

基于加压过滤机压缩空气系统节能降耗的研究与应用

李国峰

(国能神东煤炭洗选中心,陕西 神木 719315)

摘要:加压过滤机是洗选中心选煤厂煤泥水处理的核心脱水设备,是选煤厂主要耗能设备之一。压缩空气系统作为加压过滤机运行的动力源,耗电量约占选煤厂总耗电量的15%~22%。洗选中心从提升空气压缩机效率、提升加压过滤机压缩空气利用效率、空气压缩机余热回收3方面进行重点攻关。加压过滤机空气压缩系统吨煤电耗由2020年的17.3 kWh降至2021年的13.8 kWh,余热改造项目实施后每年可节约2 738.7 t标准煤,为实现选煤厂绿色低碳转型,实现2030年碳达峰和2060年碳中和贡献力量。

关键词:压缩空气系统;双极压缩;变频;智能控制;余热回收

中图分类号:TD94

文献标志码:A

文章编号:1006-6772(2023)S1-0079-05

Research and application on energy saving and consumption reduction of compressed air system based on pressurized filter

LI Guofeng

(CHN Energy Shendong Coal Preparation Center, Shenmu 719315, China)

Abstract:The pressurized filter is the core dewatering equipment for slime water treatment in the coal preparation plant, and is one of the main energy consuming equipment in the coal preparation plant. The compressed air system, as the power source for the operation of the pressurized filter, consumes about 15%~22% of the total power consumption of the coal preparation plant. The washing center focuses on three aspects: improving the efficiency of the air compressor, improving the compressed air utilization efficiency of the pressurized filter, and recovering the waste heat of the air compressor. The power consumption per ton of coal in the air compression system of the pressurized filter is reduced from 17.3 kWh in 2020 to 13.8 kWh in 2021. 2 738.7 standard coal can be saved every year after the implementation of the waste heat transformation project, contributing to the realization of green and low-carbon transformation of the coal preparation plant, carbon peak in 2030 and carbon neutralization in 2060.

Key words:compressed air system;bipolar compression;frequency conversion;intelligent control;waste heat recovery

0 引言

煤炭作为我国兜底保障的能源,在推进碳达峰碳中和战略进程中,既要坚定不移提供安全稳定的能源保障,又要勇于自我革命,为能源结构调整转型、支撑新能源和可再生能源发展,提供支撑和发展空间。站在我国能源转型发展战略的新起点上,煤炭行业扎实推动煤炭安全绿色智能化生产和清洁高效低碳化利用,促进碳达峰碳中和战略与煤炭行业转型升级发展有机融合。能耗双控的本质是坚持节约资源和保护环境的基本国策,核心是提高能源利用效率。能耗双控是企业助力实现双碳目标的重要

抓手。洗选中心充分认识到能耗双控的严峻性、紧迫性;重点从优化生产系统启停车逻辑、减少设备空转造成的无效能耗,优化生产工艺、对系统的瓶颈设备进行改造,加快高耗能机电设备替换进度,加大节能高效设备的引进等方面持续完善各类能耗管控机制^[1]。

洗选中心下辖11座选煤厂73个生产作业单元,总装机功率269 314 kW,约占神东公司总能耗的18%;其中加压过滤机压缩气体系统属于重点耗能设备,装机功率40 391 kW,占15%。因此对于神东洗选中心来说,加压过滤机压缩空气系统节能降耗是实现能源双控的重要措施之一,已成为“十四

收稿日期:2022-12-10;责任编辑:常明然 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.22130017

作者简介:李国峰(1989—),男,山西忻州人,工程师。E-mail:331408756@qq.com

引用格式:李国峰.基于加压过滤机压缩空气系统节能降耗的研究与应用[J].洁净煤技术,2023,29(S1):79-83.

LI Guofeng. Research and application on energy saving and consumption reduction of compressed air system based on pressurized filter[J]. Clean Coal Technology, 2023, 29(S1): 79-83.

五”期间的重要课题。

1 空气压缩机效率提升

2019 年 12 月 31 日国家能源基础与管理标准化技术委员会对 GB—19153《容积式空气压缩机能效限定值》进行了修订。主要内容为:对空气压缩机不同能效等级对应的效率进行升级修订,明确对空气压缩机市场准入的能效限定值^[2]。而判断空气压缩机效率的依据为机组比功率,机组比功率定义为单位时间内压缩一个立方的空气所要消耗的能耗,一般来说是用负载功率除以机组排气量,相同压力下比功率越小的机器越省电。对于洗选中心来

表 1 空气压缩机驱动电机效率提升

电机系列	电机型号	电机功率/kW	电机效率/%
改造前电动机	YXLA315XL-4	250	95.2
YE3 系列高效电动机	YE3-315L-4	250	96.0
YE4 系列高效电动机	YE4-315L-4	250	96.7

1.1.2 双极压缩空气压缩机应用

空气压缩机迭代升级,由单级压缩升级为双级压缩(图 1)。双级压缩空气压缩机综合压比低,机组比功率低,可降低电耗。双级压缩主机根据等温压缩最节能的理论,通过两段压缩,在级间增加油雾喷射冷却,以大转子低转速的螺杆转子达到节能的效果,具备综合压比低,比功率低;接近等温压缩;大转子低转速等特点。



图 1 DHV110Z 系列双极空气压缩机

GB—19153《容积式空气压缩机能效限定值》规定,功率 110 kW 输出压力 8×10^5 Pa 的一般变转速回转空气压缩机一级能效比功率限定值为 6.4,从中国能效标识网得知,DHV110Z 系列双极空气压缩机的机组比功率为 $6.13 \text{ kW}/(\text{m}^3 \cdot \text{min})$,满足一级能效要求。从数据来看,双极压缩机效率高,达到了达标值的最高能效值,使用双极能效的空气压缩机替换洗选中心现有的单极压缩空气压缩机可降低 15% 的耗电量^[4]。

1.1.3 变频空气压缩机应用

目前洗选中心空气压缩机的启动方式为星三角启动空气压缩机为例,电机启动到 Δ 状态后,延时一

说,影响空气压缩机实际能耗的因素有空气压缩机机组比功率、控制方式和维护保养等。

1.1 空气压缩机设备部件升级

1.1.1 空气压缩机电动机效率提升

空气压缩机的动力源为电动机,驱动电动机效率直接影响空气压缩机的能耗^[3],将空气压缩机驱动使用的普通电动机替换为高效电动机。功率为 250 kW 空气压缩机驱动电动机为例,见表 1,替换为 YE3 系列高效电动机时效率可提升 0.8%,替换为 YE4 系列高效电动机时效率可提升 1.5%,从电机效率来看,更换高效电动机对空气压缩机效率的提升明显。

段时间后,电磁阀得电,空气压缩机开始加荷,气罐压力开始升高。当气压升高超过设定高限压力时(卸载压力值),电磁阀失电,空气压缩机空载运行。如果在规定的时间内(空载时间内),气压又降至设定的低限压力(加载压力值),电磁阀得电,压缩机正常压缩空气,提高气罐压力,如此往复循环。从运行情况可得,空气压缩机在加载和卸载状态之间不断切换,而空气压缩机在卸载状态时,并非零消耗,空气压缩机在卸载状态时,电动机空载运行,而空载运行电流是带负荷运行电流的 50%^[5],卸载耗功是无效功耗。

使用恒压变频技术如图 2 所示,通过实时采集排气压力,根据排气压力进行 PID 调节保持供需平衡。储气罐内压力为被控量,压力变送器将储气罐的压力转换成电信号送给变频器 PID 单元,与压力给定值进行比较,PID 功能单元根据比较所得偏差的大小和方向按预定的 PID 运算规律运算后产生控制信号改变变频器输出,从而改变电动机的转速,使储气罐内的实际压力始终维持在给定值上^[6]。整个运转过程排气压力稳定,没有卸载耗功,解决了空气压缩机频繁加卸载造成的能耗浪费,同时提升空气压缩机使用寿命。

如某选煤厂常用的 250 kW 空气压缩机,电源电压 660 V,实测空载电流为 100 A 左右,正常加载时电流为 255 A 左右,加载率按照 80% 计算,每日运行 16 h。每年空气压缩机卸载状态时的能耗 $W_1 = 1.732 \times 660 \times (1 - 0.8) \times 16 \times 330 = 120.7$ 万 kWh;每年

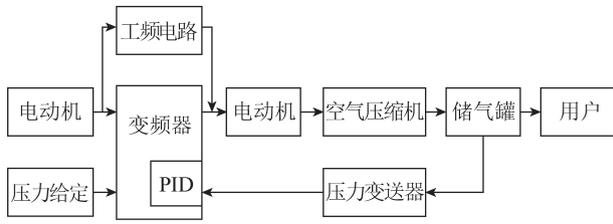


图2 恒压变频原理示意

空气压缩机加载时能耗 $W_2 = 1.732 \times 660 \times 0.8 \times 16 \times 330 = 482.8$ 万 kWh。即空载运行时的无效能耗占总能耗的 20%，而使用变频恒压调节后，节约 20% 的无效能耗，节能量显著。

1.2 空气压缩机控制系统优化

1.2.1 气压缩机漏风智能监测技术

由于选煤厂生产工艺复杂，设备部件多，送风管路长，极易出现跑风漏风等设备故障，而发生故障后人员不易发现，无法及时排除故障，造成压缩系统无法保压，导致能耗浪费。采取智能化手段实时监测加压过滤机压缩空气系统内的故障点，并及时提示报警现场人员，有效提高用风效率。具体做法为：按能量守恒定律，加压过滤机未启动时，空气压缩机出口压力应等于加压过滤机的进气口压力。加压过滤机停机时开启空气压缩机，空气压缩机的进气口与加压过滤机进气口的压力差判断压力管道、阀门或电磁阀处是否存在跑风漏气现象，如压力差超过 0.5 MPa，应立即检查并采取措施，直至二者压力差小于 0.5 MPa 为止。

加压过滤机运行时，按加压过滤机设计用风量（可根据实际值进行调整）与实际用风量进行比对，根据差值判断加压过滤机的用风量是否存在异常。在每台加压过滤机的进风端加装流量表，1 号加压过滤机耗风量为 Q_1 ，2 号加压过滤机耗风量为 Q_2 ，则总用风量：

$$Q = \sum_{i=1}^n Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n \quad (1)$$

考虑损耗系数，空气压缩机出风量 $Q(x) = (1.2-1.3)Q$ ，如加空气压缩机的排风量大于 $Q(x)$ ，设报警提示，及时消除故障，提升用风效率。

1.2.2 空气压缩机加卸载压力阶梯设定

空气压缩机加卸载压力设定不合理，压缩机启停不合理将造成浪费能耗。如多台压风机加卸载压力设定值相同，而 2 台空气压缩机可满足加压过滤机的用风需求时，多台压风机同时启停，造成供大于求、空气压缩机加载率低的问题，造成能耗浪费。因此阶梯设定不同空气压缩机的加卸载压力，不同空气压缩机分批次启停。具体做法为：将不同空气压

缩机的加卸载压力进行阶梯设定。如 2 台空气压缩机的加载压力分别设定为 6×10^5 、 6.3×10^5 Pa，假设 2 台空气压缩机处于卸载状态，当系统压力将至 6.3×10^5 Pa 时，加载压力设定值为 6.3×10^5 Pa 的空气压缩机启动，如系统压力仍在下降，降至 6×10^5 Pa 时，加载压力设定值为 6×10^5 Pa 的空气压缩机启动，从而达到分批次启动的效果。考虑长期运行情况，设定值为 6.3×10^5 Pa 的空气压缩机较 6.0×10^5 Pa 的空气压缩机加载率高，因此应定期对不同空气压缩机的加卸载压力进行互换，达到平衡的目的。

1.3 空气压缩机选型优化

由于部分选煤厂的空气压缩机型号单一，大多数为 250 kW，供风选择单一，用风系统存在大马拉小车现象，导致能耗浪费。因此配备不同功率空气压缩机，增加供风系统中空气压缩机的可选项，可降低能耗。

如加压过滤机设备运行正常的前提下，1 台 120 m^2 的加压过滤机，正常用风量在 $70 \text{ m}^3/\text{min}$ 左右，而 1 台 250 kW 的空气压缩机送风量在 $42.6 \text{ m}^3/\text{min}$ 左右，1 台 160 kW 的空气压缩机送风量在 $30 \text{ m}^3/\text{min}$ 左右。因此 250+160 kW 两台空气压缩机即可满足使用需求，而如果供风端只有 250 kW 的空气压缩机，只能选择 250+250 kW 进行供风，装机功率增加 90 kW，按每日运行 16 h，每年运行 330 d 计算，每年浪费电耗约 28.5 万 kWh。

1.4 空气压缩机维护保养

空气压缩机的维护保养管理影响压缩机的运行工况，维护保养不到位时，机组比功率增加，设备效率降低，无效功耗增加，严格按照维护保养标准对空气压缩机进行保养对空气压缩机节能降耗也非常必要。

如空气压缩机运行 4 000 h 时更换润滑油、油滤和空滤；8 000 h 时及时更换油气分离器滤芯、最小压力阀的密封元件、卸荷阀的密封元件、断油阀的弹簧及密封元件、出气阀的弹簧、单向阀芯及密封元件、流水阀的密封元件、润滑油、油滤、空滤、恒温阀等^[7]，高效的管理机制，定期保养可保证空气压缩机的运行效率和单位能耗。

2 加压过滤机压缩空气效率提升

选煤厂耗风设备主要为加压过滤机，每开启 1 台 120 m^2 的加压过滤机需开启 2~3 台 250 kW 空气压缩机，按照每天运行 16 h，每年运行 330 d 计算，1 台加压过滤机每年耗电量约为 200 万 kWh，耗能量高，因此提升加压加压过滤机用风效率对选煤厂节

能降耗来说显得尤为关键。

采集加压过滤机运行时进风口压力,具体如图 3 所示,压力趋势有一定周期性,其中压力最高点为 P_1 ,压力最低点为 P_2 。分析可知:如要确保加压过滤机正常运行,最低点风压 P_2 应大于加压过滤机反吹风包的压力 P_3 ,而供风端空气压缩机最低输出风压 P_4 应大于 $P_3 + (P_1 - P_2)$,因此影响空气压缩机输出风压的主要因素有 P_1 、 P_2 、 P_3 。空气压缩机输出风压越小,空气压缩机开启数量越少,装机功率越低,能耗越低,下面进行具体分析。

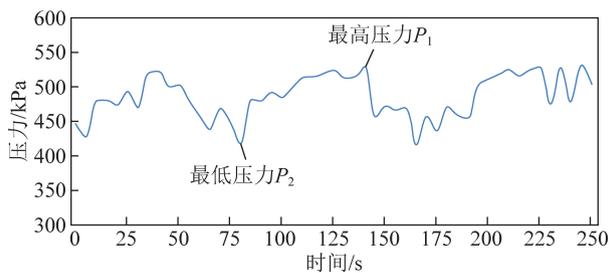


图 3 加压过滤机进风口压力曲线

2.1 $P_1 - P_2$ 提升措施

根据空气压缩机最低输出压力 P_4 计算公式得知, $P_1 - P_2$ 越小, P_4 越低,而影响 $P_1 - P_2$ 的主要因素有加压过滤机成饼效果、密封圈密封性能等运行工况有关。因此采取提升加压过滤机成饼效果、密封圈密封性能可在一定程度上提升用风效率,降低能耗。

2.1.1 提升成饼效果

当入选原煤煤质变差时,高灰细泥物料会在煤泥水系统重复循环。导致药耗量增加,加压过滤机滤饼透气性和成饼效果差,针对这种情况增加掺粗工艺调整加压过滤机入料的粒度组成,合理选择和安装滤布确保滤饼的透气性^[8];根据实际情况调整加压过滤机的主轴转速、矿浆槽内液位、上下滤液阀的开度确保成饼质量;对滤布袋和滤扇的安装方式改造为卡扣式确保滤布袋底部滤扇的密封性,提升滤饼的卸料效率。

2.1.2 提升密封性能

测试得知,卸料闸板打开时风压呈直线下降,因此运行时需保证密封圈完好,破损时及时更换,同时精准设定密封圈压力非常必要,通常加压过滤机密封圈压力设定为 $4 \times 10^5 \sim 4.5 \times 10^5$ Pa 时既能保证密封圈的密封效果,又能保证密封圈的使用寿命。

2.1.3 其它措施

加压过滤机的入料煤质、主轴转速、卸料方式等因素等都会影响 $P_1 - P_2$,加压过滤机的生产方式、生产效率^[9]与加压过滤机的能耗关系密切。因此加

强入料端煤质管控,科学设定主轴转速、卸料时间等参数,可降低能耗。

2.2 提升 P_3 措施

影响 P_3 的因素主要为加压过滤机罐压、反吹压力差设定值,压力过高,耗风量增加,增加空气压缩机能耗,影响滤布的使用寿命;压力过低,煤饼不成形,煤泥处理效果差,漏风严重,同样会增加用风能耗。在保证加压过滤机正常运行的前提下降低适当 P_3 设定值,可降低空气压缩机最低输出风压 P ,但不能过低。通常加压过滤机罐压设定值为 $2 \times 10^5 \sim 3.5 \times 10^5$ Pa,反吹压力差设定值为 $0.3 \times 10^5 \sim 0.8 \times 10^5$ Pa。

2.3 实际输出压力控制措施

在得出空气压缩机最低输出风压 P_4 后,如何使得空气压缩机的实际输出风压稍大于 P_4 ,最大限度减少空气压缩机的开机功率成为关键。在实际应用过程中存在的主要问题为空气压缩机通过手动启停,为满足加压过滤机正常运行,操作人员往往多开启 1~2 台空气压缩机,最终造成能耗浪费。以补连塔选煤厂 2 台 60 m^2 加压过滤机为例,正常时需开启 2 台空气压缩机,而通过手动控制,要开启 3~4 台空气压缩机,导致能耗增加。

解决方案:修改空气压缩机控制程序,实现智能控制,在满足加压过滤机正常运行的前提下开启最少数量的空气压缩机,降低能耗。

同样以补连塔选煤厂 2 台 60 m^2 的加压过滤机为例,智能控制空气压缩机启停的具体做法为:点击压滤机启动集控按钮,自动开启 2 台空气压缩机(运行过程中如发生故障,自动联锁下 1 台运行),压力达到 P_4 (一般为 5×10^5 Pa)时,压滤机启动;压滤机运行过程中如果进风口压力小于 P_2 ,则自动开启 3 台空气压缩机,自动开启的空气压缩机顺序由调度员手动选择(以便所有空气压缩机循环开启)。

3 空气压缩机余热回收

3.1 选煤厂空气压缩机余热回收的必要性

空气压缩机长期连续的运行过程中产生的大量高温热能由空气压缩机润滑油的加入混合成油/气蒸气排出机体,这部分高温油/气流的热量在空气压缩机输入功率中占据很大比例(65%~70%),其温度通常常在 $90 \text{ }^\circ\text{C}$ (冬春季)~ $105 \text{ }^\circ\text{C}$ (夏秋季),这些热能均由于机器运行温度需求,被废弃排至大气。

3.2 空气压缩机余热回收原理

螺杆式空气压缩机主要由进气系统、机头、润滑油系统、后冷却系统组成,余热包含在高温润滑油及

高温压缩空气中。高温润滑油中余热的回收通过对油气分离器的改造,将分离出的高温润滑油引入余热回收机组和换热器,回收其中的的余热。高温压缩空气中余热的回收经油气分离器分离出的高温压缩空气进入后冷却器中,通过改造后冷却器,回收高温压缩空气中的余热^[10]。

3.3 空气压缩机余热回收效果

空气压缩机厂区供热热源采用空气压缩机供热系统代替传统燃煤锅炉供热方式,如作为洗浴用水、取暖热源等。按照将 4 台 250 kW 的低压风机进行余热改造进行效益测算,空气压缩机加载率取 80%,需用系数 0.8,余热回收效率取 70%^[11],每天运行 16 h,年运行 330 d,该空气压缩机每年回收的热能为 $Q=4 \times 250 \times 0.8 \times 0.8 \times 0.7 \times 16 \times 330 = 236.5$ 万 kWh,折合标准煤 290.7 t。

4 结 论

“十四五”是碳达峰的关键期,洗选中心通过将传统单极压缩升级为双极变频压缩空气压缩机,并对其进行高效控制和管理,用风设备加压过滤机的效率提升和精准管控,用风末端余热回收等一系列节能降耗举措,洗选中心加压过滤机空气压缩系统吨煤电耗由 2020 年的 17.3 kWh 降至 2021 年的

13.8 kWh,降幅达 20%;余热回收全面实施后,每年可节约 2 738.7 t 标准煤,说明节能降耗措施可行。

参考文献:

- [1] 李国峰.“十四五”期间洗选中心节能降耗措施与应用[J].洁净煤技术,2021,27(S1):141-144.
- [2] 郑家强,赵跃进,陈向东.空气压缩机经济运行标准的探讨与研究[J].标准科学,2010(8):31-36.
- [3] 郑家强.空气压缩机能效评价体系改进研究[D].南京:东南大学,2002.
- [4] 章根国.压缩机技术[J].机械管理开发,2014(5):48-49.
- [5] 杨茹,张朝江,姜洪松.变频器在空气压缩机自动恒压供气节能改造中的应用[J].电气应用,2008(24):30-33.
- [6] 朱应煌.变频器在空气压缩机恒压控制中的应用[J].自动化仪表,2009(1):66.
- [7] 侯增健.空气压缩机的维护与应用[J].现代制造技术与装备,2016(7):140-141.
- [8] 杨林强.浅谈金庄煤业洗精煤降水增效实践[J].煤,2016(11):46.
- [9] 侯强.神东石圪台选煤厂加压过滤机生产效率提升优化[J].内蒙古煤炭经济,2015(9):222.
- [10] 王永菲.有色矿山喷油螺杆式空气压缩机余热回收的设计应用探讨[J].有色冶金节能,2017(4):31-33.
- [11] 王国涛.螺杆空气压缩机余热回收及节能分析[J].节能,2019(4):60-61.