

DOI: 10.7652/xjtuxb201403001

双螺杆水蒸气膨胀机的研究与开发

吴华根, 唐昊, 陈文卿, 邢子文
(西安交通大学压缩机工程系, 710049, 西安)

摘要: 针对双螺杆水蒸气膨胀机的工作过程进行了理论研究,结果表明,在欠、过膨胀工作过程中回收功减少,且当压差相等时欠膨胀引起的做功能力下降幅度较小。通过研究内容积比、进口蒸汽热力参数和欠、过膨胀对双螺杆水蒸气膨胀机回收功和容积流量影响时发现:内容积比存在最优值,其可使膨胀机回收功最大;欠膨胀会导致膨胀功下降,膨胀机的容积流量减少。由此,提出了双螺杆膨胀机的经济性设计思路:在大中型双螺杆膨胀机的设计时宜采用欠膨胀工况,使膨胀终了压力接近且略大于出口背压,相应的内容积比小于最优内容积比。采用该思路进行设计,不仅可以得到较好的回收功,而且可使得膨胀机容积流量减少、经济性提高,为指导双螺杆膨胀机的设计提供借鉴。

关键词: 双螺杆膨胀机;水蒸气;回收功;内容积比

中图分类号: TB653 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2014)03-0001-05

Research and Development of Steam Twin Screw Expander

WU Huagen, TANG Hao, CHEN Wenqing, XING Ziwen
(Department of Compressor Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The expansion working process of a steam twin screw expander was theoretically studied. The influences of internal volume ratio, thermal parameters of inlet steam, under-and over-expansion on the recovery work of the steam screw expander were investigated. The effects of the deviation between the optimum internal volume ratio and the actual internal volume ratio on the recovery work and volume flow of the steam screw expander were analyzed. The results show that under-expansion and over-expansion can lead to the decrease in recovery work of the steam twin screw expander compared with full expansion. The decrement of recovered power by under-expansion is less than that by over-expansion when the pressure difference between the internal pressure of end expansion and discharge pressure is the same. There is an optimum internal volume ratio matching the maximum recovery work at certain thermal parameters of inlet steam. It is suggested that large scale twin screw expanders should be designed according to the under-expansion condition because under-expansion will cause small drop in the recovery work and significant decrease in the volume flow ratio.

Keywords: twin screw expander; steam; recovery work; internal volume ratio

工业生产中存在着大量的低温余热,如在石化、钢铁冶炼、火力发电、水泥制造等行业的生产过程

中,有大量的低品位水蒸气直接排放到空气和河流中,造成了热源浪费和环境污染。利用双螺杆膨胀

收稿日期: 2013-06-09。 作者简介: 吴华根(1977—),男,副教授。 基金项目: 教育部新世纪优秀人才支持计划资助项目(NCET-08-0439)。

网络出版时间: 2013-12-19

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20131219.1121.007.html>

机进行低品位水蒸气的余热回收,不仅可为企业产生直接的经济效益、降低环境热污染,而且可实现能源的有效梯次利用。双螺杆膨胀机初期投资少、维护费用低、可靠性高,很适合能耗较高的企业进行余能回收,从而降低生产成本。

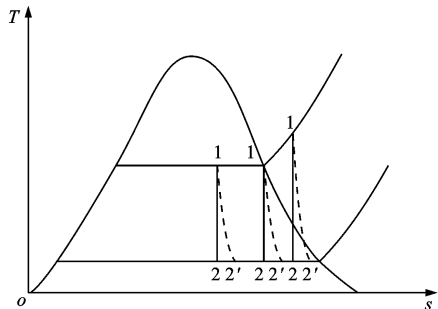
双螺杆膨胀机的研究始于石油化工业中低压气体利用,如油田气分离等^[1]。国外的研究主要是英国 City 大学有关有机朗肯循环系统中双螺杆膨胀机的特性研究^[2-4],研究中提出了在高温工况利用水蒸气作为第一级朗肯循环双螺杆膨胀机的工质,第二级采用有机工质进行热源的回收利用^[5],同时还提出了利用双螺杆膨胀机代替高压制冷系统中的节流阀,以提高系统的性能系数(COP)^[6]。国内研究也有综合性报道^[7],王维对螺杆膨胀机的结构参数与膨胀过程的关系进行了研究^[8],北京工业大学对单螺杆膨胀机的工作原理、运行特性及应用进行了深入研究^[9-10]。

本文主要针对双螺杆水蒸气膨胀机的工作过程和不同工况下工作性能的变化及影响因素进行了研究,并提出了双螺杆水蒸气膨胀机的设计准则,以期对相关技术研究提供参考。

1 膨胀做功过程分析

双螺杆水蒸气膨胀机的工作过程与双螺杆压缩机的工作过程相反,它经历了高压进汽、膨胀、低压排汽的过程^[11]。该过程中蒸汽、气液两相等热源工质直接送入双螺杆膨胀机工作腔,利用热源工质的膨胀带动阴阳转子转动,来驱动发动机、压缩机、发电机等机械设备,从而实现内能向动能或电能转换。

以水蒸气作为膨胀工质的膨胀过程温熵 $T-s$ 图如图 1 所示。在此工况下,双螺杆膨胀机的实际做功能力



1 为双螺杆膨胀机工作腔内水蒸气膨胀起始点;
2 为工作腔内等熵膨胀终点;2'为实际膨胀终点

图1 以水蒸气作为膨胀工质的膨胀过程 $T-s$ 图

$$P = q_m(h_1 - h_{2'}) \quad (1)$$

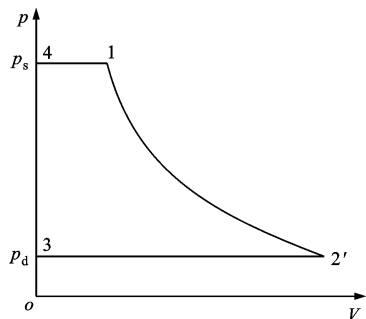
相应的等熵膨胀做功

$$P_{ad} = q_m(h_1 - h_2) \quad (2)$$

因此水蒸气双螺杆膨胀机的等熵膨胀效率

$$\eta_{ad} = \frac{P}{P_{ad}} = \frac{h_1 - h_{2'}}{h_1 - h_2} \quad (3)$$

该双螺杆膨胀机的膨胀做功过程 $p-V$ 图如图 2 所示。完全膨胀过程表示终了压力与出口背压相等。



过程线 4-1 为高压进汽过程;过程线 1-2' 为完全膨胀过程;

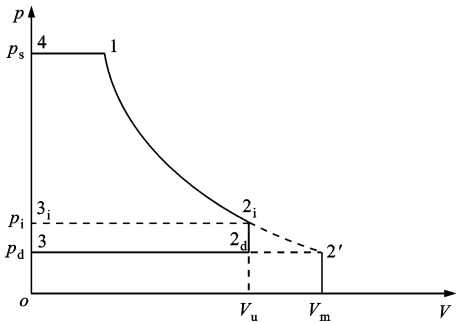
过程线 2'-3 为低压排汽过程

图2 双螺杆膨胀机膨胀做功过程 $p-V$ 图

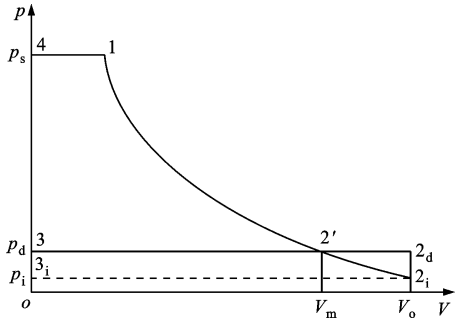
图 2 曲线所围面积 $S_{4-1-2'-3-4}$ 表征螺杆膨胀机的实际做功能力,图中 p_s 为进气压力, p_d 为排气压力。当点 2' 表示单位时间内的容积流量时,该面积的积分数值与式(1)中的 P 相等。

由于双螺杆膨胀机是容积式膨胀机,因此设计进汽和排汽孔口时必然考虑内容积比,而内容积比的大小决定着某一运行工况下膨胀过程中是否会产生欠膨胀和过膨胀。不管是欠膨胀还是过膨胀,都会对膨胀机的做功能力,即输出功产生影响。欠、过膨胀对膨胀机的做功能力和容积流量的影响如图 3 所示。

从图 3 可以看出:在同一进、排汽压力及进汽质量流量工况下(理想工作过程),欠膨胀时双螺杆膨胀机工作腔内膨胀终点为 2_i ,水蒸气做功能力可用面积 $S_{4-1-2'-3-4} - S_{2_i-2'-2_d-2_i}$ 表示,即为 $S_{4-1-2_i-2_d-3-4}$,相对于从完全膨胀到排气背压 p_d 而言,做功的减少量为面积 $S_{2_i-2'-2_d-2_i}$,该膨胀机的容积流量从完全膨胀时的 V_m 降到欠膨胀时的 V_u ,内容积比降低,从而减少了双螺杆膨胀机的体积和生产成本;过膨胀时,水蒸气做功能力可用面积 $S_{4-1-2_i-3_i-4} - S_{3-2_d-2_i-3_i-3}$ 表示,即为 $S_{4-1-2'-3-4} - S_{2'-2_i-2_d-2'}$,相对于从完全膨胀到排气背压 p_d 而言,做功的减少量为面积 $S_{2'-2_i-2_d-2'}$,该膨胀机的容积流量从 V_m 上升到过膨胀时的 V_o ,内容积比升高,从而增加了双螺杆膨胀机的体积和生产成本。



(a) 欠膨胀



(b) 过膨胀

2' 为完全膨胀工况下的内膨胀终点;

2i 为欠膨胀、过膨胀工况下的内膨胀终点;

2d 为欠膨胀排汽孔口打开时工作腔等容膨胀结束点

或为过膨胀排汽孔口打开时工作腔等容压缩结束点

图 3 欠、过膨胀对膨胀机的做功能力和容积流量的影响

2 双螺杆水蒸气膨胀机开发

根据实际运行工况参数,膨胀机进口的饱和水蒸气压力为 0.8 MPa,出口背压为 0.15 MPa,水蒸气流量为 6 t·h⁻¹。利用西安交通大学开发的 SC-CAD 软件设计开发了一种双螺杆水蒸气膨胀机,该膨胀机的基本参数如表 1 所示。在该参数设计中已考虑泄漏影响,其理论水蒸气流量为 5.5 t·h⁻¹。

表 1 双螺杆水蒸气膨胀机的基本参数

参数	数值	参数	数值
阳转子齿数	5	转子长度/mm	545
阴转子齿数	7	内容积比	4
阳转子外圆直径/mm	350	转速/r·min ⁻¹	3 000
阴转子外圆直径/mm	330	理论输气量/m ³ ·min ⁻¹	88.185

双螺杆水蒸气膨胀机的转子及主机分别如图 4 和图 5 所示。

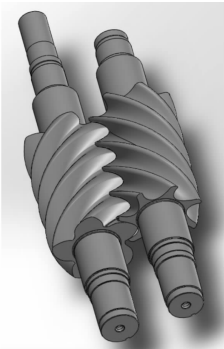


图 4 双螺杆水蒸气膨胀机转子

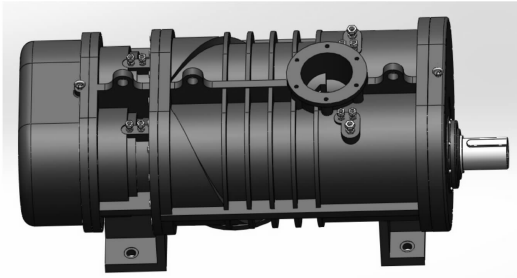


图 5 双螺杆水蒸气膨胀机主机

3 双螺杆膨胀机性能研究

在上述运行工况下,本文对双螺杆水蒸气膨胀机的膨胀做功能力进行了研究,分析了欠膨胀、过膨胀、不同内容积比和进口压力的影响,并假设工作过程中忽略了泄漏的影响,且等熵效率为 70%。

3.1 欠、过膨胀对膨胀机的影响

双螺杆膨胀机进口水蒸气可能是饱和的,也可能是过热的,因此在分析时增加了过热度对膨胀机做功能力的影响。在实际运行工况下,欠、过膨胀与完全膨胀的做功能力随过热度的变化如图 6 所示。欠膨胀工况点为本文双螺杆水蒸气膨胀机的设计工况点,进口压力为 0.8 MPa,欠膨胀工况下名义膨胀終了压力为 0.17 MPa,过膨胀工况下名义膨胀終了压力为 0.13 MPa,完全膨胀工况下膨胀終了压力为 0.15 MPa。

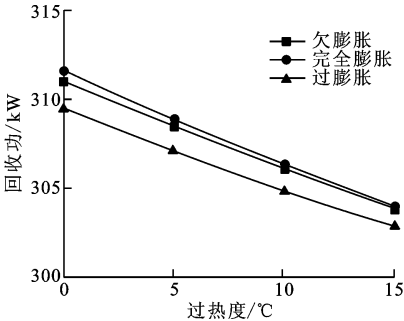


图 6 不同膨胀过程的做功能力随过热度的变化

从图 6 可以看出,相对于完全膨胀,欠、过膨胀都会导致膨胀机回收功减小,过膨胀对膨胀功的影响力大于欠膨胀,以饱和蒸汽为例(见表 2),欠膨胀导致的回收功减少量只有过膨胀的 25.2%。欠、过膨胀回收功相对于完全膨胀的减少率和容积流量增加率如表 2 所示。随着过热度的增加,膨胀机的回收功逐渐减小,这主要是因为随着过热度的增加,在同一进口压力下,进口水蒸气的比热容基本呈线性增加,密度减小,质量流量下降,从而造成回收功下降。相对于完全膨胀,回收功减少率随着过热度的增加逐渐减小,可见过热度增加会导致膨胀机做功能力下降,但下降幅度并不大。

表 2 欠、过膨胀回收功相对完全膨胀的减少率
和容积流量增加率

过热度/℃	回收功减少率/%		容积流量增加率/%	
	欠膨胀	过膨胀	欠膨胀	过膨胀
0	0.169	0.670	-8.177	15.606
5	0.123	0.559	-7.305	14.201
10	0.083	0.463	-6.449	12.876
15	0.050	0.380	-5.607	11.630

表 2 也反映出欠、过膨胀相对于完全膨胀的容积流量的增加率。相对于完全膨胀,欠膨胀可以减少膨胀机的容积流量,进气为饱和蒸汽时减少了 8.177%(意味着膨胀机的体积减小),回收功减少了 0.169%;相对于完全膨胀,过膨胀导致容积流量增加,在进气为饱和蒸汽时增加了 15.606%(意味着膨胀机的体积增大),回收功相应减少了 0.67%。由此可见,针对具体工况,双螺杆膨胀机应设计在欠膨胀工况点,这样可以减小主机体积,降低成本,而且回收功下降率仅小于完全膨胀的 0.2%,可以忽略。

3.2 内容积比对膨胀机的影响

在螺杆膨胀机中,内容积比是非常重要的参数,其决定着进汽孔口的位置和大小,同时会影响膨胀机的回收功。

在进口压力为 0.8 MPa、出口背压为 0.15 MPa、理论质量流量为 5.5 t·h⁻¹ 的饱和蒸汽运行工况下,内容积比对双螺杆膨胀机回收功及容积流量的影响如图 7 所示。

从图 7 可以看出,相同质量流量下,随着内容积比的增加,膨胀机回收功呈现先上升后下降的趋势。由此可知,对于某一确定工况,存在着最优的内容积比,其使得螺杆膨胀机的回收功达到最大,本文研究

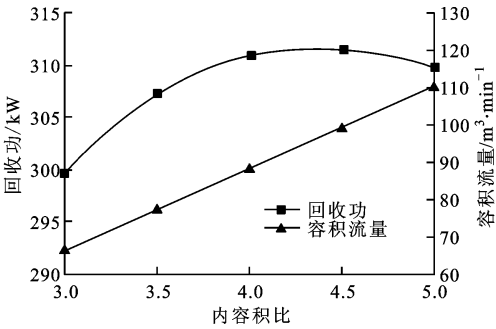


图 7 内容积比对双螺杆膨胀机回收功及容积流量的影响

中最佳内容积比为 4.5。当内容积比小于最佳内容积比时,会发生欠膨胀,反之会发生过膨胀。图 7 数据表明,欠膨胀导致的做功损失要小于过膨胀。与最佳内容积比相比,内容积比为 4 时,膨胀机回收功减少了 0.6 kW,容积流量减少了 11.04 m³·min⁻¹,膨胀终了压力与背压差值为 0.022 MPa;内容积比为 5 时,膨胀机回收功减少了 1.76 kW,容积流量增加了 11.03 m³·min⁻¹,膨胀终了压力与背压差值为-0.015 MPa。这也是本文膨胀机的内容积比选为 4 的原因。

从图 7 还可看出:当内容积比小于最佳情况时,随着内容积比的减小,膨胀机的回收功下降幅度要比容积流量下降幅度小,虽然小内容积比可以使膨胀机体积减小,暂时降低了生产成本,但从长久运行来说,小内容积比的回收功总量更少,膨胀机的总体经济性更差;当内容积比大于最佳情况时,膨胀机的回收功不仅下降幅度增大,而且容积流量也大幅增加,这使得双螺杆膨胀机的转子加工更困难。因此,选取的内容积比与最佳内容积比的偏差较大是不可取的。

综上所述来看,为了兼顾成本和回收功,双螺杆膨胀机在设计工况点的内容积比应该小于实际工况点完全膨胀时的内容积比,即膨胀机的膨胀终了压力应略高于出口背压,这样膨胀机可以适应进口水蒸气热力参数小幅变化却不影响自身的性能。

在进口压力为 0.8 MPa、出口背压为 0.15 MPa 下,保持理论容积流量不变时内容积比对双螺杆水蒸气膨胀机回收功及水蒸气的供给量(质量流量)的影响如图 8 所示。随着内容积比的降低,只要保证供给水蒸气,膨胀机的回收功会随之上升,但回收功上升幅度远不及水蒸气供给量的上升幅度,这就意味着在小内容积比下,需要水蒸气提供更多的热量,可见小内容积比时,膨胀机的经济性较差。在上述工况下,单位质量的水蒸气回收功随内容积比的变

化如图 9 所示。从图 9 可以看出,内容积比与最佳内容积比偏差越大,单位质量的回收功越少,采用小容积比时,单位质量回收功急剧下降。

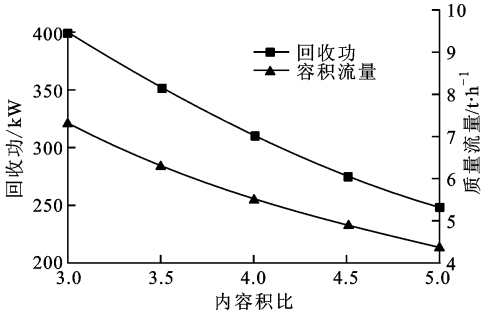


图 8 内容积比对双螺杆水蒸气膨胀机回收功及质量流量的影响

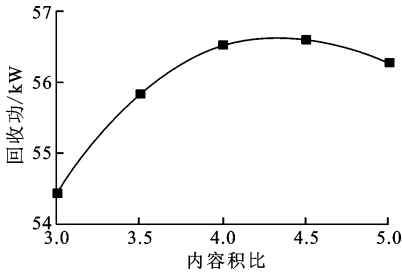


图 9 单位质量的水蒸气回收功随内容积比的变化

3.3 进口压力对膨胀机的影响

在不同进口压力下,容积流量和内容积比不变时膨胀机的回收功和质量流量随过热度的变化如图 10 所示。

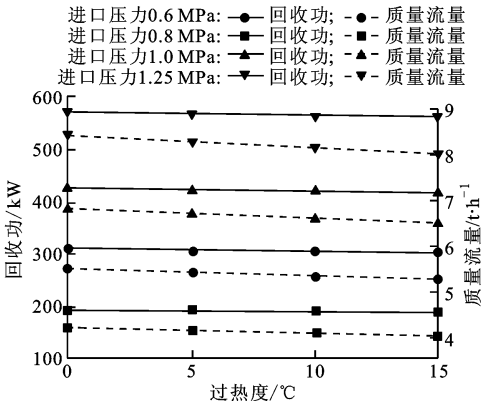


图 10 膨胀机的回收功和质量流量随过热度的变化

从图 10 可以看出,膨胀机的回收功随着进口压力的增加而增大。这是因为膨胀机的进口水蒸气比热容随压力的上升而减小,在相同的容积流量下,质量流量随之增大;出口背压相同时,进口压力上升,单位质量水蒸气的进、出口焓差增大,从而引起回收功增多。但是,随着过热度的增大,膨胀机的回收功略有下降,原因是质量流量在下降。进口压力为 0.8 MPa,

从饱和蒸汽到过热度为 15 °C 的过热蒸汽时,流经膨胀机的质量流量从 5.5 t·h⁻¹下降到 5.27 t·h⁻¹,下降了 4.18%,膨胀回收功从 310.995 kW 下降到 303.801 kW,下降幅度为 2.31%。总体来说,本文设计的膨胀机在 15 °C 过热度的范围内都能得到较好的回收功,在一定程度上拓宽了使用范围,可适用于进口工况在一定范围内的压力和过热度变化。

4 结 论

(1)欠、过膨胀都会导致双螺杆膨胀机回收功下降,相同压差下欠膨胀导致的回收功下降幅度要小于过膨胀。

(2)在水蒸气进、出口压力及质量流量一定的情况下,双螺杆膨胀机存在最优的内容积比,其可使膨胀机的回收功最大,膨胀机的容积流量随内容积比的增加而增大。

(3)在水蒸气进、出口压力及膨胀机容积流量一定的情况下,双螺杆膨胀机的回收功和质量流量随内容积比的增加而减少。

(4)对于给定的双螺杆膨胀机,在出口背压一定的情况下,膨胀机的回收功和质量流量均随进口压力的增大而增多,随过热度的增加而减少。

(5)在给定运行工况下设计双螺杆膨胀机时,宜采用欠膨胀工况,即膨胀终了压力接近但略大于出口背压,相应的内容积比小于最优内容积比,这样不仅可获得较理想的回收功,还可降低成本、拓宽膨胀机进口工况范围。

参考文献:

[1] 陈康平. 螺杆式膨胀机 [J]. 流体机械, 1980(2): 40-43.
CHEN Kangping. Screw expander [J]. Fluid Machinery, 1980(2): 40-43.
[2] SMITH I K. Development of the trilateral flash cycle system: part 1 Fundamental considerations [J]. Journal of Power and Energy, 1993, 207(A3): 179-194.
[3] SMITH I K, PITANGA M R. Development of the trilateral flash cycle system: part 2 Increasing power output with working fluid mixtures [J]. Journal of Power and Energy, 1994, 208(A2): 135-144.
[4] SMITH I K, STOSIC N, ALDIS C A. Development of the trilateral flash cycle system: part 3 The design of high efficiency two-phase screw expanders [J].

(下转第 16 页)