

跨临界 CO₂ 引射制冷循环临界背压分析

王菲, 邓建强

(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 为了优化设计或控制引射系统的性能,建立了跨临界 CO₂ 引射制冷循环中引射器性能的设定背压模型,定义引射器临界背压为忽略引射器出口动能时的引射器迭代背压,分析了引射器背压和出口速度对系统性能的影响.结果表明:当引射器背压低于临界值时,引射系数保持不变,且在不同系统高压侧压力下均成立;系统性能系数(COP)随着背压升高而增大,在系统状态可控的情况下引射器背压应尽量靠近临界值.同时,不同背压下 COP 随高压侧压力变化的趋势相同,背压作为设计或控制参数不会影响高压侧压力的优化.引射器出口动能会因流动摩擦和冲击而转化成热量并造成系统的热力学损失,背压选取不当会造成较大的引射器出口速度,且随着背压降低,出口速度增大,随着系统高压侧压力升高,出口速度先急剧降低,再缓慢变化.

关键词: 二氧化碳;跨临界循环;引射器;临界背压

中图分类号: TB61 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2012)09-0066-05

Critical Back Pressure of Transcritical Carbon Dioxide Refrigeration Cycle with Ejector

WANG Fei, DENG Jianqiang

(School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The mathematical model of the ejector with contrivable back pressure in a transcritical carbon dioxide ejector-expansion refrigeration cycle was established. The critical back pressure of the ejector was defined as an iterative value by ignoring its outlet kinetic energy. The effects of the ejector back pressure and outlet velocity on the system performance were analyzed to optimize design or control the ejector system performance. The results show that the entrainment ratio can maintain constant when the ejector back pressure is lower than critical value at different high-side pressures. The coefficient of performance (COP) increases with the ejector back pressure. It seems that the ejector back pressure under controlled system status should be close to the critical value as far as possible. Moreover, the variation tendency of COP changes similarly with the high-side pressure at different back pressures. Back pressure as the design parameter or control parameter does not affect the optimization of high-side pressure. Due to flow friction and impact, the outlet kinetic energy of the ejector will transform into heat and eventually lead to thermodynamic loss. In addition, the improper back pressure will raise the outlet velocity, and the outlet velocity increases with the decrease in the back pressure. The outlet velocity decreases dramatically first and then varies slowly with an increase in the high-side pressure of the system.

Keywords: carbon dioxide; transcritical cycle; ejector; critical back pressure

近年来对地球臭氧层破坏和全球温室效应的担忧,使氯氟烃类(CFCs)制冷剂的使用受到了前所未有的关注,寻找环保替代工质成为当前的研究重点.对自然工质 CO₂ 的再次重视使得跨临界 CO₂ 蒸气压缩循环成为新的研究对象^[1]. 由于跨临界 CO₂ 制冷系统高压侧压力一般在 10 MPa 以上,而低压侧压力在 3~4 MPa,致使通过节流元件的压差高达 7 MPa 左右,为减少节流损失,提高系统能效,在蒸气压缩系统中应用引射器成为提高系统性能的选项^[2]. 目前,针对跨临界 CO₂ 引射制冷循环开展了大量性能模拟研究^[3-5],普遍认为在跨临界制冷系统中应用引射器可在系统高低压力侧之间形成中间压力,减少了压缩机压缩比和耗功,其引射循环性能系数(COP)相比传统蒸气压缩循环有 16%~22% 的明显提高,相关实验研究也表明引射系统可以减少 14.5% 的节流损失^[6].

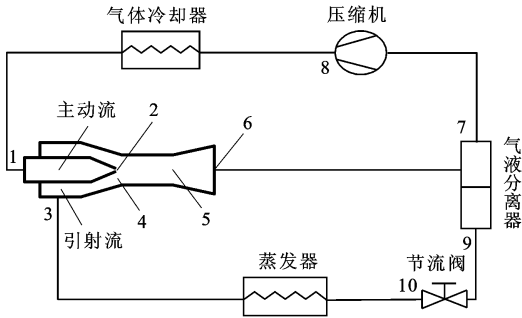
目前大部分针对引射制冷循环的一维稳态模拟比较集中于研究高压侧压力、气冷器出口温度等参数对系统性能的影响,引射器出口背压为迭代所得,并非设计或控制参数;在模拟时,一般假设引射器出口工质动能为 0 来获得相关理论数据. 实际上,作为引射循环重要部件的引射器,其进出口状态对引射器性能有重要的影响. Chen 等^[7] 根据实验研究发现,引射器背压存在临界值,当背压超过临界值时,一部分主动流不与引射流混合,而是回流至引射流管路,造成引射系数为负,对系统的稳定造成极其不利的影响. 另外,当实际背压低于临界背压时,为满足能量守恒,引射器出口会存在部分动能,该现象和影响也值得关注.

本文通过建立设定背压下引射器性能分析模型,开展模拟工作并与之前背压为因变量下的模型对比,提出了临界背压的具体定义和范围,从理论上探讨跨临界 CO₂ 引射制冷循环中引射器背压和出口动能对系统性能的影响,从而进一步掌握引射循环的相关系统特性.

1 工作原理

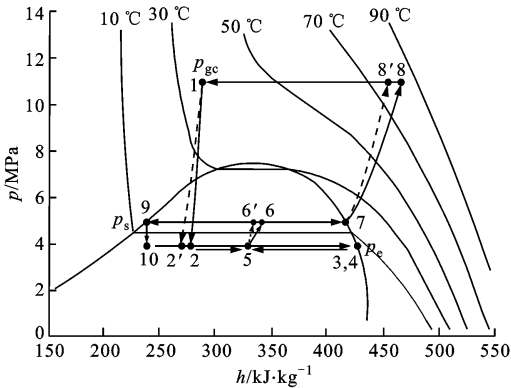
跨临界 CO₂ 引射制冷循环的物理模型如图 1 所示,图 2 为对应的压焓图. 超临界 CO₂ 在气体冷却器中冷却后进入主动流段,经喷嘴等熵膨胀降压后高速喷出,由于高速气体的挟裹作用,蒸发器中的低压蒸气进入引射器,两股流体在混合段内充分混合,交换动量,再经扩压段变为高压流体流出. 流体进入气液分离器后,一部分饱和蒸气经压缩机压

缩后再次进入气体冷却器,另一部分饱和和液体经节流阀节流降压后进入蒸发器,两股流体如此不断循环.



1:主动流入口;2:主动流出口;3:引射流入口;4:引射流出口;
5:混合段出口;6:扩压段出口;7:气液分离器气相出口;
8:压缩机出口;9:气液分离器液相出口;10:节流阀出口

图 1 跨临界 CO₂ 引射循环物理模型



1—2', 5—6', 7—8' 分别为实际流动过程 1—2, 5—6, 7—8 对应的等熵流动过程(图中各点与图 1 相对应); p_{gc} : 气体冷却器压力;
 p_s : 气液分离器压力; p_e : 蒸发压力

图 2 跨临界 CO₂ 引射循环压焓图

2 数学模型

2.1 模型假设

为了模拟引射器设定背压下跨临界 CO₂ 引射制冷循环的性能,本文做了以下简化假设:

- (1) 忽略制冷剂在引射器入口处的动能;
- (2) 忽略管道中的流动和热交换损失;
- (3) 蒸发器出口的制冷剂为饱和蒸气;
- (4) 混合过程等压且假定满足动量守恒;
- (5) 采用一维稳态模型,流体速度和温度在横截面上分布均匀;
- (6) 制冷剂在节流阀中为等焓节流.

2.2 建立模型

假设主动流的质量流量为 m_1 , 引射流的质量流量为 m_3 , 定义引射系数 $\mu = m_3/m_1$. 各段的计算模型如下.

(1) 主动流段: 流体经喷嘴等熵膨胀

$$\eta_n = (h_1 - h_2)/(h_1 - h_2') \quad (1)$$

式中: η_n 为喷嘴的等熵效率; h 为比焓, 其下标对应图 2 中各点位置.

由能量守恒得

$$h_1 = h_2 + \frac{1}{2}u_2^2 \quad (2)$$

式中: u_2 为主动流出口的流体速度.

(2) 引射流段: 基本保持恒压流动, 且流速缓慢, 由能量守恒得

$$h_3 = h_4 + \frac{1}{2}u_4^2 \quad (3)$$

(3) 混合流段: 由混合过程动量守恒得

$$u_5 = \frac{1}{1+\mu}u_2 + \frac{\mu}{1+\mu}u_4 \quad (4)$$

由引射器进口和混合段出口能量守恒得

$$h_5 + \frac{1}{2}u_5^2 = \frac{1}{1+\mu}h_1 + \frac{\mu}{1+\mu}h_3 \quad (5)$$

(4) 扩压段: 以往研究中, 引射器出口的压力等同于气液分离器内部压力, 一般认为该压力并非设定参数, 受系统中工质质量分布的影响. 模拟时一般忽略引射器出口动能, 在引射器出口速度为 0 且扩压段等熵流动的条件下迭代出引射器出口背压 p_6 , 模拟方法在引射器扩压段计算中体现, 见图 3 中方法 1. 本文采用图 3 中方法 2 来模拟引射器设定背压下的相关性能, 模拟时 p_6 为固定值, 扩压段的计算流程见图 3.

流体在扩压段中遵循等熵流动

$$\eta_d = (h_6' - h_5)/(h_6 - h_5) \quad (6)$$

式中: η_d 为等熵扩散效率.

由引射器能量守恒得

$$h_6 + \frac{1}{2}u_6^2 = \frac{1}{1+\mu}h_1 + \frac{\mu}{1+\mu}h_3 \quad (7)$$

为了维持循环的连续性^[3], 出口干度和引射系数应满足

$$x_6 = \frac{1}{1+\mu} \quad (8)$$

方法 1 假设出口动能为 0 来迭代得到出口压力、工质干度和引射系数; 方法 2 在已知出口压力的条件下, 来求取出口速度、工质干度和引射系数. 在两种方法的模拟计算过程中, 均先赋予 μ 一个初值, 经式(1)~(5)联合计算出扩压段入口的焓值 h_5 及

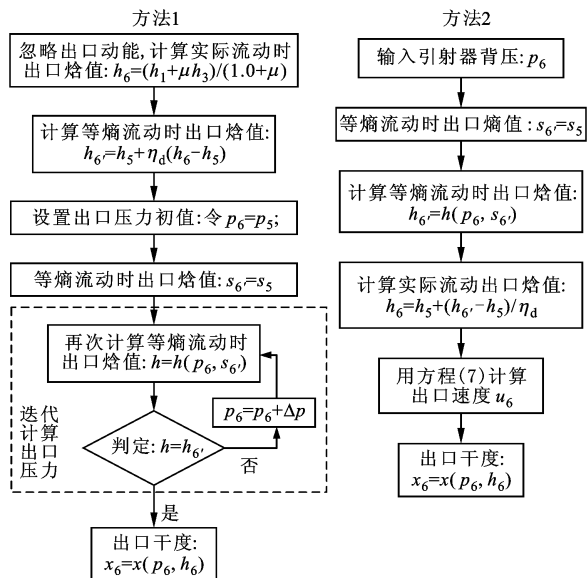


图 3 引射器扩压段计算流程图

焓 s_5 后, 代入图 3 中的程序进行计算, 得出引射器出口干度, 然后再迭代引射系数直至满足方程(8)后结束计算. 在引射制冷循环的一维稳态模拟问题中, 引射系数均需遵循方程(8)迭代求取.

3 计算结果分析

计算过程中系统的相关参数为: 气体冷却器出口温度 $T_{gc} = 36\text{ }^{\circ}\text{C}$, 蒸发温度 $T_e = 5\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\eta_n = 0.7$, $\eta_d = 0.8$.

根据能量守恒方程(7), 当出口速度为 0 时, h_6 存在最大值, 通过程序流程图计算时可以发现当其他条件已知时, 对应存在最大压力, 我们定义其为临界背压 p_{6cr} . 如果设计或控制背压大于该临界背压, 依据能量守恒方程计算出的引射器出口动能为负, 结果不合理. 相反, 若低于此值, 则出口处会残留一部分动能. 据此, 本文仅讨论引射器背压小于临界背压的情形.

模拟方法 1 和 2 仅为计算流程不同, 所构建的物理、数学模型是一致的, 图 4 描述了系统在两种模拟方法下引射系数和性能系数随高压侧压力 p_{gc} 的变化情况. 需要说明的是, 图中方法 2 的程序计算先预设 p_6 , 计算出的引射器出口速度 u_6 与设定值不符时, 迭代 p_6 . 由图可以看出, 在方法 2 下出口速度近似为 0 时得出的结果与方法 1 相同, 两种模拟过程的相关参数均一致. 当 u_6 为 50 m/s 时, 在本文物理模型假设下, 由于出口存在动能, 虽引射系数保持不变, 但 COP 明显下降, 确有研究价值.

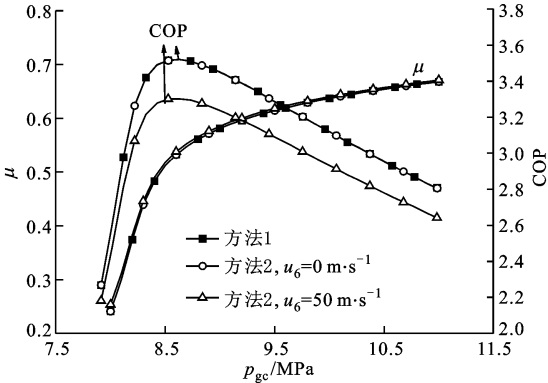


图 4 两种模拟方法下系统性能对比

图 5 为引射器临界背压随高压侧压力的变化情况。由图可以看出,随着 p_{gc} 的升高, p_{6cr} 在开始阶段迅速下降,之后变化速度放缓。

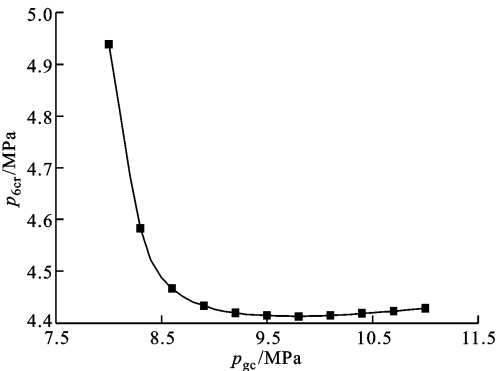


图 5 引射器临界背压随 p_{gc} 的变化

引射器出口存在较大动能时会因流动摩擦和冲击造成系统的热力损失,图 6 为系统在不同设定背压下,引射器出口速度随 p_{gc} 的变化趋势。由图可以看出,引射器背压选取不当会造成较大的出口速度 (≤ 115 m/s),同一背压下,随着 p_{gc} 的增加,速度先迅速降低,再保持稳定,最后缓慢上升, $p_6 = 4.4$ MPa 时的曲线最明显,这与图 5 中 p_{6cr} 的变化趋势相对应。当高压侧压力相同时,随着背压的升高,出口速度下降,直至接近 0,当设定背压超过 p_{6cr} 时,动能为负,导致 $p_6 > 4.4$ MPa 时数据不完整。

图 7 为 $p_{gc}=9.5$ MPa 时,不同蒸发压力下引射系数随背压的变化情况,图中实验数据取自文献 [7]。实验数据表明,当 p_6 小于某一临界值时,引射系数基本保持恒定,但当背压超过该值,引射系数会急剧下降。同时,随着 p_e 的增加,该临界值有增大的趋势。在本文模拟中,随着蒸发压力 (3.49、3.97、4.50 MPa, 分别对应蒸发温度 0、5、10 °C) 的升高,该临界值也有增大的趋势,且引射系数在设定背压

低于该值时保持恒定,这与实验数据是相一致的。

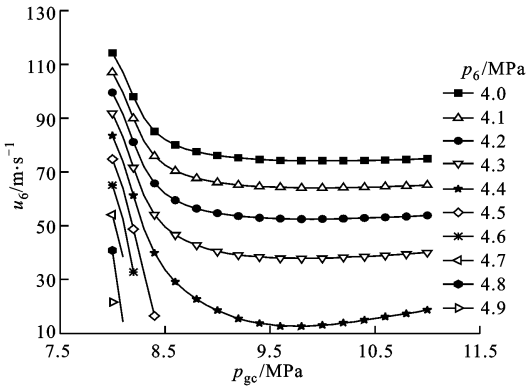


图 6 不同背压下 u_6 随 p_{gc} 的变化

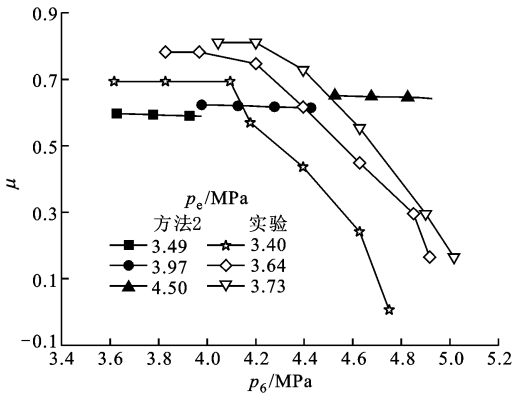


图 7 系统在不同蒸发压力下 μ 随 p_6 的变化 ($p_{gc}=9.5$ MPa)

图 8、9 分别描述了不同出口背压下 μ 和 COP 随 p_{gc} 的变化情况。由图 8 可知,当设定背压低于临界压力时,引射系数受背压变化影响很小,各曲线近似重合。图中在高压侧压力偏小时出现吻合不良是由于此时设定背压与临界背压差距过大造成的,随着 p_{gc} 的增大,此现象逐渐消失。同时,引射系数不受背压影响在不同高压侧压力下均成立。

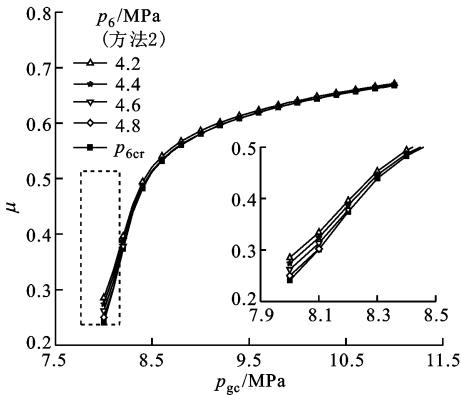


图 8 不同出口背压下 μ 随 p_{gc} 的变化

虽然背压变化对引射系数的影响很小,但对系统性能系数却有较大的影响.由图9可知,在不同背压下,COP随着 p_{gc} 的变化趋势相似且得出的最优高压侧压力大致相同,因此背压作为设定参数并不影响系统高压侧压力的优化.然而,由图中还可以看出,随着背压的升高,COP不断增大,并接近于临界背压时系统的COP.由此可见,背压对系统整体性能至关重要,在系统可控的情况下引射器背压应尽量靠近临界值,以提高系统性能.

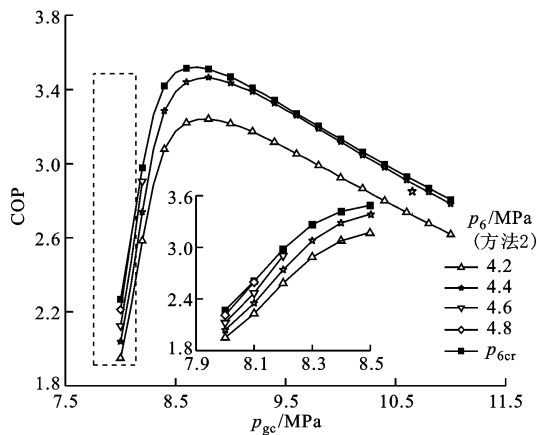


图9 不同出口背压下COP随 p_{gc} 的变化

4 结 论

本文针对跨临界 CO_2 引射制冷循环,研究引射器背压为设定参数时系统的性能,验证背压设定时迭代程序的可行性和有效性,分析引射器背压及出口速度对系统性能的影响,得出以下结论.

(1)假设引射器出口动能为0时获得引射器出口临界背压,当 $p_6 \leq p_{6cr}$ 时,引射系数不随 p_6 变化;当 $p_6 > p_{6cr}$ 时,依据守恒方程计算出的引射器出口动能为负,结果不合理.这一结论在不同高压侧压力下均成立.

(2)不同背压下COP随 p_{gc} 变化趋势相同,背压作为设定参数并不影响高压侧压力的优化;当 $p_6 \leq p_{6cr}$ 时,背压越靠近临界值,系统性能系数越高,损失越小,因此优化设计或控制时背压应尽量靠近临界值.

(3)引射器出口动能会因流动摩擦和冲击转化

成热量,最终造成系统的热力损失;引射器背压选取不当会造成较大的出口速度,且随着背压降低,出口速度增大,随着系统高压侧压力升高,出口速度先急剧降低,再缓慢变化.

参考文献:

- [1] LORENTZEN G. Revival of carbon dioxide as a refrigerant[J]. International Journal of Refrigeration, 1994, 17(5): 292-301.
- [2] 刘军朴,陈江平,陈芝久. 跨临界二氧化碳蒸气压缩/喷射制冷循环[J]. 上海交通大学学报, 2004, 38(2): 273-275.
LIU Junpu, CHEN Jiangping, CHEN Zhijiu. Thermodynamic analysis on CO_2 transcritical vapor-compression/ejection refrigeration cycle[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2004, 38(2): 273-275.
- [3] DENG Jianqiang, JIANG Peixue, LU Tao, et al. Particular characteristics of transcritical CO_2 refrigeration cycle with an ejector[J]. Applied Thermal Engineering, 2007, 27(2/3): 381-388.
- [4] LI Daqing, GROLL E A. Transcritical CO_2 refrigeration cycle with ejector-expansion device[J]. International Journal of Refrigeration, 2005, 28(5): 766-773.
- [5] 李涛,孙民,李强,等. 利用喷射提高跨临界二氧化碳系统的性能[J]. 西安交通大学学报, 2006, 40(5): 553-557.
LI Tao, SUN Min, LI Qiang, et al. Performance of trans-critical carbon dioxide system with ejector [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2006, 40(5): 553-557.
- [6] ELBEL S W, HRNJAK P S. Experimental validation of a prototype ejector designed to reduce throttling losses encountered in transcritical R744 system operation [J]. International Journal of Refrigeration, 2008, 31(3): 411-422.
- [7] CHEN Guangming, XU Xiaoxiao, LIU Shuang, et al. An experimental and theoretical study of a CO_2 ejector [J]. International Journal of Refrigeration, 2010, 33(5): 915-921.

(编辑 荆树蓉)