

高转速强漩流离心法聚氧聚氮装置研究

王喜魁, 陈正举, 洪广欢, 孟召军

(沈阳工程学院 聚能研究所, 辽宁 沈阳 110136)

摘 要: 针对空气氧氮分离的难题, 提出了一种新型结构的“转匣式轴流压气机”, 取代传统的“转毂式轴流压气机”。其结构上的主要区别在于“转毂式”的叶片安装在轮毂上, 只能实现空气压缩; 而“转匣式”的叶片安装在内机匣内侧, 在外机匣内旋转, 可实现空气分离。论述了氧氮离心分离和转匣式压气机离心增压原理; 阐述了空气采用漩流分离分流的技术可行性与实施途径; 给出了离心法聚氧聚氮的实验装置简图, 以实现空气压缩机、氧氮分离机和燃烧漩流器三机一体化, 以期达到显著提高能源效率, 充分利用资源和节能环保的目的。

关 键 词: 聚氧聚氮; 转匣式压气机; 氧氮强漩流离心分离; 漩流燃烧

中图分类号: TK474.8 文献标识码: A

引 言

聚氧聚氮研究具有重要的现实意义和良好的应用前景。“高转速强漩流离心法”旨在通过集机械、磁学于一体的综合性的强化分离方法, 将空气中的氧与氮分离, 以充分利用空气中氧资源和氮资源, 提高能源利用率, 减少环境污染。在课题前研究高梯度强磁场法聚氧聚氮的实验中, 较详细地阐述过富氧富氮在能源与环保中的用途与效能^[1]。问题是如何在磁化聚氧集氮的基础上, 进一步提高氧和氮的浓度和流量。

本研究通过变革空气压缩机的结构, 采用动静子叶片反旋的“转匣式轴流压气机”的新型结构, 可实现离心分离氧氮、漩流分流富氧流和富氮流, 从而使富氧富氮的浓度和流量在较大的进气流量下有所提高。这种装置可称为磁化法和离心法复合式聚氧聚氮法。

目前国内外氧氮离心分离研究现状: 美国 G. DLewis 曾提出过利用压气机起漩设想; 美国已在 F119 航空燃气轮机的涡轮机实现了两级涡轮动叶

片之间的对转反旋, 显著提高了燃气轮机性能, 但尚未实现动叶片相对静叶片的反旋, 而且只是涡轮机而不是压气机动静子反旋^[4~3]。法国在国际上首先提出利用轴流压气机起旋的燃烧室方案^[6], 但它仍然不够完善。日本近年来对漩流燃烧进行了研究, 石川岛播磨公司将“离心燃烧”应用于喷气燃气轮机上, 测试燃烧效率接近 100%, 燃烧室体积缩小 2/3, 推力增加了 50%^[7~8]。德国已有采用离心分离法聚氧排氮应用于冶金炉和制氧厂的专利报导^[9]。国内外的核能工业早已广泛采用离心法分离六氟化铀等多种同位素气体^[10]。

到目前为止尚未见到将磁化法和离心法相复合的“聚氧聚氮法”。本文将对氧氮离心分离原理、转匣式动静子反旋压气机结构、离心增压的优越性、综合技术可行性, 以及实验技术进行探索性研究。

1 氧氮分离最小耗功量计算

耗功大小是空气分离的重要技术指标。

经推导: 若在一个大气压条件下, 获得 1 m³ 的氧气所需的理论最小功应该是:

$$W = (RT \ln 5 + 4RT \ln \frac{5}{4}) \times \frac{1\,000}{22.4} = 274.2 \text{ kJ/m}^3 \quad (1)$$

这一理论最小分离功在理想气体等温可逆压境, 且将各组分分压力压缩至 1 个大气压下求出, 其普遍通用计算公式应为:

$$\begin{aligned} W &= W_{O_2} + W_{N_2} = (n_{O_2} RT \ln \frac{P}{P_{O_2}} + n_{N_2} RT \ln \frac{P}{P_{N_2}}) \\ &= V(P_{O_2} \ln \frac{P}{P_{O_2}} + P_{N_2} \ln \frac{P}{P_{N_2}}) \end{aligned} \quad (2)$$

式中: P —总压力; P_{O_2} 、 P_{N_2} — O_2 、 N_2 组分的分压力; n_{O_2} 、 n_{N_2} —氧、氮的克分子数。

收稿日期: 2008-02-15; 修订日期: 2008-03-20

基金项目: 沈阳市科学技术创新开发研究基金资助项目(050234)

作者简介: 王喜魁(1953—), 男, 辽宁新宾人, 沈阳工程学院教授。

计算式(1)表示了获得 1 mol 氧气的理论最小分离功。实际空气分离过程是非等温不可逆过程,因而实际氧氮分离功要比理论最小分离功大得多。分离功越小,氧氮分离方法就越完善、越先进。

然而在实际工程应用时,更值得注意的是分离空气消耗的功与分离后的气体的富氧和富氮的浓度密切相关。很显然,空气分离后氧氮的纯度愈高,所消耗的分离功愈大。氧氮分离的第二个重要参数是富氧和富氮的流量。流量愈大,消耗的功愈多,对其装置的功能和技术水平要求也愈高。计算表明与低温分离、化学分离等多种氧氮分离法相比,采用磁化法与离心法复合式聚氧集氮法所消耗功最小,装置的体积也最小,因而也是节能的。

2 氧氮旋流惯性离心分离的原理

2.1 氧氮旋流惯性离心分离基本原理

利用空气中氧氮分子量差异,在高转速的转筒式空气分离机的环形通道上,空气因受粘性作用而随转筒旋转,“兜着运动”,氧氮分子受到巨大的惯性离心力场作用,重组分的氧 O_2 趋向筒壁附近而被富集;轻组分的氮气 N_2 趋向通道中靠近转筒的中心区而被浓集。从而在压气机或引风机的径向方向造成浓度梯度形成富氧层和富氮层。在轴向方向上,依靠压力差惯性流动,同时将氧氮分流开来,富氧流被吸入外环,富氮流被吸入内环。通过空气压缩机或引风机制成富氧富氮产品。

2.2 空气在转筒内旋流离心分离的条件

经计算,分离因数 Fr 要达到 55 000~60 000 g 才能分离。而传统压气机径向离心作用很小,只占流动惯性力的 5%。

$$Fr = v^2/r \cdot g = \omega^2 \cdot r \cdot g = 1.118 \times 10^{-3} \cdot r n^2 \cdot g \quad (3)$$

式中: v 、 ω —旋筒线速度、角速度; r —半径, m; n —转速, r/min 。这个离心分离条件,相当于空气受到 5.5~6.0 万倍的重力加速度 g 。计算表明,直径在 0.5~0.6 m 左右的转筒,筒的旋转速度在 7 000 r/min 左右就可以将氧氮分离开,且能保证磁场分离后的氧氮稳定分流,防止氧氮分离后重新混流现象。

2.3 离心分离法的分离系数

反映气体分离程度的另一个物理量是分离系数 α , α 表示为:

$$\alpha = \exp \left[\frac{M_{O_2} - M_{N_2}}{2RT} v^2 \right] \quad (4)$$

式中: M_{O_2} 、 M_{N_2} —氧氮分子量; R —气体常数; T —绝对温度。由式可见,空气分离效果的主要影响因素是转筒的旋转线速度 v 和氧氮分子量之差有关,而与待分离气体的绝对重量无关。与其它的气体分离法(如分子筛法、扩散法等)相比,离心分离法具有分离级数相对较少,分离系数高的优点。

2.4 转匣式压气机的离心增压作用

在转匣式压气机中径向压力梯度较小,轴向压力梯度较大,最大相差值约为 5%。而在转匣式压气机中,由于离心作用,将沿径向形成较大的压力梯度。

设内机匣壁面处压力为 P_2 ,转筒壁附近压力为 P_1 则径向的离心增压比 π_r 可表达为:

$$\pi_r = P_2/P_1 = \exp \frac{M}{2RT} v^2 = \exp \frac{M}{2RT} \cdot \frac{n\pi}{30} \times (r_2^2 - r_1^2) \quad (5)$$

式中: r_2 —内机匣半径; r_1 —轮毂半径。在环境温度 $T=300$ K 时,不同的线速度所对应的径向离心增压比 π_r ,如表 1 所示。

表 1 机匣在不同线速下的离心增压值

线速度 $v/m \cdot s^{-1}$	增压比 $\pi_r = P_2/P_1$	中心处极限压力 $P_d/N \cdot m^{-2}$
200	16.4	1 066.6
250	84	199.98
300	550	32.0
350	5 200	3.33

从表中数值计算可见,转匣式压气机的离心增压效果是显著的。线速度增加不到 2 倍,径向压力却增加到 300 多倍,足以满足氧氮分离要求。

3 转匣式旋流惯性离心氧氮分离的技术可行性分析

3.1 离心分离空气的技术可行性分析

重元素的同位素气体 $^{238}UF_6$ 和 $^{1235}UF_6$ 六氟化铀能够离心分离(两者的分子量只差 3)。轻元素的氖同位素 ^{20}Ne 和 ^{22}Ne (分子量也只差 2),以及绝大多数的同位素气体都能用离心法分离。相比之下,空气中的氧氮分子量之差为 4,比前两者都大,所以它更容易被离心分离的,这是有利的条件。

3.2 空气离心分离的必要性

现在核能工业已广泛采用离心法来分离和浓缩的稀有资源 $^{235}UF_6$ 气体,原因是自然界中的 ^{235}U 的含量极低,只占 0.72%,而在铀矿中 ^{238}U 的含量却高达 99.275 8%。裂变核反应堆至少需要 3%浓度、核动力装置需 20%浓度,事实说明气体的离心分离方法早已在工程上应用。同理,自然联想到大

气层中自然氧浓度只有 20.95%，而宇宙航行、火箭燃料、空气喷气发动机、燃气轮机机车、燃气轮机舰船、工业炼钢、火力发电站和磁流体发电站等却需要高浓度大流量的氧，鉴于此，空气的离心分离显得愈来愈重要。

3.3 复合式氧氮分离解决了关键问题

离心分离主要解决空气在压缩机中的径向分离，沿轴向分离效果差，磁化分离恰恰主要解决了空气的轴向分离问题^[1]。

4 转匣式压气机的技术特点

传统的叶轮压气机，不论是轴流的还是径流的（离

心式）或是混流的（复合式），在结构上都属于转毂式压气机。即工作叶片都安装在轮毂上，与转轴一起旋转，整流叶片则安装在固定的机匣上，静止不动。工作叶片与机匣间总是有间隙的，所有动静叶片都是单悬臂式，易于产生振动。这种原有结构的压气机只能压缩空气，而不能用于分离空气，如图 1 所示。

而新结构的转匣式气机，在结构布局上，动静叶片的位置则好与转毂式压气机颠倒。工作叶片安装到新增设的内机匣里侧，在外机匣内旋转。整流叶片逆向反旋。本研究所提出的这种新结构的转匣式压气机，经文献检索和专利查新，尚未见到与本结构相同的方案，如图 2 所示。

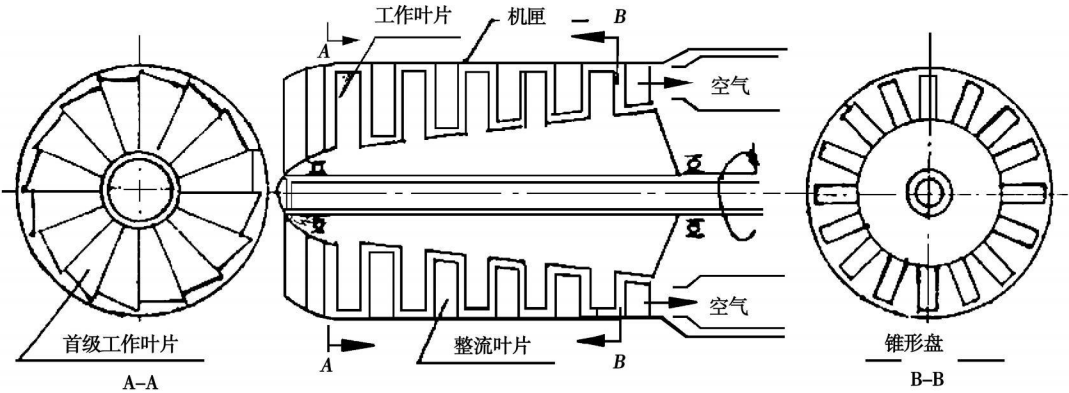


图 1 传统转毂式轴流压气机结构

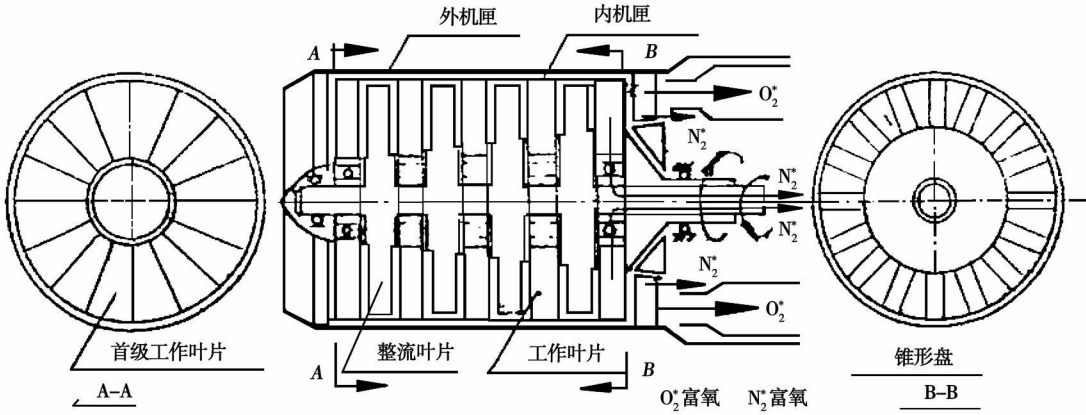


图 2 新结构的转匣式压气机结构

转匣式叶轮机实际上是转毂式离心叶轮机，转毂式轴流叶轮机以及转筒式空气分离机 3 种机械在构造原理上的结合，它综合了离心分离、离心压缩和轴向压缩 3 种物理作用。它吸收了离心压气机级压比高，特性平缓 and 轴流压气机效率高，单位流动阻力小的双重优点。

转匣式压气机的特点是首级和末级工作叶片两端是固定，为双臂固支型结构。在结构上，旋转的内机匣实际上相当于带冠叶片的叶冠连成一片。

转匣式压气机的结构方案可以有单轴的，同心双轴的和包括低压风扇级的三轴方案。其联动的涡轮部分可以采用转毂式涡轮对转反旋也可以采用转

匣式涡轮对转反旋,其中包括内转子结构和外转子结构。内转子结构是转毂式顺时针旋转轴承系统;外转子结构是转匣式(内机匣)逆时针旋转的环形转子轴承系统。内外转子由一部动力机采用反向齿轮同时驱动旋转。叶片安装在内机匣上,旋转时叶片受的压应力,定子是外机匣,这种环形面积式(转筒式)支承结构采用磁悬浮支承方式,即磁浮轴承。

本研究方案支撑磁浮轴承的创新点在于采用铜或铝磁绝缘板等非导磁材料,将磁铁磁路与基座隔离,使每个磁铁的磁力线自成回路,从而达到各磁铁间磁场去耦的目的。由于磁极与转子之间的间隙很小,设计在 $0.01 \sim 1 \text{ mm}$ 范围内,从而缩短了磁路长度,降低了轴承的磁阻和功耗。新结构的径向转筒式轴承磁铁重量将减轻约 30%,磁路长度减少 5%,从而轴承结构简化,效率得以提高。

磁浮轴承由于工作状态下无接触、无摩擦,因而其使用寿命较长。为了进一步提高其安全性,磁浮轴承本身在结构、材质和强度方面都采取了相应措施^[9]。此外还设有备用轴承,备用轴承主要用于对磁浮轴承的保护,一旦出现故障或超载时保护电磁部件用。此备用轴承采用先进的氮化硅(Si_3N_4)陶瓷球轴承,它具有自润滑能力也无需润滑密封等装置。磁浮轴承正常运转时闲置不用,它的内圈和转子的间隙通常为磁浮轴承间隙的一半约为 $0.2 \sim 0.5 \text{ mm}$,起到良好的保护作用。从而大大提高了轴承的安全性。

5 结 论

以上的研究和实验方案可得到如下结论:

(1) 利用氧氮分子量为 4 的差异,离心法可以实现“聚氧聚氮”,在原理上是科学的。

(2) 采用旋转机匣式压气机在技术上是可行的,工程上已有先例。在相同的动力条件下可以巧借反旋压气机,既能“借机产氧”,也能“借机生氮”。还能“借机起旋”。

(3) 采用“转匣式压气机”可以实现高转速,采用动静子反旋的旋转机匣式压气机装置,在不增加原有电机转速或涡轮转速条件下,压气机动静叶片对转速成自然地增加一倍。

(4) 采用“转匣式压气机”可以实现强旋流。原有转毂式压气机离心力最大约占惯性力 5%,而转匣式压气机由于取消了末级整流叶片排,旋流强度与机匣壁线速度成正比,旋流强度极大,是实现旋流

燃烧的首要条件。

(5) 转匣式压气机的离心力有利于氧氮稳定分流,外层为富氧层,内层为富氮层,由于离心力的作用,富氧层、富氮层稳定分层流动。

(6) 磁浮轴承工作状态下无接触、无摩擦,相对寿命较长,同时还设有备用轴承,从而大大提高了轴承的安全可靠性。

(7) 将离心聚氧聚氮法与磁化聚氧聚氮法复合在一起,可进一步提高富氧富氮的浓度与流量以及氧氮分流的稳定性。

参考文献:

- [1] 王喜魁,陈正举.高梯度强磁场聚氧聚氮机理与实验方案研究[J].沈阳工程学院学报(自然科学版),2005(2-3):25-29.
- [2] 王喜魁,陈正举.高效燃气轮机优化技术研究[J].沈阳工程学院学报(自然科学版),2007(2):101-104.
- [3] 中国科学院能源战略研究组.中国能源可持续发展战略专题研究[M].北京:科学出版社,2006.
- [4] 王汝武.热电厂节能技术及工程实例[M].北京:化工/环境能源出版中心,2006.
- [5] 斯蒂芬·丁派因.火的简史(工业燃烧如何增强火力)[M].北京:生活、读书、新知三联书店,2006.
- [6] 马克·瑞特,丹尼尔·瑞特.纳米技术[M].西安:西安交通大学出版,2004.
- [7] MESTRE A. Study of a turbomachine combustor with Swirling flow[J]. Entropies, 1997, 13(76):93-17.
- [8] 孙有议,校.利用离心力高速燃烧[J].张 富,译.日经产业新闻,1990,11.
- [9] 大矢晴彦.分离的科学与技术[M].(2版).北京:中国轻工业出版社,2001.
- [10] DEUTSCHES PATENTAMT. (1) DE 3023456A1, offenlegungstag. 1982. 1. 17. (2) DE 3049389A 1, offenlegungstag. 1983. 1. 20.
- [11] S·维拉龙.同位素分离[M].北京:原子能出版社,1983.
- [12] B·N 索柯罗夫.离心分离理论及设备[M].北京:机械工业出版社,1986.
- [13] 冯国权.对转式双转子发动机特征分析[J].航空发动机,1993(5):43-48.
- [14] 陈正举.旋流离心式压气机结构原理的研究//中国航空学会.中国航空学会交流论文集[C].珠海:中国航空学会,2001:250-255.
- [15] 董 艳 孙 博.旋流燃烧器的研究进展[J].节能,2005(8):11-15.
- [16] 冯国权.对转式又转子发动机特征分析[J].航空发动机,1993(5):43-48.
- [17] 陈正举.高温涡轮叶片的氮漠冷却与惰性防护[J].航空发动机,1997(4):60-65.
- [18] 王喜魁,陈正举.超常燃气轮机创新技术研究//第五届国际热电联产分布式能源联盟年会论文集[C].北京:中国电机工程学会热电专委会,2004:543-546.
- [19] 王喜魁,陈正举.磁浮轴承在高速氧氮离心分离机上的应用研究[J].沈阳工程学院学报(自然科学版),2008(2):107-130.

(编辑 何静芳)

nation with two kinds of boundary—condition treatment methods, a study has been conducted respectively of the flow and heat transfer performance of two types of longitudinally and internally finned tubes. During the study, a realizable $k-\epsilon$ two equation model was used for the turbulent flow calculation. The numerical simulation results obtained from the two calculation models were compared with test results. It has been found that the simulation results obtained from the turbulent flow model are closer to the test values than those obtained from the laminar flow model. In the meanwhile, it has also been found that the critical Reynolds Number for the flow in both internally finned tubes when developing from a laminar flow to a turbulent one is far less than that for the traditional bare tube. In the light of the simulation results obtained from the turbulent flow model, correlation formulae were obtained through a fitting for the two types of internally finned tubes of $Nu-Re$ and $f-Re$ respectively, thus extending the applicable scope of the test data. Through a field synergy principle, a contrast analysis of intensified heat exchange mechanism for both types of internally—finned tubes was quantitatively conducted. The results of the study show that the field synergy degree of longitudinally—ridged and internally—finned tubes is better than that of longitudinally flat—finned tubes, thereby playing a role of intensified heat transfer. **Key words:** internally—finned tube, forced convection, heat transfer characteristics, numerical simulation

波纹倾角 β 对空气在波纹流道内的流阻与传热影响的数值分析 = Numerical Analysis of the Influence of Corrugation Inclination Angle β on the Air Flow Resistance and Heat Transfer in Corrugated Flow Passages [刊, 汉] / WU Hua—xin, SUN Gang (College of Architectural Engineering, Harbin Engineering University, Harbin, China, Post Code: 150001), ZHOU Song (College of Power Engineering, Harbin Engineering University, Harbin, China, Post Code: 150001), TIAN Bao—ren (Jitai Heat Exchanges Manufacturing Factory, Siping, China, Post Code: 136001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2008, 23(5). — 531 ~ 534

An air—water corrugated plate type heater differs from a traditional ribbed tube type heater. The former is a primary surface type heat exchanger and the surface of which in contact with a heat transfer medium directly takes part in a heat transfer process, featuring a compact structure and high efficiency. It can be used in such cases as air—water heating and heat energy recovery systems etc. to serve as hot wind curtains and air conditioner heaters etc. The authors have simulated the air flow resistance and heat transfer characteristics in flow passages at various corrugation inclination angles of $\beta=30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ by utilizing CFD (Computational Fluid Dynamics) software Fluent, and calculated the surface friction coefficient f , Nusselt Number Nu and the ratio of heat transfer factor and surface friction coefficient j/f . The results of the study show that the corrugation inclination angle is an important factor influencing the flow resistance and heat transfer process of air in corrugated flow passages. Through relevant comparisons, the above research findings can provide definite guidelines for the further optimized design of air—water corrugation plate type heaters. **Key words:** air—water corrugated plate type heater, flow resistance, heat transfer, numerical characteristic analysis

高转速强漩流离心法聚氧聚氮装置研究 = Exploratory Study of a High Rotating Speed and Strong—whirlpool Centrifugal Method—based Oxygen and Nitrogen Collecting Device [刊, 汉] / WANG Xi—kui, CHEN Zheng—ju, HONG Guang—huan, MENG Zhao—jun (Energy Collection Research Institute, Shenyang Institute of Engineering, Shenyang, China, Post Code: 110136), // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2008, 23(5). — 535 ~ 538

To solve the difficult problem of oxygen and nitrogen separation from air, an innovative structure of “rotating casing type axial compressor” is proposed to replace the traditional “rotating hub type axial compressor”. The main difference of the two structures lies in the fact that the blades of a “rotating hub type compressor” are installed on the wheel hub and can only realize air compression, while those of a “rotating casing type compressor” are installed on the inside of an inner casing, rotating in an outer casing, thus effecting air separation. The authors have described the theories of oxygen and nitrogen centrifugal separation and the centrifugal pressure boosting of the rotating casing compressor. The merits, technical feasibility and application approach of air whirlpool separation were also expounded. A sketch of the centrifugal method—based test rig for oxygen and nitrogen collection was given, which can realize an integration of three devices, namely: an air compressor, an oxygen and nitrogen separator and a combustion whirlpool generator. The ultimate aim is to remarkably enhance energy source application efficiency, fully utilize resources as well as to save energy and protect the environment. **Key words:** oxygen and nitrogen collection, rotating casing type compressor, oxygen and nitrogen centrifugal separation, strong whirlpool separation, theoretical analysis, alternative version exploration