

S-CO₂ 布雷顿循环中离心式压缩机研究现状

秦 政¹, 林志民^{1,2}, 刘惠民², 黄振军², 王林涛²

(1. 七一一研究所, 上海 201108; 2. 上海齐耀动力技术有限公司, 上海 201203)

摘 要: 从小型离心式压缩机运行效率和冷凝影响两方面介绍了国内外机构对 S-CO₂ 离心式压缩机研究的现状。指出: 采用小型离心式压缩机对布雷顿动力循环系统中压缩机的设计和理论研究进行实验验证仍是最优的方案; 应充分利用现有技术深入研究小型离心式压缩机内部流场分布和边界层的影响, 为 S-CO₂ 离心式压缩机设计与优化提供理论支持。

关键词: 超临界二氧化碳; 布雷顿动力循环; 离心式压缩机

中图分类号: TK12 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2016)03-0052-04

Current Research on Centrifugal Compressor in S-CO₂ Brayton Cycle

Qin Zheng¹, Lin Zhimin^{1,2}, Liu Huimin², Huang Zhenjun², Wang Lintao²

(1. Shanghai Marine Diesel Engine Research Institute, Shanghai 201108;
2. Shanghai MicroPowers Co., Ltd., Shanghai 201203)

Abstract: The current research on S-CO₂ centrifugal compressor of domestic and foreign institutions was introduced from the following two aspects, operating efficiency and condensation effects of sub-scale centrifugal compressor. It was indicated that testing with a sub-scale centrifugal compressor was still the best method to verify the design and theoretical research for compressor in Brayton power cycle system. The distribution of flow field and the effects of the boundary layer inside the centrifugal compressor should be further studied by making use of existing technologies, which could provide theoretical support for the design and optimization of S-CO₂ centrifugal compressor.

Key words: S-CO₂; Brayton power cycle; centrifugal compressor

0 引 言

近年来, 随着能源问题的日益突出, 人们对高效动力循环的关注越来越多。采用以超临界二氧化碳(S-CO₂)作为循环工质的闭式布雷顿循环, 可以在中等热源温度(700~800℃)下获得较高的循环效率(~50%)。CO₂具有临界参数相对适中(7.38MPa, 31℃), 稳定性好, 存量丰富, 在超临界状态下与普通惰性气体相比具有密度大的优势, 可以有效减小动力循环中设备的尺寸。此外, 布雷顿循环过程为闭式过程, 做功工质CO₂不受热源形式的影响, 所以循环热源可以来自核反应堆、太

阳能、地热能、工业余热废热、化学燃料燃烧、垃圾焚烧等多种热源形式。因此, S-CO₂布雷顿循环在多个领域具有良好的应用前景。

1 S-CO₂ 布雷顿循环中压缩机研究现状

在S-CO₂布雷顿循环中, 压缩机功耗对整个循环系统的效率有着很重要的影响。利用S-CO₂在临界点附近有较低的压缩性的特性, 可以有效降低压缩功耗; 且S-CO₂的物性状态越接近临界点时, 压缩功耗越小^[1], 这也是S-CO₂布雷顿循环系统可以获得较高效率的一个重要原因。但值得注意的是: CO₂的物性

参数在临界点附近随温度、压力的变化（图 1）非常敏感，这对压缩机的设计提出了很高的要求。

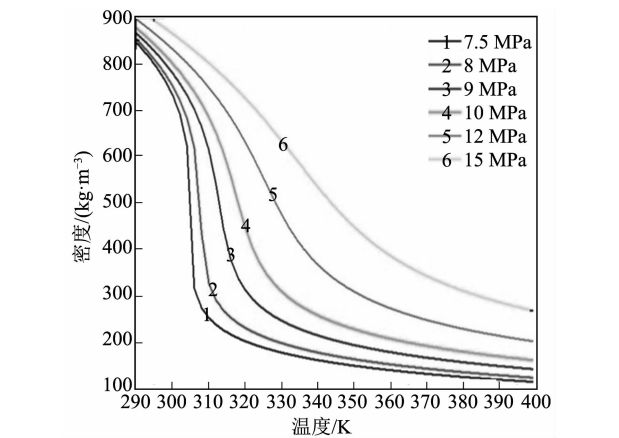


图 1 CO₂ 密度随温度和压力变化图

采用活塞式压缩机可以有效避免物性剧烈变化带来的影响，但是活塞式压缩机单位时间内产气量小，不利于将布雷顿循环系统扩展到大功率的应用场合。此外，活塞式压缩机还存在外形尺寸大，易损件多，运行中振动大等缺点。捷克技术大学曾开展过 500 kW 布雷顿循环系统的研究，虽然在第一阶段实验系统中采用了活塞式压缩机，但 Dostal^[2]指出：在第二阶段的系统中将使用离心式压缩机代替活塞式压缩机。不幸的是，受制于资金问题，捷克技术大学没有开展第二阶段的实验研究工作。美国 Bechtel 公司、Knolls 原子能实验室和 Bettis 原子能实验室共同合作研发的试验系统中也采用了一个活塞式压缩机，主要作用仅是将工质加压到微超临界状态后再进入离心式压缩机进行压缩。

Sienicki 的研究指出^[3]：透平式压缩机适用于现有的小功率系统至 300 MW 功率系统。所以，目前国内外对 S-CO₂ 布雷顿循环中压缩机的研究都集中在透平式压缩机。国际上对 S-CO₂ 布雷顿循环系统的研究都处于演示验证阶段，实验系统输出功率

都小于 1 MW。Sienicki 在研究中也指出^[3]：当 S-CO₂ 布雷顿循环的输出功率小于 1 MW 时，建议采用单级离心式压缩机。目前已公布的实验研究的离心式压缩机叶轮尺寸都在 100 mm 以内，转速则都在 50 000 (r·min⁻¹) 以上。

2 S-CO₂ 布雷顿循环中离心式压缩机研究现状

由离心式叶轮理论可知，当叶轮满足相似条件时具有相似的性能，且一般情况下随着转速的提高，叶轮效率也会提高。当转速过高时，压缩机的轴承选型变得困难，而且会使得压缩机的轴承损失变大，使压缩机的效率降低。由 Balje 公式可得^[4]，随着叶轮转速的提高，叶轮的尺寸也会相应减小。过小的尺寸使得叶轮中流体的雷诺数低于临界雷诺数，黏性力的影响随雷诺数的变化而变化。此外，压缩机的叶顶间隙与叶片高度的比值更大，这会影响压缩机的效率。对于 S-CO₂ 布雷顿循环系统中的离心式压缩机，为了保证压缩机的效率，需要将压缩机入口工质状态设置在临界点附近，但由于压缩机内部局部的加速作用，使得状态处于临界点附近的工质很容易进入两相区甚至产生冷凝。这会降低压缩机的效率，更严重的是可能会影响压缩机的稳定运行。此外，在 S-CO₂ 布雷顿循环中，压缩机的进出压差都在 7 MPa 以上，加上较高的转速和较小的尺寸的综合影响，在目前的压缩机密封设计中，并不会存在这样的工况条件。

目前，国际上仅有美国 Sandia 实验室、Bechtel 公司、Knolls 原子能实验室、Bettis 原子能实验室，日本东京工业大学和韩国高等科学技术研究院开展了 S-CO₂ 布雷顿离心式压缩机实验研究工作。他们设计的 S-CO₂ 离心式压缩机的部分参数以及实验结果如表 1 所示。

表 1 实验用小型 S-CO₂ 离心式压缩机相关参数

研究机构		美国 Sandia	美国 Bechtel&Knolls&Bettis	韩国 KAIST	日本 TIT
入口压力/MPa	设计	7.69	9.2	7.78	8.23
入口温度/K	设计	305	309	306.2	308
质量流量/(kg·s ⁻¹)	设计	3.5	5.35	6.4	1.2
转速/(r·min ⁻¹)	设计	75 000	75 000	70 000	100 000
	实验	64 000	60 000	30 000	70 000
尺寸/mm	实验	37.3	57.2	—	35
效率	设计	68%	60%	65%	—
	实验	66%	—	无	48%

美国 Sandia 国家实验室最早开展实验研究,他们通过借鉴 Capstone 成熟的微型燃机机组,采用其中成熟的空气轴承、高速电机以及相关控制程序技术,并与 Barber Nichols 公司合作重新设计了一款半开式离心式叶轮,在量化了 CO_2 工质泄漏影响后采用了迷宫密封形式,最终设计了压缩机、电机、涡轮机一体式机组(图 2)。Wright A^[6]等人已经在该机组上完成一系列的实验验证工作,最终达到的最高效率为 66%。Noalljeff S^[7]指出:压缩机效率不高的主要原因是叶轮的转速没有达到设计转速,且叶轮叶顶间隙和叶高比例达到 12%,这会降低压缩机的效率。

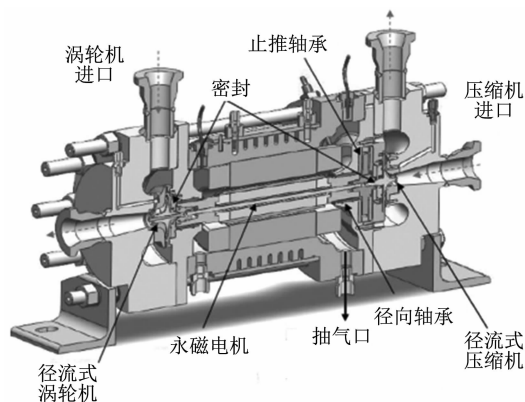


图 2 一体式机组剖面图

美国 Bethcel 公司和 Knolls 以及 Bettis 原子能实验室以 Sandia 的实验台为基础共同开展了实验研究工作,其中压缩机叶轮也由 Barber Nichols 公司重新设计。为了避免 S-CO_2 在压缩机内部进入两相区,以及更好地控制压缩机入口处的工质状态, Bethcel 公司将压缩机入口工质状态设置为 9.2 MPa、36 °C,这也使得 Bethcel 公司的叶轮设计效率低于 Sandia 公司的叶轮设计效率,仅为 60%^[8]。Bethcel 公司的布雷顿循环实验系统在热源温度为 280 °C 的条件下,总循环效率仅为 4%^[9],可见其压缩机的效率不是很高。

由于一体式机组的优越性,日本和韩国的研究机构开展的实验研究也都以一体式机组为设计方案。日本和韩国在理论设计压缩机时,为了达到理想的压缩机效率,叶轮转速分别高达 230 000 ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$) 和 110 000 ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)。其中,日本东京工业大学在综合考虑现有技术水平后设计的压缩机压比为 2.35,设计转速为 100 000 ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$),最终实验实现的最高转速为 70 200 ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$),压比为 1.4,但是压缩机效率仅为 48%^[11]。韩国高等科学技术研究院为了避免高转速带来的问题,

在后续的方案中采用了两级压缩机方案,其中高压级压缩机为一体式机组设计,设计转速为 68 000 ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$),低压级压缩机为非一体式设计,设计压比为 1.8,转速为 70 000 ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$),设计效率为 65%。目前韩国还没有对高压级压缩机进行实验研究,而低压级压缩机的实验研究也仅限于非设计工况条件下。

虽然上述机构都已经实现了离心式压缩机的运转,但都没有达到预期的效率。主要原因是:压缩机的运行转速未达到设计转速,压缩机入口处工质状态的设定以及叶轮尺寸和叶顶间隙的影响。此外,目前在 S-CO_2 离心式压缩机设计中损失模型和流动状态的研究还不够深入。由于布雷顿循环中压缩机入口状态的特殊性,各国机构都在前期进行了两相流对 S-CO_2 离心式压缩机稳定运行的实验研究工作。

Noall Jeff S 对 Sandia 的离心压缩机在两相区低转速运行时的稳定性做了实验研究^[7]。实验转速被限制在 35 000 ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$),其中大部分数据是在 25 000 ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$) 转速下测得。实验表明:该压缩机在低转速运行时,两相流的存在没有对压缩机的稳定运行造成不利的影响。Noall Jeff S 认为,这主要是临界点附近 CO_2 的密度和液相 CO_2 的密度相差不是非常大。尽管如此, Noall Jeff S 也提出,额定工况下,两相流是否会对压缩机的稳定运行产生影响,还有待实验研究。

韩国目前的实验研究重点是 S-CO_2 进入两相区的影响,所以实验中压缩机入口工质状态为次临界状态,压缩机出口工质状态为超临界状态,整个压缩过程为跨临界过程。Yoonhan A^[12]在研究中指出:在低转速情况下当压缩机内工质从次临界状态进入超临界状态时,没有产生明显的扰动。

国内西安交通大学对 S-CO_2 布雷顿循环中离心式压缩机进行了数值仿真研究。西安交通大学研究的压缩机模型较大,质量流量为 250 ($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$),叶轮直径为 340 mm,转速为 10 000 ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$),叶轮入口压力为 7.69 MPa,温度为 308.5 K,目前尚未有实验系统。郑宽宽和赵航等人利用数值模拟手段研究了两相流对该 S-CO_2 压缩机稳定运行的影响。

郑宽宽^[13]的数值模拟研究表明:在设计流量工况下,叶轮前缘和后缘都出现了静压和静温下降到两相区的区域,但是并没有对整个流场的分布产生比较明显的影响。文章指出:冷凝区域的流体都可以和附近的主流充分掺混,所以凝结流体的静温

和静压最终都恢复到超临界状态。

赵航^[13]在分析叶顶间隙内流动的基础上,研究了叶顶区域 CO₂ 两相流形成与发展的机理,分析了不同叶顶间隙对叶顶两相流的影响。数值计算表明:叶顶间隙内流体受到“引射”作用和泄漏涡的影响,前者增强流体进入两相区的趋势,而后者则对两相区域的发展具有削弱和抑制作用。叶顶间隙的大小对主叶片顶部前缘两相流区域的分布影响不大,但是尖角位置两相流区域现象更加明显。叶顶间隙的增加可以有效减小分流叶片顶部两相流区域的范围和影响。

各研究机构对压缩机内部 CO₂ 进入两相区的实验影响的研究都表明:在压缩机低速运行工况下,CO₂ 进入两相区不会对压缩机的稳定运行产生影响。这一方面是因为超临界 CO₂ 的密度和两相区内 CO₂ 的密度相差不是非常大;另一方面是由于压缩机内部流动湍流强度比较大,主流对冷凝流体有掺混作用。虽然理论研究也表明:在设计工况下,压缩机内部局部 CO₂ 进入两相区,不会对压缩机的稳定运行造成影响,但还有待实验验证。

3 结论与展望

随着超临界 CO₂ 布雷顿循环受到越来越多的关注,国内外对于 S-CO₂ 布雷顿动力循环的研究也愈加深入。S-CO₂ 布雷顿动力循环中离心式压缩机的高效稳定运行仍将是今后研究的重点之一。

在 S-CO₂ 布雷顿动力系统实验研究中,采用小型一体式离心压缩机是较合适的实验方案。但受到尺寸、转速和 CO₂ 物性变化的影响,小型一体式离心压缩机已达到的运行效率仍较低。理论和实验研究都表明:低速工况下 CO₂ 冷凝不会对压缩机运行的稳定性产生影响,但设计工况下的影响还有待实验验证。

在今后的研究中,应该借助数值模拟方法和更多先进测试手段(PIV、PDV等),重点研究压缩机内部流场的分布,尤其是边界层对流场分布的影响,深入了解 S-CO₂ 离心式压缩机的流场分布规律,并建立相应的修正公式和损失模型,从而实现小尺寸压缩机的高效稳定运行,并为以后全尺寸 S-CO₂ 离心式压缩机的设计和优化提供理论基础。

由于国内技术水平相对落后,所以目前开展压缩机模化实验时,可以适当降低转速和效率指标,从而可以采用国内成熟的密封结构和高速轴承,如干气密封和滚珠轴承,尽早开展部分实验工作。

参考文献

- [1] Dostal V. A supercritical carbon dioxide cycle for next generation nuclear reactors [R]. MIT, USA: Department of Nuclear Engineering, 2004.
- [2] Dostal V, Kulhanek M. Research on the supercritical carbon dioxide cycles in the Czech Republic [C]. Proceedings of S-CO₂ Power Cycle Symposium. April 29-30, 2009.
- [3] Siemicki. Scale dependencies of supercritical carbon dioxide Brayton cycle technologies and the optimal size for a next-step super critical CO₂ cycle demonstration [J]. S-CO₂ Power Cycle Symposium, May 24-25, 2011.
- [4] Benjamin M B. Design of supercritical carbon dioxide centrifugal compressors [D]. GMTS, 2014.
- [5] 黄钟岳, 王晓放, 王巍. 透平式压缩机. 2 版 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2013. 45.
- [6] Wright SA, Lipinski, Nichols K. Operational results of a closed Brayton cycle test-loop [C]. Proceedings of the Space Technology and Applications International forum, New York, 2005.
- [7] Kenneth Kimball. Overview of supercritical CO₂ Brayton cycle integrated system test (IST) turbomachinery development [C]. Proceedings of the S-CO₂ Power Cycle Symposium, May 24-25, 2011.
- [8] Noall, Jeff, S. Achievable efficiency and stability of supercritical CO₂ compression systems [C]. Proceedings of Supercritical CO₂ Power Cycle Symposium, September 9 & 10, 2014.
- [9] Gregory D. Wahl. Efficiency uncertainty of a turbine driven compressor in a supercritical CO₂ Brayton cycle [C]. Proceedings of S-CO₂ Power Cycle Symposium. April 29-30, 2009.
- [10] Eric M C, Timothy L C, Christopher P S. Startup and operation of a supercritical carbon dioxide Brayton cycle [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2014, 136: 69-71.
- [11] Motoaki U, Taro F, Masanori A. Aerodynamic characteristics of a centrifugal compressor working in supercritical carbon dioxide [J]. Energy Procedia, 2012, 14: 1149-1155.
- [12] Yoonhan A, Jekyoung L, Seong G. Design consideration of supercritical CO₂ power cycle integral experiment loop [J]. Energy, 2015, 86: 115-127.
- [13] 郑宽宽, 赵航, 丰镇平. 超临界二氧化碳离心压机内部流动特性分析 [J]. 工程热物理学报, 2015, 36 (5): 985-988.
- [14] 赵航, 邓清华, 黄雯婷, 等. 超临界二氧化碳离心压缩机叶顶两相流动研究 [J]. 工程热物理学报, 2015, 36 (7): 1433-1436.