

DOI: 10.7652/xjtuxb201403013

低温进气对闪蒸气压缩机流量影响的实验研究

陈金锋, 吴智敏, 冯健美, 彭学院

(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 针对低温进气对液化天然气闪蒸气(BOG)压缩机容积效率影响很大的问题,搭建了低温进气压缩机性能测试实验台。通过在气缸不同位置安装温度传感器,测量了不同进气温度下压缩机气缸内气体温度及外壁面温度,采用体积流量计测量了压缩机实际进、排气流量;通过在压缩机进口前的管路上缠加热带,采用并联铜管旁通管路,实现了进气温度调节。根据测量结果对影响容积效率的因素,特别是温度系数和进气系数进行了计算分析,结果表明:BOG压缩机稳定运行时,随着进气温度从 -54.2°C 降低到 -142.2°C ,进气系数、温度系数和容积效率均明显减小,分别下降了25.5%、25.0%和23.75%;进气温度为 -142.2°C 时,气缸外壁面温差达到最大值 76°C 。该结果可为闪蒸气回收式压缩机气缸设计提供参考。

关键词: 闪蒸气压缩机; 闪蒸气回收; 低温进气; 容积效率

中图分类号: TE974 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2014)03-0068-04

Experimental Investigation on Flow Rate of Boil-Off Gas Compressor at Low Suction Temperature

CHEN Jinfeng, WU Zhimin, FENG Jianmei, PENG Xueyuan

(School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The low suction temperature has a significant effect on the volumetric efficiency of BOG (boil-off gas) compressors. A test rig with temperature sensors was built up to investigate the temperature distribution in the cylinder at various suction temperatures. The suction and discharge flow rates were both measured by the volume flow meter. The heating tape on the pipe before the compressor inlet and the by-pass line were used to adjust the suction temperature. From the test data, the main factors influencing the volumetric efficiency were analyzed, focusing on the temperature coefficient and the suction coefficient. The results show that the suction coefficient, temperature coefficient and volumetric coefficient decreased by 24.4%, 25%, and 23.75%, respectively, when the suction temperature decreased from -54.2°C to -142.2°C . The temperature difference on the cylinder outer surface reached the maximum, 76°C , at the suction temperature of -142.2°C .

Keywords: boil-off gas compressor; boil-off gas recovery; low suction temperature; volumetric efficiency

在运输和卸船过程中,由于液化天然气(LNG)储罐内 LNG 体积的变化,以及环境温度和大气压

变化等外界能量的输入,使得储罐内产生大量的闪蒸气(BOG)(无卸船时约占储存总量的 0.05%~

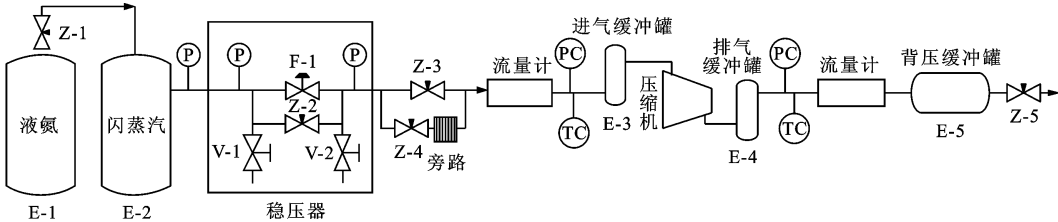
收稿日期: 2013-04-24。 作者简介: 陈金锋(1989—),男,硕士生;冯健美(通信作者),女,副教授。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51106120);国家科技支撑计划资助项目(2012BAA08B03)。

网络出版时间: 2013-12-19

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20131219.1121.001.html>

0.06%,卸船时占比更大)^[1-2]。为保证 LNG 接收站的安全运行,对闪蒸气需要进行及时处理,将 BOG 通过增压送入管网或重新送入 LNG 罐中^[3-8]。当 BOG 温度低至-162℃时,进气温度与环境温度之间存在极大温差,对进气加热影响显著。有实验数据表明,BOG 在压缩机工作腔开始被压缩时,其温度比进入工作腔时升高约 30~60℃^[9]。根据压缩机基本热力学原理,吸气温度每升高 3℃,排气量会降低约 1%,这意味着进气加热对 BOG 压缩机容积效率影响巨大^[10]。所以,在 BOG 压缩机结构参数设计阶段必须掌握低温进气对进气加热的影响规律。

本文搭建了低温进气压缩机性能测试实验台,由此研究了低温进气条件下压缩机气缸外壁面温度场、进气系数、温度系数、容积效率等随着温度变化的规律,以为低温进气压缩机的设计和制造提供



P:压力表;E:容器;Z:针阀;V:球阀;F:减压阀;PC:压力传感器;TC:温度传感器

图 1 实验装置流程图



(a)液氮气化及稳压装置



(b)压缩机及数据采集装置

图 2 实验装置实体图

参考。

1 实验装置

1.1 实验系统

搭建的低温进气压缩机性能测试实验系统的实验装置流程图如图 1 所示。由图 1 可见:由杜瓦瓶 E-1 蒸发的闪蒸气进入杜瓦瓶 E-2 进行缓冲,再经稳压器、铜管旁通管路进入压缩机;压缩机进口前的管路上缠有加热带,以辅助铜管旁通管路来调节压缩机进气温度;压缩机进、出口处均有缓冲罐,用来减小气流脉动,保证压缩机进、出口气体流量测量的准确性;在排气管路末端装有一个带阀门的气罐,用以调节压缩机背压;在缸盖、气缸外壁面以及压缩机进、排气口处均布置温度传感器,进行温度测量;气缸内气体压力由压力传感器测得。实验装置实体图如图 2 所示。

考虑到在实验室直接使用天然气的危险性,实验时利用液氮气化后的低温氮气替代 BOG 气体。实验采用的无油润滑压缩机的主要参数如表 1 所示。

1.2 实验方法及步骤

在一定的进气压力下,对不同进气温度影响压缩机气缸各处温度分布,以及进、排气量的变化规律进行了实验研究,步骤如下。

(1)压缩机启动之前,用低温氮气对压缩机进行了预冷处理,以减小压缩机气缸等部件由于大温差产生的热应力。当压缩机气缸温度冷却至-30℃时,启动压缩机。

(2)压缩机运行稳定后,调节稳压器,当压缩机进气压力稳定为 0.12 MPa 时,调节背压罐,使得排气压力稳定在 0.32 MPa。

(3)在压缩机 4 个管路的不同位置分别缠绕加热带(见图 2),另有 1 个铜管设为旁通管路,依次打开加热带 1、2、3、4 和旁通管路,可以实现 5 种不同的进气温度。当压缩机运行稳定时可以测得不同进气温度下各测点的温度和压力,以及进、出口处的气体流量。

通过以上 3 个步骤得到的实验工况如表 2 所示。

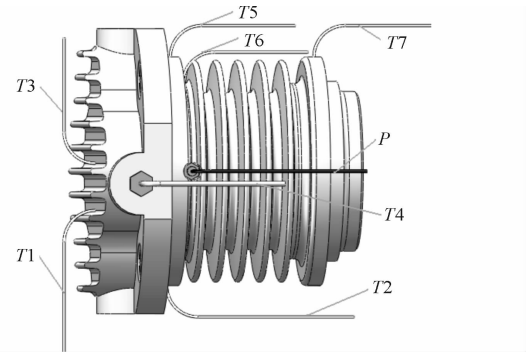
表 1 实验采用的无油润滑压缩机的主要参数

参数	数值	参数	数值
转速/ $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$	1500	排气压力/MPa	0.32
活塞行程/mm	40	工况温度/ $^{\circ}\text{C}$	$-150 \sim -50$
进气压力/MPa	0.12	理论容积流量/ $\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$	0.33

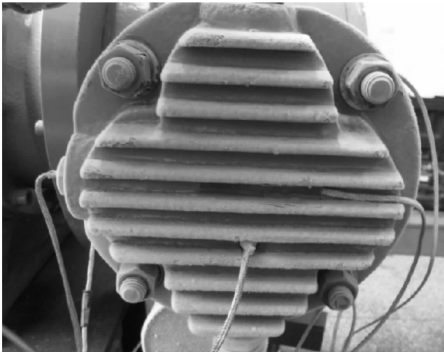
表 2 经 3 个步骤得到的实验工况

参数	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4	工况 5
进气温度/ $^{\circ}\text{C}$	-142.2	-123.8	-88.8	-73.5	-54.2
进气压力/MPa			0.12		
排气压力/MPa			0.32		

实验装置中压缩机的温度、压力传感器的布置如图 3 所示,其中 7 个测点 T1~T7 的温度传感器分别测量进口气体温度、进气侧气缸外壁温度、气缸盖外壁温度、出口气体温度、紧靠排气侧的肋顶端气缸外壁温度、排气侧肋根部气缸外壁温度、远离排气侧的气缸外壁温度,压力传感器测量气缸内气体压力。



(a) 三维图



(b) 实体图

图 3 实验装置中压缩机的温度和压力传感器布置

2 实验误差分析

低温进气对 BOG 压缩机流量影响的最重要的 3 个参数分别为进气系数 λ_s 、温度系数 λ_T 和容积效

率 η 。进气系数 λ_s 为实际吸气量与理论行程容积之比

$$\lambda_s = \frac{V_s}{V_t} = \lambda_v \lambda_p \lambda_T \tag{1}$$

式中: λ_v 为容积系数; λ_p 为压力系数; λ_T 为温度系数。实验中,由流量计测得的实际吸气量与理论行程容积之比得到进气系数 λ_s ,由测得的 P - V 图得到 λ_p 和 λ_v ,经式(1)可以计算得到 λ_T ,由流量计测得的实际排气量与理论行程容积之比得到 η 。

测量前 T 型热电偶均已经过标定,在 $-200 \sim 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内的测量误差为 $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$;标准大气压下流量计在 $6 \sim 60\text{ m}^3/\text{h}$ 范围内的测量误差为 $\pm 1\%$;压力传感器在 $0 \sim 0.7\text{ MPa}$ 范围内的测量误差为 $\pm 0.05\%$ 。由此,根据相对误差的传递公式得出 λ_s 、 η 的相对误差均为 $\pm 1\%$, λ_T 的相对误差为 $\pm 1.5\%$ 。

3 实验结果及分析

3.1 测温点的温度分析

5 种工况下压缩机 7 个测点的温度测量值如图 4 所示,测点位置见图 3。从图 4 可以看出:各工况下压缩机气缸壁面表面温度分布梯度很大,温差比较大,当进气温度为 $-142\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,最大温差达到 $76\text{ }^{\circ}\text{C}$;随着进气温度的升高,最大温差逐渐减小,当进气温度升至 $-54.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,最大温差只有 $54\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

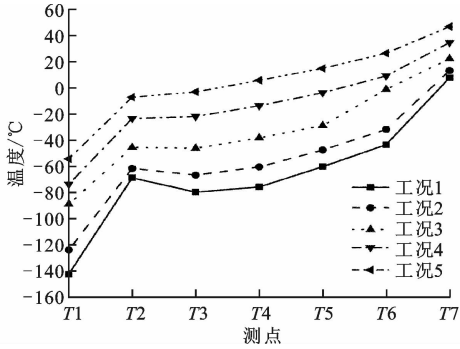


图 4 5 种工况下 7 个测点的温度测量值

3.2 进气温度对进气系数的影响

λ_s 随进气温度的变化如图 5 所示。由图 5 可以看出,随进气温度从 $-54.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 降低到 $-142\text{ }^{\circ}\text{C}$,压缩机的 λ_s 从 0.825 减小到 0.615,降低了 25.5%。原因是 λ_s 为 λ_v 、 λ_p 、 λ_T 三者的乘积,工况变化仅会影响压缩机的进气温度,所以 λ_v 、 λ_p 变化不大,因此 λ_s 与 λ_T 的变化规律相一致。

3.3 进气温度对温度系数的影响

λ_T 随进气温度的变化如图 6 所示。由图 6 可以看出:随着进气温从 $-73.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 降低到 $-142\text{ }^{\circ}\text{C}$,

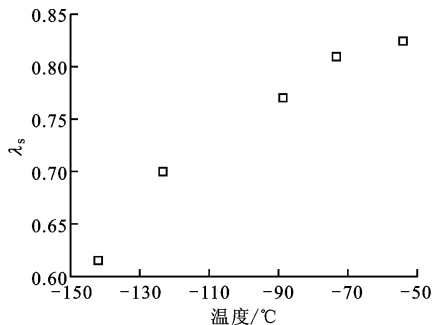


图5 进气系数随进气温度的变化

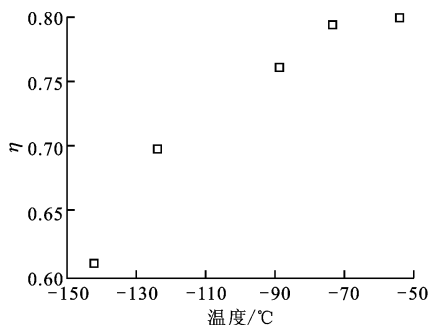


图7 容积效率随进气温度的变化

λ_T 从 0.96 减小到 0.72, 下降了 25%; 当温度高于 -73°C 时, λ_T 趋近于 1, 表明此时进气温度的变化对 λ_T 的影响不大。原因是 λ_T 反映的是气体加热对气缸吸气能力的影响, 而影响气缸内气体在吸气终了时温度的主要因素之一, 是吸气过程与气体接触的气缸和活塞壁面传给气体的热量。当进气温度较低, 如工况 1 温度低至 -142.2°C 时, 排气温度在 -80°C 左右 (见图 4), 整个气缸及活塞表面温度均低于环境温度, 因此环境温度对气缸及进气温度的影响显著, 而 λ_T 较小, 仅为 0.72。随着进气温度的升高, 外界温度与气缸及气缸内气体温度之间的温差减小, 通过气缸向气缸内气体传递的热量减小, λ_T 随之增大。

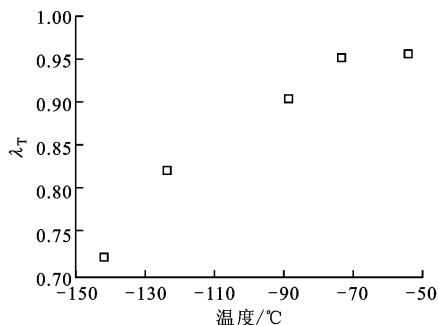


图6 温度系数随进气温度的变化

3.4 进气温度对容积效率的影响

η 随进气温度的变化如图 7 所示。由图 7 可以看出, η 随进气温度的变化较为明显, 当温度从 -54.2°C 降低到 -142°C 时, η 从 0.8 减小至 0.61, 降低了 23.75%。对比进、排气口处流量测量结果, 发现低温进气对泄漏的影响较小, η 主要受 λ_T 的影响, 由于 λ_T 随着进气温度的降低大大减小, 使得 η 随着进气温度的降低而减小。

4 结 论

本文搭建了满足低温进气条件的压缩机性能测

试实验台, 对进气温度在 $-142 \sim -54.2^\circ\text{C}$ 范围内的压缩机气缸各处温度分布及容积流量影响因素进行了实验研究, 得出以下主要结论。

(1) 在一定的进气压力下, 随着进气温度由 -54.2°C 降低至 -142.2°C , λ_T 降低显著, 由 0.96 减小到 0.72, 下降了 25%, λ_s 由 0.825 减至 0.615, 下降了 25.5%。因此, 低温进气时 λ_T 对压缩机进气量的影响很大。

(2) 随着进气温度由 -54.2°C 降低至 -142.2°C , η 从 0.81 减至 0.61。

(3) 压缩机进气温度低至 -142°C 时, 气缸壁面温度分布梯度非常大, 温差可达 76°C 。如此大的温差将会导致气缸产生较大的热应力, 所以在气缸设计时应考虑结构和材料的性能。

参考文献:

- [1] MURAI K, NAGURA K. LNG boil-off gas reciprocating compressors [J]. Kobe Steel Works Engineering Reports, 1999, 49(1): 64-67.
- [2] 顾安忠. 液化天然气技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [3] 刘浩, 金国强. LNG 接收站 BOG 气体处理工艺 [J]. 化工设计, 2006, 16(1): 13-16.
LIU Hao, JIN Guoqiang. Process comparison and energy saving analysis of BOG gas treatment of LNG receiving terminal [J]. Chemical Engineering Design, 2006, 16(1): 35-16.
- [4] QUEROL E, GONZALEZ-REGUERAR B, GARCIA-TORRENT J, et al. Boil off gas (BOG) management in Spanish liquid natural gas (LNG) terminals [J]. Applied Energy, 2010, 87(11): 3384-3392.
- [5] QUEROL E, REGUERAR B G, TORRENT J G, et al. Boil off gas (BOG) management in Spanish liquid natural gas (LNG) terminals [J]. Applied Energy, 2010, 87(11): 3384-3392.

(下转第 127 页)