

旋涡泵研究现状及存在的问题分析

权辉 李瑾 李仁年 傅百恒

(兰州理工大学 能源与动力工程学院, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 随着国民经济的发展, 旋涡泵的应用领域也随之正在逐步扩大, 对于旋涡泵的研究具有重要的理论和应用价值。本文介绍了旋涡泵的分类和特点, 从流动机理、设计方法、空化性能、力学性能和特殊用途等角度讨论了国内外的研究现状; 其次, 从研究方法、研究成果的转化和测试方法等方面入手, 分析了相关研究中存在的问题; 最后, 根据前面所述的研究成果可以认定旋涡泵的研究在高科技应用产业中具有重要的现实意义且研究方法有待进一步完善。本文认为运用先进的内部流动测试手段, 展开旋涡泵密封性能、力学特性、内部漩涡的产生演变机理及控制方法、噪声及振动特性和控制方法将是旋涡泵的研究重点。

关键词: 旋涡泵; 研究现状; 存在的问题; 分析

中图分类号: TK172 文献标识码: A

DOI: 10.16146/j.cnki.rndlge.2016.06.001

引言

旋涡泵又称侧流道泵、摩擦泵、再生泵、涡轮泵和圆周泵等, 最初出现于1920年, 由德国的西门和亨施公司制造并称为Sihl泵加以推广使用^[1-2]。旋涡泵虽属叶片式泵, 但其工作原理、结构以及特性曲线等均与离心泵、轴流泵和混流泵等类型泵不同, 是一种小流量、高扬程的泵, 其比转速 n_s 一般低于40^[3], 旋涡泵结构如图1所示。

随着科技的进步, 加工工艺及条件的改善、材料成本降低、材料性能的提升, 旋涡泵大扬程、小流量、成本低廉、结构简单紧凑、易于加工、且借助于简单装置即可实现自吸等优点凸显, 广泛应用于动力、化工、仪器仪表、液压传动、热水器和医疗器械等行业^[4]。目前, 美国和日本学者提出应用旋涡泵来研制人工心脏泵^[5-6]; 由于其自身的特点越来越受到人们的青睐, 其应用范围正在从工业、农业扩展到医

学、航空航天等高科技产业中^[5-7]。

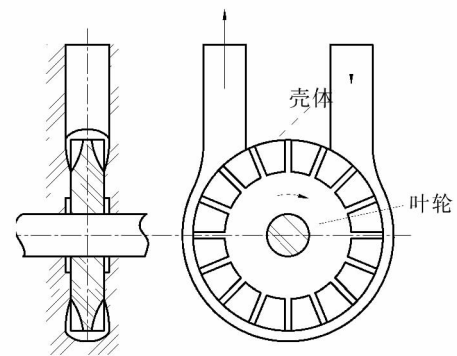


图1 旋涡泵结构

Fig. 1 The structure of Vortex pump

1 旋涡泵的分类和特点

1.1 旋涡泵的分类

(1) 按叶轮型式可分为开式与闭式, 而目前已出现介于开式和闭式叶轮之间的叶轮, 如图2所示。闭式叶轮叶片短, 是在叶轮圆盘外缘上铣削沟形成的, 叶轮的半径等于流道的内半径, 液体直接从吸入管道输送至流道中去; 开式叶轮, 叶片内半径小于流道内半径, 液体从吸入管进入叶轮, 经过叶片后进入流道, 叶片较长。半开式叶片相对疏散, 过流面积相对较大, 在叶片根部使压力最低点向叶片外径移动, 液流在进口和叶片根部的相对速度减小, 减小了旋涡泵的空化余量, 通过空化试验得到半开式旋涡泵具有较好的空化性能和运行性能^[8]。叶轮形式除与汽蚀有关外, 也与自吸能力及气液混输的工作能力有关。

收稿日期: 2015-12-06; 修订日期: 2015-12-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51579125, 51079066)

作者简介: 权辉(1984-), 男, 甘肃庆阳人, 兰州理工大学博士研究生。

通信作者: 李仁年(1963-), 男, 兰州理工大学教授。

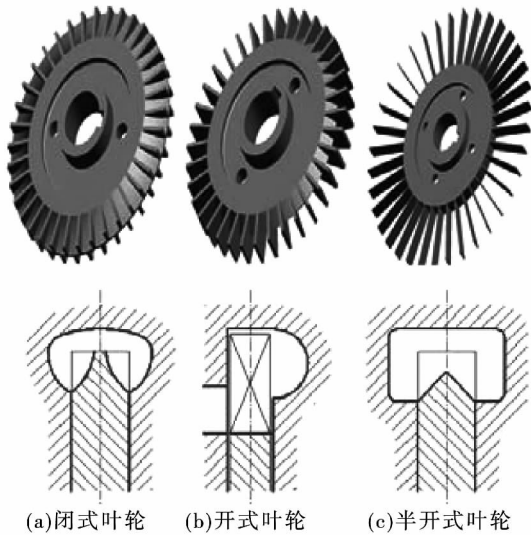


图 2 按叶轮型式分旋涡泵叶轮及结构示意图
Fig. 2 The layout of the vortex pump structure and different impeller types

(2) 按流道口与排出口相对位置分为 (a) 开流道旋涡泵、(b) 闭式流道旋涡泵、(c) 排出口为开流道的旋涡泵、(d) 向心流道旋涡泵,如图 3 所示。开流道式一般与闭式叶轮配合使用,其本身一般不具有自吸能力。开流道旋涡泵的效率较高,结构简单,但在不加安装任何附加设备之前不具有气液混输能力。排出口为开流道的旋涡泵加上辅助闭式流道旋涡泵叶轮或串联辅助叶轮后可以实现自吸和气液混输性能,但使用范围较窄。向心流道旋涡泵本身具有良好的自吸和气液混输性能,且效率比闭式流道旋涡泵高,但其加工制造的困难相对较大。闭式流道旋涡泵本身具有自吸和气液混输性能,但其效率较低。

(3) 按流道与叶轮的相对位置可分为 (a) 外围流道式旋涡泵、(b) 开式外围侧边(单侧或双侧)流道旋涡泵、(c) 闭式侧边(单侧或双侧)流道式旋涡泵。

除上述分类外,还可以按主轴安装位置分为立式旋涡泵与卧式旋涡泵;按级数分为单级和多级旋涡泵等形式。

1.2 旋涡泵的特点

旋涡泵和其它同类型泵相比具有如下的优点:

(1) 具有结构简单、紧凑、高扬程的特点。正是其体积小和重量轻的特点,使得其在舰船装备、航空航天、仪器仪表等领域有广泛的应用;

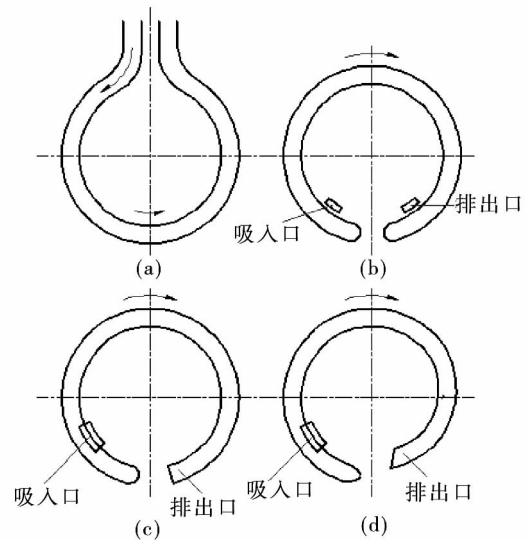


图 3 按流道口与排出口相对位置分
Fig. 3 The classification based on the relative position of the runner and the outlet

(2) 具有自吸性能或借助于简单设备就能实现自吸的特点。因此旋涡泵的管路更为简单,使用灵活方便,在民用和军用加油设备等领域中广泛使用;

(3) 很多旋涡泵具有气液混输的特点。部分产品可以输送含气量 50% 的流体,对于抽送含有气体的液体、易挥发性液体或者气化压力很高的高温气体具有重要意义^[10];

(4) 具有陡降的扬程特性曲线,在小流量工况回流现象不明显。可用于小功率的可移动式洗涤设备和农业供水设备中,旋涡泵也可作消防泵、船舶供水泵和一般增压泵使用^[9]。

同样旋涡泵也具有缺点,主要有:

(1) 效率低。主要是由于大量漩涡、二次流、回流等现象的存在水力损失较大,同时由于叶片与泵体之间不可避免地存在着间隙,特别是小流量工况下有相对较大容积损失。一般而言旋涡泵效率通常只有 18% ~ 40%,因此不宜应用于大功率的场合^[10];

(2) 抗气蚀性能较差。主要是因为流体流入旋涡泵叶片间时冲角非常大,并且旋涡泵叶轮叶片进口边不具有流线型^[2];

(3) 不能用来抽送黏性较大的液体。随着流体粘性的增加,泵的扬程和效率会急剧降低,介质的粘度限制在 114 mm²/s 之内;

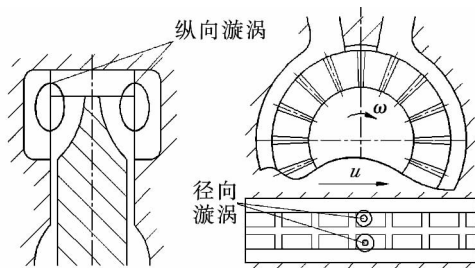
(4) 只能抽送纯净液体的介质。当液体中含有

固体颗粒时 就会因磨损引起轴向和径向的间隙增大而降低泵的性能或导致旋涡泵不能工作。

2 国内外研究现状

2.1 流动机理的研究

最先对旋涡泵进行研究工作的是德国科学家里台尔(Ritter) [2]。他于 1930 年提出旋涡泵工作过程假说: 流道中的转动液体每一质点上均有离心力作用, 由于流道中液体的圆周速度比叶轮中慢, 产生的离心力不同, 所以叶轮内的液体上所作用的离心力要比流道中液体上所作用的离心力大, 引起了液体的圆环形运动(称为纵向旋涡)。工作介质依靠纵向旋涡在流道内流经叶轮好几次, 每经过一次叶轮, 扬程就增加一次。因此, 旋涡泵的扬程高于离心泵的扬程。里台尔的假说是对旋涡泵工作原理进行研究的基础。在此基础上, 后来的学者把旋涡理论发展为纵向旋涡加径向旋涡理论[11]。旋涡泵内的漩涡分布如图 4 所示。1932 年德国学者希米德亨和前苏联的学者们几乎同时用动量交换假说来解释旋涡泵工作过程中大量的能量损失[12]。流体在旋涡泵内的流动形式如图 5 所示。

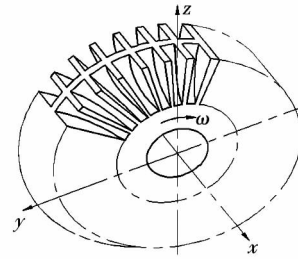


注: ω - 旋转角速度; u - 相对速度

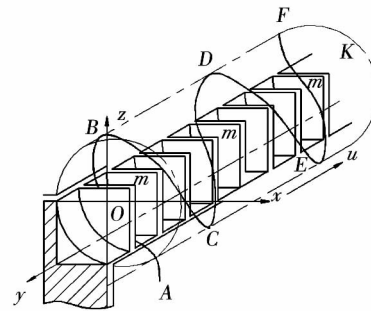
图 4 旋涡泵内部漩涡分布示意图

Fig. 4 The diagrammatic sketch of the internal vortex distribution in the vortex pump

另外, 有日本学者认为, 旋涡泵的工作过程是依靠叶轮的粗糙表面对流道内的流体作相对运动引起的摩擦剪切应力实现的。叶轮外缘“粗糙度”越大, 作用于液体的摩擦力越大, 泵扬程越高。径向小叶片与流道内的液体相对运动产生紊流摩擦力, 从而把原动机的能量传递给流道内的液体。叶轮上的叶片在流道内多次重复产生较大紊流摩擦力, 因此旋涡泵具有较高的扬程。因而旋涡泵也称为摩擦泵[13]。



(a) 旋涡泵叶轮



(b) 叶片展开时, 流道内的流动状态

图 5 旋涡泵内部流动示意图

Fig. 5 The schematic of the internal flow in the vortex pump

二战结束后, 国外的研究者得到了多个描述旋涡泵内部流动的理论模型。日本学者 Senoo Y (1954 年) 从旋涡泵内部的湍流摩擦力方面进行了研究, 提出了湍流混合模型。在这个理论模型中, 他把旋涡泵叶轮中的流动看作是库艾特—泊肃叶流动[14]; 美国学者 Iverson (1955 年) 对径向叶片叶轮的旋涡泵内部流动进行研究, 提出了一个湍流模型[15]。

在国内, 旋涡泵的研究起步较晚, 研究旋涡泵的学者不多, 且主要集中在对这两种理论的验证工作上。江苏大学董颖等(2004 年) 通过数值模拟的方法对旋涡泵的内部流动状况进行了研究, 证实了纵向旋涡和径向旋涡的存在, 并对不同截面的流动状况进行了分析[16]; 江苏大学沙毅等(2008 年) 在模型泵外特性试验和五孔管束形探针对泵体流道静压场测量的基础上, 通过对比分析数值模拟和试验结果, 解释了旋涡泵汽蚀及纵向、径向旋涡产生原因[17]。

2.2 设计理论的研究

(1) 水力设计方面

由于旋涡泵工作原理特殊, 内部流动复杂, 目前还没有精确的理论设计方法, Mason S C (1957 年) 分析了旋涡泵内部形状对其性能的影响[18]; 江苏大

学施卫东等(2005年)在国内首次通过对不同流道截面形状的旋涡泵内部流场的数值模拟,分析了旋涡泵的内部流动状况,验证了流道截面形状对旋涡泵内部流动的影响,从而为旋涡泵设计理论的完善和后续研究工作提供了重要的理论依据^[4]。

现阶段旋涡泵采用的设计方法有模型换算法和经验系数法^[12];针对这两种方法在应用中存在的诸多局限性,燕山大学王军等(2013年)提出了基于人工神经网络的智能算法^[19]。

近年来,对旋涡泵优化设计方面的研究有升温的趋势,同时也取得了一些喜人的成果。安徽理工大学黄龙(2013年)对不同流量不同工况下的旋涡泵进行分析对比,得到了流道壁面和叶轮的静压及动压分布和进出口处速度的变化规律^[20];燕山大学贾婉君(2014年)运用计算机仿真技术方法研究了旋涡泵内部流场的流动情况以及旋涡泵输出流量、扬程和效率之间的联系,讨论了旋涡泵叶轮叶片隔板厚度、叶片高度、叶片倾斜角度和叶片数等参数对旋涡泵输出性能及内部流动情况的影响,揭示了压力、速度矢量等参数的变化规律^[21];江苏大学张帆等(2015年)通过数值计算方法对于旋涡泵在最高效率工况点下叶轮间隙处的流动规律进行相关研究,具体分析了其脉动扬程、交换质量流量、间隙处压力脉动情况和轴向速度变化等问题^[22];这些成果对于改进旋涡泵结构及其优化设计具有重要参考价值。

(2) 结构设计方面

在结构设计创新方面,浙江大学朱祖超等(1995年)提出了在结构上采用导流块实现介质轴向入口、径向出口的旋涡泵设计方法,从理论上给出了效率和扬程的预测模型并提出了以效率为目标函数的优化设计方法^[23];李祥阳等(2013年)设计了采用双支承新型旋涡泵,并申请了专利^[24];符江锋等(2013年)通过采用经验系数法进行了结构参数初步设计,再结合数值模拟方法进行了旋涡泵结构参数的优化,给出了一种比轴向串联更小的体积尺寸,实现了两级组合旋涡泵的径向串联方式的设计^[25]。

在叶片数目的研究上,前苏联学者普伏列依捷尔根据大量统计资料和实验给出了叶片数设计计算公式^[26];江苏大学沙毅等(2006年)通过收集成熟水力模型的主要几何参数,运用数值分析拟合得到了叶片数计算公式^[6]。

由于旋涡泵流动的复杂性,不同的学者针对叶片型式对旋涡泵性能的影响,得出了各不相同的结论。江苏大学周文彬(2008年)指出:在径向、后倾、前倾和前转角叶片的叶轮中均存在纵向旋涡^[13]。在前转角叶片叶轮间存在有明显的径向旋涡,由于纵向旋涡和径向旋涡的共同作用,使得前转角叶片叶轮能获得比其它三种叶片叶轮更好的能量性能;径向叶片和后倾叶片叶轮间的内部流场比较相似;在性能方面,后倾叶片要略优于径向叶片。江苏大学王冠军等(2009年)应用改进的经验系数法设计了径向、前倾、后倾、转角4种不同形状的叶轮的内部流场的模型,得出了转角叶片性能最好,后倾叶片性能最差的结论^[27]。

江苏大学王洋等(2010年)提出采用交错叶片闭式叶轮的旋涡泵相对于对称叶片闭式叶轮具有更高的扬程,但两者的效率保持相当^[28];浙江大学武鹏等(2015年)采用数值模拟分析了旋涡泵压力脉动特征,认为非等距叶片分布可以大幅分散峰值强度,降低压力脉动的振幅,有利于防止压力脉动频率与油箱频率发生共振,从而降低旋涡泵运行中的噪声^[29]。

以往对旋涡泵结构参数的研究主要集中在固定其它结构参数只改变其中一种参数来讨论其对泵性能的影响。兰州理工大学赵万勇、张凡(2010年)通过正交试验法结合正交表优化组合配置不同结构参数的旋涡泵,得出了既能保证设计扬程又能提高效率的旋涡泵模型^[30]。

2.3 空化性能研究

张文革等(2005年)对一种小流量旋涡泵的汽蚀性能进行了理论分析及试验研究。在试验中利用了LabVIEW软件进行数据的实时采集、存储,并用Access及Excel进行数据的记录处理,使用了精度较高的传感器并进行软件及硬件滤波,克服了流体脉动及随机因素造成的误差,使试验精度提高。提供了一份小流量旋涡泵汽蚀试验数据,可为小流量旋涡泵汽蚀性能的研究提供参考^[31]。

针对半开式旋涡泵,江苏大学丛小青等(2010年)采用基于雷诺时均方程和RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型的单相模型对旋涡泵内部流场进行数值模拟,得出叶片根部是发生空化的危险区域的结论^[8]。

在汽蚀的防护措施研究方面,韩国学者Song J W(2003年)认为现在大多数理论只能应用于旋涡泵内流动充分发展的区域,然而在流动充分发展区

域前存在一个流动的发展区域,这个区域对旋涡泵的性能有很大的影响^[32]。他提出了一个应用于流动发展区域内的理论,并通过实验方法分析了这个区域对泵性能的影响,得出增加泵进口处流道的面积可以同时提高泵的扬程和效率,同时可以提高泵的汽蚀性能的结论。

2.4 力学性能的研究

(1) 轴向力方面。由于一般泵体和叶轮间的轴向间隙很小,大约介于 $0.1 \sim 0.25 \text{ mm}$ ^[33]。如果轴向发生窜动,将会发生咬合现象,严重磨损或原动机过载等故障。

前苏联学者 Байбаков О В 等(1979年)针对发生在带有侧流道的开式旋涡泵工作轮上的轴向力的实验结果,系统地叙述了轴向力的产生机理及其计算方法^[34];浙江大学张菲茜等(2014年)对用作汽车发动机的供油泵的轴向旋涡泵的浮动叶轮,通过数值模拟,结合泵内的压力分布情况得出叶轮所受轴向力的变化以及其承载机理^[35]。

(2) 径向力方面。从泵的吸入口至排出口的压力是增加的,沿圆周方向压力不等,因此产生了径向力。由于大量径向和纵向漩涡的存在,其内部流动不稳定,径向力不是恒定的而是波动的。当存在较大径向力时,或发生共振时,会产生挠度使主轴发生变形,引起叶轮的偏摆,从而可能使叶轮与泵盖发生干涉产生故障影响泵的有效运行;施国有等(2009年)将径向力作为影响旋涡泵侧隙的一个因素做了相关分析^[36]。目前总体而言,对旋涡泵径向力的研究较少。

2.5 特殊用途旋涡泵研究

(1) 自吸性能。浙江科技学院沙毅等(2009年)通过对自吸旋涡泵试验样机型式及变转速外特性试验,得出旋涡泵 $Q_V - H$ 、 $Q_V - \eta$ 性能曲线变化规律,验证 $Q_V - H$ 、 $Q_V - \eta$ 曲线换算满足相似理论比例定律, $Q_V - NPSH$ 曲线换算不满足汽蚀相似定律^[37]。

(2) 气液混输。浙江大学朱祖超等(2009年)采用诱导轮、复合离心叶轮和开式旋涡叶轮串联组合的叶轮结构型式,研制了HTB-5/60型低比转速气液混输离心旋涡泵样泵;以含气量和气液混合总流量两个因素作为切入点,提出了气液混输汽蚀试验方案,分析了试验工况点要求,并开展了气液混输汽蚀试验研究^[38-39]。气液混输时泵的汽蚀性能陡降,且含气量越大,汽蚀性能越低;浙江理工大学 Li

Y 等(2010)通过比较数值模拟和实验结果,得出旋涡泵流道中的气泡主要分布在叶片的压力侧,并且入口气体体积分数的增加气泡的聚集程度增强。当气体体积分数小于10%时,气相对涡流泵的性能的影响较小,当气体体积分数持续增加至15%时,由于气泡的堵塞作用旋涡泵特性曲线突然下降^[40]。

(3) 磁力旋涡泵。针对旋涡泵输送介质粘度小、腐蚀性较强,容易引起操作不当,造成密封泄漏的特点,广东石油化工高等专科学校李多民(1995年)介绍了旋涡泵改为磁力旋涡泵的设计过程并总结了使用效果^[41]。

3 研究中存在的问题

(1) 研究方法同质化严重,研究方法有很大创新空间。通过随机抽取50篇关于旋涡泵的文章,分析发现绝大多数文章都只采用数值模拟的方法,缺乏直接实验研究。

(2) 研究实用性较强,基础性较弱,研究成果的适用性存在局限。通过上述分析可以发现,部分研究都是针对某一特定型号或相近类型、或是某一特定工况或相邻工况下的研究,研究成果的大规模应用受到限制。就目前而言,对扭曲叶片的研究较少,对旋涡泵的性能有着很大影响的径向间隙、轴向间隙和流道面积等因素系统地研究较少。

(3) 对于旋涡泵工作原理和内部流动机理研究较薄弱。大部分对于工作原理的研究还处于验证性阶段,目前还没有像其它流体机械一元、二元、准三元相对成熟、系统的内部流动理论模型,在一定程度上限制了旋涡泵性能的提高。

(4) 试验测试方法困难。由于旋涡泵的结构尺寸不大,测试设备对其流动状态的影响较大,直接影响了测试成果的准确性。流动发生在截面不等的密闭空间,无法测试整个空间的物理参数,一般选取的测量点的随机误差不能有效地消除,进而直接影响测试结果的准确性。

4 结 论

(1) 旋涡泵的流量小,工作压力大,密封相对困难,尤其对于抽送危险化学品介质显得尤为重要。因此,开发密封性能好、高压的旋涡泵具有重要的应用价值。

(2) 旋涡是造成流动能量损失的主要因素,目前对于旋涡泵内旋涡的产生和演变机理及控制方法相关的研究很少,成为限制旋涡泵广泛应用的瓶颈。

(3) 对于旋涡泵力学特性的方面研究较少,旋涡泵对各种间隙要求高,而间隙对力学特性较为敏感,直接影响旋涡泵的效率 and 可靠性,今后开展旋涡泵的力学性能研究是非常有必要的。

(4) 由于大量纵向旋涡和径向旋涡的存在,势必会引起噪声和振动,降低了泵的寿命和运行可靠性,对于特殊用途的设备至关重要。如何减弱或消除噪声和振动,是旋涡泵研究的又一重要课题。

参考文献:

- [1] C. 普弗莱德丙尔(西德). 叶片泵与透平压缩机[M]. 奚启棣译. 北京: 机械工业出版社, 1983.
Pfleiderer C. (West Germany). The vane pump and the turbine compressor [M]. XI Qidi translated. Beijing: China Machine Press ,1983.
- [2] 丛庄远,董国华,查森. 活塞泵及其它类型泵[M]. 北京: 机械工业出版社, 1962.
CONG Zhuang-yuan ,DONG Guo-hua ,ZHA Sen. The piston pump and other types of pumps [M]. Beijing: China Machine Press ,1962.
- [3] 贾宗谟,穆界天,范宗霖. 旋涡泵液环泵射流泵[M]. 北京: 机械工业出版社, 1993.
JIA Zong-mo ,MU Jie-tian ,FAN Zong-lin. Vortex pump ,liquid ring pump and jet pump [M]. Beijing: China Machine Press ,1962.
- [4] 施卫东,董颖,马新华. 流道截面形状对旋涡泵内部流动影响的数值模拟[J]. 农业工程学报, 2005, 21(3): 21-23.
SHI Wei-ding ,DONG Ying ,MA Xin-hua. Numerical simulation of the effect of channel section shape on the Inner flowing of vortex pump [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering , 2005 ,21(3) : 21 - 23.
- [5] 钱坤喜,李洪. 叶轮泵及其体外模拟试验[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2004, 25(6): 521-524.
QIAN Kun-xi ,LI Hong. Development and mock experiment studies of impeller blood pumps [J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition ,2004 ,25(6) : 521 - 524.
- [6] 沙毅,王晓英,康灿. 闭式旋涡泵性能试验研究及水力设计[J]. 水泵技术, 2006(2): 15-17.
SHA Yi ,WANG Xiao-ying ,KANG Can. Performance test and hydraulic design of closed vortex pump [J]. Pump Technology , 2006 , 2: 15 - 17.
- [7] 叶椿秀,梅津光生,中村孝夫,等. 搏动辅助血泵的设计构思与实践-从旋涡泵到罗叶泵[J]. 中国胸心血管外科临床杂志, 2002, 9(1): 35-39.
YE Chun-xiu ,Umezumi Mitsuo ,Nakamura Takashio ,et al. The design conception and realization of pulsatile ventric assist devices- from spiral-vortex pump to luo-ye pump [J]. Chinese Journal of Clinical Thoracic and Cardiovascular Surgery ,2002 ,9(1) : 35 - 39.
- [8] 丛小青,张晓炜,陈向阳,等. 半开式旋涡泵空化分析及试验[J]. 排灌工程学报, 2010, 28(1): 47-50.
CONG Xiao-qing ,ZHANG Xiao-wei ,CHEN Xiang-yang ,et al. Analysis and experiment on cavitation of semi-open vortex pump [J]. Drainage and Irrigation Machinery ,2010 ,28(1) : 47 - 50.
- [9] 袁寿其,刘厚林. 泵类流体机械研究进展与展望[J]. 排灌机械, 2007, 25(6): 46-51.
YUAN Shou-qi ,LIU Hou-lin. Research progress and prospect on fluid machinery-pumps [J]. Drainage and Irrigation Machinery , 2007 ,25(6) : 46 - 51.
- [10] 张帆, Martin Böhle, 裴吉,等. 侧流道泵研究现状及发展趋势[J]. 排灌机械工程学报, 2015, 33(9): 737-743.
ZHANG Fan ,Böhle M ,PEI Ji ,et al. Status and development trend of study on side channel pumps [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering (JDIME) ,2015 ,33(9) : 737 - 743.
- [11] 关醒凡. 现代泵理论与设计[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2011: 388-390.
GUAN Xing-fan. Modern pumps theory and design [M]. Beijing: China Astronautic Publishing House ,2011: 388 - 390.
- [12] 朱俊华. 往复泵与其它类型泵[M]. 北京: 机械工业出版社, 1982: 66-95.
ZHU Jun-hua. The reciprocating pump and other types of pumps [M]. Beijing: China Machine Press ,1982: 66 - 95.
- [13] 周文彬. 旋涡泵叶片形状对内部流动及能量性能影响的研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2008.
ZHOU Wen-bin. Study of inner flow and energy performance with different shape vanes in vortex pump [D]. Zhenjiang: Jiangsu University ,2008.
- [14] Senoo Y. Researches on the Peripheral Pump. Reports of Research Institute for Applied Mechanics. Kyudku University ,July1954.
- [15] Iverson H W. Performance of the Peripheral Pump [M]. Trans. ASME ,1995.
- [16] 董颖,施卫东,汪永志. 旋涡泵的内部流动研究[J]. 水泵技术, 2004, 1: 18-20.
DONG Ying ,SHI Wei-dong ,WANG Yong-zhi. Analysis of interior flow in vortex pump [J]. Pump Technology ,2004 ,1: 18 - 20.
- [17] 沙毅,李金磊,李昌烽. 自吸旋涡泵内部流动分析[J]. 排灌机械, 2008, 26(6): 10-14.
SHA Yi ,LI Jin-lei ,LI Chang-feng. Analysis of interior flow in self-priming vortex pump [J]. Drainage and Irrigation Machinery , 2008 ,26(6) : 10 - 14.
- [18] Mason S C. Influence of Internal Geometry upon Regenerative Pump Performance [D]. MIT ,MAY ,1957.
- [19] 王军,吴凤和,陈恩平. 旋涡泵叶轮和流道水力尺寸智能算法研究[J]. 机械设计, 2013, 30(8): 1-6.
WANG Jun ,WU Feng-he ,CHEN En-ping. Study on the intelligent approach for the calculation of hydraulic dimension for impeller and passage of vortex pump [J]. Journal of Machine Design ,2013 ,30(8) : 1 - 6.
- [20] 黄龙. 旋涡泵内部流场的数值模拟及优化设计[D]. 合肥: 安徽理工大学, 2013.

- HUANG Long. The optimization and numerical simulation of vortex pump [D]. Hefei: Anhui University of Science and Technology 2013.
- [21] 贾婉君. 结构参数对旋涡泵内部流场性能影响的数值模拟分析 [D]. 秦皇岛: 燕山大学 2014.
- JIA Wan-jun. Numerical simulation of the effect of the structural parameters on the internal flow field of vortex pump [D]. Qing-huangdao: Yanshan University 2014.
- [22] 张帆, Martin Böhle, 裴吉, 等. 侧流道泵叶轮轴向间隙内流动特性数值模拟与验证 [J]. 农业工程学报, 2015, 31(10): 78-83.
- ZHANG Fan, Martin Böhle, PEI Ji, et al. Numerical simulation and verification on flow characteristics of impeller axial and radial gaps in side channel pump [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering 2015, 31(10): 78-83.
- [23] 朱祖超, 王乐勤, 黄敦回. 轴向入口旋涡泵的研制 [J]. 水泵技术, 1995, 3: 11-15.
- ZHU Zu-chao, WANG Le-qin, HUANG Dun-hui. The development of axial inlet vortex pump [J]. Pump Technology, 1995, 3: 11-15.
- [24] 李祥阳, 陈万强, 曹海泉, 等. 一种采用双支承新型旋涡泵设计方法 [J]. 机械制造, 2013, 51(591): 15-19.
- LI Xiang-yang, CHEN Wan-qiang, CAO Hai-quan, et al. A kind of dual support new vortex pump design method [J]. Machinery, 2013, 51(591): 15-19.
- [24] 符江锋, 李华聪, 韩小宝, 等. 一种采用径向串联方式的组合旋涡泵设计方法 [J]. 推进技术, 2013, 34(2): 269-272.
- FU Jiang-feng, LI Hua-cong, HAN Xiao-bao, et al. A design method using radial series of combination vortex pump [J]. Journal of Propulsion Technology 2013, 34(2): 269-272.
- [25] 张人会, 程效锐, 杨军虎. 特殊泵的理论及设计 [M]. 北京: 中国水利水电出版社 2013: 93-95.
- ZHANG Ren-hui, CHENG Xiao-rui, YANG Jun-hu. The special pumps theory and design [M]. Beijing: China Water and Power Press 2013: 93-95.
- [26] 王冠军, 袁丹青, 刘吉春, 等. 叶片形状对旋涡泵性能的影响 [J]. 轻工机械, 2009, 27(2): 27-31.
- WANG Guan-jun, YUAN Dan-qing, LIU Ji-chun, et al. The effect of impeller shape on the performance of vortex pump [J]. Light Industry Machinery 2009, 27(2): 27-31.
- [27] 王洋, 傅剑辉, 蒋其松. 闭式叶轮叶片位置对旋涡泵性能的影响 [J]. 农机化研究, 2010(9): 150-154.
- WANG Yang, FU Jian-hui, JIANG Qi-song. The effects of the location of closed impeller blades on the performance of vortex pump [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research 2010, 9: 150-154.
- [28] 武鹏, 张菲茜, 吴大转, 等. 非等距叶片微型旋涡泵压力脉动特性研究 [J]. 工程热物理学报, 2015, 36(4): 775-779.
- WU Peng, ZHANG Fei-xi, WU Da-zhuan, et al. Study on pressure fluctuation of a micro vortex pump with non-uniform blade [J]. Journal of Engineering Thermophysics 2015, 36(4): 775-779.
- [29] 张凡. 不同结构参数旋涡泵内部流场的数值模拟 [D]. 兰州: 兰州理工大学 2010.
- ZHANG Fan. Numeration simulation of inner flow with different structural parameters in vortex pump [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Science and Technology 2010.
- [30] 张文革, 杨坚华, 胡向宇. 一种小流量旋涡泵的汽蚀性能实验研究 [J]. 真空与低温, 2005, 11(4): 225-228.
- ZHANG Wen-ge, YANG Jian-hua, HU Xiang-yu. Research on anti-cavitation characters of a small-flow high-head vortex pump [J]. Vacuum and Cryogenics 2005, 11(4): 225-228.
- [31] Song J W, Engeda A, Chung M K. A modified theory for the flow mechanism in a Regenerative flow Pump [J]. Power and Energy, 2003, 217: 311-321.
- [32] 张万义, 李正华. 旋涡泵的轴向间隙 [J]. 水泵技术, 1991(1): 15-17.
- ZHANG Wan-yi, LI Zheng-hua. The axial clearance of vortex pump [J]. Pump Technology, 1991(1): 15-17.
- [33] Байбаков О В, Винокуров А Ф. Известия высших учебных заведений [J]. Машиностроение, 1979, 1: 57-62.
- Baybakov O V, Vinokourov A F. News seats of higher learning [J]. Mashinostroenie, 1979, 1: 57-62.
- [34] 张菲茜, 武鹏, 吴大转, 等. 微型旋涡泵水力特性与轴向力计算 [J]. 排灌机械工程学报, 2014, 32(8): 658-662.
- ZHANG Fei-xi, WU Peng, WU Da-zhuan, et al. Hydraulic characteristics and axial force of micro vortex pumps [J]. Drainage and Irrigation Machinery 2014, 32(8): 658-662.
- [35] 施国有, 刘丹. 旋涡泵叶轮侧隙调整技术 [J]. 水泵技术, 2009(4): 29-31.
- SHI Guoyou, LIU Dan. Vortex pump impeller Backlash adjustment technology [J]. Pump Technology 2009(4): 29-31.
- [36] 沙毅, 李金磊, 刘祥松. 自吸旋涡泵变转速性能与内部流场试验 [J]. 农业机械学报, 2009, 40(12): 119-123.
- SHA Yi, LI Jin-lei, LIU Xiang-song, et al. Self-priming vortex pump variable speed performance and internal flow test [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2009, 40(12): 119-123.
- [37] ZHU Zuchao, XIE Peng, OU Guofu. Design and Experimental Analyses of Small-flow High-head Sha Yi, Li Jin-lei, Liu Xiang-song, et al. Self-priming Vortex Pump Variable Speed Performance and Internal Flow Test [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery 2009, 40(12): 119-123.
- [38] 谢鹏, 朱祖超. 低比转速离心旋涡泵的气液混输汽蚀试验分析 [J]. 水利学报, 2009, 40(12): 1506-1511.
- XIE Peng, ZHU Zu-chao. Cavitation test analysis of low-specific-speed centrifugal-vortex pump for gas-liquid two-phase mixture flow [J]. Journal of Hydraulic Engineering 2009, 40(12): 1506-1511.
- [39] Li Y, Zhu Z C, He W Q, Wang Y P, et al. Numerical Simulation and Experiment Analyses for the Gas-liquid Two-phase Vortex Pump [J]. Journal of Thermal Science Vol. 19, No. 1(2010): 47-50.
- [40] 李多民. 磁力传动技术在旋涡泵上的应用 [J]. 流体机械, 1995, 23(1): 43-46.
- LI Duo-min. The application of magnetic transmission technology in the vortex pump [J]. Fluid Machinery, 1995, 23(1): 43-46.

(陈滨 编辑)

旋涡泵研究现状及存在的问题分析 = **Research Status and Existing Problems of Vortex Pump** [刊 汉] QUAN Hui ,LI Jin ,LI Ren-nian ,FU Bai-heng(College of Energy and Power Engineering ,Lanzhou University of Technology ,Lanzhou ,Gansu ,China ,Post Code: 730050) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. . -2016 , 31(6) . -1 ~7

With the development of the national economy ,the application span of the vortex pump is gradually expanding as well and the study of the vortex pump has significant theoretical and application value. In this review paper ,the classification and characteristics of the vortex pump are introduced first ,followed by the discussion on the research status at home and abroad from the perspectives of the flow mechanism ,design method ,cavitation performance ,mechanical properties and special purpose. Secondly ,the existing problems in the related research are analyzed from the various aspects of research methods ,the conversion of research results ,test methods and so on. Finally ,the scopes which have significant value and need to be further improved in the research and application of the vortex pump are prospected according to the aforementioned research results. It is believed that the studies of the seal performance ,mechanical properties ,internal vortex generation and evolution mechanism and control method ,the characteristics and control method of noise and vibration of the vortex pump by using the advanced instrument may be the focus of the vortex pump research. **Key words:** Vortex pump ,research status ,existing problems ,analysis

直接接触相变换热中单泡滴生长及传热特性 = **The Growth Rate and Heat Transfer Performance of Single Bubble in Direct Contact Heat Transfer with Phase Change** [刊 汉] HUANG Jun-wei ,WANG Wei-chao(Faculty of Mechanical and Electrical Engineering ,Yunnan Agricultural University ,Kunming ,China ,Post Code: 650201) ,WANG Hui-tao (Faculty of Metallurgical and Energy Engineering ,Kunming University of Science and Technology ,Kunming ,Yunnan ,China ,Post Code: 650093) ,XU Jian-xin(State Key Laboratory of Complex Nonferrous Metal Resources Clean Utilization ,Kunming University of Science and Technology ,Kunming ,Yunnan ,China , Post Code: 650093) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. . -2016 31(6) . -8 ~14

Based on the research status quo of the single bubble growth and heat transfer in direct contact heat transfer process and the energy balance equation including both convection and conduction from the continuous liquid to the bubble with the opening angle spheres model ,an improved physical geometry model of single bubble growth rate and evaporation was proposed. The effect of Pr number ,St number ,and Ja number were examined. The results show good agreement between the presented model and the others in literature. The average deviation is 19% compared with Mahood's model ,and 28% with Batty's model. **Key words:** direct-contact heat transfer; single bubble ,growth rate ,Nusselt number

换热器管道内漏故障状态与声发射信号特征定量关系实验研究 = **Experimental Study on Quantitative Rela-**