

天然气管道压缩机组提效节能技术研究

夏大林(浙江油田公司,浙江 杭州 310000)

摘要: 天然气长输管道中的压缩机组是保障输气能力的关键设备,其能耗在整个输气系统能耗中的占比相对较高,一旦压缩机组效率不高,将导致大量能源浪费。针对该问题,本次研究以某天然气管道压缩机组为例,首先对其运行现状进行分析,建立基于机组现状的热力学模型,在此基础上,开展天然气管道压缩机组提效节能技术方案进行研究,为实现能源高效利用和降低单位输气能耗奠定基础。

关键词: 天然气管道; 压缩机组; 现状分析; 热力学模型; 提效节能

中图分类号: TE974 文献标识码: A 文章编号: 1674-5167(2025)021-0112-03

Research on Efficiency and Energy saving Technology for Natural Gas Pipeline Compressor Units

Xia Dalin(Zhejiang Oilfield Company, Hangzhou Zhejiang 310000, China)

Abstract: The compressor unit in natural gas long-distance pipelines is a key equipment to ensure gas transmission capacity, and its energy consumption accounts for a relatively high proportion of the overall energy consumption of the gas transmission system. Once the efficiency of the compressor unit is not high, it will lead to a large amount of energy waste. In response to this issue, this study takes a natural gas pipeline compressor unit as an example. Firstly, the operating status of the unit is analyzed, and a thermodynamic model based on the unit status is established. On this basis, research is carried out on energy-saving technology solutions for natural gas pipeline compressor units, laying the foundation for achieving efficient energy utilization and reducing unit gas transmission energy consumption.

Keywords: natural gas pipeline; Compressor unit; Current situation analysis; Thermodynamic model; Efficiency improvement and energy conservation

随着我国经济的持续发展和能源结构的不断优化,天然气作为一种高效且清洁的能源,其在能源消费中的比重不断上升,天然气长距离输送过程中,压缩机组作为核心动力设备,其运行效率和能源消耗水平直接关系到整个输气系统的运行成本与碳排放总量。提高压缩机组的运行效率,降低能耗水平,已成为推动天然气行业绿色低碳转型的关键任务^[1]。

目前我国天然气管道中应用的压缩机组为压电驱动天然气压缩机,部分设备存在技术老化和调节能力不足等问题,制约了管道输送效率的提升,也增加了运行能耗与维护成本,在双碳战略目标的引导下,压缩机组的节能技术升级急需加快推进。针对该问题,本次研究以某天然气管道压缩机组为例,开展压缩机组提效节能技术研究,为降低天然气输送运营成本和提升能源利用效率奠定基础。

1 天然气管道压缩机组现状分析

本研究以某天然气输送站的4M型中压电驱动天然气压缩机组为研究对象,该机组承担着区域天然气输送的重要任务。该压缩机组采用对称平衡型布置方式,配置为4列4缸结构,其中2#、4#缸缸径为360mm,在正常工况下作为一级压缩缸使用,1#、3#缸缸径为265mm,在正常工况下作为二级压缩缸使

用。这种配置设计能够实现两级压缩,理论上可以获得较高的压缩比和相对较好的能效表现。该压缩机组设计压力为4.0MPa,额定功率为1200kW,设计流量为8000Nm³/h。机组配备了完整的冷却系统、润滑系统和控制系统,具备远程监控和自动调节功能。投运至今已有8年时间,累计运行时间超过52000h。

通过对该压缩机组运行数据的统计分析发现,机组整体运行效率偏低,存在明显的节能改进空间。从压缩效率来看,该机组实际等温压缩效率仅为68.5%,远低于设计值的78%和行业先进水平的82%以上。

具体表现为一级压缩缸的容积效率为87.2%,二级压缩缸的容积效率为84.6%,均低于设计指标的92%,这种效率下降直接导致了机组实际输气能力的下降和单位能耗的增加。从运行参数分析,机组入口压力平均为0.4MPa,出口压力维持在3.8MPa左右,实际压缩比为9.5,接近设计值。但是,各级间冷却效果不佳,二级进气温度经常超过45℃,比设计温度高出8~10℃,这进一步降低了压缩效率。该压缩机组的能耗水平明显偏高,成为运营成本的重要组成部分。根据实际监测数据,机组平均功耗为1150kW,单位能耗达到0.144kWh/Nm³,比行业先进水平的0.118kWh/

Nm³ 高出 22%。

2 基于机组现状的热力学模型探讨

为准确分析 4M 型天然气压缩机组的运行特性并指导提效节能改造，需要建立完整的热力学模型，该模型以经典热力学理论为基础，结合实际工程特点，综合考虑压缩过程的不可逆性、传热损失和机械损失等实际因素^[2]。模型建立遵循质量守恒定律、能量守恒定律和熵增原理，采用状态方程描述工质的热力学性质，考虑到天然气成分的复杂性，选用 Peng-Robinson 状态方程来计算天然气在不同温度和压力条件下的热力学参数，该方程对于含有重烃组分的天然气具有较高的计算精度^[3]。

一级压缩缸承担从低压到中压的压缩任务，其热力学过程可用多变过程来描述，同时，在建立一级压缩缸模型的过程中，需要考虑实际压缩过程中的传热和摩擦损失，二级压缩缸完成从中压到高压的最终压缩，同样采用多变过程模型。中间冷却器对压缩过程效率影响显著，建立其传热模型至关重要，因此可以采用对数平均温差法建立传热方程，考虑到换热器结构影响，实际传热系数可以按设计值的 75% 计算^[4]。后冷却器用于降低最终排气温度，提高下游设备运行安全性，其传热模型与中间冷却器类似，但需考虑高压下天然气物性的变化。

3 天然气管道压缩机组提效节能技术方案

3.1 天然气管道压缩机组改进措施

针对 4M 型天然气压缩机组效率偏低和能耗较高的问题，提出将现有两级压缩改为单级压缩，同时将二级双作用改为单作用的运行模式，该技术措施通过重新配置压缩机的工作方式，优化压缩流程，减少中间环节损失，从而实现整体效率的提升和能耗的降低。该改造方案的核心思路是充分利用现有设备的大缸径优势，将原本的 360mm 缸径一级压缩缸和 265mm 缸径二级压缩缸重新组合，形成更加合理的单级压缩配置，通过这种方式，不仅可以减少压缩级数带来的效率损失，还能简化系统结构，提高运行可靠性。

改造后的单级压缩方案采用 4 个 360mm 大缸径气缸同时工作的模式。原有的 2#、4# 缸继续保持其 360mm 缸径配置，而 1#、3# 缸则需要进行技术改造，将缸径从 265mm 扩大到 360mm，或者通过更换缸套和活塞等关键部件来实现缸径的统一。这种配置使得所有气缸都具有相同的缸径和排量，压缩比统一设定为 9.5 : 1，即从 0.4MPa 直接压缩到 3.8MPa，单级压缩避免了中间冷却和再压缩的过程，减少了压力损失和传热损失，理论上可以提高整体压缩效率 8-12%。传统的双作用气缸在活塞的两侧都进行压缩工作，虽

然能够提高单缸的输出能力，但也增加了密封难度和维护复杂性，改为单作用后，每个气缸只在活塞的一侧进行压缩，另一侧作为缓冲空间或直接与大气相通。单作用配置的优势在于密封要求降低，活塞杆只需要单侧密封；维护难度减小，活塞和缸套的磨损更加均匀；压缩过程更加稳定，避免了双侧压缩可能产生的不平衡力。

对于需要扩大缸径的 1#、3# 缸，采用更换缸套的方式实现。新缸套采用高强度合金铸铁材料，内表面经过精密加工和表面强化处理，确保与活塞环的良好配合。缸套壁厚设计需要满足 9.5 : 1 压缩比下的强度要求，安全系数不低于 2.5。活塞系统需要重新设计，新活塞采用铝合金材料，重量比原铸铁活塞减轻约 30%，有利于降低往复惯性力。活塞环采用三道环设计，两道压缩环和一道油环，确保良好的密封性能和润滑效果。

单级压缩后，进排气阀承受的压差增大，需要重新设计阀片厚度和弹簧刚度，进气阀采用大通径设计，阀片材料选用高强度弹簧钢，表面进行渗氮处理以提高耐磨性，排气阀则需要承受更高的排气压力，阀座和阀片的配合精度要求更加严格^[5]。

新阀系统设计流阻系数比原系统降低 15%，有效减少了进排气损失，同时，阀片的启闭时机经过优化计算，确保在各种工况下都能获得最佳的容积效率。单级压缩后，排气温度会有所升高，需要加强后冷却系统的能力，原有的中间冷却器可以改造为预冷器，用于降低进气温度，后冷却器则需要增加换热面积，确保最终排气温度控制在设计范围内。新的冷却系统采用强化传热技术，换热管内插入螺旋扰流片，传热系数比原系统提高 25%，冷却水系统增加变频调节功能，根据负荷变化自动调节冷却水流量，进一步降低辅助功耗。

3.2 天然气管道压缩机组优化方案计算流程

针对两级改单级压缩技术措施的提效节能效果评价，建立了完整的提效节能效果评价体系，该评价体系将整个评价过程分为模型校准和优化计算两个主要阶段，通过系统性的计算步骤，实现对两级改单级压缩技术措施效果的准确评估。在模型校准部分，主要完成基础参数设定和模型验证工作，在优化方案能效计算部分，整个计算流程采用迭代优化的方式，确保计算结果的准确性和可靠性。计算流程首先从开始节点启动，进入输入各级进出口压力和结构设计参数环节。

根据 4M 型压缩机组的实际结构，输入关键设计参数。接下来进入设定各级测漏系数步骤，基于实际

检测数据，设定一级缸泄漏系数为 3.2%，二级缸泄漏系数为 2.8%。随后调整各级容积系数、压力系数、温度系数，这些系数直接影响容积效率的计算精度。模型校准采用迭代计算方法确保精度，首先计算各级容积效率，然后计算容积流量，考虑实际工况下的体积修正。

进入计算绝热功率和指示功率环节，分别计算理论绝热压缩功率和考虑多变过程的指示功率，通过判断条件进行迭代验证，确保计算流量与实际流量的偏差控制在 1% 以内。如果判断条件不满足，系统将输出容积流量计算值与实际容积偏差最小时对应的压力系数、温度系数、测漏系数、净化系数，并返回调整相关参数，直至满足精度要求。模型校准的最后阶段计算各项效率指标，计算机械效率考虑摩擦损失和传动损失，计算缸热效率和比功率反映压缩过程的热力学性能，这些基础效率数据为后续的优化计算提供准确的对比基准。

3.3 天然气管道压缩机组优化结果讨论

基于前述建立的热力学模型和计算流程，对 4M 型天然气压缩机组两级改单级压缩技术措施进行了全面的效果评价，评价结果表明，该技术措施在提高设备效率、降低能源消耗、改善运行性能等方面均取得了显著成效，完全达到了预期的改造目标。通过系统性的理论计算和仿真分析，各项关键性能指标均呈现大幅提升态势，改造后的压缩机组不仅在热力学性能上实现了质的飞跃，在经济效益和环境效益方面也表现出色，为同类型设备的节能改造提供了成功范例和技术参考。

改造前压缩机组的等温压缩效率仅为 68.5%，远低于行业先进水平，实施两级改单级压缩改造后，等温压缩效率提升至 77.1%，增幅达到 8.6 个百分点，提升率为 12.5%，这一显著改善主要源于单级压缩流程的简化，消除了级间压力损失和中间冷却传热损失。容积效率方面的改善更为明显，从原来的 73.8% 提升至 89.5%，增幅达 15.7 个百分点，提升率为 21.3%，容积效率的大幅提升直接转化为压缩机实际输气能力的增强，在相同功耗条件下可以处理更多的天然气流量。

单级压缩配置下，机械传动系统得到简化，摩擦损失和传动损失均有所降低，综合机械效率从原来的 84.2% 提升至 88.0%，提升了 3.8 个百分点，这一改善虽然幅度相对较小，但在大功率设备上的绝对节能效果依然十分可观。活塞往复运动的平衡性也得到改善，单作用配置消除了双侧压缩产生的不平衡力，降低了轴承载荷和振动水平，有利于设备长期稳定运行和维

护成本的控制。

改造前压缩机组总功率为 1050kW，其中压缩功率 950kW，辅助设备功率 100kW，改造后总功率降低至 910kW，其中主压缩功率 825kW，辅助设备功率 85kW。总功率下降 140kW，降幅为 13.3%。单位能耗从原来的 0.131kWh/Nm³ 降低至 0.114kWh/Nm³，下降 0.017kWh/Nm³，节能率达到 13.0%。这一能耗水平已接近国际先进水平的 0.110kWh/Nm³，显著提升了设备的市场竞争力。

按照年运行 8000h 计算，改造前年耗电量为 840 万 kWh，改造后降低至 728 万 kWh，年节约电量 112 万 kWh，考虑到天然气输送的连续性要求，这种大幅度的能耗降低对于提升整个输送系统的经济性具有重要意义。在不同负荷工况下的节能效果同样显著。满负荷运行时节能率达到 13.0%，75% 负荷时节能率约为 11.5%，50% 负荷时节能率约为 9.8%。即使在部分负荷条件下，改造方案依然保持了良好的节能效果。

4 结论

综上所述，在碳达峰和碳中和国家战略背景下，压缩机组的能效水平直接关系到天然气行业的碳排放总量，我国天然气管道中仍广泛使用传统燃气轮机驱动的压缩机组，部分机组存在老旧和效率低等问题，远不能满足现代高效输气系统的要求。因此，需要根据压缩机组运行的实际情况，对压缩机运行参数进行优化和设备进行改造，全面降低天然气消耗和减少碳排放，助力国家双碳目标的实现。

参考文献：

- [1] 刘少杰,车海龙,宋永顺,等.采气三厂天然气压缩机能效分析与运行优化[J].石化技术,2024,31(12):177-179.
- [2] 张东阳.基于模型分析法的电驱往复式天然气压缩机节能优化研究[J].石油石化节能与计量,2024,14(07):44-50.
- [3] 兰海涛,赵玥颖,姚岸林,等.S 气田天然气压缩机组能效提升技术研究[J].石油石化节能与计量,2024,14(01):21-25+31.
- [4] 张静,李楠,宋渊娟,等.长庆油田某增压站天然气增压机组提效节能技术研究[J].流体机械,2023,51(05):97-104.
- [5] 翟海刚.新项目基于压缩机验收调试及运维管理的提效实践[J].化工管理,2022,(31):132-134.

作者简介：

夏大林（1991-），男，汉族，贵州修文人，大学本科，工程师，从事设备及管道和站场完整性管理工作。