

氩气节流型低温探针稳态模拟及双目标优化

刘洁雨, 刘迎文

(西安交通大学能源与动力工程学院, 陕西 西安, 710049)

(Tel: 029-82668727, Email: ywliu@xjtu.edu.cn)

摘要: 近年来, 基于微型节流制冷器发明的低温探针在国际低温医疗领域应用广泛, 而国内低温探针技术尚处于起步阶段, 因此开展低温探针的模拟与优化技术研究将有助于推进我国低温医疗的发展。本文对氩气节流型低温探针进行了稳态模拟, 通过探针制冷量(q_c)的数值模拟结果与实验结果的对比发现, 两者相对误差在 0.9% 以内, 数值模型精度较高。利用响应面方法 (RSM) 分析了翅片高度、翅片厚度、翅间距对探针制冷量和冷端壁面温度(T)的影响关系, 以最大制冷量和最低冷端壁面温度为优化目标, 得出了双目标下最佳翅片参数, 为低温探针的多目标优化提供了新的思路和方法。

关键词: 低温探针; 稳态模拟; 响应面方法; 多目标优化

Steady state simulation and multi-objective optimization of an argon cryoprobe utilizing throttling

Liu Jieyu, Liu Yinwen

(School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shanxi 710049)

Abstract In recent years, cryoprobe invented by using Joule-Thomson cryocooler are widely used in cryogenics medical fields in the world, and domestic cryogenic probe technology is still in its infancy. The simulation and optimization of cryoprobe are conducive to the advancement of cryogenic medical development. In this paper, the steady-state simulation of an actual argon cryoprobe is performed. The simulated values of the probe cooling capacity are compared with the experimental values, and the deviation is within 0.9%. The response surface method (RSM) was used to analyze the effects of fin height, fin thickness and fin pitch on q_c . The fins were designed with the maximum cooling capacity and the cold-end wall surface temperature as the optimal targets. The optimal fin parameters under double targets were obtained, which provided new ideas and methods for multi-objective optimization of cryoprobe.

Keywords cryoprobe; simulation; RSM; multi-objective optimization

0 前言

随着医疗技术的发展, 人们开始追求微创的手术方法, 因此微创低温冷冻治疗技术应运而生。该技术的主要工具为“氩氦刀”, 其低温探针基于微型 J-T 节流制冷器, 通过高压氩气节流获得冷量在探针端部节流产生局部低温, 同时利用回流的低压冷流体预冷高压氩气, 使得探针端部温度在短时间内达到 -120°C ^[1], 低温探针的直径通常只有 5mm, 不会对穿刺路径上正常的组织造成损伤, 是一种靶向摧毁肿瘤细胞的方法, 具有手术时间短、手术成功率高、手术并发症少、减小扩散等优点, 在肿瘤综合治疗方面疗效显著^[2]。

低温探针广泛应用于癌症治疗, 其技术在国外已经相当成熟, 但国内在这方面的研究尚处于起步阶段。浙江大学的王宏宇等^[3]设计高压氩气节流型低温探针进行实验研究, 研究了不同进气温度、压力对制冷量的影响。由于实验条件的限制, 实验所能研究的工况和数据有限, 在对低温探针的结构优化上也存在缺陷, 而数值模拟技术的发展, 很好地克服了这一缺点。本文利用有限差分法, 在考虑流道几何形状、变流体物性、径向到热损失及辐射漏热损失的基础上, 对高压氩气节流型低温探针的热力过程进行稳态数值模拟, 通过与实验值进行对比, 验证了模型的准确性。在此基础上, 引入双目标响应面优化法, 以制冷量和探针尖端壁面温度为响应值, 对低温探针进行了结构优化, 为低温探针技术的优化研究指明了方向。

1 稳态模拟

低温探针结构如图 1 所示, 主要由螺旋翅片管换热器、节流喷嘴、芯轴、外壳构成, 螺旋管材料为不

*基金项目: 国家自然科学基金项目 (No.51576150)

作者简介: 刘洁雨, (1994-), 女, 硕士研究生。

锈钢，翅片由铜带缠绕制成，外壳由蒙乃尔合金制成，其内部结构尺寸（mm）^[3]：螺旋管内径 0.4，外径 0.6；外管内径 4.6，外径 5；芯轴内径 2.4，外径 2.6；螺旋翅片管换热器长度 100，翅片间距、高度、厚度均为 0.2。高压氩气流入螺旋管，由于螺旋管的节流效应沿管程其温度和压力不断降低，流出螺旋管后经节流喷嘴等焓节流，温度迅速降低，降温后的流体通过外管与附近组织进行换热，自身蒸发吸热，然后从外管与芯轴之间，外掠螺旋翅片管对管内高压氩气进行预冷。

将低温探针划分成等距的单元体，利用控制体积法及有限差分法对每个节点建立连续性方程、动量守恒、质量守恒方程，通过 EES（Engineering Equation Solver）软件编写程序实现，迭代并求解出节点处流体温度、压力和速度。模拟环境温度为 290K，热流体进气温度与环境温度相同，在不同入口压力、流量下，模拟后的冷流体出口温度和制冷量与实验值及模拟值对比如表 1 所示，相对误差在 0.9% 以内，可以认为模型能够准确地模拟实验。

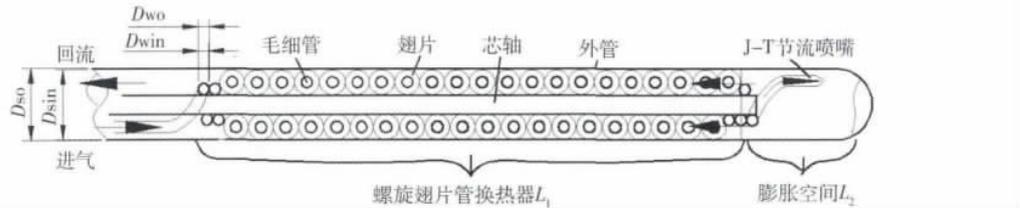


图 1 低温探针内部结构

表 1 模拟结果与文献实验数据对比

Case	$P_{h,in} / MPa$	$\dot{m} / g \cdot s^{-1}$	Q_c / W		
			实验值	模拟值	误差/%
1	19	0.761	21.2	21.15	0.24
2	18	0.691	16.3	16.43	0.80
3	17	0.644	14.9	14.91	0.07
4	16	0.564	12.6	12.67	0.56
5	15	0.512	10.8	10.89	0.83

2 基于响应面方法的双目标优化

2.1 拟合方程

响应面方法（Response surface method）是一种常用的设计实验和分析实验影响因素的方法，将响应面方法和多目标优化相结合，可以作为工程上寻找目标下最优结构参数的方法^[4]。本文以常用的响应面优化法 BBD（Box-Behnken Design）设计实验点，利用 Design-Expert 软件来实现，选取螺旋翅片管换热器中翅片高度、翅片厚度、翅片间距三个参数作为影响因素，将低温探针制冷量和冷端壁面温度作为目标。上一章节已经验证了 EES 程序稳态模拟的准确性，将模拟所得到的制冷量及冷端壁面温度值作为真实值。由于微型节流制冷器的尺寸限制，翅片高度选取范围 0.1-0.5mm，翅片厚度选取范围 0.05-0.2mm，翅片间距选取范围 0.2-0.5mm。

实验安排及结果如表 2 所示，基于 BBD 实验设计法安排试验点，中心点的重复次数为 4 次，总实验次数为 17 次。实验的运行工况为：工质为氩气，环境温度和热流体进气温度均为 290K，热流体进气压力为 18MPa，质量流量为 0.691g/s，回流冷流体的进气温度为 156.3K，进气压力 1.7MPa，只改变翅片高度、厚度及间距，模拟得到低温探针制冷量及冷端壁面温度，上一章节已经验证了 EES 程序稳态模拟的准确性，将模拟所得到的制冷量及冷端壁面温度值作为真实值。

对制冷量及冷端壁面温度分别进行方差分析，结果如表 3、4 所示，A、B、C 分别表示翅片高度、翅片厚度和翅片间距。从表中可以看出方程的失拟值分别为 0.29、0.055，说明方程模型的拟合度较高。模型的 P 值均小于 0.001，说明总体上模型因素水平值显著，因此该试验设计是可靠的，信噪比分别为 60.480、

27.705, 噪音对模型影响不显著。同时对于制冷量, A、B、C、AC、A² 为模型的显著因素, 对于冷端壁面温度, A、B、C、AB、AC、C² 为模型显著因素。

制冷量和冷端壁面温度的拟合方程分别为

$$q_c = 14.28 + 3.08 \times A + 0.88 \times B - 2.17 \times C - 0.044 \times A \times B + 0.32 \times A \times C + 0.10 \times B \times C - 1.23 \times A^2 - 0.11 \times B^2 + 0.23 \times C^2 \quad (1)$$

$$T = 13.00503 + 158.05 \times A + 0.17B - 0.42 \times C + 0.15 \times A \times B - 0.25 \times A \times C - 0.048 \times B \times C - 0.099 \times A^2 - 0.051 \times B^2 + 0.20 \times C^2 \quad (2)$$

表 2 实验设计及响应结果

次数	因变量			响应值	
	肋高/mm	肋厚/mm	肋间距/mm	制冷量/W	冷端壁面温度/K
1	0.1	0.25	0.35	10.62	157.45
2	0.3	0.25	0.2	17.5	158.84
3	0.3	0.05	0.2	15.89	158.45
4	0.3	0.05	0.5	11.09	157.65
5	0.1	0.05	0.35	8.825	157.35
6	0.5	0.25	0.35	16.98	158.75
7	0.5	0.15	0.2	17.95	159.45
8	0.5	0.15	0.5	14.49	158.15
9	0.5	0.05	0.35	15.36	158.05
10	0.1	0.15	0.2	12.7	157.65
11	0.3	0.15	0.35	12.16	157.75
12	0.1	0.15	0.5	7.975	157.35
13	0.3	0.25	0.5	13.12	157.85
14	0.3	0.15	0.35	14.28	158.05
15	0.3	0.15	0.35	14.28	158.05
16	0.3	0.15	0.35	14.28	158.05
17	0.3	0.15	0.35	14.28	158.05

表 3 制冷量的方差分析

方差来源	平方和	自由度	方差	F 值	概率 P	显著性
模型	126.66	9	14.07	291.48	<0.0001	显著
肋高(A)	76.01	1	76.01	1574.38	<0.0001	显著
肋厚(B)	6.22	1	6.22	128.86	<0.0001	显著
肋间距(C)	37.69	1	37.69	780.68	<0.0001	显著
AB	7.656E-3	1	7.656E-3	0.16	0.7043	
AC	0.40	1	0.40	8.29	0.0281	显著
BC	0.044	1	0.044	0.91	0.3761	
A2	6.03	1	6.03	124.83	<0.0001	显著
B2	0.045	1	0.045	0.94	0.3708	
C2	0.20	1	0.20	4.24	0.0851	
残差	0.29	6	0.048			
失拟	0.29	3	0.097			
纯误差	0.000	3	0.000			
总离差	126.95	15				

表 4 冷端壁面温度的方差分析

方差来源	平方和	自由度	方差	F 值	概率 P	显著性
模型	4.88	9	0.5	59.12	<0.0001	显著
肋高(A)	2.64	1	2.64	288.41	<0.0001	显著
肋厚(B)	0.24	1	0.24	26.33	0.0022	显著
肋间距(C)	1.44	1	1.44	156.64	<0.0001	显著
AB	0.090	1	0.090	9.81	0.0203	显著
AC	0.25	1	0.25	27.26	0.0020	显著
BC	9.025E-3	1	9.025E-3	0.98	0.3595	
A2	0.039	1	0.039	4.25	0.0848	显著
B2	0.011	1	0.011	1.15	0.3256	
C2	0.16	1	0.16	17.23	0.0060	显著
残差	0.055	6	9.171E-3			
失拟	0.055	3	0.018			
纯误差	0.000	3	0.000			
总离差	4.93	15				

将实际值与预测值比较，如图 2 所示，制冷量的实际值与预测值相比较，误差在 $\pm 4\%$ 以内，冷端壁面温度的实际值与预测值比较，误差在 $\pm 1\%$ 以内，说明拟合方程的准确性较高。如图 3 所示为翅片高度和翅片间距对制冷量及冷端壁面温度的影响，制冷量随翅片高度的增加而增加，增长趋势减缓，受翅片厚度的影响不大，随翅片间距的增加而减小，在固定翅片厚度的情况下，综合考虑翅片高度和翅片间距可以得到最大的制冷量；冷端壁面温度随翅片高度增加而增加，增长趋势基本上呈直线，受翅片厚度影响不大，随翅片间距的增加而减小，增长趋势放缓。

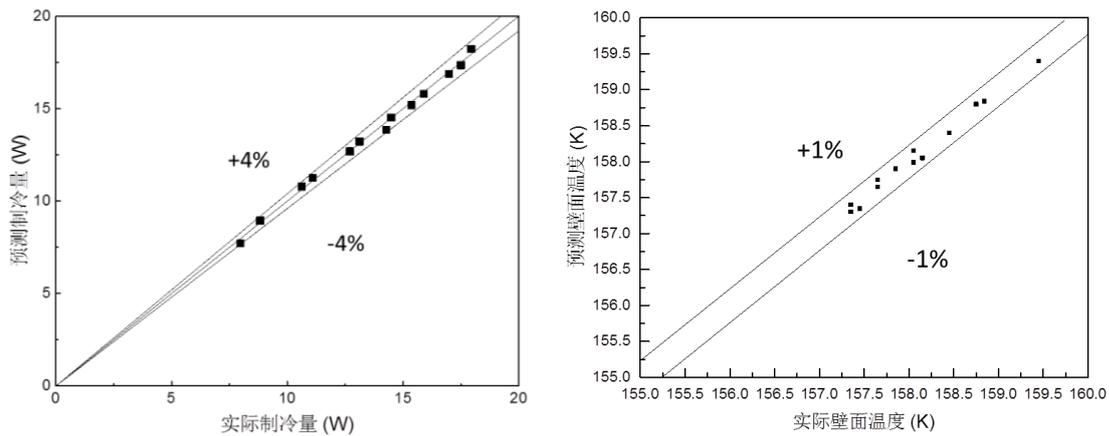


图 2 实际值与预测值比较

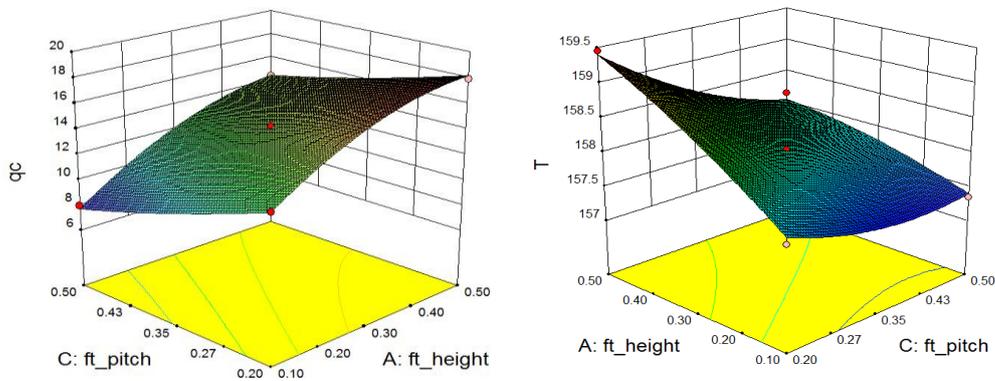


图 3 翅片高度和翅片间距对制冷量及冷端壁面温度的影响

2.2 双目标优化

为了得到尽可能大的制冷量和小的冷端壁面温度，结合响应面优化法，设置双目标优化参数表如表 5 所示。

表 5 双目标优化参数表

	目标	最小值	最大值	最小权重	最大权重	重要性
肋高(A)	-	0.1	0.5	1	1	3
肋厚(B)	-	0.05	0.25	1	1	3
肋间距(C)	-	0.2	0.5	1	1	3
制冷量/W	最大	7.975	17.95	1	1	3
壁面温度/K	最小	157.35	159.45	1	1	3

优化方法得出的最优结果为，翅片高度、翅片厚度、翅片间距分别为 0.5mm、0.05mm、0.2mm，得到的制冷量预测值为 17.38W，实际值为 17.28W，相对误差 0.5%，冷端壁面温度预测值 158.98K，实际值 158.25K，相对误差 0.5%。将优化后的结果与优化前目标相比较，如表 6 所示，优化后，制冷量增加了 8.04%，壁面温度降低了 0.57%，制冷量对翅片参数的变化更敏感。

表 6 优化前后参数比较

性能参数	优化前	优化后	增量/%
制冷量/W	15.89	17.28	+8.04
壁面温度/K	159.15	158.25	-0.57

3 结论

本文利用 EES 软件对低温探针进行稳态模拟，模拟值与实验值的相对误差在 0.9% 以内，说明稳态模拟具有很高的准确性。在此基础上，针对低温探针螺旋翅片换热器的翅片参数，采用了响应面分析及多目标优化方法，研究了一定范围内翅片参数对低温探针制冷量和冷端壁面温度的影响。

翅片高度及翅片间距对制冷量和壁面温度的影响较大且效果相反，翅片厚度对制冷量和壁面温度的影响很小。低温探针需要尽量大的制冷量和尽量低的探针壁面温度，以此为双目标对翅片参数进行优化，优化后的探针制冷量和壁面温度均较优化前有所提升，为低温探针的优化提供了新的思路和方法。

参考文献

- [1] Zhang J R. Endocare Targeted Cryoablation Therapy[J]. Journal of Biomedical Engineering Research, 2005,24(2): 128-133.
- [2] Wang H, Littrup P J, Duan Y, et al. Thoracic masses treated with percutaneous cryotherapy: initial experience with more than 200 procedures[J]. Radiology, 2005, 235(1):289-298.
- [3] 王宏宇, 张绍志, 陈光明,等. 高压氩气节流型低温探针的实验研究[J]. 低温工程, 2014(1):22-26.
- [4] Yang P, Chen H, Liu Y W. Application of response surface methodology and desirability approach to investigate and optimize the jet pump in a thermoacoustic Stirling heat engine[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 127:1005-1014.