanjalic K, et al. Investigation of the influence of oil injection upon the screw compressor working process[J]. International Journal of Refrigeration, 1992, 15 (4): 206-220.

[8] De Paep M, Bogaert W, Mertens D. Cooling of oil injected screw compressors by oil atomization [J]. Applied Thermal Engineering, 2005, 25 (17-18): 2764-2779.

[9] 彭学院,邢子文,崔天生,等. 喷油螺杆压缩机工作过程的研究及应用[J]. 流体机械, 2001, 29 (1): 9-13.

[10] Wu H, Li J, Xing Z. Theoretical and experimental research on the working process of screw refrigeration compressor under superfeed condition [J]. International Journal of Refrigeration, 2007, 30 (8): 1329-1335.

(下接第 99 页)

[3] 刘高联,谷传纲,席光,等. 叶轮机气动力学新一代反命题和优化设计的研究[R]. 国家自然科学基金重点项目结题报告. 报告号:50136030.

[4] 谷传纲,王彤,杨波. 多级离心压缩机气动设计技术与应用项目报告[R]. 2004 年国家科技进步二等奖,2004.

[5] 韩树衡. 氟里昂离心制冷压缩机的性能换算[J]. 化工机械, 1982(3): 1-8.

[6] B. Ф. 里斯[苏]. 离心压缩机械[M]. 朱报祯,等,译. 北京:机械工业出版社,1986:241-253.

[7] 袁沿,陈德明,韩树衡. 气动探针闭式校正试验研究[C]//中国制冷学会第二专业委员会“制冷机性能改进与节能学术会议”论文集, 1985.

[8] 朱报祯,郭涛. 离心压缩机[M]. 西安:西安交通大学出版社,1989.