

文章编号: 1000-7466 (2025) 02-0082-06

余隙无级调节系统在汽油加氢活塞压缩机上的应用

胡忠伟¹, 盛志广¹, 刘杰¹, 顾姝靓²

(1. 东明中油燃料石化有限公司, 山东 东明 274500;
2. 山东易阳石化节能装备有限公司, 山东 济南 250101)

摘要: 节能降碳是积极稳妥推进碳达峰碳中和、全面推进美丽中国建设和促进经济社会发展全面绿色转型的重要举措。实践证明, 余隙无级调节气量节能技术产品成熟、运行稳定可靠, 节能降碳效果显著, 非常适用于炼油化工领域往复活塞压缩机的节能改造, 是践行国务院《2024—2025年节能降碳行动方案》的友好型节能技术。某公司第六联合车间于2023-10利用余隙无级调节气量节能技术对汽油加氢一段K3201B和二段K3601B循环氢活塞压缩机进行了余隙节能改造, 改造后, 2台压缩机每日节约电量合计为7 210 kW·h, 年节约电量合计为252.4万kW·h, 年节约电费151.4万元, 年节约能量合计为832.92 t标准煤, 年减排二氧化碳合计为2 198.9 t。该节能技术具有良好的经济效益和社会效益, 值得大力推广和应用。

关键词: 压缩机; 余隙; 无级调节; 汽油加氢; 节能降碳

中图分类号: TQ051.21 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1000-7466.2025.02.014

Application of Continuously Variable Clearance Adjustment System in Gasoline-Hydrogen Piston Compressors

HU Zhong-wei¹, SHENG Zhi-guang¹, LIU Jie¹, GU Shu-liang²

(1. Dongming Zhongyou Fuel and Chemical Co. Ltd., Dongming 274500, China;
2. Shandong Yiyang Petrochemical Energy-Saving Equipment Co. Ltd., Jinan 250101, China)

Abstract: The implementation of energy conservation and carbon reduction measures is a crucial step in achieving the goals of Carbon Peak and Carbon Neutral, and in promoting a comprehensive green transformation of economic and social development. The energy-saving technology of step-less capacity regulation with variable clearance volume is highly suitable for reciprocating piston compressors in the field of refining and the chemical industry. The technical products offer numerous advantages, including stable and reliable operation, notable energy savings and carbon reduction. In the sixth joint workshop of a company, the energy-saving transformation technology for circulating hydrogen piston compressors K3201B and K3601B, which are used in the first and second stages of gasoline hydrogenation, respectively, was carried out in October 2023. The results of the transformation demonstrate the following: the total daily power saving of the two compressors is 7 210 kW·h, the total annual power saving is 2.524 million kW·h, the annual electricity saving

收稿日期: 2024-12-10

作者简介: 胡忠伟(1982-), 男, 山东东明人, 工程师, 学士, 现主要从事炼油化工生产车间的管理工作。E-mail: 18905306058@163.com。

通信作者: 顾姝靓(1996-), 女, 山东济南人, 硕士, 现主要从事往复活塞压缩机节能技术的研发等工作。E-mail: 479118868@qq.com。

cost is 1.514 million RMB, the total annual energy saving is 832.92 ton of standard coal equivalent and the total annual carbon dioxide emission reduction is 2 198.9 t. Therefore, this energy-saving technology offers significant economic and social benefits and merits vigorous promotion and application.

Key words: compressor; clearance volume; step-less regulation; gasoline hydrogenation; energy saving and carbon reduction

为大力推动节能减排,深入打好污染防治攻坚战,加快建立健全绿色低碳循环发展经济体系,推进经济社会发展全面绿色转型,助力实现碳达峰碳中和目标,国务院于2021-12-28印发了《“十四五”节能减排综合工作方案》^[1],提出“到2025年,全国单位国内生产总值能源消耗比2020年下降13.5%”的总体目标,要求“重点行业能源利用效率和主要污染物排放控制水平基本达到国际先进水平”。为此,某公司积极响应国家号召,及时部署并摸排耗能设备运行情况,对标自身发展状况,制定设备节能改造计划,根据自身生产计划逐步落实和实施设备节能改造,为实现国家制定的节能减排目标和达标要求贡献力量。

某公司第六联合车间的汽油加氢一段K3201B和二段K3601B循环氢活塞压缩机都是100万t/a汽油加氢装置的关键设备,承担着压缩并输送工艺介质 H_2 (H_2 占比约94.5%)的重要任务,这2台压缩机均是该生产装置中的高耗能设备,日均耗电量合计为34 537 kW·h,其耗电量约占整个装置耗电量的30%。

由于炼油加工业受市场因素变化的影响较大,装置加工量会跟随市场需求进行调整,因此,压缩机的外输气量也要随之调整,多余的被压缩气体就须返回到压缩机的入口,并且这些返回的高压高温气体还需冷却到压缩机入口所需的压力和温度,不但浪费了压缩机轴功,还消耗了大量的冷却水,最终导致能源利用效率较低,高碳排放得不到有效控制。另外,大部分企业总是根据装置可能的扩能改造来选用压缩机,在未扩能改造前压缩机一直处于“大马拉小车”的状态,造成巨大能耗浪费;再者,压缩机也会因多种其它原因,被要求改变外输气量,以适应工艺生产的变化^[2],从而造成大量的被压缩气体再返回到压缩机的入口,导致压缩机功耗远大于外输气量实际所需功耗。基于以上原因,装置上的这类压缩机就需要进行节能改造,且要求节能改造后,压缩机可以在较大排气量范围内实现无级调节,在此过程中,旁路调节返回线在调节负荷范围内可以完全关闭,停用

冷却水,实现压缩机轴功与排气量耗功的最佳匹配,以达到节省能耗和降低碳排放的目标^[3-8]。

第六联合车间历时一年对活塞压缩机近年常用的几种节能改造技术进行了调研、走访和论证。常用的改造技术主要有顶开进气阀无级调节技术、盖侧囊式调节技术和余隙无级调节技术。顶开进气阀无级调节技术产品已在国内炼化企业中应用近20年,技术成熟,稳定性较高,调节范围适宜,但存在至少5%左右的能耗损失,用户节能效益有所降低,且产品价格高,自身能耗大,后期维护费用高。盖侧囊式调节技术是近几年开发的新技术,相关论文很少,应用不广泛,不能实现无级调节,需要以外部气源或压缩机出口的高压气体作为调节动力源,操控方式单一,压缩机排气量精确度低,难以实现无缝最佳点节能控制。余隙无级调节技术在国内已有十余年的推广应用,各使用单位反馈,该技术产品调节范围适宜,能无级调节压缩机排气量,易实现最佳节能点,节能效果突出,无能耗损失,优于前2种技术,具有运行稳定可靠、故障率低、操控方便、产品自身能耗低、用户节能收益高及后期维护费用少等优点,已获众多企业的认可和应用。据调研,仅中国石化沧州分公司利用该技术已节能改造了13台活塞压缩机,均运行稳定,达到了节能改造的目的和要求。

基于上述的调研和论证总结,某公司决定采用余隙无级调节气量节能技术对K3201B和K3601B循环氢活塞压缩机进行节能改造。2套余隙无级调节气量节能系统历时7天,均于2023-10-20顺利开车投用。投用后,节能效果明显,压缩机和余隙无级调节系统均运行稳定。经过19d的标定考核,对比2台压缩机节能改造前后的耗电数据,得出2台压缩机每日节约电量合计达7 210 kW·h^[9],年节约电费151.4万元,节能效益突出,达到了节能降碳的目的。

1 余隙无级调节技术节能改造简述

两缸往复式活塞压缩机余隙无级调节气量节能系统工艺流程见图1^[10-12]。往复式活塞压缩机余隙

无级调节气量节能技术,在理论上能实现压缩机额定或现运行满负荷排气量的 50%~100%范围内的气量无级调节,可根据确认的主控变量对压缩机排气量进行伺服无级控制,使压缩机始终运行在最佳外输气量和最佳节能工作状态,并实现调节范围内排气量与压缩机轴功成正比例关系,进而有效降低能耗。在调节范围内,可关闭原有的旁路调节系统,进而节约循环冷却水^[13]。

当前,余隙无级调节气量节能技术改造主要以改造压缩机盖侧的气缸盖为主,改造简单,易于实施。余隙节能改造安装施工时,压缩机的其它部和原控制系统均匀无须改造,只需将压缩机气缸盖拆下并更换为对应的余隙无级调节执行单元,并辅以液控单元、泄漏监测单元和电仪控制单元即可。改造后液控单元、泄漏监测单元和电仪控制单元集中于同一个控制柜内,执行单元直接与压缩机气缸相连,液控单元与执行单元、泄漏监测单元与执行单元之间采用不锈钢管线连接,电仪控制单元与执行单元、液控单元、泄漏监测单元之间均通过仪表信号电缆相连。

执行单元是余隙无级调节系统实现余隙补助容积调节范围内压缩机外输气量无级调节的关键设备,由执行机构、传感器和信号电缆等组成,其中执行机构是整套系统中的核心部件,执行机构内部余隙补助容量的大小是余隙节能改造是否成功的关键,同时也直接关系到改造后压缩机的外输气量是否能满足生产工艺上的需求,因此,系统制造商需具有余隙补助容量精确计算的能力,同时还有较强的设计和制造能力,确保压缩机余隙节能改造后既能满足生产工艺的气量要求,又能实现压缩机最佳负荷下的最大化节能要求。

K3201B 和 K3601B 的余隙节能改造的基本信息见表 1。往复式活塞压缩机余隙节能改造时,压缩机用户既要提供压缩机制造商交付的压缩机终版额定数据,也要提供压缩机的现运行工艺参数。额定数据主要是对运行参数下的计算结果进行校核和必要的系数计算及修正,但不能作为改造压缩机的余隙补助容量的工艺计算,除非该压缩机是还没有投用过的新机,否则,改造压缩机的余隙补助容量必须根据压缩机用户的现有运行工艺参数

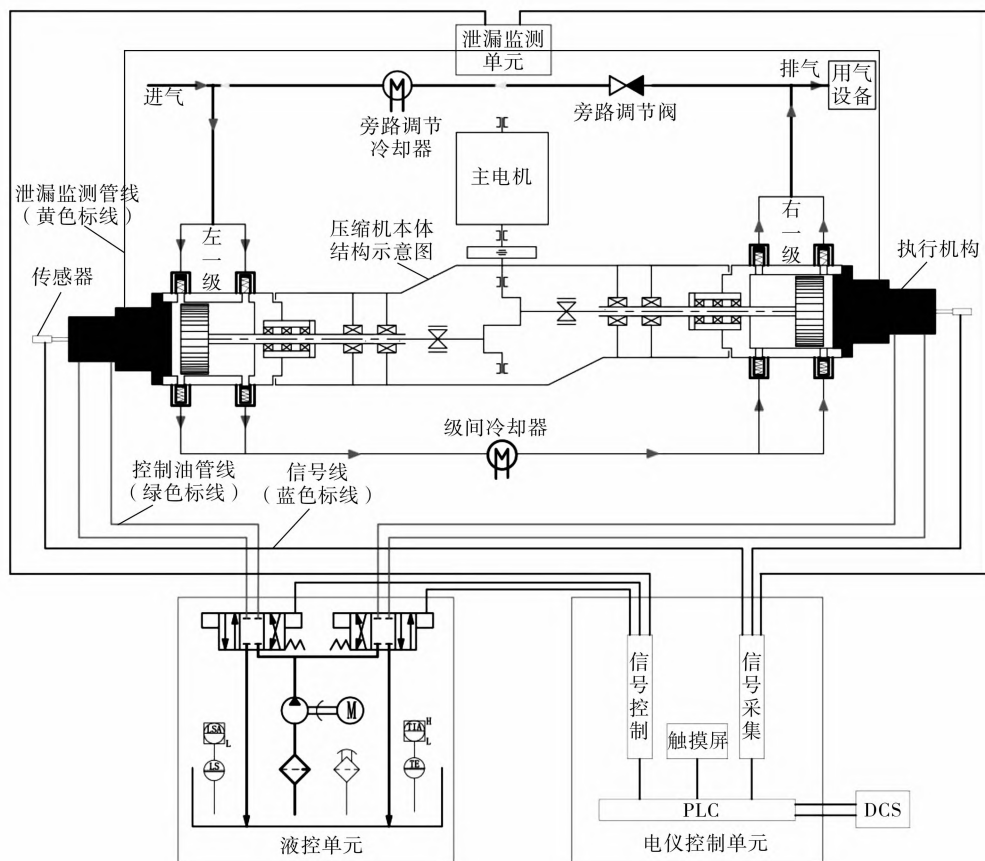


图 1 两缸往复式活塞压缩机余隙无级调节气量节能系统工艺流程图

表1 100万t/a汽油加氢装置活塞压缩机余隙节能改造前后设备型号及参数

压缩机名称	一段循环氢压缩机 K3201B	二段循环氢压缩机 K3601B
压缩机规格型号	DW-48/(16-25)-X	2D32-58.5/14-25
进口状态流量/(m ³ /min)	49.3	60.31
入口/出口压力(额定)/MPa	1.587/2.639	1.49/2.619
入/出口温度(额定)/℃	40/85	43/98
压缩机流量(额定)/(m ³ /h)	43 297(标准状态)	45 361(标准状态)
入口/出口压力(运行)/MPa	1.5/2.3	1.5/2.2
入口/出口温度(运行)/℃	34.3/66.9	35.2/71.9
压缩机流量(运行)/(m ³ /h)	38 000(标准状态)	45 361(标准状态)
现运行负荷下余隙无级调节气量百分数/%	70~90	60~75
节能改造后工艺气量调节范围/(m ³ /h)	26 600~34 200	27 217~34 021
余隙无级调节系统规格型号	YY-EEA-ACCV1.2	YY-EEA-ACCV1.2

进行精确计算和优化调整,这样才能保证压缩机在现有运行参数下工艺需气量的准确性和用户的最大化节能收益。

在实际改造过程中,由于压缩机已安装就位,压缩机余隙节能的改造空间受到了限制,特别是一级两列的活塞压缩机一般压缩比较小,余隙调节范围太宽时,余隙执行机构较长,现场安装空间有可能不能满足相邻压缩机的活塞杆抽出距离要求,这就需要压缩机用户根据多年来的工艺需气量情况给出工艺上最大需气量和最小需气量,以便系统制造商计算出准确的余隙补助容量调节范围。K3201B和K3601B活塞压缩机的余隙节能改造就遇到了这一问题,经用户与制造商多次沟通和精确计算后,最终确定的现有运行负荷下余隙无级调节气量百分比为,K3201B设计在70%~90%,工艺需气量(标准状态)在26 600 m³/h~34 200 m³/h范围内无级调节;K3601B设计在60%~75%,工艺需气量(标准状态)在27 217 m³/h~34 021 m³/h范围内无级调节。经过近一年的运行实践,证实这一方案是科学的,节能改造后,既保证了生产上的需气量要求,又能保证压缩机处于最优节能点,同时压缩机原有的旁路调节被彻底关闭,节约了大量的循环冷却水。

液控单元是实现执行机构余隙补助容量双向无级调节的动力来源,分现场手动调节、DCS远程调节和就地半自动调节模式。正常情况下,建议采

用DCS远程调节模式,这样一键式投用系统,既节省人力,又能保证系统匀速调节负荷,使压缩机原有系统也能平稳运行。在DCS端不具备组态的条件下,或DCS端故障状态下,可采用手动调节模式,但调节速度不宜太快,以保证外输气量的精度和压缩机原有系统的平稳运行。在DCS端无法远程调节控制,手动调节控制外输气量效果差时,可采用就地半自动模式,该模式下负荷调节较均匀,控制精度易于实现,压缩机原有系统也能平稳运行。K3201B和K3601B余隙无级调节系统配置的液控单元自投用之日至今已近1a时间,运行良好,未发生过任何故障。

泄漏监测单元是执行单元的安全防护设备,主要功能是在线实时监控执行机构余隙缸内余隙活塞密封组件的运行状态,密封组件一旦出现磨损泄漏或损坏泄漏现象,泄漏监测单元就会发出报警信号,泄漏量达到某一极值时,就会发出严重泄漏报警。报警发生时,应通知检维修单位到达现场确认故障原因,并判断是否需要停用余隙调节系统。

电仪控制单元是余隙无级调节系统的控制中枢,DCS远程调节控制和就地半自动调节控制都必须在PLC(可编程逻辑控制器)的作用下实现。DCS远程调节控制时,在DCS端给定一个压缩机排气量百分比信号后,余隙无级调节系统就在PLC的作用下,自动调节执行机构余隙补助容量

的大小至工艺上需要的压缩机排气量为止,操控简单,运行平稳。K3201B 和 K3601B 余隙无级调节系统配置的电仪控制单元,带有人机对话、故障分析和报警功能,并可通过 RS485 通讯模块将系统运行参数和故障信息、报警信息传输到 DCS 端的操作画面上,操作人员随时都能掌握到余隙调节系统的运行情况,方便操作的同时也减轻了员工的工作强度。余隙无级调节系统安装现场照片,见图 2。



图 2 余隙无级调节系统安装现场

2 余隙无级调节技术节能改造效益

2023-10-20 循环氢压缩机 K3201B 和 K3601B 分别投用余隙无级调节气量节能系统。在此之前的 2023-09-23 至 2023-10-12,对 K3201B 和 K3601B 进行了余隙节能改造前的耗电量标定,2 台压缩机投用余隙无级调节系统后,在经过 48 d 的稳定运行后,于 2023-12-06 至 2023-12-25 对 K3201B 和 K3601B 进行了余隙节能改造后的耗电量等的标定。标定原则是,两个标定时间段内 K3201B、K3601B 的生产负荷基本一致,工艺参数一致。K3201B 和 K3601B 余隙无级调节气量节能改造前后的标定数据^[9]见表 2。

从表 2 数据中可以得出,2 台压缩机余隙节能改造后每天可以节约电量合计达 7 210 kW·h,2 台压缩机年节约电量合计达 252.4 万 kW·h,2 台压缩机年节省电费达 151.4 万元。

根据表 2 有关数据,2 台压缩机余隙节能改造后,可以计算得出,年节约能量为 832.92 t 标

表 2 余隙无级调节气量节能改造前后的标定数据

压缩机名称	一段循环氢压缩机 K3201B	二段循环氢压缩机 K3601B
余隙无级调节气量范围/%	70~90	60~75
余隙无级调节系统规格型号	YY-EEA-ACCV1.2	YY-EEA-ACCV1.2
19 天耗电量/(kW·h)	373 000(改造前)	283 200(改造前)
19 天耗电量/(kW·h)	308 300(改造前)	210 900(改造前)
19 天内节约电量/(kW·h)	64 700(改造后)	72 300(改造后)
均节约电量/(kW·h)	3 405(改造后)	3 805(改造后)
K3201B、K3601B 年运行天数/d	350	350
年平均结算电价/(元/kW·h)	0.6	0.6
年平均节约电量/(万 kW·h)	119.2	133.2
年平均节约电费/万元	71.5	79.9
节电率/%	17.3	25.5

准煤,年减排二氧化碳 2 198.9 t,

余隙无级调节技术节能改造,可实现压缩机的平稳启动、加减负荷、切机和停机,能长周期稳定运行,且在余隙调节负荷范围内可关闭旁路调节控制阀、节约循环冷却水,但是因缺乏计量仪表无法对节约的循环冷却水进行标定,总体来讲,节能降碳项目达到了技术改造的预期目标。

3 余隙节能技术评价

循环氢压缩机 K3201B 和 K3601B 自 2023-10-20 投用余隙无级调节气量节能系统已近 1 a,基于前期考察调研的事实和近 1 a 的实际运行效果验证,该节能技术产品优势显著,具体归纳评价如下^[16-19]。

(1)产品结构简单,安装施工简单,安装时间

很短,每套系统只需7 d。

(2)开机投用简单,DCS 远程一键赋值,系统自动跟踪,可双向稳定无级调节。

(3)产品已达到本质安全,安全可靠,对运行中对压缩机本体无危害性。

(4)可根据现场实际情况采取良好的调节范围优化设计,既能保证相邻压缩机的顺利检维修,还能确保工艺上的需气量。

(5)控制精度高,控制稳定,压缩机输出气量稳定,可确保最大化节能要求。

(6)节能效率高,优于顶开进气阀技术。

(7)系统自身能耗很低,利于节能收益,优于较高自身能耗的顶开进气阀技术。

(10)运行近1 a以来无任何故障发生,极大提高了设备的利用率和节能降碳效益,优于顶开进气阀技术。

(11)因补助余隙腔的储能作用,该技术还能降低压缩机的原有振动和运行噪音。

4 结束语

余隙无级调节气量节能技术在循环氢往复活塞压缩机 K3201B 和 K3601B 上的应用很成功,该产品技术成熟度高、运行稳定可靠、节能降碳效果显著,符合国家当前的节能降碳要求,有利于推进碳达峰碳中和全面推进美丽中国建设,是践行国务院《2024—2025 年节能降碳行动方案》的友好型节能技术。

参考文献

- [1] 中华人民共和国国务院.“十四五”节能减排综合工作方案[R].2021-12-28.
- [2] 郁永章,石华鑫,林梅,等.活塞式压缩机[M].北京:机械工业出版社,1982:261-275.
- [3] 徐文广,蒙毅,李书璞,等.连续重整装置氢气增压机余隙无级调节气量节能技术应用[J].石油化工设备,2018,47(6):69-73.
- [4] 李嘉骊,王旭忠,顾兴坤.余隙无级调节气量节能技术在重整装置循环氢压缩机上的应用[J].现代化工,2019,39(3):206-209.
- [5] 游碧龙.余隙自动无级调节技术在活塞压缩机上的应用[J].压缩机技术,2012(3):30-34.
- [6] 鞠建民,刘军峰.余隙调节系统在往复压缩机上的应用[J].压缩机技术,2015(6):49-50,53.
- [7] 梁成虎,胡进旭,要晓玮,等.余隙调节系统在柴油加氢装置的应用[J].石化技术,2017,24(10):36.
- [8] 陈青松,杨杨,祝进.往复压缩机两种气量调节方式的比较[J].压缩机技术,2020(6):36-41,17.
- [9] 东明中油燃料石化有限公司资产设备处.炼化公司第六联合车间汽油加氢 K3201B 和 K3601B 循环氢压缩机余隙无级调节气量节能系统使用效果报告[R].2024-01-19.
- [10] 顾兴坤,温红林,夏存敬.余隙无级调节气量节能技术在循环氢压缩机上的应用[J].石化技术,2018,25(11):104-106,100.
- [11] 温红林,赵赞立,夏存敬,等.余隙无级调节气量节能技术在新氢压缩机上的应用[J].山东化工,2018,47(23):126-129.
- [12] 李书璞,顾兴坤,岳建华,等.往复式压缩机余隙调节技术应用[J].石油化工设备,2016,45(5):60-65.
- [13] 顾兴坤,刘燕,顾晓伟.往复式压缩机余隙无级调节气量节能技术的研发与应用[J].中国设备工程,2019(5):148-150.
- [14] 国家发展改革委等部门.炼油行业节能降碳专项行动计划[R].2024-05-27.
- [15] 中华人民共和国国务院.2024—2025 年节能降碳行动方案[R].2024-05-23.
- [16] 顾兴坤,曲延鹏,刘燕.往复式压缩机余隙无级调节气量节能技术的应用进展[J].压缩机技术,2022(1):54-59.
- [17] 徐文广,顾兴坤,王宗明.往复活塞压缩机压开进气阀调节与余隙调节气量技术对比(一)[J].石油化工设备,2021,50(6):53-58.
- [18] 李书璞,顾兴坤,刘燕.往复活塞压缩机压开进气阀调节与余隙无级调节气量技术对比(二)[J].石油化工设备,2022,51(1):60-67.
- [19] 顾兴坤,谢朴贵,曲延鹏.往复活塞压缩机压开进气阀调节与余隙调节气量技术对比(三)[J].石油化工设备,2022,51(2):69-74.

(潘编)