

高温熔盐泵关键部件结构特性分析

金永鑫^{1,2}, 张德胜³, 宋文武^{1,2}, 卢加兴²

(1. 西华大学 能源与动力工程学院, 四川 成都 610039; 2. 西华大学 流体及动力机械教育部重点实验室, 四川 成都 610039;
3. 江苏大学 流体机械工程技术研究中心, 江苏 镇江 212013)

摘要:为研究熔盐泵在不同温度下叶轮和导叶结构特性变化,采用流固热耦合方法对不同温度下熔盐泵结构进行分析。分析结果显示:叶轮叶片进口和导叶叶片出口存在应力集中现象,叶轮前后口环根部配合位置和叶轮口环上的应力圆周分布均出现周期分布。叶轮叶片和导叶叶片与盖板交线的变形规律性比较明显,叶轮叶片与盖板交线的变形量自进口至出口先小幅度降低后增加;导叶叶片和盖板交线的变形量由进口到出口呈减小的趋势。温度增加会使前后口环及其配合位置的径向变形量增加,但叶轮口环的变形量均小于静止部件配合位置的变形量,不同温度下叶轮口环和配合位置都满足间隙配合条件,不会出现干涉和卡死现象。

关键词:熔盐泵;流固热耦合;结构分析;应力分布;应变分布

中图分类号:TH311 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.rndlge.2022.02.010

[引用本文格式]金永鑫,张德胜,宋文武,等. 高温熔盐泵关键部件结构特性分析[J]. 热能动力工程,2022,37(2):70-78. JIN Yong-xin, ZHANG De-sheng, SONG Wen-wu, et al. Analysis of structural characteristics of key components of high-temperature molten salt pumps[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2022, 37(2): 70-78.

Analysis of Structural Characteristics of Key Components of High-temperature Molten Salt Pumps

JIN Yong-xin^{1,2}, ZHANG De-sheng³, SONG Wen-wu^{1,2}, LU Jia-xing²

(1. School of Energy and Power Engineering, Xihua University, Chengdu, China, Post Code:610039; 2. Key Laboratory of Fluid and Power Machinery of Ministry of Education, Xihua University, Chengdu, China, Post Code:610039;
3. Research Center of Fluid Machinery Engineering and Technology, Jiangsu University, Zhenjiang, China, Post Code:212013)

Abstract: In order to investigate the structural characteristics of the impeller and guide vane of the molten salt pump at different temperatures, a fluid-solid thermal coupling method was adopted to analyze the molten salt pump structure at different temperatures. The analysis results show that the impeller blade inlet and guide vane outlet have stress concentration phenomena. Periodic distribution of stress circumferential distribution occurs at the root mating positions of the impeller front and rear opening rings and the impeller opening ring. The deformation regularity of the intersection line of the impeller blade and guide vane with shroud is relatively obvious, the deformation amount of the intersection line of the impeller blade and shroud from the inlet to the outlet firstly slightly decreases and then increases. While the deformation amount of the intersection line of the guide vane and shroud tends to decrease from the inlet to the outlet. The increase of temperature will increase the radial deformation amount of the front and rear opening rings and its mating position, but the deformation amount of the impeller opening ring is smaller

收稿日期:2021-06-17; 修订日期:2021-06-26

基金项目:国家自然科学基金(51479083, 52009115); 流体及动力机械教育部重点实验室(西华大学)开放课题资助(LTDL2021-003); 西华大学人才引进项目(Z212007)

Fund-supported Project: National Natural Science Foundation of China(51479083, 52009115); Open Research Subject of Key Laboratory of Fluid and Power Machinery(Xihua University) of Ministry of Education(LTDL2021-003); Talent Fund of Xihua University(Z212007).

作者简介:金永鑫(1990-),男,安徽六安人,西华大学讲师.

通讯作者:张德胜(1982-),男,江苏南通人,江苏大学研究员.

than that of the mating position of the stationary parts, and the impeller opening ring and the mating position at different temperatures will meet the clearance fit conditions and no interference and jamming phenomena will occur.

Key words: molten salt pump, fluid-solid-thermal coupling, structural analysis, stress distribution, strain distribution

引言

熔盐泵是太阳能光热发电系统熔盐循环的核心循环动力设备,长轴熔盐泵的稳定运行是太阳能光热发电系统的关键所在^[1-2]。同时,熔盐泵可应用于石化、冶金等领域,因此对熔盐泵结构特性的研究在推动光热发电产业和相关领域技术提升及发展方面具有重要意义。

在熔盐泵的研究中,郭豹^[3]对熔盐泵的水力性能、结构强度以及结构动力学进行了分析,对熔盐泵的流场和结构进行了全面分析。Cheng 等人^[4]通过 PIV 实验研究了不同粘度熔盐介质在熔盐泵内的非定常特性,结果显示,熔盐介质粘度对蜗壳舌部压力曲线的形状和熔盐泵的性能曲线形状影响很大。Shao 等人^[5]通过 PIV 实验获得了流场内的速度分布均匀性、速度加权平均发散角和绝对速度的周向分量,对流场进行了更精细的流动分析。Cheng 等人^[6]在熔盐泵内进行了固液两相流数值计算分析,结果显示,随着粒径和体积分数的增加,泵的扬程和效率明显减小。Shao 等人^[7]从理论上分析了泵的性能曲线,从能量损失的视角对流体粘度以及外特性与流场的关系进行了分析研究。Wang 等人^[8]通过水力结构进行优化改进,有效提高了水力效率,同时降低了压力波动和振动强度。李云校等人^[9]对长轴熔盐泵的水力结构做了调整,很好地降低了蜗壳上受到的径向力,有效地平衡了结构受到的不平衡力。朱洋^[10]分析了粒径和体积分数对熔盐泵内压力脉动时域和频域特征的影响,同时对熔盐泵叶轮以及泵轴结构特性进行分析。康俊鎰^[11]采用统计分析方法对熔盐泵过流部件水力几何参数进行优化设计,在结构计算中加入温度影响因素。

熔盐的物性在温度变化时产生较大的变化,同时对流场和结构都会产生一定的影响^[12-13]。对熔盐泵的结构变化规律深入研究,有助于提高熔盐泵

的设计水平和产品的稳定性。本文针对熔盐泵的叶轮和导叶等关键部件进行流固热耦合分析,总结不同温度条件下结构应力和变形的变化规律,确保高温工况条件下机组安全稳定运行。

1 数值计算方法

1.1 流场计算方法

以某型号 3 级空间导叶熔盐泵为计算模型,单级设计参数为:设计流量 $Q_d = 220 \text{ m}^3/\text{h}$,设计扬程 $H = 12 \text{ m}$,转速 $n = 1\,480 \text{ r/min}$;水力模型参数为:叶轮外径 $D_2 = 270 \text{ mm}$,出口宽度 $b_2 = 30 \text{ mm}$,进口直径 $D_1 = 172 \text{ mm}$,轮毂直径 $D_h = 70 \text{ mm}$,叶轮叶片包角 $\varphi = 120^\circ$,叶轮叶片数 $Z = 5$;导叶进口宽度 $b_3 = 34.2 \text{ mm}$,进口轴向长度 $L = 142 \text{ mm}$,叶片数 $Z_0 = 8$,叶片包角 $\varphi = 90^\circ$ 。熔盐泵计算域网格为结构化网格,数量为 14.6×10^6 ,关键部件网格如图 1 所示。

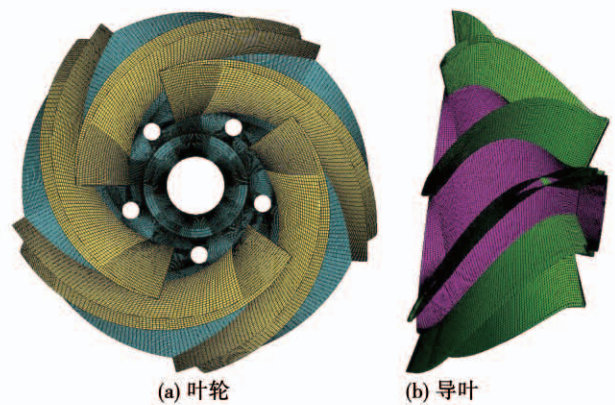


图 1 计算域网格

Fig. 1 Grids of computational domains

尺度自适应 SAS (Scale-Adaptive Simulation) 模型可根据湍流结构分辨率调整特征尺度,可以解析小尺度的涡。同时,文献[14-15]验证了 SAS 模型在叶片式旋转机械中的应用可行性,因此选取 SAS 湍流模型进行计算。计算介质分别为清水、300 ℃ 熔盐、430 ℃ 熔盐、565 ℃ 熔盐,表 1 中熔盐介质物性参数根据文献[3]确定。

表 1 熔盐物性

Tab. 1 Molten salt properties

参 数	清水	565 ℃熔盐	430 ℃熔盐	300 ℃熔盐
密度/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	997	1 730.66	1 816.52	1 899.20
粘性/ $\text{MPa} \cdot \text{s}$	0.894	1.14	1.57	3.26
比热容/ $\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$	4 181.7	1 540.2	1 516.9	1 494.6
热导率/ $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$	0.606 9	0.550 4	0.524 7	0.5

边界条件设置为:进口质量流、出口开放;固体壁面无滑移壁面条件;动静交界面设置为瞬态冻结转子模式;时间步长为 $\Delta t = 3.378\ 38 \times 10^{-4}\text{s}$,即叶轮每旋转 3° 所用时间;每个时间步长迭代 10 次,收敛精度为 10^{-5} ;求解器中对流项采用高阶精度模式,瞬态项采用二阶后向欧拉模型。

熔盐泵清水试验在开式试验台上进行,进出口压力均采用高频压力传感器采集,并进行时均处理。图 2 为熔盐泵的清水试验和 4 种介质的数值计算外特性结果,图中数值计算外特性结果均为时均结果,数值计算结果与试验结果吻合度较高。

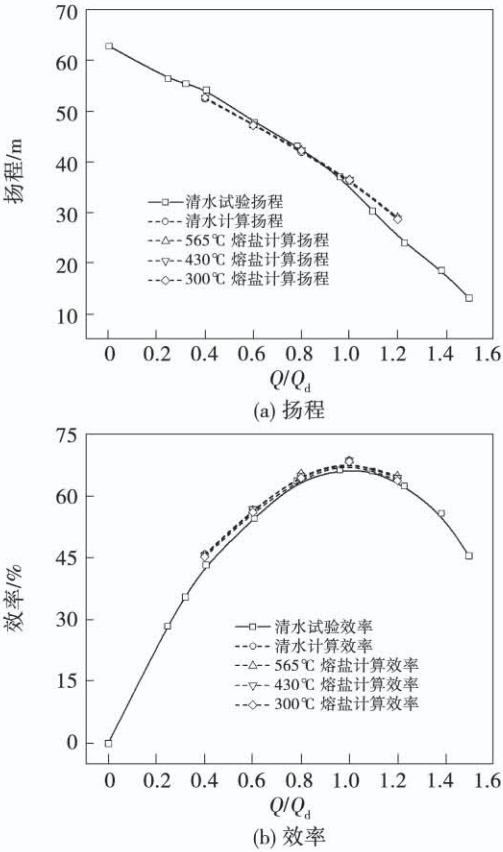


图 2 熔盐泵模拟外特性与实验结果对比
Fig. 2 Comparison of simulated external characteristics and experimental results of the molten salt pump

1.2 结构计算方法

高温熔盐泵流道壁面上存在流场载荷和惯性载荷,通过流场计算获得流场载荷,将流场数据施加在对应耦合面上,给定旋转部件的旋转速度和方向,叶轮部件的旋转速度为 1 480 r/min。热载荷通过流场计算结果中的温度加载施加于结构域,在加载流场载荷的同时施加热载荷。熔盐泵结构如图 3 所示。

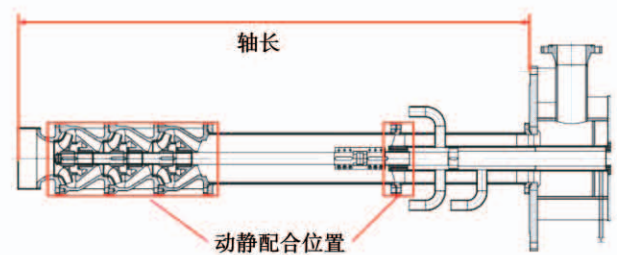


图 3 高温熔盐结构特点
Fig. 3 Structural characteristics of high temperature molten salt pump

对 25,300,430 和 565 ℃4 个温度下高温熔盐泵的叶轮和导叶的应力和应变进行计算与分析。熔盐泵结构计算域网格共 2.15×10^6 个,结构部件网格如图 4 所示。熔盐泵采用耐高温合金材料 347H 制造,材料属性如表 2 所示。

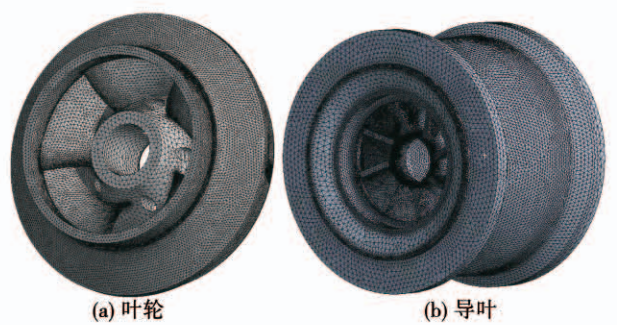


图 4 高温熔盐泵部件网格
Fig. 4 Grids of high temperature molten salt pump components

表 2 材料属性

Tab. 2 Material properties

温度/ ℃	密度/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	弹性模 量/GPa	泊松比	热膨胀系数/ 10^{-6}K^{-1}	热导率/ $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$
25	7 960	193	0.281	16.6	10.4
300	7 958	184	0.293	17.5	15.9
430	7 954	176	0.312	18.4	20.5
565	7 947	163	0.336	19.1	23.4

2 结果与分析

2.1 数据分布位置

由图 5(a)和图 5(b)可知,叶片和导叶与盖板交界几何特征比较复杂,同时也是最容易发生应力集中的位置。图 5(c)和图 5(d)是动静部件配合的位置,如果结构设计不合理就会造成在高温条件下动静部件发生干涉的现象。因此,对动静部件配合位置的应力和形变进行分析是必要的。

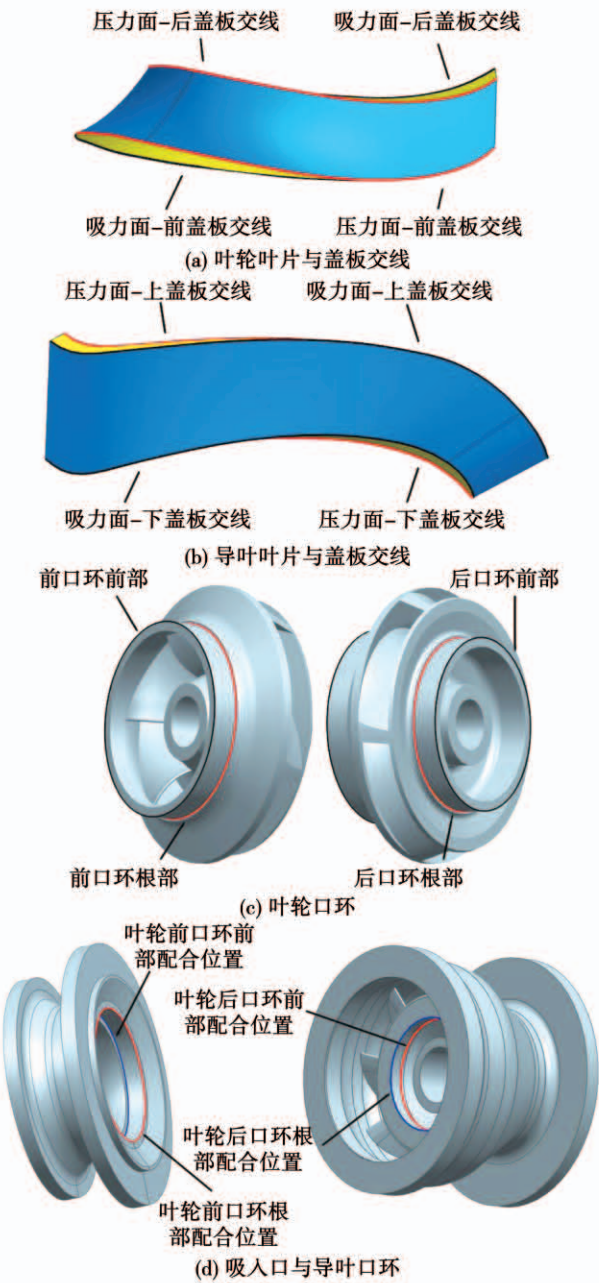


图 5 数据分布位置示意图

Fig. 5 Schematic diagram of data distribution locations

2.2 应力分析

由图 6(a)和图 6(b)可看出,输送介质温度改变后叶轮叶片与盖板交线处的应力变化比较明显,在叶片进口处出现明显的应力集中现象。吸力面出口位置应力值高于压力面出口位置的应力值,叶片-盖板交线中间位置都出现了小幅度的应力增大现象,这与文献[13]和[16]中的结论吻合。

由于温度因素会致使结构产生热应力,温度越高热应力值越大,因此输送介质温度越高时应力值越大。由于叶片出口面与吸力面的夹角很小,致使该位置比较容易出现应力值较大的现象。叶片进口与盖板交界处几何结构比较复杂,使叶片进口处的应力值比较大。同时,叶片进口与后盖板交界处受到后盖板和轮毂共同作用,造成叶片进口位置与后盖板相交位置的应力值相对比较大。叶片中间位置出现应力突增现象,主要是由于圆弧向直线过渡致使应力值增加。

图 6(c)和图 6(d)导叶和叶片与盖板交线处的应力分布显示。叶片进口处会出现小范围高应力值分布区域,主要是由于导叶叶片进口与盖板相交处存在圆弧过渡区域。导叶叶片中间区域的应力值比较低,在接近出口处压力面和吸力面应力值均出现大梯度增加现象。该现象主要是由于在出口处存在法兰盘结构,同时导叶下盖板结构比较复杂,最终导致叶片出口处的应力突增。

由图 7(a)和图 7(b)可知,叶轮口环前部配合位置应力分布没有出现特定周期性。叶轮口环根部配合位置应力圆周分布呈现 8 个波峰和波谷,主要原因是吸入喇叭与导叶体相连接,导叶对吸入喇叭的应力分布产生明显影响。由图 7(c)和图 7(d)可知,前口环前部应力圆周分布出现 5 个明显的周期,前口环前部的应力圆周分布也呈现 5 个周期变化。出现该现象主要是由于叶轮叶片数为 5 个,叶片对叶轮口环处应力分布产生明显的影响。

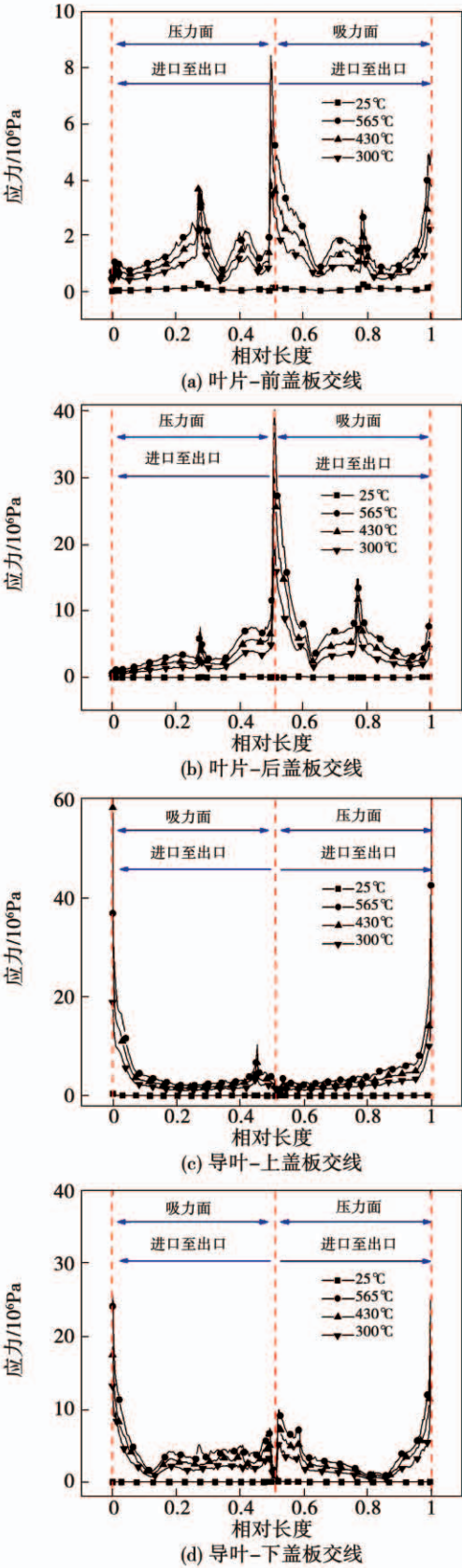


图 6 叶片和导叶与盖板交线应力分布

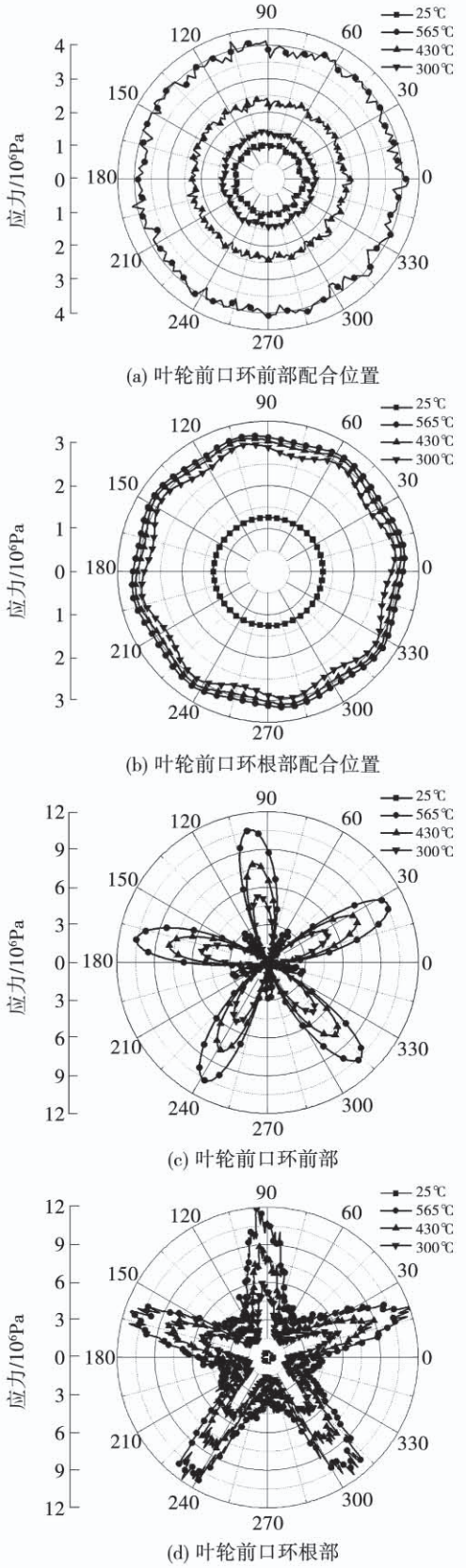


图 7 叶轮前口环位置应力分布

Fig. 6 Stress distribution at the intersection of blade and guide vane with shroud

Fig. 7 Stress distribution at the location of impeller front opening ring

图 8(a)和图 8(b)为叶轮后口环应力分布。可以看出,叶轮后口环根部位置应力圆周分布呈 5 个微弱的周期,后口环前部位置应力圆周分布呈 5 个明显的周期,说明叶轮后口环上应力分布也受到叶片结构的影响。图 8(c)和图 8(d)为叶轮后口环配合位置的应力分布。可以看出,后口环根部配合位置的应力圆周分布呈 8 个明显周期和 8 个小周期的分布特点,前部配合位置的应力圆周分布呈规则的 8 个变化周期。叶轮后口环配合位置位于导叶上,其应力分布特点受到导叶结构的影响。

2.3 变形分析

图 9(a)和图 9(b)为叶轮叶片和盖板交线的变形分布曲线图。可以看出,进口至出口变形量先降低后增加;后盖板交线上变形幅度比较大,压力面和吸力面的变形量规律和大小比较统一;导叶叶片和盖板交线的变形量由进口到出口呈减小趋势;叶轮进口至出口半径增加,因此叶轮叶片与盖板交线变形量整体呈上升趋势,前盖板相对位置半径比后盖板大,使后盖板交线变形幅度比前盖板大。导叶叶片与盖板交线进口至出口半径降低,因此进口至出口变形量呈下降趋势,如图 9(c)和图 9(d)所示。

交线位置最大变形量统计如表 3 所示。叶轮变形量比导叶小,常温清水条件下的变形量比高温熔盐条件下的变形量小很多,叶轮和导叶的变形量随温度升高明显增大。

表 3 结构交线最大变形量(10^{-3} mm)

Tab.3 Maximum deformation of the structural intersection line (10^{-3} mm)

位置	25 ℃	300 ℃	430 ℃	565 ℃
叶片-前盖板	0.005 5	0.47	0.693	0.92
叶片-后盖板	0.004 9	0.42	0.611	0.82
导叶-上盖板	0.015	985	1 440	1 910
导叶-下盖板	0.014	1 010	1 480	1 970

在叶轮前后口环及其配合位置的径向变形量决定着运行过程中发生干涉和卡死现象的可能性,因此对不同温度下动静配合位置的径向变形量进行分析,检验动静部件间是否会发生干涉和卡死。

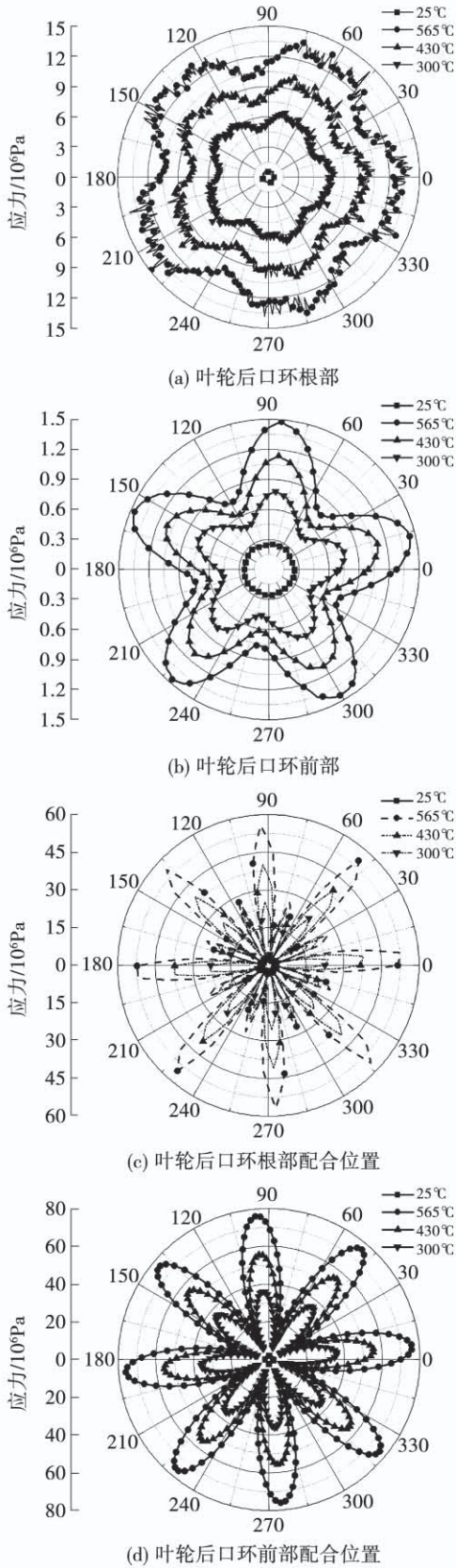


图 8 叶轮后口环位置应力分布

Fig.8 Stress distribution at the location of impeller rear opening ring

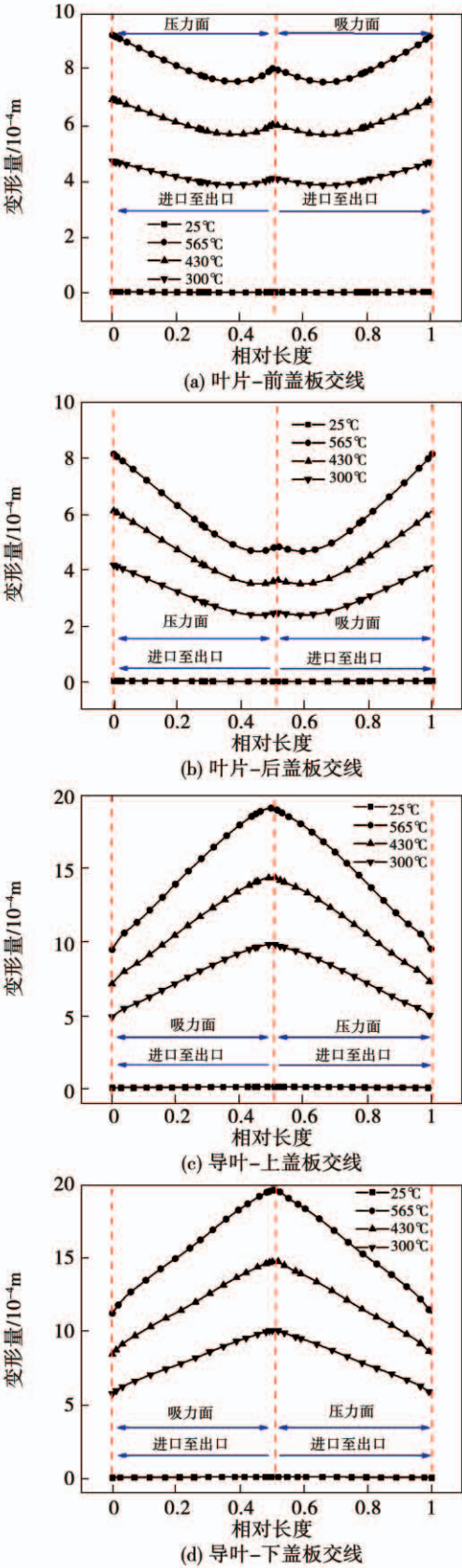


图9 叶片和导叶与盖板交线变形分布

Fig.9 Deformation distribution at the intersection of blade and guide vane with shroud

图 10 和图 11 为前后口环和配合位置的径向变形量圆周分布图。

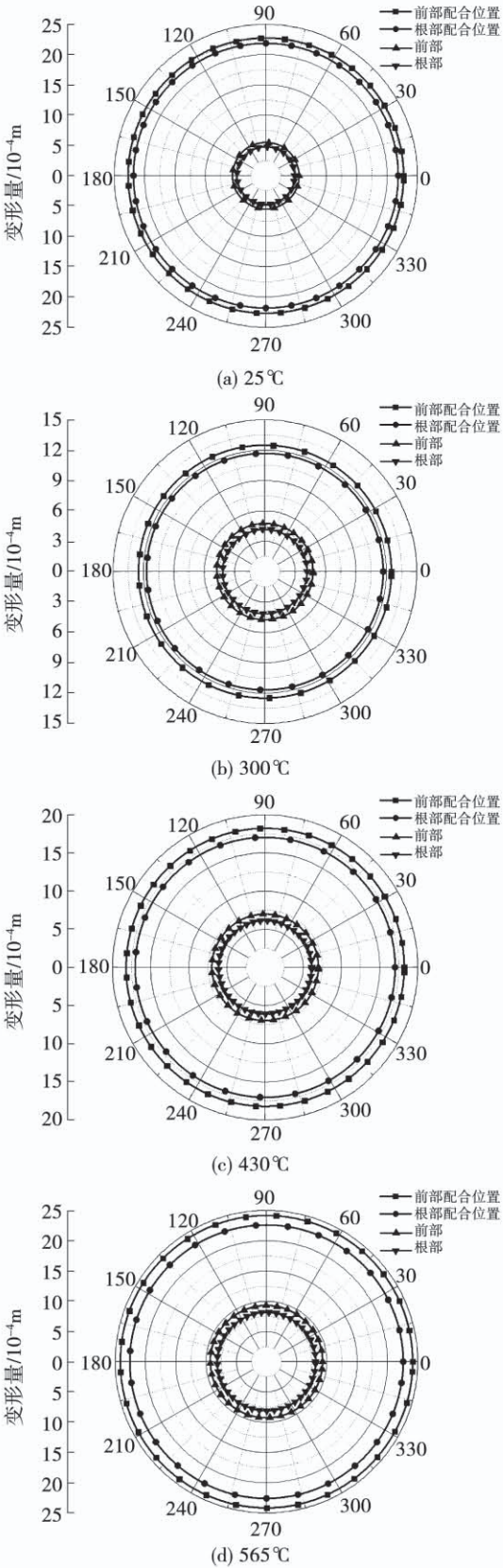


图 10 叶轮前口环位置径向变形分布

Fig.10 Radial deformation distribution at the location of impeller front opening ring

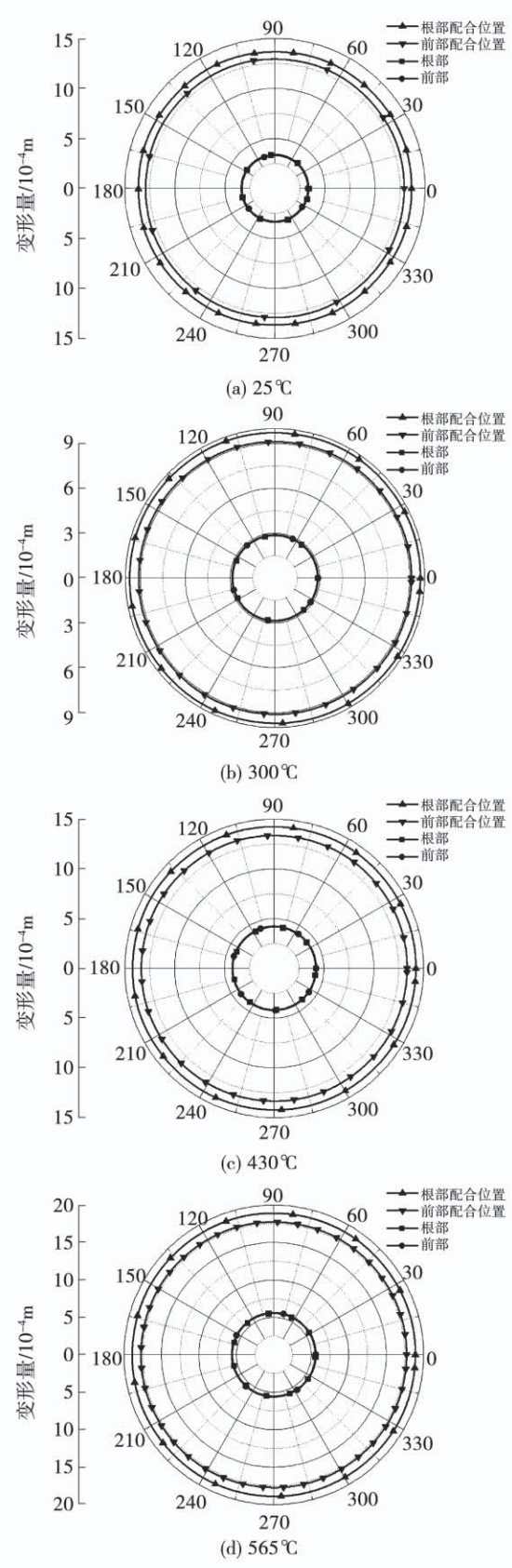


图 11 叶轮后口环位置径向变形分布

Fig. 11 Radial deformation distribution at the location of impeller rear opening ring

由图可看出,温度增加会使前后口环及其配合位置的径向变形量增加,但叶轮口环的变形量均小于静止部件配合位置的变形量。同时,静止部件配合位置初始直径均大于叶轮口环的直径。因此,叶轮口环和配合位置均满足间隙配合,不会出现干涉和卡死现象,如表 4 所示。

表 4 叶轮口环及配合位置径向平均变形

Tab.4 Average radial deformation of impeller opening ring and matching position

叶轮位置	径向平均变形量/mm			
	25 °C	300 °C	430 °C	565 °C
前口环前部	0.005 49	0.475	0.698	0.928
前口环根部	0.004 76	0.417	0.611	0.814
后口环根部	0.003 37	0.284	0.417	0.554
后口环前部	0.003 30	0.287	0.422	0.562
前口环前部配合位置	0.022 7	1.25	1.82	2.42
前口环根部配合位置	0.021 8	1.17	1.71	2.26
后口环根部配合位置	0.013 7	0.972	1.42	1.89
后口环前部配合位置	0.012 9	0.911	1.33	1.77

3 结 论

针对熔盐泵的叶轮和导叶等关键部件进行流固热耦合分析,获得结构中应力和变形分布特点。主要结论为:

- (1) 叶轮叶片进口和导叶叶片出口处存在应力集中,叶轮叶片吸力面应力值高于压力面;叶轮口环根部配合位置的应力圆周分布出现 8 个周期,叶轮上的应力圆周分布均出现 5 个周期,应力出现周期性分布主要是受叶片结构的影响形成的。
- (2) 叶轮叶片和导叶叶片与盖板交线的变形规律性比较明显,叶轮叶片与盖板交线的变形量自进口至出口先小幅度降低后增加;导叶叶片和盖板交线的变形量由进口到出口呈减小的趋势,上下盖板交线上的变形量幅度比较接近。
- (3) 温度增加会使前后口环及其配合位置的径向变形量增加,但叶轮口环的变形量均小于静止部件配合位置的变形量,不同温度下叶轮口环和配合位置都满足间隙配合条件,不会出现干涉和卡死

现象。

参考文献:

- [1] HUNT, J. Handling molten salt for sun power[J]. World Pumps, 2011(1): 22 – 26.
- [2] BARTH D, PACHECO J, KOLB W, et al. Development of a high-temperature, long-shafted, molten-salt pump for power tower applications[J]. Journal of Solar Energy Engineering, 2002, 124(2): 1059 – 1080.
- [3] 郭 豹. 高温熔盐泵设计及可靠性分析[D]. 镇江: 江苏大学, 2016.
- GUO Bao. Design and reliability analysis of molten salt pump at high temperature[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2016.
- [4] CHENG Wen-jie, SHAO Chun-lei, ZHOU Jian-feng. Unsteady study of molten salt pump conveying mediums with different viscosities[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 137(7): 174 – 183.
- [5] SHAO Chun-lei, ZHOU Jian-feng, GU Bo-qin, et al. Experimental investigation of the full flow field in a molten salt pump by particle image velocimetry[J]. Journal of Fluids Engineering, 2015, 137(10): 104501.
- [6] CHENG Wen-jie, GU Bo-qin, SHAO Chun-lei, et al. Hydraulic characteristics of molten salt pump transporting solid-liquid two-phase medium[J]. Nuclear Engineering and Design, 2017, 324: 220 – 230.
- [7] SHAO Chun-lei, ZHOU Jian-feng, CHENG Wen-jie. Effect of viscosity on the external characteristics and flow field of a molten salt pump in the view of energy loss[J]. Heat & Mass Transfer, 2019, 55(3): 711 – 722.
- [8] WANG Kai, LU Xin, LI Yu, et al. Performance improvement of a liquid molten salt pump: geometry optimization and experimental verification[J]. Symmetry, 2019, 423(11): 1 – 16.
- [9] 李云校, 康 灿, 朱宜超, 等. 蜗壳结构对立式高温熔盐泵性能的影响[J]. 化工学报, 2013, 64(8): 2853 – 2859.
- LI Yun-xiao, KANG Can, ZHU Yi-chao, et al. Influence of volute structure on performance of vertically-installed high-temperature molten-salt pump[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2013, 64(8): 2853 – 2859.
- [10] 朱 洋. 熔盐泵内部固液两相流动数值模拟及结构动力学特性分析[D]. 镇江: 江苏大学, 2018.
- ZHU Yang. Analysis of solid-liquid two-phase flow and structural dynamic characteristics for the molten-salt pump[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2018.
- [11] 康俊盛. 高温熔盐泵水力优化设计及转子强度校核[D]. 镇江: 江苏大学, 2018.
- KANG Jun-jun. Hydraulic design optimization and strength check of rotor for molten salt pump at high temperature[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2018.
- [12] ZAVOICO A. Solar power tower design basis document[R]. SAND2001 – 2100, San Francisco: Sandia National Laboratories, 2001.
- [13] NUNES V, QUEIROS C, LOURENCO M, et al. Molten salts as engineering fluids-a review[J]. Applied Energy, 2016, 183: 603 – 611.
- [14] SI Qiao-rui, YUAN Jian-ping, YUAN Shou-qi, et al. Numerical investigation of pressure fluctuation in centrifugal pump volute based on SAS model and experimental validation[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2014(6): 506 – 515.
- [15] 段亚雄. 基于CFD的空调用贯流风机优化及SAS湍流模型的适用性分析[D]. 武汉: 华中科技大学, 2017.
- DUAN Ya-xiong. Optimization of cross flow fan for air-conditioner based on CFD and applicability analysis of SAS turbulence model[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2017.
- [16] 董亚光. 基于流固热多场耦合的高温熔盐泵优化设计和结构可靠性研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2018.
- DONG Ya-guang. The flow field and structure characteristics analysis of molten salt pump based on multi-field coupling[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2018.

(刘 颖 编辑)