

模压不锈钢叶轮室在大型轴流泵中的应用浅析

丁超¹, 卢丽¹, 顾越²

[1. 日立泵制造(无锡)有限公司, 江苏 无锡 214000; 2. 苏州市水利工程建设处, 江苏 苏州 215000]

摘要: 模压轴流泵不锈钢叶轮室主要用于大型给排水、远距离送水以及防洪排涝、城市河道调水、灌溉等大型重点水利工程的大口径叶片可调轴流泵。这些工程关系到国计民生, 具有重大的社会效益和经济效益。随着社会的发展、技术的进步, 这些大型水利工程不仅对水泵的水力性能、结构性能都提出很高的要求, 同时也对水泵的加工工艺、制造质量和抗汽蚀性能等提出了更高的要求。模压不锈钢叶轮室具有质量可靠、抗腐蚀汽蚀性能优、外观整洁美观、制造周期可控等优点。鉴于此, 在设计、生产大型轴流泵时, 对核心水力零件——叶轮室探索应用模压不锈钢焊接的新工艺、新结构, 全面提高叶轮室的性能和质量。

关键词: 汽蚀失重; 模压焊接; 分半叶轮室; 轴流泵

中图分类号: TV675

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)12-0339-04

Brief Analysis on Application of Molded Stainless Steel Impeller Chamber in Large Axial Flow Pump

DING Chao¹, LU Li¹, GU Yue²

[1. HITACHI Pump Manufacture (Wuxi) Co., Ltd., Wuxi 214000, China; 2. Suzhou Water Conservancy Engineering Construction Office, Suzhou 215000, China]

Abstract: The stainless steel impeller chamber of molded axial flow pump is mainly used for the large-diameter blade adjustable axial flow pumps in the large-scale water supply and drainage, long-distance water conveyance, flood control and waterlogging drainage, urban river water transfer, irrigation and other large-scale key water conservancy projects. These projects are related to the national economy and the people's livelihood, and have the significant social and economic benefits. With the development of society and the advancement of technology, these large-scale water conservancy projects put forward not only the high requirements for the hydraulic performance and structural performance of water pumps, but also the higher requirements for the processing technology, manufacturing quality and cavitation resistance of water pumps. The molded stainless steel impeller chamber has the advantages of reliable quality, excellent corrosion and cavitation resistance, neat and attractive appearance, and controllable manufacturing cycle. In view of this, when the large axial flow pumps are designed and manufactured, the application of new processes and new structures of molded stainless steel welding is explored for the impeller chamber of core hydraulic parts to comprehensively improve the performance and quality of the impeller chamber.

Keywords: cavitation weight loss; molded welding; split-into-half impeller chamber; axial flow pump

0 引言

轴流泵流量扬程曲线较陡, 固定叶片角度运行时高效区范围较窄^[1], 为满足泵站变化的水位条件使水泵在高效区内稳定运行, 大型轴流泵大都设计为叶片角度可调的转轮结构。叶片沿转动轴线翻转角度, 叶片外缘与叶轮室需是球面配合, 为使叶轮室可以安装, 其结构必须是分半结构。水利水电工程

水泵基本技术条件规定, 叶轮叶片外缘与叶轮室之间的单边间隙应小于0.1%叶轮直径^[2]。为提高水泵容积效率^[3], 减小叶片与叶轮室间隙回流, 会将单边间隙控制在0.08%~0.1%叶轮直径, 这要求叶轮室有更高的球面形状公差, 保证运转间隙均匀。

轴流泵运行的时候, 叶轮进口部位液体在收缩断面处流速增加, 产生负压, 当压力降低到一定程度时, 就会产生汽蚀空泡。携带汽蚀空泡的液体流动到高压处, 叶片外缘与叶轮室间隙空间减小, 空泡体积减小以至溃灭, 产生水泵汽蚀现象^[4]。空泡溃灭产生的冲击, 对叶轮室产生连续破坏作用, 造成金属

收稿日期: 2025-07-30

作者简介: 丁超(1987—), 男, 学士, 工程师, 从事水泵设计工作。

失重,损坏叶轮室,并产生振动噪声、高频压力脉动。招标文件一般规定,在满足约定的叶轮最小淹没水位运行时,累计运行6 000 h,叶轮外壳汽蚀失重不超过 $0.55D^2$ kg(D 为叶轮直径m),汽蚀部位最大深度不得超过2.5 mm(从母材的原始表面量起)。

1 轴流泵大型化趋势

我国幅员辽阔,但人多地少,人均耕地仅800.4 m²,不足世界人均耕地1/4。国民经济的稳定以农业为基础,水利是农业以至国民经济的命脉。我国降水量时间分配不均,6—9月份降雨量占年降水总量4/5,南方台风一次暴雨量可占全年降水总量4/5;年际变化大,丰枯年降水量可能相差5~10倍之多,北方不少河流连枯期大于5年,黄河自20世纪末以来常出现断流,甚至一年数次断流。水资源地域分布悬殊,黄、淮、海及东北诸河流域耕地占全国总耕地60%,水资源仅为全国总量1/7。加之地形复杂,山地、丘陵和崎岖高原占全部陆地面积3/5,平原不足1/8。自然条件较好、经济发达的地区多沿江(河)滨湖,易生涝灾。随着城市化及部分城市向国际性大都市迈进的趋势,城市供、排水或防洪要求愈高。基于上述我国国情和建设、发展的需要,兴建大型轴流泵站用于提水灌溉、排涝及跨流域翻水调水工程^[5],必为抗御自然灾害、优化水资源配置、改善生态和生活环境、保证农业稳产高产和国民经济持续发展的主要水利措施之一。大型轴流泵站装机流量大于100 m³/s,按5台水泵机组,4用1备规划,单泵流量大于25 m³/s,水泵叶轮直径大于2 m。轴流泵大型化,可以满足高效大流量输水调水的需求;加大叶轮直径,不仅可以提高水泵机组运行效率,还可以极大的增加水泵流量性能,水泵输出流量与叶轮直径成3次方关系。

2 大型轴流泵叶轮室现状和存在的问题

大口径叶轮室采用铸件工艺造型,内室为球面形状,沿轴线中开分半用于安装,分半哈夫面螺栓把紧,组成整体叶轮室。常见的结构材质有以下两种形式。

(1)铸钢叶轮室内衬不锈钢。叶轮室主体采用ZG270-500铸钢,内室中部衬焊环形1Cr18Ni9Ti不锈钢板材,高度一般为叶轮室高度的1/3~1/4。不锈钢衬焊段有防腐性和一定的抗汽蚀性,腐蚀和汽蚀剥落相较铸钢段更少,保证了部分叶片运行间隙,减缓

了水泵效率的降低。但是还存在以下问题:a.铸件尺寸大,外表面布置环筋纵筋,结构复杂,铸造流动性差,铸件缺陷多,严重的无法修补,报废后影响交期;b.叶轮室铸钢体需要横向错位钻出塞焊孔,不锈钢需贴紧叶轮室塞焊,焊接不良将导致衬焊段脱落、鼓包和叶轮室漏水;c.塞焊热量过于集中^[6],叶轮室不规则变形过大,超过加工余量而报废;d.后期维修不便,铸钢叶轮室腐蚀汽蚀严重时(见图1),无法焊补时,采用车大叶轮室内径,更换不锈钢内衬,并配套加大叶轮直径的方法,确保叶片运行间隙。

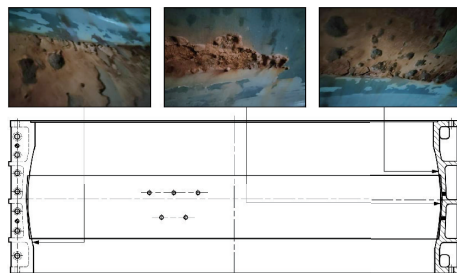


图1 铸钢叶轮室腐蚀汽蚀失重图

(2)铸不锈钢叶轮室。叶轮室全部由不锈钢铸造而成,内室和外表面均有防腐性。但是存在以下问题:a.铸件受限于铸造流动性,铸件壁厚大,整体重量重,造价高昂,价格没有市场竞争力;b.铸件尺寸大,外表面布置环筋纵筋,结构复杂,不锈钢铸造流动性更差,外观质量不易保证,铸件缺陷更多,易产生报废。缺陷修补焊接坡口深度超过壁厚的22%或25 mm(两者中取较小者)、或其面积超过65 cm²、或承压铸件水压试验漏水时,均认为是重大缺陷焊补^[7],不锈钢铸造零件作报废处理。

3 模压不锈钢叶轮室特点和优势

模压不锈钢叶轮室采用不锈钢中厚板^[10]作为原材料,结构为半个叶轮室采用纵向分3块,整个叶轮室分6块,压制成型后焊接。焊缝结构为2/3双V形坡口^[8],内大外小,内侧 α 角40°,外侧 α 角60°,清根焊透后UT探伤。叶轮室外圆布置6道纵筋,2道横筋,纵筋为整体结构,横筋遇纵筋分割焊接。叶轮室两端焊接法兰,法兰与叶轮室及纵筋为落座焊,焊缝分布均匀焊接长度足,结构整体性好。模压不锈钢叶轮室具有以下优势。

(1)不锈钢板材原材料质量控制优于铸件,由大型钢厂批量制作,材质晶相均匀。规避了不锈钢铸件气孔、裂纹、夹砂、缩松等铸造缺陷。

(2)标准依据充分,样片理化试验验证,防腐蚀

抗汽蚀失重性能更优。江河湖泊、城市污水使用 04Cr13Ni5Mo 马氏体不锈钢^[9],执行不锈钢热轧钢板和钢带标准,统一数字代号^[10]S41595。海水等高氯离子浓度的腐蚀性介质使用 S31803 双相不锈钢^[11],执行压力容器和一般用途铬及铬-镍不锈钢钢板标准技术条件标准。

(3)相较塞焊内衬工艺,模压不锈钢焊接工艺焊接热量分布均匀不易变形,球面随形压制,毛坯尺寸可控,叶轮室壁厚利用率高,加工余量 2~3 mm 即可,材料利用率高,节能减排。

(4)不锈钢型材放线定位焊接,结构整齐,外观整洁美观,避免了铸件外表粗糙,浇帽口割除后需要修整打磨。筋板焊接预留避让焊缝用过焊孔,在叶轮室设置振动监测传感器时,可用于信号线缆贴紧设备穿线走线,保护线缆的同时也提高了规整感。

(5)制造周期可控,较铸造零件时间大为缩短。取消了大型铸件砂箱及零件模具,节省了模具造型制作时间,也不需要铸造流程的系统模拟,避免了铸件缺陷报废问题。

4 马氏体不锈钢应用及焊接特点

目前普遍采用的马氏体不锈钢可分为 Cr13 型马氏体不锈钢和低碳马氏体不锈钢,以及超级马氏体不锈钢。04Cr13Ni5Mo 为低碳马氏体不锈钢,在 Cr13 型马氏体不锈钢基础上,在大幅度降低碳含量的同时, w(Ni)控制在 4%~6% 的范围,还加入少量的 Mo、Ti 等合金元素的一类高强马氏体钢。除具一定的耐腐蚀性能外,还具有良好的抗汽蚀、磨损性能,因此在水轮机及大型水泵中有广泛地应用。

低碳马氏体不锈钢有较好的焊接性,由于其 w(C)已降低到 0.05%~0.03% 的水平,因此从高温奥氏体状态冷却到室温时,可全部转变为低碳马氏体,没有明显的淬硬倾向。不同的冷却速度对热影响区的硬度没有显著的影响,具有良好的焊接性,该类钢经固溶和一次回火或二次回火热处理后产生回火马氏体^[12](见图 2),由于韧化相逆变奥氏体均匀弥散分布于回火马氏体基体,因此,具有较高的强度和良好的塑韧性,表现出强韧性的良好匹配。与此同时,其抗腐蚀能力明显优于 Cr13 型马氏体钢。

5 双相不锈钢应用及焊接特点

目前普遍采用的双相不锈钢可分为 Cr18 型、

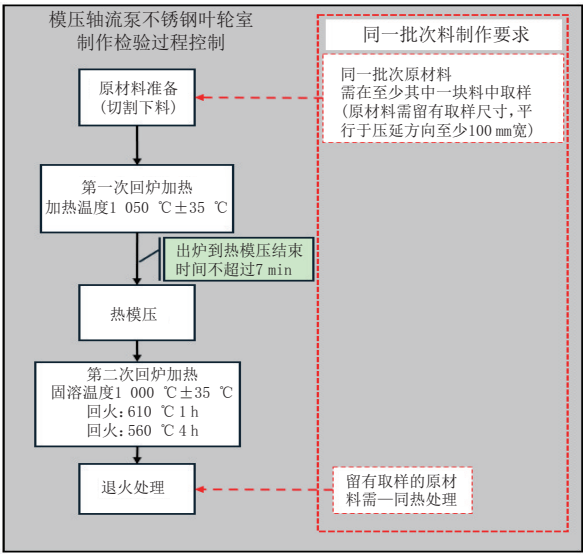


图 2 制作检验过程控制图

Cr23 型(不含 Mo)、Cr22 型、Cr25 型四类。S31803 双相不锈钢为 Cr22 型,其点蚀指数 PREN 为 35(PREN= w(Cr)+3.3 w(Mo)+16 w(N))>40 时,称为超级双相不锈钢^[13]。它的主要特点是屈服强度可达 400~600 MPa,是普通不锈钢的 2 倍,因此可以节约用材,降低设备制造成本。在抗腐蚀性能方面,特别是在介质环境比较恶劣(如 Cl⁻ 含量较高)的条件下,双相不锈钢的抗点蚀、缝隙腐蚀、应力腐蚀及腐蚀疲劳性能明显优于通常的 Cr-Ni 及 Cr-Ni-Mo 奥氏体型不锈钢。可与高合金奥氏体不锈钢相媲美。

S31803 双相不锈钢具有良好的焊接性,与铁素体不锈钢及奥氏体不锈钢相比,其既不像铁素体不锈钢的焊接热影响区,由于晶粒严重粗化而使塑韧性大幅度降低,也不像奥氏体不锈钢那样,对焊接热裂纹比较敏感。因此,铁素体-奥氏体双相不锈钢在石油化工设备、海水与废水处理设备、输油输气管线、造纸机械等工业领域获得越来越广泛地应用。

6 成果及应用

经过近些年的不断研发和投入,在成型焊接、整体热处理^[14]、防变形加工(见图 3)、尺寸控制(见图 4)等方面形成了技术积累和可靠的工艺路线。产品已运用到许多重大工程项目中(见表 1),并且运行可靠稳定,得到了客户的认可。表 1 中部分列举了近 3 年较大直径的模压叶轮室产品业绩。04Cr13Ni5Mo 马氏体不锈钢材质用于江河水、城市排涝,S31803 双相不锈钢用于海水介质。



图3 直径3 400 mm 叶轮室加工图



图4 直径3 400 mm 叶轮室尺寸测量图

表1 业绩参数表

编号	工程项目	叶轮室 直径/mm	叶轮室 材质	投运 时间
1	浙江郭西湾闸站	Sφ3040	04Cr13Ni5Mo 马氏体不锈钢	2022 年
2	上海中横沥南泵闸	Sφ2000	04Cr13Ni5Mo 马氏体不锈钢	2022 年
3	浙江界牌硐泵站	Sφ3400	S31803 双相不锈钢	2023 年
4	安徽引江济淮蒙城站	Sφ3600	04Cr13Ni5Mo 马氏体不锈钢	2023 年
5	湖南苏家吉泵站 (一站)	Sφ2800	04Cr13Ni5Mo 马氏体不锈钢	2004 年
6	湖南苏家吉泵站 (二站)	Sφ3040	04Cr13Ni5Mo 马氏体不锈钢	2024 年
7	浙江北仑穿山泵站	Sφ2600	S31803 双相不锈钢	2025 年

7 综合性能对比

虽然在许多大(1)型、大(2)型、中型泵站主泵^[15]设备的技术规范及产品要求中指定叶轮外壳采用铸钢内衬不锈钢叶轮室结构材质,但模压不锈钢叶轮室的综合性能优势(见表2)是显而易见的。

8 结 语

模压轴流泵不锈钢叶轮室拥有可靠的质量、优异的性能、合理的造价,是大口径轴流泵叶轮室的发

表2 综合性能对比表

项目	模压不锈钢叶轮室	内衬不锈钢叶轮室
材质	04Cr13Ni5Mo 马氏体不锈	本体 ZG270-500 铸钢,内衬
结构	钢模压焊接	1Cr18Ni9Ti 不锈钢(520 mm 高)
防腐耐汽蚀	内腔全表面均有防腐耐汽蚀剥落性能	内衬不锈钢段有防腐性能,1Cr18Ni9Ti 耐汽蚀剥落性能不如 04Cr13Ni5Mo
工艺稳定性	模压焊接,材质均匀,无夹渣裂纹铸件缺陷,质量可靠	衬焊段开孔塞焊,工艺复杂,衬焊不锈钢有鼓起突起概率,与叶片运行时碰擦,导致运行事故
材料力学性能	抗拉强度≥795 MPa 屈服强度≥550 MPa 硬度 HB 221-294 冲击韧度 aK/(J·cm ⁻²)≥50 力学性能更优	抗拉强度≥500 MPa 屈服强度≥270 MPa 硬度 HB 180-200 冲击韧度 aK/(J·cm ⁻²)≥35 力学性能稍逊
综合评价	优秀	良好

展方向,符合产业和市场绿色可持续的主流。在防腐耐磨及抗汽蚀失重性能方面表现优秀,是技术升级迭代的发展方向。我们始终探索应用新工艺、新结构,以先进的技术和优异的质量建立世界领先的水泵制造企业,为社会做出贡献。

参考文献:

[1] 关醒凡.轴流泵和斜流泵[M].北京:中国宇航出版社,2009:131-136.
[2] SL/T 806—2020,水利水电工程水泵基本技术条件[S].
[3] 关醒凡.现代泵理论与设计[M].北京:中国宇航出版社,2011:600-606.
[4] 查森.叶片泵原理及水力设计[M].北京:机械工业出版社,1988:83-84.
[5] 严登丰.泵站工程[M].北京:中国水利水电出版社,2005:7-28.
[6] 陈祝年.焊接工程师手册[M].北京:机械工业出版社,2002:1243-1251.
[7] GB/T 2100—2017,通用耐蚀钢铸件[S].
[8] 中国机械工程学会焊接学.焊接手册(第3册)[M].第2版.北京:机械工业出版社,2001:38-49.
[9] GB/T 4237—2015,不锈钢热轧钢板和钢带[S].
[10] ASTM A240/A240M—2012,压力容器和一般用途铬及铬-镍不锈钢钢板标准技术条件[S].
[11] 纪贵.世界标准牌号手册[M].北京:中国标准出版社,2003:276-279.
[12] 樊东黎.热处理工程师手册[M].北京:机械工业出版社,2004:12-14.
[13] 成大先.机械设计手册[M].北京:化学工业出版社,2002:117-125.
[14] 沈阳水泵研究所,中国农机化研究院.叶片泵设计手册[M].北京:机械工业出版社,1983:223-241.
[15] GB/T 50265—2022,泵站设计规范[S].