

叶顶间隙结构对轴流铅铋泵叶轮磨损特性的影响

常杰元¹ 黎义斌^{1,2} 马文生³ 张人会^{1,2} 刘欣¹ 牛腾¹

1(兰州理工大学 能源与动力工程学院 兰州 730050)

2(兰州理工大学核级泵先进装备创新研究中心 兰州 730050)

3(重庆水泵厂有限责任公司 重庆 400033)

摘要 铅冷快堆反应回路中的高温液态铅铋金属会对轴流铅铋泵叶轮叶片头部产生冲刷磨损效应,造成叶片表面保护层破裂从而加快材料腐蚀速率。为了降低高温液态金属对叶片表面的冲刷磨损效应,设计平面、倒直角和倒圆角的三种叶顶间隙结构,并通过缩比换算方法验证仿真结果的可靠性,继而采用 ANSYS CFX 流体动力学软件分析了不同叶顶间隙结构下的流速、剪切力、流态随冲刷磨损特性变化规律,并利用壁面熵产率方法分析了高温液态铅铋金属在材料表面的能量损耗。结果表明:标准工况下倒直角模型的扬程和效率较平面分别降低了 1.02% 和 0.64%,倒圆角模型扬程降低了 0.51%,而效率提升了 0.51%。叶轮内冲刷磨损效应主要发生在叶片轮缘进口边附近,倒直角和倒圆角设计可以通过降低叶顶间隙的流速和改善流态的途径减小叶片表面机械能损耗,从而降低该位置的冲刷磨损效应。因此倒圆角设计和倒直角设计能够改善高温液态铅铋金属对叶片头部冲刷磨损的影响。

关键词 轴流铅铋泵, 叶顶间隙, 冲刷磨损, 数值模拟

中图分类号 TL425

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.100503

Influence of impeller top clearance structure on the wear characteristics of the impeller of an axial flow lead-bismuth pump

CHANG Jieyuan¹ LI Yibin^{1,2} MA Wensheng³ ZHANG Renhui^{1,2} LIU Xin¹ NIU Teng¹

1(School of Energy and Power Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

2(Innovation Research Center of Nuclear Grade Pump Advanced Equipment of Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

3(Chongqing Water Pump Factory Co., Ltd., Chongqing 400033, China)

Abstract [Background] The high-temperature liquid lead-bismuth metal has a scouring and wear effect on the head of the axial flow lead-bismuth pump impeller blades in a lead-cooled fast reactor system, causing the protective layer on the blade surface to break down and material corrosion rate to accelerate. [Purpose] This study aims to reduce the scouring wear effect of the high temperature liquid metals on blade surfaces. [Methods] First of all, three types of leaf top clearance structures, i.e., plane, chamfered right angle, and chamfered rounded angle, were designed. Then, the reliability of the simulation results was verified by the scaling conversion method, and the commercial CFD

甘肃省教育厅"双一流"重点项目

第一作者: 常杰元, 男, 1997年出生, 2023年于兰州理工大学获硕士学位, 主要从事叶片泵内部流动机理研究

通信作者: 黎义斌, E-mail: liyibin58@163.com

收稿日期: 2023-03-20, 修回日期: 2023-05-14

Gansu Provincial Education Department "Double First Class" Key Projects

First author: CHANG Jieyuan, male, born in 1997, graduated from Lanzhou University of Technology with a master's degree in 2023, mainly engaged in the research of internal flow mechanism of vane pump

Corresponding author: LI Yibin, E-mail: liyibin58@163.com

Received date: 2023-03-20, revised date: 2023-05-14

software ANSYS CFX with SST $k-\omega$ turbulence model was employed to analyze the variation of flow velocity, shear force, and flow pattern with scouring and wear characteristics under different leaf top clearance structures. Finally, the energy loss of the high temperature liquid lead-bismuth metal on the material surface was analyzed using the wall entropy yield. **[Results]** Analysis results show that the head and efficiency of the chamfered right angle model are reduced by 1.02% and 0.64%, respectively, compared with those of the flat surface under standard operating conditions, and the chamfered angle model shows a 0.51% reduction in the head and 0.51% efficiency increase. The impeller scouring wear effect occurs predominantly near the inlet edge of the blade rim, and the effect of the high temperature liquid metal on the blade head scouring wear is improved by the chamfered and rounded designs. **[Conclusions]** The chamfered and rounded designs reduces the mechanical energy loss on the blade surface by reducing the flow velocity at the top clearance and reducing the scouring wear effect at this location. Therefore, the rounded design and the right angle design could improve the influence of high-temperature liquid lead-bismuth metal on the erosion wear of the blade head.

Key words Axial lead-bismuth pump, Leaf top clearance, Scouring wear, Numerical simulation

高温液态铅铋合金具有较好的导热性、化学稳定性,第四代核能系统论坛将高温液态铅铋金属作为目标冷却剂之一。轴流泵因其具有低扬程、结构简单、安装灵活等优点^[1-2],可满足反应堆热量转移、结构安装及安全性等设计要求,成为铅铋泵设计泵型之一^[3]。而高温液态铅铋介质属于高密度、高能量和高黏度的不可压缩流体,会对轴流叶片轮缘进口边产生冲刷磨损效应^[4],使轴流叶片头部形成卷边磨损效应,造成材料表面保护膜破裂加速腐蚀^[5]。

Zhang等^[6]研究发现,高温液态铅铋金属会对铅铋泵叶轮轮缘产生侵蚀作用;Wang等^[7]阐明轴流铅铋泵叶轮在工作状态时处于高速旋转,其表面的高温液态金属流动速度可以达到 $10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$;武少杰等^[8]利用高温液态金属动能冲击材料表面得到大宽深比焊缝,说明高温液态铅铋金属对材料的冲刷磨损效应不容忽视^[9];为了预测液态金属对材料冲刷磨损特征,彭湃等^[10]设计新型试验装置研究液态金属对壁面材料的冲刷磨损。

目前,控制高温液态铅铋金属冲刷磨损材料表面的主要方法有耐磨蚀涂层技术及流场优化等^[11-13]。Zhu等^[14]通过微弧氧化的方法提高材料的耐腐蚀性;Kurata等^[15]研究了合金涂层在防腐屏障中的适用性;Chen等^[16]通过研究液态金属与界面的润湿性及剪切力表征材料耐腐蚀性;王凯琳等^[17]通过优化流场改善液态金属冲刷磨损材料表面。虽然学者在防腐蚀方面做了许多工作,但通过水力设计角度进行防腐蚀设计的研究较少,本文聚焦高温液态铅铋金属对轴流叶轮叶片冲刷磨损问题,通过对磨损因素进行分析,并改变叶顶间隙结构以改善流态角度,研究叶轮叶片的冲刷磨损特征。本研究为轴流铅铋泵叶轮的减磨损设计提供了理论帮助。

1 计算模型及数值方法

1.1 冲刷磨损影响因素分析

高温液态铅铋金属对过流部件冲刷磨损是流体以一定的速度及角度冲击材料表面,造成材料表面保护膜破裂或损坏,该过程视为液态铅铋金属对材料物理受力,主要表现在剪切力方面。根据牛顿内摩擦定律,剪切力是动力黏度系数与速度梯度的关系,其表达式为^[18]:

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (1)$$

为了更加清晰地阐明剪切力与流动介质物性参数关系,引入边界层理论及动量损失定律,得到湍流条件下切应力表达式为:

$$\sigma = bxRe_x^{-1/5} \quad (2)$$

$$\tau = a\rho u^2 \left(\frac{v}{\sigma u} \right) \quad (3)$$

式中: σ 为边界层厚度,m; Re 为雷诺数; μ 为动力黏度系数, $\text{Pa}\cdot\text{s}$; du/dy 为速度梯度, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; a 为剪切力系数; ρ 为液态铅铋金属的密度, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$; u 为流速, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; v 为动力黏度系数, $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ 。

根据剪切力公式(1)和(3)可以发现,冲刷磨损与介质黏度、速度梯度、流速及密度相关。

1.2 物理模型及网格处理

以轴流铅铋泵为研究对象,其额定扬程 $H=5.5\text{ m}$,额定流量 $Q=760\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$,额定转速 $n=1\,250\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 。叶轮叶片5枚,导叶叶片9枚,叶轮叶顶平面间隙为 0.5 mm 。利用设计参数三维建模,图1为轴流铅铋泵三维模型示意图。

为了降低高温液态铅铋金属对轴流叶片头部轮缘的冲刷磨损,通过降低流速及改善流态的角度设

计了两种叶顶间隙结构优化方案,三种结构模型依次为平面设计、倒直角及倒圆角设计结构,如图2所示。

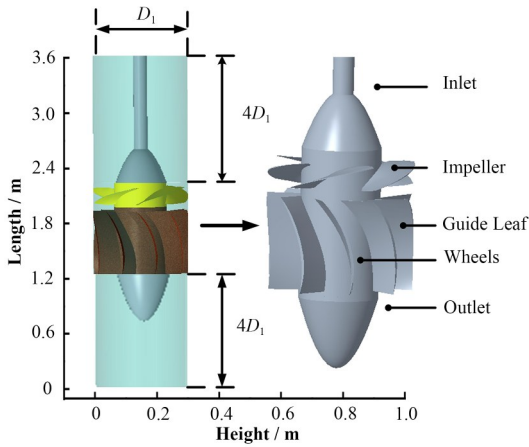


图1 铅铋轴流泵三维模型示意图

Fig.1 Schematic diagram of 3D model of lead-bismuth axial flow pump

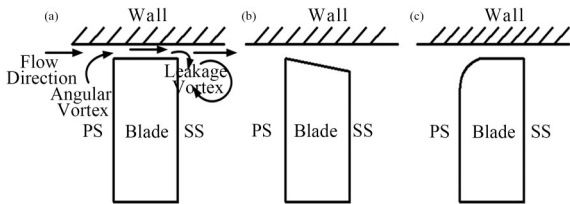


图2 叶顶间隙结构示意图

(a) 平面方案, (b) 倒直角方案, (c) 倒圆角方案

Fig.2 Schematic diagram of the leaf top clearance structures
(a) Plane, (b) Chamfering, (c) Rounding

图3为轴流铅铋泵及叶顶间隙结构的网格示意图。采用六面体网格对流体域网格划分,对重点分析区域进行网格加密,保证满足湍流模型精度要求^[19]。为证明数值计算结果不受网格数的影响,选择轴流铅铋泵扬程为监测参数进行网格无关性验证,如图4所示。当网格数量达到483万时,继续增加网格数,轴流铅铋泵扬程计算结果趋于稳定,证明监测参数扬程对网格数的增加不再敏感,因此将总网格数控制在480万左右。

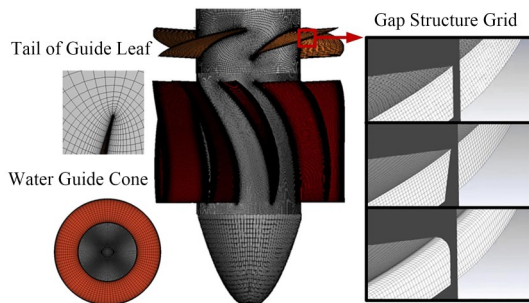


图3 计算域网格示意图

Fig.3 Schematic of domain grid

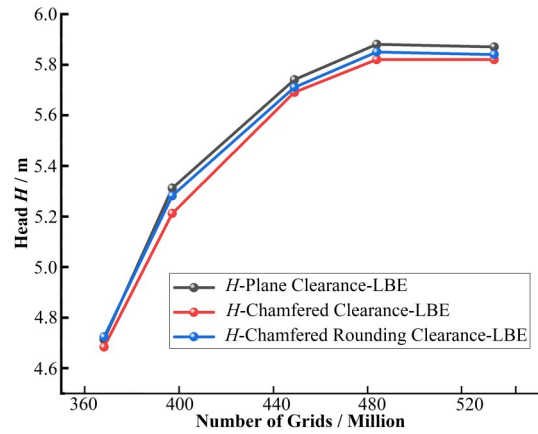


图4 网格独立性验证

Fig.4 Verification of the grid independence

1.3 边界条件

本文利用水力仿真软件 ANSYS CFX 进行三维定常流场模拟,边界条件设置如下:叶轮为旋转域,其余部件为静止域,内部参考大气压均为 101 325 Pa,流体计算模型采用 SST $k-\omega$ 湍流模型,设置转速为 $1\ 250\ \text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 。壁面为无滑移壁面,近壁面区域采用标准壁面函数处理,域之间采用 Interface 连接,选取 GGI (General Grid Interface) 实现数据传递。数值计算时设置铅铋合金温度为 $350\ ^\circ\text{C}$,此时液态金属密度为 $10\ 320\ \text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$,黏度为 $0.001\ 94\ \text{Pa}\cdot\text{s}$,采用进口条件为质量流量进口,出口条件为自由出流,设置出口压力为 0 Pa。

1.4 实验装置及模型验证

为验证数值模拟结果可靠性,由于试验设备的限制,在闭式试验台上开展同转速、缩比系数(γ)为 0.48 的平面方案间隙模型叶轮进行自来水外特性试验,图5为试验台布置图,图6为模型试验台,试验台由电动机、模型泵、压力传感器、电磁流量计、阀门、水箱等组成。当进行外特性试验时,需要等待 3~5 min,待流动稳定后再进行数据采集。

当数值模拟计算时,为了保证计算模型的实际工程意义,故采用缩比前的模型进行数值模拟,在平面叶顶间隙结构模型进行试验与数值计算结果相互验证时,需将平面模型所得试验数据进行相似换算得到原型的试验数据,根据相似换算定义缩比系数为:

$$\gamma = \frac{D_M}{D_P} \quad (4)$$

式中: γ 为缩比系数, $\gamma=0.48$ 。 D_M 、 D_P 分别为模型机和原型机叶轮外径尺寸,假设二者满足几何相似和动力相似,则扬程系数、流量系数可得模型与原型扬程、流量之间的换算关系:

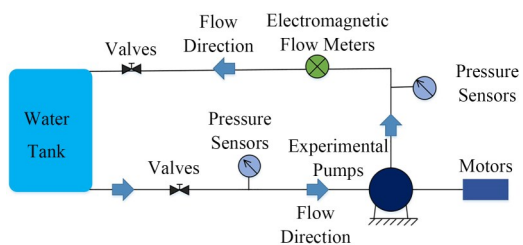


图5 试验装置工作流程示意图
Fig.5 Workflow diagram of experimental setup

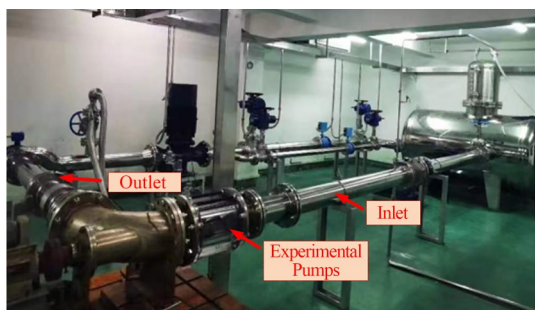


图6 轴流泵模型清水试验场地照片
Fig.6 Site photo of axial flow pump model for clean water test

$$\frac{H_M}{H_P} = \gamma^2 \left(\frac{n_M}{n_P} \right)^2 \quad (5)$$

$$\frac{Q_M}{Q_P} = \gamma^3 \left(\frac{n_M}{n_P} \right)^3 \quad (6)$$

式中： H_M 、 H_P 、 Q_M 、 Q_P 、 n_M 、 n_P 分别为模型与原型的扬程、流量和转速。

图7为试验结果与数值模拟结果绘制的外特性曲线图，可以看出，高温液态铅铋金属的数值模拟结果与介质水数值模拟结果保持基本一致，说明铅铋介质与水的结果具有可靠的相似度，且介质水数值模拟结果与试验外特性曲线的发展趋势一致，试验结果与数值模拟的最大偏差在4%以内，处于可接受误差范围之内，因此计算模型和数值方法较准确。

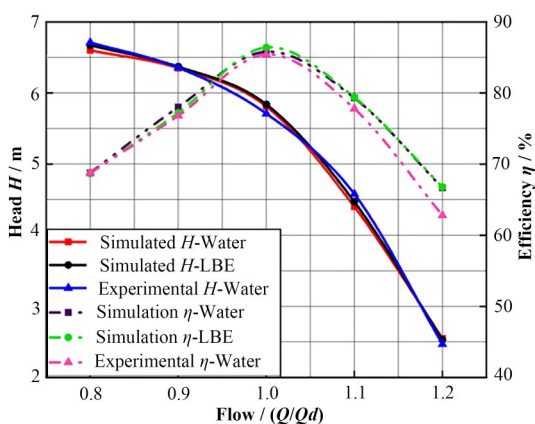


图7 轴流铅铋泵模型准确性验证
Fig.7 Model accuracy verification for axial lead-bismuth pump

2 计算结果分析

2.1 叶顶间隙结构对轴流铅铋泵性能的影响

针对三种叶顶间隙结构进行介质为液态铅铋金属的水力性能计算，得到扬程、效率随流量变化的外特性曲线，如图8所示。

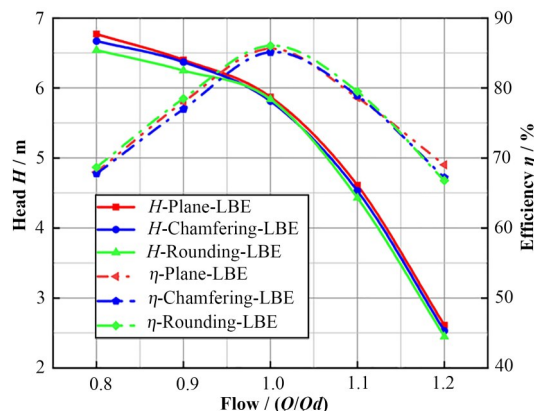


图8 外特性曲线
Fig.8 External characteristic curve

从图8可以看出，三种叶顶间隙结构下轴流泵的扬程、效率曲线十分相近，其中在 $1.0Q$ 工况点，倒直角方案和倒圆角方案的扬程相较原方案分别降低了1.02%和0.51%，倒直角方案效率降低了0.64%，而倒圆角方案效率提升了0.51%，这是由于叶顶间隙结构处间隙径向距离增大进而增大了泄漏损失，造成了轴流铅铋泵水力性能下降，而倒圆角方案的水力效率反而提升是因为对叶顶间隙倒圆角使液态铅铋金属从压力面平缓过渡改善了该位置的流态。在 $0.8Q$ 到 $1.2Q$ 内扬程、效率的最大偏差分别为3.39%和3.28%，说明在水力性能要求不高的前提下可以采用倒直角方案和倒圆角方案。

2.2 不同叶顶间隙结构下壁面流速规律分析

根据式(3)发现高温液态铅铋金属流速对材料冲刷磨损有至关重要的影响。为了直观分析液态铅铋金属流速对叶轮叶片表面冲刷磨损特征，选取轮毂流线、中间流线和轮缘流线的截面分析冲刷磨损特征，其截面位置为叶高20%、50%和90%。

图9、10为不同叶顶间隙结构下叶轮叶片压力面、吸力面流速随流线变化曲线规律，可以看出，叶片压力面和吸力面高速流主要分布在叶片进口边且沿着流线向出口边逐渐递减，但在出口边流速陡升，液态铅铋金属流速直接影响叶片表面材料的磨损程度，说明液态铅铋金属流速对叶片头部的冲刷磨损起到促进作用。对比三种结构在叶片表面的流速随流线变化规律，发现倒直角和倒圆角叶片结构比较

平面设计其叶片压力面和吸力面头部轮缘流速分别下降了2.9%和8.8%，表现出叶片吸力面冲刷磨损程度有了更大程度的改善，且叶片表面流速分布沿轴向从进口到出口分布更加均匀。倒直角和倒圆角结构在压力面和吸力面的轮毂流线和中间流线上流速最少下降了5.8%。观察流速在轮缘流线上变化规

律可以发现，改进模型较平面模型在叶片压力面的出口边流速有所提升，而在叶片吸力面倒直角方案在中段凸起，增加了叶片后段的速度梯度。液态金属流速对材料表面冲刷磨损有重大影响，而倒直角、倒圆角设计有效降低了叶片表面流速和速度梯度从而改善了叶片表面的冲刷磨损情况。

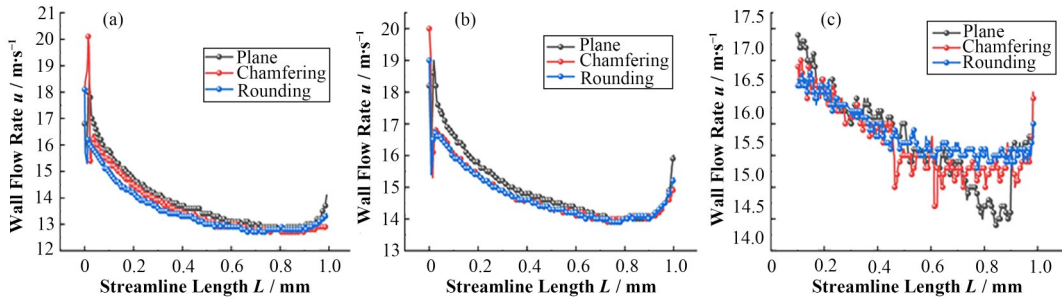


图9 不同叶顶间隙结构下压力面流速分布曲线

(a) 轮毂流线, (b) 中间流线, (c) 轮缘流线

Fig.9 Distribution curves of flow velocity on the pressure surface under different leaf top clearance structures (a) Wheel streamlines, (b) Median streamlines, (c) Flange streamlines

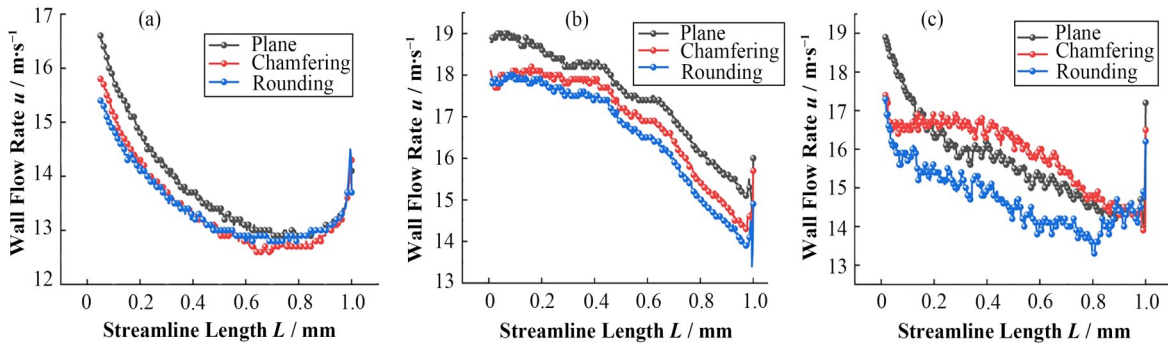


图10 不同叶顶间隙结构下吸力面流速分布曲线

(a) 轮毂流线, (b) 中间流线, (c) 轮缘流线

Fig.10 Distribution curves of flow velocity on the suction surface under different leaf top clearance structures (a) Wheel streamlines, (b) Median streamlines, (c) Flange streamlines

2.3 不同叶顶间隙结构下冲刷磨损规律分析

高温液态铅铋金属对材料表面的冲刷磨损主要表现在剪切力方面，因此，为了对比标准工况下不同叶顶间隙结构的冲刷磨损特性，采用剪切力定性及定量进行冲刷磨损特征研究。

图11为标准工况下不同叶顶间隙的叶轮叶片压力面和吸力面剪切力分布规律。从图11可以看出，叶片表面剪切力分布沿径向从轮毂向轮缘呈递增趋势，但叶片进口边靠近泵体内壁面一侧切应力陡升，说明高温液态金属对叶片的冲刷磨损主要发生在叶片轮缘进口边附近，这是由于该位置存在流速较大、高强度涡，造成液态金属对壁面材料的冲刷磨损增大。对比三种叶顶间隙下剪切力变化规律发现倒直角和倒圆角设计降低了叶片表面轮缘一侧的剪切力且增强了轮毂一侧的剪切力，使叶片表面剪

切力沿径向从轮毂到轮缘更均匀，因此，倒直角和倒圆角设计能够有效降低液态金属对轴流叶片的冲刷磨损，在水力性能允许的情况下可以考虑倒直角和倒圆角设计降低叶片表面的磨损现象。

为了能够定量对比分析不同叶顶间隙的叶片表面剪切力变化，选取轮毂流线、中间流线及轮缘流线上切应力随流线数值进行分析。

图12和图13为设计工况下不同叶顶间隙结构叶轮叶片在压力面和吸力面的剪切力曲线。可以看出，高冲刷磨损区域主要分布在叶片进口边，且沿着流线从进口到出口逐渐降低。对比叶片表面剪切力数值发现倒直角和倒圆角设计的冲刷磨损效应比较平面设计有所降低，其叶片轮缘进口边剪切力平均下降了5.5%，中间流线进口边下降了5.8%，这是由于倒圆角设计使液态铅铋金属平稳过渡进而改善叶

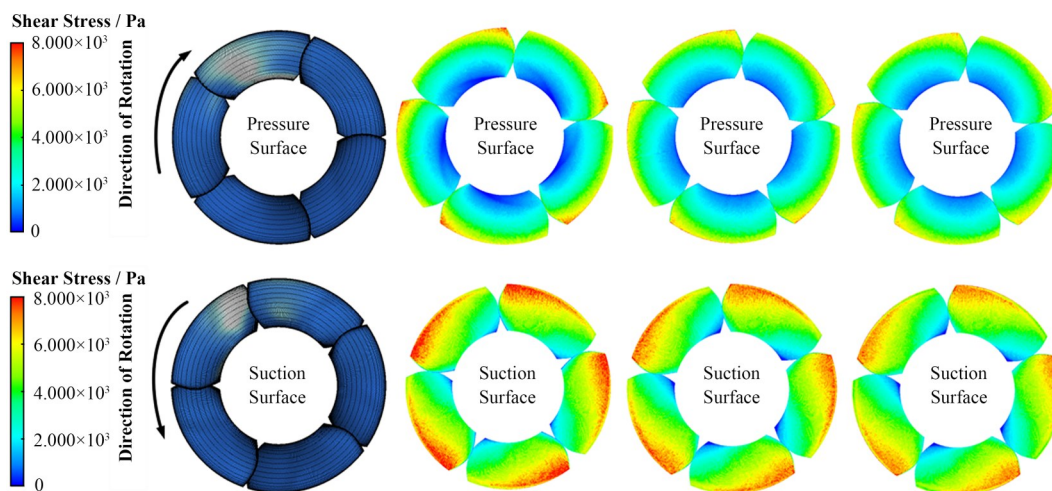


图 11 不同叶顶间隙结构下叶轮叶片剪切力分布云图
(a) 叶轮模型, (b) 平面方案, (c) 倒直角方案, (d) 倒圆角方案

Fig.11 Cloud contour of impeller blade shear force distribution under different leaf top clearance structures
(a) Impeller, (b) Plane, (c) Chamfering, (d) Rounding

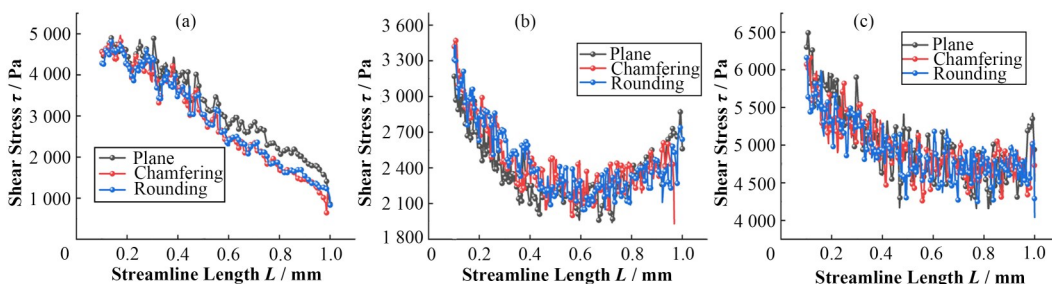


图 12 不同叶顶间隙结构下压力面剪切力曲线
(a) 轮毂流线, (b) 中间流线, (c) 轮缘流线

Fig.12 Shear curves on pressure surface under different leaf top clearance structures
(a) Wheel streamlines, (b) Median streamlines, (c) Flange streamlines

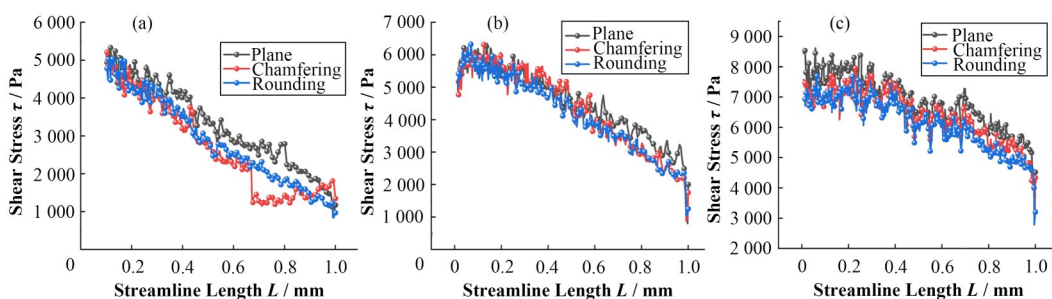


图 13 不同叶顶间隙结构下吸力面剪切力曲线
(a) 轮毂流线, (b) 中间流线, (c) 轮缘流线

Fig.13 Shear curves on suction surface under different leaf top clearance structures
(a) Wheel streamlines, (b) Median streamlines, (c) Flange streamlines

顶间隙附近流态,而倒直角设计采用间隙增大从而降低流速。对比两种设计发现倒圆角设计对于控制叶片表面材料冲刷磨损效果更优,通过剪切力表征量化的方法验证了倒直角和倒圆角设计能够有效降低叶片表面的冲刷磨损情况,因此,在水力性能要求条件允许的情况下可采取倒直角和倒圆角的设计方法降低液态铅铋金属对轴流叶片表面的磨损影响。

2.4 不同叶顶间隙结构下涡分布规律分析

高温液态铅铋金属流态的变化不仅消耗机械能而且影响泵的水力性能,对叶片表面的冲刷磨损起到加速作用。研究不同叶顶间隙下叶片头部液态铅铋金属的流态变化,阐明流态对磨损特征的作用规律,为了更清晰地观察流态变化,对流态进行Q准则

的涡识别处理且设置阈值 level 为 0.04, 并用速度进行上色。

图 14 为标准工况下不同叶顶间隙的叶轮叶片压力面流态云图。从图 14 可以看出, 叶片进口边存在大量旋涡且从进口边轮毂到轮缘涡强度和速度逐步递增, 随着对叶顶间隙倒直角或倒圆角处理时, 叶片进口边冲刷磨损效应随着涡强度的降低而降低,

其中叶片轮缘进口边流态改善尤为明显, 结合图 11 发现涡的改善很好地降低了冲刷磨损效应, 这是由于倒直角设计降低了间隙位置流速进而减小涡速度, 而倒圆角设计使液态铅铋金属平稳地进入叶顶间隙, 改善了叶顶间隙流态从而降低了涡强度, 故倒直角和倒圆角设计能够有效降低叶片表面材料的冲刷磨损。

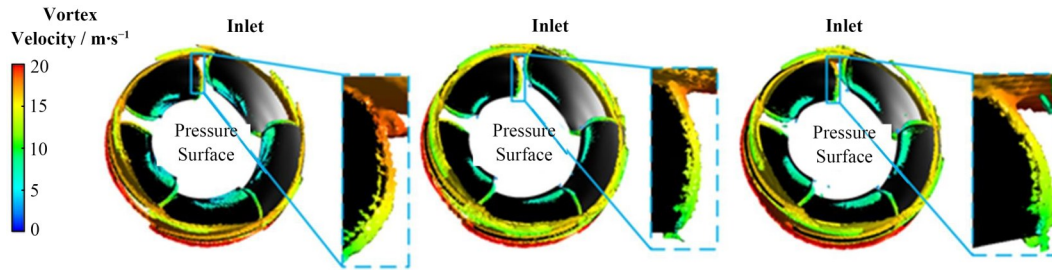


图 14 叶轮叶片压力面涡分布云图
(a) 平面模型, (b) 倒直角方案, (c) 倒圆角方案

Fig.14 Cloud map of vortex distribution on leaf wheel pressure surface
(a) Plane, (b) Chamfering, (c) Rounding

2.5 不同叶顶间隙结构下叶片表面壁面熵产率分析

液态铅铋金属对叶轮表面的冲刷磨损效应本质上是流体对材料表面剪切力做功消耗机械能, 即叶片表面冲刷磨损效应越严重, 则该区域的机械能损耗越大。学者利用壁面熵产率计算壁面区域的机械能损耗^[20], 并对该方法进行了验证^[21-22]。壁面熵产率能够有效表征液态铅铋金属在材料表面机械能损失, 当叶轮内温度保持不变时, 壁面熵产率表征了壁面剪切力、壁面流速等因素在内的叶片表面冲刷磨损效应。

图 15 为标准流量工况下不同间隙叶轮叶片压力面和吸力面壁面熵产率分布规律。可以看出, 高壁面熵产率主要分布在叶片进口边靠近轮缘一侧, 且吸力面高壁面熵产率区域明显大于压力面高壁面熵产率区域。随着对叶顶间隙进行倒直角和倒圆角处理时, 叶片表面的最大壁面熵产率从 $311 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ 下降到 $275 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ 和 $248 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$, 对比图 11 发现, 冲刷磨损效应的降低使叶片表面的机械能随之降低, 这是因为表面熵产率受流速和流态影响, 倒直角和倒圆角设计降低了流速, 从而减少表面机械能损耗, 达到改善冲刷磨损的效果。

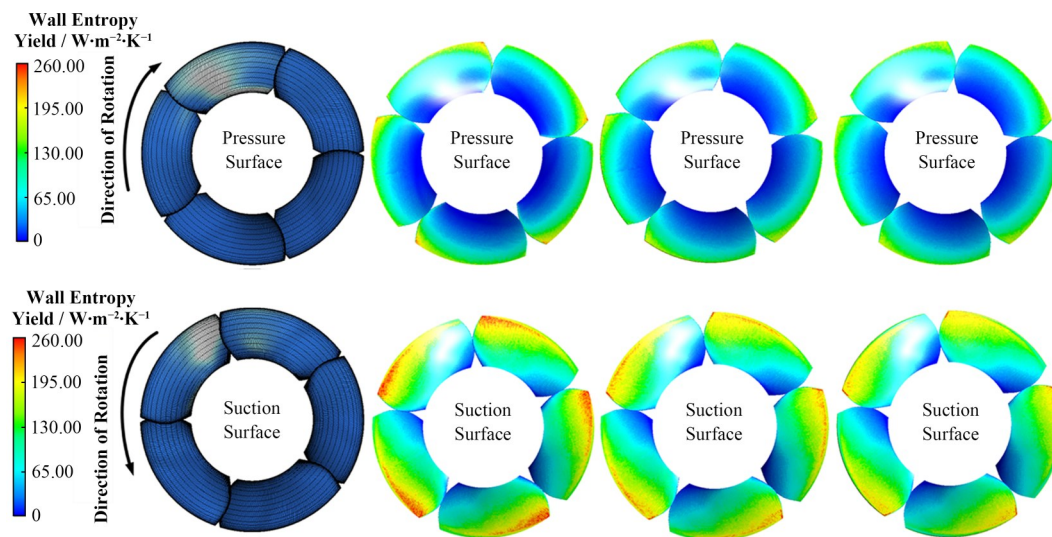


图 15 叶轮叶片壁面熵产率云图
(a) 叶轮模型, (b) 平面方案, (c) 倒直角方案, (d) 倒圆角方案
Fig.15 Cloud contour of entropy yield on impeller blade wall
(a) Impeller, (b) Plane, (c) Chamfering, (d) Rounding

3 结语

本文通过数值模拟方法计算了不同叶顶间隙结构下轴流铅铋泵水力性能,预测了冲刷磨损效应随叶片间隙结构变化规律,分析了影响冲刷磨损效应降低的原因,最后通过壁面熵产率阐明叶片表面机械能损耗与冲刷磨损关系,得到了以下结论:

1)标准流量工况下,倒直角设计模型的扬程和效率较原方案分别降低了1.02%和0.64%,倒圆角设计方案扬程降低了0.51%,而效率提升了0.51%,这是由于倒直角和倒圆角设计方案增大了叶顶间隙使得间隙泄漏增大进而降低水力性能,而倒圆角使液态金属平稳过渡降低流态旋涡进而提高水力效率。

2)高温液态金属对轴流铅铋泵叶轮冲刷磨损位置主要发生在叶片轮缘进口边附近。比较平面设计,倒直角和倒圆角设计都有效降低了液态铅铋金属对叶片进口边的冲刷磨损效应。

3)比较平面设计,倒直角和倒圆角设计通过降低流速和改善流态的途径能够影响高温液态金属对叶片表面冲刷磨损效应,利用壁面熵产率验证了叶片表面的机械能损耗越低,则高温液态金属对材料表面的冲刷磨损效应越小。

作者贡献声明 常杰元负责方案的酝酿、起草、撰写及分析;黎义斌负责方案的酝酿及文章内容的审阅;马文生负责相关试验指导;张人会负责方案的酝酿及文章内容的审阅;刘欣负责文章内容的审阅;牛腾负责文章内容的审阅。

参考文献

- 张光蓉,戴庆忠.我国轴流泵的发展与开发研究[J].东方电气评论,2004,18(1):4-9. DOI: 10.3969/j.issn.1001-9006.2004.01.002.
ZHANG Guangrong, DAI Qingzhong. Development and study of axial pumps in China[J]. Dongfang Electric Review, 2004, 18(1): 4 - 9. DOI: 10.3969/j.issn.1001-9006.2004.01.002.
- 李靖晗,胡永海,阮鹏程,等.对转轴流泵的设计与数值分析[J].流体机械,2021,49(2):37-42.
LI Jinghan, HU Yonghai, RUAN Pengcheng, *et al.* Design and numerical analysis of the counter-rotating axial flow pump[J]. Fluid Machinery, 2021, 49(2): 37 - 42.
- 王凯琳,李良星,张双雷,等.轴流铅铋泵的设计及其水力性能分析[C]//第十六届全国反应堆热工流体学术会议暨中核核反应堆热工水力技术重点实验室2019年学术年会论文集.2019:298-309.
WANG Kailin, LI Liangxing, ZHANG Shuanglei, *et al.* Design of axial lead-bismuth pump and its hydraulic performance analysis[C]//Proceedings of the 16th National Academic Conference on Reactor Thermodynamic Fluids and 2019 Annual Academic Conference of Key Laboratory of Thermodynamic Hydraulic Technology of CNNC Nuclear Reactors. 2019: 298 - 309.
- 张双雷,李良星,宋立明.轴流铅铋泵流场分析及优化[J].核动力工程,2022,43(3):158-164. DOI: 10.13832/j.jnpe.2022.03.0158.
ZHANG Shuanglei, LI Liangxing, SONG Liming. Analysis and optimization of flow field in an axial flow lead-bismuth pump[J]. Nuclear Power Engineering, 2022, 43(3): 158 - 164. DOI: 10.13832/j.jnpe.2022.03.0158.
- 黄家运,胥炎橙.核电站常规岛系统管道应对流动加速腐蚀设计策略研究[J].中国核电,2022,15(2):193-199.
HUANG Jiayun, XU Yancheng. Study on the flow accelerated corrosion design strategy for the conventional island pipeline in nuclear power plant[J]. China Nuclear Power, 2022, 15(2): 193 - 199.
- Zhang Y C, Kang C, Zhu Y, *et al.* Investigation on the performance and flow characteristics of a liquid lead-bismuth pump[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2021, 35(7): 2939 - 2947. DOI: 10.1007/s12206-021-0617-x.
- Wang K L, Li L X, Wang Y B, *et al.* Design and hydraulic performance studies on an axial lead-bismuth pump for GEN-IV reactors[J]. International Journal of Energy Research, 2021, 45(8): 11822 - 11836. DOI: 10.1002/er.5778.
- 武少杰,高洪明,张宗郁.基于Fluent的熔融金属填充焊接冲蚀孔形成过程数值模拟[J].焊接学报,2016,37(2):119-122,134.
WU Shaojie, GAO Hongming, ZHANG Zongyu. Numerical simulation of erosion hole formation process in molten metal filling welding based on Fluent[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2016, 37(2): 119 - 122, 134.
- 房玉超,杨子酉,何景山.电子束点焊熔池的液态金属冲刷效应作用规律[J].焊接学报,2019,40(6):137-142,167. DOI: 10.12073/j.hjxb.2019400168.
FANG Yuchao, YANG Ziyu, HE Jingshan. Law of liquid metal scouring effect in electron beam spot welding molten pool[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2019, 40(6): 137 - 142, 167. DOI: 10.12073/j.

- hjxb.2019400168.
- 10 彭湃, 郭腾蛟, 王延宇, 等. 液态金属旋转腐蚀实验装置的发展及创新设计[J]. 现代工业经济和信息化, 2022, **12**(4): 73 - 74, 145. DOI: [10.16525/j.cnki.14-1362/n.2022.04.027](https://doi.org/10.16525/j.cnki.14-1362/n.2022.04.027).
PENG Pai, GUO Tengjiao, WANG Yanyu, *et al.* Development and innovative design of rotating corrosion experimental apparatus for liquid metals[J]. Modern Industrial Economy and Informationization, 2022, **12**(4): 73 - 74, 145. DOI: [10.16525/j.cnki.14-1362/n.2022.04.027](https://doi.org/10.16525/j.cnki.14-1362/n.2022.04.027).
 - 11 丁祥彬, 罗梦, 路广遥, 等. 不同表面处理对316L钢焊缝耐液态铅铋腐蚀的影响[J]. 焊接, 2019(2): 21 - 25, 66. DOI: [10.12073/j.hj.20181013001](https://doi.org/10.12073/j.hj.20181013001).
DING Xiangbin, LUO Meng, LU Guangyao, *et al.* Effect of different surface treatments on corrosion resistance of 316L steel weld to liquid lead and bismuth[J]. Welding & Joining, 2019(2): 21 - 25, 66. DOI: [10.12073/j.hj.20181013001](https://doi.org/10.12073/j.hj.20181013001).
 - 12 Kondo M, Takahashi M, Sawada N, *et al.* Corrosion of steels in lead-bismuth flow[J]. Journal of Nuclear Science and Technology, 2006, **43**(2): 107 - 116. DOI: [10.1080/18811248.2006.9711073](https://doi.org/10.1080/18811248.2006.9711073).
 - 13 王军, 刘超男, 梁超飞, 等. 316L不锈钢包埋渗铝涂层制备及动力学研究[J]. 核技术, 2023, **46**(3): 030606. DOI: [10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.030606](https://doi.org/10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.030606).
WANG Jun, LIU Chaonan, LIANG Chaofei, *et al.* Formation and kinetics of aluminide coating on 316L stainless steel by pack cementation process[J]. Nuclear Techniques, 2023, **46**(3): 030606. DOI: [10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.030606](https://doi.org/10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.030606).
 - 14 Zhu Q A, He N, Zhang Y C, *et al.* Effect of current density on micro-arc oxidation of Q235 steel and corrosion resistance in liquid Pb-Bi[J]. Materials and Corrosion, 2019, **70**(7): 1171 - 1178. DOI: [10.1002/maco.201810453](https://doi.org/10.1002/maco.201810453).
 - 15 Kurata Y, Sato H, Yokota H, *et al.* Applicability of Al-powder-alloy coating to corrosion barriers of 316SS in liquid lead-bismuth eutectic[J]. Materials Transactions, 2011, **52**(5): 1033 - 1040. DOI: [10.2320/matertrans.m2010337](https://doi.org/10.2320/matertrans.m2010337).
 - 16 Chen Y, Qiu C J, Hu L B, *et al.* The corrosion behavior of multiphase ceramic protective coatings on China low activation martensitic steel surface in flowing liquid lead-bismuth eutectic[J]. Steel Research International, 2017, **88**(8): 1600413. DOI: [10.1002/srin.201600413](https://doi.org/10.1002/srin.201600413).
 - 17 王凯琳, 李良星, 张双雷, 等. 轴流铅铋泵的设计及其水力性能分析[J]. 西安交通大学学报, 2020, **54**(11): 166 - 174. DOI: [10.7652/xjtub202011020](https://doi.org/10.7652/xjtub202011020).
WANG Kailin, LI Liangxing, ZHANG Shuanglei, *et al.* Design and hydraulic performance analysis of axial lead-bismuth pump[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2020, **54**(11): 166 - 174. DOI: [10.7652/xjtub202011020](https://doi.org/10.7652/xjtub202011020).
 - 18 张凤羽. 流体力学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2013.
ZHANG Fengyu. Hydromechanics[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2013.
 - 19 王福军. 水泵与泵站流动分析方法[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2020.
WANG Fujun. Analysis method of flow in pumps & pumping stations[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2020.
 - 20 Duan L, Wu X L, Ji Z L, *et al.* The flow pattern and entropy generation in an axial inlet cyclone with reflux cone and gaps in the vortex finder[J]. Powder Technology, 2016, **303**: 192 - 202. DOI: [10.1016/j.powtec.2016.09.019](https://doi.org/10.1016/j.powtec.2016.09.019).
 - 21 Chang H, Shi W D, Li W, *et al.* Energy loss analysis of novel self-priming pump based on the entropy production theory[J]. Journal of Thermal Science, 2019, **28**(2): 306 - 318. DOI: [10.1007/s11630-018-1057-5](https://doi.org/10.1007/s11630-018-1057-5).
 - 22 Pei J, Meng F, Li Y J, *et al.* Effects of distance between impeller and guide vane on losses in a low head pump by entropy production analysis[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2016, **8**(11): 168781401667956. DOI: [10.1177/1687814016679568](https://doi.org/10.1177/1687814016679568).