

## 煤矿用耐磨离心泵结构优化与性能提升研究

王宏凯

吉林省装备制造有限责任公司, 吉林 辽源 136200

[摘要] 为了解决煤矿主排水离心泵输送含固介质造成的过流部件磨损快、效率下降、密封失效等问题, 从叶轮和压水室结构改进、高耐磨材料及表面强化、密封防泄漏、机组对中减振和运行调节等几个方面提出了系统的优化措施。首级叶轮叶片进口边堆焊硬质合金, 加大隔舌圆角, 采用环形和螺旋组合压水室, 叶轮和泵体用高铬铸铁并辅以等离子堆焊, 填料密封采用外冲洗方案, 激光对中并调校支撑刚度, 配置变频调速装置避开临界转速, 保持高效区运行。经过固液两相流仿真和Finnie磨损模型预测、样机测试、现场6个月考核, 优化泵在含砂质量浓度为3%时叶轮寿命由原来的2100h提高到现在的5800h, 效率提高4.5个百分点, 振动烈度降低39%, 维修成本降低。从结果可以看出, 结构、材料、密封、运行方式四者共同优化可以提高煤矿耐磨离心泵的可靠性以及经济性。

[关键词] 煤矿排水; 耐磨离心泵; 结构优化; 性能提升; 磨损预测

DOI: 10.64635/ja.2026.1498

中图分类号: TH311

文献标识码: A

## Research on Structural Optimization and Performance Improvement of Wear-Resistant Centrifugal Pumps for Coal Mines

Wang Hongkai

Jilin Province Equipment Manufacturing Co., Ltd., Liaoyuan, Jilin 136200, China

**Abstract:** To solve problems such as rapid wear of flow-passage components, efficiency decline, and seal failure caused by the transportation of solids-containing media by centrifugal pumps for main drainage in coal mines, this paper proposes systematic optimization measures from several aspects, including structural improvement of the impeller and volute chamber, high-wear-resistant materials and surface strengthening, sealing and leakage prevention, unit alignment and vibration reduction, and operation regulation. Hard alloy surfacing is applied to the inlet edge of the first-stage impeller blades, the fillet radius of the cutwater is increased, and a combined annular and spiral volute chamber is adopted. High-chromium cast iron, supplemented by plasma surfacing, is used for the impeller and pump body. An external flushing scheme is adopted for the packing seal. Laser alignment is carried out and support stiffness is adjusted, while a variable-frequency speed regulation device is configured to avoid critical speeds and maintain operation in the high-efficiency range. Through solid-liquid two-phase flow simulation, Finnie wear model prediction, prototype testing, and a six-month field assessment, the service life of the optimized pump impeller increased from 2,100 h to 5,800 h when the sand mass concentration was 3%. The efficiency increased by 4.5 percentage points, vibration severity decreased by 39%, and maintenance costs were reduced. The results show that the coordinated optimization of structure, materials, sealing, and operation mode can improve the reliability and economy of wear-resistant centrifugal pumps for coal mines.

**Keywords:** coal mine drainage; wear-resistant centrifugal pump; structural optimization; performance improvement; wear prediction

### 引言

煤矿主排水泵输送含煤粉、岩粉等颗粒的介质, 浓度1%~5%, 个别超过8%, 硬度可达HV900以上。过流部件受到冲蚀、磨粒磨损的影响, 壁厚变薄, 型线被破坏, 扬程、效率不断下降。部分矿井叶轮更换周期小于2000h, 检修费用高、有排水安全隐患。行业长期只从材料升级、局部结构改良入手, 使用

Cr27高铬铸铁、过流件表面喷涂堆焊等, 但是没有从根本上解决效率保持率低、密封过早失效、振动引起的连锁损坏问题。近年来, 固液两相流模拟被用来评价磨损, 用颗粒轨迹分析来指导叶轮的改进。双蜗壳或者增大基圆间隙可以减小径向力和磨蚀强度, 但是将水力结构、材料强韧化、密封系统、对中精度、运行策略等综合优化的工程实践还很充分, 缺少可

以落地的组合方案和现场长期考核数据。

### 1 煤矿耐磨离心泵磨损和性能衰减分析

过流部件磨损主要是叶轮叶片进口边、工作面和后盖板交接处,以及压水室隔舌和扩散段内壁。含砂颗粒进入叶轮后受到离心力和科氏力的作用,相对速度增大,集中冲击叶片进口背面以及压力面靠近出口的区域。微切削和疲劳剥落引起叶片型线偏移,出口安放角实际值不断偏离设计值。磨损后的叶片出口厚度变薄,流道面积发生改变,泵的扬程、效率是逐渐降低的。根据某矿解体检测数据可知,运行 1200h 后叶片进口边厚度由原来的 10mm 减小到 4.8mm,叶轮外径处磨损量达到 0.7mm<sup>[1]</sup>。

压水室隔舌处由于流速高、直接受到叶轮甩出的颗粒流冲击,是磨损的又一敏感部位。隔舌磨损后间隙增大,内泄漏增大,容积效率降低。径向力不平衡增大,造成轴系振动,使密封环境更差。经对返厂大修泵的实测可知,隔舌磨损量大于 3mm 时,泵的振动烈度由原来的 3.2mm/s 上升到 5.8mm/s,填料密封的泄漏量明显增大。

性能衰减还和颗粒沉降、压水室堵塞有关。当流量偏离额定流量时,在压水室的扩散段出现回流区,颗粒滞留、堆积加剧了局部磨损,压水室等效过流面积减小,曲线陡降。由此可知,磨损和性能衰减相互交错,单靠一个手段很难达到根本上的解决办法,必须从过流部件型线、材料耐磨性、密封抗污染能力以及运行工况等几个方面共同着手进行改善。

## 2 结构优化设计

### 2.1 叶轮耐磨结构改进

叶轮改进主要是为了减缓型线磨损,保持水力效率。原型叶轮为闭式,叶片数 7 片,叶片出口安放角 22°,叶片包角 110°。颗粒轨迹仿真发现叶片进口背侧存在高能碰撞区。改进措施为在叶片进口边加厚 3mm,并倒圆。对进口边背水面和叶片工作面近后盖板侧,用镍基碳化钨焊条沿流线方向进行条状堆焊,堆焊宽度 8mm,厚度 3mm,堆焊后修磨至与基面平齐,防止局部凸起造成二次流和气蚀<sup>[2]</sup>。叶片出口边向背侧略削薄,使出口安放角不变,但出口处的挤压效应减小,颗粒在出口处的冲击强度降低。叶轮前、后盖板内表面增加两道环形阻砂槽,槽宽 2.5mm,深 1.5mm,引导颗粒向外缘输送,减轻盖板密封环处颗粒聚集磨损。经过改进后,叶片质量只增加了很小的量,转子做动平衡校验,不平衡量控制在 G2.5 级。

### 2.2 压水室流道优化

压水室用螺旋形和环形过渡的组合流道来降低隔

舌冲击,提高宽流量范围的流动适应性。原设计隔舌圆角半径只有 3mm,颗粒撞击集中,磨损形貌为深沟状。优化后隔舌圆角半径增大到 8mm,隔舌起始位置沿叶轮旋转方向前移 5°。配合扩散段喉部面积增大 6%,速度峰值降低。为消除扩散段局部回流,在扩散段后部设一条高 30mm、长 120mm 的低矮导流筋,使颗粒顺畅流出。该导流筋用耐磨合金堆焊而成,方便现场修整。经过这样的调整之后,压水室内流速分布更趋均匀,壁面剪切应力峰值降低大约 17%,预测的磨损率也有所减少。

## 3 性能提升措施

### 3.1 高耐磨材料和表面强化

过流部件基材采用高铬铸铁 KmTBCr26,化学成分及热处理工艺按 GB/T 8263 执行。铸件加热时先在 650℃、后在 850℃分段保温,升温速率为 80℃/h 以下,经 1050℃保温 2h 后空冷淬火,再 250℃回火保温 4h,基体组织为马氏体加共晶碳化物 M7C3,硬度 HRC 58~62。铸件同时进行固溶强化,控制残余奥氏体含量在 5% 以下,防止产生相变应力而产生微裂纹<sup>[3]</sup>。对磨损敏感的部位做表面强化。叶片进口堆焊前对基体待焊部位进行着色探伤,无缺陷后预热到 250℃,用等离子弧堆焊镍基碳化钨复合粉末,电流 150A,送粉速率 20g/min,层间温度控制在 300℃以下,焊后缓冷并做去应力处理。堆焊层硬度达到 HRC 64,与基体结合界面无气孔、裂纹,结合强度大于 450MPa。口环、级间衬套用硬质合金整体烧结合,表面硬度 HRA89。填料函底部设碳化硅陶瓷防磨板,隔绝颗粒进入填料区域。材料组合方案经销盘磨损试验验证,在含砂质量分数为 3%、中位粒径为 0.15mm 的石英砂浆中,线速度为 2.8m/s 时进行 5h 冲刷,KmTBCr26 的磨损率为原 ZG35CrMo 的 1/3,堆焊层磨损率降低 40%。

### 3.2 密封系统防泄漏设计

填料密封是煤矿离心泵常用的、便于维护的轴封形式,但是含固介质很容易进入填料函,使填料和轴套急剧磨损,泄漏量迅速增大。因此对填料密封系统进行优化,轴套用基体为不锈钢、表面超音速火焰喷涂碳化钨涂层,涂层厚度 0.25mm,硬度≥HV1100,粗糙度 Ra≤0.2μm。填料为五道柔性石墨纤维编织盘根,中间设一道带孔填料环(灯笼环)来保证外冲洗水的均匀分布。冲洗方案为 Plan 32 外冲洗法,用泵出口引出高压水,先经旋流除砂器分离掉大部分颗粒,再经精度 10μm 的在线过滤器,洁净冲洗水经节

流孔板后进入填料环。冲洗水压力比密封腔内介质压力大 0.05 ~ 0.1 MPa，冲洗流量为 0.3 ~ 0.5 m³/h，使填料得到不断的润滑和冷却，防止外部颗粒进入。冲洗管路设流量开关、压力变送器，当冲洗水流量小或者压力不够时发出报警信号。同时填料函底部设直径为 4 mm 的倾斜冲洗孔，与轴线成 30° 夹角，引入一股补充冲洗水来扰动沉积物，补充冲洗水量为 0.2 m³/h。两路冲洗回路都由 PLC 控制电磁阀来完成自动工作，正常工作时每隔 2 h 冲洗一次，即 2 h 内有 10 s 的冲洗时间，既保证了密封的效果，又节约了清水的使用量。

3.3 机组对中、减振措施

振动造成密封动态泄漏和轴承疲劳。优化泵组的中精度，用激光对中仪把联轴器径向偏差、角向偏差都控制在 0.03 mm 以内。底座用槽钢焊接改为带有混凝土二次灌浆层的刚性平台，基础表面凿毛后支模，灌注 C40 无收缩灌浆料并振捣密实，养护 7 天后机组就位，平台质量达到机组总质量的 1.5 倍，有效降低系统固有频率<sup>[4]</sup>。泵轴承体支撑筋板表面喷砂除锈到 Sa2.5 级，增加阻尼涂层，材料为丁基橡胶复合约束层，涂覆厚度 4 mm，自然硫化后覆盖 0.5 mm 厚不锈钢约束板，损耗因子大于 0.2。经过敲击模态测试，优化后的机组一阶固有频率为 42.3 Hz，运行转速对应转频 24.7 Hz，避开率大于 40%，额定工况下轴承座振动速度有效值由 4.6 mm/s 降低到 2.8 mm/s。

3.4 运行工况调控策略

矿井涌水量变化大，泵长期处在偏工况下工作，磨损和振动都会增大。安装高压变频器，根据水仓水位传感器信号和管路特性自动调节转速。最低运行转速设为额定转速的 70%，即 35 Hz，防止进入小流量不稳定区、管路喘振。在泵轴承箱、出口管路上装有压电加速度传感器和压力变送器，对振动的大小、压力脉动进行监测。当振动烈度大于 4.5 mm/s 或者出口压力波动幅值大于额定扬程的 5% 时，控制器自动把转速降低 5%，开启密封冲洗程序，60 s 内如果信号仍然超限，则发出警报并记录事件<sup>[5]</sup>。控制系统对累计运行时间、功率进行累计，根据效率衰减趋势自动给出叶轮更换窗口和轴承润滑周期。经过半年的现场统计可知，变频运行比工频运行平均转速低 8%，折算轴功率减少约 12.6 kW，磨损速率减慢，系统没有共振。

4 优化效果的验证

4.1 流场仿真和磨损预测

建立包括吸入室、首级叶轮和压水室全流道水体

模型，用欧拉 - 拉格朗日法计算连续相流场和颗粒运动轨迹。计算域用六面体核心网格离散，边界层第一层网格厚度为 0.02 mm，保证壁面 y+ 值小于 1，经过网格无关性检验，网格总数由原来的 270 万增加到现在的 450 万时扬程和效率的偏差都在 0.8% 之内，最终选用约 320 万的网格。湍流模型选取 SST k- $\omega$ ，颗粒相假设为稀疏相，颗粒粒径服从 Rosin-Rammler 分布，中位粒径 0.15 mm，分布指数 1.5，密度 2650 kg/m³。磨损模型用 Finnie 切削模型，颗粒冲击速度指数取 2.4，系数 K 为 1.8 × 10<sup>-9</sup>，法向和切向恢复系数分别为 0.4 和 0.8，根据石英砂对高铬铸铁的冲蚀试验数据拟合得到。对仿真对比优化前后的叶轮、压水室壁面磨损率分布进行对比。原型泵叶轮叶片进口背面磨损率峰值为 4.7 × 10<sup>-7</sup> kg/(m²·s)，优化后降为 2.1 × 10<sup>-7</sup> kg/(m²·s)。压水室隔舌部位磨损率下降 51%。颗粒轨迹表明，隔舌圆角增大后颗粒偏转更加平滑，直接碰撞少了。该预测结果同后面现场考核趋势一致。

4.2 样机性能对比测试

按照 GB/T 3216-2016，在开式试验台上分别对原型泵和优化样机做清水性能试验。测试流量为 0 ~ 120% 的设计流量。扬程用 0.1 级压力变送器测量，流量用精度 0.5 级的电磁流量计测量，轴功率用转矩转速仪测量，转速传感器误差控制在 ±1 r/min 以内<sup>[6]</sup>。每个工况点稳定后连续采集三次数据取平均值，各点效率重复性偏差均在 ±0.2% 以内。为了排除多级叠加的影响，只对首级进行比较，但是整机试验核对全级性能趋势一致。主要结果见表 1。

表 1 优化前后离心泵性能对比

| 参数            | 原型泵   | 优化样机  |
|---------------|-------|-------|
| 额定流量 Q/(m³/h) | 280   | 284   |
| 扬程 H/m        | 152   | 156   |
| 效率 $\eta$ /%  | 72.3  | 76.8  |
| 轴功率 P/kW      | 161.6 | 158.9 |
| 振动烈度/(mm/s)   | 4.6   | 2.8   |
| 叶轮更换周期/h      | 2100  | 5800  |

注：叶轮更换周期为在矿井水含砂质量浓度约为 3% 的情况下，由于磨损而使性能下降超过 8% 时的统计平均运行小时数。

由上图可知，改进样机的额定点效率提高了 4.5 个百分点，扬程略高，振动水平也小了。在全流量范围内曲线更平缓，高效区变宽。

4.3 现场连续运行考核

将一台优化样机和一台原型泵并排安装在同一个

泵房内, 输送相同的排水管路, 交替运行来保证水位的控制。记录每天的排水量、功率、振动、密封泄漏情况, 每两周用便携式超声波流量计和精密压力表在泵的进、出口法兰处复测扬程和效率, 同时采集填料函温度和冲洗水压力。监测时间为 6 个月, 期间矿井水固体颗粒质量浓度在 2.5% ~ 3.5% 之间波动。优化样机在考核期内填料密封的泄漏量始终保持在允许的每分钟 5 ~ 10 滴范围内, 未出现过量泄漏故障, 轴承温度一直保持在 68℃ 以下, 振动烈度为 2.7 mm/s 到 3.1 mm/s 之间。运行到 4000h 时, 优化样机实测扬程为 148m, 比原型泵初期值还要高。叶轮解体检查发现, 叶片进口边堆焊层表面只有浅表犁沟痕迹, 扫描电镜观察没有剥落坑; 环形阻砂槽有明显的颗粒疏导痕迹, 压水室导流筋完好。轴套表面涂层光滑, 无明显磨损, 填料更换周期延长至 6000h 以上。对比原型泵运行到 2100h 时效率已经下降了 9.1%, 而优化样机运行到 5800h 时效率下降只有 5.4%, 仍然比原型泵初始效率高。

#### 4.4 综合技术经济评价

对优化后的泵做全寿命周期成本分析, 即设备改造成本、电费、维修人工费。高铬铸铁铸件、等离子堆焊加工、密封系统升级使单台泵一次性改造费用比原型增加约 18%, 折合 2.7 万元。但是叶轮更换周期由原来的 2100h 增加到现在的 5800h, 年均更换次数由原来的 1.7 次降低到现在的 0.6 次, 维修人工和备件费用从原来的年均 4.2 万元降到现在的 1.5 万元, 下降幅度达到 63%。同时效率提高使得年运行 5000h 时节电约 3.2 万 kWh, 按电价 0.6 元 /kWh 计算, 年节省电费 1.92 万元。年总节约费用为 4.6 万元, 静态回收期为 14 个月。考虑到排水系统停机风险降低、排水安全裕度提高, 间接效益明显。该优化方案可以用于同类矿井, 对于水质方面的微调, 根据实际情况可以调整堆焊材料以及冲洗回路。

#### 5 结束语

以 MD280-65×6 型煤矿耐磨离心泵为研究对象, 根据磨损机理分析, 完成了叶轮和压水室结构改进、高铬铸铁及表面强化、填料密封外冲洗系统、机组对中减振和变频调控的全方位优化。仿真及现场考核结果表明, 在含砂工况下叶轮寿命由原来的 2100h 提高到现在的 5800h, 效率提高 4.5 个百分点, 振动降到 2.8 mm/s, 填料密封可长周期维持微泄漏运行。综合成本降低、安全性提高。所提出的方法路线清楚, 工序可行, 对煤矿主排水泵的延长使用寿命和提高效率有借鉴意义。

#### 【参考文献】

- [1] 张佳龙, 向阳. 离心泵机脚振动的影响因素及表征公式研究 [J/OL]. 噪声与振动控制, 1-6 [2026-08-10].
- [2] 钱永康, 王旭芳. 离心泵机械结构改进设计策略 [J]. 大众科技, 2026, 28(1): 56-59.
- [3] 温振楠. 输送含颗粒介质离心泵的磨损机制及结构防护 [J]. 化学工程与装备, 2026, (4): 103-105.
- [4] 范鹏军, 崔彪虎, 王自强, 等. 空化条件下离心泵叶轮内涡结构运动特性分析 [J]. 设备管理与维修, 2025, (8): 40-44.
- [5] 师学文, 常胜, 徐锦程. 自平衡多级离心泵运行问题及解决措施 [J]. 中国井矿盐, 2025, 56(5): 27-28+31.
- [6] 王福华, 周奇智. 通用离心泵拆装检修标准工艺及其模块化模具夹具设计研究 [J]. 模具技术, 2025, (4): 23-29.

作者简介: 王宏凯 (1985.01—), 毕业院校: 黑龙江科技学院, 所学专业: 电子信息工程, 当前就职单位: 吉林省装备制造有限责任公司, 职务: 技术研发中心专业技术 (设计员), 职称级别: 中级。