

基于多目标的制冷机低温泵抽气性能分析与研究

胡振宇^{1,2} 杨庆喜^{2*} 林可馨^{1,2} 徐皓² 陈肇玺²

(1. 中国科学技术大学 合肥 230026; 2. 中国科学院合肥物质科学研究院等离子体物理研究所 合肥 230031)

Analysis and Research on Pumping Performance of Refrigerator-cooled Cryopumps Based on Multi-objectives

HU Zhenyu^{1,2}, YANG Qingxi^{2*}, LIN Kexin^{1,2}, XU Hao², CHEN Zhaoxi²

(1. University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China; 2. Institute of Plasma Physics, Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract Refrigerator-cooled cryopumps have been widely applied in fields such as nuclear fusion, space environment simulation, and high-energy physics research owing to their advantages, including oil-free cleanliness and high pumping speed. To meet the demand for improving the pumping performance of cryopumps, a multi-factor and multi-objective optimization method based on orthogonal experiments and the entropy weight method is proposed. This method is employed to investigate the influence laws of parameters such as baffle angle (φ), baffle overlap ratio (η), number of cold plate layers (n), and cold plate radius (r) on the performance indicators of refrigerator cooled cryopumps, and to conduct a multi-objective comprehensive evaluation of cryopump performance. The results show that different parameters exert varying degrees of influence on each performance indicator. Furthermore, the weights of the above parameters relative to the pumping performance indicators are determined via the entropy weight method: secondary radiation heat has the largest weight, followed by primary radiation heat, the maximum temperature of the cold plate array, and transmission probability. On the basis of these weights, the structure of the cryopump is optimized using the comprehensive evaluation and analysis method of orthogonal experiment, and the optimal parameter combination scheme for the cryopump is obtained: baffle angle of 50° , baffle overlap ratio of 0.9, cold plate layers of 9, and cold plate radius of 90 mm. The aforementioned multi-objective optimization method and comprehensive evaluation idea provide a useful reference for the pumping performance analysis and structural optimization of refrigerator-cooled cryopumps.

Keywords Refrigerator-cooled cryopump, Pumping performance, Multi-objective optimization

摘要 制冷机低温泵凭借清洁无油、高抽速等优势,在核聚变、空间环境模拟、高能物理研究等领域得到广泛应用。针对低温泵抽气性能提升需求,提出一种基于正交试验与熵权法的多目标优化方法,用于探究障板角度(φ)、障板重叠率(η)、冷板层数(n)、冷板半径(r)等参数对制冷机低温泵性能指标的影响规律,并对低温泵的性能开展多目标综合评价,结果表明不同参数对各性能指标的影响程度存在差异,并进一步通过熵权法确定了以上参数对抽气性能指标的权重:二级辐射热权重最大,其次为一级辐射热、冷板阵列最高温、传输概率。依据上述权重,通过正交试验综合评价分析方法,对低温泵结构进行了优化,获得了低温泵最优参数组合设计方案:障板角度 50° 、障板重叠率 0.9、冷板层数 9 层、冷板半径 90 mm。上述多目标优化方法与综合评价思路,为制冷机低温泵的抽气性能分析和结构优化提供了有益的参考。

关键词 制冷机低温泵 抽气性能 多目标优化

中图分类号: TH36

文献标识码: A

doi: 10.13922/j.cnki.cjvst.202604015

制冷机低温泵利用低温冷凝、低温吸附和低温捕集过程进行抽气,是获得超高真空的重要设备。凭借清洁无油、较高抽速、运行稳定等优势,制冷机低温泵被广泛应用于核聚变、空间环境模拟、高能物理研究、真空镀膜等领域^[1]。制冷机低温泵通常需综合传输性能和传热性能来开展低温泵抽气性能分析。传输性能主要与障板的结构尺寸相关,而传热性能与低温板热负荷和表面温度分布有关,其主要影响低温板黏附系数。

针对制冷机低温泵抽气性能,目前国内外研究人员运用不同方法、针对不同参数开展了相关研究。例如 Gilankar S G 等^[2]研究了低温板的直径、高度等几何参数对捕获系数的影响,结果表明低温板直径存在最优值,增加低温板的高度会降低气体捕获系数。江耀^[3]通过中心组合设计方法,改变障板夹角、间隔、高度分析比较气体传输概率,结果显示夹角和间隔对传输概率的影响远大于高度。但这些研究只考虑了结构参数对传输性能的影响,缺乏对传热性能的分析。姚吉恺等^[4]针对不同冷板层数与直径开展抽气性能对比研究,以抽速、降温时间、工作寿命为指标确定了最佳冷板阵列结构参数。郎嘉琪^[5]分析了结构参数对传输概率和辐射热负荷的影响,指出冷却结构之间的区域纵横比是主要影响因素。Zhang C 等^[6]分析不同障板型式下低温泵的总辐射热负荷,并考虑间距对传输概率的影响,最终选择 15 mm 间距的人字形障板。但这些研究缺乏对多指标的客观评价,未能综合考虑结构参数对抽气性能的影响。而熵权法作为一种定量赋权方法,可通过评估各指标对某关键性能或参数影响,客观地计算指标权重,并考虑了不同指标间的相关性^[7]。此外,正交试验法作为一种研究多因素、多水平的设计方法,能够通过少量试验确定性能指标的重要程度并预测最优组合^[8]。

因此,本研究提出一种基于正交试验与熵权法的低温泵抽气性能优化方法。首先,根据制冷机低温泵的结构组成与工作参数,分析了其对低温泵抽气性能的影响。其次,选取障板角度(φ)、障板重叠率(η)、冷板层数(n)、冷板半径(r)作为试验因素,构建四因素四水平正交表,形成 16 组试验方案。通过极差分析,得到结构参数对不同性能指标的影响差异程度,利用熵权法计算不同性能指标的权重,得到综合评分并排序,通过正交试验综合评价分析

方法,对低温泵结构进行了优化,获得了低温泵障板角度、障板重叠度、冷板层数和冷板半径最优参数组合设计方案。本研究提供了一种多目标优化方法与设计思路,对于提升制冷机低温泵的抽气性能具有重要的参考价值。

1 几何模型描述

制冷机低温泵通常由壳体、冷屏、障板、低温板等组成,其典型结构如图 1 所示。参考《JB/T 11081—2011》标准^[9],以公称通径 1250 mm 的低温泵为研究对象。由于低温泵结构总体对称,采用了四分之一模型以降低计算复杂度。泵壳的材料为 316 L 不锈钢。冷屏、障板与低温板均为无氧铜。冷屏与一级冷头接触,接触温度为 80 K,冷板阵列与二级冷头接触,接触温度为 7 K。

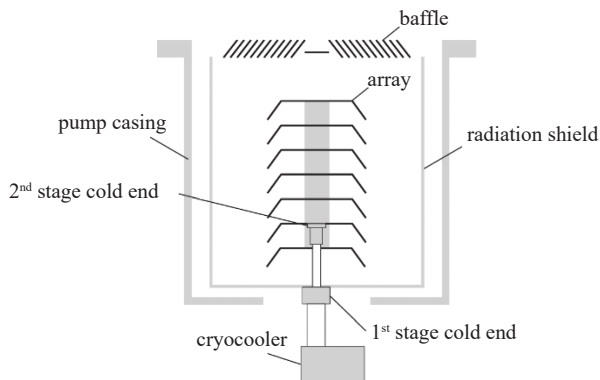


图1 制冷机低温泵典型结构

Fig. 1 Typical structure of refrigerator-cooled cryopump

本设计选用百叶窗型障板(如图 2 所示)。障板的主要作用是阻挡热辐射,降低冷板板所受热负荷。同时,障板的设计还需兼顾有良好的流导功能,以获得更好的气体传输功能。当挡板阵列的长度 L 一定时,挡板高度 h 越低,传输概率越大,但在 L/h 大于 10 后变化不大^[10]。为了体现不同角度下的障板间距,现定义障板重叠率 η 为障板间距 d 与障板在水平方向的投影长度 l 之比:

$$\eta = \frac{d}{l} \quad (1)$$

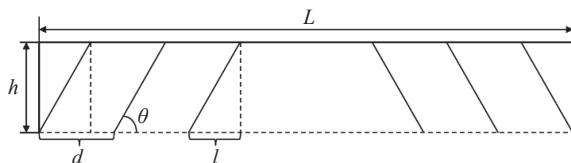


图2 障板结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of baffle structure

当障板重叠时, $\eta \leq 1$; 当障板未重叠时, $\eta > 1$ 。

冷板阵列由多块低温板堆叠而成(如图3所示), 每块低温板的外表面为抛光的冷凝面, 内表面为粘附有活性炭的吸附面。

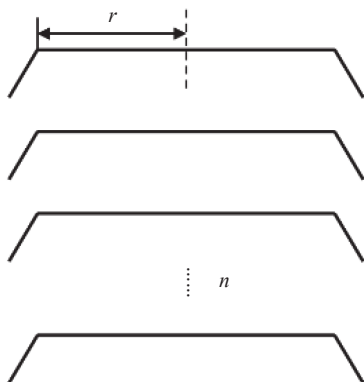


图3 冷板阵列示意图

Fig. 3 Schematic diagram of cold plate array

根据经验, 公称通径为 1250 mm 的制冷机低温泵需要配备 4 台制冷机, 每台制冷机的一级冷量应大于 35 W (50 K), 二级冷量应大于 1.5 W (4.2 K), 据此参考某厂商的 CH415 制冷机^[11], 其制冷量网状图如图4所示。

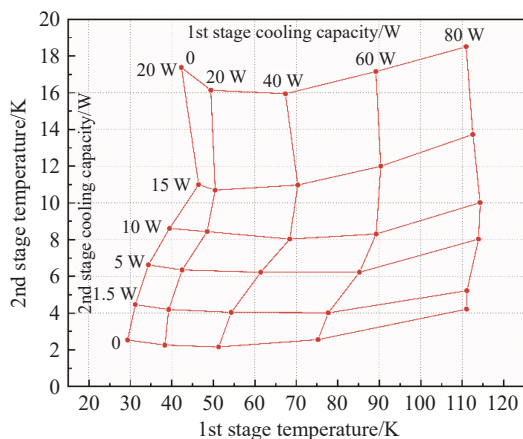


图4 CH415 制冷机冷量

Fig. 4 Cooling capacity of the CH415 refrigerator

本研究选用椰壳活性炭作为吸附剂, 其在不同温度下对不同气体的黏附系数见表1^[12]。

表1 不同温度下的气体黏附系数^[12]

Tab. 1 Gas sticking coefficients at different temperatures^[12]

T/K	He	H ₂	D ₂	T ₂
5	0.35	0.6	0.9	1.0
7	0.17	0.5	/	1.0
12	0.03	0.3	0.85	/

2 低温泵抽气性能影响因素分析

低温泵的真空设计旨在给定的冷量供应和空间限制内实现泵送速度的最大化。不考虑辐射挡板, 低温泵的理论抽速在数值等于气体沿流动方向的平均速率 v' 与气体可流入的泵口面积的乘积:

$$S_{id} \equiv A_{inlet} \cdot v' = A_{inlet} \cdot \sqrt{\frac{R_0 \cdot T}{2\pi \cdot M}} \quad (2)$$

式中, A_{inlet} 为入口横截面积, cm^2 ; T 为被抽气体的温度, K; M 为被抽气体的摩尔质量; R_0 为气体常数。考虑到辐射挡板的流导和捕获系数时, 有效抽速公式如下:

$$S \equiv c \cdot S_{id} = c \cdot A_{inlet} \cdot \sqrt{\frac{R_0 T}{2\pi \cdot M}} \quad (3)$$

由于制冷机低温泵的入口截面、挡板和低温板平行, 捕获系数 c 可用 Oatley 定律表示^[13]:

$$\frac{1}{c} = \frac{1}{W} + \frac{1}{\alpha} - 1 \quad (4)$$

式中, α 为黏附系数, 即黏附在低温表面的粒子数与撞击在低温表面的粒子数之比, 与低温板表面温度有关; W 为气体分子的传输几率。因此, 低温泵的泵送速度不仅与泵的入口面积有关, 也取决于泵的几何结构、部件表面温度、被泵送气体的种类和温度等因素。

3 低温泵传热与传输分析基本理论

制冷机低温泵通常在高真空环境下运行, 内部气体密度极低, 可以忽略气体对流与气体的导热, 因此制冷机低温泵的传热过程主要涉及热辐射与固体导热^[14]。一级冷阵的辐射热负荷为: 泵体内壁对冷屏外壁的辐射、来自真空室的直接辐射。对于来自泵体内壁的辐射热 Q_{s1} (单位: W), 可按下式计算:

$$Q_{s1} = \frac{A_{s1} \sigma (T_{b1}^4 - T_{s1}^4)}{\frac{1}{\varepsilon_{b1}} + \frac{1}{\varepsilon_{s1}} - 1} \quad (5)$$

式中, A_{s1} 为冷屏外壁面积, m^2 ; σ 为斯特藩-玻尔兹曼常数, 其值为 $5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$; T_{b1} 、 T_{s1} 为两换热面的温度, K; ε_{b1} 为泵体内壁发射率, 0.1; ε_{s1} 为冷屏外壁发射率, 0.25。

对于来自真空室的直接辐射热 Q_{s2} , 可按下式计算:

$$Q_{s2} = A_{s2} \varepsilon_{s2} \sigma (T_{b2}^4 - T_{s2}^4) + A'_{s2} \varepsilon'_{s1} \sigma (T_{b2}^4 - T_{s1}^4) \quad (6)$$

式中, A_{s2} 、 A'_{s2} 分别为障板外壁以及冷屏内壁的部分面积, m^2 ; T_{b2} 为真空室内壁温度; T_{s2} 为障板温度, K;

ε_{s2} 为障板外壁发射率, 0.25; ε'_{s1} 为冷屏内壁发射率, 0.9。

低温板冷凝面受到的辐射热 Q_c 可按下式计算:

$$Q_c = A_c \frac{\sigma(T_{s2}^4 - T_c^4)}{\frac{1}{\varepsilon_c} + \frac{1}{\varepsilon_{s3}} - 1} + A_c t_a \varepsilon_c \sigma(T_{b2}^4 - T_c^4) \quad (7)$$

式中, 第 1 项为障板和冷屏对冷凝面的辐射热; 第 2 项是真空室透过障板对冷凝面的辐射热; A_c 为冷凝面面积, m^2 ; T_c 为冷凝面温度, K ; ε_c 为冷凝面发射率, 0.25; ε_{s3} 为冷屏内壁发射率, 0.9; t_a 为辐射传输几率。

此外, 低温泵内部存在固体热传导, 其数值方程为^[15]:

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) \quad (8)$$

式中, ρ 为密度; h 为显熵; t 为时间; k 为热导率; T 为温度。

低温泵泵腔内气体处于分子流状态, 气体分子间的碰撞可忽略, 只需考虑气体分子与器壁的碰撞, 此时的数值模拟一般采用蒙特卡洛(MC)法。当气体分子与壁面碰撞时, 遵循克努森定律:

$$dp = \frac{dw}{\pi} \cos \theta \quad (9)$$

式中, dw 为立体角; θ 为气体分子与碰撞壁面法线的夹角。

气体分子运动速度的概率分布遵循 Maxwell-Boltzmann 分布^[16]:

$$f(v) = 4\pi \left(\frac{m}{2\pi kT} \right)^{3/2} v^2 \exp \left(-\frac{mv^2}{2kT} \right) \quad (10)$$

式中, $f(v)$ 表示分子速率在 v 到 $v+dv$ 区间内出现的概率密度; v 为分子速率; m 为单个气体分子的质量; k 为玻尔兹曼常数, 其值为 $1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$; T 为气体的绝对温度, K 。

传输概率的计算公式为:

$$W = 1 - \frac{A}{N} \quad (11)$$

式中, W 为传输概率; A 为进气面吸附的粒子数; N 为进气面产生的粒子数。

4 低温泵抽气性能多目标优化

以障板与低温板的结构参数为研究对象设计正交试验, 得到对不同性能指标的影响差异程度, 再通过熵权法计算不同性能指标的权重, 进而得到综合评分, 结合正交试验综合评价分析方法, 最终确定低温泵最优参数组合设计方案。

4.1 正交试验分析

4.1.1 正交试验设计

本研究选定了 4 个性能指标: 传输概率、冷板阵列最高温、一级辐射热、二级辐射热。理由如下: 气体分子的传输概率表征为气体分子与低温吸附面碰撞的可能性, 其在很大程度上决定了低温泵的抽气能力。冷板阵列最高温通过影响黏附系数, 对低温泵的抽速产生影响。辐射热负荷是低温泵热负荷的主要来源, 考虑到为制冷机低温泵提供冷量的制冷机功率有限, 结构设计时尽量降低热负荷, 使制冷机的冷量能更多地被用于抽除气体而非抵消外部热量。

本研究选取了 4 个主要结构参数: 障板角度 φ (因素 A)、障板重叠率 η (因素 B)、冷板层数 n (因素 C)、冷板半径 r (因素 D), 作为正交试验的考察因素, 并为每个因素设置 4 个水平, 对低温泵性能开展正交仿真实验。研究采用 $L_{16}(4^5)$ 正交表, 因素水平表见表 2。

表 2 因素水平表

Tab. 2 Parameters and levels

因素	$\varphi(A)$	$\eta(B)$	$n(C)$	$r(D)$
编号	A1	B1	C1	D1
	A2	B2	C2	D2
	A3	B3	C3	D3
	A4	B4	C4	D4
水平	45°	0.9	7	90 mm
	50°	1	8	100 mm
	55°	1.1	9	110 mm
	60°	1.2	10	120 mm

4.1.2 正交试验结果分析

表 3 为结构参数对低温泵的四项性能指标的极差分析结果。表中 k_i 为相应水平 i 的结果均值, R 为极差。通过对比 R , 可以发现四个主要结构参数对传输概率的影响程度依次为: $n > r > \eta > \varphi$ 。同样的, 对冷板阵列最高温的影响程度为: $r > \varphi > n > \eta$; 对一级辐射热的影响程度为: $\eta > n > \varphi > r$; 对二级辐射热的影响程度为: $r > n > \varphi > \eta$ 。值得注意的是, 对于传输概率, 低温板层数(因素 C)、低温板半径(因素 D)的极差值分别为 0.026 与 0.018; 而障板角度(因素 A)与障板重叠率(因素 B)的极差仅为 0.002 与 0.003。针对这种现象, 为排除蒙特卡洛算法的统计噪声干扰, 本研究在正交试验中单次测试

粒子数设定为 5×10^7 , 依二项分布估算的传输概率统计标准差在 10^{-5} 量级, 证明了极差数据的真实性。从分子动力学角度分析, 在因素 A 与因素 B 的参数范围内, 障板结构已接近光学密闭状态。此时, 粒子必须经过多次漫散射才能实现传输, 传输概率对这两个结构参数的敏感性较低。而低温板层数与半径决定了低温泵的有效捕获面积, 成为了影响传输概率的主导因素。

表3 极差分析

Tab. 3 Range analysis

指标	传输概率				冷板阵列最高温/K			
	A	B	C	D	A	B	C	D
k_1	0.169	0.168	0.155	0.159	9.085	9.095	9.072	8.836
k_2	0.169	0.169	0.167	0.167	9.074	9.142	9.187	9.043
k_3	0.168	0.169	0.174	0.173	9.210	9.196	9.133	9.245
k_4	0.170	0.171	0.181	0.177	9.223	9.158	9.199	9.467
R	0.002	0.003	0.026	0.018	0.149	0.101	0.127	0.631

指标	一级辐射热/W				二级辐射热/W			
	A	B	C	D	A	B	C	D
k_1	53.181	51.556	53.241	53.058	5.148	5.198	4.867	4.634
k_2	52.313	52.453	53.369	53.194	5.101	5.279	5.351	5.131
k_3	53.233	53.583	52.000	52.505	5.560	5.457	5.378	5.513
k_4	52.282	53.417	52.399	52.252	5.458	5.333	5.671	5.989
R	0.951	2.027	1.369	0.942	0.459	0.259	0.804	1.355

各结构参数的水平变化对性能指标的影响趋势如图5所示。对于正向指标, 指标值越大, 性能越好。反之, 对于负向指标, 指标值越小, 性能越好。在本研究中, 传输概率是正向指标, 其他均为负向指标。以冷板阵列最高温为例, 可以观察到其影响趋势为 $kA4 > kA3 > kA1 > kA2$, 这表明 A2 是因素 A 的最优值。同理, B1、C1 和 D1 分别是其余因素 B、C、D 的最优值。因此, 冷阵最高温的最优结构参数组合为 A2-B1-C1-D1。对应障板角度为 50° 、障板重叠度为 0.9、冷板层数为 7 层、冷板半径为 90 mm。传输概率、一级辐射热和二级辐射热对应的最优结构参数组合分别为 A4-B4-C4-D4、A4-B1-C3-D4 和 A2-B1-C1-D1。

将传输概率的最佳优化方案命名为方案 I。将冷阵最高温与二级辐射热的最佳优化方案并为一组进行考虑, 命名为方案 II。将一级辐射热的最佳优化方案命名为方案 III。图6给出了方案 I ~ III 的模拟结果, 展示了各优化方案对应的性能指标。

结果表明: 对于最优传输概率, 方案 I 的传输概率与正交试验中传输概率最高值相近, 但其余负向性能指标均最大, 二级辐射热更是比正交试验最大值还高出约 10%; 从方案 II 可以看出, 其冷阵最高温、二级辐射热最低, 但其传输概率最低、一级辐射热较高; 对于最优一级辐射热, 方案 III 的一级辐射热为 49.586 W, 但其冷阵最高温与二级辐射热均较高。根据上述分析可知, 针对不同性能指标, 所对应的最优优化方案各不相同, 其性能表现也存在差异。因此, 本研究采用熵权法进一步分析各性能指标的权重, 计算不同方案的综合评分并进行排序, 最终确定最优适用方案。

4.2 熵权法分析

4.2.1 熵权法基本理论

熵权法作为一种客观的因子权重计算方法, 依据熵值理论确定各影响因素指标的权重, 其有效利用了指标数据, 排除了主观因素的干扰^[17]。其计算流程如下:

(1) 建立初始矩阵 X

$$X = (x_{ij})_{m \times n} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (12)$$

式中, m 和 n 分别代表样本数量与评价指标。 x_{ij} 表示每个参数的值, $i=1, 2, \dots, m, j=1, 2, \dots, n$ 。

(2) 矩阵归一化 Z

$$Z = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} & \cdots & z_{1n} \\ z_{21} & z_{22} & \cdots & z_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ z_{m1} & z_{m2} & \cdots & z_{mn} \end{bmatrix} \quad (13)$$

其中, 矩阵 Z 是 X 的标准化矩阵。 z_{ij} 计算公式如下:

$$\begin{cases} z_{ij} = \frac{x_{ij} - (x_{ij})_{\min}}{(x_{ij})_{\max} - (x_{ij})_{\min}} & (\text{Positive}) \\ z_{ij} = \frac{(x_{ij})_{\max} - x_{ij}}{(x_{ij})_{\max} - (x_{ij})_{\min}} & (\text{Negative}) \end{cases} \quad (14)$$

(3) 计算熵值 e_j

$$P_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}} \quad (15)$$

$$e_j = -\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m (P_{ij} \ln P_{ij}) \quad (16)$$

其中, e_j 取 0 到 1 之间。

(4) 计算权重 w_j

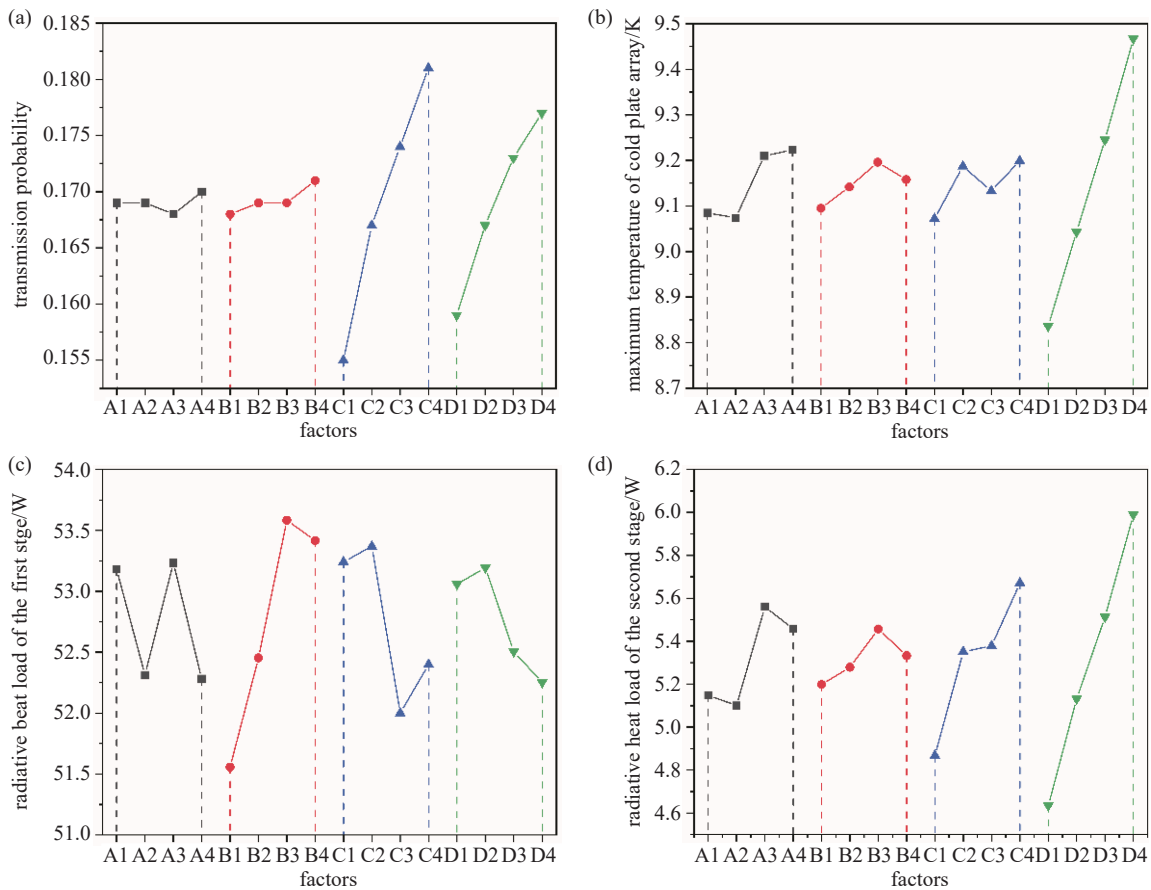


图5 结构参数对性能指标的影响曲线。(a)传输概率,(b)冷板阵列最高温,(c)一级辐射热,(d)二级辐射热

Fig. 5 Effect curves of structural parameters on performance indicators. (a) Transmission probability, (b) maximum temperature of cold plate array, (c) radiative heat load of the first stage, (d) radiative heat load of the second stage

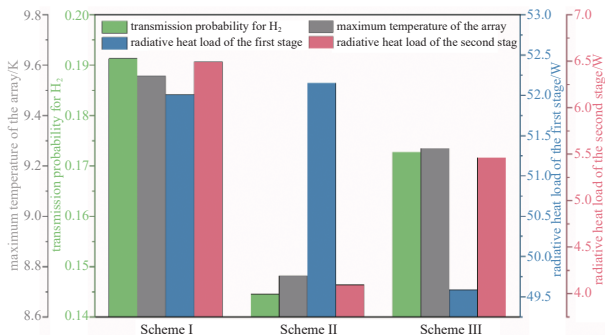


图6 不同最优方案的性能指标

Fig. 6 Performance indicators of different optimal schemes

$$w_j = \frac{1 - e_j}{\sum_{i=1}^m (1 - e_i)} \quad (17)$$

(5) 计算综合得分 S_j

$$S_i = \sum_{j=1}^n w_j z_{ij} \quad (18)$$

4.2.2 熵权法分析

根据熵权法计算得到各性能指标的权重占比,

如图 7 所示。可以看出,在所研究的 4 项性能指标中,二级辐射热权重最大,为 31.58%;其次为一级辐射热、冷阵最高温、传输概率,分别占 26.86%、23.14%、18.42%。虽然计算得到的一级辐射热权重较高,但在实际工程应用中,需结合 GM 制冷机的制冷能力进行综合评估。在本设计中,一级辐射热通过影响障板温度从而影响凝湿性气体的抽速,但一级冷量有较大余量,障板的温度波动被抑制,致使一级辐射热对抽速的影响受限。相比之下,二级制冷量仅为几瓦至十几瓦,对二级辐射热比较敏感。因此,应在一级热负荷不突破制冷机冷量限制的前提下,通过调整结构参数来优化低温泵的传热性能和传输性能。

根据相应权重计算 16 组正交试验方案的综合得分并排序,结果如表 4 所示。结果表明:16 组方案中,方案 1 综合得分最高,为 0.711;方案 15 综合得分最低,为 0.261。

同样地,对综合评分进行了极差分析,结果如

表 5 所示。由极差 R 可知, 结构参数对综合得分的影响程度排序为 $r > \eta > \varphi > n$ 。此外, 图 8 给出了所考虑因素对综合得分的影响曲线。最优综合得分对应的组合为 A2-B1-C3-D1, 即最优结构参数组合为障板角度 50° 、障板重叠度 0.9、冷阵层数 9 层、冷板半径 90 mm。结合仿真结果可知, 该方案的传输概率为 0.164, 冷阵最高温为 8.834 K, 一级辐射热为 52.805 W, 二级辐射热为 4.732 W。

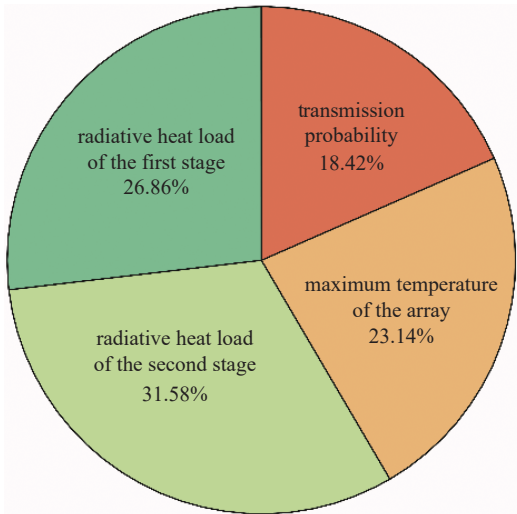


图7 不同性能指标的权重

Fig. 7 Weights of different performance indicators

表 4 十六组方案的综合评分与排序

Tab. 4 Comprehensive scores and rankings of 16 schemes

方案	综合评分	排名	方案	综合评分	排名
1	0.711	1	9	0.466	8
2	0.461	9	10	0.444	11
3	0.460	10	11	0.349	15
4	0.390	14	12	0.400	13
5	0.606	5	13	0.615	4
6	0.483	7	14	0.701	2
7	0.582	6	15	0.261	16
8	0.616	3	16	0.408	12

表 5 综合评分的极差分析

Tab. 5 Range analysis of comprehensive scores

	综合评分			
	A	B	C	D
k_1	0.505	0.599	0.488	0.599
k_2	0.572	0.522	0.432	0.510
k_3	0.415	0.413	0.561	0.479
k_4	0.496	0.454	0.508	0.400
R	0.157	0.186	0.129	0.199

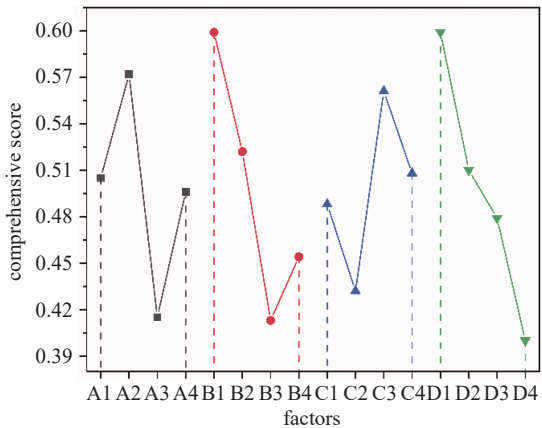


图8 影响因素对综合得分的影响

Fig. 8 Effects of influencing factors on comprehensive score

5 总结

本研究提出了一种基于正交试验与熵权法的低温泵性能多目标优化与评价方法, 并分析了障板角度(φ)、障板重叠率(η)、冷板层数(n)、冷板半径(r)对低温泵抽气性能的影响及最优组合。主要结论如下:

(1)不同结构参数对低温泵各项性能指标的影响程度各异。对传输概率的影响程度依次为: $n > r > \eta > \varphi$ 。对冷板阵列最高温的影响程度为: $r > \varphi > n > \eta$; 对一级辐射热的影响程度为: $\eta > n > \varphi > r$; 对二级辐射热的影响程度为: $r > n > \varphi > \eta$ 。

(2)基于熵权法确定各指标的权重, 以此评估低温泵的抽气性能。二级辐射热、一级辐射热、冷板阵列最高温、传输概率分别占 31.58%、26.86%、23.14%、18.42%, 并对 16 组方案进行评分与排序。综合得分最高与最低的分别为方案 1(0.711)和方案 15(0.261)。

(3)结构参数对低温泵抽气性能的影响程度排序为: $r > \eta > \varphi > n$ 。障板角度、障板重叠度、冷板层数、冷板半径的最优组合为: A2=50°, B1=0.9, C3=9, D1=90 mm, 其传输概率为 0.164, 冷板阵列最高温为 8.834 K, 一级辐射热为 52.805 W, 二级辐射热为 4.732 W。

本文提出的多目标优化与评价方法有效弥补了单指标优化的不足, 通过对多指标的客观评价, 综合考虑了结构参数对抽气性能的影响。获得的最优结构参数可指导大口径制冷机低温泵工程设计, 对核聚变、空间环境模拟等领域设备研发具有重要参考与应用价值。

参 考 文 献

- [1] Zhao Y S, Sun L C, Shao R P, et al. Design and performance test of DN1250 LN₂ refrigerator cooled cryopump[J]. *Vacuum*, 2019, 56(1): 1–5 (赵月帅, 孙立臣, 邵容平, 等. DN1250 液氮屏蔽型制冷机低温泵的研制与性能测试 [J]. *真空*, 2019, 56(1): 1–5 (in Chinese))
- [2] Gilankar S G, Kush P K. Experimental verification of capture coefficients for a cylindrical cryopanel of closed cycle refrigerator cryopump[J]. *Journal of Physics Conference*, 2008, 114: 012058
- [3] Jiang Y. Development and performance of experimental cryopump with a 4 K G-M cryocooler[D]. University of Science and Technology of China, 2024 (江耀. 基于 4 K 制冷机的实验用低温泵设计与性能测试 [D]. 中国科学技术大学, 2024 (in Chinese))
- [4] Yao J K, Wang G D, Li H L, et al. Simulation analysis and structural optimization of cold panel array in cryocooler-based cryopump[J]. *Journal of Vacuum Science and Technology*, 2025, 45(7): 523–528 (姚吉恺, 王国栋, 李恒霖, 等. 制冷机低温泵冷板阵列仿真分析及结构优化 [J]. *真空科学与技术学报*, 2025, 45(7): 523–528 (in Chinese))
- [5] Lang J Q. Structure design and performance test of the module of cryosorption pump[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2022 (郎嘉琪. 大气载下低温吸附泵单元抽气模组的结构设计与性能测试 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2022 (in Chinese))
- [6] Zhang C, Chen Z, Yang Q, et al. Design and development of the EAST plug-in cryopump for long-pulse high-performance operation[J]. *Vacuum*, 2024, 220: 112845
- [7] Yin Y, Song C, Jing Y, et al. EWMS: A software tool for interactively using entropy weight coefficient method for aggregating sustainability indicators[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2025, 191: 106500
- [8] Xiao L, Bian M, Sun Y, et al. Transport properties evaluation of pore-scale GDLs for PEMFC using orthogonal design method[J]. *Applied Energy*, 2024, 357: 122445
- [9] SAC/TC18. Vacuum technology cryocooler-based cryopump: JB/T 11081-2011[S] (全国真空技术标准化技术委员会. 真空技术 制冷机低温泵: JB/T 11081-2011[S] (in Chinese))
- [10] Benvenuti C, Passardi G, Blechschmidt D. Molecular and radiation transmissivities of chevron type baffles for cryopumping[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology*, 1981, 19(1): 100–103
- [11] Zhejiang Bwokai Technologies Co., Ltd. Cryocooler [EB/OL]. [2026-05-26]. <https://en.bwokai.com/index.php/diwenzhilengji/>
- [12] Day C, Antipenkov A, Dremel M, et al. R&D and design for the cryogenic and mechanical vacuum pumping systems of ITER[J]. *Vacuum*, 2007, 81(6): 738–747
- [13] Haefer R A. Cryopumping. Theory and practice [M]. Oxford: Clarendon Press, 1989
- [14] Ren J S, Qian J. Study on photoshielding of refrigerator cryopump[J]. *Vacuum*, 1989(3): 34–39 (任家生, 钱进. 制冷机低温泵中光屏蔽问题的探讨 [J]. *真空*, 1989(3): 34–39 (in Chinese))
- [15] Baechler W G. Cryopumps for research and industry[J]. *Vacuum*, 1987, 37(1-2): 21–29
- [16] Gao X Y. Modern cryogenic pump[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1990: 56 (高香院. 现代低温泵 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1990: 56 (in Chinese))
- [17] Wang Y, Li Y, Li H, et al. Study on the correlation between soil resistivity and multiple influencing factors using the entropy weight method and genetic algorithm[J]. *Electric Power Systems Research*, 2025, 246: 111692