◆设备、控制与安全生产◆

两级离心泵串联输送系统优化实践

胡文武

（湖北大峪口化工有限责任公司，湖北 钟祥 431910）

［摘 要］湿法磷酸装置磷石膏湿排系统主要由两台离心式渣浆泵串联组成，针对两级离心泵串联加压输送磷石膏浆液在实际运行中存在的二级泵超额定电流和过流部件汽蚀问题进行优化改进。根据现场实际工况，结合离心式渣浆泵的性能曲线，通过改变二级泵叶轮直径，配合一级泵变频调节，满足磷石膏浆液输送系统要求，彻底解决了存在问题。

［关键词］两级离心式渣浆泵；串联；磷石膏输送；超额定电流；叶轮切割

［中图分类号］TH38 ［文献标志码］B ［文章编号］2097-4566（2026）01-0126-03

Optimization practice of two-stage centrifugal pump series transportation system

HU Wenwu

（*Hubei Dayukou Chemical Co., Ltd., Zhongxiang* 431910, *China*）

Abstract: The phosphogypsum conveying system in WPA plant is mainly composed of two centrifugal slurry pumps in series. In view of the problems of the over rated current of the secondary pump and cavitation of the overflow parts in the actual operation of the two-stage centrifugal pumps in series pressurized transportation of phosphogypsum slurry, the system is optimized and improved. According to the actual site conditions, combined with the performance curve of the centrifugal slurry pump, it is proposed to change the impeller diameter of the secondary pump and coordinate with the frequency conversion adjustment of the primary pump. It can meet the requirements of phosphogypsum slurry transportation system and completely solve the existing problems.

Key words: two-stage centrifugal slurry pump; series; phosphogypsum conveying; over rated current; impeller cutting

某公司磷酸生产装置采用的是Jacobs-Dorrco二水法生产工艺，产量为30万t/a，配套2套两级离心泵串联磷石膏输送系统，用于过滤系统分离出来的磷石膏固体颗粒的湿法调浆外排输送工作。在湿法磷酸生产工艺中，磷石膏外排输送量直接影响磷酸装置的产量，因此两级离心泵串联磷石膏输送系统在磷酸生产中起着重要作用。

1 工艺简述

真空转台式过滤机固液分离出来的干基磷石膏通过螺旋卸料机卸料至料斗，同时在料斗中加入定量的回水进行调浆，要求调浆至磷石膏浆w(固) ≤ 35%，最后自动流入石膏浆槽搅拌均匀；再经过2台结构和技术参数相同的离心泵串联（泵标高+108 m）加压输送，通过约6 km的DN450 mm的渣浆衬胶管道输送至渣场的磷石膏渣坝内（标高+185 m）。渣库内的水溢流至回水池，再经过渣场回水泵加压，通过约6 km的DN350 mm的钢衬胶渣浆管道输送回磷酸装置，主要作为磷石膏调浆水、循环水冷却水、洗涤塔洗涤水等，以达到整个装置的水平衡。磷石膏料浆泵技术参数如下：①一级磷石膏料浆泵（简称一级泵），位号P23108A，卧式离心泵，型号LH200-75，叶轮直径750 mm，流量572 m^3/h，扬程H=91.1 m，汽蚀余量NPSHr 3.5 m；电机YPT450-6 355 kW，额定电流667 A，电压380 V，恒转矩100～1 000 r/min，变频电机。②二级磷石膏料浆泵（简称二级泵），位号P23108B，卧式离心泵，型号LH200-75，叶轮直径750 mm，流量572 m^3/h，扬程H=91.1 m，汽蚀余量NPSHr 3.5 m；电机YKK450-6 355 kW，电压6 kV，额定电流43.9 A，工频电机。

收稿日期：2024-06-22； **修回日期**：2025-12-24

作者简介：胡文武（1986— ），男，湖北黄梅人，从事通用机械技术及设备、化工机械设备研究。

2　优化前存在的问题

（1）二级泵汽蚀严重。在实际生产过程中，二级泵经常性出现不正常的噪声和振动；泵解体检修时发现，泵的护套、前护板和后护板都出现多处蜂窝状的汽蚀孔洞，表面也有明显化学腐蚀现象。该泵的过流部件最长使用周期不超过4个月。

（2）二级泵超额定电流。当一级泵的变频调节至70%时，二级泵的运行电流达到46.3 A，已经超过额定电流43.9 A，而此时的磷石膏输送量约为690 m^3/h（见表1）。

表1　泵的运行参数

Table 1　Operating parameters of pump

一级泵变频/%	电流/A		出口压力/kPa	流量/（$m^3 \cdot h^{-1}$）
	一级泵	二级泵		
50	348	36.0	1 469	473
60	387	41.8	1 573	573
70	460	46.3	1 685	691

为了保障二级泵的运行安全，一级泵在实际运行中，变频调控不能超过70%，而这种运行条件下磷石膏输送系统的实际输送量不能满足磷酸装置的工艺生产要求。

3　问题分析

3.1　二级泵汽蚀问题分析

磷石膏输送系统设计是一级泵变频调控，二级泵工频运行。通过调整一级泵变频来调整整个磷石膏输送系统的流量和扬程，这种操作方法存在一定的弊端[1]。

根据相似定律应用到不同转速运行的同一台离心泵上时，流量、扬程、功率与转速之间的比例关系[2]：$q_{V_1}/q_{V_2} = n_1/n_2$，$H_1/H_2 = (n_1/n_2)^2$，$N_1/N_2 = (n_1/n_2)^3$。其中$q_V$、$H$、$N$分别表示流量、扬程、功率，下标1、2相对于转速1、转速2的物理量。

一级泵在进行变频控制时，其实际流量和泵的变频成正比，即一级泵的流量和扬程低于额定流量和扬程；由于二级泵是工频泵，此时仍然按设计流量和扬程运行，导致两级离心泵串联系统中流量和扬程不匹配，二级泵就会经常性出现汽蚀现象[3]。

3.2　二级泵超流问题分析

两级离心泵串联磷石膏输送系统的原设计扬程，是指将磷石膏输送至磷石膏渣库最终的坝高245 m。由于生产现场环境改变，目前磷石膏只需要输送至高度185 m的磷石膏中转站即可。

根据离心泵的性能曲线和生产现场实际情况，磷石膏输送系统的实际扬程降低，致使两级串联泵的实际工况点发生改变；一级泵的变频只有不到70%，而磷石膏输送系统的实际流量远大于设计值，最终二级泵的实际做功增大，即泵轴功率增大，所以二级泵必定会出现超额定电流情况[4]。

4　优化方案及计算

依据该泵的性能曲线和离心泵切割定律可知，流量和扬程是可以再次调整的[5]。以两台串联泵为一个整体，可以通过先对两级离心泵串联系统的实际流量和扬程进行计算确认，再根据计算的实际工况点进行泵轴功率校核，确认泵轴功率不超原设计功率后，再计算二级泵叶轮切割量，以及对应的一级泵的变频调数值，最后通过现场实践优化改造，对本次理论计算的结果进行确认（是否能保障磷石膏输送系统输送量和扬程达到磷酸过滤系统工艺生产要求）。

4.1　实际流量的计算

工艺生产要求输送量按照设计产能36万t/a，年生产300 d，日产能1 200 t（折P_2O_5）；吨产品干矿消耗以3.5 t计，吨干矿石膏值1.45 t，可知日产石膏量为6 090 t；石膏浆综合排放指标为密度1.24 g/mL，w(固）29.5%，可知石膏浆输送量为693.6 m^3/h。

综合实际工艺生产中装置冲洗水、置换水以及工业净化水排放渣场等，石膏料浆泵的实际输送量约为730 m^3/h。

4.2　实际扬程的计算

计算磷石膏输送总扬程$H_{总}$，需要考虑圆管中输送介质的管损$H_{损}$，即沿程损失，其中关键数据沿程损失系数λ需要通过区分流体流动的特性属于层流或是紊流，计算过程如下。

（1）计算介质流速v，$v = q_V/\pi r^2 = 1.28$ m/s。

（2）计算雷诺数，$Re = \rho vd/\mu = 1\,298$。

（3）计算λ，根据莫狄图说明可知，当$Re < 2\,000$，属于层流，“λ–Re”关系与管子的相对粗糙度无关，即粗糙管、光滑管的规律一致[1]，计算得：$\lambda = 64/Re = 0.049$。

（4）计算管损，根据达西–魏斯巴赫公式：

$H_{损} = \lambda \times (l/d) \times (v^2/2g) = 54.6$ m。

（5）计算磷石膏输送系统总扬程：

$H_{总} = H_{差} + H_{损} = [(185-108) + 54.6]$m $= 131.6$ m。

综上计算以及同性能参数的两级离心泵串联，流量无变化，扬程叠加的理论，即：$q_V = q_{V_1} = q_{V_2}$，$H = H_1 + H_2$的要求可知，单台磷石膏料浆泵的实际工况点为流量730 m^3/h，扬程68.5 m。

通过查询泵的特性曲线可知，磷石膏料浆泵能

保障在该工况点正常运行，该工况点运行时泵的效率η为58%。

4.3 *泵轴功率校核*

（1）泵设计轴功率计算。根据经验公式$P_{电}=1.2P_{轴}$计算得：$P_{轴}=(355\div1.2)\ \text{kW}=295\ \text{kW}$。

（2）该工况点泵实际泵轴功率计算。根据经验公式$P_{实}=\rho g q_V H/\eta$[1]计算得：$P_{实}=291\ \text{kW}$。

$P_{实}<P_{轴}$，即实际工况点的轴功率没有超过泵的原设计轴功率，所以不会出现泵超电流问题。

4.4 *叶轮切割量计算*

（1）首先计算比转数。根据比转速公式$n_s=3.65\cdot n\cdot\sqrt{q_V}\div H^{3/4}$[1]计算得：$n_s=3.65\times992\times\sqrt{0.158}\div91^{3/4}=49$。

通过上述计算可知：$n_s\leqslant60$。

根据经验可知，磷石膏料浆泵叶轮的最大允许切割量为20%，且每切割10%，效率下降1%[5]。

（2）再计算叶轮切割后直径D_1。根据离心泵切割定律公式$H_1/H_2=(D_1/D_2)^2$：

$D_1=\sqrt{(68.5\div91)}\times750\ \text{mm}=637.5\ \text{mm}$。

从理论计算结果可知，在两级离心泵串联系统中，二级泵的叶轮理论设计直径为637.5 mm。考虑到工业输送系统实际运行中可能面临的介质特性波动、设备磨损累积、工况瞬时变化等不确定因素，为确保系统长期稳定运行并预留足够的安全裕度，建议将叶轮直径调整为675 mm。

4.5 *优化方案*

离心泵串联运行时，需采用同种类型且同种规格的设备，因其特性曲线基本一致，可确保串联后的总流量与扬程尽可能贴近理想工况要求[6]。基于此原理，结合实际工艺需求，针对两级离心泵串联输送系统制定以下优化方案：

（1） 二级泵叶轮参数调整，将二级磷石膏料浆泵的叶轮直径由原设计的750 mm更换为675 mm。通过缩小叶轮直径，可优化该泵的流体动力学性能，使其与一级泵的特性曲线进一步匹配，减少串联运行时的能量损耗与工况波动。

（2） 一级泵变频调节优化，对一级磷石膏料浆泵配套的变频器进行调节，将运行频率控制至90%左右的高效区间。通过精准的变频调控，可动态匹配一级泵的输出流量与扬程，确保两级泵在串联系统中形成稳定的压力梯度，避免因转速不匹配导致的系统效率下降。

5 优化改造后效果

通过实施切割二级泵叶轮和一级泵变频配套调节的优化方案，两级离心泵串联磷石膏输送系统的输送能力由原设计的流量572 m^3/h，优化提升至流量730 m^3/h左右，二级泵没有再出现超额定电流的情况，系统的出口压力满足工艺生产要求；而且二级磷石膏料浆泵的汽蚀情况消失，其过流部件的使用周期明显延长。

该优化不但保障了过滤系统的正常稳定运行，而且磷酸装置的稀酸产量稳步增长。该优化改造预计每年可产生直接经济效益达34.99万元，而且该泵的维保工作量明显减少。

6 结论与建议

本文研究并解决了两台离心泵串联磷石膏输送系统的超额定电流和泵汽蚀严重的问题，使其输送能力得到明显提升。同时也论证了叶轮切割是生产现场有效的节能手段，针对生产现场设计，扬程有富余的泵可以通过切割叶轮来降低泵的实际运行功率，从而到达节能的效果。另外，切割定律同样适用于多台离心泵串联系统的计算，但在对多台离心泵串联输送系统进行技术参数核算时，一定要先核算整个系统，再核算单台设备。再者，离心泵串联时必须采用同种类型及同种规格的离心泵进行串联，现场操作时切记要同步调整。

[参考文献]

[1] 李湘洲.离心泵流量-扬程曲线特性研究[J].湖南大学学报(自然科学版),1996(2):78-83.
LI X Z. Study on the *H-Q* Characteristic Curves of Centrifugal Pumps[J]. Journal of Hunan University(Natural Sciences),1996(2):78-83.

[2] 曾国锋,赵汝浦.化工原理[M].4版.北京:化学工业出版社,2022.

[3] 关醒凡.现代泵理论与设计[M].北京:中国宇航出版社,2011.

[4] 张勤,王颖,龙华,等.长输管道开泵方案运行优化与能耗分析研究[J].油气田地面工程,2023,42(3):55-61.
ZHANG Q, WANG Y, LONG H, et al.Operation Optimization and Energy Consumption Analysis of Long-distance Pipelines Pumprting Schemes [J]. Oil-Gas Field Surface Engineering, 2023,42(3):55-61.

[5] 孟繁华,郝连俭,郝旭林.离心泵叶轮外径切割方法的探讨[J].机械管理开发,2002(3):21-22.
MENG F H,HAO L J,HAO X L.Approach to External Diameter Cutting Methods of Centrifugal pImpellers [J]. Mechanical Management and Development,2002(3):21-22.

[6] 崔丹,韩庆祝,李树林.离心泵工作点及管路特性曲线的探讨[J].黑龙江大学自然科学学报,1998(1):92-95,116.
CUI D, HAN Q Z, LI S L.New Research on Pump Duty Point and it's System Curve [J]. Journal of Natural Science of Heilongjiang University,1998(1):92-95,116.