

轴流铅铋泵的设计及其水力性能分析

王凯琳, 李良星, 张双雷, 张拯政

(西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 为了研究铅铋合金泵合适的优化设计方案, 基于叶片速度三角形和圆柱层无关性假设理论, 设计了不同转速的轴流铅铋泵模型。利用 Ansys CFX 软件, 构建了不同转速包含导叶的铅铋泵水力模型和无导叶的铅铋泵水力模型, 通过 SST $k-\omega$ 湍流模型模拟对比不同的转速以及有无导叶轮设计对轴流铅铋泵水力性能的影响。模拟结果表明: 导叶轮是铅铋泵低流速设计的一个重要构件, 可将转速为 420 r/min 铅铋泵的叶轮出口冷却剂流速由 4 m/s 降低到 1.8 m/s; 泵内冷却剂和壁面间相对速度最高区域分布在叶片前缘泵壳侧, 该流速会随泵轴转速的减小而降低; 在低负荷条件下高转速铅铋泵比低转速铅铋泵拥有更好的流量扬程和效率性能, 但是在 0.8~1.2 倍额定流量的高负荷工况条件下低转速铅铋泵比高转速铅铋泵拥有更高的效率和扬程性能。此项研究可为铅冷快堆的主泵设计优化提供一定的参考。

关键词: 铅冷快堆; 主泵; 铅铋合金; 轴流铅铋泵; 水力性能

中图分类号: TL433 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202011020 **文章编号:** 0253-987X(2020)11-0166-09



OSID 码

Design and Hydraulic Performance Analysis of Axial Lead-Bismuth Pump

WANG Kailin, LI Liangxing, ZHANG Shuanglei, ZHANG Zhengzheng

(State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The lead-bismuth eutectic (LBE) primary pump is a key conveying equipment in lead or lead-alloy cooled fast reactors (LFRs). In order to explore the suitable optimal design scheme of LBE pump, based on the velocity triangle theory and cylinder layer independence, LBE pumps with different rotational speeds are designed. Using Ansys CFX software, the hydraulic model of LBE pumps with different rotating speeds and LBE pump without guide vane were constructed, then the influence of different rotating speeds and vane design on the hydraulic performance of axial lead-bismuth pump was studied by SST $k-\omega$ turbulence model. The results show that guide vane is an important component for low velocity design of lead-bismuth pump, which helps to reduce the coolant flow velocity from 4 m/s to 1.8 m/s in 420 rpm pump impeller outlet. The highest relative coolant flow velocity between coolant and wall in the pump is distributed in the blade leading edge of pump shroud and it increases with the rotating speed. Low rotating speed LBE pump has better performance near the rated flow rate (0.8 times~1.2 times rated flow), which is more suitable for the reactors running under long-term and high-load operation conditions. The research work will provide reference for performance analysis and theoretical design optimization of the primary LBE pumps of lead-cooled fast reactor.

Keywords: lead-cooled fast reactors; primary pump; lead-bismuth eutectic; axial lead-bismuth pump; hydraulic performance

铅冷快堆(LFRs)拥有较好的安全性、可靠性、稳定性和可持续性^[1-3],由于铅(Pb)/铅铋合金(LBE)冷却剂具有化学性质稳定、热传导性强和乏燃料处理能力好等特点,第四代核能系统国际论坛将 LFRs 评定为有望最早实现商业化的四代反应堆^[1]。开展铅冷快堆主泵设计及其水力性能优化研究对铅冷快堆的安全运行至关重要,LFRs 一回路铅铋泵可帮助冷却剂克服更多循环阻力,可提高反应堆单位质量功率密度,是运行中控制冷却循环的核心部件。开展一回路主泵的设计和 optimization 研究,对 LFRs 的发展和应用具有重要的推进作用。

近年来,国内外针对铅/铅铋泵的运行特点提出了一些新型概念设计。Mangialardo 等为欧洲池式铅冷快堆 ALFRED 提出了射流泵的概念设计^[4],并进行模拟研究,结果显示射流泵喷嘴处液态铅流速高达 15 m/s;Ferrini 等为 ALFRED 提出多叶片螺旋泵的概念设计^[5],随后用 SST $k-\omega$ 和 $k-\epsilon$ 湍流模型进行模拟并进行对比,两种模型对应的模拟结果差别较小,均可以用于快堆主泵的模拟计算;Lu 等提出了一种中心对称双出口蜗壳离心泵的概念设计,并认为导叶轮会略微降低铅铋泵的性能^[6];Shi 等通过 NCCL 实验装置使用氩气气举泵进行了铅铋合金回路循环实验研究^[7];Jaesik 等提出了磁流体冷却剂系统的概念设计,省去了叶轮和密封设备等内部构件,可以防止高流速铅铋合金对叶片的腐蚀作用,然而该系统提供的流量和循环动力低于采用机械泵的设计方案,同时该系统需要庞大的辅助设备,可能无法满足对质量和体积限制较大的小型移动式反应堆设计方案^[8]。Murty 等进行了铅铋合金对泵体等壁面材料作用的实验研究,结果表明铅铋合金对壁面材料存在腐蚀作用,腐蚀速率会随着铅铋合金的流速降低而降低^[9-10]。综上所述,目前国内外学者针对铅铋主泵的研究大多仍处于概念设计阶段,对于铅铋泵的结构和泵内冷却剂流速的优化设计的研究却很少提及。国际原子能机构(IAEA)研究认为通过优化设计来提高反应堆安全性和稳定性仍是一个重要的研究议题^[3]。因此,对于铅冷快堆主泵,研究可以满足冷却剂循环动力需求并降低泵内铅铋合金流速的优化设计方案,对提升铅铋泵的寿命以及推动铅冷快堆的发展具有十分重要的学术意义和工程价值。

为满足小型 LFRs 的应用需求,提出一种流量约 4 300 t/h、可满足 20 MW 换热要求的铅铋泵设计和优化方案。在铅铋泵的研究中,动叶轮出口加

装导叶轮来降低出口铅铋合金流速的设计方案常常被忽视。为了研究合适的铅铋泵低流速设计方案,开展了不同泵轴设计转速的铅铋泵性能分析,对比其内部冷却剂的流速,同时研究导叶轮设计对铅铋泵内部冷却剂流速造成的影响,以期获得最优的铅铋泵设计方案,从而推进铅冷快堆主泵的研究进程,并为主泵设计提供借鉴方案。

1 铅铋主泵的设计

铅铋主泵设计目标为满足小型可运输长寿命铅铋冷却快堆(SPARK)^[11-12]的一回路冷却剂循环动力需求。铅铋泵的设计主要受尺寸、扬程和安全性能约束:①铅铋主泵需要有足够小的占地面积,以便实现小型化和灵活性的设计需求;②能为一回路提供足够的循环动力,在额定工况附近有更好的水力性能;③为了保护反应堆堆芯和一回路流道,铅铋合金的出口流速应降低到 2 m/s 以下,同时在事故工况下冷却剂流经泵体时流动阻力尽可能小。

图 1 为小型铅铋冷快堆一回路系统图,主泵位于反应堆和换热器之间,其需要将铅铋合金从下往上通过管路输送到反应堆入口带走堆芯热量后进入换热器进行换热,为铅铋冷却剂提供循环动力来克服堆芯、换热器和管路间产生的流动阻力。铅铋合金拥有较低的熔点,其对壁面材料的腐蚀速率和温度成正比相关,所以主泵设计位于堆芯外换热器出口处。轴流泵在偏远地区常常作为小型水电站的水轮机,具有体积小、结构简单且流动阻力小的优点^[14],符合反应堆断电事故工况(SBO)时尽可能降低冷却剂在泵体流动阻力的设计需求,因此选择轴流泵作为铅铋泵的设计泵型。

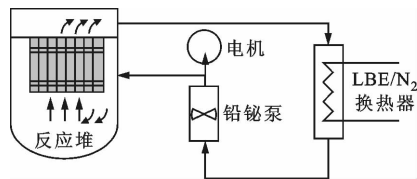


图 1 SPARK 一回路系统示意图

本文依据速度三角形理论、圆柱层独立性假设、质量守恒和动量守恒定律对铅铋泵开展理论分析和叶片几何设计。

根据设计参数、泵轴材料强度和铅铋泵进出口流速限值,确定泵壳尺寸和最小轮毂尺寸。图 2 给出了叶片进出口速度三角形,将三维流道划分为多个圆柱流面展开,将单个叶片流面上的复合流速 v 分解为圆周流速 u 和轴向流速 m ,对应关系如下式

$$\boldsymbol{v} = \boldsymbol{u} + \boldsymbol{m} \tag{1}$$

图 3 给出了动叶轮和导叶轮的平面叶栅展开示意图,从动叶轮和导叶轮流道内切割出 5 个圆柱形流面($L_1 \sim L_5$),其中, $v_1、v_2$ 为动叶轮进出口绝对速度; $w_1、w_2$ 为叶片进出口的相对速度; α 为绝对速度和圆周速度之间的夹角, β 为相对速度和圆周速度间的夹角, l 为叶型长度, t 是两个叶片翼型之间的距离。

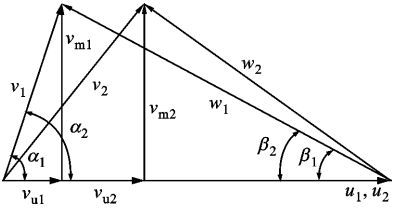


图 2 叶片进出口速度三角形

采用欧拉方程计算铅铋泵扬程

$$H_t = (u_2 v_{u2} - u_1 v_{u1}) / g \tag{2}$$

$$u_{1L_n} = u_{2L_n} = 2nR L_n \tag{3}$$

式中: H_t 为铅铋泵的理论扬程; $v_{u1}、v_{u2}$ 为叶片进出口绝对流速的圆周分速度; $u_1、u_2$ 是进出口圆周速度; R 为圆柱层流面半径; L_n 代表第 n 层圆柱层流面, n 取 1~5。

根据动量守恒,可计算流道进出口间的压差为

$$\delta_p = H_t \rho_{LBE} g = (u_2 v_{u2} - u_1 v_{u1}) \rho_{LBE} \tag{4}$$

式中: ρ_{LBE} 为铅铋合金密度。

结合进出口速度三角形的几何关系,可将欧拉方程转化为

$$H_t = \frac{u_2}{g} \left(u_2 - \frac{v_{m2}}{\tan \beta_2} \right) - \frac{u_1}{g} \left(u_1 - \frac{v_{m1}}{\tan \beta_1} \right) \tag{5}$$

式中: $\beta_1、\beta_2$ 分别为叶片入口和出口的相对液流角; $v_{m1}、v_{m2}$ 为叶轮进口和出口的轴向速度。

1.1 叶轮部分设计

以图 3 中的第 1 层圆柱层流面(L_1)为例,设计过程如下。铅铋泵叶轮进出口轴向流速和叶轮入口的理论最大相对流速为

$$u_1 = u_2 = \pi D n / 60 \tag{6}$$

$$\left. \begin{aligned} v_{m1} &= v_{m2} = \frac{Q_m}{A_{\text{flow}} \rho_{LBE} \eta_v \varphi} \\ v_{\text{max}} &= \sqrt{v_{m1}^2 + u_2^2} \end{aligned} \right\} \tag{7}$$

式中: Q_m 是泵的质量流量; A_{flow} 是流通截面积; η_v 是容积效率; φ 是叶片驱逐系数,从 $L_1 \sim L_5$ 流面按线性取值, φ 的取值范围为 0.92~0.97; v_{max} 为该流面内的冷却剂最大流速。

根据图 3 中的速度三角形关系,可以得到进出口液流角为

$$\beta_1 = \arctan \frac{v_{m1}}{u}; \quad \beta_2 = \arctan \frac{v_{m2}}{u - v_{u2}} \tag{8}$$

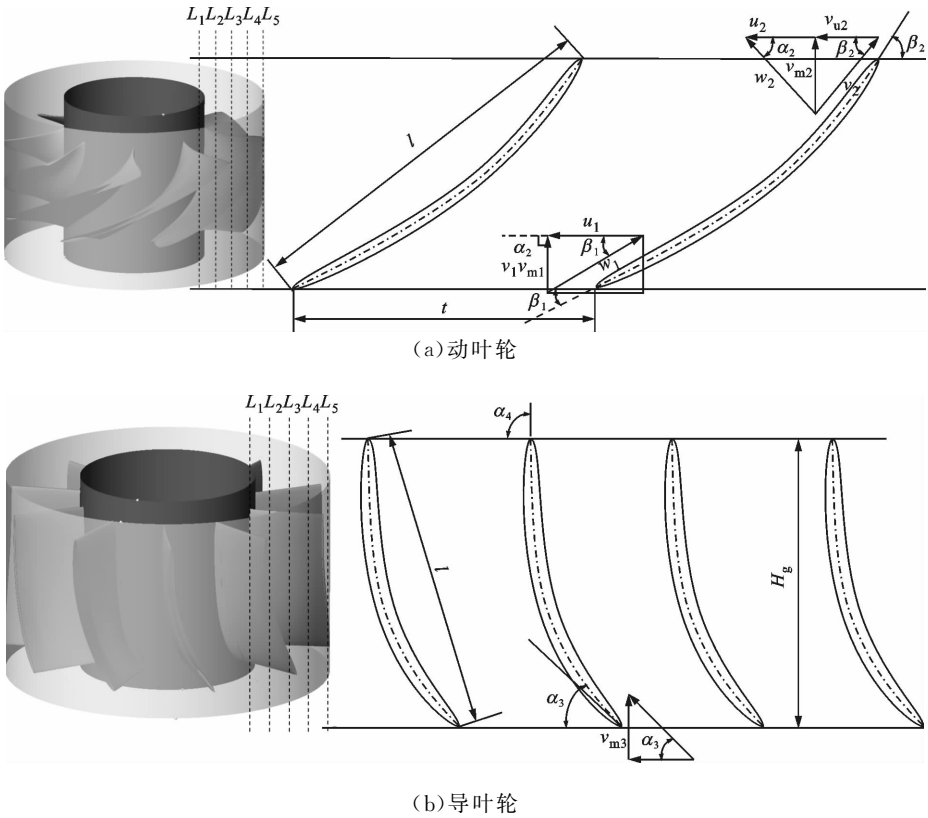


图 3 动叶轮和导叶轮平面叶栅展开示意图

1.2 导叶部分

导叶进口液流角由导叶轮进口速度三角形决定。根据图 2,绝对速度 v_3 分解为圆周流速 v_{u3} 和轴向流速 v_{m3} ,入口液流角 α_3 理论角是绝对速度方向和圆周方向之间的夹角。

从叶轮出口到导叶进口,流通面积保持不变,流动损失可以忽略,因此导叶片进出口液流角和翼型高度的设计式为

$$v_{u3} = v_{u2}; \quad v_{m3} = v_{m2} \tag{9}$$

$$\alpha_3 = \arctan \frac{v_{m2}}{v_{u2}}; \quad \alpha_4 = 90^\circ \tag{10}$$

$$l_g = H_g / \sin\left(\frac{\alpha_3 + \alpha_4}{2}\right) \tag{11}$$

式中: H_g 为导叶翼型高度,参考韩国其等的轴流泵导叶轮模型试验^[15]给出的最佳叶栅稠密度算出, H_g 为 0.15 m。

本文为了开展不同转速设计对轴流铅铋泵的性能和内部最大相对流速的影响作用,对转速分别为

表 1 转速为 500 r/min 的平面直列叶栅叶片设计参数

层数	$\beta_1 /$ rad	$\beta_2 /$ rad	$\alpha_3 /$ rad	$\alpha_4 /$ rad	$u_1 /$ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	$u_2 /$ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	$v_{m1} /$ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	$v_{m2} /$ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	$v_{\max} /$ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	$l_r /$ m	$l_g /$ m	$\delta_p /$ kPa	$H_g /$ m
L_1	0.461	0.863	0.712	1.57	4.52	4.52	2.25	2.25	5.05	0.107	0.162	125	1.2
L_2	0.381	0.582	0.798	1.57	5.48	5.48	2.20	2.20	5.91	0.122	0.160	125	1.2
L_3	0.322	0.435	0.867	1.57	6.45	6.45	2.15	2.15	6.80	0.137	0.158	125	1.2
L_4	0.276	0.347	0.925	1.57	7.40	7.40	2.10	2.10	7.69	0.152	0.157	125	1.2
L_5	0.241	0.286	0.973	1.57	8.37	8.37	2.06	2.06	8.62	0.167	0.670	125	1.2

表 2 转速为 420 r/min 的平面直列叶栅叶片设计参数

层数	$\beta_1 /$ rad	$\beta_2 /$ rad	$\alpha_3 /$ rad	$\alpha_4 /$ rad	$u_1 /$ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	$u_2 /$ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	$v_{m1} /$ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	$v_{m2} /$ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	$v_{\max} /$ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	$l_r /$ m	$l_g /$ m	$\delta_p /$ kPa	$H_g /$ m
L_1	0.584	1.267	0.628	1.57	3.80	3.80	2.25	2.25	4.42	0.080	0.162	125	1.2
L_2	0.445	0.819	0.711	1.57	4.61	4.61	2.20	2.20	5.11	0.092	0.160	125	1.2
L_3	0.378	0.585	0.780	1.57	5.42	5.42	2.15	2.15	5.83	0.103	0.158	125	1.2
L_4	0.326	0.452	0.839	1.57	6.22	6.22	2.10	2.10	6.56	0.114	0.157	125	1.2
L_5	0.285	0.367	0.889	1.57	7.03	7.03	2.06	2.06	7.33	0.126	0.156	125	1.2

表 3 转速为 340 r/min 的平面直列叶栅叶片设计参数

层数	$\beta_1 /$ rad	$\beta_2 /$ rad	$\alpha_3 /$ rad	$\alpha_4 /$ rad	$u_1 /$ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	$u_2 /$ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	$v_{m1} /$ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	$v_{m2} /$ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	$v_{\max} /$ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	$l_r /$ m	$l_g /$ m	$\delta_p /$ kPa	$H_g /$ m
L_1	0.637	1.566	0.639	1.57	3.64	3.64	2.70	2.70	4.53	0.133	0.162	125	1.2
L_2	0.565	1.217	0.691	1.57	4.16	4.16	2.64	2.64	4.93	0.164	0.160	125	1.2
L_3	0.505	0.952	0.739	1.57	4.67	4.67	2.58	2.58	5.34	0.195	0.158	125	1.2
L_4	0.454	0.765	0.780	1.57	5.18	5.18	2.53	2.53	5.76	0.228	0.157	125	1.2
L_5	0.410	0.633	0.817	1.57	5.69	5.69	2.47	2.47	6.20	0.261	0.156	125	1.2

500、420 包含导叶和 340 r/min 的轴流铅铋泵进行设计和模拟,并设计 420 r/min 无导叶铅铋泵作为对比,验证导叶轮对铅铋主泵设计和优化的作用。模拟的 4 个轴流铅铋泵有相同的泵壳尺寸,动叶轮可以产生相同的扬程。根据式(3)(5)(8)和(11),为了降低转速,需要增加出口液流角 β_2 或增加动叶轮部分轮毂的直径, β_2 无法无限增加(理论上小于 90°),因此转速低到一定程度时需要通过增加轮毂直径来降低转速。500 和 420 r/min 的轮毂设计直径均为 172 mm,340 r/min 的轮毂设计直径为 204 mm,铅铋泵的叶轮外径均为 320 mm。不同转速铅铋泵的叶栅叶片设计参数见表 1~3。

2 数值方法

根据理论设计结果,通过流体动力学分析软件 Ansys CFX 完成铅铋泵的三维流体动力学计算,为了确保模拟结果的准确性,同时还会将模拟结果与理论设计结果进行对比。图 4 为铅铋泵模型结构示

意图和 4 个铅铋泵的 Ansys CFX 的几何模型,为了减少体积,铅铋泵进出口存在弯管,由于入口存在较长的引流管,且入口流速较慢(约 0.8 m/s),所以入口弯管影响可以忽略,铅铋泵出口弯管为渐扩弯管,以降低冷却剂在铅铋泵出口流道中的流动速度。该模型由半透明的泵壳部分和实体的泵轴部分组成,泵内流体流通通道可分为静态域和旋转域。导叶片、弯管和引流管所在区域属于静态域,动叶片所在区域为旋转域。

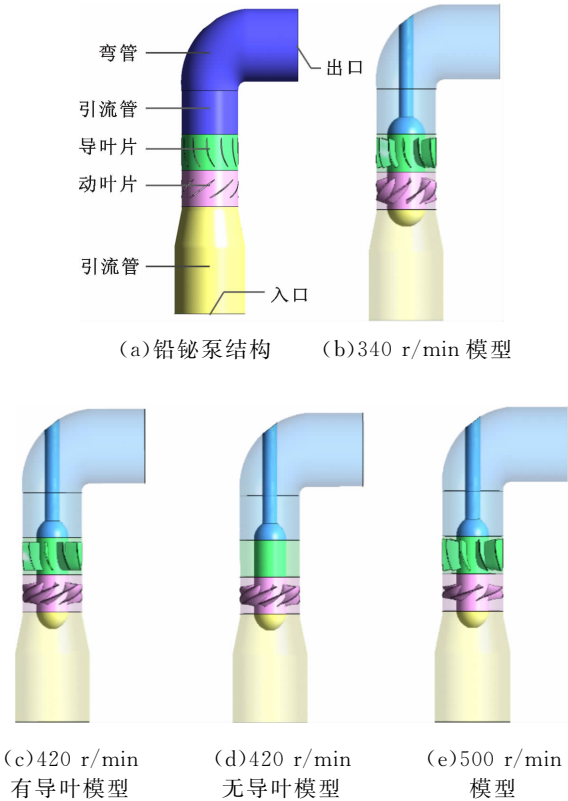


图 4 铅铋泵模型结构示意图和 4 个铅铋泵的几何模型

为了提高铅铋泵壁面附近冷却剂流场的计算精度,对铅铋泵进行六面体结构化网格划分。图 5 给出了动叶轮流通区域及六面体网格划分结果,可以发现叶片、轮毂和泵壳避免附近突出边界层网格。六面体网格具有更好的网格质量,同时能更好地迎合流场方向,具有离散误差小、收敛性好的优点。

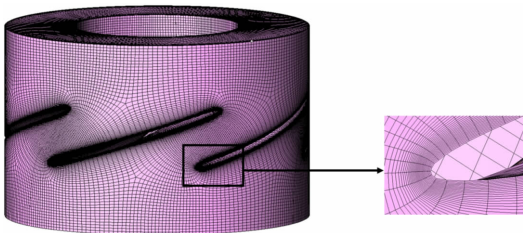


图 5 动叶轮流通区域及六面体网格划分结果

在湍流模型的选择上,铅铋泵内最大相对流速区域集中在叶片表面附近,为了准确地得到模拟结果,本文采用 SST $k-\omega$ 模型来提高铅铋合金和泵壁面之间流固分离模拟的计算精度^[16],进而精确捕捉近壁面附近铅铋合金的速度分布,同时可以保证一定的叶轮出口的旋流和弯管处曲率流的模拟精度^[17]。SST $k-\omega$ 模型对边界层网格精度具有较高要求,本文进行了网格无关性验证和 Y^+ 无关性验证。

表 4 给出了无关性验证结果,方案 1 为原始网格划分方案,方案 2 在方案 1 的基础上对整体网格进行加密,可以看出方案 2 网格数变化对动叶轮扬程造成的影响低于 0.1%,方案 3、4 是在方案 2 的基础上继续对模型的边界层网格加密,进行 Y^+ 无关性验证,结果表明方案 3、4 中边界层网格加密产生的 Y^+ 的变化对整体的模拟性能影响很小,结合 SST $k-\omega$ 对边界层网格的需求,为了确保壁面附近冷却剂流速的计算精度并节省计算量,本文采用方案 3 的网格数和边界层厚度进行计算,由于铅铋合金密度较大,在反应堆一回路系统高温条件下其动力黏度仅是 20° 常温水动力黏度的 1.5 倍,密度却是水的 10 倍以上,因此壁面边界层附近的雷诺数相对较高,黏性力的主导地位较弱,根据方案 3 计算结果 Y^+ 的平均值在 78.5 左右,满足湍流模型的计算要求^[18]。入口边界设置为压力入口,出口边界为质量流量出口,其他壁面设置为无滑移壁面。

表 4 叶轮网格和 Y^+ 无关性验证的结果

方案	叶轮网格数	扬程/m	边界层厚度/mm	Y^+ 均值
1	1 189 213	1.167 2	0.10	125.1
2	1 852 179	1.168 5	0.10	126.4
3	3 485 861	1.169 1	0.05	78.5
4	6 248 234	1.169 0	0.01	21.5

3 数值结果分析

根据理论设计,铅铋泵以 4 300 t/h 的质量流量输送铅铋合金,并提供 125 kPa 的循环动力。为了验证设计和 CFX 计算结果的准确性,将表 1~3 中的理论计算参数和 CFX 模拟计算参数进行对比,表 5 给出了理论计算值和模拟计算值之间的相对误差,根据对比结果,泵的理论计算值与 CFD 模拟误差在 4% 以内,不同转速铅铋泵设计模型的模拟性能差距较小(最大为 2%),确保本文建立的水力模型对于不同转速铅铋泵性能和冷却剂流场的计算结

果具有一定准确度。

表 5 叶轮进出口总压差理论和模拟计算结果对比

转速/(r·min ⁻¹)	叶轮进出口压差/kPa		相对误差/%
	理论值	模拟值	
340	125	122.1	2.32
420(有导叶泵)	125	120.6	3.52
420(无导叶泵)	125	120.6	3.52
500	125	123.3	1.36

3.1 铅铋泵冷却剂流线分布结果

通过模拟冷却剂在铅铋泵内的涡流分布来判断泵内的能量损失。图 6 给出了为额定工况下冷却剂在铅铋泵内的流线分布,其中图 6b 和 6c 是转速为 420 r/min 的铅铋泵模型,图 6b 包含导叶轮设计,图 6c 不包含导叶轮设计,通过对比椭圆区域的流线分布可以发现,相同转速下导叶轮消除了动叶轮出口冷却剂的大部分旋转运动,无导叶轮的泵在铅铋合金流出动叶轮区域后依然维持螺旋前进的流动,并在流入曲面流道后产生一定的涡流,造成能量损失。图 6a、6b 和 6d 给出了包含导叶轮设计的不同

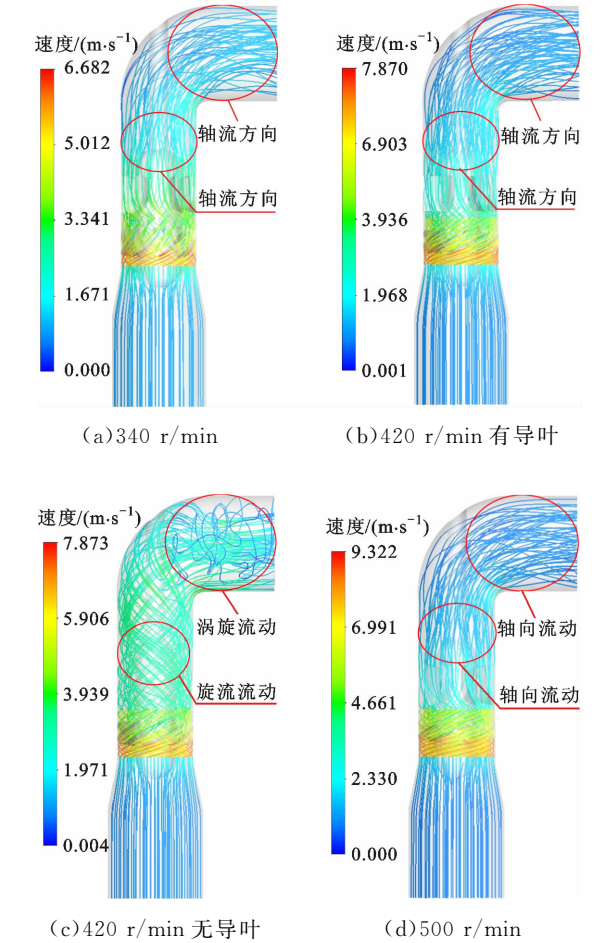


图 6 不同铅铋泵内冷却剂流线分布图

转速铅铋泵内流线分布情况,相比之下经过导叶轮消除作用后,在铅铋泵出口弯管处冷却剂近似于轴向流动,产生的涡流较少,能量损失降低。

3.2 速度和压力计算结果分析

铅铋合金的腐蚀速度和流速成正相关,通过分析冷却剂在铅铋泵内的速度分布,可以得出铅铋泵的优化设计方案。图 7 给出了不同铅铋泵的速度分布云图,4 个铅铋泵的入口冷却剂流速设计值较低(约 0.8 m/s),根据图中动叶轮部分的椭圆区域显示,进入动叶轮后冷却剂和壁面间的相对流速开始快速上升并达到最大。图 7a、7b 和 7d 分别为不同转速的铅铋泵流场分布,通过对比泵内液态铅铋合金的最大流速可以发现,其值随设计转速的减小而减小,而冷却剂流速大于 3 m/s 的高流速区域主要集中在动叶轮流道的泵壳侧。根据模拟结果,泵内铅铋合金的最大流速由 500 r/min 时的 9.322 m/s 减小到 340 r/min 时的 6.617 m/s,减小了 2.7 m/s。图 7b 和 7c 分别为相同转速下,包含导叶轮设计和不包含导叶轮设计的铅铋泵流场分布云图,通过对比导叶轮出口的椭圆区域可以发现:相同转速的条件下铅铋合金经过带导叶的泵后,出口速度可以

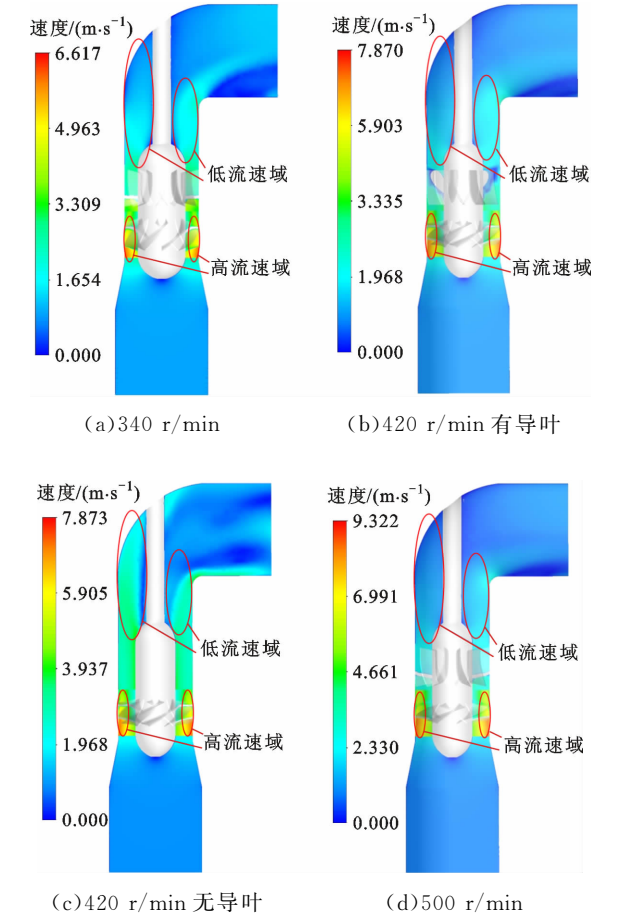


图 7 不同铅铋泵内冷却剂速度分布云图

降低到 1 m/s 左右,但在没有导叶的铅铋泵中,出口弯管壁面附近冷却剂仍有 4 m/s 的较高流速,会提升一回路管路和堆芯入口的流动速度,结合 SPARK 反应堆堆芯入口流速小于 2 m/s 的设计限制^[11],导叶轮是铅铋泵的一个重要部件,保护一回路流道并降低冷却剂进入堆芯的流速。图 8 为动叶轮 L_5 叶栅层表面附近 LBE 冷却剂相对流速分布,叶片的最大流速位于前缘靠近泵壳的一侧,该部位是铅铋泵最容易受到冷却剂冲蚀的部位,在设计时需要对该部位进行强化,由图可以发现铅铋泵转速降低时叶片前缘的最大流速相应降低,结合速度分布模拟结果可得,低转速和加装导叶轮是铅铋泵低流速设计的最佳设计方案。

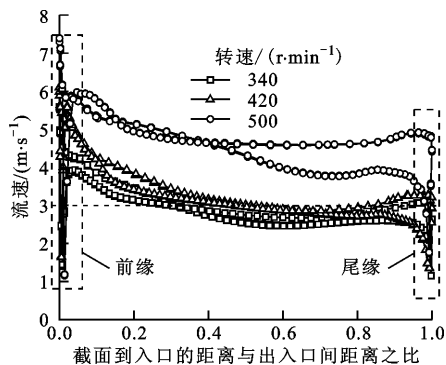
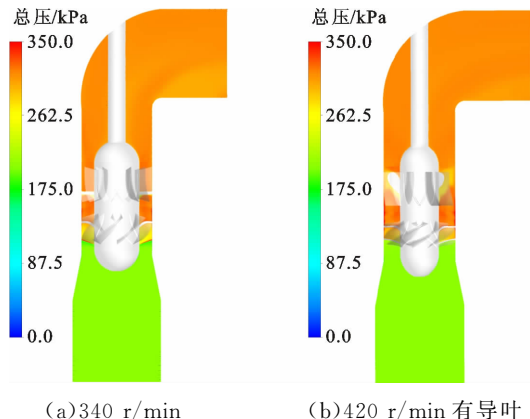


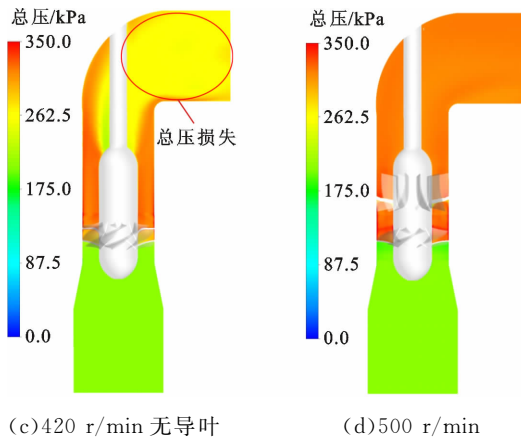
图 8 设计工况下轮缘动叶片表面 LBE 相对流速分布

图 9 给出了不同铅铋泵内冷却剂压力分布云图,在入口处冷却剂进入动叶轮前压力基本维持不变,压降损失可以忽略不计,随后经过动叶轮做功压力开始快速上升。对比图 9b 和 9c 椭圆内冷却剂压力分布可得,在转速相同的条件下,冷却剂流经出口弯管时在没有导叶轮的铅铋泵中总压下降明显,而相同转速下,包含导叶轮的铅铋泵设计避免这一现象。结合图 6b 和 6c 的冷却剂流动迹线对比结果表明,相同转速下无导叶轮的铅铋泵在出口弯管处产生的涡流流动会在弯管内造成较多的能量损失,有



(a) 340 r/min

(b) 420 r/min 有导叶



(c) 420 r/min 无导叶

(d) 500 r/min

图 9 不同铅铋泵内冷却剂压力分布云图

导叶泵可以减少铅铋泵出口弯管内的压降损失,对提高本文设计的铅铋泵的水力性能具有重要作用。

3.3 泵的水力和情转性能分析

转速可以影响冷却剂在铅铋泵内的流动速度,同样影响铅铋泵的流量-扬程和效率性能,对反应堆的安全至关重要,因此将不同负荷工况下 4 个铅铋泵的性能进行对比研究。

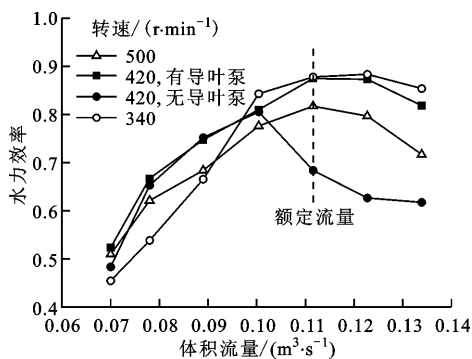
铅铋泵的水力效率为单位时间内冷却剂质量流量提升到泵的扬程所需功和泵轴的输入功率的比值,计算公式如下

$$\eta_h = \frac{\rho g Q H_t}{M \omega} \quad (12)$$

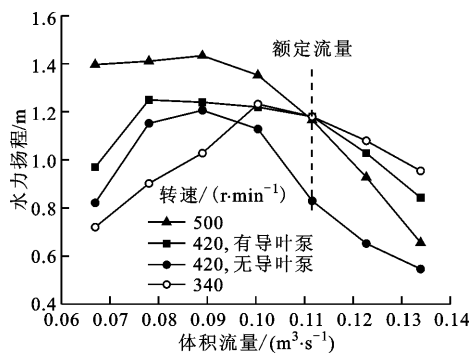
式中: M 为叶片表面总扭矩; ω 为角速度。

本文将 500 r/min 定义为高转速泵,将 340~420 r/min 定义为低转速泵。图 10 为不同铅铋泵的流量效率和流量扬程曲线对比。可以发现,泵的输运效率先增加后减小,在额定流量时,水力效率达到最大值,同时无导叶轮泵在大负荷工况下效率和扬程均低于包含导叶轮设计的铅铋泵,导叶轮可以提高铅铋泵的水力效率和性能。当铅铋泵的流量高于额定流量时,随着流量的增加,高转速泵的效率 and 扬程下降速度比低速泵快,反之,当铅铋泵的流量低于额定流量时,随着流量降低,高转速泵的效率 and 扬程下降速度低于低速泵。但是在额定流量附近 ($0.8Q \sim 1.2Q$),低速泵的效率 and 扬程优于在此工况下的高速泵。实际运行中反应堆需要长期在高负荷下运行,因此低速泵的性能更符合反应堆的实际工况。

实际应用中,核主泵不仅要求高效稳定的运行性能,安全可靠也非常重要。在反应堆断电造成铅铋冷却剂失流事故时,主泵的情转时间是最关键的安全指标之一。参考 AP1000 主泵安全标准规定,主泵在进入情转事故状态后达到半流量的最小时间



(a) 流量效率



(b) 流量扬程

图 10 不同铅铋泵的流量效率曲线和流量扬程曲线

应在 5 s 以上,核主泵需要在泵轴加装飞轮增加转动惯量来满足安全设计要求,铅铋泵所需转动惯量的设计计算式如下

$$I = \frac{P_e t}{\omega_e^2 \eta_e [n_e / n(t) - 1]} \quad (13)$$

式中: P_e 为铅铋泵的有效功率; η_e 为铅铋泵效率; t 为断电时间; n_e 为额定转速; $n(t)$ 为 t 时刻的转速; ω_e 为额定角速度。

根据式(13),转速越大飞轮设计转动惯量越小。经计算主泵初始设计转动惯量随转速由小到大分别为 78.25、51.28 和 36.19 kg/m^2 ,随后通过徐一鸣等提出的惰转模型^[19]进行验证,其模型和实验值对比最大误差在 2% 以内,对应表达式如下

$$Q(t) = \frac{Q_e}{1 + (1 + \alpha)tT_{h,e}/I\omega_e} \quad (14)$$

式中: Q_e 为额定体积流量; $T_{h,e}$ 为铅铋泵额定工况铅铋泵的转子扭矩,其值由模拟计算得出; α 为摩擦转矩系数,取为 0.02。

基于铅铋泵额定参数以及模拟计算值,结合式(14)来估算铅铋主泵的惰转流量随时间变化情况如图 11 所示。由图 11 可见不同转速铅铋泵的惰转流量变化情况相差不大,高转速铅铋主泵的惰转曲线略低于低转速铅铋主泵,其半流量惰转时间为 6.62

s,远大于 5 s 的安全设计标准。结合转动惯量设计结果可以发现,在满足安全设计标准的同时低转速铅铋泵对飞轮的转动惯量要求较大,转动惯量越大飞轮体积越大。然而铅铋合金具有较高沸点,在惰转时冷却剂不容易达到饱和沸腾状态造成堆芯传热恶化,实际铅铋冷却快堆惰转安全设计标准应比本文的参考值低,但在对重量和体积要求较高的小型铅铋冷却快堆主泵开展低转速设计时,仍需根据体积和重量设计限制,对主泵飞轮转动惯量加以考虑。

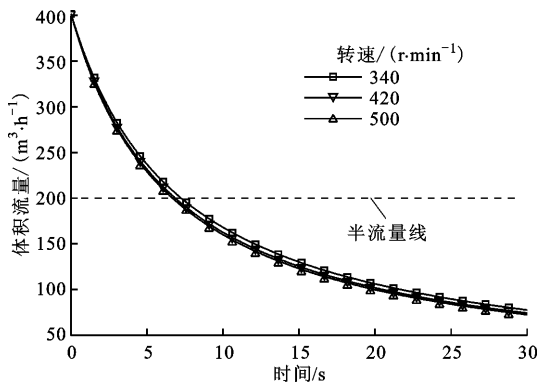


图 11 不同转速铅铋泵惰转流量变化情况

4 结 论

为满足小型铅冷快堆的发展需求,基于叶片速度三角形和圆柱层无关性假设设计轴流铅铋泵,设计的铅铋泵质量流量提升到 4 300 t/h,扬程达到 1.2 m,同时泵的进出口流速降到了 1 m/s 以下,利用数值模拟软件对 4 个不同型号铅铋泵内部流场和水力性能进行计算,通过对比得出如下结论。

(1)铅铋泵内铅铋合金冷却剂高流速区域集中在动叶轮靠近泵壳一侧,对比 500 和 340 r/min 铅铋泵流速计算结果,最大流速降低了 2.7 m/s。

(2)导叶轮可以消除部分叶轮出口冷却剂的圆周速度,降低泵出口冷却剂的整体流速,保护堆芯和一回路流道,同时导叶减小了主泵出口处弯曲流道的扬程损失,有利于提高整体的输送效率,是铅铋泵低流速设计的一个重要构件。

(3)不同铅铋泵流量扬程曲线和流量效率曲线随着流量的增加先增加后减小,在额定流量处达到最大值,随着流量降低,高转速铅铋泵比低转速泵拥有较好的流量扬程和效率曲线,但是低转速泵在额定流量附近相对于高转速铅铋泵具有更高的效率和水力性能,更符合反应堆长期高负荷运行的要求。同时根据惰转性能分析可知,低转速泵可以满足惰转性能需求,但要加大转动惯量的设计,对小尺寸快

堆主泵开展低转速设计优化时,需根据体积和重量设计限制,对主泵飞轮转动惯量加以考虑。

参考文献:

- [1] ZRODNIKOV A, TOSHINSKY G, KOMLEV O, et al. Innovative nuclear technology based on modular multi-purpose lead-bismuth cooled fast reactors [J]. *Progress in Nuclear Energy*, 2008, 50: 170-178.
- [2] CUNNINGHAM N. Small modular reactors: a possible path forward for nuclear power [EB/OL]. (2012-10-01) [2019-05-08]. <http://www.americansecurityproject.org/ASP%20Reports/Ref%200087%20-%20Small%20Modular%20Reactors.pdf>.
- [3] VUJIĆ J, BERGMANN R M, ŠKODA R, et al. Small modular reactors: simpler, safer, cheaper? [J]. *Energy*, 2012, 45: 288-295.
- [4] MANGIALARDO A, BORREANI W, LOMONACO G. Numerical investigation on a jet pump evolving liquid lead for GEN-IV reactors [J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2014, 280: 608-618.
- [5] FERRINI M, BORREANI W, LOMONACO G, et al. Design by theoretical and cfd analyses of a multi-blade screw pump evolving liquid lead for a generation-IV LFR. [J] *Nuclear Engineering and Design*, 2016, 297: 276-290.
- [6] LU Yonggang, ZHU Rongsheng, FU Qiang, et al. Research on the structure design of the LBE reactor coolant pump in the lead base heap [J]. *Nuclear Engineering and Technology*, 2019, 51(2): 1-10.
- [7] SHI Leitai, BING Tan, WANG Chenglong, et al. Experimental investigation of gas lift pump in a lead-bismuth eutectic loop [J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2018, 330: 516-523.
- [8] JAESIK K, REYOUNG K H. Development of innovative reactor-integrated coolant system design concept for a small modular lead fast reactor [J]. *International Journal of Energy Research*, 2018, 14(41): 1-9.
- [9] MURTY K L, CHARIT I. Structural materials for Gen-IV nuclear reactors: challenges and opportunities [J]. *Journal of Nuclear Materials*, 383(1/2): 189-195.
- [10] ZHANG Jinsuo. A review of steel corrosion by liquid lead and lead-bismuth [J]. *Corrosion Science*, 2009, 51(6): 1207-1227.
- [11] 雷驰, 吴宏春, 曹良志, 等. 小型可运输长寿命铅铋冷却快堆堆芯设计研究 [J]. *原子能科学技术*, 2019, 53(8): 1451-1458.
- LEI Chi, WU Hongchun, CAO Liangzhi, et al. Core design study of small transportable long-life lead-bismuth cooled fast reactor [J]. *Nuclear Science and Engineering*, 2019, 53(8): 1451-1458.
- [12] ZHOU Shengcheng, CHEN Renzong, SHAO Yiqiong, et al. Conceptual core design study of an innovative small transportable lead-bismuth cooled fast reactor (SPARK) for remote power supply [J]. *International Journal of Energy Research*, 2018, 11(42): 4197-4205.
- [13] NGUYEN T D C, CHOE J, EBIWONJUMI B, et al. Core design of long-cycle small modular lead-cooled fast reactor. [J] *International Journal of Energy Research*, 2019, 1(43): 254-273.
- [14] QIAN Zhongdong, WANG Fan, GUO Zhiwei, et al. Performance evaluation of an axial-flow pump with adjustable guide vanes in turbine mode. [J] *Renewable Energy*, 2016, 2(99): 1146-1152.
- [15] 韩国其, 刘大恺. 轴流泵后导叶几何参数的试验研究 [J]. *河海大学学报*, 1989, 1(1): 79-85.
- HAN Guoqi, LIU Dakai. Experimental study on geometric parameters of rear guide vane for axial flow pump [J]. *Journal of Hehai University*, 1989, 1(1): 79-85.
- [16] 任芸, 吴登昊, 牟介刚, 等. 考虑旋转和曲率的湍流模型修正及应用 [J]. *西安交通大学学报*, 2016, 50(9): 25-30.
- REN Yun, WU Denghao, MOU Jiegang, et al. Modification for turbulence model considering rotation and curvature with applications [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2016, 50(9): 25-30.
- [17] 阎畅, 刘海涌, 朱惠人. 带横流及旋流射流冲击换热的数值与实验研究 [J]. *计算机仿真*, 2008, 1(3): 44-47.
- YAN Chang, LIU Haiyong, ZHU Hui ren. Numerical computation and experimental investigation of convective heat transfer for diagonal impingement jet flow with transverse flow and swirl flow [J]. *Computer Simulation*, 2008, 1(3): 44-47.
- [18] BIBHAB K L, AJOY K D. Investigation of turbulence for wind flow over a surface mounted cube using wall Y^+ approach [J]. *Indian Journal of Science and Technology*, 2017, 10(8): 1-10.
- [19] 徐一鸣, 徐士鸣. 核主泵惰转转速计算模型的比较 [J]. *发电设备*, 2011, 25(4): 236-238.
- XU Yiming, XU Shiming. Comparison of computation models for idle rotate-speed of reactor coolant pumps [J]. *Power Equipment*, 2011, 25(4): 236-238.

(编辑 武红江)