

文章编号: 1671-6612 (2025) 02-281-06

# 重力热管在隔膜生产线热回收中的应用与研究

陈志豪<sup>1</sup> 丛惠<sup>2</sup> 江鑫<sup>3</sup> 孟尔豪<sup>1</sup> 强天伟<sup>1</sup>

(1. 西安工程大学西安市干空气能利用技术重点实验室 西安 710048;

2. 西安市建筑设计研究院有限公司 西安 710054;

3. 北京德天地兴科技发展有限公司 北京 102200)

**【摘要】** 隔膜生产线在生产过程中会产生大量的余热, 如果不能有效地回收利用, 不仅会浪费能源, 还会给环境造成负面影响。将隔膜生产线的余热回收利用, 不仅可以提高能源利用效率, 降低生产成本, 还可以减少对环境的污染, 具有非常重要的意义。

**【关键词】** 隔膜生产线; 组合式热管; 余热回收

中图分类号 TK172 文献标志码 A

## Research on the Application of

## Two-Dimensional Combined Heat Pipe in Heat Recovery in Diaphragm Production Line

Chen Zhihao<sup>1</sup> Cong Hui<sup>2</sup> Jiang Xin<sup>3</sup> Meng Erhao<sup>1</sup> Qiang Tianwei<sup>1</sup>

(1. Xi'an Polytechnic University, Xi'an, Xi'an Key Laboratory of Dry Air Energy Utilization Technology, Xi'an, 710048;

2. Xi'an Architectural Design and Research Institute Limited company, Xi'an, 710054;

3. Beijing Detiandixing Science and Technology Development Co., Beijing, 102200)

**【Abstract】** Diaphragm production lines generate a lot of waste heat during the production process, and if they are not recycled effectively, they will not only waste energy, but also have a negative impact on the environment. It is of great significance to recycle the waste heat of the diaphragm production line, which can not only improve energy efficiency, reduce production costs, but also reduce environmental pollution.

**【Keywords】** Diaphragm production line; Combined heat pipe; Waste heat recovery

## 0 引言

隔膜生产线是一种利用隔膜技术进行生产的工艺。它是将两种不同的溶液通过隔膜分隔开来, 通过隔膜的选择性通透性实现离子的传递和分离, 从而达到电化学反应和物质的分离纯化的目的<sup>[1]</sup>。由于隔膜生产线工艺具有高效、环保、节能等特点, 因此在化工、电子、环保等领域得到广泛应用。隔膜生产线在生产过程中会产生大量的余热, 隔膜生产线余热回收技术是利用重力热管相变技术, 将隔

膜生产线产生的余热传导至冷风侧预热冷风。隔膜生产线重力热管余热回收技术具有回收效率高、回收效果好、维护方便、使用寿命长等优点。设备本身工作不需要任何动力<sup>[2]</sup>。

## 1 项目背景

### 1.1 隔膜生产线的概况

该项目为国内某公司锂电池隔膜生产线余热回收, 锂电池湿法隔膜生产线中产的高温废气中含有

作者简介: 陈志豪 (1996-03-10), 男, 硕士, E-mail: 411193991@qq.com

通讯作者: 强天伟 (1970-11-30), 男, 博士, 教授, E-mail: 254599797@qq.com

收稿日期: 2024-07-22

大量的热能，这些废气直接排放到室外空气中，不仅会对环境造成污染，还会大量浪费可节约的能源。

## 1.2 隔膜生产线工艺流程

隔膜生产线的生产工艺流程首先需要将聚合物和溶剂按照一定的配方混合，并进行搅拌和加热，以使其充分溶解和混合。

其次是将混合好的材料通过挤出机的机头均匀地涂覆到冷却辊上，然后通过采用烘箱或热辊等

设备，通过加热和通风使隔膜中的溶剂快速蒸发。将涂覆好的隔膜中的溶剂蒸发掉，使其成为干燥的固体。

然后对隔膜进行预热并纵向拉伸及横向拉伸，使其达到合适的尺寸，最后定型并冷却，将干燥好的隔膜按照一定的尺寸和形状进行切割，最终收卷生产出成品隔膜。图 1 为隔膜湿法双向同步拉伸产线工艺流程图。

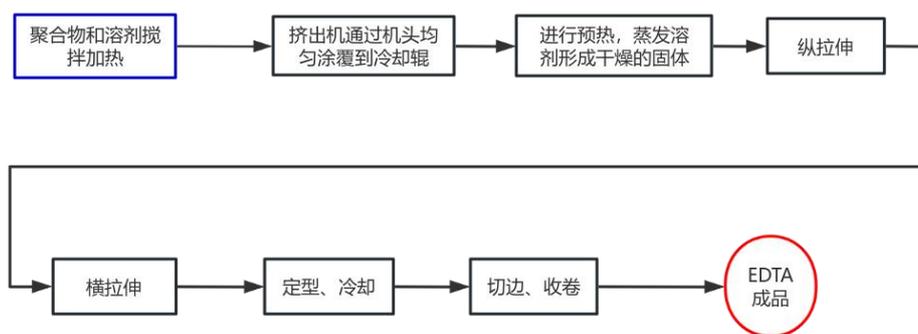
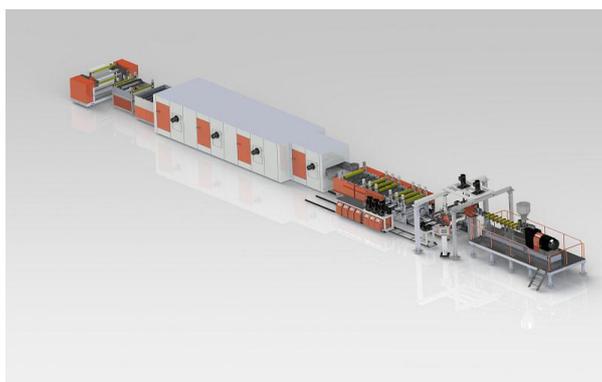


图 1 隔膜湿法双向同步拉伸产线工艺流程图

Fig.1 Diaphragm wet two-way synchronous stretching production line process

由于挤出机的机头装置处需要大量的热量，并且在生产过程中会产生大量的余热。采取重力热管余热回收装置在隔膜生产线中，进行热管热交换的节能改造，可以实现锂电池湿法隔膜生产线高温废气中的余热回收和利用，实现能源的节约和环境的保护，同时也可以提高能源利用效率和降低成本<sup>[3]</sup>。这对于锂电池行业的可持续发展和节能减排具有重要意义。

## 2 设计方案

### 2.1 热管余热回收设计方案

将重力式热管换热器就近安装在隔膜生产线

余热排放处，选取逆流换热方式安装<sup>[4]</sup>，将隔膜生产线挤出机所产生的余热经引风机送到换热器排风侧，高温排气经换热器送到排气管道排出；热管排风侧内部的工质吸收排风余热变成蒸汽，蒸汽在热管蒸发至热管新风侧，遇到冷空气冷凝放热，实现预热新风的目的，加热后的空气经新风出口在送风机牵引下送入隔膜生产线中，并且热管中的工质冷凝成液态因重力又留回热管排风侧，形成一个循环。热管换热器本身不产生能耗，并且降低了加热器的能耗，实现了节能减排的目的<sup>[5]</sup>。

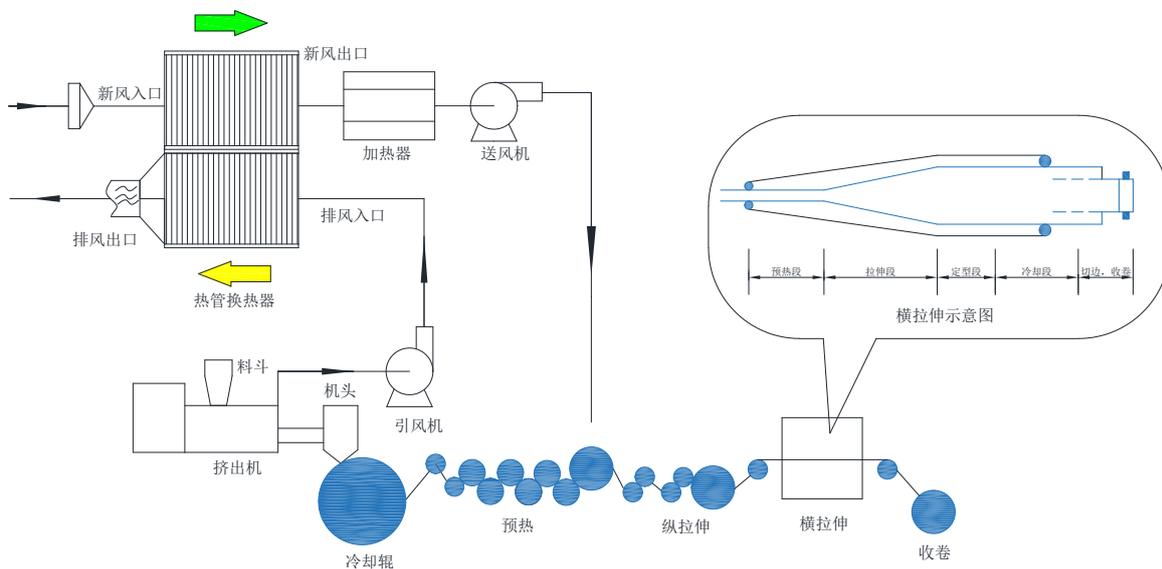


图 2 热管余热回收设计方案图

Fig.2 Process diagram of heat pipe installation in diaphragm production line

2.2 重力热管换热器设计

设计选型以热侧与冷侧流体的平均温度计算<sup>[6]</sup>, 结合设计要求进行参数定型, 设计风速选取 2.5m/s, 排气侧风口尺寸为宽 2390mm×高 1470mm。验证各参数后, 基管采用长度为 4050mm 的铝管, 共计 579 支管, 按正三角形叉排的 13 排排列。热

管热侧与冷侧长度均取值为 1470mm, 长度比为 1, 热侧与冷侧有效换热面积均为 1012.84m<sup>2</sup>, 排气侧压降为 354.11Pa, 送风侧压降为 407.65Pa。所用的热管管外扩展表面参数见表 1。管束以三角形叉排方式排列, 横排热管间距  $S_1=52\text{mm}$ , 纵向间距  $S_2=45.03\text{mm}$ , 如图 3 所示。

表 1 管外扩展表面参数

Table 1 Surface parameters for external expansion of pipes

光管外径	光管内径	翅片管外径	翅片高度	翅片厚度	翅片间隙	管材种类
$d_o/\text{mm}$	$d_i/\text{mm}$	$d_f/\text{mm}$	$H/\text{mm}$	$\delta/\text{mm}$	$Y/\text{mm}$	种类
25	20	45	10	1	1.1	铝管

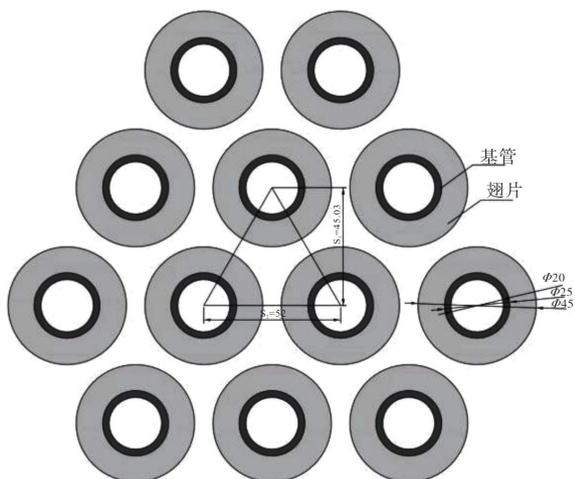


图 3 热管平面叉排布置图

Fig.3 Layout Plan of Heat Pipe Crossings

如图 4 所示, 将翅片和内部呈特殊沟槽结构的基管由一根铝管一次性挤压成型, 生产加工为螺旋式一体化纯铝翅片热管以达到增强换热的目的<sup>[7]</sup>。



图 4 螺旋翅片热管图<sup>[8]</sup>

Fig.4 Spiral Fin Heat Pipe Diagram

表 2 管外扩展表面参数

Table 2 Surface parameters for external expansion of pipes

光管外径 <i>d<sub>o</sub></i> /mm	光管内径 <i>d<sub>i</sub></i> /mm	翅片管外径 <i>d<sub>f</sub></i> /mm	翅片高度 <i>H</i> /mm	翅片厚度 <i>δ</i> /mm	翅片间隙 <i>Y</i> /mm	管材种类
25	20	45	10	1	1.1	铝管

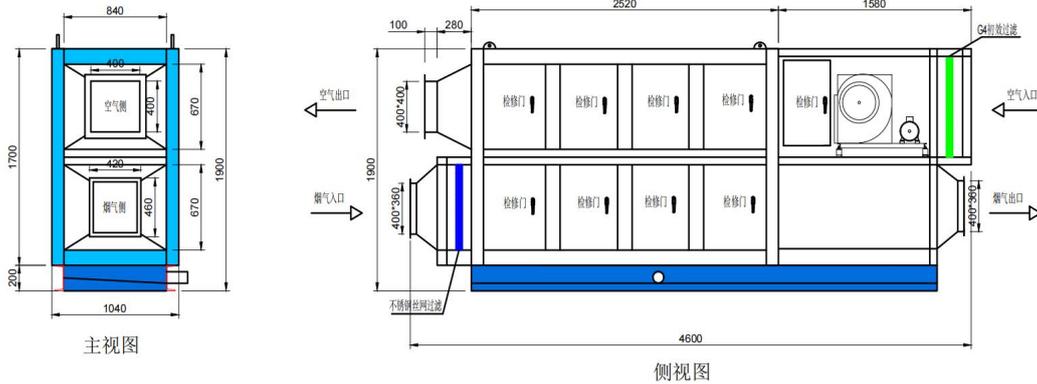


图 5 重力热管的结构图

Fig.5 Structural schematic diagram of gravity heat pipe

### 3 热管余热回收的数据测试及分析

#### 3.1 测量仪器的选择<sup>[9]</sup>

测试仪器所需风速仪型号为 testo 410i, 量程为 0.4m/s~30m/s, 测量精度为±(0.2 m/s+2%测量值); 测温仪型号为 DT1311, 测量温度范围为-200℃~1370℃, 测量精度为±(1%+1℃)。



(a) 风速仪 (b) 测温仪

图 6 测试仪器

Fig.6 Testing instrument

测量时会产生误差, 首先是人为误差, 读数及记录出现错误; 其次是量具误差, 测量仪器的精确性以及测量时有一定的延迟性等; 再有是环境因素, 测量现场存在灰尘会影响测量精度, 及测量时若风速过大会导致仪器振动; 最后是测量方法造成的误差, 测量方法及仪器使用不当。其中的系统误差, 例如测量方法造成的误差, 以及量具误差, 可

以通过改善测试方法, 提高测试精度等方法消除此类误差。而由于读数及记录出现错误, 测量点位置不准确以及环境因素造成的偶然误差, 需要通过多次测量, 并取所测数据的算术平均值表示其测量结果, 从而减小偶然误差对测量产生的影响。

#### 3.2 温度测量

重力式热管换热器回收隔膜生产线产生的余热<sup>[10]</sup>, 由于隔膜生产线产生的排气进入换热器的温度与风量直接影响换热器的效能<sup>[11]</sup>, 现以 2024.05.19 现场实测数据为代表对换热器运行工况参数进行分析研究, 采集整个系统处于稳定工作状态时热管换热器的实际工况参数, 并将当天整个生产作业进行时间段所测的热管换热器两侧温度及风速参数汇总成图 7 及图 8。

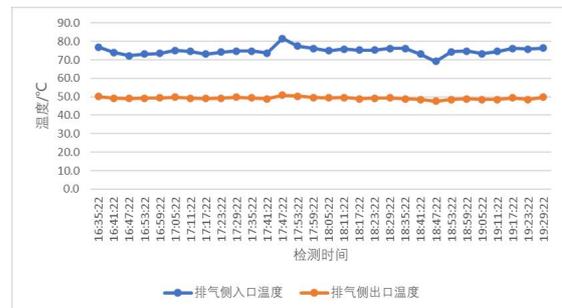


图 7 排气侧温度变化曲线图

Fig.7 Exhaust side temperature change graph

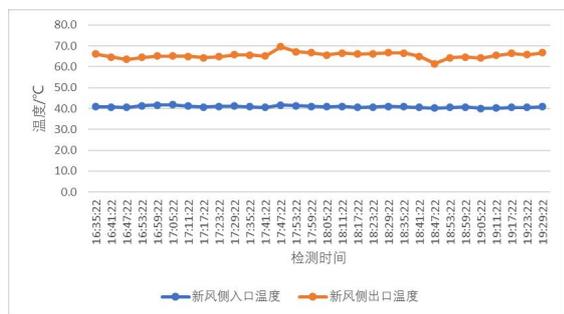


图 8 新风侧温度变化曲线图

Fig.8 Temperature change curve on the fresh air side

通过图 7 及图 8 排气侧与新风侧温度变化情况发现, 隔膜生产线生产过程中产生的余热被换热器排气侧所吸收, 排气温度在 70~80°C 之间, 下降至 50°C, 且由图 8 发现, 室内新风经换热器新风侧进口端进入换热系统, 新风温度处于 40~42°C 的较小温差。经换热器加热, 升温至 70~80°C 之间, 并且相同时间节点, 新风侧温度与排气侧温度变化规律相似, 达到稳定状态<sup>[12]</sup>。

### 3.3 回收排气热量计算

对重力式热管换热器回收隔膜生产线产生的 75°C 排气余热的热量进行全年运行实测数据统计, 并根据生产线排气侧进出口温差四季全天气平均值 (统计不同季节排气进出口所测温差, 分别计算各季节平均温差) 如表 3 所示, 则取其算术平均值进行计算<sup>[13]</sup>。

表 3 全天气平均回收温度

Table 3 Average recovery temperature throughout the day

	春	夏	秋	冬	算术平均 值
	季	季	季	季	
全天气平均回收 温度/°C	43.6	25.5	23.2	38.9	32.8

每小时排气余热回收节省的热量:

$$Q = C_p M \Delta T \quad (1)$$

则每小时回收排气余热可节约的热量:

$$Q_z = 1.005 \times 51720 \times 32.8 = 1704898.08 \text{ kJ/h} \quad (2)$$

### 3.4 节能效益计算

换算成千卡为:  $1704898.08 \times 0.2389 = 407300.15 \text{ kcal/h}$

按照天然气热值 8500 大卡/m<sup>3</sup> 的发热量来计算, 一年可节约 379507m<sup>3</sup> 的天然气, 天然气价格为 3.85 元/时, 每年节约人民币约 98573 元。

### 3.5 回收周期计算

将节能计算结果汇总如表 4 所示, 通过初始投资 300000 元的热管换热器回收隔膜生产线排气中所含余热, 设备运行按全年工作 250 天, 每天进行 6h 烘干作业进行计算, 热管换热器对隔膜生产线排气余热的回收温度按四季全天气平均值 32°C 取值, 天然气热值取值 8500kcal/m<sup>3</sup>, 则一年可节省折合天然气 379507m<sup>3</sup>, 天然气单价为 3.85 元/时, 则设备运行一年所带来的节能效益达到 98573 元。第三年下半年便可回收换热器初期投入成本, 且热管换热器投入运行后无专人维护费用产生<sup>[14]</sup>。

表 4 节能计算表

Table 4 Energy saving calculation table

序号	计算项目	算术平均值
1	热管换热器的投资费用	300000 元
2	每小时排气回收量	407300.15kcal/h
3	节约天然气量	379507m <sup>3</sup>
4	节能效益	98573 元
5	回收周期	6872.85h

### 3.6 环境效益计算

将污染物减排量计算结果汇总并对其环境效益价值进行计算汇总如表 5 所示<sup>[15]</sup>。

表 5 全年污染物减排量及环境效益

Table 5 Annual pollutant emission reduction and environmental benefits

序号	种类	减排量/t	单价/(元/t)	总价/元
1	CO <sub>2</sub>	248.35	12	2980.2
2	SO <sub>2</sub>	0.28	1400	392
3	NO <sub>x</sub>	1.20	1600	1920
4	烟尘	3.81	180	685.8
5	炉渣	32.59	25	814.75
6	粉煤灰	15.24	30	457.2
7	合计	301.47	—	7249.95

由表 5 可知, 选取重力热管换热器回收隔膜生产线排气产生的余热, 全年污染物减排量总计 301.47t, 由此产生的环境效益价值为 7249.95 元。

## 4 热管优化

热管在长时间运行过程中难免会出现许多问题<sup>[16]</sup>: (1) 管束内外壁都可能会结垢, 污垢层的热阻要比金属管材大得多, 从而导致热交换能力迅速下降, 严重时将会使换热介质的流道阻

塞。预防措施包括定期清洗管束、合理选材、在流体中加入缓蚀剂等。(2)热管式换热器在长时间运行中可能会出现堵塞问题,影响设备性能。选择适当的材料对于避免堵塞问题还是有很大作用的,热管式换热器的管道和换热表面应选用不易生锈或结垢的材料,如不锈钢或钛合金。要保持流体的适当流速,以避免堵塞。定期清洗和维护热管式换热器是防止堵塞问题的有效方法。(3)热管长时间运行可能还会遇到一些季节性问题的,在不同季节,环境温度的变化可能会影响热管的运行效率。例如,在冬季,环境温度较低,可能导致热管的热响应速度变慢,而在夏季,高温可能导致热管的热负荷增加。为了解决这个问题,可以考虑使用适合不同季节的热管材料,或者设计具有调节功能的热管系统,以适应季节性温度变化。(4)在供暖和制冷系统中,热负荷需求随季节变化而变化。例如,供暖系统在冬季需要更多的热能,而在夏季则可能完全不需要。为了应对这种季节性需求变化,可以设计具有季节性运行模式的热管系统,或者使用跨季节储热技术来存储夏季的热能,用于冬季供暖。季节变化可能会影响热管的保温和防腐性能。因此,需要定期检查热管的保温层和防腐涂层,必要时进行更换或修复,以确保热管的长期稳定运行<sup>[17]</sup>。

## 5 结论

本文针对隔膜生产线的排气余热以气-气式重力热管换热器进行回收,选取常规设计法,把热侧光管外表面积当作基准传热面积并以热侧与冷侧流体的平均温度计算换热系数从而对热管换热器进行选型设计。结合设计要求定型热管换热器的规格,设计风速选取 2.5m/s,基管材质采用长度为 3050mm 的铝管,共计 579 支管,取 13 排管,按正三角形叉排方式进行排列,热侧与冷侧长度比为 1。热管采用高效螺旋式一体化纯铝翅片管低温热管组装加工成重力热管换热器,以回收排气余热。热管换热器产生的压力降为 450Pa 左右,在设计风量的基础上,热管换热器排气侧每小时回收排气余热可节约的热量为 1704898.08kJ/h。一年可节约 379507m<sup>3</sup> 的天然气,相当于一年节省 98573 元,按照初投资 30 万计算,第三年下半年便可回收换

热器初期投入成本,全年污染物减排量总计 301.47t,产生的环境效益价值为 7249.95 元。隔膜生产线余热回收效果评估的结果分析可以为系统调整、优化提供重要的参考依据。

## 参考文献:

- [1] 吴承康,徐建中,金红光.能源科学发展战略研究[J].世界科技研究与发展,2000,(4):1-6.
- [2] 王丹.中低温热管换热器的理论分析与实验研究[D].北京:北京工业大学,2013.
- [3] 刘国维,单岩昆,黄鸿鼎.两相闭式热虹吸管的强化传热[J].化工学报,1991,(1):66-72.
- [4] 刘泽.闭式重力热管的传热性能研究[D].天津:天津大学,2012.
- [5] 董其伍,王丹,刘敏珊.余热回收用热管及热管式换热器的研究[J].工业加热,2007,(4):37-40.
- [6] 罗亮.翅片管换热器传热特性的数值模拟研究[D].长沙:中南大学,2010.
- [7] 徐晓萍,史金涛,姜峰,等.具有内置管的多相流闭式重力热管传热性能[J].天津大学学报:自然科学与工程技术版,2014,47(1):928-933.
- [8] 战洪仁,张倩倩,史胜,等.带有内螺纹的重力热管仿真模拟研究[J].沈阳化工大学学报,2020,(4):352-357.
- [9] 湛蓝,孙星星,林真国,等.热管换热器在锅炉尾气余热回收应用中的影响因素探讨[J].低碳世界,2016,(29):64-65.
- [10] 李科群,周超.热管式空气预热器的设计[J].化工进展,2006,25(z1):227-230.
- [11] 白丽莹.热管型吸收式制冷余热回收系统的优化研究[D].天津:天津大学,2007.
- [12] 王永胜.热管壁面温度的理论研究与确定[J].工业加热,2016,45(4):62-63,67.
- [13] 王巧丽.余热回收翅片管换热器传热与流体力学特性研究[D].广州:华南理工大学,2012.
- [14] 韩建荒,刘扬,李君书,等.翅片管式换热器传热与流场流动特性的数值模拟[J].化工机械,2013,40(3):347-350.
- [15] 郭优,刘彬,强天伟,等.煤矿井筒中热管式空气加热器的设计与应用[J].节能,2023,42(12):97-100.
- [16] 梁慧荣,康亚磊,孙健.重力热管内部蒸发冷凝过程的传热特性研究[J].节能,2024,43(10):60-62.
- [17] 王慧慧,王辉祥,熊亚选,等.中高温熔盐重力热管的传热性能[J].煤气与热力,2024,44(2):9-15.