

液化天然气潜液泵关键技术及研发方案

谭宏博, 厉彦忠, 梁 骞, 李 欢

(西安交通大学制冷与低温工程研究所, 陕西 西安 710049)

摘要:分析了液化天然气(LNG)潜液泵的关键技术:包括密封、电机的冷却及润滑、LNG 泵内的汽蚀防范以及推力自平衡技术(TEM)等。提出了我国自主研发的技术攻关方案,建议从 LNG 潜液泵电气设备和泵体部件研发 2 个方面展开研究,为包括 LNG 潜液泵在内的低温液体输送泵自主研发提供参考。

关键词:潜液泵;液化天然气;推力平衡装置;关键技术

中图分类号:TB655

文献标识码:A

文章编号:0253-4320(2007)12-0052-03

Key technologies and research schemes for submerged pumps for liquefied natural gas

TAN Hong-bo, LI Yan-zhong, LIANG Qian, LI Huan

(Institute of Refrigeration and Cryogenics Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The key technologies for submerged pump for liquefied natural gas(LNG) including seal technique for electrical motor, cooling and lubrication of submerged motor and Thrust Equalizing Mechanism (TEM) are discussed in this literature. Further more, the research schemes are also proposed in the paper. It is suggested that the key problems concerned with pump body and submerged cryogenic motor should be firstly investigated. It is expected that this paper would provide some references for developing our own patented submerged motor LNG pumps.

Key words: submerged (motor) pumps; liquefied natural gas(LNG); thrust equalizing mechanism(TEM); key technology

当前我国大力发展液化天然气(LNG)产业,成为调整能源构成、缓解对石油供应的依赖和压力、保障我国能源安全的重大举措。在 LNG 整个产业链中,其输出、转运、接收、利用等各个环节都将用到低温泵,这使 LNG 低温输运泵在产业链中扮演了举足轻重的角色。目前,美国 J. C. Carter 公司、荏原(Ebara)国际公司,日本的 Nikkiso、Shinko 公司,法国的 Cryostar 公司等少数几家公司基本垄断着 LNG 输送泵的供应,我国尚无拥有自主知识产权的相关产品。目前我国的 LNG 接收终端、气化站和液化天然气汽车(LNGV)加注站无一例外地采购国外进口产品,因此在我国大力发展 LNG 产业的大形势下,开展 LNG 输送泵的国产化研发势在必行。笔者分析了 1 种潜入式 LNG 低压输送泵的关键技术,并提出了该技术自主研发的主要内容。

1 LNG 低温潜液泵的关键技术

LNG 潜液泵是 1 种泵和电机一体潜入低温 LNG 中输送低温介质的机械。由于 LNG 的低温(储存压力为 0.1 MPa 时,饱和温度约为 -162°C)和易燃的特性,输送泵不仅要能承受低温的性能,而且对泵的气密性和电气安全性能要求更高^[1]。此外,低温

LNG 中的电机润滑和冷却、泵体中可能发生的 LNG 气化、电机转子与泵体叶轮共用同一根轴所带来的平衡性问题等,成为 LNG 潜液泵不同于一般泵体的主要特点,这些问题的应对措施就是 LNG 潜液泵的关键技术。

1.1 LNG 潜液泵的密封技术

LNG 潜液泵是将泵与电动机整体安装在一个密封的金属容器内,不需要轴封,也不存在轴封的泄漏问题,泵的进、出口用法兰结构与输送管路相连。因此,其密封问题就是电气连接处的密封。

为防止 LNG 沿着电缆从连接处泄漏到接线盒遇到火花发生爆炸,通常在外接电缆与接线盒处设置 2 道氮气密封保护系统,阻断 LNG 可能的泄漏通道。如果第 1 道 N_2 保护失效,第 2 道 N_2 密封系统仍可正常工作,而第 1 道 N_2 保护失效时其压力有显著变化,由此向安全监测装置报警^[2]。

1.2 低温下潜液式电机相关技术

浸入低温 LNG 中的电动机转矩与速度的对应关系和电流与速度的对应关系类似,在低温下启动转矩会有较大的降低。此类电机的功率为 1 000 ~ 2 300 kW,其启动电流大约需要满负载工作电流的 6.5 倍。为降低启动电流,软启动技术、自耦变压器和

收稿日期:2007-08-06

作者简介:谭宏博(1982-),男,博士生,主要从事 LNG 冷能回收相关技术的研究,029-82668738, tanhongbo@stu.xjtu.edu.cn;厉彦忠(1958-),男,博士,教授,博士生导师,从事低温换热器,低温气液两相流及 LNG 相关技术研究。

变频无级调节启动技术分别被成功地研制并应用^[3]。

此外,电机浸入低温液下被泵内液体冷却,冷却效果好,电机效率高且没有腐蚀的问题,电机绝缘性能不易劣化。轴承润滑也由 LNG 承担,具有良好的冷却和润滑效果。

1.3 防止 LNG 在泵内“汽蚀”技术

由于泵体浸入饱和状态下的 LNG 中,轻微的压降或者温升都可能造成 LNG 的气化^[4],由此可能产生“汽蚀”现象。特殊的螺旋诱导器被用来减小 LNG 在吸入口处的阻力,允许液体可以在较低的压力和液位下运转,并可以消除“死穴”,防止产生汽蚀。另外,经过精心设计的叶轮能使低温的 LNG 平滑地流动,且有充裕的汽蚀余量(NPSH)以防止汽蚀带来的危害。

1.4 LNG 潜液泵轴向受力平衡技术

由于电机转子与叶轮同轴,其轴向力和径向力受力不平衡直接影响泵和电机的寿命。此外,由于轴承是由 LNG 润滑,轴向力和径向力影响液膜的状态,极易造成严重的磨损。

现代 LNG 潜液泵普遍采用推力平衡机构(thrust equalizing mechanism, TEM)来平衡轴向推力。TEM 的上磨损环直径大于下磨损环,致使高速转动过程中合力向上,因此泵轴上的所有转动部件向上移动,此时叶轮的节流环调节缩小它与固定板的间距,限制通过磨损环的流动,并引起上闸室压力增加。由于上闸室压力的增加,此时推力向下,旋转部件又向下移动,因此固定板与叶轮节流环间的距离变大,上闸室压力减小(见图 1)。经过 TEM 反复连续的自调节,可以使利用 LNG 润滑的球形推力轴承在零轴向推力状态下运转,极大地提高了轴承的可靠性,并延长了 LNG 潜液泵的维修周期^[5-6]。

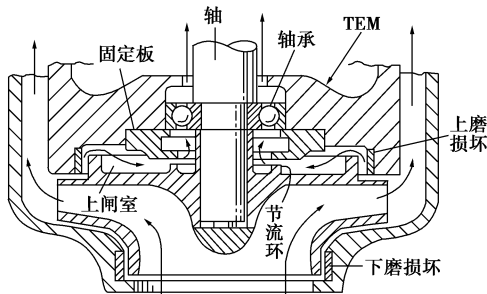


图 1 推力平衡装置

径向力的平衡是由 1 种对称扩散器叶片来实现(见图 2)。由于扩散器与流体是对称的,低温的 LNG 从叶轮中流出后进入轴向的扩散器,在其流量范围下具有完美的液压对称性。因此,潜液式 LNG 泵作用于叶轮上的径向力理论上为零^[7]。

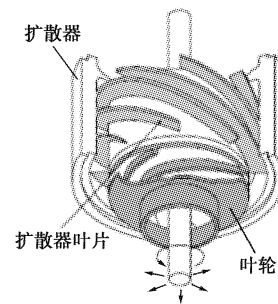


图 2 低温潜液泵的扩散器

2 开展 LNG 低温潜液泵自主研发的攻关内容

通过分析 LNG 潜液泵的关键技术,笔者提出了其主要研究内容,并建议对几项重要技术展开攻关。

2.1 LNG 潜液泵电气设备研究

电气设备研制主要包括低温电绝缘材料和低温电缆的研究、电气连接处的密封技术研究、潜液式电机的润滑冷却技术研究和电机低温工作特性研究几个方面。

(1) 电绝缘材料及电缆的低温性能研究

主要对电机转子、定子线圈及引线在 111 K 以下的低温性能进行实验研究,选择合适的绝缘材料和结构。低温电缆应采用聚乙烯和聚酯带组成综合绝缘层,易于实现与泵连接。日本 Tokyo Gas 公司所生产的 6 kV 电源输送低温电缆^[8](见图 3),其直径为 23 mm,具有良好的柔韧性,可实现弯曲半径超过电缆半径 10 倍以上,可承受最大电流为 300A,工作温度为 90~162℃。

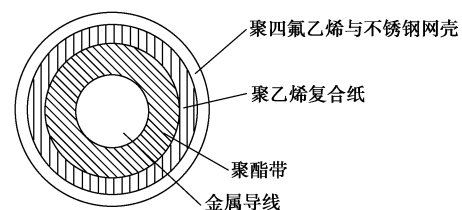


图 3 低温电缆的结构

(2) 电气连接的密封技术研究

由于 LNG 属易燃易爆物质,而且电机的接线盒应防爆,为了防止 LNG 沿着电缆泄漏到接线盒内遇到电火花发生爆炸,要对电机的外接电力系统进行密封和保护,使其能承受高压和高电压的冲击。日本 Nikkiso 公司研制的陶瓷气体密封端子和双头密封结构^[9](见图 4、5),具有很好的可靠性。所有密封件都采用特殊的焊接技术焊接而成。气体密封头采用 2 个端头,串联,中间腔内充有氮气,任一密封件的泄漏都不会让气体通过端头。充装氮气压力低于泵内压力,高于大气压力,任一端的泄漏都会引

起氮气压力的变化并报警。

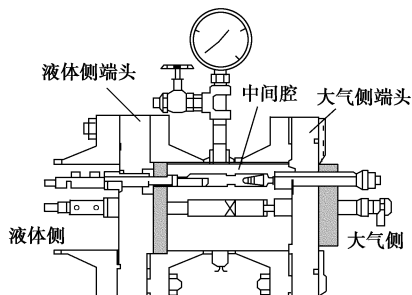


图 4 双头密封结构

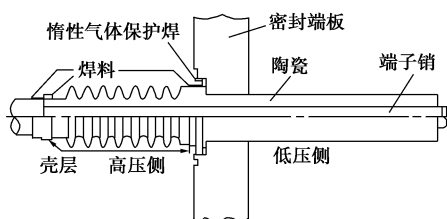


图 5 陶瓷气体密封装置

(3) 潜液式电机的润滑和冷却技术研究

由于电机浸在 LNG 中,被低温的 LNG 冷却,但由于被输送的 LNG 都在饱和温度附近,很小的温升或压降即可能造成 LNG 气化,因此应研究电机内部温度场分布,预测 LNG 气化情况。此外,LNG 潜液泵内的轴承及相关运动部件都由 LNG 润滑。由于 LNG 的黏度较低,使用的球形滚珠轴承很容易损坏,使用寿命很短。使用滑动轴承可以减少轴承的负荷,延长使用寿命 5 年以上^[8]。应开展 LNG 自润滑实验研究,分析液膜形成条件,通过测量轴承径向和轴向压力分布,分析 LNG 润滑下的轴承受力,研究不同低温液体对液膜形成的影响,研发 LNG 自润滑轴承技术。

(4) 低温下电机工作特性研究

低温泵的电动机转矩与普通空气冷却的电动机不同,在低温状态下,由于其电阻和磁力特性的变化,电动机的电力特性在低温下会发生改变,使得转矩有较大降低。因此需要研究电动机转矩变化的影响因素及特性曲线,了解电动机在不同工况下的启动特性。

2.2 LNG 潜液泵泵体研究

这部分内容主要围绕泵体的设计展开,可以借鉴常温流体泵的研发方法,但对于低温液体的汽蚀现象的研究是关键,因为被输送的 LNG 处于饱和温度,极易引起气化。另外,低温潜液泵的推力平衡技术也是一大特点。

(1) LNG 在泵内汽蚀规律研究

对低温液体的“闪蒸”和“汽蚀”现象进行理论分析,建立闪蒸数学模型,利用 CFD 技术模拟不同压降和流速下液体的闪蒸现象,根据数值计算结果开展实验研究。首先进行常温实验,通过可视化手段测量气泡数量,分析定流速、变背压条件和变流速条件下液体闪蒸规律。最后开展低温下液氮和 LNG 闪蒸实验,根据常温实验的经验,测量不同压降和流速下的气泡数量,研究其闪蒸特性。同时开展不同结构形式下汽蚀和闪蒸实验研究,从结构上改善汽蚀性能,指导泵体设计研制。

(2) 低温潜液泵叶轮及诱导轮结构设计与优化

利用 CFD 技术模拟具有三维旋扭叶片的叶轮和有螺旋通道的诱导轮内 LNG 三维非定常流动。采用三维 N-S 方程和标准 K- ϵ 模型,对转动部件与静止部件之间采用滑移网格技术建立交界面,模拟叶轮及诱导轮内三维流场,分析其压力场和速度场分布,并优化叶轮和诱导轮几何参数,提高 LNG 潜液泵整机性能并改善汽蚀特性,减少 LNG 气化。

(3) LNG 潜液泵自平衡机构的研究

TEM 技术是通过低温动力学手段消除作用在潜液泵轴承上的推力,也是 LNG 潜液泵的一个重要特点。应该开展自主设计的自平衡机构动力学研究,利用数值分析和实验研究的手段,对其进行优化设计,开发出可用于低温潜液泵的成熟产品。

3 结论

目前,LNG 潜液泵被应用于 LNG 工业链的众多环节当中,如大型储罐的罐内泵、LNG 船用泵、LNG 加注站用泵以及汽车燃料泵等。它是 LNG 产业中的重要设备,同时,其生产供应为美国、日本等少数国家所垄断,因此,开展 LNG 潜液泵的自主研发意义重大。

国外 LNG 潜液泵技术起步较早,已有产品投入实际工程应用。目前主要发展高压、大型、高效的低温潜液泵;国内相关技术基本空白,现已建成的 LNG 终端和加注站中全部采用进口泵。当前我国 LNG 发展迅速,形成国外进口与国内生产相结合的格局,可以预见 LNG 产业将蓬勃发展,LNG 潜液泵具有十分广阔的市场。

参考文献

- [1] 顾安忠,鲁雪生,汪荣顺,等.液化天然气技术[M].北京:机械工业出版社,2004.

(下转第 57 页)

依次流经两级叶片式生物反应器,两级之间相距800 mm。反应器安装在河道模拟试验装置中,试验系统流程图如图4所示。由进水池、出水池、反应区(由2个相同的反应器组成)、风泵、水泵、流量计等构件和设备组成。反应区截面尺寸为400 mm×700 mm,长度为2 730 mm;进水池尺寸为1 100 mm×1 096 mm×1 075 mm;出水池尺寸为1 500 mm×1 096 mm×1 075 mm。(所有实验装置均由PVC塑料板焊接成型)

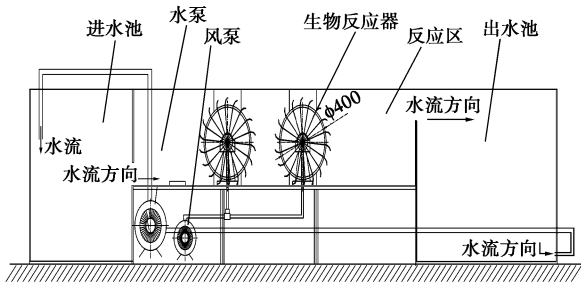
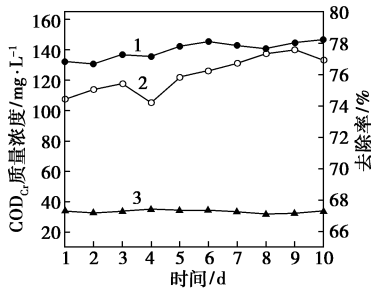


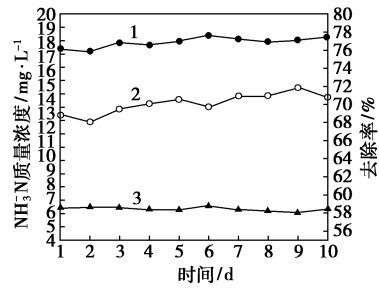
图4 试验工艺流程

试验时间从2006年6月10日—7月25日,气温为25~35℃,平均气温为30℃,运行工艺参数:叶轮转速2.5 r/min、曝气量2.5 m³/h、污水流量2.0 m³/h。试验污水水源为华南理工大学南湖侧的部分生活污水及实验室、办公室排出污水的混合水。进水COD_{Cr}的质量浓度100~140 mg/L, NH₃-N质量浓度15~20 mg/L。COD_{Cr}和NH₃-N去除效果分别如图5和图6所示。



1—进水;2—COD去除率;3—出水

图5 COD_{Cr}去除效果



1—进水;2—COD去除率;3—出水

图6 NH₃-N去除效果

可以看出,叶轮生物膜反应器对类似河流污水的低浓度污水有较好的处理效果,基质COD_{Cr}的平均去除率为76.7%,NH₃-N的平均去除率为70.6%。

4 结论

(1)叶轮生物膜反应器结构简单,易于被水驱动旋转,计算得出仅需0.066 m/s的水流速度即可驱动叶轮,适合河流处理污水。

(2)叶轮生物膜反应器集成生物膜技术和曝气氧化技术,处理效果较好,对低浓度污水的去除效果为:COD_{Cr}的平均去除率为76.7%,NH₃-N的平均去除率为70.6%。

参考文献

- [1] 2006年中国环境状况公报[EB/OL]. <http://www.sepa.gov.cn/ztd/sjhjr/2007hjr/tpbd56/200706/P020070605323023573963.pdf>.
- [2] 华南理工大学.一种转笼式悬浮填料生物污水处理方法及其装置:中国,200410077611.2[P].2005-08-17.
- [3] 江帆,陈维平,吴纯德,等.悬浮填料转笼式生物反应器的研制与应用[J].现代化工,2005,25(8):53-55.
- [4] Wesley Eckenfelder W. Industrial Water Pollution Control[M]. 3rd. New York:Jr McGraw-Hill Companies, Inc,2000.
- [5] Alan Seragg. Environmental Biotechnology[M]. London: World Book Publish Company,2000.
- [6] 黄卫星,陈文梅.工程流体力学[M].北京:化学工业出版社,2001.
- [7] 徐祖信.河流污染治理技术与实践[M].北京:中国水利水电出版社,2003. ■

(上接第54页)

- [2] 张翼飞,全晓龙.液化天然气(LNG)输送泵的特点与应用[J].水泵技术,2006(6):38-40.
- [3] Steve Rush. Submerged motor LNG pumps in sent-out system service[J]. Pumps and Systems,2004(3):32-37.
- [4] Coyle David A, Patel Vinod. Processes and pump services in the LNG industry[C]//Proceedings of the twenty-second international pump users symposium,2005:179-185.
- [5] Weisser G L. Modern submersible pumps for cryogenic liquids[J]. World Pumps,1994(1):23-25.

- [6] Loughman David, Cullen David. Submerged electric motor pumps for marine liquefied gas cargo[J]. World Pumps,1996(9):50-55.
- [7] 湖南力普吉实业有限公司. Ebara 低温潜液式离心泵[EB/OL]. [2007-6-15]. http://www.lpge.com/chs/3.files/Ebara_Catalogo.pdf.
- [8] Tokyo Gas Co Ltd. High head/large capacity in-tank LNG pump[EB/OL]. [2007-6-15]. http://www.tokyo-gas.co.jp/techno/stp/e_txt/36e.htm.
- [9] 湖南力普吉实业有限公司. Nikkiso 潜液泵宣传样本[EB/OL]. [2007-6-15]. http://www.lpge.com/chs/3.files/Nikkiso_Broch.pdf. ■