背开式双“S”形叶轮碱泵的设计与试验

宫恩祥[1]，黄铭科[1]，张　丽[1]，刘三华[1]，杨　巍[2]
（1.江苏大学 流体机械工程技术研究中心，江苏 镇江 212013；2.合肥华升泵阀有限责任公司，安徽 合肥 230031）

摘　要：针对碱泵强腐蚀的工作环境和效率较低的问题，提出了背开式双“S”形方形前盖板叶轮碱泵的设计方法.采用加大流量系数法，分析了叶轮各几何参数对泵的通过性能和效率的影响，得出双“S”形叶轮有利于高粘性、易结晶或含少量颗粒的介质通过的结论；采用HS－1镍基合金材料，研究其金相组织为奥氏体，保证了碱泵的耐蚀性能，降低了泵的造价；根据工艺要求，采用单级悬臂结构，提高系统的稳定性.试验结果表明，双“S”形叶轮碱泵扬程－流量曲线平稳，无驼峰，实际扬程52.3 m，流量为4 m^3/h，效率为16.18%，满足设计要求，实现了碱泵的国产化，为小流量超低比转速泵用于输送高温、强腐蚀、粘性介质泵的设计提供了设计参考.

关键词：碱泵；双“S”形叶轮；超低比转速泵；镍基合金；腐蚀
中图分类号：TH311　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1674－8530(2010)02－0136－04

Design and experiment of alkali pump with back-open dual “S” impeller

Gong Enxiang[1], *Huang Mingke*[1], *Zhang Li*[1], *Liu Sanhua*[1], *Yang Wei*[2]
(1. Research Center of Fluid Machinery Engineering and Technology, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China; 2. Hefei Huasheng Pump and Valve Co. Ltd., Hefei, Anhui 230031, China)

Abstract: Aiming at the alkali pump works in a strong corrosion condition and low efficiency, a design method with dual “S” impeller was proposed. By using the enlarged flow rate coefficient method, the effects of geometry parameters of the impeller on passing performance and efficiency were analyzed and the hydraulic design method was introduced. The results show that the dual “S” impeller is benefit for transporting viscous medium. Adopting nickel-base alloy, its metallographic structure is austenite, named HS－1, assures the anti corrosion performance and reduces the cost of the pump. According to process engineering requirements, a single-stage cantilever structure was used and the system's stability was improved. The test result shows that the dual “S” impeller of alkali pump has a steady $Q-H$ curve. In addition, the actual head is 52.3 m and the flow rate is 4 m^3/h, the efficiency of the pump is 16.18%. All the technical parameters are satisfied for the design requirements and achieves localization of the alkali pumps. It is useful for the design of mini flow and low specific speed pump used in transporting high temperature, strong corrosion and viscous medium.

Key words: alkali pump; dual “S” impeller; low specific speed pump; nickel-base alloy; corrosion

氯碱工业是我国基础原材料工业，在我国经济发展中具有举足轻重的地位.随着近年来我国氯碱工业规模日益扩大，氯碱工业用泵需求迅速增长.但系统中的几大关键设备——离子膜电解槽、吸收塔、

收稿日期：2009－10－26
基金项目：中石化国产化项目(W07012)；江苏大学高级人才科研启动基金资助项目(07JDG065)
作者简介：宫恩祥(1965—)，男，安徽合肥人，副研究员(hspumps@263.net)，主要从事流体特殊耐腐蚀材料的研究.
黄铭科(1985—)，男，福建龙岩人，硕士研究生(huangmk04@126.com)，主要从事流体机械的研究.

万方数据

碱泵等目前主要都还依赖进口，制约着我国氯碱工业的发展.

碱泵作为整个装置的动力设备，使整个生产过程流动化和化学反应顺利进行，主要用于输送氨盐水、热碱液、熔融碱、滤液等介质，其工作特点是高温、强腐蚀且效率较低. 由于碱泵工作介质都具有强腐蚀性，一般的金属难以抵抗，因而如何正确选材是泵设计的重要内容. 目前国内对该类泵的研究较少.

魏宗胜在《氯碱和纯碱工业用泵》中综述了氯碱和纯碱工业用泵的种类和选型原则[1]，但未能针对泵材选取及小流量低比转速流程泵设计进行论述；Thomas F O' Brien 等在《Overview of the Chlor-Alkali Industry》中论述了2002年以来全球的氯碱产量和目前主要的氯碱生产技术以及碱泵的使用情况[2]. 当前国内碱泵的主要泵型是IJ型碱泵，但该类泵流量范围在6.3～400 m^3/h，对于流量为4.0 m^3/h的小流量工况尚空缺.

笔者以氯碱工业用碱泵的国产化研制为例，结合合肥氯碱厂二效蒸发装置主循环泵系统，介绍一种背开式双"S"形方形前盖板特殊叶轮结构，对叶轮的设计方法、泵材料的选择、泵结构的选取及试验结果进行分析讨论.

1 双"S"形叶轮的设计

研制的高温碱泵是应用于二效蒸发装置的主循环泵(P-2)，其工况条件为输送48% NaOH熔融碱，介质温度为160 ℃，粘度为4.40×10^{-3} Pa·s，密度为1 447.1 kg/m^3，要求设计流量为4 m^3/h，扬程为47.0 m.

新型高温碱泵采用背开式双"S"形方形前盖板叶轮. 此种叶轮形式特殊，结构如图1和图2所示. 具有以下特点：①叶轮设计成背开式结构，叶片数为4片，从总体外观上看叶轮由两个"S"形叶片组成；②前盖板设计成方形，并在转角处圆弧光滑过渡，能够减少一定量的圆盘摩擦损失，提高水力性能[3]，并节省材料；③后盖板设计成背开式、直线型流线，加工工艺简单，并方便与轴向间隙的调整；④在泵运行过程中，由于双"S"形叶轮的关键间隙位于叶轮背面与泵盖盖板之间，是平面间隙形式，较开式叶轮更易加工，也便于装配过程中间隙的调整与控制；⑤双"S"形叶轮由于无部分前、后盖板，在具体工况应用中较闭式叶轮更适用于有一定粘性介质、易结晶或含少量颗粒的工况条件[4].

1.1 叶轮几何参数的确定及叶片绘形

低比转速泵的设计常用方法有加大流量设计法、无过载设计法、短叶片偏置设计法和面积比设计法. 文中采用加大流量设计法进行设计计算[5-6].

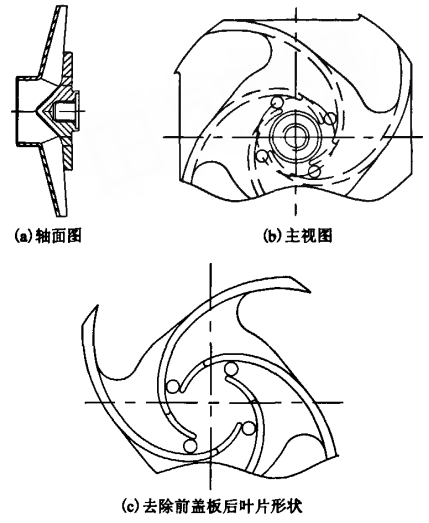


图1 双"S"形叶轮结构示意图

Fig. 1 Structural sketch of dual"S" impeller

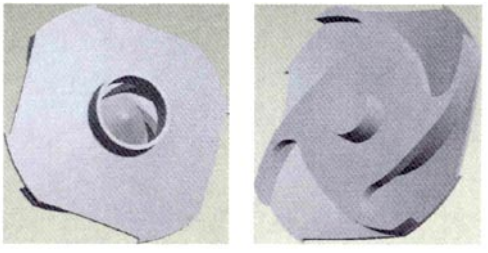


图2 双"S"形叶轮三维图

Fig. 2 Three-dimensional contour of dual"S" impeller

1.1.1 加大流量设计参数选择

文献[5]列出了流量在3～6 m^3/h时的流量放大系数K_1取1.7，比转速在23～30时的比转速放大系数K_2取1.48. 本设计中泵的比转速为20，故取$K_1=1.7$，$K_2=1.5$. 应用公式(1)和式(2)计算放大后流量和扬程.

$$Q'=K_1Q, \tag{1}$$

$$n_s'=K_2n_s, \tag{2}$$

式中Q，n_s为设计流量和比转速；Q'，n_s'为放大后计算流量和比转速.

1.1.2 叶轮进口直径

$$D_j=\sqrt{D_0^2+D_h^2},$$

式中D_h为轮毂直径，m；D_0为叶轮进口有效直径，m.

万方数据

$$D_0 = k_0 \sqrt[3]{Q/n},$$

式中 Q 为流量，m^3/s；n 为转速，r/min；k_0 为修正系数，这里取 5.5.

1.1.3 叶轮外径

对于低比转速泵，应着重考虑降低叶轮外径 D_2 以减少圆盘摩擦损失. 文献[7]提供的 D_2 计算公式如下：

$$D_2 = K_{D_2} \sqrt[3]{Q/n},$$

式中 $K_{D_2} = (9.5 \sim 10)(n_s/100)^{-1/2}$；$n_s$ 为比转速.

1.1.4 叶轮出口宽度

低比转速泵适当增大叶轮出口宽度 b_2 可以提高 H，减小 D_2，且有利于叶轮的制造，使叶轮获得较好的流道形状和较高的水力效率. 文献[5]提供的 b_2 计算公式如下：

$$b_2 = 0.78\left(\frac{n_s}{100}\right)^{0.5} \times \sqrt[3]{Q/n}.$$

1.1.5 叶轮叶片的出口安放角

研究表明适当增大叶轮出口安放角 β_2 可以提高 H，减小 D_2，以减少圆盘损失，从而提高效率 η，但 β_2 不宜取过大，否则会使流道弯曲严重，动扬程增加. 根据文献[4]提供的 n_s 与 β_2 的关系表，查得比转速在 22～30 范围内，β_2 取 32°～40°.

1.1.6 叶片包角

由于叶片数较少，使包角 θ 较一般离心泵大，θ 取 150°～200°，大的包角有利于充分传递功率.

1.1.7 叶片绘型

低比转速叶轮一般使用圆柱形叶片，结构简单，也很紧凑. 叶片绘型可采用方格网保角变换法，或采用变角对数螺旋线作为叶片型线进行绘型. 本设计采用方格网法.

根据计算，取叶轮主要几何参数：$D_j = 52$ mm，$D_2 = 184$ mm，$b_2 = 6$ mm，$\beta_1 = 12°$，$\beta_2 = 40°$，$\theta = 185°$.

2 泵材料的选择

碱泵所输送的介质具有强腐蚀性，且温度较高，其苛刻的腐蚀环境对泵的可靠性要求较高，泵一旦出现故障，整个系统只能立即停止运行. 因此，要求碱泵的叶轮、轴、轴承、密封件及壳体的材料除耐腐蚀外还必须耐高温.

镍是化工生产中耐蚀性能非常好的材料，具有优异的耐碱性腐蚀性能. 在苛性碱溶液中，镍表面能形成一种坚固的保护膜，阻止镍的腐蚀，即使在高温条件下也相当稳定. 同时镍材还具有优异的机械性能、加工性能，耐高温，稳定的金属性能和良好的焊接性能. 因此，镍材被广泛用在氯碱工业中用来制造蒸发器、储罐、管道、泵和阀门等，是氯碱工业的理想材料.

但镍材造价昂贵，如果通过研制新材料来替代进口泵材料，将会带来极大的经济效益，加速推进国产化. 根据美国材料与试验学会镍及镍合金铸件的标准规范[8]，笔者研制出新材料 HS－1.

在新材料 HS－1 中，应严格控制碳(C)、镍(Ni)、铬(Cr)、钼(Mo)的成分. 适当降低碳含量，能提高材料抗晶间腐蚀性能. 镍是基本元素之一，保证材料对苛性碱或中等还原性介质的耐蚀性及良好的机械性能，并保持高铬高钼合金的稳定性，使之获得单一的奥氏体组织结构，这一点对合金的生产和加工非常重要. 铬和钼能够提高对各种介质温度的适应能力，分别提供抗氧化和抗还原环境能力，并共同起到抵抗局部腐蚀(点蚀和缝隙腐蚀)的作用. 表 1 为 HS－1 材料合金成分，图 3 为铸件在 600 倍显微镜下的金相组织，图 4 为固溶处理后的金相组织.

表 1 HS－1 合金成分

Tab. 1 Component of HS－1 alloying %

合金	Ni	C	Cr	Mo	Fe	Mn
HS－1	58	0.05	15.5	16	5.5	0.5



图 3 铸件金相组织

Fig. 3 Microstructures of nickel-base alloy

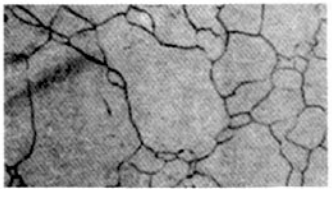


图 4 固溶热处理后金相组织

Fig. 4 Microstructures of nickel-base alloy after heat treatment

由图 3 和图 4 的金相组织照片可以观察到材料的金相组织为奥氏体，属于镍基合金. 在铸态下的树

枝晶，经过固溶热处理后能够看到典型奥氏体组织. 材料经固溶热处理后能提高材料耐晶间腐蚀或耐应力腐蚀能力. 固溶热处理包括两个过程：

(1)将合金加热到 1 040 ~ 1 150 ℃，保持足够长的时间；

(2)在 2 min 之内快速冷却，可水冷淬火或材料厚度在 1.5 mm 以上时可快速空冷至黑色状态(400 ℃左右).

3 泵结构的选取

对于高温泵，一般采用的结构是中间支撑式，以保证泵与电机的中心高不变，但碱泵输送的介质温度需保持在 160 ℃，否则易形成结晶，降低效率，甚至堵塞流道，烧毁电机. 为了工艺需要及满足连续运转要求，设计上执行 API610(10 版)标准《石油、重化学和天然气工业用离心泵》，选用 OH1 型单级悬臂结构，如图 5 所示.

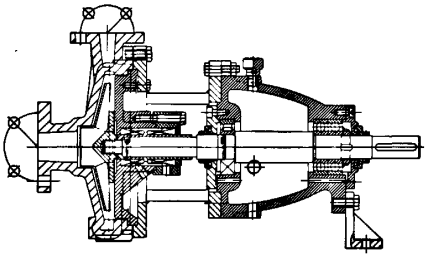


图 5 碱泵结构图

Fig. 5 Structure of alkali pump

4 试验结果分析

该泵在实验室进行了试验研究，对应设计点的性能指标优于进口样机，试验结果对比如表 2 所示，HS1K1.5×1 -82 镍泵的性能曲线如图 6 所示.

表 2 国产化泵与进口泵性能对比

Tab. 2 Performance comparison of domestic pump vs import pump

类型	流量/(m^3/h)	扬程/m	效率/%	轴功率/kW
进口泵	4	50.2	15.82	3.97
国产化泵	4	52.3	16.18	3.50

由性能曲线可以看出，泵扬程 H - 流量 Q 曲线平缓，不出现驼峰，扬程对流量的变化率就较小，工况稳定，且无过载现象，满足工程需要，符合设计要求. 这主要是由于双“S”形叶轮叶片数少，有利于流道的通畅，从而提高了介质的通过能力，在输送高粘性、易结晶或含少量颗粒介质时有很好的流动性.

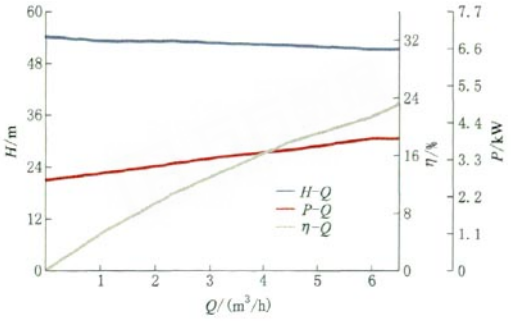


图 6 HS1K1.5×1 -82 镍泵的性能曲线

Fig. 6 Performance curves of HS1K1.5×1 -82 nickel pump

5 应用实例分析与总结

如图 7 所示，碱泵在合肥氯碱厂运行一年以来，运行稳定，流量和扬程满足工况要求，各过流部件无明显腐蚀，用户反映良好.



图 7 国产化镍泵应用在氯碱厂

Fig. 7 Domestic nickel pump used in Chlor-Alkali factory

碱泵采用 HS -1 镍基合金材料，能保证泵在高温强腐蚀性介质中安全运行，延长泵使用寿命，较进口泵降低设备成本. 由于材料本身耐高温，且为满足工艺需要，泵体采用 OH1 型单级悬臂结构.

背开式双“S”形方形前盖板叶轮有利于输送粘性介质，使流道通畅，改善水力性能，提高泵效率. 此种叶轮形式能广泛应用于氯碱工业，并为设计小流量、高粘性、腐蚀性强介质泵提供设计参考.

参考文献(References)

[1] 魏宗胜. 氯碱和纯碱工业用泵[J]. 化工设备设计，1994(6)：29 -39.

Wei Zongsheng. Chlor-alkali and soda ash industry pumps[J]. *Chemical Equipment Design*, 1994(6): 29 -39. (in Chinese)

(下转第 159 页)

[3] 王福军. CFD 在水力机械湍流分析与性能预测中的应用[J]. 中国农业大学学报, 2005,10(4):75 - 80.
Wang Fujun. Application of CFD to turbulent flow analysis and performance prediction in hydraulic machinery [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2005, 10 (4):75 - 80. (in Chinese)

[4] 汤方平,刘 超,周济人,等. 低扬程贯流泵装置模型试验研究[J]. 水泵技术, 2004(4):28 - 31.
Tang Fangping, Liu Chao, Zhou Jiren, et al. Study on model test of low-head tubular pumping system [J]. *Pump Technology*, 2004(4):28 - 31. (in Chinese)

[5] 关醒凡,商明华,谢卫东,等. 后置灯泡式贯流泵装置水力模型[J]. 排灌机械, 2008,26(1):25 - 28.
Guan Xingfan, Shang Minghua, Xie Weidong, et al. Hydraulic model and its pilot-plant unit for rear bulb-type cross-flow pump[J]. *Drainage and Irrigation Machinery*, 2008,26(1):25 - 28. (in Chinese)

[6] Date A W. *Introduction to Computational Fluid Dynamics* [M]. New York: Cambridge University Press, 2005.

[7] 中水北方勘测设计研究有限责任公司. SL 140—2006 水泵模型及装置模型验收试验规程[S]. 北京:中国水利水电出版社,1997.

(责任编辑 张文涛)

(上接第 139 页)

[2] Thomas F O'Brien, Tilak V Bommaraju, Fumio Hine. *Overview of the Chlor-Alkali Industry*[M]// *Handbook of Chlor-Alkali Technology: Volume I*. New York: Springer US,2005:37 - 74.

[3] 牟介刚,李 思,郑水华,等. 离心泵叶轮出口盖板形状对水力性能的影响[J]. 排灌机械,2009,27(5):323 - 326.
Mou Jiegang, Li Si, Zheng Shuihua, et al. Relationship between hydraulic performance of centrifugal pump and shape of impeller shroud[J]. *Drainage and Irrigation Machinery*,2009,27(5):323 - 326. (in Chinese)

[4] 李 涛,尚家巨,郝 宁. 星形叶轮的特点及其特性分析[J]. 通用机械,2007,6(7):70,94.
Li Tao, Shang Jiaju, Hao Ning. The characteristics and analysis of star-like impeller[J]. *General Machinery*, 2007,6(7):70,94. (in Chinese)

[5] 袁寿其,曹武陵,金树德,等. 低比转速离心泵的理论与设计[J]. 排灌机械,1992,10(3):29 - 36.
Yuan Shouqi, Cao Wuling, Jin Shude, et al. The theory and design of low specific speed centrifugal pump[J]. *Drainage and Irrigation Machinery*, 1992, 10(3):29 - 36. (in Chinese)

[6] 倪永燕,袁寿其,袁建平,等. 低比转速离心泵加大流量设计模型[J]. 排灌机械,2008,26(1):21 - 24.
Ni Yongyan, Yuan Shouqi, Yuan Jianping, et al. Model of enlarged flow design for low specific speed centrifugal pump[J]. *Drainage and Irrigation Machinery*, 2008, 26 (1):21 - 24. (in Chinese)

[7] Tuzson J. *Centrifugal Pumps Design*[M]. New York: John Wiley & Sons Inc,2000.

[8] Standard Specifi-cation for Castings, Nickel and Nickel Alloy[S]. ASTM,2003.

(责任编辑 徐云峰)

万方数据