

化工厂公用工程压缩空气系统优化技术改造

许 伟 (巴斯夫化工有限公司, 上海 201507)

摘 要: 化工厂公用工程生产的单位压缩空气耗电量一直较高, 系统可靠性欠佳, 主要原因是关键设备和工艺设计不节能且没有集中联控管理: 微热再生干燥器能耗较高且无前置冷冻干燥处理, 采用时间切换控制而非较先进的露点控制, 三个供气站没有中央联控系统。因此展开了相应的系统优化的技术改造: 改造为鼓风干燥器和露点控制, 设计增加冷冻干燥机, 设计中央联控系统。最终取得较好节能效果, 并显著地提高了系统的可靠性。本文对该技术改造关键点和部分相关节能原理以及最终效果进行了阐述。

关键词: 微热再生干燥器; 鼓风再生干燥器; 冷冻干燥机; 露点控制; 中央联控系统

Abstract: The electricity consumption per unit compressed air produced by the utility of the chemical site was always high, and the system reliability needs to be improved, the main causes were that the key equipment and process design are not energy saving, and there was no centralized control: The energy consumption of heated regenerative dryer was high and no pre-cooling drying treatment. The heated regenerative dryers also used time switching control, not advanced dew point control. The three compressed air supply stations did not have centralized control system. Therefore, the related technical modification project for system optimization was conducted: modified to the blower type dryer and dew point control, added the freezing dryer, designed the centralized control system. The project finally achieved good effects of energy savings and improved the system reliability significantly. This paper elaborates the key points of the technical modification and related some energy saving principles as well as final energy saving performance.

Key words: Heated regenerative dryer, blower heated dryer, freezing dryer, dew point control, centralized control system

1 项目背景和范围

1.1 供气站主要设备概况

化工厂公用工程装置有三个供气站 (A, B, C), 改造前设置八台自有产权的螺杆式空压机及七台微热再生干燥器等设备 (见图 1 和表 1)。

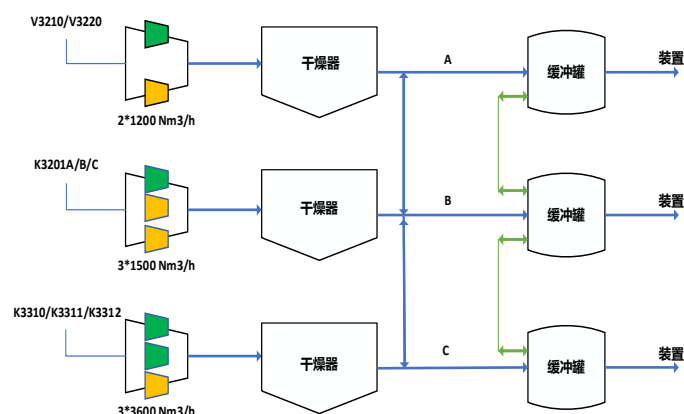


图 1 空压机系统图

表 1 空压机和干燥器数据表

供气站	空压机台数	位号	单台额定流量 Nm ³ /h	单台额定功率 kW	变频器台数	微热再生 吸附式干燥器台数
A 空压站	2	V3210/3220	1000	132	2	2
B 空压站	3	K320A/B/C	1500	250	1	3
C 空压站	3	K3312/ K3310/11	3600	500	1	2
总计	8				4	7

1.2 改造原因

供气站提供压缩空气的压力露点 $\leq 40^{\circ}\text{C}$ (压缩空气纯度等级为 2 级)^[1], 原设计选用微热再生吸附式干燥器, 无冷冻预冷干燥装置, 可以满足标准选型要求^[3], 但是设计不节能, 微热干燥器自身能耗较高 (表 2)^[1], 且没有前置预冷处理, 几个供气站没有中央联控系统。而联控系统能优化系统压力带和启停顺序, 智能控制, 还能实现热工控制和保护, 提高压缩空气站控制和管理水平, 保证空压机安全和经济运行^[2]。

表 2 吸附式干燥器耗气量^[1]

干燥器类型	耗气量
无热再生吸附式干燥器	$\leq 25\%$
微热再生吸附式干燥器	$\leq 16\%$
鼓风加热再生吸附式干燥器 (有气耗型)	$\leq 4\%$
压缩热再生吸附式干燥器 (有气耗型)	$\leq 5\%$

表 3 主要改造范围

供气站	空压机	改造范围	微热干燥器	主要改造范围			
				增加前置预冷	改为鼓风式	改为露点控制	改为联控系统
A 空压站	2 台	升级为中央联控系统	2 台	√		√	√
B 空压站	3 台		3 台				√
C 空压站	3 台		2 台	√	√	√	√

因此立项为六西格玛项目, 展开技术改造, 以实现

节能降耗，提高系统的可靠性。

1.3 项目范围

主要改造范围见表 3。

2 项目主要技术改造

2.1 C 空压站设计前置冷冻式冰水干燥机

2.1.1 干燥器前置预冷干燥设计的原因

吸附式干燥器内干燥的氧化铝在吸附时会产生吸附热能，升温约 10~15℃。温升会对干燥器氧化铝效率和能耗产生重要影响，较理想吸附温度为 20~40℃，高于 50℃后，吸附剂逐渐失去吸附能力，因此干燥器进口最佳设计温度应该≤ 35℃。

压缩机出口空气温度在夏季约为 40℃或更高，因此要设计前置预冷，冷冻水将空压机出口压缩空气降低一定温度，脱离部分饱和和冷凝水后进入吸附式干燥器，以降低其工作负荷，延长吸附式干燥器单塔运行时间，降低能耗。

2.1.2 前置冷冻式冰水干燥机工作原理

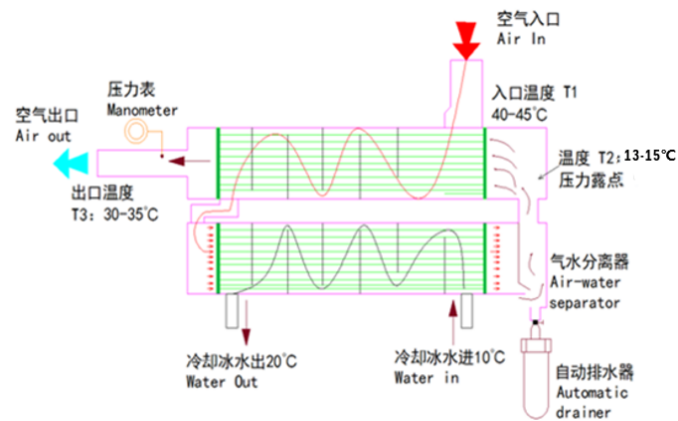


图 2 前置冷冻冰水干燥机工作原理

在 C 空压站增加冷冻冰水干燥机，压缩空气预冷后再进入吸附式干燥器，保证吸附效率和经济型，扩大干燥器的处理能力。以夏天运行参数（表 4）为例说明工作原理。

表 4 C 空压站冷冻冰水干燥机夏季运行参数

设备运行主要参数	数值	单位
进气流量	7200	Nm ³ /h
进气温度	40	℃
出气温度	30	℃
进气压力	0.7	MPa
冰水进水温度	10	℃
冰水出水温度	20	℃
冷冻干燥机内压缩空气露点	13~15	℃

冰水干燥机工作步骤如下，见图 2。

①压缩机出口潮湿高温的压缩空气经入口气气换热器与气水换热器的冷空气进行热交换，使其进入气水换热器的温度降低；

②降温后的压缩空气流入气水换热器与冷冻水热交换，压缩空气的热量被冷冻水带走，压缩空气温度急

速下降，潮湿空气中的水分因为达到饱和温度迅速冷凝成水滴，冷凝水从自动排水阀处排出。经干燥后的空气压力露点可达 13~15℃；

③降温后的冷空气流经气气换热器与入口的高温空气热交换，经热交换的冷空气因吸收了入口空气的热量提升了温度，确保出口空气管路不结露，经由出口进入用气管道。由于充分利用了出口空气的冷源，降低了换热系统的负荷；

④经过前置冷冻冰水干燥机预冷，压缩空气进入吸附式干燥器时的温度从进口 40℃（压力露点为 51.19g/m³）下降到 13~15℃，压缩空气含水量下降到 11.35~12.83g/m³（压力露点：13~15℃）。压缩空气含水量减少量为 38.36 g/m³（15℃露点），约 75%。达到节能目的，同时也确保压缩空气品质。

2.2 A 空压站增加前置冷冻水冷却器干燥处理

A 空压站干燥器前增加冷冻水冷却器干燥处理，利用来自供气站内制冷机的富余冷冻水（7~10℃）换热，将压缩机出口空气温度降低，脱离部分饱和和冷凝水后进入吸附式干燥器，保证吸附效率和经济型，节能降耗。

2.3 C 空压站微热再生干燥器改造为鼓风式

2.3.1 鼓风再生干燥器优点

空压机出口的成品气体进入微热再生干燥器后，有一部分需要用来加热再生和冷吹再生塔，一般需要耗费相当于干燥器入口气量约 10~13% 的成品压缩空气，造成能源浪费。而鼓风吸热再生干燥器再生时使用 0.05~0.07MPa 的鼓风机出口空气，整个加热流程不消耗 0.7MPa 左右的成品压缩空气。

2.3.2 鼓风再生干燥器加热流程

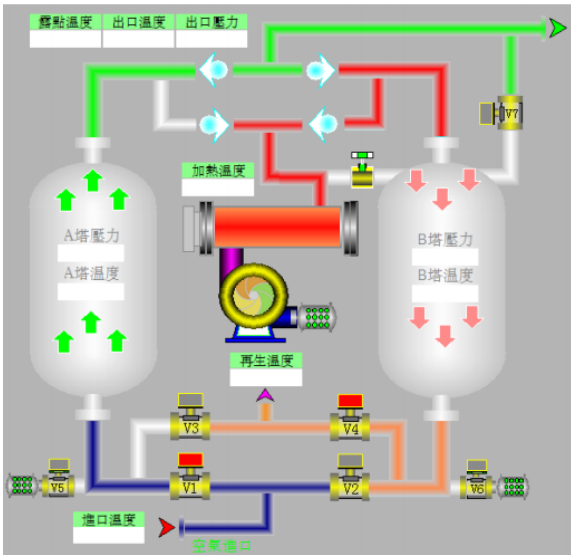


图 3 鼓风再生干燥器加热流程再生流程

表 5 鼓风再生干燥器流程阀门

位号	阀门	位号	阀门
V1	A 塔进口蝶阀	V2	B 塔进口蝶阀
V3	A 塔再生排气阀	V4	B 塔再生排气阀
V5	A 塔泄压阀	V6	B 塔泄压阀

如图3所示并参加表5, A塔为吸附状态, B塔为再生状态, 此时V1阀打开, V4, V5阀关闭; V2, V4, V6阀暂时关闭, 然后V6阀打开泄压; 完成泄压后, V4阀打开, V6阀关闭; 然后开启鼓风机再开启和加热器。

再生时, 设备周围的大气通过鼓风机被吸入, 气体被加热器加热提温, 被加热的气体从上而下对B塔进行热再生, 塔中的水分被蒸发带出系统外, 过程不需要消耗成品干燥压缩空气。只是在冷吹时后半段时, 利用成品干燥压缩空气对再生塔进行冷吹, 消耗约2%左右的成品压缩空气。

2.4 中央联控系统设计

2.4.1 集中顺序控制设计

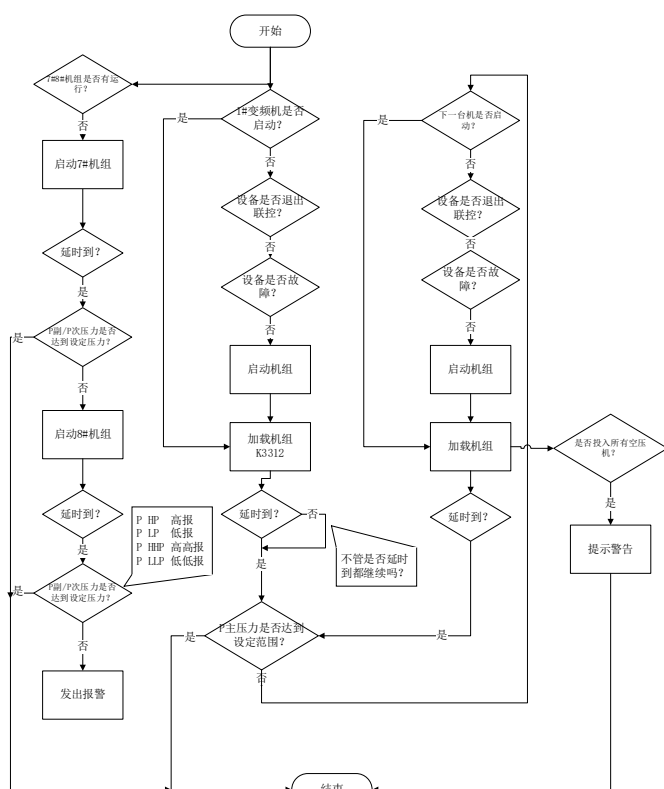


图4 控制逻辑图

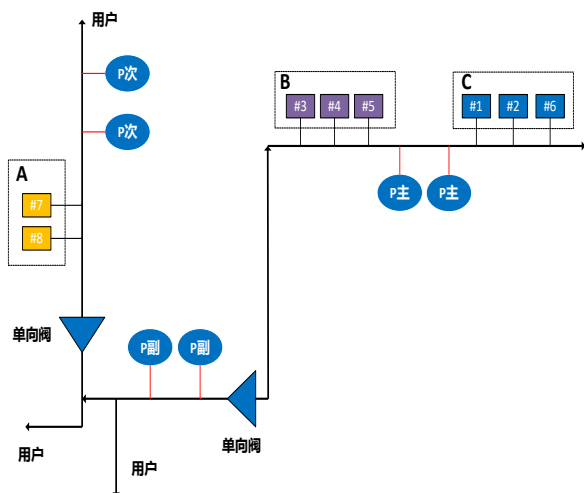


图5 中央联控系统示意图

设计顺序控制逻辑（图4），运行前可以设定主机

和备机, 机组的顺序设置为 NO.1 (C 空压站 K3312) → NO.2 (C 空压站 K3310) → NO.3 (B 空压站 K3201A) → NO.4 (B 空压站 K3201B) → NO.5 (B 空压站 K3201C) → NO.6 (C 空压站 K3311) → NO.7 (A 空压站) → NO.8 (A 空压站), NO.1 为主机。NO7 和 NO8 在 A 空压站供气站考虑到中间单向阀（图5）失效风险, 故 A 空压站空压机必须启动一台。

启动顺序: 当目标压力低于系统压力下限设定值时, 如果主机未运行, 经过启动延时时间后, 则系统强制启动主机, 经过启动延时时间后; 如果目标压力仍低于系统压力下限值, 并且主机已运行, 并且备机未运行, 则系统强制启动备机 NO.2; 并依次顺序逐渐启动下一台备机 NO.3, 直到系统压力不低于目标压力 (压力低值)。其中当任意空压机出现故障, 控制逻辑自动跳过此机器进入下一台机组。

反之亦然设计停止顺序, 这样可以依据系统生产情况自动调剂投入运行设备的数量, 避免不必要的机组投入运行, 同时减少卸载的能耗。

系统设计中考虑了节能控制指令: 当 K3312 变频机负载率低于一定值时, 通过联控系统系统 PLC 发出指令让顺序控制中在运行的序号最大的一台空压机卸载, 卸载满 15min 后, 机器自动停机, 智能管理。

2.4.2 采用集中压力带控制

表6 公用工程装置空压机表

空压供气站	运行台数 (通常)	总台数	变频	位号
A 空压站	1	2	2	V3210 (变频), V3220 (变频)
B 空压站	1	3	1	K3201A (变频), K3201B, K3201C
C 空压站	2	3	1	K3312 (变频), K3310/K3311

公用工程装置多台空压机 (表6), 为了避免机组在系统压力下降时同时触发多台机组一起启动, 在没有设计 PLC 联控系统之前, 通常需要通过设置不同的加载压力和卸载压力 (如图6) 单台机组的压力带宽为 0.08MPa, 但在 4 台机组的梯度压力带下, 系统压力带达到了 0.14MPa, 而且该带宽会随着同一系统中空压机的数量增加而增加。通常每增加 0.1MPa 的供气压力, 将增加系统能耗 7~8%。

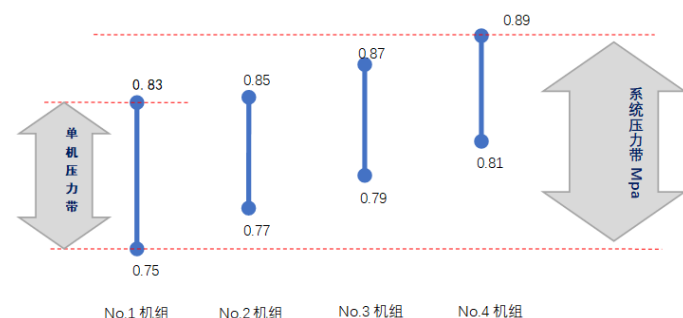


图6 压力带示意图

采用系统联控系统, 在实现稳定供气的同时, 带来能源的节约^[5]; 其控制原理为在空中系统内设置唯一

的一个压力带,当达到压力设定值时,逐台对备机加载/卸载(启动/停止)指令。设计采用节能的变频螺杆空压机调速,基本上保证空压机的比功率变化不大,从而维持高效运行。另外,其调速响应比较快,通过智能控制能使得管网压力波动幅度很小,通常 0.01MPa~0.03MPa,这样能够降低管网平均压力,使系统高效运行,一般能节约 3%~5% 系统能耗^[2]。

中央联控系统状态下,A空压站允许机组数量 ≤ 1 台(单向阀),正常情况下8台机组都由P主(主压力传感器),见图5,来实现中央联控系统控制。

2.4.3 中央联控系统设计的主要优点

①单点压力控制:通过母管压力传感器监测压力,目标压力是通过系统中的单点压力进行设置,从而使系统压力能很好的维持在设定的目标压力范围内,并以变频螺杆空压机调速,使系统高效运行,节能降耗;②控制性能可靠:通过使用顺序控制逻辑,防止多台机组同时启动、同时加载的来避免引起电源冲击波动,保证系统的可靠性;③控制方式灵活:可依据设备数量,设置多个压缩机的不同运行顺序,从而实现主备机功能。

3 节能收益与展望

改造前的压缩空气能耗 0.470t ce/万 Nm³,改造后,压缩空气能耗下降至 0.382t ce/万 Nm³,以节能量计算,年节约 RMB100 万元,仅以节能量计算的投资回收期在 3.23 年,取得较好的节能效果。

(上接第 122 页)程中,要避免与任何尖锐物品接触,以免造成破损;

②按手套国家标准要求,距离袖边位置 $> 40\text{mm}$ 处存在渗漏的手套才为不合格品。主要是由于生产过程的工艺控制,以及检测操作要求,使得 $< 40\text{mm}$ 处的渗漏很难检出。因此,检测过程中不必过度关注 $< 40\text{mm}$ 处的渗漏情况,否则很容易造成从距袖边距离较近处引起破损;

③标准对于如何确认渗漏有详细的要求,包括手套充水后没有立即渗漏,需要再观察 2~4min,以及用溶性染料将水进行染色,均有明确规定,目的是为了避过度挤压造成手套的破损。

因此,在试验过程中,出现的多检渗漏现象,一方面不排除样品本身质量问题的原因;另一方面,也与各实验室在检测过程中的操作的规范性有关,实验室应尽量避免检测过程中的过度挤压。

6.2 其他方面的影响因素

6.2.1 非人为因素

①样品调节:试验前,将样品放置在 $25 \pm 5^\circ\text{C}$ 、 $50 \pm 20\%$ RH 下调节 16h 以上,在 10 个工作日内完成所有试验。此次能力验证所有实验室样品调节均符合要求;

②水温:确保水温在 $10\sim 36^\circ\text{C}$,排除地域和季节变化时水温对检测结果的影响。此次能力验证所有实验室水温均符合要求;

压缩空气系统最低负荷设计应该在总需求负荷基础上再有 20% 的预留^[4]。化工厂的一些装置在改扩建,因此工厂总的用气负荷也在不断地增加,所以下一步可以考虑增加离心式压缩机。相比螺杆压缩机,离心压缩机的单位流量更大,检修频率更低,可靠性也更高,可以连续没有中断的最少运行 3 年时间^[6],而且运行效率也更高,更节能。在此基础上,对公用工程压缩空气系统再做总体改进,可以进一步优化改造化工厂公用工程压缩空气系统,取得更多效益,创造更多的社会价值。

参考文献:

- [1] JBT105320-2017. 一般吸附式压缩空气干燥器(机械行业标准)[S]. 中华人民共和国工业和信息化部,2018.
- [2] GBJ 50029-2014. 压缩空气站设计规范(中国机械工业联合会)[S]. 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,2014.
- [3] ISO 8573-1. 压缩空气污染物和纯度等级[Z].2010.
- [4] PIP PCCIA001, Instrment Air System Design Criteria,(Process Industry Practices, The University of Texas at Austin, USA),2011.
- [5] 蔡茂林等. 压缩空气系统节能技术实用手册[M]. 北京:机械工业出版社,2019.
- [6] API 672. 石油化工和气体工业用组装型整体齿轮增速离心式空气压缩机[S]. 美国:美国石油协会标准,2019.

③水量:标准规定 $1000 \pm 50\text{cm}^3$ 水量,过少可能引起渗漏检出现象不明显,容易漏检;过多有可能引起手套在试验过程中造成破裂现象。此次能力验证实验室水量符合要求;

④试验:仪器或装置是否处于正常状态,为便于观察,可用溶性染料将水进行染色,确保手套的各个部位(距袖边 $> 40\text{mm}$ 部位)存在的渗漏能够准确检出。

6.2.2 人为因素

①样品的处理方式:是否轻展手套产品并确保样品在任何方向上没有受到过度伸张。并确保整个试验过程中,试验人员穿戴手套或指套进行操作。从上报的调查表来看,符合要求;

②试验中,手套的放置和取下,应注意操作规范,尽量避免由于操作原因造成手套破裂。特别是距离袖边较近部位的撕裂或破损。

参考文献:

- [1] CNAS-GL003:2018. 能力验证样品均匀性和稳定性评价指南[S]. 北京:中国合格评定国家认可委员会,2018.
- [2] CNAS-GL002:2018. 能力验证结果的统计处理和评价指南[S]. 北京:中国合格评定国家认可委员会,2018.
- [3] GB 7543-2006. 一次性使用灭菌橡胶外科手套[S]. 北京:国家质量监督检验检疫总局,2006.
- [4] 于振凡. 抽样检验[M]. 北京:中国计划出版社,2004.