

# 透平增压泵在合成氨碳丙烯脱碳工艺中的应用研究

纪运广<sup>1</sup>, 徐洋洋<sup>1</sup>, 薛树旗<sup>1\*</sup>, Mike Oklejas<sup>2</sup>, 杨守志<sup>3</sup>

(1. 河北科技大学机械工程学院, 河北 石家庄 050018; 2. 奥氏透平科技公司, 美国 密歇根州 48103; 3. 石家庄海阔捷能科技有限公司, 河北 石家庄 050018)

**摘要:**以 10 万 t 合成氨变换气碳丙烯脱碳净化装置为应用对象, 设计了新型透平增压式能量回收系统, 在国内率先将透平增压泵应用于合成氨脱碳能量回收工艺。与现有余压能量回收装置相比, 透平增压泵结构独特, 调节工艺简单, 可很好地适应流体特性波动, 因而系统运行平稳, 故障率低, 寿命长, 综合效益明显。

**关键词:**合成氨脱碳; 余压能量回收; 透平增压泵; 调节

中图分类号: TP277

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2017)11-0158-04

DOI: 10.16606/j.cnki.issn 0253-4320.2017.11.036

## Application of turbo booster pump in decarbonization process of ammonia synthesis system

Ji Yun-guang<sup>1</sup>, Xu Yang-yang<sup>1</sup>, Xue Shu-qi<sup>1\*</sup>, Mike Oklejas<sup>2</sup>, Yang Shou-zhi<sup>3</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018, China; 2. Oklejas Turbo Solutions LLC, MI 48103, USA; 3. Shijiazhuang Haikuojieneng Technology Co., Ltd., Shijiazhuang 050018, China)

**Abstract:** A new type of turbo booster energy recovery system is designed and applied in the propylene carbonate based decarbonization process of 100,000 tons per year ammonia synthesis system, which is the first in China. Compared with existing residual pressure energy recovery equipment, the turbo booster pump has a distinctive structure and is easier to operate. It can adapt well with the characteristic fluctuation of fluid and therefore it runs more smoothly, and has lower failure rate, longer service life and greater comprehensive benefits.

**Key words:** decarbonization process in ammonia synthesis system; residual pressure energy recovery; turbo booster pump; regulation

合成氨是一个高能耗的产业, 每生产 1 t 0.1 MPa、298 K 的气态氨, 能耗大约 20 GJ。其中合成氨脱碳工艺更是一个能量密集且非自发的过程, 其能耗约占整个合成氨总耗能的 10%<sup>[1]</sup>。在脱碳工艺中, 富液从吸收塔排出时需经过减压阀进入再生塔。如果将减压阀耗散的余压能回收再利用, 可节省庞大的能源成本。因而, 针对于合成氨脱碳工艺中的余压能量回收极具社会和经济价值, 符合我国合成氨工业未来的发展方向。

## 1 传统的合成氨碳丙烯脱碳工艺和现有能量回收技术

### 1.1 传统合成氨碳丙烯脱碳工艺

碳丙烯脱碳溶剂 (C<sub>4</sub>H<sub>6</sub>O<sub>3</sub>) 性质稳定、再生容易、净化度高、价格便宜等, 使之成为众多小型合成

氨系统中常用的一种湿法脱碳方式, 即 PC 法脱碳<sup>[2-3]</sup>。表 1 是碳丙烯溶剂脱碳的一般操作环境。

表 1 碳丙烯液的一般操作环境

试剂	吸收压力/ MPa	操作温度/ ℃	原料气 CO <sub>2</sub> 质量分数/%	净化气 CO <sub>2</sub> 质量分数/%
PC	1.4~2.0	25~38	20~30	0.2~1.0

碳丙烯溶剂在高压环境下吸收并脱除工艺气体中的酸性气体, 在低压环境下进行再生, 然后增至高压形成循环<sup>[4]</sup>。此类脱碳方法吸收塔中压力越高, 越有利于酸性气体的脱除, 因此在吸收塔底的出口积攒着大量余压能。

传统碳丙烯脱碳工艺原理如图 1 所示, 具有以下不足: 碳丙烯脱碳工艺流量大、压差小、流量波动大; 采用减压阀直接将高压富液减压, 能量浪费严

收稿日期: 2017-05-08; 修回日期: 2017-08-30

基金项目: 河北省高等学校科学技术研究重点项目 (ZD2015090); 石家庄市科学技术研究与发展计划项目 (161080203A); 河北省留学人员科技活动择优资助项目 (CL201607); 河北省科技计划项目 (17394505D); 河北省高层次人才资助项目 (E2016100006)

作者简介: 纪运广 (1972-), 男, 博士, 讲师, 研究方向为液体余压能量回收、流体机械设计技术; 薛树旗 (1962-), 男, 教授, 研究方向为机电控制技术, 通讯联系人, 0311-81668641, xueshuqi@hebut.edu.cn。



反渗透海水淡化系统中已普遍应用,其核心技术是将高压富液的能量直接转化成低压贫液的能量,如图 5 所示。透平增压泵与一级增压泵接力使用,分摊高压贫液循环泵所承受的压力,降低贫液循环泵的能耗,使整个机组密封性能要求降低,相对提高了系统密封性能,延长了系统稳定运行的周期。

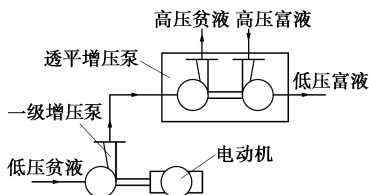


图 5 透平增压式能量回收方式

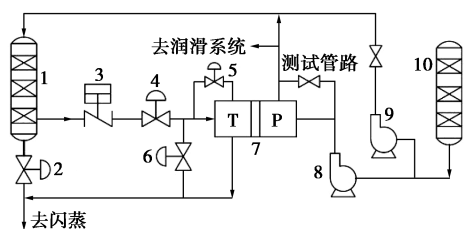
### 3 透平增压泵能量回收技术应用案例

以河北景化化工设备有限公司 2 套独立运行的合成氨碳丙烯脱碳净化装置为例,系统最大循环流量 1 000 m<sup>3</sup>/h,脱碳吸收塔在 1.8 MPa 下操作,高压富液流经液位调节阀节流减压至 0.4 MPa 后进入闪蒸罐,高达 1.4 MPa 余压能通过减压阀损失掉,造成脱碳工艺电耗居高不下,脱碳富液能量的高效回收利用可从根本上降低脱碳工艺的电耗。

采用透平增压泵技术对上述装置进行节能改造。透平增压泵式能量回收系统主要包括能量回收装置工艺系统、辅助润滑系统 2 部分。

#### 3.1 透平增压泵式能量回收装置工艺设计

传统合成氨碳丙烯脱碳工艺中,主要能耗点集中在“减压阀+高压贫液循环泵”。能量回收系统加入透平增压泵,保留、备用“减压阀+高压循环泵”。两路相对独立,切换方便,具体如图 6 所示,吸收塔底部出口 DN600 mm 管线后续设为 A、B、C 3 路:A 路管径 DN450 mm,经过一系列管道阀门直接进入透平增压泵透平侧进行能量回收;B 路管径为 DN125 mm 的旁路;C 路管径为 DN600 mm,透平增



1—脱碳吸收塔;2—液位调节阀;3—快速切断阀;4—节流阀;  
5—辅助阀;6—旁通阀;7—透平增压泵;8—循环供料泵 1#;  
9—循环供料泵 2#;10—脱碳再生塔

图 6 透平增压式能量回收工艺原理及主要配置

压泵出口、旁路及经过液位调节阀的线路汇合为一路前往闪蒸。透平增压泵采用 B 回路旁路调节,避免了工艺波动,稳定了透平增压泵的输出功率<sup>[7]</sup>。

透平增压泵与贫液循环泵 1# 串联分级增压,贫液循环泵 2# 备用,通过降低贫液循环供料泵出口压力来降低其电耗,并采用 VFD 调节,这比节流阀和旁通阀调节更节能。该系统对流体特性波动的适应性更强,大流量下运行,规模效应明显。

正常运行时,85% 的高压富液流量经吸收塔底部透平侧进行能量回收,全部的低压贫液经泵侧增压,约有 2/3 的增压是靠一级循环泵来完成的。与透平增压泵直接关联的有 3 个阀门,位于透平增压泵透平入口的节流阀,透平入口的辅助阀,以及透平增压泵并行的旁通阀,其中节流阀可以容纳所有高压富液流量通过并产生相应压降来适应透平增压泵透平侧压力,辅助阀可以通过 10%~15% 的流量,旁通阀则可以通过 20% 的流量,这 3 个阀相互配合完成吸收塔的液位调节。

系统正常运行过程中,如果吸收塔液位下降,液位控制器发出信号,辅助阀关闭,减少进入透平侧流量,液位上升;当吸收塔液位上升,液位控制器发出降低液位的信号时,节流阀逐渐打开,辅助阀打开以增加流量,若液位仍在上升,则辅助阀完全打开,旁通阀逐渐打开,让更多的流量通过旁路。在正常操作中,10%~15% 的调节量足以满足液位的调节。如果液位急剧不可控变化,则需要液位调节阀和快速切断阀进行紧急辅助调节。

#### 3.2 透平增压泵辅助润滑系统设计

透平增压泵内部装有自润滑推力轴承和中心轴承,直接使用来自透平增压泵的高压贫液进行润滑,所需流量不超过总流量的 1%。为保证系统安全运行,润滑液设有 2 个来源:一是来自透平增压泵泵侧的高压贫液;二是当透平增压泵泵侧无法提供高压贫液时,则由润滑泵供给,工艺原理如图 7 所示。液体自润滑轴承避免了轴封及其辅助系统的使用,降低了维护成本。

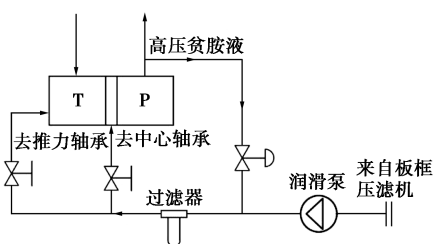


图 7 透平增压泵辅助润滑系统原理图

轴承润滑系统对润滑液具有较高的清洁度要求,轴承安装部位间隙较小,杂质进入易造成堵塞及轴承划伤,致使透平增压泵无法正常工作,一般需前置安装精度120目左右的过滤器,精度不宜过高或过低,过高易造成堵塞,过低会造成过滤质量低,造成轴承损伤。

### 3.3 透平增压泵主要技术指标

#### 3.3.1 透平增压泵的设计参数

表2所示为应用于河北景化化工设备有限公司的透平增压泵的主要参数。

表2 透平泵主要设计参数

参数	数值	参数	数值
系统工艺流量/( $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ )	1000	泵流量/( $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ )	1000
透平流量/( $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ )	850	泵进口压力/MPa	1.6
透平进口压力/MPa	1.8	泵出口压力/MPa	2.3
透平出口压力/MPa	0.4	综合回收效率/%	67.2

#### 3.3.2 透平增压泵综合回收效率

透平增压泵的转化效率是能量回收系统是否正常运行且达到设计要求的一个关键因素:

$$\eta = [Q_p \times (P_{p,\text{out}} - P_{p,\text{in}})] / [Q_t \times (P_{t,\text{in}} - P_{t,\text{out}})] \quad (1)$$

式中, $P_{p,\text{out}}$ 为泵侧出口压力; $P_{t,\text{out}}$ 为透平侧出口压力; $P_{p,\text{in}}$ 为泵侧进口压力; $P_{t,\text{in}}$ 为透平侧入口压力; $Q_p$ 为泵侧流量; $Q_t$ 为透平侧流量。

#### 3.3.3 经济可行性评估

经济可行性评估是根据具体情况对选用液力透平增压泵是否合理进行分析。建议以3年回收其设备投资为参考标准<sup>[8]</sup>。判定原则如下:

$$K = (M_1 \times B_{\text{HP}} \times 26\ 280) / M_2 \geq 1 \quad (2)$$

式中, $K$ 为经济系数; $B_{\text{HP}}$ 为输出功率,kW; $M_1$ 为电力成本,元/kW; $M_2$ 为透平增压泵一次性投资+3年预计维修费用,元。

### 3.4 系统投入使用注意事项

#### 3.4.1 溶液清洁程度不足

经数次系统调试结果分析,氨液洁净程度不足以对轴承造成损伤,前置过滤器压差大,系统无法正常稳定运行。最新的透平增压泵配备了PEEK材料轴承,最大限度地提高轴承寿命。

过滤器选用应综合考虑过滤精度、允许的压力降、纳污容量、通透能力等因素<sup>[9]</sup>。其工作能力主要取决于滤芯的有效过滤面积、滤芯本身性能、液体黏度、过滤前后压差等<sup>[10]</sup>。

$$A = (Q\mu/\delta\Delta P) \times 10^4 \quad (3)$$

式中, $Q$ 为过滤器的额定流量,L/min; $\mu$ 为液体的动

力黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ; $\Delta P$ 为压力差,Pa; $\delta$ 为滤芯材料的单位过滤能力, $\text{L}/\text{cm}^2$ 。

#### 3.4.2 吸收塔液位高度问题

保证氨液系统循环稳定,脱碳塔液位要求超过60%,保持在较高的液位。如图8所示的现场运行监控界面可知,系统运行稳定,液位一直保持在61%~65%。



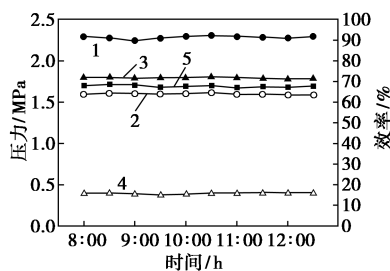
图8 现场运行监控画面

### 3.5 系统应用效果分析

透平增压泵能量回收系统一级贫液循环泵采用MD900-50×5,润滑油泵采用GSF-F-5,2016年3月开始安装运行,经过一系列调试,透平增压泵能量回收系统运行基本稳定,吸收塔液位维持在61%~65%,综合能量回收效率在65%以上,如图9、图10分别为透平增压泵系统应用现场以及某时间段系统运行数据记录。河北景化化工设备有限公司2套独立运行的变换气碳丙烯脱碳净化装置每年运行330d,2套装置共节约 $763.54 \times 10^4$  kWh,节约电力成本534.47万元。



图9 透平增压泵现场运行图



1—泵出口压力;2—透平入口压力;3—泵入口压力;  
4—透平出口压力;5—透平增压泵效率

图10 透平增压泵运行参数

发和大量出入通道的液体内循环,从而达到强化T形翅片管管外沸腾传热的作用。Gewa-T管传热示意图见图1。

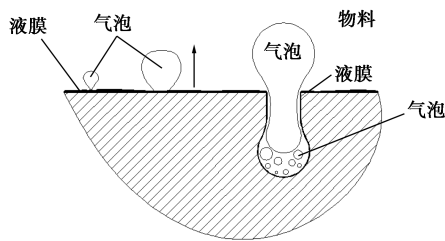


图1 Gewa-T管传热示意图

## 2 Gewa-T管性能特点

Gewa-T管主要特点为:①传热效率高,Gewa-T管对于工业酒精和轻质油品管外沸腾传热系数相较于光管能提高到2倍以上;同样对于R113工质管外沸腾传热系数则比光管高1.6~3.3倍<sup>[7-8]</sup>。②沸腾所需传热温差小,研究表明,相同热流密度时,T形翅片管实现沸腾的传热温差仅为光管的1/5~1/2<sup>[9]</sup>。③不易结垢,T形翅片管凭借T形翅片隧道内剧烈的气液交换和T缝出口气体高速喷出,保证了内部槽面和管外表面都不易结垢。

Gewa-T管凭借以上优势,能够很好达到强化传热和防垢的目的,是强化传热与防结垢技术结合起来的典型管型代表。

## 3 Gewa-T管重沸器工艺计算

对于T形翅片管重沸器设计计算可按图2流程进行,T形翅片管用于物料壳程沸腾,管内物料为无相变的显热传热或水蒸汽冷凝传热等操作工况,管内传热系数与压降计算和光管相同,本文中重点介绍管外沸腾传热与壳程压降的工艺计算模型,并给出工业设计计算实例。

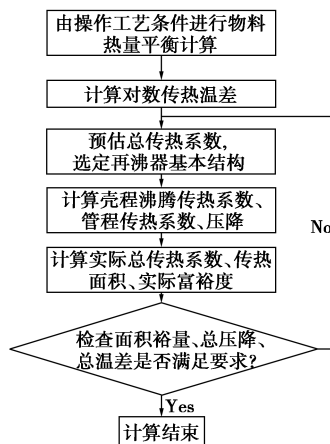


图2 Gewa-T管重沸器设计计算流程

### (1) Gewa-T管内传热计算

管内单相对流换热,目前公认且广泛应用的管内单相流体换热系数计算为Dittus-Boelter公式<sup>[1]</sup>:

(上接第161页)

## 4 总结

针对合成氨碳丙烯脱碳工艺流量大、压差小、流量波动大的特点,在国内首次将透平增压泵应用于碳丙烯脱碳能量回收装置中,整个系统调节控制简单,适应性强,系统运行平稳,综合回收效率高。应用透平增压泵后,显著降低系统故障发生率,停机检修时间缩短,带来良好的节能效果和可观的经济效益,对余压能量回收利用起到工程示范作用。

(1)对现有的气体净化系统改造,采用透平增压泵技术可极大地降低系统能耗、设备故障率,投资回收期短。采用透平增压泵加压减小扬程,不会增加电耗,真正达到节能的效果。

(2)对新建的气体净化设备直接配备透平增压式能量回收系统,一级供料泵流量不变扬程降低,选型更方便,成本更低,控制系统规格同样会降低。

## 参考文献

- [1] 马亮,薛树琦,闫文召.余压透平发电技术在合成氨工艺中应用研究[J].现代化工,2014,34(6):124-127.
- [2] 唐俊丽.合成氨工艺脱碳方法评述[J].化学工程师,2011,(12):34-36.
- [3] 章渊昶,牛月清,陈平,等.合成氨脱碳工艺和脱碳设备的技术改造[J].化工进展,2014,33(8):2224-2227.
- [4] 王照成,李繁荣,周明灿.余压能量回收装置在湿法脱碳工艺中的应用[J].化肥设计,2013,51(3):46-49.
- [5] 黄武星,孙彦发.能量回收液力透平泵在净化脱碳系统的应用[J].煤化工,2014,2(1):67-68.
- [6] 祝成耀,薛树琦,刘静.余压能量回收技术在柴油加氢精制工艺中的应用研究[J].现代化工,2015,35(7):124-127.
- [7] 张立胜,裴爱霞,术阿杰,等.特大型天然气净化装置液力透平能量回收技术优化[J].天然气工业,2012,32(7):74-76.
- [8] 肖涛.液力透平的选择与应用[J].科技视界,2015,(6):7-8.
- [9] 肖庆荣,郑远,叶萍.液压过滤器在在液压系统中常见故障及分析[J].液压与气动,2011,(12):116-117.
- [10] 汪龙.液压过滤器的选型设计与分析[J].过滤与分离,2016,26(2):17-20. ■