

高压高扬程固液两相介质离心泵的设计原则

于海力¹, 张锐¹, 刘海丽¹, 吕志全², 吴玉珍¹

(1.北京航天动力研究所, 北京 100076; 2.中国石油天然气集团公司 辽阳石化分公司, 辽阳 111000)

摘要: 固液两相介质离心泵主要用于煤化工、冶金、电力、石油化工、市政工程等领域, 用于输送含灰渣、固体杂质和浆体的介质, 其扬程一般不超过 80 m。超过 80 m 扬程的高压高扬程固液两相介质离心泵可以用作煤气化工业中的激冷水泵、洗涤塔循环泵和石化行业 PTA 装置中的 TA 浆料供料泵, 在这类泵的设计中有些需要特别关注的技术特点。从转子刚性、轴向力平衡、过流部件设计的适用性、支撑系统的稳定性、机械密封设计的可靠性等几个方面论述了高压高扬程固液两相介质离心泵的设计原则。

关键词: 离心泵; 固液两相介质泵; 高扬程泵; 高压入口

中图分类号: TH311-34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2015) 02-0070-05

Design philosophy of high-pressure & high-lift centrifugal pump for solid-liquid phase mediums

YU Hai-li¹, ZHANG Rui¹, LIU Hai-li¹, LÜ Zhi-quan², WU Yu-zhen¹

(1. Beijing Aerospace Propulsion Institute, Beijing 100076, China;

2. Liaoyang Petrochemical Branch Company, CNPC, Liaoyang 111000, China)

Abstract: The solid-liquid two-phase centrifugal pump is mainly used in coal-chemical industry, metallurgical industry, thermo power plant, petrochemical industry and municipal engineering to transport the medium with slag, solid impurities and slurry. Generally speaking, its lift is not more than 80 m. The high-pressure & high-lift centrifugal pump for solid-liquid phase mediums, whose lift is more than 80 m, can be used as chill water-pump and scrubber circulation pump in coal-gasification industry, and TA slurry feeding pump in PTA industry. More attention should be paid to some technical features in design of these pumps. In this article, some design philosophies of high-pressure & high-lift centrifugal pump for solid-liquid phase mediums are described in the aspects of rotor rigidity, axial force balancing, flow passage component's applicability, brace's stability and mechanical seal's reliability.

Keywords: centrifugal pump; solid-liquid phase medium pump; high-lift pump; high-pressure inlet

收稿日期: 2014-12-17; 修回日期: 2015-02-05

作者简介: 于海力 (1978—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究领域为流体机械

0 引言

固液两相介质离心泵主要用于煤化工、冶金、电力、石油化工、市政工程等领域, 主要特点是采用耐磨材质, 设计中要考虑介质特性对泵性能的影响。

高压高扬程固液两相介质离心泵因其特别突出的轴向力、转子刚性、冲刷磨损及高 PV 值(即压力 (pressure) 与速度 (velocity) 的乘积)的机械密封等诸多因素, 除按照一般的固液两相介质离心泵设计考虑材料的耐磨性和泵性能外, 还需要在设计工作中对转子刚性、轴向力平衡、过流部件的设计、轴承支撑系统设计、密封和辅助控制系统设计等诸多方面予以重点关注。

1 固液两相介质离心泵结构

固液两相介质离心泵一般采用单级悬臂结构, 由内壳体、外壳体、机械密封、转子部件、轴承座、底座及支撑系统等部分组成, 见图 1 所示。

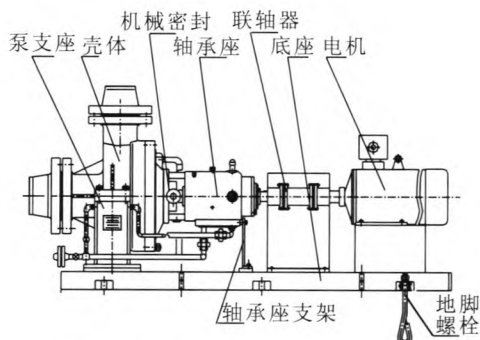


图 1 固液两相介质离心泵结构

Fig. 1 Structure of centrifugal pump for solid-liquid two-phase medium

2 设计基本原则

2.1 转子的刚性

转子的刚性是泵设计中的重要环节, 转子刚度不足, 可能导致转-静件间隙密封过早磨损, 机械密封泄漏, 甚至加大动不平衡响应。固液两相介质离心泵由于工况更苛刻、介质不均一、过流部件磨损后不对称, 激发振动的因素较多, 对

转子的稳定性要求更高, 转子应在不考虑水动力支撑作用下设计成刚性的, 刚度越大可靠性越高。因此要合理选择轴的结构尺寸、两支撑轴承中心间的跨距、轴承间轴颈、轴承与叶轮间跨距、叶轮的重量等设计参数。

在最严苛的动态条件下, 在最大叶轮直径和规定的转速和介质条件下, 泵的允许工作范围内, 在密封面处, 轴的刚度应当保证轴的总挠度小于 $50\ \mu\text{m}$ 。

图 2 为离心泵转子结构示意图。图中 A, B, C 和 L 为几个点距离叶轮中心的距离。据图 2 所示, 转子的静挠度计算公式为

$$\delta = \frac{P}{3E} \left[\frac{C^3}{I_c} + \frac{B^3 - C^3}{I_b} + \frac{A^3 - B^3}{I_a} + \frac{A^2 \times L}{I_l} \right] \quad (1)$$

式中: δ 为轴变形量; P 为包含自重的转子所受径向力; E 为弹性模量; I_a, I_b, I_c, I_l 为转动惯量。

公式(1)可以被定性简化为变形量 δ 与 L^3/D^4 成正比, 其中 L 是轴的长度, D 是轴的直径。 L^3/D^4 被定义为挠性系数, 挠性系数越高, 轴的变形量越大, 转子稳定性也越差。

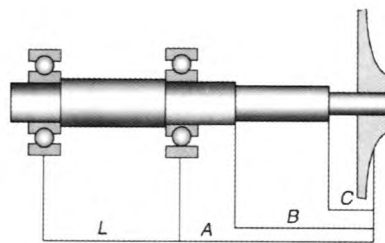


图 2 离心泵转子结构示意图

Fig. 2 Rotor structure of centrifugal pump

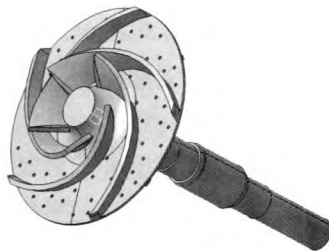


图 3 转子三维示意图

Fig. 3 3D structure of rotor

图3是一台大功率高扬程的料浆泵转子示意图。该泵额定点流量为 $620 \text{ m}^3/\text{h}$ ，扬程 136 m ，转速 1480 rpm ，叶轮直径达到 645 mm ，叶轮重量为 60 kg 。对应公式(1)的 $L=366 \text{ mm}$ ， $D=100 \text{ mm}$ 。由于叶轮很重，转子的刚性对泵的稳定运行将起到关键作用，叶轮的减重设计也变得十分重要，为此进行了转子变形理论和数值分析。由公式计算可知，本泵的挠性系数为 0.49 ，静止状态下轴端最大挠度为 0.015 mm ，运转状态下按照最大径向力 3000 N 考虑，轴端挠度为 0.08 mm ，折算到密封处，挠度小于 $50 \mu\text{m}$ ，满足要求。

为了验证经验公式计算的准确性，对该泵进行了三维建模数值模拟计算，计算结果如图4所示，两种计算方法得出的结论一致。



图4 静止状态轴挠度数值计算结果

Fig. 4 Calculated deflection of shaft in idle state

2.2 轴向力平衡

离心泵产生轴向力的第一个因素是叶轮前后盖板结构不对称，受力面积也不一样；第二个因素是流动不对称，叶轮前后盖板压力分配不平衡；第三个因素是在密封面上由密封腔内外压差产生的轴向力。在高入口压力和高扬程的情况下，后两个因素更加突出。轴向力平衡的途径主要有：叶轮后设置背叶片平衡方法；叶轮盖板开平衡孔平衡轴向力方法；采用全开叶轮自动平衡轴向力平衡法。通常，固液两相介质离心泵多采用背叶片，但这种方法对背叶片和后衬板的间隙敏感，如果泵的扬程较高、叶轮直径较大，那么残留未平衡轴向力较大；而叶轮平衡孔平衡轴向力方法易于加工，对间隙不敏感，从水力试验结果和实际应用看，平衡孔对离心泵效率的影响并不大，运行可靠。对于高浓度固液两相介质离心

泵，采用背叶片同时开平衡孔的设计方法，背叶片的作用一方面是防止固体沉积，同时平衡孔起到平衡轴向力的作用。

2.3 过流部件的设计

过流部件包括叶轮、扩压器、壳体。叶轮有闭式、开式、半开式等几种形式。扩压器有导叶式和蜗壳式等。半开式和开式叶轮外径和出口宽度可以采用机械加工的方式调整，易于实现针对具体某个水力性能参数的离心泵做最优设计，而闭式叶轮一般只能做分级设计，针对具体参数要套用已有的铸件，难于实现设计最优化，因而叶轮优先选择开式。

固液两相离心泵介质中含有颗粒，对过流部件有冲刷磨损作用，还会在流道内沉积。叶轮和扩压器磨损影响泵工作稳定性和效率，其中壳体磨损除导致性能下降外，还存在安全隐患。对于闭式叶轮，灰渣沉积在转-静间隙密封处会造成非正常磨损，特别严重时，灰渣沉积在叶轮盖板和壳体之间的空腔内可以导致壳体和叶轮磨损和研死，发生事故。

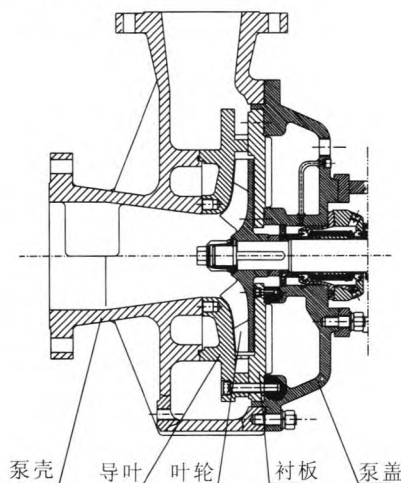


图5 过流部件结构图

Fig. 5 Structure of flow passage components

图5是适合输送固液两相介质的离心泵过流部件结构图，由环形壳体、叶轮、导叶扩压器、耐磨衬板等几部分组成。以叶轮、导叶和衬板组合成内腔，壳体作为外腔共同组成双层壳体结构。外腔主要用于承压，内腔零件主要用于耐磨和实现泵的水力性能。泵壳选用强度、韧性方面

具有优势的材料, 导叶、衬板、叶轮则可以选择硬度高的耐磨材料, 实现了承压和承磨功能的分离设计。其中叶轮选用开式叶轮, 除实现水力性能的最优化设计外还有效避免了固体沉积, 也不用设置转-静间隙密封。

对于高扬程固液两相离心泵, 叶轮和导叶的设计除了要考虑水力性能、耐磨性能外, 还需要考虑叶轮与导叶的匹配, 特别需要关注流体激励。叶轮和导叶的数目按照公式(2)选用。

$$X = n \cdot Z_r - m \cdot Z_d \quad (2)$$

式中: $n=1,2,3\cdots$; $m=1,2,3\cdots$; Z_r 为叶轮叶片数; Z_d 为导叶叶片数。结果要求 $X \geq 2$ 。

经验表明因导叶和叶轮叶片数目不匹配引起的激振力具有破坏性, 长期运行会导致泵轴、轴承座支撑筋板疲劳断裂。

2.4 轴承支撑系统的设计

泵支撑系统包括泵壳支座、轴承座和轴承, 它的稳定性影响泵的稳定运行, 需要核算在两倍于 API (American Petroleum Institute) 标准数值条件管口力矩和力的作用下泵壳支座的形变, 泵联轴器轴端的位移应该小于 $50 \mu\text{m}$ 。混凝土基座和底座的总重应该大于设备总重的 3 倍。在泵与驱动机支架正下方的焊接底座的底侧应该焊接加固横向肋, 加固肋的形状应有利于牢固地固定在灌浆中。

轴承箱应该具有足够的刚性和强度, 轴承在 25 000 h 寿命条件下核算当量动载荷应具有足够的安全裕量, 选择自动调心的轴承, 以达到轴系和轴承箱的良好匹配, 延长轴承寿命。轴承箱的尾部支撑起辅助作用, 强化支撑的稳定性。

整个泵的支撑系统尽可能采用铸造工艺, 铸铁具有优异的减震性和尺寸稳定性。

对于介质温度高于 250°C 的泵, 泵支座要求通冷却水, 降低底座的高温变形量, 维持机组的对中性。

图 6 是可供参考的高扬程固液两相离心泵的支撑轴承座, 该泵后轴承为两列 40° 角接触球轴承同向布置和一系列同型号轴承反向布置组合使用, 前轴承为球面滚子轴承, 经验表明, 这种轴

承配置适合于重载工况, 对苛刻工作条件有较高使用冗余度, 球面滚子轴承实际运行温度比相同安装尺寸的双列角接触球轴承运行温度低。

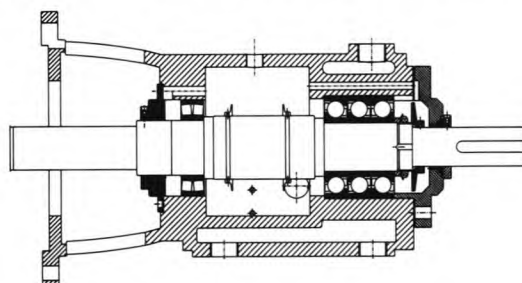


图 6 高扬程固液两相离心泵轴承座

Fig. 6 Bearing bracket of high-lift centrifugal pump

2.5 机械密封和辅助控制系统设计

轴密封是保证离心泵安全运行的又一重要部件。根据机械密封使用条件, API 标准将机械密封分为 3 类, 第 1 类密封的腔体尺寸为非标准尺寸, 温度限定在 260°C 以下, 压力 2.2 MPa (绝压) 以下; 第 2 类密封是标准腔体结构, 温度可以达到 400°C , 使用压力 4.2 MPa (绝压); 第 3 类密封是包容第 2 类密封的要求, 另外还要求进行严格的检验、试验。机械密封的布置方式也分 3 种: 第 1 种是单机械密封, 第 2 种是双机械密封配置的缓冲液压力低于密封腔压力, 第 3 种是双机械密封配置的隔离液压力高于密封腔压力。具体密封形式分为 A 型 (多弹簧型)、B 型 (波纹管随轴转动型) 和 C 型 (波纹管静止型)。需要依据具体介质工况 (如: 温度、压力、凝固点、含渣量、腐蚀性和毒性等) 做出最合适的选择。一般磨蚀性介质和高凝固点介质需要用硬-硬配合密封面; 温度超过 176°C 时推荐选择波纹管补偿元件; 压力超过 4.2 MPa (绝压) 以上时密封面需要做特殊设计, 比如开流体动压槽来改善高压和高摩擦热条件下的端面润滑膜稳定性, 见图 7 所示。

密封设计方案还应包括合理设计辅助控制系统, 对于固液两相离心泵, 密封冲洗液的正常连续供应尤其重要。在管路系统中, 应根据不同的要求, 配有冷却器、虹吸罐、分离器、过滤器、孔板、温度计、流量指示器、压力开关、流量调

节阀和止回阀等,所有这些都是为了提高设备运行的安全性。

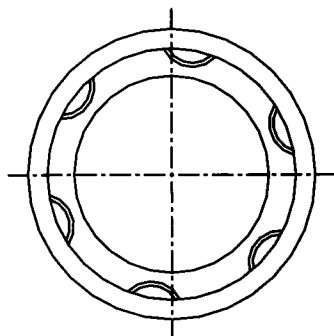


图 7 高压机械密封端面的流体动压槽

Fig. 7 Dynamic pressure groove on seal face for high-pressure machinery

3 结论

高压高扬程固液两相离心泵因为操作工况特殊,在泵设计中需要特别关注转子刚性、轴向力和径向力平衡、过流部件设计、轴承和支撑系统的稳定以及机械密封和系统的设计。30 多个系列、千余台产品的设计研发实践表明:遵循文中

设计原则可以使得离心泵在效率、运行稳定性、操作冗余度、寿命和可靠性方面得到保证。

参考文献:

- [1] HEINZ P B, ALLAN R B. Pump user's hand book: life extension[M]. 3rd Edition. U.S.A.: The Fairmont Press, INC., 2009.
- [2] MATTHEW A G. Addressing pump reliability problems [M]. U.S.A.: Mechanical Solutions Inc., 2006.
- [3] JOHANN F G. Centrifugal pumps [M]. 2nd Edition. Germany: Springer press, 2010.
- [4] KHALID Y A, SAPUAN S M. Wear analysis of centrifugal slurry pump impellers[J]. Industrial Lubrication and Technology, 2007, 59(1): 18-28.
- [5] [S.I.] Installation, operation, maintenance and assembly instructions [M]. Australia: Weir Warman, 2000.
- [6] 何希杰, 劳学苏. 渣浆泵选型方法探讨[J]. 水泵技术, 1995(6): 29-35.
- [7] 卜炎. 机械传动设计手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 1999.
- [8] 关醒凡. 现代泵技术手册[M]. 北京: 宇航出版社, 1995.

(编辑: 陈红霞)

(上接第 55 页)

- [11] PAHL R A. Integration and test of a refrigerant-based cold-gas propulsion system for small satellites [J/OL]. [2011-10-23]. <http://www.docin.com>.
- [12] BURGESS J D, HALL M J, LIGHTSEY E G. Evaluation of a dual-fluid cold-gas thruster concept[J]. International Journal of Mechanical and Aerospace Engineering, 2012, 6: 232-237.
- [13] LUGINI C, ROMANO M. A ballistic-pendulum test stand to characterize small cold-gas thruster nozzles[J]. Acta Astronautica, 2009, 64(5): 615-625.
- [14] 严家驷. 工程热力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001.
- [15] CHEN H, ZHENG J, XU P, et al. Study on real-gas equations of high pressure hydrogen[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2010, 35(7): 3100-3104.

(编辑: 陈红霞)