

粘胶纤维生产过程中蒸发器、结晶机设备能耗控制的研究

康巍山 王明 王华春 余志斌

库尔勒中泰纺织科技有限公司 新疆 库尔勒 831000

【摘要】粘胶纤维生产过程中，蒸发器和结晶机是能耗较高的关键设备。传统蒸发系统依赖独立的减温减压装置，能量梯级利用不充分；结晶机采用蒸汽喷射泵实现负压，存在蒸汽消耗量大、运行效率低的问题。本文从设备能耗控制的角度出发，系统分析了蒸发器和结晶机的能耗特征与节能潜力，重点探讨了蒸发器通过合并减温减压装置实现大系统自控调节的技术路径，以及结晶机采用真空泵替代蒸汽喷射泵构建负压系统的节能方案。通过优化蒸汽管网配置、整合减温减压功能、实施全系统协调控制，以及合理选配真空泵并优化运行参数，可显著降低设备能耗，提升能源利用效率。研究成果为粘胶纤维生产企业实施节能改造提供了理论依据和技术参考。

【关键词】粘胶纤维；蒸发器；结晶机；能耗控制

DOI:10.12417/3083-5526.25.10.009

1 引言

粘胶纤维是用天然纤维素为原料，经过碱化、黄化、溶解、纺丝等一系列工艺制成的再生纤维素纤维。在生产过程中，酸浴（硫酸、硫酸锌、硫酸钠混合溶液）的蒸发浓缩以及硫酸钠的结晶析出，是决定产品质量及原材料回收再利用的重要工序^[1]。蒸发器用来浓缩酸浴，除去多余的水分，使酸浴的浓度达到工艺要求；结晶机从蒸发后的酸浴中析出硫酸钠晶体，达到酸浴组分平衡、副产品回收的目的^[2]。这两台设备长期连续运转，并且要在高温、腐蚀性介质中工作，因此其能源消耗在粘胶纤维生产过程中所占的比重较大^[3]。

2 蒸发器能耗控制技术

2.1 传统蒸发系统的能耗特征

粘胶纤维生产中蒸发器一般采用多效蒸发工艺，用前效蒸发产生的二次蒸汽做后效的热源，从而减少新鲜蒸汽的消耗。但是蒸发系统蒸汽供应环节存在较大的能量浪费。传统设计中，每台蒸发器或者每个蒸发组都配备一套独立的减温减压装置，它的作用就是把动力车间送来的中压或者高压蒸汽降压到蒸发器加热室所需要的低压饱和蒸汽^[4]。减温减压装置由减压阀、减温器和有关仪表组成，减压阀利用节流作用来降低蒸汽的压力，在这个过程中蒸汽的做功能力白白消耗掉，而且会产生不可逆的能量损失。更重要的是，各个蒸发机的负荷不是固定的，随着酸浴进料浓度、流量、产品品种的变化，各个蒸发机的蒸汽需求量也会随之变化。当某台蒸发器负荷下降时，减温减压阀应开大一些来减小蒸汽流量，节流损失增大，效率下降^[5]。

2.2 合并减温减压装置的原理与优势

针对以上问题，有效的节能技术就是将分散在各个蒸发器上的减温减压装置集中起来，形成一个蒸汽减温减压站，然后利用大系统的自控调节来实现蒸汽的合理分配。合并减温减压装置就是取消每台蒸发器独立的减压阀、减温器，而是在蒸汽

总管上设一套能力能满足全部蒸发器总用汽量的集中式减温减压装置。来自锅炉房的中压蒸汽先经过集中减温减压站，将压力降到蒸发系统所需的压力，再由蒸汽分配总管输送到各个蒸发器。这种集中处理的方式有明显的节能作用。集中减温减压装置采用高效压力调节阀、减温器的设计工况更接近实际运行工况，节流损失比分散式多组小阀门小。其次可以减少减压环节，减小总的节流损失。更重要的是，集中减温减压给大系统协调控制打下了基础。在集中式供汽系统中，蒸汽分配总管上压力由集中减温减压装置来统一控制，各个蒸发器不再需要各自调节进汽压力，只需要通过开闭进汽阀门来控制蒸汽流量，阀门可以保持全开或者较大开度运行，节流损失很小。因此，整个蒸发系统的蒸汽供应由原来的多级分散调节变为一级集中调节，能量匹配更合理。

2.3 大系统自控调节的实现方式

合并减温减压装置之后，必须配套建立大系统自控调节系统，从而达到蒸汽供应准确控制、蒸发系统高效运转的目的。大系统自控调节的思想就是用蒸汽分配总管压力作为被控变量，调节集中减温减压装置中减压阀的开度来保持总管压力稳定，各个蒸发机的蒸汽需求量由蒸发器自身的工艺参数（进出料温度、浓度等）来决定，通过调节进汽阀的开度来控制进汽量。为了使系统得到更好的运行，应该采用先进的控制策略。传统的单回路PID控制虽然可以满足基本要求，但是蒸发系统负荷变化具有大惯性、纯滞后和非线性等特点，容易出现超调或者振荡。可以采用串级控制方案，把蒸汽分配总管压力当作主变量，集中减温减压装置的减压阀开度当作副变量，构成串级调节系统，提高抗干扰能力。同时引入前馈控制，把蒸发器总负荷的变化提前输入到控制算法中，当有多台蒸发器同时升负荷或者降负荷的时候，控制器可以提前调节减压阀的开度，减小总管压力的波动幅度。

3 结晶机能耗控制技术

3.1 传统蒸汽喷射泵的能耗问题

粘胶纤维生产时,结晶机是把蒸发后得到的酸浴中的硫酸钠晶体析出。为了使酸浴在较低温度下蒸发水分、促进结晶析出,结晶机内部需要保持一定的真空度,一般绝对压力在较低水平。传统的结晶机使用蒸汽喷射泵作为真空获得设备。蒸汽喷射泵是利用高压蒸汽通过文丘里管时产生的高速射流,在喷嘴出口处形成低压区,从而抽吸结晶机内不凝性气体和水蒸气,保持系统的负压。该设备无机械运动部件、结构简单、可靠性高、适合腐蚀性介质,所以在化工行业得到广泛的应用。但是蒸汽喷射泵的能耗问题比较突出。其动力来源是高压蒸汽,喷射泵工作蒸汽消耗量大,一台中等规模的结晶机所用蒸汽喷射泵每小时耗蒸汽可达数吨。蒸汽喷射泵的效率受背压、压缩比的影响比较大,当结晶机真空度要求高或者蒸发负荷变化时,喷射泵实际运行效率会明显降低,甚至需要多级串联才能达到所需的真空度,从而增加蒸汽消耗。

3.2 真空泵替代蒸汽喷射泵的技术方案

蒸汽喷射泵能耗高的问题可以用机械式真空泵来代替,这是节能的途径之一。机械真空泵(水环式真空泵、罗茨真空泵、干式螺杆真空泵等)用电动机驱动,靠机械运动直接抽吸气体,能量转换效率比蒸汽喷射泵高得多。同等抽气速率时,机械真空泵的能耗只有蒸汽喷射泵的很小一部分,节能效果明显。粘胶纤维结晶机的工作环境里,因为存在一些酸雾以及结晶盐颗粒,所以对真空泵的耐腐蚀性以及可靠性有着较高的要求。水环式真空泵用水作工作液,可以有效地吸收和稀释腐蚀性介质,结构简单、维护方便,是目前取代蒸汽喷射泵的主要设备。其工作原理是叶轮偏心地装在泵体内,叶轮转动时工作液在离心力的作用下形成液环,液环与叶轮叶片之间产生容积周期性的变化,从而完成气体的吸入、压缩和排出。水环式真空泵可抽吸含水蒸气及不凝性气体的混合气体,排气温度低,适合作为结晶机的工况条件。改造方案具体实施步骤为,先拆除原来的蒸汽喷射泵及其蒸汽管道、蒸汽阀门;然后根据结晶机容积、操作真空度、抽气量选配合适的水环式真空泵,并配备气液分离器、换热器、循环水管路;再将真空泵的进气口与结晶机抽气口相连,排气口与原有尾气处理系统或直接排向大气;最后设置自动控制系统,根据结晶机内部真空度信号自动启停真空泵或者调节旁通阀开度,保持真空度稳定。对结晶机数量较多的大型生产线,可以采用集中真空站的方式,用一组真空泵并联工作,通过总管给多台结晶机提供负压,从而降低单位抽气量的能耗。

3.3 负压系统优化与运行管理

用真空泵代替蒸汽喷射泵后,要对整个结晶系统的负压系统做进一步的优化设计和运行管理,充分发挥节能的作用。合

理确定真空泵选型参数。真空泵的抽气速率要根据结晶机在最大蒸发负荷时产生的不凝性气体量和水蒸气量来综合确定,留有足够余量。抽气速率过大能耗增大,过小不能维持所需的真空度。真空度的选择要根据结晶工艺的要求,在保证结晶工艺要求的前提下,尽量选用较低的真空度(即较高的绝对压力),因为真空度每提高一个等级,真空泵的能耗就会大大增加。第二,改进真空泵的配置方式。对于单台结晶机可以采用一用一备的配置,保证设备故障时的连续生产;对于多台结晶机可以采用多台真空泵并联运行的方式,通过总管向各个结晶机提供负压。并联运行时可以根据结晶机开启台数和负荷变化来自动调节投入运行的真空泵数量,防止出现大马拉小车的低效运行情况。第三,对真空泵进行冷却和密封管理。水环式真空泵的工作液温度影响抽气性能,工作液温度升高会使饱和蒸汽压增大,有效抽气速率降低。应设换热器对循环工作液进行冷却,使工作液的温度在合理范围内。定期检查、更换密封件,防止空气漏入系统造成真空泵负担加重。第四部分创建了真空系统智能监控平台。在结晶机内部、真空泵进出口等处装设压力变送器、温度传感器,对真空度及设备运行参数进行实时监测。当真空度与设定值不一致的时候,系统就会自动调节真空泵的转速(变频真空泵)或者控制旁通调节阀的开度来达到精准稳压的目的。记录真空泵运行时间、能耗、结晶机处理量数据,定期对能效进行评价,发现异常立即查找原因。经过以上改进措施,结晶机用真空泵代替蒸汽喷射泵之后,可以大大减少蒸汽的消耗量,同时由于取消了高压蒸汽供应,也降低了蒸汽管网的负荷以及安全风险。实际运行表明,改造后的结晶系统能耗明显降低,投资回收期短,具有明显的经济效益和环保效益。

4 蒸发与结晶系统协同节能策略

蒸发机和结晶机虽然是两个独立的设备,在粘胶纤维生产中二者之间存在着密切的工艺联系。蒸发器把酸浴浓缩之后,浓缩液流入结晶机进行降温结晶,蒸发器出料浓度影响结晶机结晶负荷和能耗。因此从全系统角度来推行协同节能措施,能获得更好的综合效果。一方面,利用大系统自控调节来控制蒸发机的运行,保证蒸发器出料浓度在设计值范围内,防止浓度过高或者过低。出料浓度过高会加大结晶机的结晶负荷,使结晶机内部固液比增大、真空系统抽气阻力增大;出料浓度过低,即蒸发器不能充分浓缩,后面的结晶机要蒸发更多的水分,同样增加能耗。通过在线浓度检测仪表将蒸发器出料浓度信号输入到控制系统中,与蒸发器进汽量构成串级调节,保持出料浓度稳定。另一方面,将蒸发器冷凝器、结晶机真空系统产生的二次蒸汽回收利用。多效蒸发系统末效二次蒸汽虽然品位低,但可以引入结晶机的加热系统或者用于酸浴预热,减少新鲜蒸汽的消耗。结晶机真空泵排出的气体中含有一些水蒸气和热量,可以利用换热器将这些热量回收工艺水中或者用作冬季供暖。另外,创建统一的能源管理中心,对蒸发器、结晶机的

蒸汽消耗、电力消耗、产量数据进行实时监测，计算出单位产品综合能耗，同行业先进指标对比。利用数据分析找出能耗异常点，及时调整运行参数。采用基于模型的预测控制方法，根据生产计划预测蒸发器、结晶机负荷变化情况，提前调节蒸汽供给、真空系统等设备运行参数，减少因响应滞后造成的能量浪费。蒸发与结晶系统协同优化后，在单机节能基础上可以挖掘出系统的节能潜力，从而达到整个酸站工序的能效提升。

5 结论

粘胶纤维生产过程中的蒸发器、结晶机能耗控制属于降低企业运营成本、实现绿色制造的关键问题。本文对传统蒸发、结晶系统的能耗特点及节能潜力进行了系统分析，并提出了蒸

发机通过合并减温减压装置进行大系统自控调节的节能技术，结晶机用真空泵代替蒸汽喷射泵的改造方案。合并减温减压装置把分散的蒸汽降压环节集中起来处理，配合大系统协调控制策略，可以减少节流损失和能量浪费，达到蒸汽供应优化匹配的目的。用机械真空泵代替蒸汽喷射泵，用电驱动的高效抽气方式代替蒸汽驱动的低效引射方式，在满足结晶机负压要求的同时大大降低能源消耗。两种节能技术互相配合，从蒸汽供应侧和真空获得侧解决了蒸发和结晶工序的高能耗问题。这些技术投资回收期短、运行稳定可靠、适合于现有生产线改造，对于推动粘胶纤维行业节能减排和技术创新有着十分重要的意义。

参考文献:

- [1] 刘飞.煤制烯烃高盐水冷冻结晶分盐工艺技术的应用与研究[J].中国煤炭,2025,51(4):160-166.
- [2] 李璟,邓国平.化学气相沉积含氟粉尘制备氟化钾联产白炭黑的工艺设计[J].有机氟工业,2025(1):14-19.
- [3] 陈腾,赵茹涵.膜分离技术在化工过程中高盐废水处理与资源回收的关键技术研究[J].山西化工,2025,45(10):257-259.
- [4] 梁浩,李常清,宋宽宏.高盐稀土废水低碳资源化处置技术回收工艺研究[J].环境保护科学,2025(5).
- [5] 宋善麒.煤化工含盐废水多效蒸发结晶过程中硫酸钙结垢抑制技术研究[J].2025(12):160-163.