

超临界 CO₂ 流化床换热器 优化设计研究

程佳¹ 李开冉¹ 吴彬²

1. 山东腾达技术咨询有限公司; 2. 山东祥安安全技术服务有限公司

摘要:超临界 CO₂ 布雷顿循环因其高效率、小体积和低排放的特点, 成为光热发电技术的重要发展方向。作为核心设备的流化床颗粒 -sCO₂ 换热器, 其性能直接影响系统效率和经济性。然而, 现有换热器设计在高温、高压、大流量条件下存在成本高、效率低及工程化难题。本研究从建模与参数优化、传热强化及大型化设计三方面入手, 提出了一套高效、经济的大型化换热器设计方案。研究表明, 通过优化管束高宽比、鳍片管结构及流程布局, 换热器净效率从 92.4% 提升至 98.7%, 设备成本降低约 30%。结合模块化制造与蛇形床体设计, 成功实现 100 MW 换热器的工程化应用, 同时在低负荷运行条件下具备较高的经济性和稳定性。研究成果为超临界 CO₂ 布雷顿循环技术的进一步推广提供了重要参考。

关键词:超临界 CO₂; 流化床换热器; 传热强化; 优化设计; 大型化

随着全球能源需求的增长与气候变化问题的加剧, 开发绿色、清洁的可再生能源已成为全球共识。太阳能光热发电因其覆盖面广、可持续性强和污染小的优势, 被认为是未来能源体系的重要组成部分。

然而, 传统太阳能光热发电技术存在成本高、效率低等瓶颈, 限制了其大规模推广^[1]。超临界 CO₂ 布雷顿循环是一种新兴的高效发电技术, 其以高效率和小体积为特点, 被视为提升光热发电技术竞争力的关键方向。作为其核心设备之一, 颗粒 -sCO₂ 流化床换热器因其优异的传热性能在该系统中扮演了重要角色。然而, 换热器的效率、成本与可靠性仍需进一步优化, 尤其是在高温高压条件下的大型化设计中, 面临着传热与传质的复杂性和设备工程化应用的挑战。

本研究旨在通过优化颗粒 -sCO₂ 流化床换热器的关键参数, 提高设备效率, 降低材料使用量, 并提出适用于工程应

用的大型化设计方案, 为未来光热发电技术的发展提供技术支撑^[2]。

1 换热器优化设计

1.1 建模与参数选择

针对超临界 CO₂ 布雷顿循环系统

中的颗粒 -sCO₂ 流化床换热器, 设计适用于 1MW 装置的建模程序。模型中综合考虑了换热器的热平衡、压降特性以及颗粒和流化空气的流动特性, 建立了基于能量守恒和传热强化的换热器集成计算模型, 优化前浅层多级流化床热态

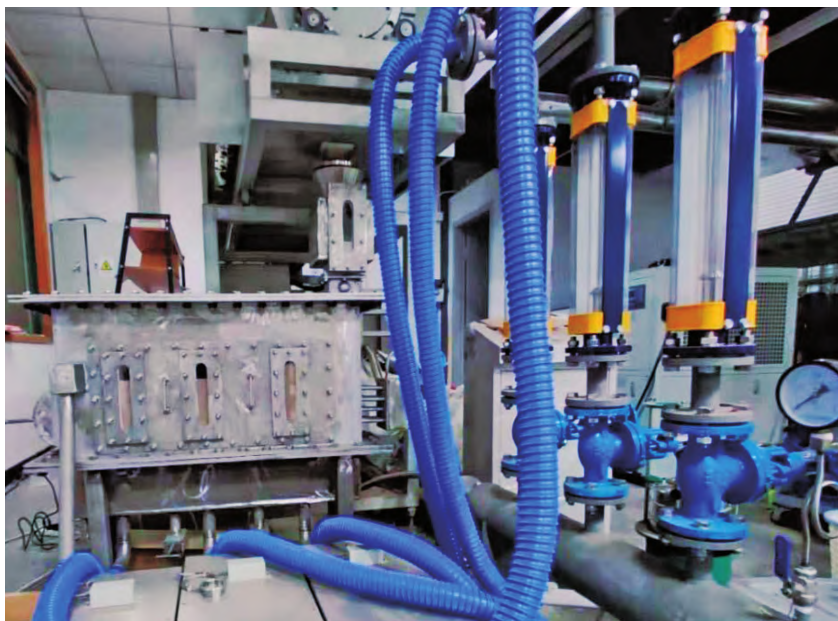


图1 优化前浅层多级流化床热态试验台

试验台如图 1 所示。

根据现有前浅层多级流化床热态试验台，优化建立模型，模型的初始条件包括颗粒粒径（280 μm ）、颗粒密度（约 2 500 kg/m^3 ）、床层厚度和流化风速（约 0.2 m/s ）。选用管束高宽比、埋管直径和长度作为关键优化因子，通过分析其对换热器净效率和金属使用量的影响，提出了最佳参数范围：管束高宽比为 2，埋管外径 21.3 mm，埋管长度 10.12 m。模型验证表明，通过优化管束几何参数，可有效提升换热器的净效率，同时减少金属使用量约 15%，为后续的效率优化奠定了理论基础^[3]。

1.2 效率优化

为进一步提升换热器的传热效率，从结构优化和流程优化两方面展开研究。首先，通过调整埋管排列方式和流化空气流程，将原本的外循环流程优化为内部循环，大幅减少了热量损失，并使净效率从 92.4% 提升至 95.8%。通过数值模拟对比了不同高宽比、外径和管长参数下的换热器能量分布（见图 2）。结果表明，高宽比过大或过小均会影响气固两相的热传递均匀性，而选择高宽比为 2 时，可最大化换热效率。优化后换热器能量平衡如图 3 所示。

通过改变床料出口温度和埋管形式（鳍片管设计），进一步强化传热能力，使换热器净效率提升至 97.9%。

1.3 传热强化设计

传热强化是提升换热器性能的重要手段。本研究结合参数强化和结构优化两种策略，全面分析其对传热系数和设备成本的影响。参数强化方面，通过将颗粒出口温度从 550℃ 提升至 600℃，传热系数显著提高^[4]。设备成本减少约 34.7%。结构优化方面，引入鳍片管设计（见图 4），鳍片管的排列与气固接触模式，通过增加传热表面积和减小热阻，实现传热性能的进一步增强。数值

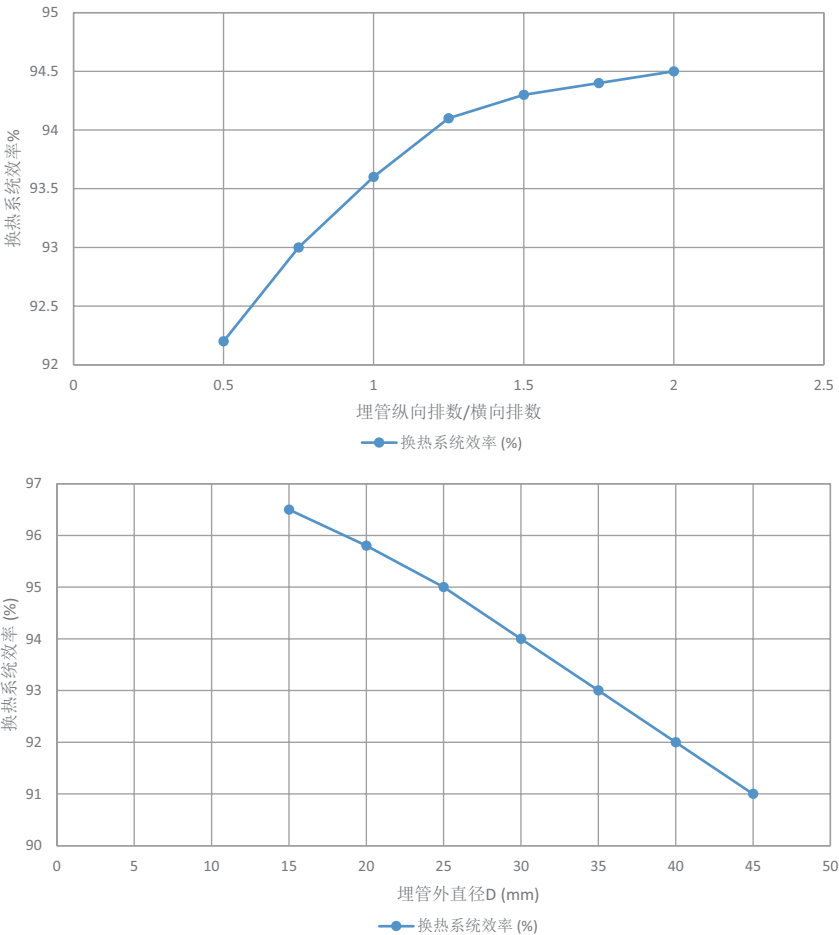


图 2 管束参数优化对能量分布的影响

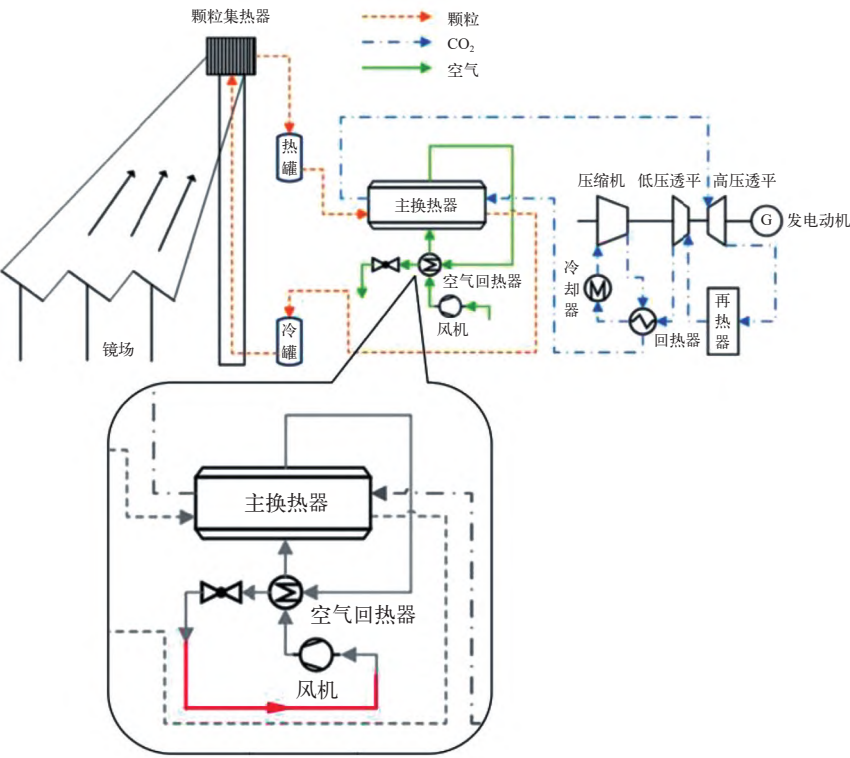


图 3 优化后换热器能量平衡

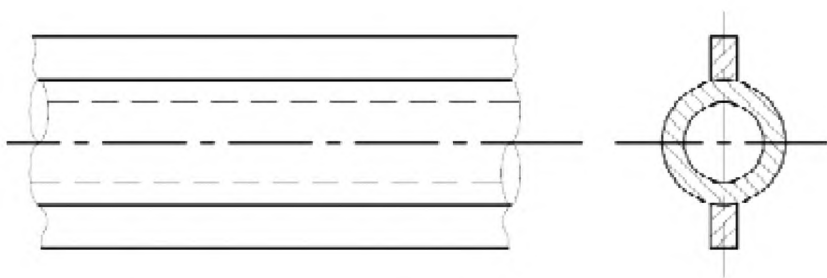


图4 鳍片管设计示意

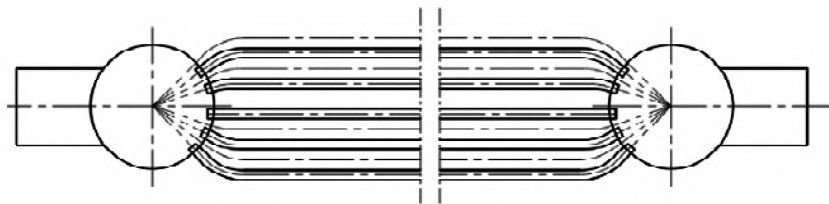


图5 模块化管束制造示意

模拟验证表明,优化后的鳍片管换热器总传热系数提升至 $369.5\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。综合强化设计后,换热器的净效率达到 98.7%,同时材料使用量降低 42.9%,为大型化工程应用提供了坚实的理论和技术支持。

2 大型化设计与工程应用

2.1 1MW 换热器工程设计

为满足 1 MW 超临界 CO_2 布雷顿循环系统的运行需求,换热器设计采用模块化思路,从设备布局、结构稳定性和热膨胀控制等方面进行了系统优化。

首先,模块化制造方式被应用于换热器的管束部分,采用预制整体式管片进行制造和装配(见图 5)。每片管束包含一定数量的埋管,通过标准化设计和生产提高了设备可靠性,并简化了现场安装流程。为了减少热膨胀对管束的影响,床体采用冷护板内部浇筑墙体结构,有效降低了膨胀问题的发生概率。

换热器的布风设计同样经过优化。布风板采用钟罩型风帽(共 154 个),并结合非接触浇筑固定方式,以避免因热膨胀差异引发的损坏。密封结构则采用双层设计,兼顾保温、膨胀吸收和密封性能,有效

提升了系统运行的稳定性和可靠性。最终,优化后的换热器主体尺寸为 $9\,000\text{mm} \times 1\,400\text{mm} \times 8\,640\text{mm}$,结构紧凑且性能优越,满足了 1 MW 系统对效率和稳定性的高要求^[5]。

2.2 100 MW 换热器优化

在 100 MW 超临界 CO_2 布雷顿循环系统中,换热器需要同时应对高温、高压和大流量工质的复杂工况。为了满足其性能需求,本研究提出了一种分段布置与蛇形床体结构结合的优化方案。

首先,根据高参数下管长和膨胀

量的限制,采用分段布置及蛇形床体结构设计的方式将加热器分为热段和冷段(见图 6)。

这种分段设计不仅减少了膨胀问题,还通过冷段与热段的差异化选材降低了整体材料成本约 40%。为解决大规模床体布风困难和占地面积过大的问题,创新提出蛇形床体结构设计。该结构将三段床体集中布置在蛇形路径上,利用统一布风系统实现了高效的流化和传质,避免了传统独立床体布置中复杂连接管道和巡检困难的问题。在低负荷运行条件下,蛇形床体设计支持并联与串联的灵活组合模式,有助于提高换热器经济性和稳定性,进一步优化整体系统性能。

2.3 低负荷运行优化

在太阳能光热发电中,超临界 CO_2 布雷顿循环系统常需应对低负荷运行工况。为提升设备经济性和稳定性,本研究分析了不同负荷下换热器的性能,并提出优化设计方案。

通过模拟分析发现,在低负荷运行时,流化风速降低会显著影响传热系数。因此,优化设计引入了分区控制策略,通过调节蛇形床体的并联与串联组

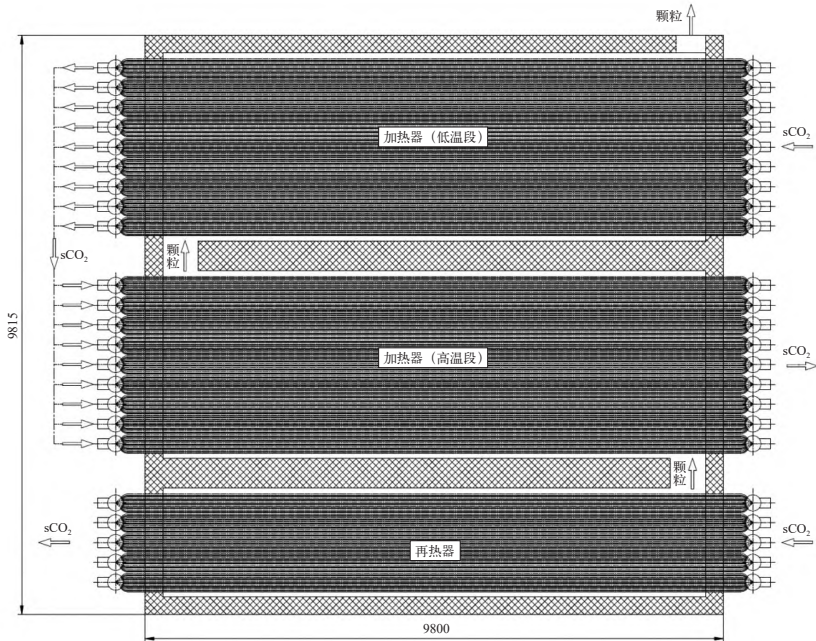


图6 分段布置及蛇形床体结构设计示意

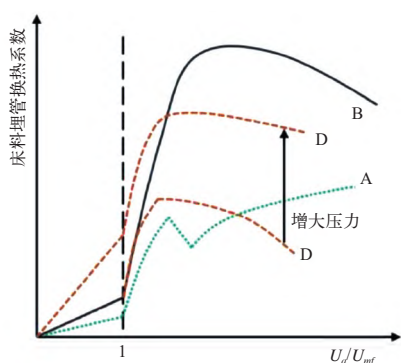


图7 分区控制下的流化风速优化示意图
合方式,动态分配流化风量与颗粒流量(见图7)。这种分区控制不仅降低了能耗,还显著提升了传热效率。

为避免局部区域传热不均的问题,在低负荷条件下采用了鳍片管换热的增强设计。鳍片的引入有效增加了传热表面积,弥补了低风速带来的传热效率损失。优化后的换热器在20%~40%负荷范围内表现出更高的经济性和稳定性,其灵活调节能力显著提升了系统整体的负载适应能力,为未来大规模光热发电系统提供了可靠的技术参考。

3 设备成本与经济性分析

3.1 成本结构

超临界CO₂流化床换热器的成本主要由3部分构成:设计制造部件成本、辅机配套成本和安装运维成本。本研究针对1MW和100MW换热器分别进行了成本分析。设计制造部件成本,设计制造部件主要包括管束、床体、风帽、密封结构和支吊系统等。管束成本在整体中占比最高,约占总成本的60%。优化后的高宽比和鳍片管设计显著减少了金属使用量,使得材料成本降低约15%。

模块化制造方式提高了生产效率,并减少了现场安装时间,进一步降低了制造成本。辅机配套成本,辅机设备包括流化空气风机、测控设备及热回收系统等,占总成本的30%。通过优化风机选型和减少风量需求,使辅机设备功

率降低了约20%,相应成本也随之减少。安装运维成本,模块化设计大幅简化了安装流程,使现场安装成本减少约10%。优化后的密封与膨胀设计降低了运行期间的维护需求,从长周期来看进一步提升了经济性。优化后的成本结构中,材料和制造成本占比最高,但其优化空间也最为显著。通过改进设计和工艺,整体制造和运维成本降低了20%~30%。

3.2 经济性评估

超临界CO₂流化床换热器的经济性不仅体现在初始成本的降低,还体现在其运行效率和寿命周期成本的优化上。运行效率提升,通过参数和结构优化,换热器净效率从92.4%提升至98.7%。这种高效率直接减少了燃料消耗和运行成本。在100MW光热发电机组中,每提升1%的换热效率,年运行成本可降低约200万元人民币。寿命周期成本,优化设计显著延长了设备的使用寿命。

特别是模块化设计和耐高温高压材料的应用,使得主要部件的更换周期延长约30%,降低了长期维护成本。成本回收期,基于优化设计的1MW换热器成本回收期缩短至约5.2年,而传统设计通常需要6年以上。对于100MW机组,分段布置和蛇形床体设计进一步降低了单位换热面积的成本,其回收期控制在6.5年以内。综合收益评估,综合初始投资和运行节约,优化后的换热器在30年的寿命周期内可减少20%~25%的总成本。这种显著的经济性提升使其在大规模光热发电中具有广阔的应用前景。

4 结语

超临界CO₂流化床换热器作为光热发电系统的核心设备,其优化与大型化设计对提升整体系统性能具有重要意义。本研究提出了一系列创新设计,包括优化管束结构、流程布局和传热强化

方法,使换热器的效率和经济性显著提升。通过模块化制造和蛇形床体结构的创新应用,解决了大型化设计中的膨胀、密封及布风难题,实现了100MW级设备的工程化方案。研究还验证了换热器在低负荷运行时的可靠性与经济性,为其在多种负荷条件下的稳定运行提供了技术支撑。

然而,随着未来光热发电技术向更高温度、更高效率方向发展,换热器在材料选择、极端工况适应性及动态响应性能等方面仍需进一步研究。本研究的成果为推动超临界CO₂布雷顿循环技术的大规模应用奠定了坚实基础,并为未来可再生能源领域的技术创新提供了重要借鉴。

参考文献:

- [1] 孟闾,白亮,孟明.破解大容积、超高压反应釜设计难题的研究[J].流程工业,2024(03):28-31.
- [2] 潘恒乐,王荣文,吴名辉,等. ZJ119型卷接机组流化床供丝气流温度控制系统的设计[J].烟草科技,2023,56(12):91-97+105.
- [3] 姜峰,孙兴一,齐国鹏,等.气-固循环流化床螺旋板式换热器的传热性能与压降[J].化学工业与工程,2023,40(06):78-88.
- [4] 陆晓焰,杨召,秦卫东,等.固废循环流化床焚烧炉外置换热器运行特性研究[J].工业锅炉,2023(05):36-40.
- [5] 黄康胜,冯西平.流化床乙丙共聚生产高抗冲击共聚物操作控制研究[J].山东化工,2023,52(13):189-191.