

乙烯装置膨胀再压缩机性能试验及评价

姜 良 李文琦 杨思思 付大春 李志权 范吉全

中国寰球工程有限公司北京分公司, 北京 100101

摘 要:膨胀再压缩机是乙烯装置的核心设备,机组在高速、低温下运行,对设计、材料和轴承系统等方面的要求很高,目前严重依赖进口。膨胀再压缩机的性能试验是评价机组性能的重要手段,但关于膨胀再压缩机的性能试验还没有相关成熟标准指导。根据膨胀再压缩机的特点,对乙烯装置膨胀再压缩机性能试验的方案设计进行介绍,包括试验转速、试验气体、试验状态的设计以及试验结果的换算,并结合相似理论开发了试验结果核算程序。结果表明,机组试验等熵效率为 82.55%,优于设计等熵效率,符合标准指标;为保证性能试验结果的可靠,试验设计和测试过程中应注意气体液化、流动相似等问题。利用相似理论设计的乙烯装置膨胀再压缩机性能试验方案和试验结果核算程序可以有效应用于工程领域。

关键词:膨胀再压缩机;性能试验;相似理论;乙烯装置

DOI:10.3969/j.issn.1006-5539.2022.03.007

Performance test and evaluation of expander-compressor in ethylene plant

JIANG Liang, LI Wenqi, YANG Sisi, FU Dachun, LI Zhiqian, FAN Jiquan

HQBJ, Beijing, 100101, China

Abstract: Expander-compressor is the core equipment in the ethylene plant. Expander-compressor unit runs at high speed and low temperature, so it has high requirements for design, material and bearing system. At present, expander-compressor is highly dependent on imported units. Expander-compressor's performance test is an important method to evaluate the performance of the expander-compressor unit, but there is no relevant mature standard on this topic to refer to. In this paper, the expander-compressor's performance test scheme is introduced, including the design of test speed, test medium, test conditions and the conversion of the test results based on the machine characteristic, and a program used for the test result validation is developed based on the Similitude Principle. It shows that the test isentropic efficiency is 82.55%, which is higher than the design isentropic value, and the performance of this expander-compressor can meet the evaluation criteria specified in the standard. In conclusion, the designed performance test scheme and test result validation program using Similitude Principle can be effectively applied to the engineering field.

收稿日期:2021-05-12

基金项目:中国石油天然气股份有限公司科学研究与技术开发项目“大型乙烯基地设计技术升级与优化增效技术开发应用”(2017E-09(GF))

作者简介:姜 良(1990-),男,陕西榆林人,工程师,硕士,主要从事石化工程透平、压缩机等设计及选型工作。E-mail:jianglianghq@163.com

Keywords: Expander-compressor; Performance test; Similitude principle; Ethylene plant

0 前言

现代乙烯工业中,膨胀再压缩机作为低温分离流程获取冷量的关键设备,制冷效果远优于节流膨胀阀的制冷效果,其性能优劣对于提升乙烯收率、降低装置能耗水平具有重要影响^[1-2]。膨胀再压缩机是一种高速叶轮机械,由膨胀机和压缩机组成,转速可达 20 000 ~ 40 000 r/min,而且通常在低温环境下运行,技术难度大、科技含量高,目前严重依赖进口。中国膨胀机技术发展比较缓慢,在航天领域有一些低温氢气膨胀机方面的研究,但尚未工业化应用推广^[3-5];在空分领域,杭氧集团、四川空分集团等制造企业通过引进国外技术,已经可以生产一些空分膨胀机,但在石油化工装置上还鲜有应用^[6-7];一些石油化工运营单位联合研究所、制造厂在空分膨胀机的基础上开展膨胀再压缩机国产化研究,但研究深度还远远不够^[8-9]。性能试验是检验膨胀再压缩机性能的重要措施,国际上尚无直接相关试验标准,国外的性能试验一般依据厂家经验进行;国内的性能试验还仅限于个别领域内开发阶段的方案测试^[10-12],应用时也缺乏可靠的试验结果评价措施。近年来,随着能源化工行业,特别是氢气、甲烷等新能源领域的快速发展,膨胀再压缩机的市场需求愈加扩大,有必要对膨胀再压缩机的性能试验和评价展开研究。本文针对某乙烯装置高压膨胀再压缩机,结合工艺流程需求,对其性能试验的原理、方案和具体过程展开介绍,并依据相似理论开发了试验结果核算程序对试验结果进行评价。深入探索和研究膨胀再压缩机性能试验方案设计和试验结果评价,对检验机组性能有重要意义,也有助于膨胀再压缩机国产化研究。

表 1 高压膨胀再压缩机工艺参数表

Tab. 1 Process parameters of HP expander-compressor

项目	质量流量 / (kg·h ⁻¹)	入口压力 / MPa. a	入口温度 / °C	出口压力 / MPa. a	出口温度 / °C
膨胀机	14 778	2. 237	- 124. 5	1. 137	- 146
压缩机	13 262	0. 538	23. 9	0. 632	44. 1
项目	分子量 / (g·mol ⁻¹)	绝热效率 / 多变效率	轴功率 / kW	转速 / (r·min ⁻¹)	叶轮直径 / mm
膨胀机	4. 37	81. 5%	561	27 658	230
压缩机	4. 20	70. 7%	554	27 658	298

1.2 结构及原理

膨胀机和压缩机采用同轴设计,中间为轴承系统;膨胀机吸入高压气体膨胀制冷并输出功率,带动压缩机

1 膨胀再压缩机概述

1.1 工艺流程及参数

以某乙烯装置为例说明膨胀再压缩机的工作流程和用途。该乙烯装置以乙烷为原料,采用前脱乙烷前加氢工艺,其中低温分离系统膨胀再压缩机工艺流程见图 1。

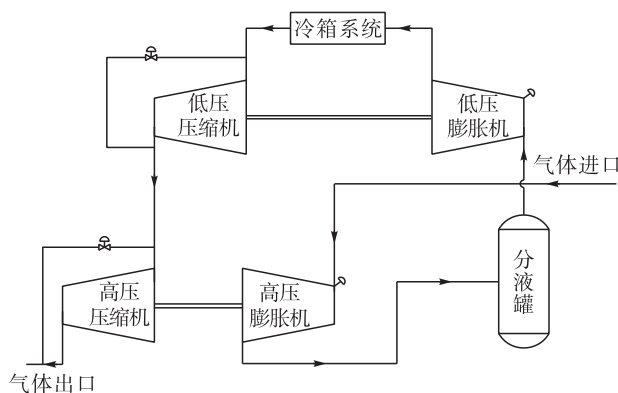


图 1 低温分离系统膨胀再压缩机工艺流程图

Fig. 1 Process flow diagram of expander-compressor in cryogenic separation system

上游分离出的低温氢气和甲烷混合气体首先进入高压膨胀机膨胀做功,经过分液罐后进入低压膨胀机膨胀做功,然后经冷箱换热后逐级进入低压压缩机和高压压缩机。气体经膨胀机后温度会进一步降低,并且发出一定功率,可以为冷箱系统提供冷量用以分离出乙烯产品,而发出的功率则作为压缩机运转的动力。由于介质中含有大量氢气,单台膨胀机能力受限,因此配置高压和低压 2 台膨胀再压缩机串联使用。高压膨胀再压缩机设计参数见表 1。

旋转从而压缩气体。膨胀再压缩机是一种功率自平衡机械设备,会根据膨胀功和压缩功自动平衡转速,如果压缩机功率偏高其转速会变低,反之则转速升高,运行

时很容易偏离设计工况^[13]。为了提高机组性能,通常会设计很高转速,采用开式或半开式叶轮,并配套使用铝合金、钛合金等高比强度材料,轴承可以使用磁力轴承

以进一步降低轴承损耗^[14],因此对整个机组的设计和制造要求都很高。膨胀再压缩机典型结构见图 2。

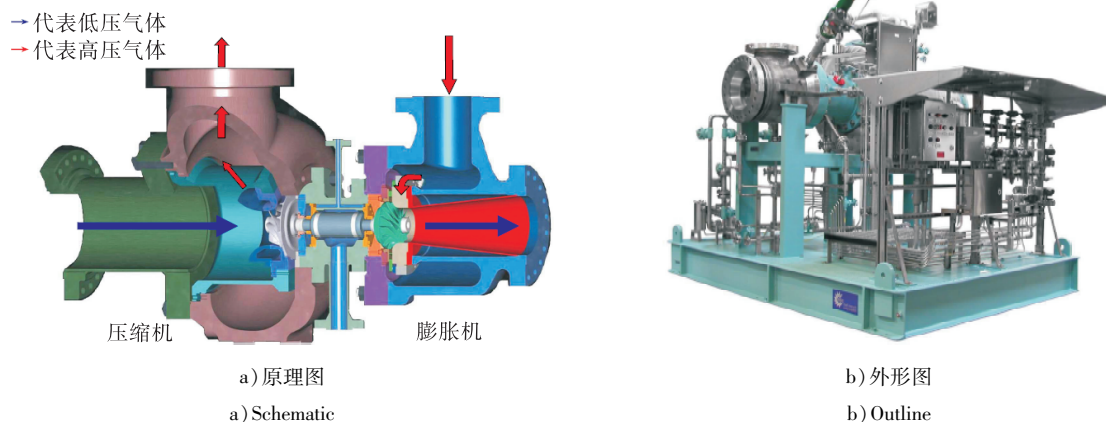


图 2 膨胀再压缩机结构图

Fig. 2 Structure of expander-compressor

2 性能试验原理

2.1 性能试验考核指标

根据 API 617—2014 *Axial and Centrifugal Compressors and Expander-compressor*^[15] (以下简称 API 617—2014), 制造后的膨胀再压缩机应保证膨胀机在设计速比下的等熵效率不低于设计等熵效率的 98%, 压缩机在正常流量下的能头不低于设计能头的 98%, 而且在保证工况下压缩机吸收的功率为膨胀机发出功率的 96% ~ 106%。

2.2 性能试验计算方法

膨胀再压缩机由膨胀机和压缩机组成, 压缩机为单级离心压缩机, 国内外都有直接可遵循的试验标准, 而膨胀机没有可参照的具体标准, 将参照 ASME PTC-10 (2009) *Performance Testing of Centrifugal Compressors-The real Gas Calculation Method*^[16] (以下简称 ASME PTC-10)、叶轮机械设计理论^[17-18]和厂家经验进行试验。根据考核指标, 膨胀机性能试验主要为了验证机组等熵效率和功率, 等熵效率是机组实际焓降和等熵焓降的比值, 可以根据式(1)~(3)获得, 而功率则可根据式(4)通过实际焓降与吸入流量获得, 速比则可以根据式(5)获得。可见, 只需要测量出机组进出口温度、压力以及流量等参数, 就可计算得到机组实际的等熵效率和功率等, 进而评价机组的性能水平。

$$\Delta H_s = C_p \times T_1 \times \left(1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right) \quad (1)$$

$$\Delta H_a = C_p \times (T_1 - T_2) \quad (2)$$

$$\varphi = \frac{\Delta H_s}{\Delta H_a} \quad (3)$$

$$P = m \times \Delta H_a \quad (4)$$

$$X_a = \frac{U}{C} \quad (5)$$

式中: ΔH_s 为等熵焓降, kJ/kg; ΔH_a 为实际焓降, kJ/kg; C_p 为定压比热容, kJ/(kg·K); k 为绝热指数; T_1 为膨胀前温度, K; T_2 为膨胀后温度, K; p_1 为膨胀前压力, kPa; p_2 为膨胀后压力, kPa; φ 为等熵效率; P 为轴功率, kW; m 为膨胀机质量流量, kg/h; X_a 为速比; U 为叶轮轮缘速度, m/s; C 为机组等熵喷射速度, m/s。

2.3 性能试验相似理论应用

在试验过程中, 因条件受限, 往往无法获得和设计工况一样的气体组分、压力、温度等, 因此会依据相似理论进行相似试验^[19]。根据透平机械基本理论, 要符合流动相似, 需要保证机组在两个工况下几何相似、运动相似、动力相似和热力相似, 工程中通常做法是要求决定性的相似准则相似, 如表征黏性影响的雷诺数、表征可压缩性的马赫数和绝热指数等^[20]。根据 ASME PTC-10 及厂家经验, 膨胀机性能试验采用的相似准则及其可接收偏差范围如下: 速比 0.95 ~ 1.05, 流量转速比 0.90 ~ 1.10, 比容比 0.95 ~ 1.05, 雷诺数(参考准则)见图 3-a), 马赫数(参考准则)见图 3-b)。

根据实际测试经验, 在相似试验条件下很难保证压缩机和膨胀机同时符合如上相似准则, 因此压缩机和膨胀机一般都独立进行性能试验, 另一侧根据计算获得需要匹配的条件。

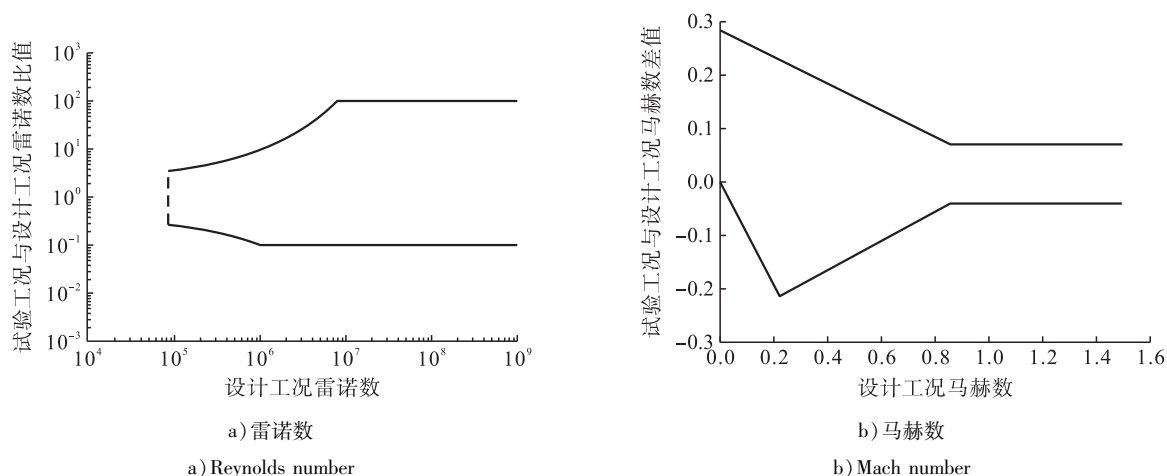


图3 ASME PTC-10 雷诺数和马赫数允许偏差图

Fig. 3 Tolerance of Reynolds number and Mach number of ASME PTC-10

3 性能试验方案及过程

3.1 试验方案

3.1.1 试验气体选择

根据 ASME PTC-10,膨胀机性能试验可以分为 I 型和 II 型。I 型试验完全复现机组运行情况,包括气体组分、转速、压力等,II 型试验是在上述试验条件不易或无法实现的情况下进行的相似试验。本机组处理气体为氢气和甲烷混合气体,平均分子量约 4 g/mol,且入口温度较低,试验时不易获取,参照厂家经验做法,经多方协调后采用空气作为替代气体。空气是一种安全气体,物理特性和热力特性也较为清晰,可以进行开式试验。

3.1.2 试验条件及转速确定

选定空气介质后,需要确定具体的试验条件。由于

采用开式试验,膨胀机的出口压力为大气压,入口温度和压力由气源决定,为了更好达到相似条件,也可以对进出口条件进行一定调整。假定膨胀机制造后能力和设计能力一样,则膨胀机效率应该一样,根据比容比相似准则进而可计算出试验状态出口密度和温度;类似于压缩机的能头系数,速比是决定膨胀机性能非常关键的因素,也是一个重要的相似准则,结合式(4)可计算出膨胀机等熵喷射速度,进而可以确定膨胀机的相似试验转速;再根据流量转速比准则可计算出试验需要的气量。设计后还应考虑雷诺数和马赫数的偏差,实时调整测试条件,以便达到充分的流动相似。本机组的设计条件与试验条件见表 2。

表2 膨胀机设计条件与试验条件表

Tab. 2 Calculation of expander's design and test case

项目	介质	入口流量 / ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	入口压力 / MPa. a	入口温度 / $^{\circ}\text{C}$	出口流量 / ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	出口压力 / MPa. a	出口温度 / $^{\circ}\text{C}$
设计条件	氢气混合物	1 812.3	2.237	-124.5	3 049.9	1.137	-146.0
试验条件	空气	1 142.5	0.840	108.0	1 848.7	0.450	57.3
项目	出口含液量	等熵效率	分子量 / ($\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$)	转速 / ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	出口流量 转速比	速比	
设计条件	4.08%	81.5%	4.37	27 658	0.11	0.57	
试验条件	—	81.5%	28.90	16 764	0.11	0.57	

3.1.3 性能试验装置

膨胀再压缩机性能试验在测试台进行,主要包括机组测试回路部分和数据自动采集及处理部分。机组性能试验台配置见图 4,本次试验采用开式试验,压缩机入口和出口都与大气直接相连,膨胀机入口与高压空气管道连接,出口直接排放至大气,高压空气由测试台空压

机提供。为了试验管路的匹配性,膨胀机入口速关阀采用试验台速关阀组件。

从试验原理可知,膨胀机性能试验需要记录机组入口温度、入口压力、出口温度、出口压力、流量、转速等参数,然后通过计算获得机组性能,其中流量通过孔板流量计测量。温度和压力仪表布置在机组进出口管道上,

为了测试数据的准确性,按照 ASME PTC-10 做法同时记录 4 组数据,每 1 个测量截面间隔 90°垂直布置 4 个测量仪表,计算时舍去偏差较大的数据,对于压力信号,为了保证测量的准确性,还需要在机组进出口设置足够长的直管段。测试数据通过变送器发送到控制台,由测试台自动采集数据并记录处理。所有的仪表在测试前应经过功能测试和校验,以消除仪表本身的误差^[21]。由于采用空气试验,还需要记录测量时的大气压和湿度,以便准确计算空气介质物性参数。

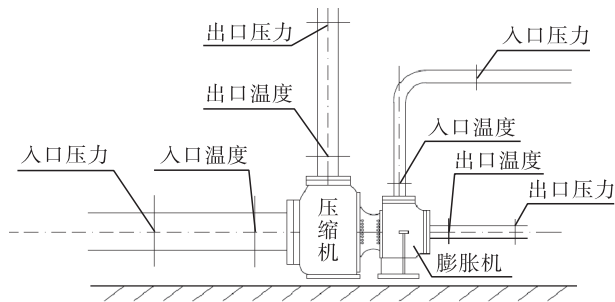


图 4 试验台配置示意图

Fig. 4 Test bed sketch

3.2 试验过程

按照设计的试验条件准备试验台,做好必要的安全措施,然后开始膨胀机试验。本机组采用磁力轴承系统,需要将轴承及其磁力控制系统组装好以后进行试验。试验过程如下。

- 1) 完成辅助系统准备。密封系统调试合格,磁力轴承通电保证轴承处于悬浮状态。
- 2) 启动膨胀再压缩机。保证膨胀机入口导叶阀门

表 3 膨胀机试验数据与换算结果表

Tab. 3 Expander's Test Data and Conversion Results

项目	介质	入口流量 / ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	入口压力 / MPa, a	入口温度 / $^{\circ}\text{C}$	出口流量 / ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	出口压力 / MPa, a	出口温度 / $^{\circ}\text{C}$
试验数据	空气	1 139.0	0.836 8	107.79	1 835	0.449	56.7
换算结果	氢气混合物	1 867.7	2.237 0	-124.50	3 008	1.137	-150.0
项目	出口含液量	等熵效率	分子量 / ($\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$)	转速 / ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	出口流量 转速比	速比	
试验数据	—	82.55%	28.90	16 873	0.109	0.575 5	
换算结果	—	82.55%	4.37	27 658	0.109	0.575 5	

图 6 中试验点为膨胀机在设计条件下的实际测试结果,根据试验空气介质换算到设计条件时的试验效率为 82.55%,高于设计值 81.5%,其他测试点效率也等于或略优于设计值,各考核参数均满足 API 617—2014 要求,证明机组制造后的性能满足设计要求。

根据表 3 数据计算,试验条件 and 设计条件的马赫数和雷诺数偏差都在允许范围内,试验条件的流动状

(Inlet Guide Vane, IGV) 关闭、压缩机入口切断阀全开。

- 3) 逐渐打开膨胀机 IGV 进行升速。
- 4) 调整进出口参数以达到设计的试验点。
- 5) 试验点膨胀机出口温度稳定后进行数据记录。
- 6) 重复上述步骤 4) 和 5) 完成所有测试点。

3.3 试验结果与评价

由于采用相似试验,获取的试验数据不能直接用于性能评价,需要换算到设计工况,特别是还应对膨胀机特性曲线(效率—速比曲线)进行适当修正,典型效率修正曲线见图 5。

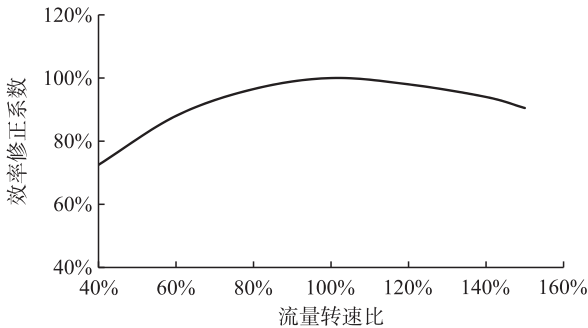


图 5 膨胀机性能试验效率修正曲线图

Fig. 5 Efficiency correction curve of expander performance test

由于国外制造厂仅提供试验数据和换算后的性能曲线,对于换算的合理性、正确性无法判断,因此也同时设计了性能试验核算程序,用于结果对照。核算程序的设计理论与前述试验理论一致,但计算顺序相反。膨胀机实际试验数据与根据核算程序换算后的结果见表 3,其他测试点换算结果也基本一致,试验性能曲线见图 6。

态与实际流动状态较为接近,也保证了试验结果的准确性。另外,可以发现表 3 换算结果中的出口温度、流量等与表 2 中的设计条件差别较大,这主要是由于在设计条件下机组出口会有部分气体液化,液化过程导致实际温度低于计算温度,实际出口气体流量低于计算出口气体流量,因此在机组相似换算中应特别关注液化问题。

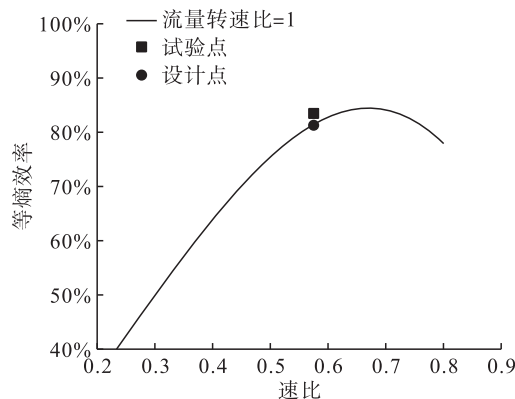


图6 试验性能曲线图

Fig. 6 Performance curve of test

4 性能试验注意事项

膨胀再压缩机是一种高速复杂设备,特别是本机组采用磁力轴承设计,正常运转时机组转子系统需要时刻处于悬浮状态,配套的安保辅助陶瓷轴承只能承受5次全载荷冲击,性能试验时既要注意保护机组的安全性,又要考虑试验结果的准确性。

1) 试验前必须进行安全性检查。

2) 试验转速的选择需要考虑足够的安全性。试验转速由试验介质与试验时的进出口条件决定,试验台进出口状态可以在一定范围内调整,设计时需要避开临界转速,特别是压缩机侧试验时还需要考虑足够的裕量,以保证对喘振现象的准确判断。

3) 试验条件的设计还应考虑试验介质状态,应避免膨胀后产生凝液、结冰现象,介质单相流状态是试验结果热动力换算的可靠保证^[22]。

4) 膨胀机试验时还应考虑对应状态下压缩机的性能,如果某个试验点无法与压缩机匹配,还应调整压缩机状态,如压缩机的入口温度、入口压力等。

5) 膨胀机设置有IGV,为了保证试验条件的流动相似,应保证在每个试验点的IGV开度与对应设计工况下的IGV开度一致。

6) 膨胀机每个试验点的获得需要不断调整相关参数靠近,测量时保证速比一定,流量转速比尽可能一致,以减少修正。

7) 试验中的调节主要通过膨胀机喷嘴调节,为了达到测试目的,可能需要进行必要的试验台调整。

8) 为了保证流动的相似性,对应试验点的IGV开度应与实际工况开度一致。

9) 试验前所有测量仪表需经过必要的校验,测试系统用管径、长度、变径、弯头等应合理设计,以减少测量误差。

5 结论

膨胀再压缩机在乙烯装置中占据核心地位,性能试验是保证其质量的重要环节,开展相关研究对于促进其国产化、提升乙烯装置收益率都具有重要意义。本文利用相似理论,对某乙烯装置膨胀再压缩机的膨胀机部分进行试验方案设计、测试,并对试验结果进行核验评价,得出如下结论。

1) 本膨胀再压缩机制造后性能满足设计要求,结合流体相似理论开发的试验结果核算程序结果满足工程设计使用要求。

2) 膨胀机性能试验参数的设计、试验台的搭建、试验过程中的操作以及试验结果的验证都对试验结果的可靠性有重要影响,试验时需要对各环节进行把控。

3) 对于低温膨胀机性能试验,试验设计和结果核算过程中应特别关注机组出口凝液问题,该问题会对试验条件和试验结果产生较大的影响。

参考文献:

- [1] 刘刚. 乙烯装置分离冷区系统影响乙烯收率的因素分析研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2014.
LIU Gang. Ethylene plant cold zone separating system research of factors affecting the yield of ethylene [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2014.
- [2] 邹余敏, 王洪汶, 孙晶磊, 等. 乙烯装置中尾气膨胀制冷及对深冷分离的影响[J]. 石油化工, 2000, 29(9): 686-688.
ZOU Yumin, WANG Qiwen, SUN Jinglei, et al. Expansion refrigeration of tail gas in ethylene plant and its effect on cryogenic separation [J]. Petrochemical Technology, 2000, 29(9): 686-688.
- [3] 侯予, 陈纯正, 熊联友, 等. 低温氦透平膨胀机的热力设计及性能分析[J]. 西安交通大学学报, 2003, 37(7): 666-669.
HOU Yu, CHEN Chunzheng, XIONG Lianyou, et al. Design and analysis of thermal performance for cryogenic helium expansion turbine [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2003, 37(7): 666-669.
- [4] 侯予, 陈纯正, 熊联友, 等. 低温氦气体轴承透平膨胀机的设计[J]. 低温工程, 2003(3): 7-11.
HOU Yu, CHEN Chunzheng, XIONG Lianyou, et al. Design of cryogenic helium expansion turbine [J]. Cryogenics, 2003(3): 7-11.
- [5] 刘立强, 熊联友, 侯予, 等. 透平膨胀机使用不同工质时热力性能的实验研究[J]. 低温与超导, 1998, 26(2): 53-57.
LIU Liqiang, XIONG Lianyou, HOU Yu, et al. The experimental study on thermal performance of turbo-expanders

- performed with different working fluids [J]. Cryogenics and Superconductivity, 1998, 26 (2): 53-57.
- [6] 陈克平, 钟丽娜. 杭氧透平膨胀机发展现状[J]. 深冷技术, 2009(3): 58-61.
- CHEN Keping, ZHONG Lina. Development Status of Turbo-expander technology at Hangyang [J]. Cryogenic Technology, 2009 (3): 58-61.
- [7] 李海辉. 氢气膨胀机的开发及应用[J]. 深冷技术, 2017 (3): 24-29.
- LI Haihui. Development and application of hydrogen expander [J]. Cryogenic Technology, 2017 (3): 24-29.
- [8] 邹云. 引进天然气透平膨胀机国产化改造实践[J]. 天然气与石油, 2020, 38(1): 98-103.
- ZOU Yun. Domestic modification practice of imported natural gas turbo-expander [J]. Natural Gas and Oil, 2020, 38 (1): 98-103.
- [9] 邹云. Rotoflow 公司天然气透平膨胀机改造设计[J]. 深冷技术, 2010(4): 6-8.
- ZOU Yun. Reform and design of natural gas turbine expander of Rotoflow company [J]. Cryogenic Technology, 2010 (4): 6-8.
- [10] 赵晨, 杨金福, 韩东江, 等. 增压透平膨胀制冷机转速性能试验研究[J]. 工程热物理学报, 2013, 34 (7): 1199-1203.
- ZHAO Chen, YANG Jinfu, HAN Dongjiang, et al. Experimental study on speed characteristics of turbo-refrigerator [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2013, 34 (7): 1199-1203.
- [11] 姚海, 吴荣仁. 空气制冷机中小流量透平膨胀机的试验研究[J]. 低温工程, 1998(5): 42-46.
- YAO Hai, WU Rongren. Experimental study of small high speed cryogenic turbo expander for air refrigerator [J]. Cryogenics, 1998 (5): 42-46.
- [12] 侯予, 林韶宁, 陈纯正, 等. 全动压气体轴承透平膨胀机机械性能的试验研究[J]. 西安交通大学学报, 2005, 39 (5): 476-479.
- HOU Yu, LIN Shaoning, CHEN Chunzheng, et al. Experimental study on mechanical performance of expansion turbine with aerodynamic bearings [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2005, 39 (5): 476-479.
- [13] 江楚标. 透平膨胀机及发展动态[J]. 深冷技术, 2001 (5): 1-9.
- JIANG Chubiao. Turboexpanders and recent developments [J]. Cryogenic Technology, 2001 (5): 1-9.
- [14] 李志权, 邢桂坤, 付大春, 等. 磁力轴承透平膨胀机/再压缩机组的选型探讨[J]. 化工设备与管道, 2009, 46 (1): 31-34.
- LI Zhiquan, XING Guikun, FU Dachun, et al. Discussion of type selection for AMB turbo-expander/compressor unit [J]. Process Equipment & Piping, 2009, 46 (1): 31-34.
- [15] American Petroleum Institute. Axial and centrifugal compressors and expander-compressor: API 617—2014 [S]. Washington, D. C.: API Publishing Services, 2014.
- [16] American Society of Mechanical Engineers. Performance testing of centrifugal compressors—The real gas calculation method: ASME PTC-10 (2009) [S]. New York: America. American Society of Mechanical Engineers, 2009.
- [17] 王仲奇, 秦仁. 透平机械原理[M]. 北京: 机械工业出版社, 1988.
- WANG Zhongqi, QIN Ren. Turbomachinery principles [M]. Beijing: China Machine Press, 1988.
- [18] 计光华. 透平机膨胀机[M]. 北京: 机械工业出版社, 1989.
- JI Guanghua. Turbo-expander [M]. Beijing: China Machine Press, 1989.
- [19] 邵晨, 杨思思, 张文国, 等. 大型氮肥装置合成气压缩机性能试验[J]. 化工设备与管道, 2019, 56(2): 38-42.
- SHAO Chen, YANG Sisi, ZHANG Wenguo, et al. Performance test of synthesis gas compressor in large nitrogen fertilizer plant [J]. Process Equipment & Piping, 2019, 56 (2): 38-42.
- [20] 祁大同. 离心式压缩机原理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2018.
- QI Datong. Principle of centrifugal compressor [M]. Beijing: China Machine Press, 2018.
- [21] 叶大均. 热力机械测试技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 1981.
- YE Dajun. Thermomechanical testing technology [M]. Beijing: China Machine Press, 1981.
- [22] 孙皖, 马斌, 牛璐, 等. 低温透平膨胀机内平衡凝结两相流动的数值模拟[J]. 西安交通大学学报, 2013, 47 (7): 36-39.
- SUN Wan, MA Bin, NIU Lu, et al. Numerical simulation of equilibrium condensation two-phase flow in cryogenic turboexpander [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2013, 47 (7): 36-39.