

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2017.06.002

基于仿真分析的船用防爆阀阻燃片优化研究^{*}

刘 红, 沈少祥, 闫 凡

(浙江工业大学 机械工程学院, 浙江 杭州 310014)

摘要:针对防爆阀阻燃片结构设计缺少理论指导,主要依靠实验测试完成设计的问题,给出了一种仿真分析方法,以便于结构优化研究。借助计算流体力学理论和 FLUENT 仿真平台,建立了阻燃片的优化模型,通过均匀设计方法对阻燃片凸台宽度、凸台角、凸台高度等尺寸数据进行了分析,使用 MATLAB 对仿真数据进行了回归处理,通过出口总压与温度的散点图寻找性能最佳尺寸。研究表明,运用均匀设计和回归分析数值处理方法有利于数据处理和多目标优化,获得的尺寸回归函数能求得性能最佳尺寸;仿真结果与实际情况基本一致,同时该尺寸阻燃片实际测试过程中降压灭焰性能满足要求,有助于防爆阀阻燃片的设计研究。

关键词:阻燃片;仿真分析;计算流体力学;均匀设计

中图分类号:TH 138.5;U 664.5

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2017)06-0562-05

Optimization on flame arrester sheet of explosion proof valve based on simulation analysis

LIU Hong, SHEN Shao-xiang, YAN Fan

(College of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract: Aiming at the problem that lack of theoretical guidance and the performance was mainly tested by experiments in the structural design process of flame arrester sheet, the research of structural design and optimization was provided a analysis method of simulation. The optimization model of flame arrester sheet was established by CFD and FLUENT simulation platform, flame arrester sheet's dimension data of convexity width, convexity corner, convexity height were optimized and analyzed by the uniform design method, simulation data were handled by regression analysis with MATLAB, the dimension of best performance was found by scatter diagrams of total pressure and temperature at outlet. The results indicate that the numerical methods of uniform design and regression analysis are favour of data processing and multi-objective optimization, the dimension regression functions are able to gain the dimension of best performance, simulation results are basically identical with actual test results, also this flame arrester sheet can meet performance requirements of reducing pressure and extinguishing fire in the actual test process, this method is helpful to the design of flame arrester sheet.

Key words: flame arrester sheet; simulation analysis; CFD; uniform design

0 引 言

随着船舶行业的发展,船用柴油机的防爆阀越来越受到重视。防爆阀作为安全装置,能有效减少船用柴油机安全事故,避免造成经济损失和人员伤亡,比如曲轴箱爆炸。因此,国际船级社颁布了 IACS UR M66^[1],明确规定新建的船舶发动机必须要有阻

燃性防爆阀。现阶段,防爆阀的研究取得了较大成果,但也存在一些问题。如厦门大学的学者研发的 FB2 型电磁防爆阀在液压系统中应用广泛^[2],但是不具备灭焰功能;中国船舶重工集团第 711 研究所研制的导流防爆阀可用于流体降压稳流^[3],但未考虑阻燃功能;DASGUPTA 等人^[4]采用键合图建模技术对不同的减压阀进行了动力学分析,得到了减压阀

收稿日期:2016-12-15

基金项目:浙江省科技厅公益技术研究工业项目(2016C31043)

作者简介:刘红(1960-),男,浙江杭州人,博士,教授,主要从事现代设计理论与方法、CAD/CAE 技术方面的研究. E-mail: hliu@zjut.edu.cn

的工作特性,但未考虑结构优化问题;BRUK 等人^[5]通过一系列爆炸实验研究了减压阀突然爆裂和爆炸条件对压力容器热工水力学的影响;贺国等人^[6]应用 CFD 方法对船用柴油机制动活塞式气体减压阀内部的流场进行了研究,指出了阀门结露的原因。然而,关于防爆阀阻燃片的结构对降压灭焰性能的影响方面研究不多。

本研究对现有的某型防爆阀阻燃片进行结构优化,确定阻燃片凸台宽度、凸台角、凸台高度为优化变量,通过 FLUENT 进行仿真分析,获得最佳尺寸。

1 防爆阀仿真模型建立

1.1 防爆阀结构与工作原理

防爆阀如图 1 所示。

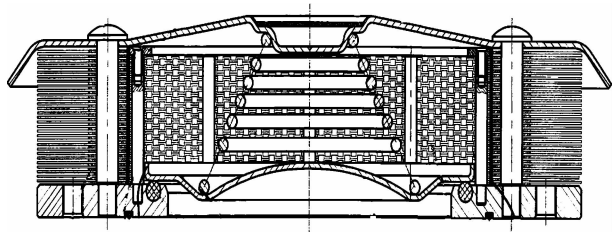


图1 防爆阀结构图

它由环形底座、面板、弹簧、阀板、阻燃器、内外阻燃圈等构成。

其中阻燃器由冲压成型的阻燃片叠加而成,是防爆阀的关键部件,也是研究的对象,防爆阀阻燃片与阻燃器如图 2 所示。

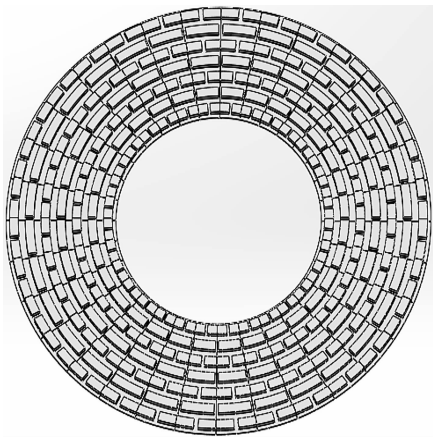


图2 防爆阀阻燃片与阻燃器

阻燃片上有冲压成的凸台,凸台沿周向均匀分布,沿径向由内到外等间距均匀分布 7 圈,且相邻两圈的凸台相互交错分布,外圈凸台刚好挡在内圈两凸台形成的间隙前面。当高温高压的气流冲入流道,先受到凸台阻挡,与凸台碰撞损耗压力,与凸台壁面热交换降温,然后沿凸台左右方向分成两股气流,最后冲入下一

个流道,这个过程不断重复直到冲出防爆阀,实现降压灭焰的目的。

1.2 模型假设

由于防爆阀内部流场较为复杂,本研究在建立分析模型前作如下假设:

(1) 防爆阀处于开启稳定状态,只对稳态流场做分析;

(2) 开启时,防爆阀内的油气混合气体与外界空气连通,流速小于声速的三分之一,将油气混合气体视为不可压缩气体;

(3) 单相流,火焰通过温度描述;

(4) 进气口气体参数均匀,气体的热物性参数不随温度的变化而变化;

(5) 流体流动方式为湍流,流动强度为 5% ;

(6) 阻燃器的结构属于周期性轴对称结构,假设进口气口气体各个方向均匀,即阀内流场也是周期性轴对称。

1.3 仿真设置

本研究根据对称性取一个典型扇面建立轴对称模型。本研究建立的三维轴对称扇面模型延长尾部空间,以便于气体喷出防爆阀并与空气的接触过程中,分析出口总压与温度的变化,防爆阀阻燃片计算模型如图 3 所示。

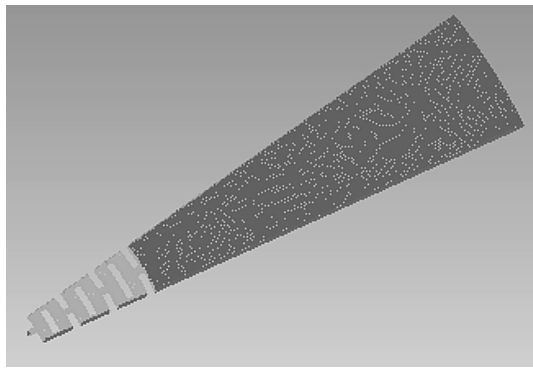


图3 防爆阀阻燃片计算模型

本研究采用 ICEM 软件进行网格划分,考虑近壁区和迷宫通道的复杂,采用非结构四面体网格,设置凸台壁面网格大小为 0.1、0.3、0.5 (3 组),对应设置尾部延长部分网格大小为 0.5、0.7、0.9 (3 组),分别得到 103 382、75 443、68 635 个网格单元。经仿真计算发现,3 种网格质量对出口压强和温度的误差均在 7% 左右,网格对结果影响不大。本研究取 103 382 个网格,其网格质量如图 4 所示。

某型阻燃式防爆阀的额定压力为 5 kPa ~ 18 kPa,允许误差 20%。分析防爆阀开启稳定状态下的流场时,为检验安全性,设工作入口总压为 20 kPa。常用船用柴

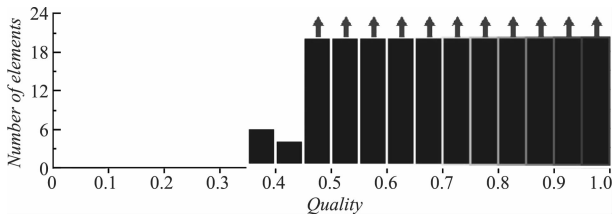


图 4 阻燃片网格质量

油机润滑油的燃点越为 299.85 ℃ ~ 380.85 ℃^[7], 由于防爆阀工作时, 要求在油气混合气体达到引爆温度前开启, 将高温高压气体释放, 起到降压灭焰效果, 为检验安全性, 设入口温度为 336.85 ℃。考虑到防爆阀爆炸试验条件下的工作情况, 设极限入口总压为 3.5×10^5 Pa。根据某公司多次试验总结, 防爆阀性能评价指标如下: 极限入口总压 $P_{in} = 3.5 \times 10^5$ Pa, 入口温度 $T_{in} = 336.85$ ℃时, 出口总压 $P_{out} \leq 7.0 \times 10^4$ Pa 和入口总压 $P_{in} = 2.0 \times 10^4$ Pa, 入口温度 $T_{in} = 335.85$ ℃时, 出口温度 $T_{out} < 299.85$ ℃。

本研究采用 FLUENT 软件进行仿真, 其关键设置如下: 考虑近壁面对压力和温度的影响, 开启能量方程, 选择 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型, 勾选加强壁面计算选项, 选择 SIMPLEC 算法进行运算, 动量、湍流动能和湍流耗散率都设置为二阶迎风格式, 确保计算精度。

2 优化设计方案

2.1 优化模型

阻燃片结构优化的目标是出口温度与出口总压满足性能评价指标。优化变量取凸台宽度、凸台角、凸台高度, 阻燃片凸台优化变量如图 5 所示。

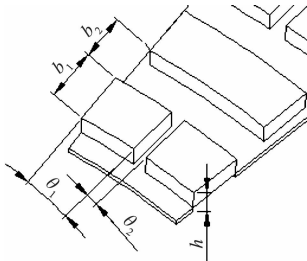


图 5 阻燃片凸台优化变量

(1) 凸台宽度 b_1 。考虑到阻燃片的冲压工艺, 凸台宽度 b_1 应大于可冲压小尺寸界限, 根据 KANDLIKAR^[8] 提出的界限为 3 mm, 可以确定凸台宽度 $b_1 \geq 3$ mm; 考虑到阻燃片的工作性能和尺寸大小, 凸台宽度应 $b_1 \leq 6$ mm; 已知凸台圈数为 7, 阻燃片内径为 122 mm、外径 240.00 mm, 除去飞边, 凸台宽度应满足 $7b_1 + 6b_2 = 59$ mm。故凸台宽度应在 $3 \text{ mm} \leq b_1 \leq 6 \text{ mm}$ 。

(2) 凸台角 θ_1 。凸台角是用来控制凸台的长度, 凸

台角过大, 则流道过小, 凸台角过小, 则不能挡住气流; 每圈上的凸台数量确定, 凸台角 θ_1 应满足 $\theta_1 + \theta_2 = 11.25^\circ$ 。故设定凸台角应在 $7^\circ \leq \theta_1 \leq 10^\circ$ 。

(3) 凸台高度 h 。考虑到一次冲压所能冲出的深度、防爆阀降压灭焰的效果和生产经验, 一般设定凸台高度 h 应在 $1.5 \text{ mm} \leq h \leq 2.5 \text{ mm}$ 。

该优化模型属于多目标优化问题, 且优化变量的取值范围较大, 因此本研究将采用线性加权法、均匀设计法进行分析, 将其转化为单目标优化问题并构建一个求最小值的优化模型函数 F 。考虑到防爆阀设计的首要目的是阻燃, 即出口温度 T 越低越好, 故将其系数设置为 0.7; 其次是降压, 即出口总压 P 比进口压力小, 故将其系数设置为 0.3, 得到如下优化模型表达式:

$$F_{(X_1, X_2, X_3)} = 0.7 \times T_{(X_1, X_2, X_3)} + 0.3 \times P_{(X_1, X_2, X_3)} \tag{1}$$

式中: F —关于函数 T 和 P 的构造函数; T, P —关于 X_1, X_2, X_3 的函数。

2.2 构造均匀设计表

本研究在阻燃片凸台优化过程中考虑了 3 个优化变量, 根据每个变量情况, 取凸台宽度、凸台角和凸台高度的步长分别为 0.6 mm、 0.6° 和 0.2 mm, 即每个优化变量有 6 个水平, 如果对每个尺寸进行仿真, 则需进行 216 次。由于计算量较大, 本研究在保证计算数量和效果最佳的基础上, 采用方开泰、王元^[9] 描述的等水平均匀设计方法对数据进行处理。所构造的 $U^*(6^6)$ 均匀设计表如表 1 所示。

表 1 均匀设计表 $U^*(6^6)$

NO	1	2	3	4	5	6
1	1	2	3	4	5	6
2	2	4	5	1	3	5
2	3	6	2	5	1	4
4	4	1	5	2	6	3
5	5	3	1	6	4	2
6	6	5	4	3	2	1

即 $U_7(7^6)$ 均匀设计表的最后一行去掉来构造 $U^*(6^6)$, 根据均匀性准则, 取表中前 3 列作为因数水平得到优化设计, 如表 2 所示。

表 2 优化设计表

NO	b_1/mm	$\theta_1/(^\circ)$	h/mm
1	1(3)	3(8.2)	3(1.9)
2	2(3.6)	6(10)	5(2.3)
2	3(4.2)	2(7.6)	2(1.7)
4	4(4.8)	5(9.4)	5(2.3)
5	5(5.4)	1(7.0)	1(1.5)
6	6(6.0)	4(8.8)	4(2.1)

3 仿真与优化分析

3.1 仿真结果

本研究通过 FLUENT 对以上不同尺寸的阻燃片进行仿真,结果如表 3 所示。

表 3 均匀设计仿真结果

序号	b_1/mm	$\theta_1/(\text{^\circ})$	h/mm	$T/(\text{^\circ C})$	$P_1 \approx P/100$
1	1(3)	3(8.2)	3(1.9)	321	340.1
2	2(3.6)	6(10)	5(2.3)	290	293.0
3	3(4.2)	2(7.6)	2(1.7)	320	501.7
4	4(4.8)	5(9.4)	5(2.3)	305	293.7
5	5(5.4)	1(7.0)	1(1.5)	321	553.2
6	6(6.0)	4(8.8)	4(2.1)	321	286.2

其中,出口温度 T 是在入口总压为 $2.0 \times 10^4 \text{ Pa}$,入口温度为 $336.85 \text{ ^\circ C}$ 下所得结果。出口总压 P 是在入口总压为 $3.5 \times 10^5 \text{ Pa}$,入口温度为 $336.85 \text{ ^\circ C}$ 下所得结果,为便于后续计算,将 P 转化为 P_1 ,与 T 的数量级一致。

3.2 出口温度与出口总压回归分析

本研究利用 Matlab 的函数拟合工具对以上 6 组不同尺寸的数据结果进行拟合。笔者选取显著水平 $\alpha = 0.05$,分别获得出口温度和出口总压回归函数、出口温度和出口总压函数残差如图 6 所示。

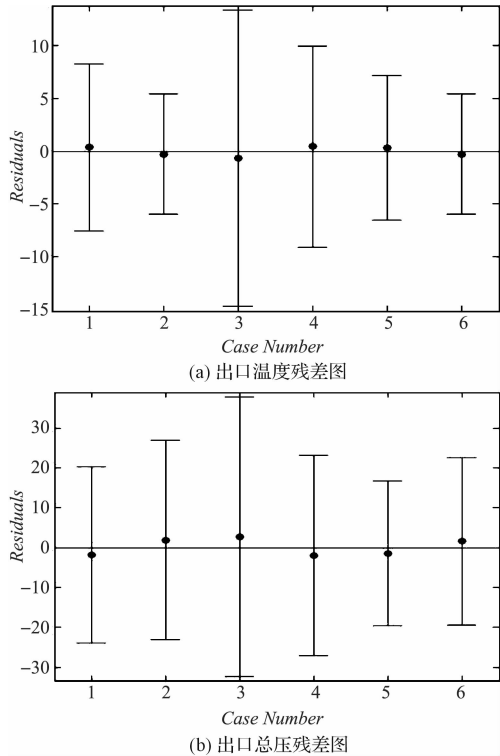


图 6 拟合函数的残差图

表 4 函数拟合效果参数

序号	R^2	F	P	S^2
1	0.999 3	476.157 7	0.002 1	0.641 6
2	0.999 4	448.081 6	0.002 2	34.355 1

其中, R^2 为相关系数,反映回归方程的拟合程度,范围为 $0 \leq R^2 \leq 1$, R^2 值越接近 1,回归方程的拟合程度越好; F 为统计量,是检验回归方差显著性的值; P 为显著性值,当 $\alpha \leq P$ 时,方程有显著意义; S^2 为误差方差。

由表和图中的数据可知,函数的拟合效果较好,具有代表性。

出口温度关于凸台宽度、凸台角、凸台高度的回归函数如下式所示:

$$T = 287.89 + 0.064\,4 \times X_3^4 \times X_2 - 0.697\,5 \times X_2^2 \times X_3 + 0.097\,8 \times X_1^3 \times X_3 - 10.56 \times X_1 + 7.59 \times X_2 + 41.85 \times X_3 \tag{2}$$

出口总压与凸台宽度、凸台角、凸台高度关系的回归函数:

$$P = -552.73 - 177.99 \times X_1 \times X_2 + 1.42 \times X_1^2 \times X_2^2 + 0.75 \times X_1 \times X_3^3 - 0.1 \times X_1^4 \times X_2 + 876.6 \times X_1 + 248.41 \times X_2 - 36.21 \times X_3 \tag{3}$$

式中: T —出口温度, P —出口总压, X_1 —凸台宽度, X_2 —凸台角, X_3 —凸台高度。

3.3 优化分析

本研究将出口温度回归函数式(2)和出口总压回归函数式(3)代入优化模型函数式(1),获得 F 关于变量 X_1 、 X_2 、 X_3 的函数。为得到最优尺寸,本研究利用控制变量法^[10],步骤如下:控制凸台角和凸台高度为固定值,按步长递增凸台宽度并编号至递增结束;按步长递增一个凸台角,循环步骤(1)至凸台角递增结束;按步长递增一个凸台高度,循环步骤(1)和(2)至凸台高度递增结束;将 3 个因素共 216 组不同尺寸的值通过 Matlab 绘图功能得到函数式(1)的散点如图 7 所示。

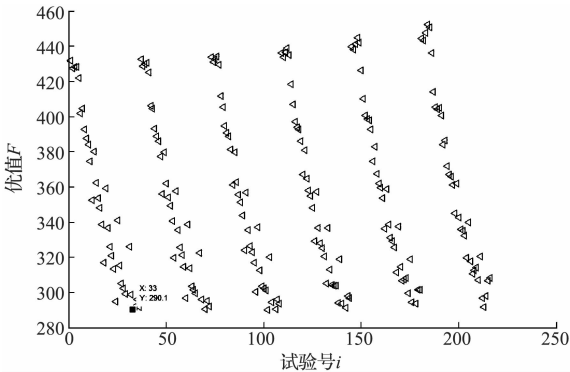


图 7 最佳尺寸的散点图

经过比较可知,图 7 中编号 33 在图中最下端,其 F 值最小,即尺寸最优值所在编号,具体尺寸为 $b_1 = 4.2 \text{ mm}$,

衡量出口温度和出口总压函数拟合质量如表 4 所示。

$\theta_1 = 10^\circ$, $h = 1.5 \text{ mm}$ 。入口总压为 $2.0 \times 10^4 \text{ Pa}$, 入口温度为 336.85°C 时, 出口温度为 291.72°C ; 入口总压为 $3.5 \times 10^5 \text{ Pa}$, 入口温度为 336.85°C 时, 出口总压为 $28\,953 \text{ Pa}$ 。

该尺寸阻燃片通过 Fluent 仿真结果如图 8 所示。

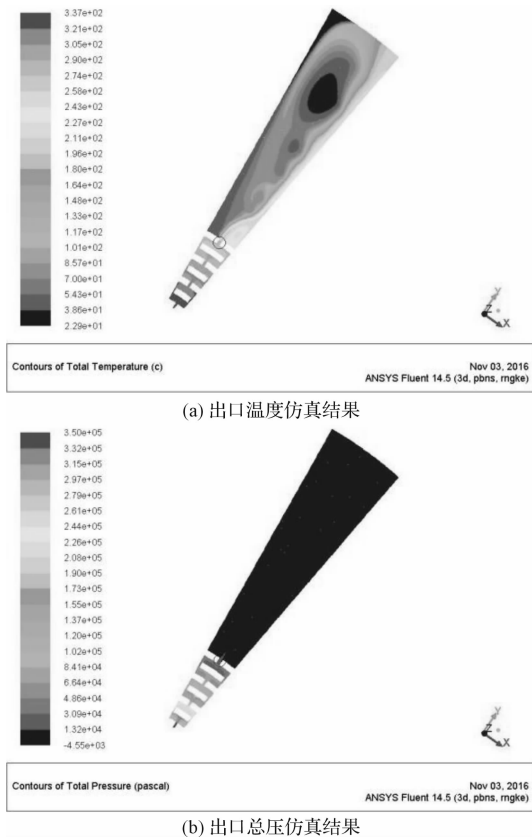


图 8 最佳尺寸仿真结果

其出口温度为 289.7°C , 出口总压为 $30\,500 \text{ Pa}$, 阻燃片降压灭焰效果显著。计算发现, 误差均在 5% 以内, 故可认为该凸台尺寸是当前条件下的最佳尺寸, 根据优化结果指导生产的阻燃片装配成防爆阀后, 经检验具有良好的阻燃性能。

3.4 实验验证

一般需要通过实验手段验证仿真与优化结果的正确性, 尤其是上述轴对称仿真模型的合理性。但是, 阻燃片有特殊性, 其仿真与优化结果无法直接通过实验来检验, 这是因为阻燃片仅仅是防爆阀的核心零件。另一方面, 阻燃实验是在瞬间完成的, 检测爆炸瞬间防爆阀出口的温度与压力很难, 只能通过观察火焰是否

熄灭来检验其阻燃性能。根据优化结果指导生产的阻燃片装配成防爆阀后经检验具有良好的阻燃性能。

4 结束语

本研究用 CFD 仿真方法研究了某型防爆阀阻燃片结构对降压灭焰性能的影响。降压灭焰性能通过出口总压和出口温度体现。由出口总压和出口温度函数所得到的构造函数散点图发现, 散点呈一定规律出现且编号大致上连续, 函数最小值点在图中某列点的末端, 但最小值所在编号不一定与相邻点连续。比较每列最下端点, 得到最小值所在编号, 获得凸台最佳尺寸并用 FLUENT 验证计算结果, 结果一致。

在防爆阀阻燃片的优化过程中, 采用的数值处理方法和得出的结论有助于今后对防爆阀整体性能研究。

参考文献 (References):

- [1] 黄立贤, 张于雅, 胡克峰, 等. 船用柴油机防爆阀船规要求的发展[J]. 柴油机, 2009, 31(1): 29-32.
- [2] 褚丹雷, 胡国清, 卢贵主, 等. FB2 型电磁防爆阀[J]. 厦门大学学报: 自然科学版, 1999, 38(6): 943-946.
- [3] 中国船舶重工集团公司第七一一研究所. 导流防爆阀[P]. 中国: CN101050725, 2007-10-10.
- [4] DASGUPTA K, KARMAKAR R. Dynamic analysis of pilot operated pressure relief valve[J]. **Simulation Modelling Practice and Theory**, 2002, 10(1-2): 35 - 49.
- [5] BRICK A M, VANDERSTEEN J D J. The effect of pressure relief vale blowdown and fire conditions on the thermo-hydraulics with in a pressure vessel[J]. **Journal of pressure Vessel Technology**, 2006, 128(3): 465-575.
- [6] 贺 国, 文学栋, 石小营. 柴油机气体减压阀内部流场及结露机理研究[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2012, 40(1): 119-122.
- [7] 蒋兰芳, 刘 红, 梁 华, 等. 船用柴油机阻燃式防爆阀的压力降分析[J]. 上海交通大学学报, 2013, 46(6): 889-893.
- [8] KANDLIKAR S G. Fundamental issues related to flow boiling in minichannels and microchannels[J]. **Exp Therm Fluid Sci**, 2002, 26(2-4): 389-407.
- [9] 方开泰. 均匀设计与均匀设计表[M]. 北京: 科学出版社, 1994.
- [10] 覃绮珊. 控制变量法及其应用[J]. 广西物理, 2002, 3(2): 50-51.

[编辑: 周昱晨]

本文引用格式:

刘 红, 沈少祥, 闫 凡. 基于仿真分析的船用防爆阀阻燃片优化研究[J]. 机电工程, 2017, 34(6): 562 - 566.

LIU Hong, SHEN Shao-xiang, YAN Fan. Optimization on flame arrester sheet of explosion proof valve based on simulation analysis[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2017, 34(6): 562 - 566.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>