文章编号:1001-2060(2024)04-0122-09

# 基于流 – 热 – 固单向耦合计算的 LNG 船用 蝶阀流动及结构改进设计

# 朱兰馨,蔡振威,王炜哲

(上海交通大学 机械与动力工程学院,上海 200240)

摘 要:以超低温蝶阀为研究对象、LNG液化天然气(Liquefied Natural Gas, LNG)为流体工质,利用 Solidworks 软件 对蝶板的结构尺寸进行参数化处理。基于计算流体力学数值模拟技术,利用 Ansys 软件对蝶阀开展流 - 热 - 固单 向耦合计算分析,计算 90°~10°不同蝶阀开度下蝶板的流量系数,及蝶阀开度 10°下不同蝶板结构参数对蝶阀流通 性能、蝶板位移及应力行为的影响。计算结果表明:减小蝶板厚度可以显著增强蝶阀的流通性能,降低蝶板所受最 大应力;降低轴颈厚度对蝶阀流通性能提升效果较弱,但可以有效降低蝶板所受最大应力。

关键 词:LNG 船用蝶阀;流动特性;参数化;结构改进设计;流量系数

中图分类号:TH137 文献标识码: A DOI:10.16146/j. cnki. rndlgc. 2024.04.015

[引用本文格式]朱兰馨,蔡振威,王炜哲. 基于流 - 热 - 固单向耦合计算的 LNG 船用蝶阀流动及结构改进设计[J]. 热能动力工程,2024,39(4):122-130. ZHU Lan-xin, CAI Zhen-wei, WANG Wei-zhe. Flow and structural improvement design of LNG ship butterfly valves based on fluid-heat-solid unidirectional coupling calculation[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power,2024,39(4): 122-130.

# Flow and Structural Improvement Design of LNG Ship Butterfly Valves based on Fluid-Heat-Solid Unidirectional Coupling Calculation

ZHU Lan-xin, CAI Zhen-wei, WANG Wei-zhe

(School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, China, Post Code: 200240)

**Abstract**: Taking the ultra-low temperature butterfly valves as the research object and liquefied natural gas (LNG) as the fluid working medium, the parameterization processing of structure size of butterfly plate was carried out by using Solidworks software. Based on computational fluid dynamics numerical simulation technology, the fluid-heat-solid unidirectional coupling calculation analysis of butterfly valves was performed by using Ansys software, the flow coefficient of the butterfly plate under different butterfly valve opening of  $90^{\circ} - 10^{\circ}$  was calculated, and the effects of different butterfly plate structure parameters on the butterfly valve circulation performance, the butterfly plate displacement and stress behavior under butterfly valve opening of  $10^{\circ}$  were analyzed. The calculation results show that reducing the butterfly plate thickness can significantly enhance the flow performance of the butterfly valve, and reduce the maximum stress on the butterfly plate; decreasing the journal thickness has a weaker effect on improving the flow performance of butterfly valves, but it can effectively reduce the maximum stress on the butterfly valves, but it can effectively reduce the maximum stress on the butterfly valves, but it can effectively reduce the maximum stress on the butterfly valves, but it can effectively reduce the maximum stress on the butterfly valves, but it can effectively reduce the maximum stress on the butterfly valves.

Key words: LNG ship butterfly valve, flow characteristics, parameterization, structural improvement design, flow coefficient

收稿日期:2023-08-30; 修订日期:2023-10-12

作者简介:朱兰馨(1997-),女,上海交通大学硕士研究生.

通信作者:王炜哲(1977—),男,上海交通大学研究员.

# 引 言

天然气作为能源三大支柱之一,不仅利用效率 高,还符合我国构建绿色低碳能源体系的需求。在 现有的运输方式中,海上贸易时液化天然气(Liquefied Natural Gas,LNG)在储存和运输中具有更高的 便利性<sup>[1]</sup>,而船用超低温蝶阀因相较于其他阀门具 有更高的安全性而得到广泛运用。在蝶阀的组成部 件中,蝶板结构参数是影响蝶阀流动特性及结构强 度的主要因素,所以对其进行结构参数改进设计分 析是十分有必要的。

近年来,国内外学者对蝶阀流动特性展开了大 量的研究。Ogawa 等人<sup>[2]</sup>从理论上对蝶阀压力损失 进行了研究,预测了阀门损耗系数。Huang 等人<sup>[3]</sup> 利用流体数值模拟对蝶阀内不可压缩流体的流场进 行三维数值分析,得到流场的速度与应力云图。Lin 等人<sup>[4]</sup>利用计算流体动力学(CFD)模型预测不同 阀门操作角度下盘形蝶阀的流体动力系数,同时也 验证了 CFD 在蝶阀领域应用的可行性。Palys 等 人<sup>[5]</sup>将参数耦合分析与有限元模型方法相结合.对 蝶阀进行多目标优化,提高了蝶阀的流量系数。 Jang 等人<sup>[6]</sup>利用数值分析模型计算不同直径蝶阀 的流量系数,并利用实验数据验证了计算结果的可 靠性。Kwak 等人<sup>[7]</sup>对低温蝶阀的不同密封结构进 行热力耦合分析,对气密性进行评估并提出了优化 方案。Corbera 等人<sup>[8-9]</sup>利用遗传算法对蝶阀的流 动性能进行结构优化,验证了遗传算法在蝶阀结构 优化领域的可行性。沈洋等人<sup>[10]</sup>利用流体数值模 拟技术对蝶阀开度连续变化的流场进行模拟仿真, 研究速度场和压力场的分布规律。徐滟等人[11]对 三偏心蝶阀密封面接触问题进行非线性有限元分 析,为进一步提高三偏心蝶阀的使用寿命提供了理 论基础。吴晗等人<sup>[12]</sup>利用有限元模型对蝶阀在极 限工况下的应力与位移进行分析,绘制相关图像,为 三偏心蝶阀的设计优化提供理论依据。钱帅<sup>[13]</sup>对 超低温三偏心密封蝶阀的材料及加工工艺进行理论 研究,为衍生设计提供了理论依据。

以上针对蝶阀结构的研究多以水或空气为流动 介质,涉及超低温流动介质的研究较少,无法有效反 映蝶阀在超低温情况下的流动特性及结构变化,对 LNG 船用蝶阀的研究意义不大。同时,以往研究中 多通过流体实验与数值模拟相结合的方法分析流体 的流动特性,忽略了蝶阀本身结构参数对流场的影 响及不同参数下的结构强度分析。

本文针对 LNG 船用蝶阀中蝶板结构模型的部 分参数进行参数化处理,并对蝶阀进行流 – 热 – 固 单向耦合计算,分析超低温环境下不同结构参数对 蝶阀流动特性、蝶板位移及应力的影响。

#### 1 计算模型

#### 1.1 几何模型及变量参数选取

本文主要研究对象为全轴式蝶阀,构建超低温 蝶阀及其连接管道内流场的全三维模型,如图1所 示。蝶阀与管道相连,管道公称直径为400mm,内 径为393.7mm。为保证出、入口段的充分发展,入 口段与出口段的长度分别取5倍和10倍公称直径。 为研究不同蝶阀开度对流动特性的影响,分别建立 蝶阀在10°,30°,50°,70°和90°开度下的流场模型 进行流动特性分析。



Fig. 1 Three-dimensional model of butterfly valve structure and flow channel

因蝶阀中影响流道形状的部件为蝶板,因此对 不同变量参数的分析以蝶板为对象。选取 3 个参 数,利用 Solidworks 软件进行三维建模并对选定尺 寸进行参数化处理,随后导入 Ansys 进行数值模拟 计算。选取的 3 个参数如图 2 所示。进行参数化处 理时将 3 个参数分别设置为蝶板轴颈厚度  $d_1, d_2$ (设置同步变化),以及蝶板板厚  $d_3$ ,以现有模型轴 颈厚度 98 mm/96 mm,蝶板板厚 35.5 mm 为依据, 以 2 mm 为步长分别选取 5 组数据,参数范围如表 1 所示。



parameter selection

#### 表1 蝶板结构变量参数选取范围

Tab. 1 Selection range of variable parameters

for	butterfly	plate	structure
-----	-----------	-------	-----------

参数	数据1	数据2	数据3	数据4	数据5
$d_1/mm$	100	98	96	94	92
$d_2/\mathrm{mm}$	98	96	94	92	90
$d_3/\mathrm{mm}$	29.5	31.5	33.5	35.5	37.5

螺板通过轴颈处的3个锁紧销与阀杆配合,轴 颈结构对来流产生阻碍作用,导致此处流场的复杂 程度增加,因此选择轴颈厚度作为螺板的结构变量 参数。此外,螺板板厚减小会导致蝶板与阀体之间 空隙增大,进而增大流通面积,促进流通效果,因此 选择蝶板板厚作为另一个结构变量参数,且这两处 结构变动在工程加工中较容易实现。

#### 1.2 流动边界条件及网格划分

蝶阀管道内流体流动平缓,工程上流速在1~3 m/s 范围内。选取1 m/s 为速度入口边界,温度设定为 112 K,参考压力设定为1 MPa,出口设定为零静压 出口。由于阀体及管道外侧均有保温层包裹,因此 管道壁面设置为绝热边界。CFD 计算模型采用k-ε 湍流模型。流场分析模型及网格划分如图3 所示。



Fig. 3 Flow field analysis model and meshing

为防止生成过密网格造成收敛困难及计算资源 的浪费,流域模型采用分区网格划分。蝶阀所在区 域采用四面体网格划分,并对狭小过流区域进行加 密处理,保证低开度下有足够的网格密度。对出入 口段所在区域进行结构化网格划分,节约计算资源。

在计算前对网格进行无关性验证以保证网格质量,以10°开度下的蝶阀流量系数为评估标准,调整 网格相关尺寸,设计5种不同密度的网格。网格数 分别选取41万、50万、76万、92万和120万,计算 结果如图4所示。由图4可知,网格数从76万增长 至120万,流量系数变化率小于1%,流量系数计算 结果不再随着网格数的增长产生明显变化。所以选 取76万网格数作为后续流体模型网格划分标准。



图 4 流量系数随网格数量变化曲线 Fig. 4 Curve of flow coefficient changing with the number of grids

超低温蝶阀的流动介质为超低温液化天然气, 温度设定 112 K,其在工作压强 1 MPa 下的物性参 数如表 2 所示。

# 表 2 液化天然气物性参数

Tab. 2 Physical parameters of LNG

参 数	数值
温度/K	112
密度/kg·m <sup>-3</sup>	42.09
粘度/Pa•s	0.05
比定压热容/J·(kg·K) <sup>−1</sup>	3 408
导热率/W·(m·K) <sup>-1</sup>	0.2092

#### 1.3 热-固边界条件及网格划分

将流动计算结果中流体壁面的温度和压力导入 热-固计算模块,即可进行蝶阀的热力行为计算和 稳态静力学分析。在热力计算中,超低温蝶阀与外 界存在对流传热,环境温度设置为 25 ℃,以阀盖与 阀体交界法兰面为边界,法兰面以下部分有保温层, 设置为绝热边界,阀盖及以上长颈部分无保温层覆 盖,根据工程经验设置对流传热系数为 10 W/(m<sup>2</sup>·K)<sup>[14]</sup>,阀体内部壁面及蝶板表面温度由流 体域交界面相关结果导入。固体域网格划分如图 5 所示。为保证计算精度,对应力较为集中的轴颈部 位进行了网格加密处理。



图 5 蝶阀模型有限元网格划分 Fig. 5 Finite element mesh division of butterfly valve model

以轴颈厚度 98 mm/96 mm,蝶板厚度 35.5 mm 的蝶板结构为例对固体网格进行网格无关性验证,

调整网格相关尺寸。设计6种不同密度的网格,网 格数分别选取12万、17万、31万、52万、88万和 100万。最大应力值随网格数变化曲线如图6所 示。由图6可知,网格从88万上升至100万时,最 大应力值变化率为0.5%,最大应力值不再随着网 格数的增长明显变化,所以选取88万网格数作为后 续固体模型网格划分标准。



图 6 最大应力值随网格数变化曲线 Fig. 6 Curve of maximum stress value changing with the number of grids

采用316L钢材作为蝶阀的主要部件制造材料, 材料在不同温度下的相关参数如表3所示。

温度/K	密度/ kg·m <sup>-3</sup>	杨氏模量/ GPa	泊松比	热导率/ W・(m・K) <sup>-1</sup>	比定压热容∕ J•(kg•K) <sup>-1</sup>	热膨胀系数/ 10 <sup>-6</sup> ・K <sup>-1</sup>
40	7 970	209	0.283	5	190	13.0
77	7 970	209	0.283	8	190	13.0
80	7 970	209	0.283	8	251	13.0
100	7 970	195	0.294	11	251	15.8
150	7 970	195	0.294	11	490	15.8
295	7 970	195	0.294	15	490	15.8
300	7 970	195	0.294	15	490	15.8

表 3 不同温度下 316L 材料参数<sup>[14]</sup>

Tab. 3 Parameters of 316L material at different temperatures	Tab. 3 P	arameters	of 316L	material a	at different	temperatures	[14]
--	----------	-----------	---------	------------	--------------	--------------	------

计算过程中发现,当蝶阀开度较小时,残差值逐 渐减小,且在一定区间内产生小幅震荡。这是由于 在低开度下,流道狭窄处产生强烈间隙射流导致的 非定常流动,此时将多次计算的平均流量系数视为 该工况下的计算结果。固体的应力应变结果多受低 温冷缩影响,因此压力脉动对固体强度产生的影响 可以忽略。

## 2 计算分析

### 2.1 流动行为分析

为衡量蝶阀流通能力,工程上普遍采用流量系 数作为性能指标,主要与蝶阀的尺寸、结构、流体的 流速和物性参数有关,流量系数计算公式为:

$$K_v = Q \sqrt{\frac{\rho}{\Delta \rho}} \tag{1}$$

式中: $K_v$ —流量系数;Q—体积流量, $m^3/h$ ; $\rho$ —流体 密度, $kg/m^3$ ; $\Delta p$ —流体域上、下游压差, $Pa_o$ 

由式(1)可以看出,蝶阀的流通能力主要受上、 下游压差影响,流量系数反映了在不同开度下蝶阀 的压力损失变化。不同开度下蝶阀中部截面处压力 云图如图 7 所示。





由图 7 可知,随着蝶阀开度减小,上、下游压差 逐渐增大,当开度从 90°减小至 70°时,流体对蝶板 的最大压力增大幅度较小,仅为9.4%。蝶阀开度 越小压力值增长幅度越快,当开度从30°减小至10° 时压力增长约50倍。蝶板转动导致蝶板处流道收 缩,流通面积随之逐渐减小,开度越小流道收缩幅度 越大,使高压力梯度更加集中于收缩口附近,导致蝶 板所受的流体压力逐渐增强,并对蝶板的相关位移 及应力结果产生进一步的影响。

不同开度下蝶阀中部截面的速度云图如图 8 所示。由图 8 可知,在蝶阀开度 90°时,由于蝶板本身的阀轴结构,易在阀轴后部形成明显的低流速区域。 当蝶阀开度从 90°减小到 70°时,收缩口最大速度上 升不明显,仅为 7%。当蝶阀开度进一步减小时,流 通面积大幅减小,在蝶板承压面上形成较大的压力 堆积,流通区域进一步受到压缩,高速区域逐渐减 小,流场的速度梯度逐渐增大,最大流速在低开度下 大幅上升。



图 8 不同开度下蝶阀中部截面处速度云图 Fig. 8 Cloud diagrams of velocity on middle section of butterfly valve under different opening 利用流道进、出口压差计算蝶阀在开度 10°, 30°,50°,70°和90°下的流量系数,绘制进、出口压差 及流量系数随开度变化曲线如图 9 所示。



图 9 近、山口压左及流重杀奴随开度的变化 Fig. 9 Variation of inlet and outlet pressure difference and flow coefficient with opening

由图 9 可知,随着蝶阀开度增大,流量系数呈上 升趋势,变化率先增大后放缓。蝶阀开度从 90°变 化到 70°时,流量系数变化相对较小,从 70°开始,蝶 阀开度减小导致流量系数显著降低。开度从 30°减 小至 10°时,进、出口压差大幅升高,在 10°开度时达 到最大值,此时流量系数达到最小值,流体流通能力 最差,蝶板所受流体压力最大。考虑到工况的危险 程度,后续开展结构参数的改进设计时将基于 10° 开度的模型进行流 – 热 – 固单向耦合计算。

#### 2.2 热力行为分析

以蝶板轴颈厚度为 98 mm/96 mm、蝶板板厚为 35.5 mm 的蝶板结构为例,设定蝶阀开度为 10°,蝶 阀整体温度分布云图如图 10 所示。



蝶阀在法兰面以下有保温层覆盖,温度保持在 -161 ℃,与流体温度一致。温度梯度主要存在于 法兰面以上,即阀盖及阀杆上半部分,最高温度可达 20 ℃。因阀杆与阀盖间存在间隙,而阀盖与外界热 交换面积更大,为蝶阀散冷的主要区域,所以同一水 平位置的阀杆温度低于阀盖。

蝶板的位移分布云图如图 11 所示。



由图 11(a)可知,由于蝶板存在一定厚度,导致 蝶板在 A,B 两侧流通面积大小不同,A 侧流通面积 较小,流体对蝶板压力梯度较大,且 A 侧偏向来流 方向,所以蝶板沿 x 轴收缩量在 A 侧达到最大值。 由图 11(b)可知,由于蝶板上方结构即阀体与阀盖 之间有较大温度梯度,导致零件产生的冷缩变形自 上而下逐渐变大,且蝶阀下方结构即底盖有轴向位 移约束,所以蝶板沿 y 轴方向收缩量自下而上逐渐 变大,最大可达 1.25 mm。由图 11(c)可知,受阀杆 及销约束限制,蝶板冷缩方向为 z 轴页方向,且轴颈 侧受流体压力影响,流体压力方向为 z 轴正方向,产 生 z 轴正向位移,所以蝶板在 C 侧收缩量较低,在 D 侧收缩量较高。由图 11(d)可知,受上游流体压力 及结构约束限制,位移自上而下逐渐减小,且沿轴向 分布不完全对称,最大值为 1.35 mm。

蝶板所受应力分布云图如图 12 所示。由图 12 可知,应力在轴颈处销孔位置达到最大值,约为 106 MPa。由于结构原因,此处销孔为封闭孔,即流体进 入后会产生较为复杂的涡流,且销与蝶板之间有约 束关系,流体对销产生的压力会导致销与蝶板的挤 压力与摩擦力上升,使蝶板销孔处局部应力增大。







# 3 蝶板结构改进分析

#### 3.1 蝶板板厚的影响分析

针对蝶板板厚进行参数化处理,将模型导入计 算后,利用流体域进、出口压差及流量系数计算公式 计算不同蝶板板厚下的流量系数,绘制流量系数随 蝶板板厚变化曲线,如图 13 所示。由图 13 可知,随 着蝶板板厚减小,流量系数呈上升趋势,当蝶板板厚 从 37.5 mm 降低至 29.5 mm 时,流量系数变化率达 到 29 %。这主要是因为减小蝶板板厚会显著增加 流通面积,从而导致流量系数大幅变化,说明固定开 度下改变蝶板板厚参数对提升蝶阀流通性能是可 行的。



with butterfly plate thickness

蝶板所受最大应力及最大位移随蝶板板厚变化 曲线如图 14 所示。



displacement on butterfly plate changing with butterfly plate thickness

由于改变蝶板参数并不会改变蝶阀与外部换热 边界条件,且蝶板完全浸没在超低温流体中,所以蝶 板整体的温度分布并不会随着蝶板参数改变。但随 着蝶板板厚减小,流量系数显著提高,上下游压差减 小,蝶板所受流体侧压力也随之减小,蝶板所受最大 应力随蝶板板厚减小而逐渐降低,且小于316L钢材在112 K温度下600 MPa的屈服应力,不会产生失效。相对于蝶板板厚减小幅度,蝶板最大位移减小幅度过于缓慢,当蝶板板厚降低10 mm时,最大位移量仅降低0.001 mm,导致相对变形量上升,进一步减小蝶板板厚可能产生失效隐患。当蝶板板厚减小到一定程度时,蝶板所受最大应力及最大位移会迅速上升,导致结构失效,所以减小蝶板板厚虽然可以有效提升蝶阀流通能力,却存在一定的限制范围<sup>[15]</sup>。

#### 3.2 轴颈厚度的影响分析

对蝶板上、下两轴颈部位 d<sub>1</sub> 和 d<sub>2</sub> 进行参数化 处理,构建模型后进行计算分析,以 d<sub>1</sub> 为 x 轴绘制 流量系数随轴颈厚度变化曲线,如图 15 所示。由图 15 可知,轴颈厚度逐渐减小虽然会影响轴颈部位湍 流涡量产生,流量系数变化率仅为 0.5%,但变化不 规律且变化幅度较小,说明改变蝶板轴颈厚度对蝶 阀流通性能的提升并无显著效果。





螺板所受最大应力及最大位移随轴颈厚度变化 曲线如图 16 所示。因流道被轴颈部位压缩,流体在 螺板后部会形成回流,产生复杂的涡流区域。随着 轴颈厚度的增大,涡流生成情况也会随之产生变动, 其复杂情况及剧烈程度并不完全随轴颈厚度的减小 规律变动。不同轴颈厚度下应力最大值为 113 MPa,低于 600 MPa 的材料屈服应力,并在轴颈厚度 为96 mm 时达到最小值。当轴颈厚度减小时,螺板 上下游压差与流体侧对螺板及销的压力最大值也在 96 mm 时达到最小值,流体对螺板及销的压力降低 将有效降低销与蝶板销孔之间的挤压力与摩擦力, 从而降低蝶板所受最大应力值。蝶板最大位移随轴 颈厚度变化量低于 0.01%,可忽略不计。所以,减 小蝶板轴颈厚度虽然无法有效改变蝶阀流通能力, 但有助于降低蝶板所受最大应力,后续可综合改变 轴颈板厚与蝶板板厚进行计算以求得蝶板所受应力 最大值的最优解。



图 16 蝶板所受最大应力及最大位移随轴颈 厚度变化曲线

Fig. 16 Curve of maximum stress and maximum displacement on butterfly plate changing with journal thickness

#### 4 结 论

本文利用流 – 热 – 固单向耦合计算分析方法, 计算了不同蝶阀开度下 LNG 船用蝶阀的流量系数 变化情况,并得出流量系数、最大应力及最大位移随 不同结构改进设计参数变化曲线。结论如下:

(1)在开度90°~10°范围内,随着蝶阀开度减小,管道上、下游压差逐渐增大,蝶阀流量系数逐渐减小,流通能力逐渐变差。

(2) 在 10°开度时,由于约束力作用,蝶板位移 自下而上逐渐增加,且偏向来流方向位移较大,应力 在轴颈处销孔位置达到最大值。

(3)改变蝶板板厚对流量系数的影响较大,变 化率可达 29%,对蝶阀流通性能的提升较为显著。
在蝶板厚度 29.5~37.5 mm 的范围内,蝶板板厚为
29.5 mm 时的蝶板流通性能最好。

(4)改变蝶板轴颈厚度对流量系数的影响较小,对蝶阀流通性能的提升并无显著效果,但可以有效降低蝶板所受最大应力。在轴颈厚度 92~100 mm

范围内,96 mm 的轴颈厚度可有效降低蝶板所受最 大应力。

#### 参考文献:

[1] 程跃东. 液化天然气(LNG)及其应用研究[J]. 化工管理,
 2019(4):63-64.

CHENG Yue-dong. Liquefied natural gas (LNG) and its application research  $[\,J\,].$  Chemical Management, 2019(4) :63 – 64.

- [2] OGAWA K, KIMURA T. Hydrodynamic characteristics of a butterfly valve—prediction of torque characteristics [J]. ISA Transactions, 1995, 34(4):327 - 333.
- [3] HUANG Chen-dong, KIM R H. Three-dimensional analysis of partially open butterfly valve flows[J]. Journal of Fluids Engineering, 1996,118(3):562-568.
- [4] LIN F D ,SCHOHL G A. CFD prediction and validation of butterfly valve hydrodynamic forces[J]. Critical Transitions in Water and Environmental Resources Management, 2004, 160(7):1-8.
- [5] PALYS L, MRZYGLOD M W. Using metamodeling and fluid-structure interaction analysis in multi-objective optimization of a butterfly valve[J]. Computer Assisted Methods in Engineering and Science, 2021, 28(1):17-38.
- [6] S. E. J, S. H. J, Y. W. J, et al. Validation of the hydrodynamic torque analysis model generated in triple eccentric butterfly valve for nuclear power plant[J]. Journal of Computational Fluids Engineering, 2019, 24(4):93 - 98.
- [7] KWAK H S, SEONG H, KIM C. Design of laminated seal in cryogenic triple-offset butterfly valve used in LNG marine engine[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2019,20(2):243-253.
- [8] CORBERA S, OLAZAGOITIA J L, LOZANO J A. Multi-objective global optimization of a butterfly valve using genetic algorithms [J]. ISA Transactions, 2016, 63:401-412.
- [9] CORBERA CARABALLO S, OLAZAGOITIA RODIRGUEZ J L, LOZANO RUIZ J A, et al. Optimization of a butterfly valve disc u-

sing 3D topology and genetic algorithms [J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2017, 56:941-957.

- [10] 沈 洋,金晓宏,杨 科. 蝶阀三维流场仿真和阀板驱动力矩 求解[J]. 中国科技论文,2013,8(8):820-823.
  SHEN Yang, JIN Xiao-hong, YANG Ke. Simulation of 3D flow field and calculation of moments on valve plate for butterfly valve
  [J]. Chinese Science Paper,2013,8(8):820-823.
- [11] 徐 滟,王 渭,黄明亚. 三偏心蝶阀密封应力均匀性的数值 仿真[J]. 包装与食品机械,2006,24(2):11-15.
  XU Yan,WANG Wei,HUANG Ming-ya. The digital simulation of uniformity of tri-eccentric butterfly valve sealing stress [J]. Packaging and Food Machinery,2006,24(2):11-15.
- [12] 吴 晗, 匡茜茜, 吴雪萍. 极限工况下三偏心蝶阀的力学特性 分析[J]. 江苏科技信息, 2022, 39(2):41-44.
  WU Han, KUANG Qian-qian, WU Xue-ping. Analysis of the mechanical characteristics of three eccentric butterfly valve under limit working conditions [J]. Jiangsu Science and Technology Information, 2022, 39(2):41-44.
- [13] 钱 帅.超低温三偏心硬密封蝶阀的设计与研究[D].浙江: 浙江工业大学,2012.
   QIAN Shuai. Design and research of cryogenic three eccentric hard acel hutterfu value [D]. Zhaijang Zhaijang University of

hard seal butterfly valve [D]. Zhejiang: Zhejiang University of Technology, 2012.

- [14] 周璟莹. 超低温球阀热固耦合分析及密封材料性能研究
  [D]. 兰州:兰州理工大学,2017.
  ZHOU Jing-ying. Thermo mechanical coupling analysis and sealing material's performance study of ultra-low temperature ball valve[D]. Lanzhou;Lanzhou University of Technology,2017.
- [15] 刘阳阳.大型蝶阀产品的结构有限元分析及优化研究[D]. 石家庄:河北科技大学,2015.

LIU Yang-yang. Finite element analysis and optimization of the large butterfly valve products [D]. Shijiazhuang: Hebei University of Science and Technology, 2015.

(刘 颖 编辑)