风力搅拌致热器结构正交试验优化设计

黄 兴，赵伟召，王绍龙，严红燕，徐立扬
（华北理工大学 冶金与能源学院，河北 唐山 063210）

摘 要：高效的直驱式致热器是提升风力直驱致热系统性能的关键。文章针对典型的直叶圆盘涡轮式搅拌致热器的最佳结构参数展开研究，通过单因素试验和正交试验定量分析了影响搅拌致热器的输入扭矩及功率的因素及其大小，建立了搅拌致热器的输入功率与各因素间的多元线性回归模型。研究结果表明：增加桨叶数、液面高度、转速均可以提升搅拌致热器性能，提升搅拌桨高度会降低搅拌致热器性能，在一定范围内增加挡板数可以提升致热器性能，当桨叶数达到一定数值后其性能不再提升。各因素对搅拌致热器性能影响程度依次为：转速>搅拌桨高度>挡板数>液面高度>桨叶数，其中，搅拌桨高度和转速对致热器性能影响特别显著，挡板数和液面高度对于搅拌致热器性能有显著影响，而桨叶数在合适范围内有一定的影响。针对不同工况下的搅拌致热器的最佳结构参数，应用多元线性回归理论建立与之相适应的回归方程，可以预测搅拌致热系统的性能。

关键词：搅拌致热；风能开发利用；因素分析；正交试验
中图分类号：TK89 **文献标志码**：A **文章编号**：1671-5292(2025)11-1494-08

0 引言

作为重要的可再生能源，风能在实现“双碳”目标过程中扮演着重要角色。风力发电并网是主流的风能利用形式[1]。风机大型化、集群化的发展模式能有效提高风力发电效率和并网经济性，是当前风力发电机组的主流发展趋势[2,3]。由于分布式风能利用受风力资源、发电效率、并网成本等因素限制[4,5]，现有风力发电机组难以广泛推广，探寻新的分布式风能利用方式具有重要意义。风力直驱致热是一种典型的风能利用形式，通过风力机捕获风能将其转化为工质的热能，从而为其他设施供暖、供热。风力直驱致热无并网需求，在风机切入风速和切出风速区间内均可工作，可有效提高风能利用率，贴合分布式风能利用场景，是未来分布式风能利用的主要方向。

在风力直驱致热系统中，致热器性能直接影响系统的能效和建设运维成本。当前典型的风力致热器有固体摩擦致热、电涡流致热、直驱热泵致热及搅拌致热[6-8]。其中搅拌致热因其结构简单、易与风力机匹配且对不同风速适应性强等特点而受到广泛关注[9]。研究人员通过数值模拟和试验方法对搅拌致热装置进行了研究。Gu D[10]通过实验和数值模拟，研究了桨叶形状对搅拌器功率的影响。李永光[11]通过实验研究了致热器启动时所需扭矩与角加速度、转速、叶片半径等因素之间的关系。郭宇[12]研究了不同致热工质对搅拌致热器致热效果的影响。Liu X[13]通过对一系列相关指标的分析，研究了转子的层数和位置、工质的液位和物理特性对致热效果的影响。黄兴[14]通过数值模拟获得了挡板数量对搅拌致热器性能的影响规律。上述成果对搅拌致热器研究提供了诸多帮助，但尚未对多因素耦合影响展开研究。

本文通过单因素试验和正交试验定量地分析了影响搅拌致热器的输入扭矩及功率的因素及其大小，建立了搅拌致热器的输入功率与各因素间的多元线性回归模型，据此来研究桨叶数、挡板数、液面高度、搅拌桨高度和转速对直驱搅拌致热器性能的影响规律，为直驱搅拌致热器设计与优化奠定基础。

1 风力机直驱搅拌致热系统工作原理及试验系统

1.1 风力机直驱搅拌致热系统工作原理

典型风力机直驱搅拌致热系统工作原理如图 1 所示。该系统通常选用垂直轴风力机，其工作过程如下：首先，风力机叶轮将捕获的风能转化为转

收稿日期：2024-11-13。
基金项目：中央引导地方科技发展资金项目(246Z4309G)；国家自然科学基金项目(52374336)；冶金与能源学院青年教师发展基金(RN20244136)。
通信作者：王绍龙(1989-)，男，博士，讲师，研究方向为流体流动与传热数值模拟与新能源设备开发。E-mail：wangsl@ncst.edu.cn

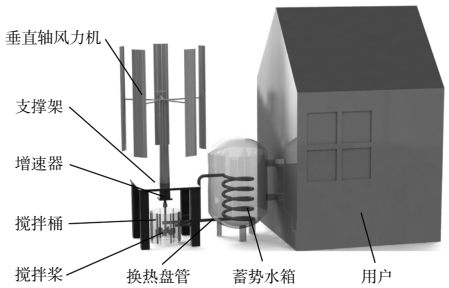


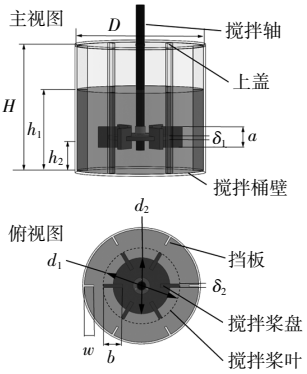
图 1　风力机搅拌致热系统工作原理

Fig.1 Working principle of the wind turbine stirring thermal system

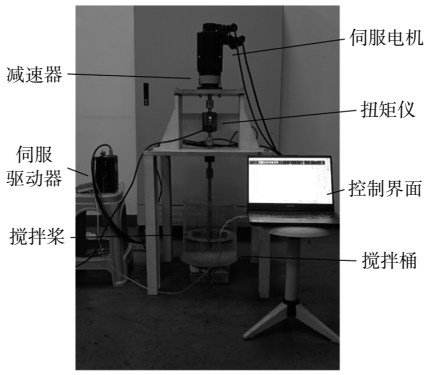
轴的机械能;然后,转轴带动搅拌桨在搅拌桶内转动，搅拌桶内的载热介质在转子的带动下与搅拌桨、搅拌桶及自身相互撞击,并通过扩散涡使搅拌桶内的载热介质充分运动产生相互摩擦，进而使载热介质升温;最后,升温后的载热介质经由换热盘管将蓄热水箱中的水加热，从而为用户提供热源[15]。由于风力机叶轮最优转速区间与搅拌桨最优转速区间难以匹配，通常在风力机叶轮转轴与搅拌桨转轴之间增加增速器用以提供增速功能[16]。目前,主要针对搅拌致热器的本体进行了试验研究,并通过数据分析以求得最佳运行参数,而后期可通过调整风力机的转速、功率输出等运行参数与之适配。其次,可通过优化传动系统,即调整增速器的传动比实现转速和扭矩的适配，满足搅拌致热系统的要求。

1.2　搅拌致热器试验系统

搅拌致热器的性能直接关系到搅拌致热系统的效能。通常搅拌致热器由搅拌桶、搅拌桨及液体载热介质组成。图 2(a)为一种典型的直叶圆盘涡轮式搅拌桨，其结构核心是搅拌轴与圆形搅拌盘桨同轴紧固,盘周均布若干个直搅拌桨叶。直搅拌的特征参数包括:直径 d_1、盘径 d_2、厚度 δ_1、桨叶数



(a)搅拌器结构图



(b)试验平台

图 2　搅拌致热器结构及试验平台

Fig.2 Stirring heater structure and test platform

n_1、桨叶高度 a、桨叶宽度 b、桨叶厚度 δ_2。搅拌桶通常为圆形，在搅拌桶四周布置挡板以抑制流体打旋,其典型的特征参数包括:高度 H、内径 D、挡板数 n_2 和挡板宽度 w。将搅拌桶与搅拌桨组合在一起向搅拌桶内注入致热工质并加装上盖后即完成搅拌致热器装配。现有的研究中,通常注入的致热工质充满搅拌桶,但在实际使用过程中,致热工质须通过外接管道流动将热量导出，这就导致致热工质难以完全充满搅拌桶，形成新的特征参数(致热工质高度 h_1、搅拌桨高度 h_2、转速 ω)。可见,搅拌致热器虽结构简单，但影响其性能的特征参数较多,且不同的特征参数还会产生相互影响。因此，明确各参数对搅拌致热器的影响规律及相互作用关系,对性能优化至关重要。

为探究搅拌致热器试验系统性能，搭建了如图 2(b)所示的试验平台。选用伺服电机(型号:PS140)代替风力机作为能量输入设备,实现不同转速下的风能输入。为伺服电机配装 1:5 减速机(型号:PS142-190)实现降速增矩。在搅拌轴与减速机之间增加动态扭矩仪 (型号:DYN-200),用以测试搅拌轴的转矩并通过电脑实时读取转矩。对搅拌致热器性能评价的最直接方法是测试致热工质的温升情况，致热工质升温热量如式 (1)所示。而在实际测试中搅拌桶向外散失热量无法避免,这导致 T_1 难以被精准测定,因此影响了最终的评价效果。本研究中通过评价搅拌桨的转矩来表征搅拌致热器的工作效率，可以认为搅拌桨的输入功率即为风力机向致热器的输入功。

$$Q_W=cm(T_1-T_0) \quad (1)$$

式中:Q_W 为加热作业的热量,J;c 为致热工质比热容,J/(kg·℃);T_1 为致热试验台工作一段时间后的温度,℃;T_0 为致热试验台初始温度,℃。

$$P_j=\frac{\omega\pi T}{30} \quad (2)$$

式中:P_j 为输入功率,W;T 为扭矩,N·m。

2 结构参数对致热性能试验的单因素影响

在研究结构参数对搅拌致热器性能的影响时,首先确定部分固定参数。本试验系统选用的搅拌桶特征参数:D=300 mm,H=300 mm,w=25 mm。选用的搅拌特征参数:d_1=200 mm,d_2=150 mm,δ_1=10 mm,a=50 mm,b=50 mm,δ_2=20 mm。水作为致热工质时,结构参数为 n_1,n_2,h_1,h_2 和 ω。

2.1 桨叶数对致热性能的影响

为了探究桨叶数 n_1 对搅拌致热器性能的影响,确定 n_2=6 个,h_1=250 mm,h_2=100 mm,ω=200 r/min,n_1 选取 2,4,6,8,10 片。图 3 为不同 n_1 对应的扭矩和功率变化。

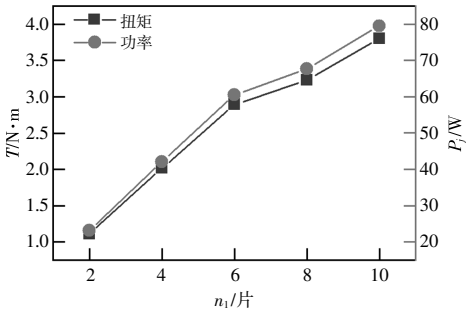


图 3 不同桨叶数 n_1 对应的扭矩和功率

Fig.3 Torque and power corresponding to different number of paddles n_1

由图 3 可知,随着 n_1 的增加,T 逐步递增,P_j 也在增加,当 n_1 从 2 片增加到 10 片,对应的 T 从 1.11 N·m 增长到 3.8 N·m,P_j 从 23.18 W 增长到 79.53 W,P_j 增长率依次为 81.41%,43.83%,11.90% 和 17.51%。综上,增加桨叶数可以增强搅拌致热器致热效果。

2.2 挡板数对致热性能的影响

为探究 n_2 对搅拌致热器性能的影响,确定 n_1=6 片,h_1=250 mm,h_2=100 mm,ω=200 r/min,n_2 选取 2,4,6,8,10 个。图 4 为不同 n_2 对应的扭矩和功率变化。

由图 4 可知:随着 n_2 由 2 个增加到 8 个,T和 P_j 均逐步增加;当 n_2 为 8 个时,T 和 P_j 达到最

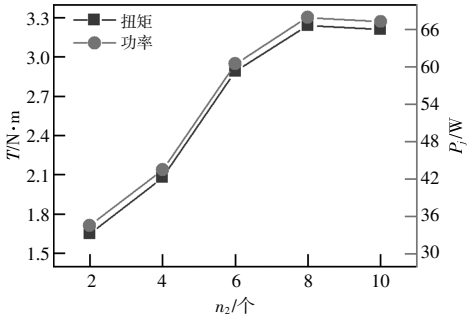


图 4 不同挡板数 n_2 对应的扭矩和功率

Fig.4 Torque and power corresponding to different number of baffles n_2

大值;而当 n_2 增至 10 个时,搅拌致热器的 T 和 P_j 便不再增大。当 n_2 从 2 个增至 8 个时,T 从1.65 N·m 增长到 3.21 N·m,P_j 从34.58 W 增长到 67.25 W,P_j 增长率依次为 25.74%,39.10%,12.33%。综上,当挡板数在一定范围内时,增加挡板数可增强致热效果,而超过该范围后将不再提升。

2.3 液面高度对致热性能的影响

为探究 h_1 对搅拌致热器致热性能的影响,确定 n_1=6 片,n_2=6 个,h_2=100 mm,ω=200 r/min,h_1 选取 100,150,200,250,300 mm。图 5 为不同 h_1 对应的扭矩和功率变化。

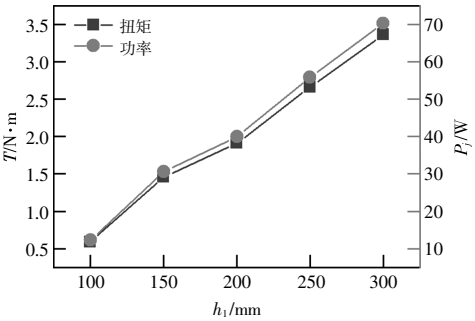


图 5 不同液面高度 h_1 对应的扭矩和功率

Fig.5 Torque and power corresponding to different liquid level heights h_1

由图 5 可知,随着 h_1 的增加,T 和 P_j 均逐步递增。当 h_1 从 100 mm 增加到 300 mm 时,扭矩 T 从 0.59N·m 增长到 3.36 N·m,P_j 从 12.28 W增长到 70.29 W,P_j 增长率依次为149.67%,30.17%,39.76% 和 26.01%。综上,增加液面高度可以增强搅拌致热器致热效果。

2.4 搅拌桨高度对致热性能的影响

为探究 h_2 对搅拌致热器致热性能的影响,确定 n_1=6 片,n_2=6 个,h_1=250 mm,ω=200 r/min,h_2 选取 50,100,150,200,250 mm。图 6 为不同h_2 对应的扭矩和功率变化。

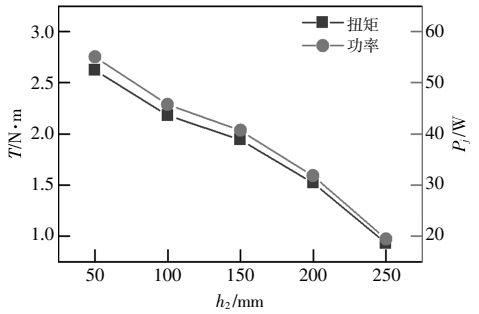


图 6　不同搅拌桨高度对应的扭矩和功率

Fig.6 Torque and power for different paddle heights h_2

由图 6 可知，随着 h_2 的增加，T 和 P_j 均逐步递减。当 h_2 从 50 mm 增加到 250 mm 时，T 从2.62 N·m 减少到 0.93 N·m，P_j 从 54.97 W 减少到19.44 W，P_j 增长率依次为 −16.79%，−32.87%，−21.65%和−38.82%。综上，增加搅拌桨高度会减弱搅拌致热器致热效果。

2.5　转速对致热性能的影响

为探究 ω 对搅拌致热器致热性能的影响，确定 n_1=6 片，n_2=6 个，h_1=250 mm，h_2=100 mm，ω 选取 100，200，300，400，500 r/min。图 7 为不同转速 ω 对应的扭矩和功率变化。

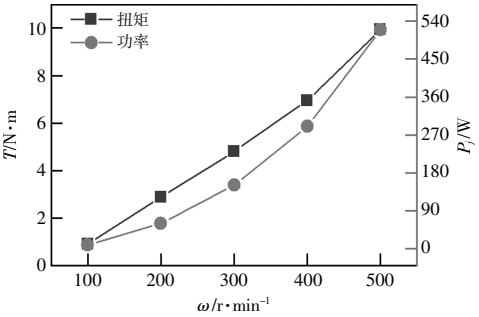


图 7　不同转速 ω 对应的扭矩和功率

Fig.7 Torque and power corresponding to different speeds ω

由图 7 可知，随着 ω 的增加，T 和 P_j 均逐渐递增。当 ω 从 100 r/min 增加到 500 r/min 时，T 从 0.9 N·m 增长到 9.93 N·m，P_j 从 9.41 W 增长到 519.66 W，P_j 增长率依次为 542.72%，149.79%，92.58%和 78.62%。综上，增加转速可以增强搅拌致热器致热效果。

3　多因素耦合作用对致热性能的影响

3.1　正交试验设计及结果分析

为探究多因素耦合作用对搅拌致热器致热效果的影响，采用正交试验法进行试验设计。本次正交试验中，评价指标为功率(P_j)，选取桨叶数(n_1)、挡板数(n_2)、液面高度(h_1)、搅拌桨高度(h_2)和转速(ω)5 个因素，每个因素选取 4 个水平，选取 $L_{32}(4^6)$的正交表进行试验设计。正交试验影响因素及水平如表 1 所示。正交试验设计如表 2 所示。

表 1　正交试验影响因素及水平

Table 1 Orthogonal test influencing factors and levels

因素	水平			
	1	2	3	4
n_1/片	2	4	6	8
n_2/个	2	4	6	8
h_1/mm	100	150	200	250
h_2/mm	50	100	150	200
ω/r·min^{-1}	100	200	300	400

表 2　正交试验设计

Table 2 Orthogonal experimental design

序号	n_1/片	n_2/个	h_1/mm	h_2/mm	ω/r·min^{-1}	空列	P_j/W
1	2	2	100	50	100	1	1.09
2	2	4	150	100	200	2	12.95
3	2	6	200	150	300	3	31.24
4	2	8	250	200	400	4	87.9
5	4	2	100	100	200	3	7.63
6	4	4	150	50	100	4	3.74
7	4	6	200	200	400	1	69.24
8	4	8	250	150	300	2	99.79
9	6	2	150	150	400	1	65.71
10	6	4	100	200	300	2	0
11	6	6	250	50	200	3	51.48
12	6	8	200	100	100	4	9.04
13	8	2	150	200	300	3	0
14	8	4	100	150	400	4	0
15	8	6	250	100	100	1	9.95
16	8	8	200	50	200	2	70.85
17	2	2	250	50	400	2	117.51
18	2	4	200	100	300	1	46.71
19	2	6	150	150	200	4	5.29
20	2	8	100	200	100	3	0
21	4	2	250	100	300	4	84.79
22	4	4	200	50	400	3	168.51
23	4	6	150	200	100	2	0
24	4	8	100	150	200	1	0
25	6	2	200	150	100	2	4.16
26	6	4	250	200	200	1	31.42
27	6	6	100	50	300	4	72.24
28	6	8	150	100	400	3	165.88
29	8	2	200	200	200	4	13.04
30	8	4	250	150	100	3	7.62
31	8	6	100	100	400	2	79.06
32	8	8	150	50	300	1	171.71

极差分析主要关注数据集中的最大值与最小值间的差异,即数据的离散范围。通过极差分析法可以直观地展示各因素对功率值的影响情况。正交试验结果的极差分析见表 3。在表 3 中,K_i (i=1,2,3,4)表示某个因素的第 i 个水平的所有功率值的平均值,R 为某种因素的 K_i 最大值与最小值之差,通常认为R 值越大则该因素对功率变化的影响越显著。由表 3 可知,R_{n1}=16.376,R_{n2}=41.778,R_{h1}=41.305,R_{h2}=56.940,R_{ω}=89.776。因此各因素对功率的影响程度依次为:转速>搅拌桨高度>挡板数>液面高度>桨叶数。

表 3 极差分析

Table 3 Polarization analysis

因素	K_1	K_2	K_3	K_4	R
n_1/片	37.836	54.213	49.991	44.030	16.376
n_2/个	36.743	33.869	39.813	75.646	41.778
h_1/mm	20.003	53.160	51.600	61.308	41.305
h_2/mm	82.141	52.001	26.726	25.201	56.940
ω/r·min^{-1}	4.450	24.084	63.310	94.226	89.776

各因素对搅拌致热器功率的影响见图 8。

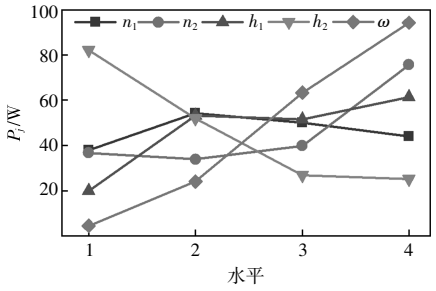


图 8 各因素对功率的影响

Fig.8 Plot of the effect of each factor on power

由图 8 可知,挡板数、液面高度和转速等因素与功率大小呈正相关,而搅拌桨高度与功率大小呈负相关。随着桨叶和挡板数的增加,可以更好地分割流体,抑制流体在搅拌桶中的打旋现象,从而增大流体与搅拌桶壁面、挡板以及自身的接触面积,增大功率值。液面高度和转速的递增、搅拌桨高度的递减会增大流体流动的湍流强度,流体的分层扰动也会随之增强。增大流体本身以及流体与壁面、挡板之间的摩擦,从而增大功率值。其中功率最大的组合为 n_1=8 片,n_2=8 个,h_1=150 mm,h_2=50 mm,ω=300 r/min。

方差分析可进一步分析不同因素对功率值变化的影响以及影响的显著性,正交试验结果的方差分析如表 4 所示。表中“*”表示显著。

表 4 方差分析

Table 4 ANOVA

因素	偏差平方和	自由度	F 比	F 临界值	显著性
n_1	1 222.65	3	0.721	$F_{0.1}(3,3)$=5.390	
n_2	9 191.86	3	5.419	$F_{0.1}(3,3)$=5.390	
h_1	7 933.95	3	4.678	$F_{0.1}(3,3)$=5.390	
h_2	17 161.59	3	10.118	$F_{0.05}(3,3)$=9.280	*
ω	38 648.48	3	22.786	$F_{0.05}(3,3)$=9.280	*
误差	1 696.16				

由表 4 可知,各因素对功率的影响程度依次为:转速>搅拌桨高度>挡板数>液面高度>桨叶数,与极差分析结果一致。其中,转速及搅拌桨高度对功率变化的影响显著,挡板数及液面高度对功率变化的有一定的影响,而桨叶数对功率变化的影响作用最弱。

3.2 多元线性回归分析

单因素试验中各因素与致热功率的关系如图 9~13 所示。

由图 9~13 可见,桨叶数、挡板数、液面高度、搅拌桨高度以及转速与致热功率大致呈线性关系。以本次正交试验数据作为数据来源,通过多元线性回归分析可以发现,桨叶数的显著性系数 P 值为0.692(P>0.05),即桨叶数的递增对功率的变化影响较小,故将其从自变量的范围中排除。因此,本次线性回归模型,以挡板数、液面高度、搅拌

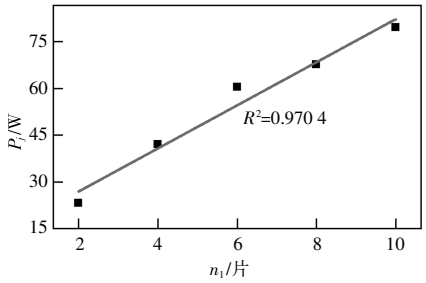


图 9 桨叶数与功率的关系

Fig.9 The relationship of number of propeller blades and power

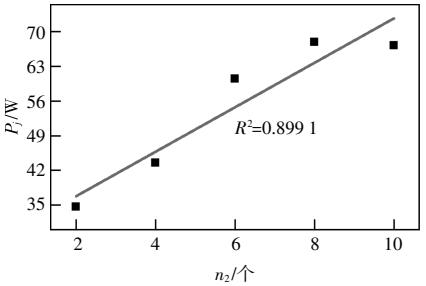


图 10 挡板数与功率的关系

Fig.10 The relationship of number of baffles and power

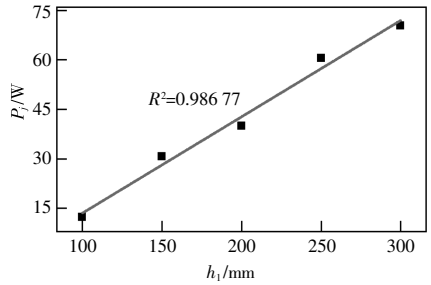


图 11　液面高度与功率的关系

Fig.11 The relationship of liquid surface height and power

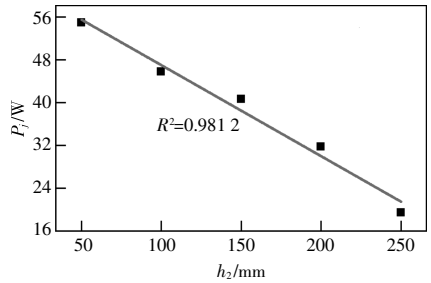


图 12　搅拌桨高度与功率的关系

Fig.12 The relationship of stirring paddle height and power

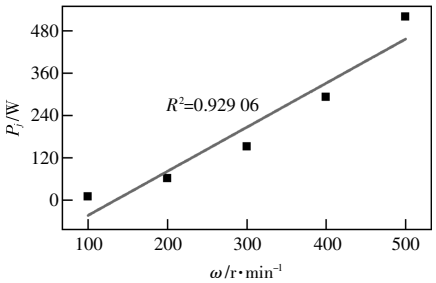


图 13　转速与功率的关系

Fig.13 The relationship of rotational speed and power

桨高度、转速作为自变量,以功率作为因变量,进行多元线性回归分析。其回归模型为 $P_j=a+bx_{n_2}+cx_{h_1}+dx_{h_2}+ex_{\omega}$，其中 a,b,c,d,e 为回归参数值,反映了自变量对功率 P_j 的影响程度。通过数据处理,可得表 5 中的功率值的回归方程为

$$P_j=-58.615+4.62x_{n_2}+0.265x_{h_1}-0.332x_{h_2}+0.298x_{\omega} \quad (3)$$

表 5　回归分析

Table 5 Regression analysis

模型	平方和	自由度	均方	F	显著性
回归	54 783.520	4	13 695.880	20.991	*
残差	16 964.197	26	652.469		
总计	71 747.718	30			

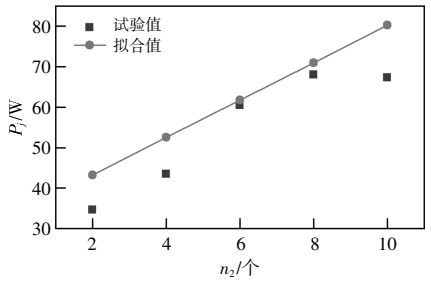
由数据分析可知,本次模型的 R^2=0.764,表明模型计算结果与原始数据一致，即模型与试验数据拟合度高。模型 F=20.991，对应的临界值为 2.743,而显著性校验 F=0.000,远小于显著性水平 0.05,证明该模型回归效果显著。分析结果显示,回归模型自变量的 t 检验 P 值分别为 0.036,0.003,0.000,0.000，可见其中自变量的 P 值均小于 0.05,表明在 95%的置信区间内,自变量的变化均可影响功率值的大小。本文采用试验结果对多元回归模型进行了验证,试验条件见表 6。

表 6　验证回归模型的试验条件

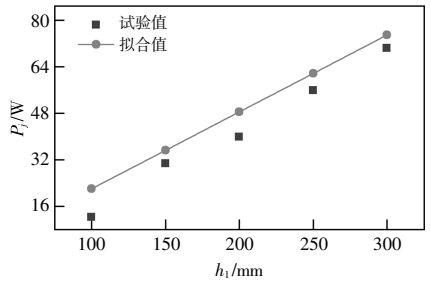
Table 6 Validate the testing conditions for the regression model

序号	试验条件
1	n_1=6 片,h_1=250 mm,h_2=100 mm,ω=200 r/mim,n_2 取 2,4,6,8,10 个。
2	n_1=6 片,n_2=6 个,h_2=100 mm,ω=200 r/mim,h_1 取 100,150,200,250,300 mm。
3	n_1=6 片,n_2=6 个,h_1=250 mm,ω=200 r/mim,h_2 取 50,100,150,200,250 mm。

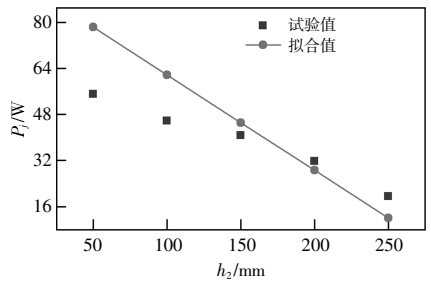
图 14 为功率的实测值与回归拟合值的对比。由图 14 可知,功率的测量值和线性拟合值的误差在可控范围内,从而验证了式(3)的准确性。



(a)不同挡板数下的功率



(b)不同液面高度下的功率



(c)不同搅拌桨高度下的功率

图 14　功率的实测值与回归拟合值的对比

Fig.16 Comparison between measured power values and regression fitted values

4 结论

本文通过单因素试验和正交试验定量分析了影响搅拌致热器的输入扭矩及功率的因素及其大小，建立了搅拌致热器的输入功率与各因素间的多元线性回归模型,得出如下结论。

①单因素试验分析表明,增加桨叶数、液面高度、转速均可以提升搅拌致热器性能,提升搅拌桨高度会降低搅拌致热器性能，在一定范围内增加挡板数可以提升致热器性能，当桨叶数达到一定数值后其性能不再提升。

②正交试验分析表明，各因素对搅拌致热器性能影响程度依次为：转速>搅拌桨高度>挡板数>液面高度>桨叶数。其中转速和搅拌桨高度对致热器性能影响显著，挡板数和液面高度对致热器性能有显著影响，而桨叶数在合适范围内则有一定的影响。

③本试验中搅拌致热器的最佳结构参数:桨叶数为 8 片,挡板数为 8 个,液面高度为 150 mm,搅拌桨高度为 50 mm,转速为 300 r/min。可依据回归方程对不同运行参数进行预测。

参考文献:

[1] 黄仕亮. 新能源风力发电技术分析 [J]. 通讯世界,2024,31(6):124-126.

[2] 苏扬.风力发电技术创新与产业发展研究[J].中国高新科技,2024(10):69-71.

[3] 王家坤,司化涛,王希转,等.基于 MQ-WaveNet 的智慧新能源大规模风力发电智能控制[J].可再生能源,2024,42(10):1341-1347.

[4] 李磊.碳中和目标下风力发电技术的发展与挑战[J].电气技术与经济,2024(4):90-92.

[5] 万玉良,刘鑫,吴晓丹,等.风电与多能源储能联合调峰多场景动态鲁棒优化模型[J].可再生能源,2020,38(5):690-695.

[6] Hanadi S, Kang S, Park G, et al. Analysis of the Eddy current of water heating device to convert wind energy directly into heat: Case study maldo island, South Korea[J].Applied Energy,2024,376:124192.

[7] Ji Q, He H, Kennedy S, et al. Design and evaluation of a wind turbine-driven heat pump system for domestic heating in Scotland [J].Sustainable Energy Technologies and Assessments,2022,52:101987.

[8] Liu Q, Zhang X, Xiong X, et al. CFD simulation of power characteristics and flow field distribution of different spiral stirring paddles[J].Chemical Engineering and Processing - Process Intensification,2024,205:110033.

[9] Mclean D, Pope K, Duan X. Start-up considerations for a small vertical-axis wind turbine for direct wind-to-heat applications [J].Energy Conversion and Management,2022,261:115595.

[10] Gu D, Wang J, Yang H, et al. Investigation on solid particles and pseudoplastic fluid mixing characteristics in a dislocated self-similarity impeller stirred reactor[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research,2023,62(27):10700-10710.

[11] 李永光,马云玲.搅拌式风力致热装置启动性能研究[J].太阳能学报,2020,41(3):29-33.

[12] 郭宇,孙先鹏,杨康,等.不同风能搅拌致热工质产热效果研究[J].太阳能学报,2021,42(1):205-209.

[13] Liu X, Sun X, Li J, et al. Experimental study on the heating effect of a wind-energy stirring heater [J]. Journal of Thermal Science,2021,30(3):772-781.

[14] 黄兴,顾学超,王绍龙,等.挡板数量对搅拌致热器性能影响数值模拟研究 [J]. 可再生能源,2023,41(5):631-636.

[15] 丁兴江,章学来,陆定宇,等.风力驱动管式致热器流体循环制热性能研究[J].流体机械,2021,49(8):48-56.

[16] 王朝正,勾昱君,钟晓晖,等.风能驱动永磁涡流致热法的研究与发展[J].节能,2021,40(4):25-28.

Optimized design of wind mixing heater structure by orthogonal test

Huang Xing, Zhao Weizhao, Wang Shaolong, Yan Hongyan, Xu Liyang
(College of Metallurgy and Energy, North China University of Science and Technology, Tangshan 063210, China)

Abstract: High-efficiency direct-drive heating devices are the key part to improve the performance of direct-drive wind heating systems. In this paper, the optimal structural parameters of a typical straight-blade disc turbine agitator heating device were investigated. The effect of input torque and power for the agitator heating device were also investigated via single-factor experiments and orthogonal experiments, and a multiple linear regression model for input power and the various factors of the agitator heating device were established. The results showed that the increasing in the number of blades, liquid level height, and rotational speed can enhance the performance of the agitator heating device, while the increasing in the height of the agitator blade decreasing its performance. And the increasing in the number of baffles initially can improve the performance of the heating device, but the performance improvement will no longer increase as the number of blades reaches a certain value. The degree of influence of the aforementioned factors on the performance of the agitator heating device is as follows: rotational speed > height of agitator blades > number of baffles > liquid level height > number of blades. The agitator blade height and rotational speed have a positive impact on the performance of the heating device, while the number of baffles and liquid level height have a significant influence. The performance of the direct-drive agitator heating system can be predicted with the established multiple linear regression model based on the various optimal structural parameters. The investigation of this paper can founded a basis for designing and optimizing of the direct-drive agitator heating devices.

Keywords: heating by direct stirring; wind energy utilization; factor analysis; orthogonal test