

红土镍矿高压酸浸高温预热器给料泵叶轮破坏案例分析

杨胜平, 潘竞香

(中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038)

[摘要] 本文针对某项目红土镍矿高压酸浸出系统在试车及试生产过程中高温预热器给料泵叶轮损坏的情况进行了过程调研和原因分析, 找出了问题根源所在, 为该问题的解决提供了可行性依据, 并优化和完善现有的操作规程及试车方案, 对工艺设计、设备选型、结构设计、材质选择等环节起到了一定性作用, 为类似项目问题解决提供了指导和借鉴案例。

[关键词] 红土镍矿; 高温预热器; 给料泵; 过流件; 损坏机理; 改进提升

[中图分类号] TF815 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1003-8884(2024)01-0050-06

DOI: 10.19611/j.cnki.cn11-2919/tg.2024.01.008

1 叶轮破坏概述

该系统为某红土镍矿高压酸浸系统, 设计年产30 000 t Ni 金属镍, 共三个系列。工艺流程中, 矿浆进行三级预热后, 用泵送至高压浸出釜处理, 经过三级闪蒸后, 送入下游工序。预热工序中, 每级预热器物料输送采用串级离心泵的形式, 高温预热器给料泵为三台串级, 分两组配置。试车某日发现其中一个系列高温预热器给料泵无流量, 观察一段时间后仍无流量, 经过一系列调整后现场发现一级泵泵壳处泄露严重, 系统停车分析原因。

停车后对现场情况进行收集分析, 发现:

1) 一级泵叶轮中心径向破裂, 断裂面没有发现旧裂纹痕迹, 表面没有重物撞击现象, 没有发现叶轮与前护板摩擦; 机械密封第一摩擦副动环破损; 泵蜗壳内衬耐磨护套出现裂纹。图1为机械密封面破坏状态, 箭头所指部分。

2) 二级、三级泵叶轮中心径向裂纹, 宽度约0.2 mm, 属贯穿式裂纹; 其中二级泵叶轮与前护板摩擦, 三级泵没有发现摩擦现象; 三级泵蜗壳内衬耐磨护套流体出口部位有约0.01 mm 细裂纹, 未贯穿。



图1 机械密封动环、静环均受到不同程度损坏

2 破坏原因分析

针对上述情况, 采用排除法对其进行原因分析:

1) 异物随着流体高速进入泵内造成叶轮冲击破坏。叶轮材质经过成分分析检测, 检测报告中Cr含量高达36%, 耐磨性、耐蚀性好、硬度高但韧性低, 经猛烈冲击后也会出现裂纹, 随着转速提高, 裂纹延长直至破裂完全解体, 一级叶轮碎片与流体在离心力作用下对蜗壳衬套及下游二、三级泵叶轮加重造成破坏。在拆开二、三级泵蜗壳后检查有一级泵叶轮碎片并未发现其他异物, 同时对高温预热器底部排料口四通管底法兰打开也未找到其他异物, 因此由外来异物造成叶轮破坏理由不充分, 故排除此因素。

2) 叶轮和蜗壳衬套铸造质量差。从破坏的叶轮断裂面不难看出, 断面粗糙并有大小不等的气孔存在, 最大气孔直径约10 mm(图2)。考虑到提高叶轮及护套耐磨性, 泵厂家提供的叶轮和衬套中Cr含量在35%以上, 据资料介绍, 该耐磨合金材质韧

[收稿日期] 2023-10-26

[第一作者] 杨胜平(1974—), 男, 贵州福泉人, 高级工程师, 主要从事化工、有色冶金设备技术管理工作。

[引用格式] 杨胜平, 潘竞香. 红土镍矿高压酸浸高温预热器给料泵叶轮破坏案例分析[J]. 有色设备, 2024, 38(1): 50-55.

表 1 高温预热器给料泵主要技术参数

设备名称	高温预热器给料泵			
设备编号	E102-PP-3004A			
设备类型	卧式单级 6 叶片离心泵			
冷态工况				
泵流量	单位/ ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	参数		
		最小	正常	最大
		173	346	415
汽蚀余量(NPSH)	m	11 - 13.7		
		一级	二级	三级
进口压力	kPa(G)	150	1 030	1 910
出口压力	kPa(G)	1 030	1 910	2 790
每级压差	kPa(G)	880	扬程(m)	61.4
热态工况				
泵流量	m^3/h	参数		
		最小	正常	最大
		330	472	570
汽蚀余量(NPSH)	m	11 - 13.7		
		一级	二级	三级
进口压力	kPa(G)	700	1 397	2 090
出口压力	kPa(G)	1 397	2 090	2 790
每级压差	kPa(G)	679		
密封形式	博格曼机械密封, 密封面碳化硅, 双端面密封		传动方式	皮带
泵转向	逆时针		防倒转	逆止器
叶轮直径/mm	560		叶轮材质	耐磨合金
轴套材质	双相钢		叶轮形式	闭式
衬套材质	耐磨合金			
泵转速/($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	1 102		速比	1.31:1
电机功率/kW	225			

性差,容易破碎和断裂,即在泵转速提高时,叶轮与轴是靠螺纹连接并随着转速提高会越来越紧,裂纹可以从叶轮后盖板与螺纹连接处发展并直至破碎解体(现场发现后盖板裂纹比前盖板裂纹宽),可能是叶轮铸造时热处理没有达到标准要求,且在材料实验室通过燃烧方法进行了确认,该耐磨合金叶轮是一种低碳铸铁,与大多数其他白口铸铁相比,虽其整

体含碳量仍较低,但超过规范 0.2%。目测发现,裂纹发生在叶轮的“机头”处。铸件的截面在“鼻子”区域相对较薄。“鼻子”通常不会受到严重磨损和显著的机械载荷,“鼻子”的另一侧是一个空心区域,此外轴是连接的。图中 3 个叶轮的类似裂纹进一步表明,热冲击最有可能是故障破坏的根本原因,显示铸件含碳量略超过 A52 合金规定的范

围。此外,铸件热处理不均匀,外观质量不佳(图 3),该问题有可能是影响叶轮及衬套破坏因素之一,后期厂家提供了显微镜组织,并用 10 mm 钢球做了硬度测试,结果符合要求,表明在强度方面并没有大的实质性影响,不是失效根本原因。

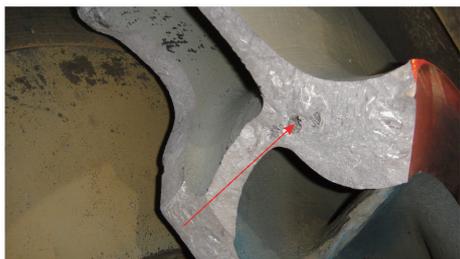


图 2 叶轮断裂面气孔(10 mm)



图 3 显微镜下显示有孔洞



图 4 蜗壳衬套裂纹

3) 泵升温速率过快导致叶轮及衬套破裂。在系统启动或重启过程中操作不当,泵本体已经冷却到一定程度导致泵本体的温度与上下游的物料存在较大的温差,在引入热物料之后因为骤冷骤热造成叶轮及蜗壳衬套出现裂纹(图 3)。本次损坏的泵在启泵之前其入口管道及泵腔内充满冷水,打开泵进口阀门时中温预热器的水温为 143 ℃,由此可看出,泵在启动后将冷水排出并将热水流入泵内,此期间的温升超过了 100 ℃/h(规范要求不大于 50 ℃),“叶轮鼻子”是一种薄铸件,一面暴露在热环境中,这使其对热冲击更敏感,这个短暂的热冲击可能会

导致叶轮及衬套破裂。然而,由于热冲击取决于实际应用、材料、零件尺寸和几何形状,因此很难量化,但从温差应力角度及现场实际现状来分析,泵叶轮及蜗壳护套温升速率过快应是主要破坏主因。

4) 水锤现象。水锤经常发生在泵及管道系统中,当某个阀门关的速度过快会导致高压脉冲流体以极高传递速度从管道自上而下对设备进行冲击破坏,特别会导致叶轮反转,导致轴承箱及电机等设备损坏,这种情况多发生于泵出口管线。根据 DCS 数据记录,当泵出口阀门紧急关断时,泵出口压力仍然大于高温预热器压力(设计泵出口压力与高温预热器压力要保持一定正压差值),认为从高温预热器返回的气体推动液体形成的水锤,自上而下冲击叶轮破坏可能性较小。

当检修人员准备对给料泵拆除检修时,确认泵进料端的放料口无水排出后开始拆泵,当拆除三级泵密封液系统取压管后,放料管有余料排出,表明存在负压现象。泵进出料管路中,没有排气阀门,按停泵操作程序关闭进出料阀后再放料,在进料管和出料管均会有一段负压真空段,开泵前进料会有冲击,但不会有大的破坏力,也可以认为没有水锤的存在。

开泵填充提压是在排出阀门关闭的情况下进行,排出管路没有排气阀,排出管道存在气体,也极易形成正压水锤,冲击会发生在泵的出口管路上,一般会引起出口管路振动或法兰泄漏,水击力对叶轮有影响但不会对蜗壳产生破坏力。

关于进料端的水锤现象,破坏力最大的是泵运行过程突然关闭进料阀产生的负压水锤,负压水锤冲击的是进料方向,若泵入口管路中有汽液夹带混合流体且流速非常高(大于 30 m/s 或者超音速),则对叶轮造成冲击会较大,但设计院在逻辑联锁控制已经考虑防范:泵进料阀打开之前给料泵不能启动,只要联锁有效,则泵运行阶段不可能出现负压水锤。从 DCS 历史记录分析,都是在打开进料阀后启动泵进行操作。下表为高温预热器给料泵出口及高温预热器内压力。

表中数据显示即使在给料泵没有流量一段时间内,泵出口压力仍然高于预热器内压力。

5) 汽蚀现象。我们常说的“汽蚀”就是当叶轮入口处的压力 P 下降至被输送液体在工作温度下的饱和蒸汽压 P_s 时,液体将会发生部分汽化,生成的气泡随液体从泵入口处进入叶轮,进入叶轮后,在

表2 给料泵出口及预热器内压力

时间	给料泵流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	预热器液位/ %	给料泵出口 压力/kPa	预热器温度/ ℃	预热器压力/ kPa	备注
6:18	329.7	65.5	1 234.4	183.9	1 064.3	B组泵
6:24	48.3	77.0	1 198.7	185.1	1 143.7	B组泵
6:30	0.0	83.2	767.6	182.5	755.1	B组泵
6:36	0.0	71.6	672.0	172.6	664.8	B组泵
6:42	0.0	43.6	600.2	168.5	592.1	B组泵
6:48	0.0	26.6	570.2	165.8	562.0	B组泵
6:54	0.0	24.5	507.5	163.3	498.7	B组泵

离心力的作用下,随着压力的升高,气泡急剧收缩、凝聚或破裂,气泡的消失产生局部真空,使其周围液体得以极高的速度冲向原气泡所占的空间,产生高强度的冲击波,冲击叶轮和泵壳,产生噪声,并引起振动。尤其当气泡的凝聚发生在叶片表面附近时,液体质点如许多细小的高频水锤撞击着叶片,由于长时间累加受到气泡的破灭所产生的冲击力反复作用,叶轮的局部表面出现斑痕、裂纹、蚀坑,甚至海绵状损坏的现象。当离心泵在发生汽蚀时继续运转,

由于气泡的存在,会导致离心泵流量下降,同时,泵的扬程、效率也急剧降低。根据DCS数据及值班记录,下面对预热器是否会产生汽蚀进行分析。

$$NPSH = \frac{P_1}{\rho g} + \frac{U_1^2}{2g} - \frac{P_v}{\rho g} \quad (1)$$

式中: P_1 为泵入口处的绝对压力,Pa; u_1 为泵入口处的液体流速,m/s; P_v 为被输送液体在工作温度下的饱和蒸汽压,Pa; ρ 为被输送液体的密度, kg/m^3 。

表3 计算泵某阶段汽蚀余量

时间	给料泵 流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	预热器 液位/%	预热器 压力/kPa	预热器 温度/℃	P1泵入口 处压力/ kPa	饱和蒸汽 压 PV/ kPa	有效汽蚀 余量/m	泵必须的 汽蚀余量/ m	是否 发生 汽蚀	备注
6:18	329.7	66.4	379.4	134.3	532.4	304.3	23.0	11-13.7	否	B组泵
6:24	48.3	88.3	370.8	137.1	552.8	341.6	21.0	11-13.7	否	B组泵
6:30	0.0	99.6	414.8	148.3	632.8	451.2	18.0	11-13.7	否	B组泵
6:36	0.0	99.2	358.2	151.7	576.2	502.2	7.0	11-13.7	是	B组泵
6:42	0.0	97.5	310.5	148.9	528.5	451.2	8.0	11-13.7	是	B组泵
6:48	0.0	94.4	280.1	145.7	470.1	427.2	5	11-13.7	是	B组泵
6:54	0.0	89.0	257.7	143.3	440.7	404.4	4	11-13.7	是	B组泵

从此表中数据可以看到,当液体饱和蒸汽压 p_v 及流速一定时,汽蚀余量越大,表明泵入口处静压头越高,即压力 p_1 越高,泵就越不容易发生汽蚀,反之则反。一般要求有效汽蚀余量比必须汽蚀余量大0.5 m以上时,泵才能正常运行,而本次有发生汽蚀现象导致泵抽空情况的发生。若本次泵叶轮破坏是汽蚀造成,表明叶轮的抗汽蚀性能较差(实际运行时间太短,总计不足200 h,理论使用寿命为4 000 h),需

要进一步改进,但汽蚀现象发生确实是导致泵破坏重要因素之一。另外,机械密封动静环密封面破坏是由于泵抽空后导致密封面液膜消失,密封面干磨发热烧坏。

综合以上各因素,泵叶轮和蜗壳衬套材料脆、韧性低、热处理、温差应力、汽蚀等现象发生综合叠加因素是本次泵破坏主要原因。

3 解决方法及措施

3.1 设计方面的改进

1) 对管路系统进行设计优化, 在预热器泵出口增加排空阀, 且泵手册建议设置该阀门, 便于对管路及泵填充水时进行排气, 见图 5。

2) 在泵出口管路增设止回阀, 防止水锤现象发生。

3) 对泵前端预热器出料结构进行优化设计, 减少阻力损失, 保证泵入口压力, 避免汽蚀现象发生。

3.2 操作方面的改进提升

1) 考虑修改给料泵的填充方式, 将关闭预热器进料阀填充的方式修改为关闭泵出口阀进行填充, 利用备用泵放料阀进行排气。可利用现有的三级泵密封液系统取压管上安装压力跟踪器, 不用另外开孔。

2) 严禁将温度很高液体直接送至泵内, 这样容易由于温差应力作用导致叶轮和耐磨护套破裂。并增加暖泵措施, 对送入泵内介质要求在 70 ~ 100 °C 范围, 时间为 0.5 h, 确保充分暖泵, 同时制订出切换泵操作方案细节, 包括但不限于上下游工艺状态确认、安全等。

3) 优化高压酸浸系统操作规程, 修订串连泵操作程序和工艺控制技术参数, 根据离心泵操作及维护手册要求, 当泵流量处于正常流量 20% 以下时, 如果继续运行就会发生汽蚀, 须立即停泵, 否则对泵机械密封及叶轮损伤很大。

4) 计算并摸索取得不同操作温度下控制汽蚀的进料压力和流量等操作工艺参数, 为类似项目设计模型形成提供科学依据。

5) 加强日常工作巡检, 每 2 h 对泵叶轮转动声音及振动进行检测并录入系统, 必要时引入智能巡检机器人, 实时监控设备运行状态, 形成泵的运行规律曲线, 便于生产系统全面科学管理; 时常关注密封水流量及温度是否稳定; 尽量减少预热器的压力波动对给料泵的影响。

6) 工艺操作人员加深理解泵关于串连泵的操作说明, 可考虑通过进一步理论及实践培训来减少故障发生。

3.3 叶轮、蜗壳衬套备件材料检测及改进

1) 由于该耐磨合金性脆、韧性低, 可焊性差, 可通过泵厂家针对高压酸浸实际运行工况优化材质成分及热处理方法, 并充分考虑现场可修复性因素, 如蜗壳护套件可以考虑采用现场焊补修复办法恢复使

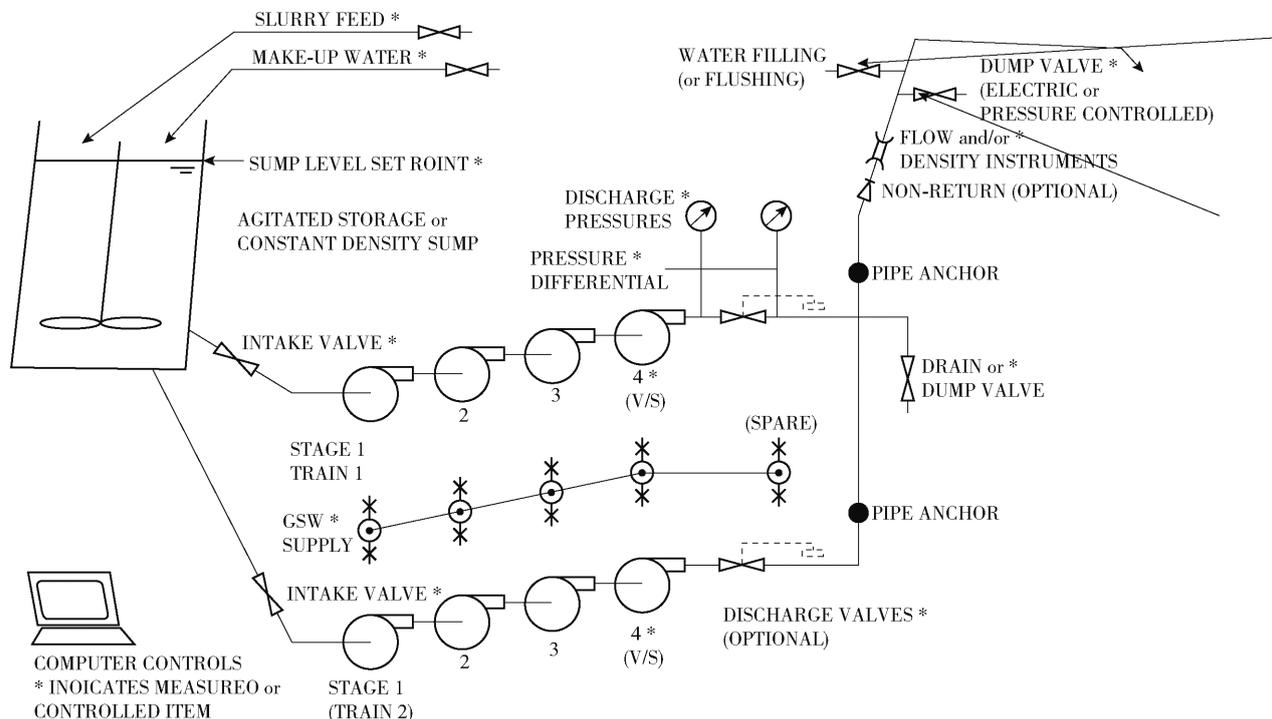


图 5 增设填充水及排空阀

用,减少系统停车时间;将损坏件断口取样送相应资质单位进行金相分析。

2)加大叶轮及蜗壳衬套备件储量,确保发生损坏时能及时更换,减少系统待件停车时间。

3.4 给料

泵系统提升改造为了不影响后期正常生产,增设泵真空装置。当泵发生汽蚀现象时,启动真空泵装置进行抽气,保护泵转动部件及密封系统。

过流件材质调整,考虑到热冲击、汽蚀、磨损等情况,改用陶瓷前护板及蜗壳衬里,叶轮调整 Cr 材料的铬的含量,减少脆性,增加整体泵使用寿命。

4 结论

在某红土镍矿项目高压酸浸系统试车过程中,预热器给料泵出现损坏的主要原因为叶轮和蜗壳衬套材料韧性低、温差应力、汽蚀现象综合作用叠加形成。为避免此类现象发生,应从工艺系统方面、泵叶轮材料及结构、维护保养等方面着手进行改造优化,并对运行过程中操作层面进行规范和提升。此次破坏分析总结与改进为该项目后续正常运行提供了科学依据,对同类项目有很好的借鉴意义。

Case analysis of impeller damage in feeding pump of high-pressure acid leaching high-temperature preheater for laterite nickel ore

YANG Shengping, PAN Jingxiang

Abstract: This article conducts process research and cause analysis on the damage of the impeller of the high-temperature preheater feeding pump in the high-pressure acid leaching system of a certain project's laterite nickel ore during the trial run and production process. The root cause of the problem is identified, providing a feasible basis for solving the problem, and optimizing and improving the existing operating procedures and trial run plan. The process design, equipment selection, structural design, material selection and other aspects play a qualitative role, providing guidance and reference cases for solving similar project problems.

Key words: laterite nickel ore; high temperature preheater; feed pump; overcurrent component; damage mechanism; improvement and enhancement ▲