[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2025.05.003

不同空化状态下离心泵内颗粒磨损机理研究

王　岩，邵春雷*

（南京工业大学 机械与动力工程学院，江苏 南京　211816）

摘　要：为了研究离心泵空化过程中的磨损特性，课题组以IS 80-50-250型离心泵为研究对象，采用离散相模型（Discrete Phase Model，DPM）、Schnerr-Sauer空化模型和Oka磨损模型对含沙水条件下离心泵内不同空化状态下的磨损状态进行模拟，分析了空化状态、固体颗粒直径和颗粒密度对离心泵性能和磨损的影响规律。结果表明：随着空化程度的加剧，离心泵内各部件的磨损变化具有一致性，呈现出先增大后减小的变化趋势；同时当固体颗粒直径小于0.03 mm时，固体颗粒会促进空化的形成，当固体颗粒直径为0.05～0.07 mm时，固体颗粒会抑制空化的形成，但是磨损情况会随着颗粒直径的增大而增大；固体颗粒密度的改变会改变泵内湍流状态，从而影响泵内流场的分布，颗粒密度越大，离心泵内各部件磨损越严重。研究结果可为离心泵磨损的研究提供参考。

关　键　词：离心泵；磨损特性；泥沙磨损；离散相模型；Oka磨损模型

中图分类号：TH311　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1005-2895(2025)05-0018-11

Mechanisms of Particle Wear in Centrifugal Pumps under Various Cavitation Regimes

WANG Yan，SHAO Chunlei*

（School of Mechanical and Power Engineering，Nanjing Tech University，Nanjing 211816，China）

Abstract：In order to investigate the wear characteristics of centrifugal pumps during cavitation，the IS 80-50-250 centrifugal pump was took as the research object. Numerical simulations were conducted using the Discrete Phase Model（DPM），the Schnerr-Sauer cavitation model，and the Oka wear model to analyze erosion patterns under low-concentration sand-laden water conditions under various cavitation states. The effects of cavitation regimes，particle size，and particle density on cavitation dynamics and wear behavior were systematically evaluated. The results indicate that with the intensification of cavitation，the wear of various components in the centrifugal pump are consistent，showing a trend of first increasing and then decreasing；At the same time，when the diameter of solid particles is less than 0.03 mm，solid particles promote the formation of cavitation. When the diameter of solid particles is 0.05 to 0.07 mm，solid particles will inhibit the formation of cavitation，but the wear will increase with the increase of particle diameter；The change in solid particle density will alter the turbulent state in the pump，thereby affecting the distribution of the flow field inside the pump. The higher the particle density，the more severe the wear of various components inside the centrifugal pump. The research results can provide reference for the study of centrifugal pump wear.

Keywords：centrifugal pump；wear characteristic；particle wear；DPM（Discrete Phase Model）；Oka wear model

离心泵叶轮进口处因叶片高速旋转导致压力降低，因而常发生空化现象，在此工况下，离心泵会同时受到沙粒磨蚀与空蚀的协同破坏，对离心泵造成严重损坏。许多学者研究了气、固、液多相流条件下冲蚀磨损和空蚀耦合损伤的影响规律[1-2]。

现有的研究表明：因离心泵内部流动结构复杂，空

收稿日期：2025-02-24；**修回日期**：2025-07-16

基金项目：国家自然科学基金（51306087）；江苏省自然科学基金（BK20191361）；江苏省研究生科研与实践创新计划项目（SJCX21_0493）。

第一作者简介：王岩（1997），男，硕士研究生，主要研究方向为流体机械。**通信作者**：邵春雷（1981），男，博士，教授，主要从事流体工程与密封技术研究。E-mail：chunlei-shao@njtech.edu.cn

化发展迅速,导致磨损试验时间较长,试验效率低下。虽然磨损试验周期长、花费资金多,并且研究难度高,但是也取得了一系列的研究成果[3-8]。近年来,随着计算机仿真技术的不断发展,离心泵仿真分析技术取得了巨大的进步,研究人员[9-15]研究了离心泵在空化条件下,固体颗粒直径和颗粒密度对离心泵扬程和效率的影响。然而,目前对于离心泵在不同空化程度下的磨损与空蚀的协同影响机理的研究较少,同时对于临界空化条件下的固体颗粒参数对磨损的研究也没有明确的结论。课题组采用离散相模型(Discrete Phase Model,DPM)模型、Schnerr-Sauer 空化模型和 Oka 磨损模型探究离心泵在不同进口压力和不同颗粒参数条件下,过流部件在空蚀和磨损共同作用下的磨蚀情况。

1　计算模型和计算方法

1.1　几何模型

课题组选取 IS 80-50-250 型离心泵作为研究对象,通过增加离心泵的进口延长段、出口延长段来降低边界条件对泵内部流场的影响。离心泵的额定转速 n_d 为 2 900 r/min,额定流量 Q_d 为 50 m^3/h,设计扬程 H_d 为 80 m。离心泵的主要参数如表 1 所示。

表 1　离心泵的主要参数

Table 1　Key parameters of centrifugal pump

泵进口直径 D_{in}/mm	泵出口直径 D_{out}/mm	叶轮出口直径 D_2/mm	叶片数 Z	蜗壳基圆直径 D_3/mm
80	50	250	6	260
蜗壳进口宽度 b_3/mm	蜗舌安放角 φ_0/(°)	叶片出口宽度 b_2/mm	叶片进口安放角 β_1/(°)	叶片出口安放角 β_2/(°)
22	20	9	38	32

1.2　网格划分及无关性验证

离心泵的流体计算域模型如图 1 所示,包括蜗壳、叶轮、进口延长段以及出口延长段。设置延长段的主要目的是便于流体充分发展,减少回流现象的出现。进口延长段长度为泵进口直径 D_{in} 的 4 倍。课题组基于 FLUENT Meshing 平台对离心泵三维模型进行网格划分,网格划分结果如图 2 所示。为了寻找合适的网格数,进行了网格无关性验证。在泵的设计工况下,对 6 组不同网格数模型进行了模拟计算,得到的不同网格数对应的扬程如表 2 所示,网格数为 N_5 和 N_4 时扬程仅相差 0.8%,为保证计算效率,最终选定网格数为 N_4 = 1 425 367 进行计算模拟。

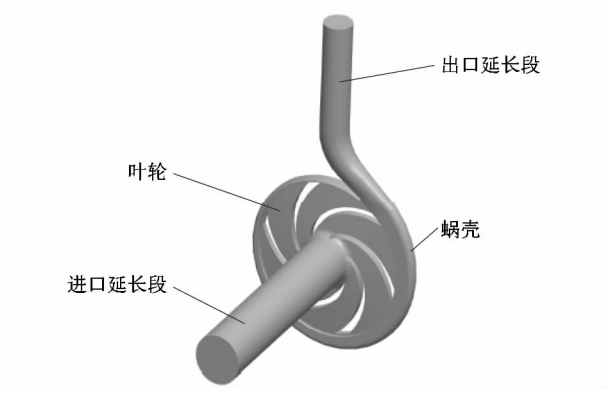

图 1　离心泵的流体计算域模型

Figure 1　Fluid computational domain model of centrifugal pump

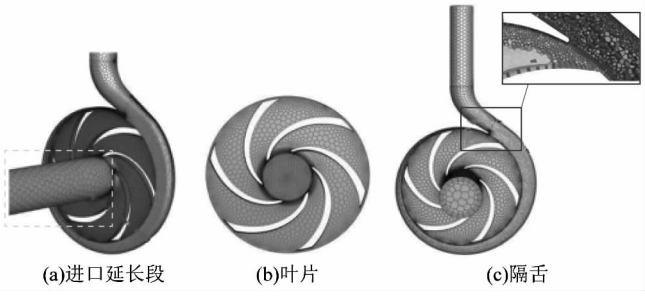

图 2　离心泵计算域网格划分

Figure 2　Mesh generation of computational domain of centrifugal pump

表 2　不同网格数对应的离心泵扬程

Table 2　Centrifugal pump head corresponding to different grid numbers　　单位:m

N_1 = 687 614	N_2 = 854 722	N_3 = 1 187 235	N_4 = 1 425 367	N_5 = 1 886 024
78.511 3	80.492 2	82.215 2	83.454 2	84.121 8

1.3　连续相模型

含沙水条件下离心泵内空化流动涉及气、液、固三相流动问题,数值求解时以欧拉多相流流动模型为框架,将水视为连续相。其中,水与空泡、水与沙粒之间存在相互作用力,且水与空泡之间由于发生相变而存在质量传递,使得相间具有动量交换。选取水作为连续相输运介质进行离心泵多工况输运,湍流模型选取 SST κ-ε[16],采用 Coupled 耦合求解方法进行求解,其

余变量采用二阶迎风格式设置。则湍动能与湍流耗散方程为：

$$\left.\begin{aligned}&\frac{\partial}{\partial t}(a_l\rho_l)+\nabla\cdot(a_l\rho_l\mu_l)=M_c-M_v;\\&\frac{\partial}{\partial t}(a_v\rho_v)+\nabla\cdot(a_v\rho_v\mu_v)=M_v-M_c;\\&\frac{\partial}{\partial t}(a_s\rho_s)+\nabla\cdot(a_s\rho_s\mu_s)=0;\\&a_l+a_v+a_s=1。\end{aligned}\right\}\tag{1}$$

式中：a_l，a_v和 a_s分别为流体介质中液相体积分数、气相体积分数和固体颗粒体积分数；ρ_l，ρ_v和 ρ_s分别为液相密度、气相密度和固体颗粒密度；μ_l，μ_v和 μ_s分别为液相速度、气相速度和固体颗粒速度；M_c为单位混合流体介质中由于空泡凝结而使液相增加的质量，也是空泡减少的质量；M_v为单位混合流体介质中由于液相空化而使液相减少的质量，也是空泡增加的质量。

1.4 空化模型

通过 Schnerr-Sauer 空化模型开展离心泵内空化流动的数值仿真计算，该模型中不存在经验系数，因而通过计算得到的结果的精度较高，方程源项如下：

$$\left.\begin{aligned}&\dot{m}^{+}=F_{vap}\frac{\rho_v\rho_l}{\rho_m}a_v(1-a_v)\frac{3}{R_B}\sqrt{\frac{2}{3}\left(\frac{p_v-p}{\rho_l}\right)},p\leqslant p_v;\\&\dot{m}^{-}=F_{cond}\frac{\rho_v\rho_l}{\rho_m}a_v(1-a_v)\frac{3}{R_B}\sqrt{\frac{2}{3}\left(\frac{p-p_v}{\rho_l}\right)},p>p_v。\end{aligned}\right\}\tag{2}$$

式中：$\dot{m}^{+}$为流体蒸发速率；$\dot{m}^{-}$为流体凝结速率；F_{vap}为蒸发系数，取 $F_{vap}=50$；F_{cond}为凝结系数，取 $F_{cond}=0.2$；ρ_m为混合相密度；R_B为空泡半径；p 为流场中的压力，p_v为液体饱和蒸气压。

1.5 离散相磨损模型

DPM 是以欧拉-拉格朗日方法为基础建立的模型。在该模型中，流体被视为连续介质，而固体颗粒则作为离散体系。

假设固体颗粒体积分数为 8%，颗粒形状为球形，不考虑固体颗粒自身的运动特性，忽略固体颗粒之间相互碰撞情况及颗粒碎裂情况，假定颗粒与壁面为完全碰撞反弹。假设固体颗粒直径最大为 0.07 mm，只考虑阻力和重力对固体颗粒的作用，不考虑附加质量力、流场的压力梯度引发的附加力、Basset 力、Saffman 升力和 Magnus 升力等作用力[17]89。

磨损模型选取 Oka 模型，Oka 模型[18]是通过归纳总结大量试验数据得出的冲蚀磨损方程，其表达式为：

$$\left.\begin{aligned}&E=E_{90}\left(\frac{\mu_s}{\mu_{ref}}\right)k_2\left(\frac{d_s}{d_{ref}}\right)k_3f(\alpha);\\&E_{90}=K\rho_m(H_V)^{k_1}\left(\frac{\mu_s}{\mu_{ref}}\right)^{k_2}\left(\frac{d_s}{d_{ref}}\right)^{k_3};\\&f(\alpha)=(\sin\alpha)^{n_1}[1+H_V(1-\sin\alpha)^{n_2}]。\end{aligned}\right\}\tag{3}$$

式中：E 为单位面积在单位时间内物体表面的磨损率；E_{90}为当攻角为 90°时材料的磨损率；K 为单位动能下材料的体积磨损量，反映了材料的抗冲蚀能力的强弱，K 越大材料越易磨损；k_1，k_2 和 k_3 为速度指数，$k_2=2.3(H_V)^{0.038}$，$k_3=0.19$；$f(\alpha)$为攻角函数；H_V 为维氏硬度；d_s为固体颗粒直径；d_{ref}为颗粒参考直径；μ_s为固体颗粒速度；μ_{ref}为固体颗粒冲蚀速度；α 为固体颗粒撞击在壁面上的攻角；$n_1=0.71(H_V)^{0.14}$，$n_2=2.4(H_V)^{-0.94}$。

1.6 边界条件

离心泵流体域的进口边界条件采用压力进口，根据试验获得的不同进口压力模拟离心泵的空化状态，其中颗粒的释放速度等于连续介质的速度。与此同时，离心泵出口边界条件采用质量出口，在离心泵的进口和出口处颗粒反弹类型设置为 Escape，其他壁面的颗粒反弹类型设置为 Reflect，反弹系数设定为 1。叶轮和蜗壳的交界面设置为无滑移边界，对于近壁面采用标准壁面函数进行处理。采用 Couple 耦合求解算法，收敛精度为 10^{-4}。

1.7 模拟可行性验证

采用扬程系数 Ψ 和空化数 σ 来进行模拟可行性验证，其公式为：

$$\psi=\frac{H}{u_2^2/2g};\tag{4}$$

$$\sigma=\frac{p_{in}-p_v}{0.5\rho_l u_2^2}。\tag{5}$$

式中：ψ 为扬程系数；u_2为叶轮出口圆周速度；H 为泵的扬程；g 为重力加速度；σ 为空化数；p_{in}为泵进口压力；p_v为液体饱和蒸气压，取 $p_v=3\ 169$ Pa。

在额定流量条件下，图 3 所示为试验以及数值模拟所获取的离心泵空化性能曲线。图中竖向虚线从右

向左分别表示未空化到临界空化、临界空化到空化和空化到严重空化3种不同空化状态的临界值。以未空化状态下的扬程系数1.108为基础扬程系数,由图3可知在临界空化状态下扬程系数为1.101,扬程系数下降0.63%,严重空化状态下的扬程系数为1.076,下降2.89%。

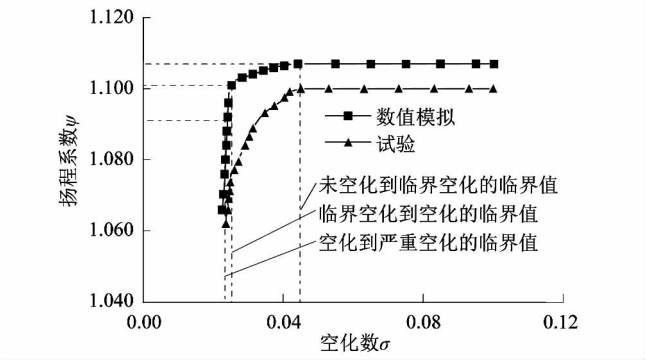

图3　试验及数值模拟得到的离心泵空化性能曲线

Figure 3　Cavitation performance curves of centrifugal pump obtained from experiment and numerical simulation

由图3可以观察到:随着空化程度的不断加剧,试验与数值模拟的变化趋势基本一致,具体表现为扬程系数在未空化时保持稳定,之后逐渐下降,而且当空化达到某种程度时,扬程系数会出现急剧下降的情况。在相同的空化数情况下,试验和数值模拟所得的扬程系数之间的最大误差在未发生空化阶段,其数值模拟和试验的扬程系数分别为1.108和1.097,其中数值模拟结果比实验结果大1%,在可接受误差范围之内,表明课题组所采用的流场计算方法准确性较高,可以满足性能预测精度要求。

2　进口压力对离心泵性能及磨损的影响

2.1　进口压力对离心泵扬程的影响

图4所示为颗粒密度ρ_s为2 800 kg/m^{3}时,不同进口压力下离心泵设计工况下的扬程随颗粒直径变化的情况。由图4可知:当进口压力相同时,扬程会随着固体颗粒直径的增大而呈现出逐渐下降的趋势;当颗粒直径相同时,随着进口压力的逐渐降低,离心泵的扬程也逐渐降低;颗粒直径从0.00 mm(无固体颗粒)增大到0.01 mm时,扬程的下降速度比固体颗粒直径从0.03 mm增大到0.07 mm时的下降速度快。这是因为直径较小的固体颗粒在离心泵运行过程中会充当成核核子,从而促进空化的形成,扰乱离心泵内部流场,加快离心泵扬程的下降速度;但是当固体颗粒直径逐渐增大时,固体颗粒受到的重力、惯性力逐渐增大,其充当成核核子的作用逐渐减弱,而固体颗粒消耗离心泵的能量逐渐增加,所以离心泵的扬程的下降速度变小。因此固体颗粒直径的大小会影响离心泵扬程下降的速度,并随着固体颗粒直径的增大影响逐渐减弱。

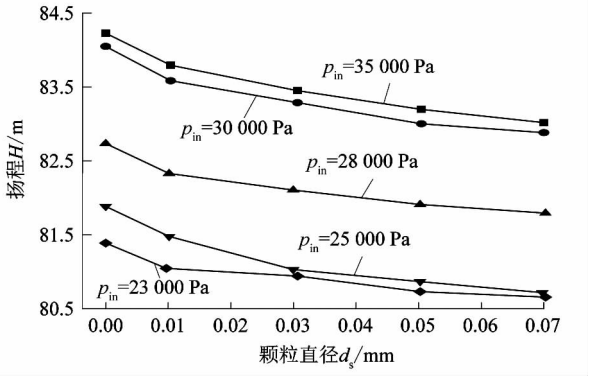

图4　不同进口压力下离心泵扬程随颗粒直径变化曲线

Figure 4　Variation curves of centrifugal pump head with particle diameter under different inlet pressures

2.2　进口压力对固体颗粒速度的影响

固体颗粒速度分布反映了离心泵内部颗粒的运动轨迹,颗粒的运动轨迹又说明了颗粒随着泵内流体运动时的运动趋向性,能在一定程度上反映泵内部件的磨损情况。图5所示为不同进口压力下,固体颗粒直径为0.03 mm、颗粒体积分数为8%条件下,离心泵内部颗粒的速度轨迹。颗粒进入叶轮流域后与叶轮头部频繁发生碰撞,颗粒运动方向随着叶片旋转发生改变:颗粒运动方向与叶片型线的圆周切向方向保持一致,然后随机地进入蜗壳流道,此时颗粒的运动速度明显增大,颗粒在蜗壳流域流体的拖曳作用下沿着螺旋形流道运动,最后流出离心泵。随着空化的加剧,空化气相体积分数增大,叶轮传递给固体颗粒的能量增加,固体颗粒的速度才会突然增大。

另外,从图5可以看出:在颗粒随流体运动过程中,颗粒不是一直保持与流体相同的运动状态,这与颗粒自身属性及相间作用相关,同时从颗粒的运动轨迹

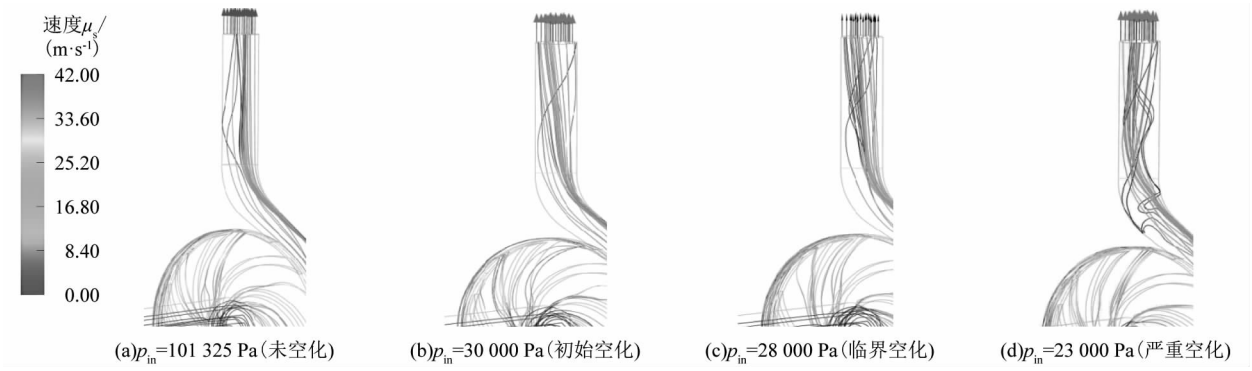

图 5 不同进口压力下离心泵内颗粒速度轨迹

Figure 5 Particle velocity trajectories inside centrifugal pump under different inlet pressures

可以预测出颗粒会对叶轮头部、叶轮后盖板以及蜗壳环形内壁面的磨损产生显著影响。

对不同空化程度下的固体颗粒进行分析可以发现:随着空化程度的加剧,输送固体颗粒的流体速度在逐渐增大,流动也逐渐紊乱。这是因为随着气相体积分数的增大,固体颗粒获得了巨大的旋转动能,这与实际情况是相符的,同时证明了空化程度会在一定程度上影响离心泵内部流场的流动稳定性。

2.3 进口压力对蜗壳磨损状态的影响

图 6 所示为不同进口压力下离心泵蜗壳内颗粒冲蚀速度分布。颗粒冲蚀速度分布可以反映蜗壳内的磨损分布。p_{in}为 101 325,30 000,28 000 和 23 000 Pa 分别对应着未空化、初始空化、临界空化和严重空化 4 种状态。随着空化程度的加剧,蜗壳内的体积磨损量在逐渐增大,这是因为随着空化程度的加剧,固体颗粒在流动过程中因撞击、反弹等因素影响获得的动能在逐渐增大,因此对于蜗壳壁面的冲击作用逐渐明显;随着空化程度的加剧,蜗壳壁面的磨损在逐渐变得严重,这又从侧面验证了进口压力的改变会影响固体颗粒在离心泵内部的集聚分布状态,进而影响体积磨损量。

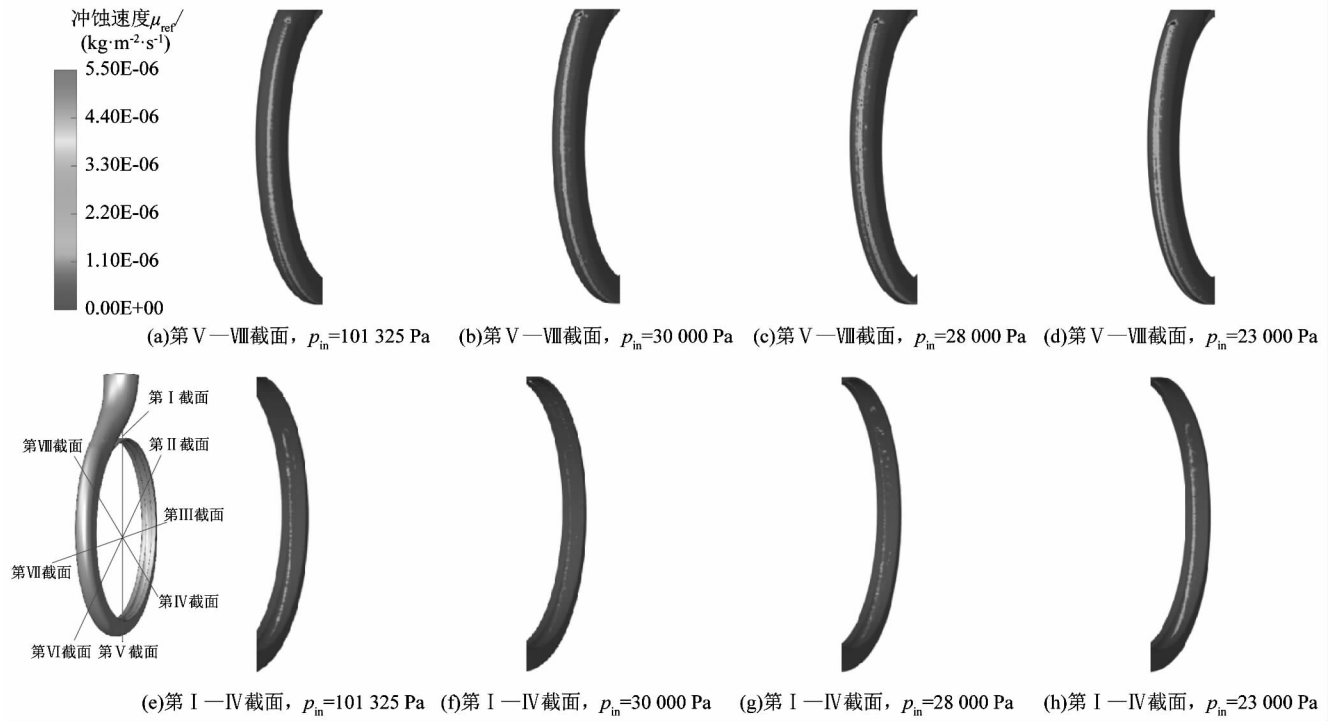

图 6 不同进口压力下离心泵蜗壳内颗粒冲蚀速度分布

Figure 6 Distributions of particle erosion velocity inside volute of centrifugal pump under different inlet pressures

蜗壳内壁面的磨损主要发生在与叶轮轮缘线相对应的位置,严重空化阶段的体积磨损量和临界空化阶段的体积磨损量有很大差别,当离心泵处于由临界空化阶段向严重空化阶段过渡时,固体颗粒会因为颗粒的跟随性及流体速度等因素的影响,在蜗壳内壁面处改变流动特点,甚至会在内壁面形成一定厚度的沙粒层,从而降低蜗壳内壁面的体积磨损量[17]91。另外根据空化磨损对比发现:随着进口压力的降低,离心泵蜗壳的体积磨损量比纯水工况下的体积磨损量严重,这种情况也说明了空化程度会影响离心泵的磨损情况。

2.4　进口压力对叶片磨损状态的影响

图7所示为不同进口压力下离心泵叶片处的颗粒冲蚀速度分布,其反映的是叶片冲击磨损分布情况。由图7可以看出:叶片的冲击磨损在尾翼磨损明显,未发生空化时磨损主要集中在叶片进口部分,随着空化程度的加剧,叶片磨损逐渐由叶片头部向叶片中部扩散,且在叶片压力面尤为明显,在临界空化阶段磨损值达到最大。这是由于当离心泵处于临界空化阶段时叶片进口端同时发生汽蚀与磨损现象,2者相互促进使得叶片进口端磨损十分明显;严重空化阶段气相体积分数增加到一个定值,因为空化的影响叶片进口部分流入的液体较少,离心泵震动明显,因此流入叶片进口端的固体颗粒受轴向力作用增大,固体颗粒大量冲击后盖板并产生一定的附着;与此同时,叶片做的功绝大部分传递给了液体介质和固体颗粒,使得固体颗粒的运动速度逐渐上升,其对叶片的冲击作用也在变大,所以会发生以上现象。

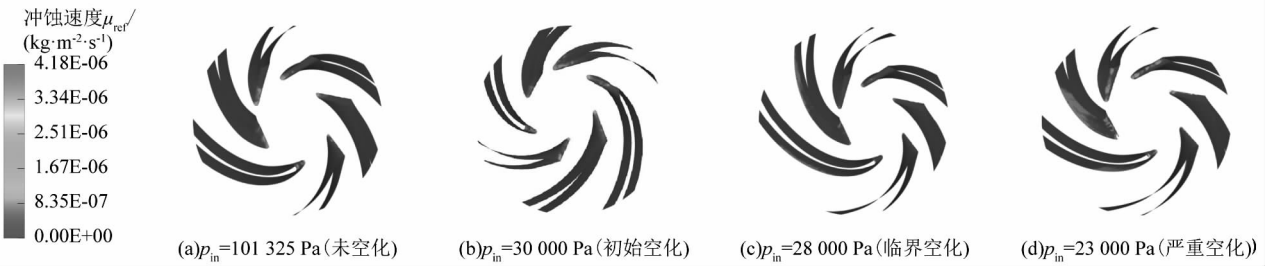

图7　不同进口压力下离心泵叶片处颗粒冲蚀速度分布

Figure 7　Distributions of particle erosion velocity at blade of centrifugal pump under different inlet pressures

3　颗粒直径对离心泵性能及磨损的影响

3.1　颗粒直径对离心泵扬程和效率的影响

在固体颗粒密度ρ_s为2 800 kg/m^3、颗粒的体积分数a_s为8%的条件下,离心泵进口压力p_{in}为28 000 Pa,离心泵内部处于临界空化状态,得到图8所示的离心泵扬程和效率随颗粒直径变化曲线。从图8可以发现:离心泵的扬程和效率随着颗粒粒径的增大,均出现先增大后减小的趋势;颗粒直径为0.01~0.05 mm时,扬程随着固体颗粒粒径的增加而逐渐增大,颗粒粒径0.05~0.07 mm时扬程随着颗粒直径的增大而急剧下降;然而效率在固体颗粒直径小于0.01 mm时,随着颗粒直径的增大而逐渐变大,此后随着固体颗粒直径的增大离心泵的效率逐渐降低,在固体颗粒直径为0.07 mm时的效率和纯水工况下的效率分别为74.25%和76.45%,2个效率相差很小。

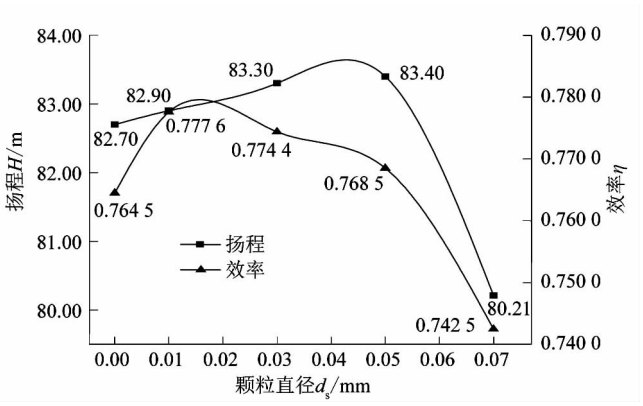

图8　离心泵扬程和效率随颗粒直径变化的曲线

Figure 8　Head and efficiency curves of centrifugal pump as function of particle diameter changing with particle diameters

这是因为:在流体介质中加入固体颗粒后,离心泵发生空化,离心泵内的成核机制被破坏,造成了离心泵的扬

程和效率在颗粒直径较小时发生增大现象;随着颗粒直径的增大,固体颗粒增加了离心泵内部的摩擦和碰撞阻力,使得离心泵需要克服更大的阻力来达到相同的流量和扬程,导致了效率的快速下降;随着颗粒直径的变大,流体密度变大,离心泵的一部分动能传递给泥沙颗粒,这也导致了扬程的下降。

3.2 颗粒直径对颗粒运动速度的影响

图 9 所示为临界空化条件下不同直径颗粒的速度轨迹。当固体颗粒在流体介质中流动时需考虑固体颗粒的流动跟随性。当固体颗粒直径小于 0.03 mm 时,固体颗粒具有很好的跟随性,颗粒在叶轮流道和蜗壳区域内跟随流体进行规则性运动,受到的离心力和惯性力较小,固体颗粒与叶轮和蜗壳内壁面发生碰撞的概率较低。因此,在颗粒直径较小时对离心泵的磨蚀以空蚀为主,主要发生在叶轮头部。随着固体颗粒直径的增大,其自身所受的惯性力和离心力也在逐渐增大,颗粒在流体内的跟随性变差,固体颗粒冲击叶片工作面的概率增大,叶片的磨蚀逐渐以颗粒冲击导致的磨蚀为主。在蜗壳内部的固体颗粒因离心力增大而使得其运动时的旋转半径变大,导致固体颗粒与蜗壳内壁面碰撞的几率增加,蜗壳内部的磨损也随着颗粒直径的增大而加剧。因此,离心泵在颗粒直径较小时的磨蚀以空蚀为主,随着颗粒直径的变大,磨蚀情况以磨损为主。

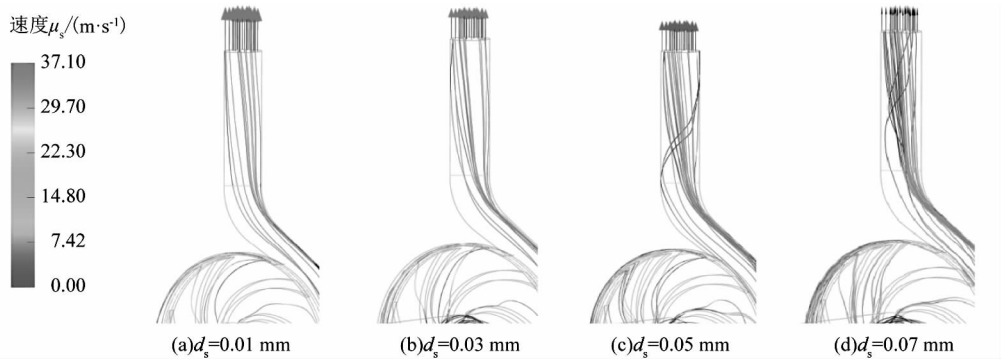

图 9 临界空化条件下不同直径颗粒的速度轨迹

Figure 9 Particle velocity trajectories with different diameters under critical cavitation

3.3 颗粒直径对蜗壳磨损状态的影响

图 10 所示为不同颗粒直径时蜗壳内颗粒冲蚀速度分布。颗粒冲蚀速度分布可以反映蜗壳内的磨损分布情况。在固、液两相流介质下,蜗壳内部从蜗壳第Ⅰ截面附近沿顺时针方向到第Ⅷ截面的磨损情况呈现逐渐增大的趋势,而且第Ⅷ截面附近(隔舌附近)的磨损情况最为严重。这是因为隔舌附近的流道截面最窄,固体颗粒进入蜗壳内的速度最大,对隔舌附近的冲击强度也最大;当固体颗粒由叶轮流道进入蜗壳流道内,随着蜗壳旋转半径的增大和蜗壳流道横截面的增大,固体颗粒速度减小,使得冲击能量逐渐变小,固体颗粒与蜗壳壁面的碰撞几率也在逐渐降低,因此磨损情况逐渐减轻。

3.4 颗粒直径对叶片磨损状态的影响

图 11 所示为不同颗粒直径条件下离心泵叶片处固体颗粒的冲蚀速度分布。其反映了叶片磨损分布情况。当固体颗粒直径为 0.01 ~ 0.03 mm 时,离心泵主要受空蚀的影响,在叶片进口端有少量的点状空蚀孔坑,叶片其余部位的磨损程度相对较轻。这也证明了在颗粒体积分数较低的含沙水条件下,离心泵内叶片的磨损以空蚀为主,此时固体颗粒直径对于离心泵内部的流场没有显著的影响,过流部件的磨损情况仅仅出现在流场内速度最大的区域。

当固体颗粒直径为 0.05 ~ 0.07 mm 时,固体颗粒质量增大,自身所受的惯性力和离心力随之增大,其在流场中的速度与流体介质的速度之间存在一定的速度差,与叶片的工作面和背面的碰撞几率增加。尤其是叶片工作面,因为处于受压面,此处的固体颗粒数量较多,与工作面碰撞的颗粒数量也较多。由图 11(d)可以发现叶片中下部附近的磨损变得十分严重,由点状磨损变成了片状磨损,这与固体颗粒的冲蚀速度和叶片自身受力情况有关。

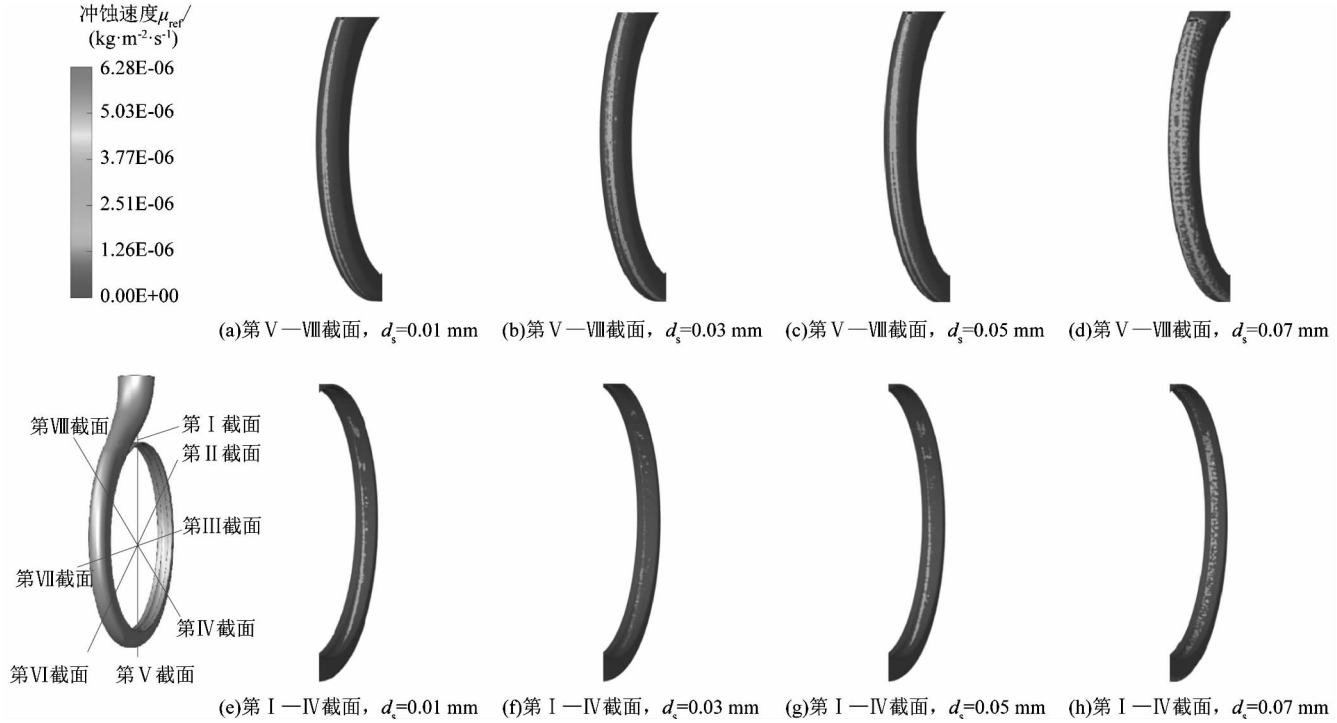

图 10　离心泵蜗壳内不同直径颗粒的冲蚀速度分布

Figure 10　Distributions of particle erosion velocity inside volute of centrifugal pump under different particle diameters

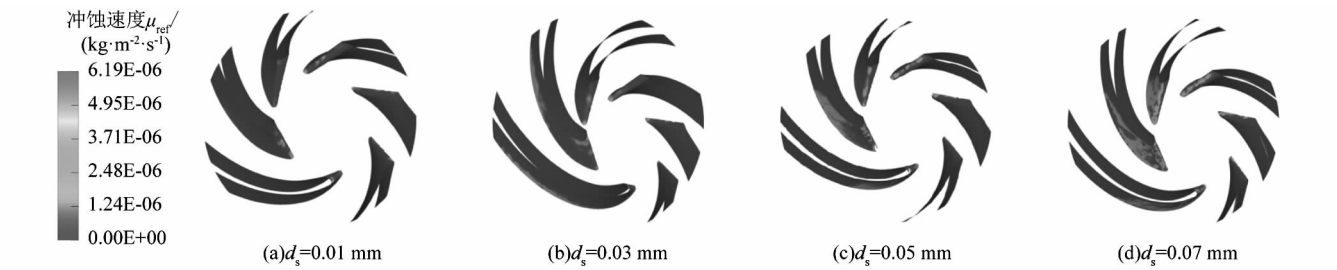

图 11　离心泵叶片处不同直径颗粒的冲蚀速度分布

Figure 11　Distributions of particle erosion velocity at blade of centrifugal pump under different particle diameters

由此可知:叶片的磨损随着固体颗粒直径的增大而逐渐增大,叶片的磨损分布情况和固体颗粒的冲蚀速率分布具有一致性,对于叶轮后盖板和叶片出口、叶片中下部 3 处来说磨损主要集中在叶片出口处。同时由于叶片背面和工作面的压力差,使得固体颗粒相对集中在叶片工作面,而对于叶片背面的冲击颗粒的数量和冲击能量相对较少,对其结构磨损的影响较小。

4　颗粒密度对固液两相流动及磨损的影响

4.1　颗粒密度对颗粒运动轨迹的影响

图 12 所示为不同密度颗粒的速度轨迹,其反映了颗粒的运动轨迹。由图 12 可知,固体颗粒密度的改变对于固体颗粒在叶轮流道内的运动轨迹具有显著的影响。随着固体颗粒密度的变大,固体颗粒的运动速度也逐渐增大,运动轨迹逐渐变得混乱,增加了固体颗粒与离心泵各过流部件的碰撞几率,尤其是叶轮内的固体颗粒,密度大的固体颗粒会更加容易向叶片工作面偏移,对工作面产生更大的冲击磨损。

4.2　颗粒密度对蜗壳磨损的影响

图 13 所示为蜗壳内不同密度颗粒的冲蚀速度分布,其反映了蜗壳的磨损分布情况。随着固体颗粒密度的增大,蜗壳内部的磨损情况也逐渐变得严重。当

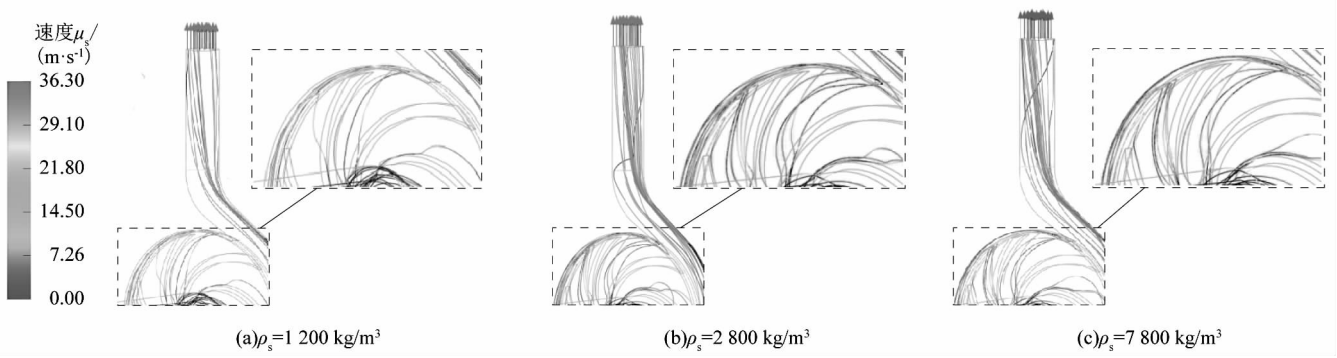

图 12 不同密度颗粒的速度轨迹

Figure 12 Particle velocity trajectories with different densities

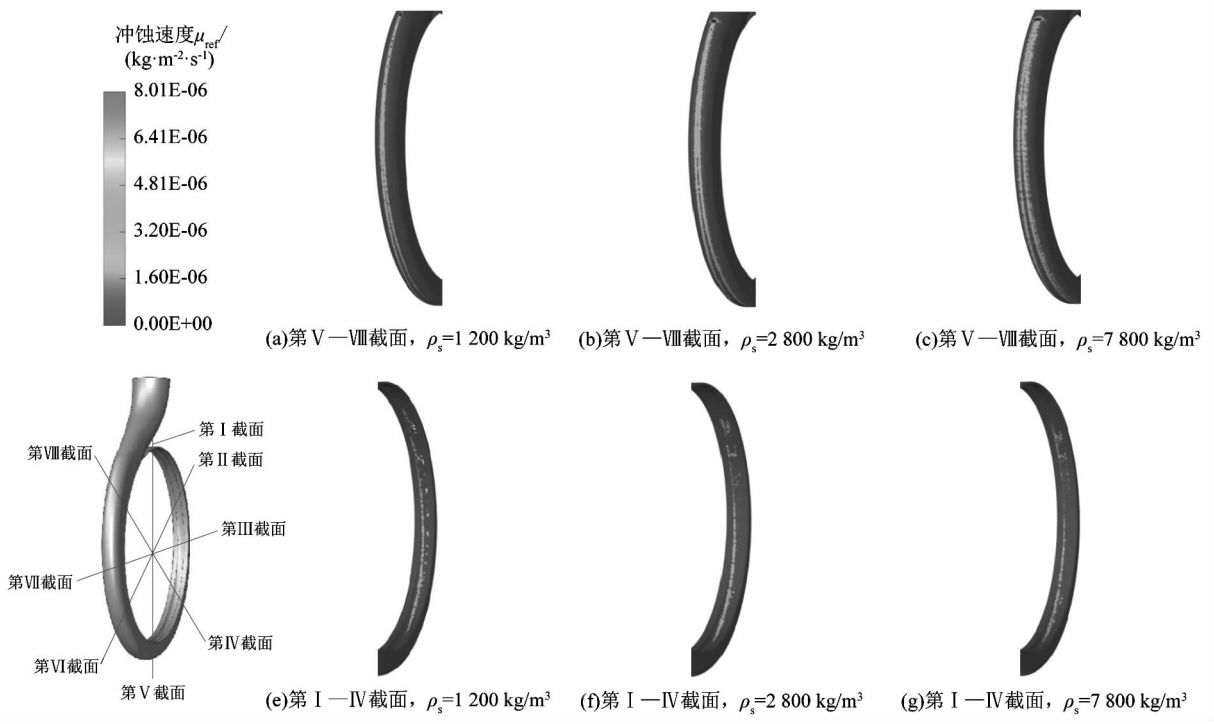

图 13 离心泵蜗壳内不同密度颗粒的冲蚀速度分布

Figure 13 Distributions of particle erosion velocity inside volute of centrifugal pump under different particle densities

固体颗粒密度为 1 200 kg/m^{3}时,蜗壳内部的磨损情况变化规律和颗粒直径对其影响规律一致,磨损的主要位置为靠近蜗壳与叶轮边缘交界处,蜗壳内部从第Ⅰ截面开始沿顺时针方向到第Ⅷ截面(隔舌附近)磨损逐渐增大。当固体颗粒密度为 2 800 kg/m^{3}时,隔舌附近区域的磨损程度明显增大,且蜗壳内部从第Ⅱ截面沿顺时针方向到第Ⅵ截面附近的磨损程度进一步加大;当固体颗粒密度为 7 800 kg/m^{3}时,蜗壳内部的磨损逐渐趋于均匀分布,并不仅仅分布在叶轮边缘线附近。并且蜗壳的体积磨损量随固体颗粒密度的增加而增加。

出现上述情况的原因是:随着固体颗粒密度的增大,固体颗粒自身受到的惯性力也在逐渐增大,且较小密度的固体颗粒与较大密度的固体颗粒相比在流体介质中的流动性更好,因此较小密度的固体颗粒会以较大的速度冲击蜗壳隔舌,给隔舌附近的区域造成严重

的磨损;离心泵内流场湍流强度随着颗粒密度的增大而增强,同时在重力的影响下,蜗壳上半部分,尤其是隔舌附近的冲蚀速度会出现由大到小的变化。因此,颗粒密度越大,对离心泵隔舌附近造成的冲击磨损越大,蜗壳下部附近的磨损相对会变小,但总的体积磨损量均会随着固体颗粒密度的增大而增大。

4.3　颗粒密度对叶片磨损的影响

图 14 所示为离心泵叶片处不同密度颗粒的冲蚀速度分布,其反映的是叶片处磨损分布情况。当固体颗粒密度为 1 200 kg/m^{3}时,在临界空化状态下,叶片的磨损集中分布在叶片的进口段,同时在叶片的工作面出现点状磨损分布,此时的磨蚀以空蚀为主;当固体颗粒密度为 2 800 kg/m^{3}时,叶片的工作面开始出现片状磨损,叶片的中下部的磨损情况变得严重;当固体颗粒密度为 7 800 kg/m^{3}时,叶片的工作面磨损情况变得更为严重。

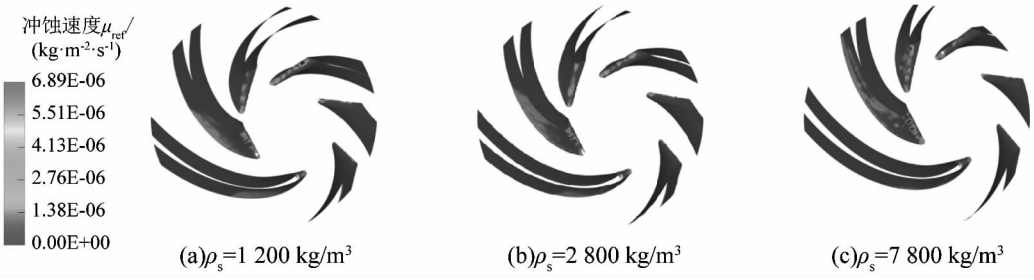

图 14　离心泵叶片处不同密度颗粒的冲蚀速度分布

Figure 14　Distributions of particle erosion velocity at blade of centrifugal pump under different particle densities

出现上述情况的原因是:离心泵在设计工况下运行,当固体颗粒密度较小时,固体颗粒和流体介质的密度相差不多,此时的叶片磨蚀以空蚀为主,固体颗粒在叶轮流道内分布均匀,所以在叶片的工作面和背面均会出现磨损;当固体颗粒密度增大,其自身受到的惯性力就会逐渐增大,由于叶片工作面和背面的压力差的存在,叶片的工作面会受到更多固体颗粒的冲击。综合考虑固体颗粒受到的重力、离心力和轴向力,固体颗粒对叶片的中下部造成冲击,磨损更加明显。

5　结论

课题组通过改变离心泵进口压力来实现离心泵内不同的空化状态,然后研究了不同空化状态下离心泵内的磨损情况,并改变固体颗粒的直径和密度来研究离心泵性能和磨损的变化规律,得到以下结论:

1) 随着进口压力的逐渐降低,离心泵空化现象逐渐严重,离心泵叶片的磨损逐渐由进口端向中下部扩散,磨损由以空蚀为主变为以磨损为主。

2) 低体积分数,小直径的固体颗粒会在离心泵内部充当成核核子,诱导空化现象提前发生。

3) 固体颗粒的直径和密度都会影响过流部件的磨损分布。随着颗粒直径和密度的增大,叶片上的磨损逐渐从以叶片进口端的空蚀为主变为以叶片中下部的磨损为主;对于蜗壳而言,体积磨损量会随着固体颗粒密度的增大而增大。并且,随着颗粒直径或颗粒密度的增大,蜗壳上半部的磨损会逐渐增大,这与固体颗粒受到的重力有关。

在研究过程中还发现因颗粒直径的改变离心泵的扬程最高点和最佳效率点并不是重合的,这一点有待继续研究;同时,当固体颗粒直径小于 0.01 mm 时,离心泵效率随直径增大而增大,但在颗粒直径大于 0.01 mm 时泵的效率随直径增大而逐渐降低,离心泵的效率、扬程和固体颗粒直径之间的关系仍需进一步研究。

参考文献:

[1] 张涛,陈次昌,吕东莉,等. 含沙水流中空化促进磨损破坏机理[J]. 排灌机械工程学报,2011,29(4):297-302.

[2] JIN H Y,ZHENG F Z,LI S Y,et al. The role of sand particles on the rapid destruction of the cavitation zone of hydraulic turbines[J]. Wear,1986,112(2):199-205.

[3] HU H X,ZHENG Y G. The effect of sand particle concentrations on the vibratory cavitation erosion[J]. Wear,2017,384/385:95-105.

[4] WANG Y,WU J H,MA F. Cavitation-silt erosion in sand suspensions[J]. Journal of Mechanical Science and Technology,2018,32(12):5697-5702.

[5] ZHANG Y N,XIE X Y,ZHANG Y N,et al. Experimental study of

influences of a particle on the collapsing dynamics of a laser-induced cavitation bubble near a solid wall[J]. Experimental Thermal and Fluid Science,2019,105:289 – 306.

[6] BILUS I,HOCEVAR M,DULAR M, et al. Numerical prediction of various cavitation erosion mechanisms [J]. Journal of Fluids Engineering,2020,142(4):401 – 402.

[7] 王勇,李刚祥,袁霄,等. 混合沙粒对半开式叶轮离心泵磨损的影响[J]. 排灌机械工程学报,2021,38(8):764 – 769.

[8] PAGALTHIVARTHI K V, VISINTAINER R J. Solid-liquid flow-induced erosion prediction in three dimensional pump casing[C]// ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting. Vail Colorado USA:ASME,2009:611 – 617.

[9] PENG G J,HUANG X,ZHOU L,et al. Solid-liquid two-phase flow and wear analysis in a largescale centrifugal slurry pump [J]. Engineering Failure Analysis,2020,114:1 – 19.

[10] 刘小兵,曾永忠,华红,等. 渔子溪电站水轮机转轮叶片泥沙磨损研究[J]. 西华大学学报(自然科学版),2020,39(5):67 – 73.

[11] XU H L,CHEN W,XU C. Cavitation performance of multistage slurry pump in deep-sea mining[J]. AIP Advance,2019,9(10):105024.

[12] ADNON A,JABBAR A U,KOTEN H,et al. Strive to reduce slurry erosion and cavitation in pumps through flow modifications, design optimization and some other techniques: long term impact on process industry[J]. Materials,2021,14(3):30.

[13] LIU M, TAN L, CAO S L. Influence of viscosity on energy performance and flow field of a multiphase pump[J]. Renewable Energy,2020,162:1151 – 1160.

[14] LÜ L,ZHANG Y X,ZHANG Y N. Experimental investigations of the particle motions induced by a laser-generated cavitation bubble[J]. Ultrason Sonochem,2019,56:63 – 76.

[15] LIN P,HU D,LIN Z J,et al. The mechanism of joint effects of axial-flow pump cavitation and sediment wear[J]. Advance in Mechanical Engineering,2020,12(5):14.

[16] 苏佳慧. 颗粒磨损模型改进及其在离心泵泥沙磨损中的应用[D]. 武汉:武汉大学,2019:1 – 20.

[17] 陈正甦,衡亚光,熊平,等. 基于 CFD-DPM 的离心泵内颗粒性质对泵性能与磨损的影响[J]. 西华大学学报(自然科学版),2024,43(1):87 – 96.

[18] MENDOZA A J, GUZMAN E, MARTIENZ-PEDRERO F, et al. Particle laden fluid interfaces: dynamics and interfacial rheology [J]. Advances in Colloid and Interface Science, 2014,206:303 – 319.