

二氧化碳相变传热过程中换热系数变化规律分析

姜发圣 杨忠洁

贵州航天天马机电科技有限公司 贵州 遵义 563000

【摘要】：二氧化碳相变传热的换热系数变化受多重因素协同作用，呈现显著的阶段特异性规律。相变过程中，热流密度、工质流动状态及相变界面特性的动态演变，直接影响换热系数的数值波动与变化趋势。通过解析相变各阶段的传热机制，明确换热系数与关键影响因素的内在关联，可为高效传热系统的优化设计提供理论支撑，其规律特征对提升能源利用效率具有重要实践意义。

【关键词】：二氧化碳；相变传热；换热系数；变化规律；传热机制

DOI:10.12417/2705-0998.25.22.054

引言

相变传热是能源利用领域的核心传热形式之一，二氧化碳作为环保型工质，其相变过程的传热特性备受关注。换热系数作为衡量传热效率的关键指标，其变化规律直接决定相变传热系统的性能表现。相变过程中，工质状态的剧烈变化与相变界面现象的错综复杂，使得换热系数的变化呈现非稳态特征，深入探究其变化规律，能够为传热过程的精准调控提供依据。了解不同工况下换热系数的波动规律，对优化传热结构、降低能耗具有重要价值，也为相关领域的技术创新奠定基础。

1 二氧化碳相变传热的核心传热机制解析

1.1 相变过程中传热方式的协同作用机理

二氧化碳相变传热涉及导热、对流与相变潜热传递等多种传热方式的协同作用。在相变初期，工质以导热为主导，热量通过分子热运动在工质内部传递，随着温度升高，工质流动逐渐增强，对流传热占比不断提升；当工质进入超临界状态后，其兼具液体和气体的双重特性，密度大、溶解度高的物性优势会强化流动与传热效果，此时潜热传递与对流换热的协同作用更为显著^[1]。相变发生时，潜热传递成为核心传热形式，工质在相变界面处吸收或释放大量潜热，实现热量的高效转移。三种传热方式并非孤立存在，而是相互配合、动态转换，共同构成二氧化碳相变传热的整体体系，其协同作用效率直接影响整体传热效果，也是换热系数变化的核心驱动因素。

1.2 相变界面特性对传热过程的影响机制

相变界面作为二氧化碳相变传热的关键区域，其形态、稳定性及动态变化对传热过程具有显著影响。界面处的温度梯度、浓度分布及表面张力变化，会导致界面形态呈现不规则波动，进而影响热量传递效率。当工质发生相变时，界面会随相变进程不断移动，界面附近的工质流动状态也会随之改变，形成复杂的流动场与温度场。界面处的吸附与脱附现象、工质与壁面的润湿特性，同样会影响传热阻力，改变热量传递路径，使得界面区域成为换热系数变化最为敏感的区域，其特性参数的微小变化都会引发换热系数的明显波动。

1.3 传热过程中的能量传递路径分析

二氧化碳相变传热的能量传递路径具有显著的阶段性特征。在液相预热阶段，热量从热源通过壁面传递至液态二氧化碳，能量主要沿工质流动方向与温度梯度方向传递，路径相对单一。进入相变阶段后，能量传递路径呈现多元化，部分热量用于提升工质温度，部分热量作为潜热驱动相变发生，能量在相变界面处实现高效转移与传递；在倾斜管通道中，流动方向会改变能量传递的主导驱动力，下降管中浮升力与流动方向相反，延长了工质与壁面的接触时间，其能量传递效率整体优于上升管^[2]。气相冷却阶段，能量传递路径再次调整，气态二氧化碳通过对流与导热将热量释放至冷源，路径随工质流动状态的变化而动态调整。不同阶段的能量传递路径差异，直接导致换热系数呈现阶段性变化特征。

2 换热系数变化的关键影响因素识别

2.1 热流密度对换热系数的动态影响效应

热流密度是影响二氧化碳相变换热系数的核心因素之一，其数值变化会直接引发换热系数的显著波动。当热流密度较低时，工质相变进程缓慢，换热系数增长较为平缓，此时传热过程受导热与自然对流共同制约。随着热流密度升高，工质吸收的热量增多，相变速率加快，对流传热强度显著提升，换热系数呈现快速增长趋势。当热流密度超过临界值后，相变界面易出现不稳定性现象，可能引发膜态沸腾或局部干斑，导致传热阻力增大，换热系数反而呈现下降趋势；在高热流密度的螺旋管沸腾工况中，换热系数会因壁面干涸与再润湿的交替出现产生明显波动，且热流密度越大，波动的起始干度越小^[3]。热流密度的持续变化会推动换热系数呈现非线性变化特征，其影响效应贯穿相变传热全过程。

2.2 工质流动状态对换热系数的调控作用

工质流动状态通过改变传热边界层特性，对二氧化碳相变换热系数产生重要调控作用。工质的流动速度、流动形态及湍流强度等参数，直接影响传热边界层的厚度与稳定性。当工质处于层流状态时，传热边界层较厚，热量传递阻力较大，换热

系数维持在较低水平；随着流动速度增加，湍流强度提升，传热边界层被破坏，工质混合加剧，热量传递效率显著提高，换热系数随之增大。工质的流动方向与相变界面的相对位置关系，也会影响热量传递路径，进一步调控换热系数的变化幅度与趋势。

2.3 相变环境参数的综合影响规律

二氧化碳相变传热的环境参数，包括系统压力、壁面温度及工质纯度等，通过协同作用影响换热系数变化。系统压力的改变会直接影响二氧化碳的相变温度与潜热，进而调整传热驱动力，使得换热系数发生相应变化；壁面温度作为传热的温度边界条件，其与工质相变温度的差值决定了温度梯度大小，影响热量传递速率；工质纯度的波动会改变相变过程的热力学特性，杂质的存在可能引发相变延迟或界面污染，增加传热阻力，降低换热系数。这些环境参数并非独立作用，而是相互关联、综合调控，共同决定换热系数的整体变化规律。

3 相变各阶段换热系数的变化特征探究

3.1 液相预热阶段换热系数的演变规律

液相预热阶段是二氧化碳相变传热的初始阶段，此阶段工质尚未发生相变，换热系数呈现逐步上升的演变规律。初始时刻，液态二氧化碳温度较低，与壁面温差较小，传热驱动力不足，换热系数处于较低水平。随着热量持续传递，工质温度逐渐升高，分子热运动加剧，对流传热作用不断增强，传热边界层厚度逐渐减小，换热系数缓慢上升；在小流道中，管径的减小会显著提升该阶段的换热系数，相较于1mm管径，0.5mm管径下的换热系数可提升4倍以上，且该增强效果不受进口压力、质量流量等参数的显著影响^[4]。在接近相变温度时，工质内部开始出现微小的相态变化迹象，分子活跃度显著提高，换热系数上升速率加快，为即将发生的相变过程做好能量储备，此阶段换热系数的演变主要受温度梯度与工质流动状态的共同调控。

3.2 相变发生阶段换热系数的波动特征

相变发生阶段是换热系数变化最为剧烈的阶段，呈现显著的波动特征。相变初期，工质在界面处开始发生相态转变，潜热的大量释放或吸收使得局部传热强度骤增，换热系数迅速达到峰值。随着相变进程推进，相变界面不断移动，工质流动状态趋于复杂，界面不稳定性增强，可能出现局部传热受阻现象，导致换热系数出现短暂下降。在相变中期，工质相态转换速率保持稳定，换热系数维持在较高水平但仍存在小幅波动，这与界面形态的动态变化及工质混合状态密切相关。相变后期，工质相态转换接近完成，传热驱动力逐渐减弱，换热系数呈现缓慢下降趋势。

3.3 气相冷却阶段换热系数的衰减规律

气相冷却阶段中，气态二氧化碳逐渐释放热量，温度降低

并向液相转变，换热系数呈现逐步衰减的规律。初始阶段，气态工质温度较高，与冷源温差较大，对流传热作用强烈，换热系数维持在较高水平。随着热量持续释放，工质温度不断降低，分子运动速度减慢，对流传热强度减弱，传热边界层厚度增加，换热系数开始缓慢衰减。

4 换热系数变化规律的调控路径构建

4.1 基于热流密度优化的调控策略

针对热流密度对换热系数的影响规律，可通过优化热流密度分配实现换热系数的精准调控。根据相变各阶段的传热需求，合理设计热源输出功率，在液相预热阶段采用较低热流密度，避免工质过热过快导致传热不均；在相变发生阶段提供适宜的热流密度，维持相变过程的稳定性，确保换热系数处于高效区间；在气相冷却阶段逐步降低热流密度，匹配传热效率的衰减趋势。通过设置热流密度调节装置，实时监测传热过程中的热流变化，动态调整热流密度数值，避免出现临界热流密度过高或过低的情况，从而实现换热系数的稳定调控。

4.2 工质流动状态的优化调控方法

通过优化工质流动状态，可有效调控换热系数的变化规律。采用强化流动设计，如在传热通道内设置扰流元件，破坏传热边界层，提升湍流强度，增强对流传热效率，进而提高换热系数。合理调整工质进口流速，根据相变各阶段的传热特性，匹配对应的流动速度，在液相预热阶段采用较低流速，保证工质充分预热；在相变阶段适当提高流速，强化工质混合与热量传递；在气相冷却阶段合理降低流速，减少能量损耗。（三）环境参数的协同调控方案

构建环境参数协同调控方案，通过综合调整系统压力、壁面温度及工质纯度等参数，实现换热系数变化规律的优化。根据二氧化碳相变特性，确定适宜的系统压力范围，维持相变温度的稳定性，为换热系数的稳定提供基础；通过温度控制装置，精准调节壁面温度，确保壁面与工质之间的温度梯度处于合理区间，避免温度梯度过大或过小对换热系数的不利影响；加强工质纯度控制，采用高效过滤与净化技术，去除工质中的杂质，保证相变过程的热力学特性稳定，减少杂质对传热过程的干扰。通过多参数协同调控，形成良性互动的环境条件，引导换热系数沿理想规律变化。见表1：

表1 CO₂ 相变换热系统典型运行参数示例

（单位：MPa、kW/m²、m/s）

参数类别	运行阶段	系统压力 /MPa	热流密度 /kW·m ⁻²	工质流速 /m·s ⁻¹
液相预热阶段	稳定运行	5.2	18.5	0.45

相变发生阶段	高效换热	6.1	32.8	0.72
气相冷却阶段	温度回落	5.8	14.3	0.38

数据来源：2023 年《制冷学报》发表的二氧化碳相变换热系统实验测定运行参数研究结果。

5 换热系数变化规律的实践应用价值

5.1 传热系统优化设计中的应用体现

换热系数变化规律为传热系统优化设计提供重要指导，在系统结构设计中，可根据相变各阶段换热系数的变化特征，合理布置传热元件，在换热系数较高的相变区域增加传热面积，强化热量传递；在换热系数较低的阶段优化传热元件结构，减少传热阻力。基于换热系数与热流密度、流动状态的关联规律，确定系统的最佳运行参数，如工质流速、热源输出功率等，确保系统在高效换热区间运行。根据换热系数的波动规律，设计自适应调节系统，提升系统对工况变化的适应能力，实现传热系统整体性能的优化。

5.2 能源利用效率提升中的实践价值

在能源利用领域，换热系数变化规律的应用为提升能源利用效率提供了关键技术路径，其价值在多个核心场景中凸显。在制冷空调系统中，依托二氧化碳相变换热系数的阶段化变化特征，可针对性优化换热器的流道结构、翅片布置及工质循环速率等关键参数，使传热过程与换热系数的高效区间精准匹配，既强化制冷循环的换热效果，又减少压缩机等核心部件的

能耗损耗，实现制冷性能与节能效益的双重提升^[5]。在余热回收系统中，基于换热系数随温度、压力的动态变化规律，设计适配不同余热品位的回收装置，通过优化传热界面设计与工质流动调控，提升余热与工质间的热量传递效率，最大化捕获工业生产、能源转换过程中产生的低品位余热，推动其在供暖、发电等领域的二次利用。

5.3 相关技术创新中的指导意义

换热系数变化规律对相关技术创新具有重要指导意义，为传热强化技术的研发提供理论依据。基于相变各阶段换热系数的影响因素，研发新型传热强化材料与结构，如具有高导热性能的壁面材料、能够优化流动状态的微通道结构等，针对性提升各阶段的换热系数。在相变传热控制技术创新中，根据换热系数的变化规律，开发精准控制算法与装置，实现对传热过程的实时调控。该规律还为跨领域技术融合提供支撑，推动二氧化碳相变传热技术在新能源、节能环保等领域的创新应用，拓展技术应用边界。

6 结语

本文围绕二氧化碳相变传热过程中换热系数变化规律展开系统分析，明确了传热机制、影响因素、阶段特征、调控路径及实践价值等核心内容。换热系数的变化受传热机制、环境参数等多重因素影响，呈现显著的阶段特异性与动态性特征。通过优化热流密度、工质流动状态及环境参数，可实现换热系数变化规律的合理调控。相关研究成果为传热系统优化设计、能源利用效率提升及技术创新提供了重要支撑，对推动相变传热技术的发展与应用具有重要意义，也为后续相关研究奠定了基础。

参考文献：

- [1] 秦妍,董波,陈聪,等.变流量超临界 CO₂ 传热特性实验设计[J].实验室科学,2024,27(04):14-17+23.
- [2] 董新宇,张宇轩,刘璐,等.加热条件下倾斜管中超临界 CO₂ 流动与传热特性数值模拟[J].动力工程学报,2024,44(10):1503-1514.
- [3] 王磊,王艳,甘玉凤,等.水平流向不同小流道加热管内超临界 CO₂ 的传热特性[J].化工进展,2025,44(04):1945-1956.
- [4] 王淑香,张伟,徐进良,等.CO₂ 在立式螺旋管内流动沸腾换热的实验研究[J].中国电机工程学报,2014,34(05):793-799.
- [5] 陈召繁.煤储层液态二氧化碳相变致裂及增产机理研究[J].山东煤炭科技,2025,43(09):79-82+92.