

# 超临界 CO<sub>2</sub> 在并联通道内流量偏差规律 试验研究

白晨光, 颜建国, 郭鹏程\*

(西安理工大学西北旱区生态水利国家重点实验室, 陕西, 西安, 710048, E-mail: [guoyicheng@126.com](mailto:guoyicheng@126.com))

**摘要:** 掌握并联通道内超临界 CO<sub>2</sub> 流量分配规律对新型太阳能热发电吸热器等能量转换设备的设计和优化具有重要意义。本研究开展了超临界 CO<sub>2</sub> 在内径 2 mm 水平并联圆管内流量分配试验, 采用电加热方式分别控制两个并联支路的加热热流, 分析热流密度偏差、系统压力和质量流量对并联管流量分配的影响规律。试验参数范围: 系统压力 7.5~8.5 MPa, 总质量流量 150~250 g/min, 热流密度 55~100 kW/m<sup>2</sup>, 流体温度 20~100°C。试验表明, 并联管路两支路热流密度偏差越大, 流量分配偏差越明显; 管内超临界 CO<sub>2</sub> 因热偏差而导致的流动阻力偏差是流量分配不均的主要原因。提高系统压力、提高质量流量可以削弱超临界 CO<sub>2</sub> 在并联通道内的流量偏差现象, 有助于提升流动系统稳定性。研究成果为太阳能热发电技术能量转换系统的设计提供一定的理论基础与技术支撑。

**关键词:** 流量分配; 流量偏差; 超临界流体; 太阳能热发电

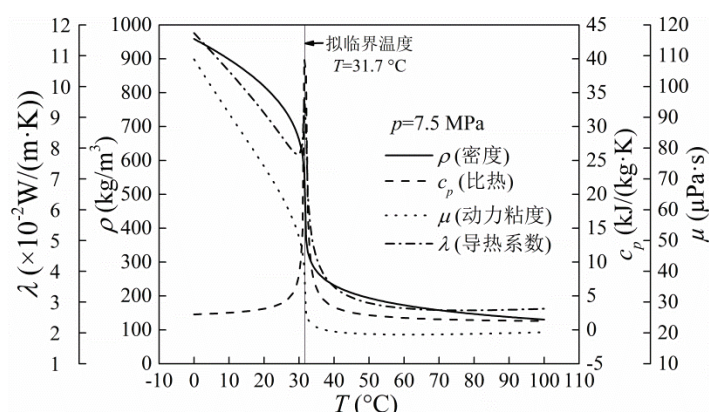
## 1 引言

太阳能光热发电具有可储热、可调峰、可连续发电、适用于大规模集中发电等一系列优点, 是最具应用前景的太阳能发电方式之一<sup>[1]</sup>。目前, 太阳能光热发电过程中热能到电能的转换过程采用传统的朗肯循环来进行, 为了进一步提高其发电效率、降低建设成本, 基于超临界 CO<sub>2</sub> 布雷顿循环的太阳能热发电技术得到了广泛关注。与传统的朗肯循环相比, 超临界 CO<sub>2</sub> 布雷顿循环具有热转换效率高、功耗小、设备尺寸小、经济性好等优点<sup>[2]</sup>。

工程中, 超临界二氧化碳吸热过程是在并联管路换热器中进行, 由于其特殊的热物性规律(图 1), 当并联管路的热流存在一定的偏差时, 并联管路中的工质流量也将出现偏差, 即存在流量分配不均的问题。流量分配不均现象使得管间的换热存在差异, 引起热应力, 威胁着换热设备的安全稳定运行。为此, 亟需开展并联管超临界 CO<sub>2</sub> 流量分配试验研究, 揭示并联管内流量分配不均匀现象的规律。

基金项目: 国家自然科学基金(51839010)、陕西省重点研发计划(2017ZDXM-GY-081)、中国博士后科学基金资助项目(2018M633546)、陕西省教育厅科学研究计划专项项目(17JK0560)

通讯作者: 郭鹏程, E-mail: [guoyicheng@126.com](mailto:guoyicheng@126.com)

图1 超临界 CO<sub>2</sub> 物性

目前, 关于并联管路流量分配的研究主要以水蒸汽-水两相流为对象。朱波等<sup>[3]</sup>试验发现, 两相流干度越小, 流量分配越不均匀; 李夔宁等<sup>[4]</sup>对比了不同结构的平行流蒸发器流量分配特性, 发现增加内径并不能改善其流量分配均匀性, 两相流进口在集箱中间时更有利于流量均匀分配; Dario 等<sup>[5]</sup>综述了在不同支路直径下的气液两相流分配特性; Li 等<sup>[6]</sup>试验发现, 在微小通道中增大并联支路间距有利于两相流动分配, 在小间距情况下入口条件对流量分配的影响很大。

近年来, 随着超临界流体技术的发展, 许多学者也开展关注超临界流体在并联管路流量分配特性。冉振华等<sup>[7]</sup>研究了超临界状态下航空煤油 (RP-3) 在并联管路中流量分配规律及热流密度、压力对其影响, 发现并联管间热流偏差会造成流量偏差, 提高压力有助于系统稳定; Zhang 等<sup>[8]</sup>研究了超临界水在并联管路内的流动不稳定性现象, 发现增加流量和系统压力有助于增强系统稳定性。

归纳而言, 关于超临界流体流量分配特性的试验研究仍明显不足, 其流动分配规律及相关机理仍较模糊。因此, 本文在课题组前期超临界 CO<sub>2</sub> 传热研究的基础上<sup>[9,10]</sup>, 进一步开展超临界 CO<sub>2</sub> 在并联通道流量分配特性研究, 阐明超临界 CO<sub>2</sub> 流量分配规律, 并分析主要热工参数对流量分配的影响。

## 2 试验系统

图2为本试验系统的示意图。高压恒流泵抽取储液罐内的液态 CO<sub>2</sub>, 工质进入进口集箱后分流至两条水平并联支路。两支路试验段为水平放置的 316L 不锈钢圆管, 内径 2 mm, 壁厚 0.5 mm, 有效加热长度为 280 mm, 采用电加热方式独立控制两支路的加热热流。CO<sub>2</sub> 经过试验段后汇集至出口集箱, 之后进入水冷套管冷却后进入储液罐, 形成闭式回路。

采用罗斯蒙特压力变送器来测量系统压力, 采用两台罗斯蒙特压差变送器分别测量试验段 1 和试验段 2 的压差。采用两台西门子质量流量计测量两个并联支路的质量流量。采

用直径 0.2 mm 的 K 型热电偶丝测量试验段的外壁温，测温范围为 0~1000 °C。采用 T 型铠装热电偶测量试验段进出口主流体温度。采用 IMP3595 数据采集系统采集数据。

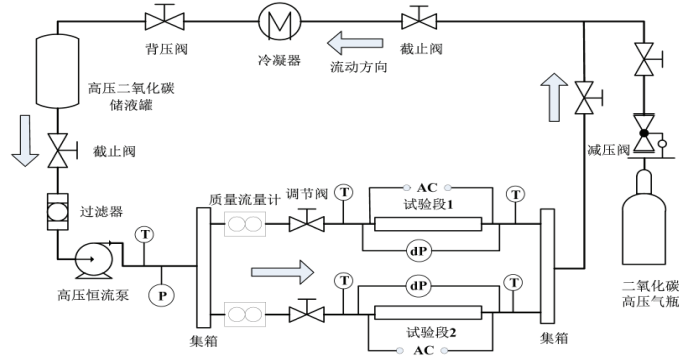


图 2 试验系统回路

### 3 结果分析

#### 3.1 热流偏差对流量分配的影响

图 3 给出了两并联支路流量、温度随热流密度的变化趋势，将并联支路 1 设为基准管、支路 2 为加热管，横坐标为加热管热流密度比基准管热流密度，其中维持其系统压力为 7.5MPa、总质量流量 150g/min、试验段进口温度 20°C 不变，为基准管提供恒定不变的 55 kW/m<sup>2</sup> 加热热流密度。试验过程中持续增加加热管热流密度 (0~200 kW/m<sup>2</sup>)，以模拟并联管路受热不均现象。

由图 3 可以看出，加热管热流密度不断增加导致加热段内 CO<sub>2</sub> 温度不断增加，温度达到超临界点时，CO<sub>2</sub> 密度急剧降低，密度的降低引起其流速的增加，流速增加后管路阻力快速上升，从而导致加热管质量流量减小，基准管流量上升。随着加热管热流不断增加，该现象更明显。

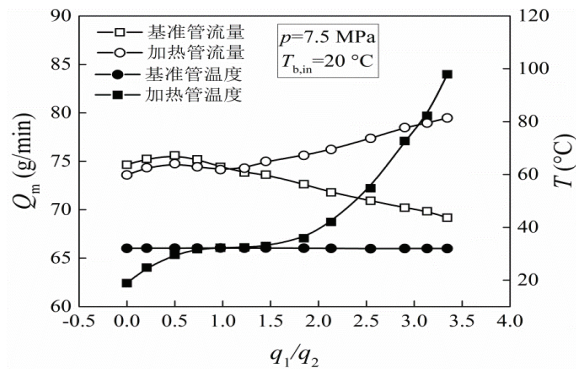


图 3 典型工况下的流量偏差与流体温度偏差

### 3.2 系统压力对流量分配的影响

图 4、错误！未找到引用源。分别为在其它条件不变的前提下，8.5 MPa 与 9.2 MPa 的支路流量随热流密度之比的变化关系，图 6 为 3 个压力条件下基准管与加热管流量之差与热流密度之比的关系。观察可知，随着系统压力升高，两管间流量偏差受到抑制。这是因为，当系统压力上升后，临界温度上升，CO<sub>2</sub> 密度随温度的变化也趋于平缓（图 7），因而支路内管路阻力上升趋势变慢，流量偏差得以抑制。

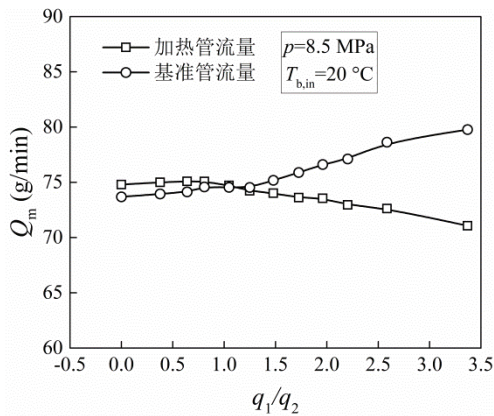


图 4 流量偏差特性 ( $p = 8.5 \text{ MPa}$ )

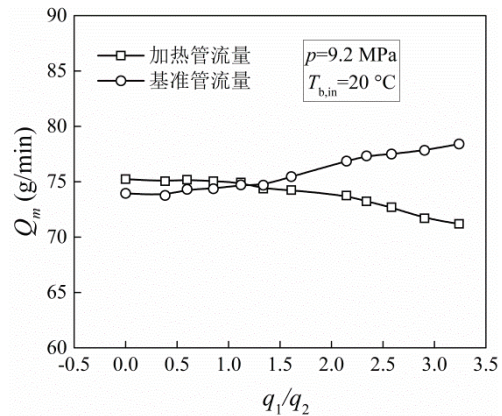


图 5 流量偏差特性 ( $p = 9.2 \text{ MPa}$ )

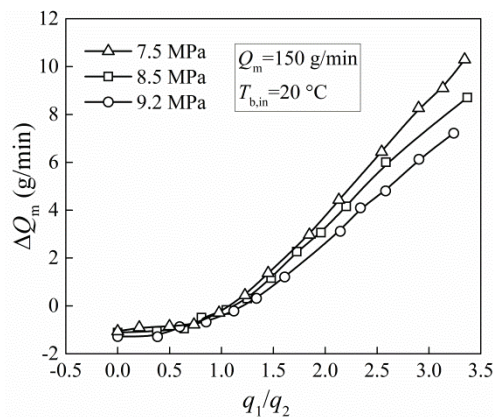


图 6 压力对流量偏差的影响

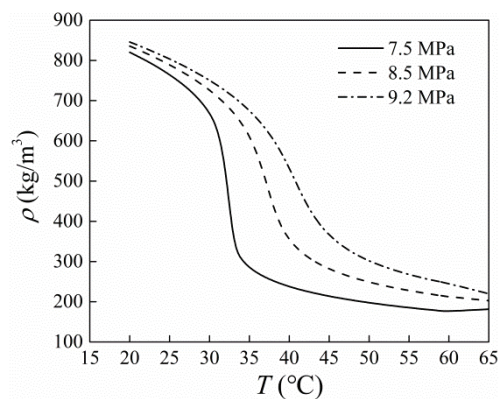


图 7 密度随压力变化关系

### 3.3 系统流量对流量分配的影响

系统总流量上升时，两支路间流量偏差变化并不明显，但是由于本小节系统总流量产生了变化，采用真实流量差比较已经不具有对比性，因此当采用支路流量比平均流量作为评价方法，即：

$$q_{m1} = \frac{2Q_{m1}}{Q_{m1} + Q_{m2}}$$

图 8 给出了系统压力 7.5MPa、试验段进口温度 20°C, 100g/min、150g/min、185g/min 三个不同质量流量下两并联支路相对流量随热流密度的变化趋势。可见随着流量增大, 两支路间相对流量差降低, 即当质量流量增加时系统总体的耐热性增加, 而因流量偏差而产生的加热管热负荷影响降低, 系统稳定性提高。

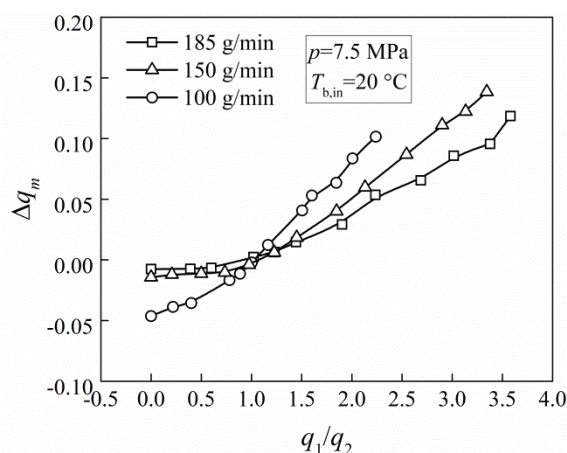


图 8 不同流量下  $\Delta q_m$  与  $q_1/q_2$  关系

#### 4 结论

本研究开展了超临界 CO<sub>2</sub> 在水平并联管道间流量分配的特性研究, 讨论了热流密度、压力、质量流量对并联管道流量分配的影响, 主要结论如下: ①管路间非均匀加热热流密度会导致加热管质量流量的减小, 基准管流量上升, 随着加热管热流不断增加, 该现象更明显。②提高系统压力可以减缓管路阻力上升趋势, 减少流量偏差, 提高系统稳定性。③提高质量流量, 虽然两支路真实流量分配偏差并无明显影响, 但是系统总体的换热能力增强, 从而减弱了热偏差对系统的影响, 系统稳定性提高。

#### 参 考 文 献

1. 张耀明, 邹宁宇. 太阳能热发电技术[M].北京: 化学工业出版社, 2016.
2. 赵新宝, 鲁金涛, 袁勇, 等. 超临界二氧化碳布雷顿循环在发电机组中的应用和关键热端部件选材分析[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36 (1): 154-162.
3. 朱波, 庞力平, 吕玉贤. 多并联分支管联箱气液两相流流量分配的研究[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2013, 40 (02): 95-100.
4. 李夔宁, 吴小波, 尹亚领. 平行流蒸发器内气液两相流分配均匀性实验研究[J]. 热能动力工程, 2009, 24 (06): 759-765+818-819.
5. Dario ER, Tadrist L, Passos JC. Review on two-phase flow distribution in parallel channels with macro and micro hydraulic diameters: Main results, analyses, trends[J]. Applied Thermal Engineering, 2013, 59 (1-2):



316-335.

6. Liu Y, Wang S. Distribution of gas-liquid two-phase slug flow in parallel micro-channels with different branch spacing[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 132: 606-617.
7. 冉振华, 徐国强, 邓宏武, 等. 超临界压力下航空煤油在并联管中流量分配特性[J]. 航空动力学报, 2012, (01): 63-68.
8. Zhang L, Cai B, Weng Y, et al. Experimental investigations on flow characteristics of two parallel channels in a forced circulation loop with supercritical water[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 106: 98-108.
9. Wang JH, Guo PC, Yan JG, et al. Experimental study on forced convective heat transfer of supercritical carbon dioxide in a horizontal circular tube under high heat flux and low mass flux conditions[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2019, 11 (3).
10. 颜建国, 朱凤岭, 郭鹏程, 等. 高热流低流速条件下超临界 CO<sub>2</sub> 在小圆管内的对流传热特性[J]. 化工学报, 2019, 70 (05): 1779-1787.

## Experimental investigation of flow distribution of supercritical carbon dioxide in parallel channels

BAI Chen-guang, YAN Jian-guo, GUO Peng-cheng\*

(State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, E-mail: [guoyicheng@126.com](mailto:guoyicheng@126.com))

**Abstract:** It is significant to understand the distribution law of supercritical CO<sub>2</sub> flowing in parallel channels for the design and optimization of energy transformation equipment, especially for new type solar thermal power station. In this paper, the flow distribution of supercritical CO<sub>2</sub> is carried out in two parallel tubes with an inner diameter of 2mm. The heating fluxes for two parallel channels are controlled by electric heating method. The influences of heat flux deviation, pressure and mass flow are analyzed. Test parameters range are as follows: system pressure 7.5-8.5 MPa, total mass flow 150-250 g/min, heat flux 15-100 kW/m<sup>2</sup>, fluid temperature 20-100°C. The results show that the flow deviation is intensified with increasing deviation of heat flux. The main reason for the uneven distribution of flow is caused by the deviation of heat flux between two parallel channels. It could weaken the flow deviation and improve the stability of the system by increasing the system pressure and the mass flow rate. The research results provide a theoretical basis and technical support for the design of energy conversion system in solar thermal power technology.

**Key words:** Flow distribution; Flow deviation; Supercritical fluid; Solar thermal power generation