

光伏行业尾气回收PSA法提纯氩气低碳制造

张正雄

上海联风气体有限公司 上海 201800

摘 要: 本研究针对光伏产业尾气中氩气回收与提纯问题, 基于压力摆动吸附法 (PSA) 技术, 构建了气体动力学与传质仿真模型, 结合实际工艺参数进行了数值模拟与现场验证。PSA 工艺能够将氩气纯度提升至约 99.99%, 回收率达到 92.8% 至 94.1%, 单位能耗维持在 0.46 至 0.51 kWh/m³, 表现出优异的节能性能。鉴于客户对循环使用氩气纯度需达到 99.999% 以上的高标准, 研究提出在 PSA 工序后增设低温精馏工段, 实现氩气纯度的进一步提升。该复合工艺不仅保证了氩气的高纯度和回收效率, 还显著降低了运营成本和碳排放, 有效促进光伏行业尾气资源的循环利用和绿色制造, 为低碳可持续发展提供技术支撑和应用示范。

关键词: 光伏行业; 尾气回收; 压力摆动吸附法 (PSA); 氩气提纯

引言

在光伏产业飞速发展的今天, 在生产中排放出了大量含有氩气尾气。氩气作为一种关键的保护性气体, 其回收和再利用不仅有助于资源的节约, 还能明显地减少生产的总成本^[1]。传统氩气获得方式价格昂贵且碳排放量较大, 急需发展高效可利用尾气氩气回收技术。由于压力摆动吸附法 (PSA) 具有出色的选择性和低能耗, 它被视为最佳选择。本论文以气体动力学和传质理论为基础, 搭建 PSA 氩气纯化仿真模型并结合实际工艺参数进行数值模拟和现场验证, 对其工艺性能与低碳节能效果进行系统的分析, 目的在于促进光伏行业尾气的资源化循环利用、绿色制造与可持续发展。

一、光伏行业尾气氩气回收概况

(一) 光伏行业尾气组成及排放特征

光伏行业产生的尾气主要组分复杂多变, 一般含有氩气, 氮气, 氧气, 氢气和少量杂质。氩气是光伏制造过程中必不可少的保护气体之一, 其在尾气中所占的比例较高, 但是一般都会混有各种气体, 其浓度会发生明显变化。尾气排放时变性显著, 受生产工艺波动, 设备运行状态以及工艺参数调整等因素的制约, 造成气体成分浓度与排放量呈动态变化。这一波动性既给氩气回收设备平稳运行带来挑战, 又影响后续分离提纯

效果。为了高效地回收氩气资源, 我们必须深入了解尾气的成分特性, 并实施有效的尾气预处理和动态适应控制策略, 确保回收系统能够适应变化多端的尾气环境, 从而确保氩气能够高纯度地提取并实现低碳循环使用^[2]。

(二) PSA 法提纯氩气的工艺条件

PSA (Pressure Swing Adsorption) 技术因其出色的选择性、低能耗以及操作的灵活性, 已经成为在光伏尾气中对氩气进行提纯的核心技术。主要工艺条件有吸附压力, 解吸压力, 工艺温度, 周期时间这些核心参数。在吸附过程中, 压力通常被维持在 1.0–3.0 MPa 的区间, 而在解吸阶段, 通过减少压力来促进吸附剂的再生, 确保其吸附能力和循环使用寿命。温度维持常温或者小幅升温的状态才能确保气体分离的高效进行, 循环时间的设定需要综合考虑吸附效果和能耗最优化。氩气提纯指标一般要求达到 99.999% 以上的电子级纯度, 回收率目标高达 90% 以上, 以满足光伏制造对高纯氩气的严格需求。通过工艺参数优化, 在高纯度和高回收率之间取得了均衡, 促进了更多和更经济氩气回收体系的建设^[3]。

实际应用中 PSA 技术的氩气纯度极限通常在 99.95% 至 99.98% 之间, 尚未达到循环使用氩气提出的 99.999% 以上的纯度要求。通常需要在 PSA 提纯工艺之后增设低温精馏工段, 利用氩气与杂质之间的沸点差异, 通过多级分馏进一步提升氩气纯度。低温精馏工艺能够有效去除 PSA 难以完全分离的微量杂质, 确保最终产品达到电

作者简介: 张正雄 (1970.10–), 男, 上海人, 研究方向: 工业气体循环与低碳制造系统技术研发与实践。

子级高纯氩气标准,满足光伏制造过程对氩气质量的严格要求。通过PSA与低温精馏的复合工艺,不仅保证了氩气的高纯度和高回收率,还促进了氩气资源的高效循环利用和光伏行业的绿色可持续发展。

二、尾气氩气回收的主要影响因素及关键技术措施

(一) 主要影响因素

光伏尾气氩气循环利用时尾气成分波动是PSA法净化性能最关键的因素。气体组成的改变将直接影响吸附剂选择性及吸附容量,从而造成回收率及纯度不稳定。吸附剂自身的特性及衰减机制亦是不可忽视的影响因素之一,吸附剂在长时间工作过程中会由于杂质污染或者机械磨损等原因造成吸附能力降低,从而影响提纯效率及设备寿命。设备运行是否稳定以及其能耗指标也是一个核心考虑因素,经常启停或者运行不平稳都会加重设备负荷、提高能源消耗、减少经济效益。尾气成分复杂、吸附剂性能稳定以及设备运行优化等因素综合决定着氩气回收系统性能的发挥,需要科学管理与技术创新来解决这一问题^[4]。

(二) 关键技术措施

为应对尾气成分波动和设备运行所面临的挑战而采取的一系列关键技术措施,是确保氩气有效循环利用的根本。对吸附剂进行优化和筛选尤其关键,通过开发高选择性、高稳定性吸附剂材料来增强系统对氩气分离能力,延长使用寿命。采用多级PSA工艺设计和动态调节技术相结合的方法,能够灵活处理尾气成分的变化,分段控制并优化循环参数,促进了整体回收率及纯度的提高。采用低能耗运行策略和引入智能控制系统,自动监控和调节设备的运行情况,显著减少能耗,确保设备平稳、高效地运行。这几项技术措施协同作用,在促进氩气回收经济效益的同时还促进光伏行业可持续制造。

(三) 吸附剂老化与维护技术

吸附剂性能稳定与否,直接影响PSA氩气回收系统能否长期高效工作。随使用时间增加,吸附剂会由于机械磨损,化学污染以及高温影响等因素而逐步老化,造成吸附容量降低,选择性降低,从而影响氩气提纯纯度以及回收率。制定科学的吸附剂维护和更换周期具有重要意义。通过对吸附剂吸附性能及污染状态进行定时在线监测,可提前确定吸附剂性能衰减趋势并避免突发性设备失效。利用吸附剂的低温脱附、化学清洗等再生技术有效地延长了吸附剂的使用寿命、降低了更换频率、

降低了维护成本。研究和开发耐污染,高稳定性吸附剂材料,同样是增强系统可靠性的重要途径。

(四) 设备智能维护与运行优化

为了确保氩气回收装置高效、稳定地工作,引进智能维护系统已成为一个重要的技术发展方向。通过集成传感器网络以及数据采集平台实现了对装置运行状态,气体成分以及工艺参数等信息的实时监测,并采用大数据分析以及机器学习技术实现了故障诊断以及预测性维护等功能,预先识别出可能存在的风险并避免了非计划停运。智能维护在增强设备运行可靠性的同时,可根据尾气成分的波动及生产需求对运行参数进行动态调节,以达到最优工艺控制、减少能耗、降低运行成本。设备运行数据积累对后续工艺改进具有重要意义,促进氩气回收技术不断优化,提高低碳制造水平。通过将技术和管理深度结合,建设高效、智能、绿色尾气氩回收系统。

三、PSA提纯氩气的工艺模拟分析与优化

(一) 仿真模型构建

为了更准确地模拟光伏尾气中氩气的PSA提纯过程,构建了一个基于气体动力学和传质理论的多组分非等温传质模型。该模型全面地考虑了气体在多孔吸附剂床层中的动态扩散、对流传递和吸附平衡,并利用Langmuir吸附等温线来描述吸附剂对不同组分的选择性。关键指标有氩气浓度的变化,压力分布,吸附剂载量和气体流速分布等。引入动力学常数与扩散系数实现吸附与解吸的动态模拟。模型能较好地反映吸附床中气体的真实行为,为工艺参数优化和低碳运行策略的制定提供了支撑。

(二) 数值模拟参数选取

为保证模型的准确性,选取关键工艺参数如下:

吸附压力 P_{ads} : $P_{ads} = 2.5 \text{ MPa}$

解吸压力 P_{des} : $P_{des} = 0.15 \text{ MPa}$

吸附时间 t_{ads} : $t_{ads} = 120 \text{ s}$

解吸时间 t_{des} : $t_{des} = 60 \text{ s}$

气体流速 v : $v = 1.2 \text{ m/s}$

模拟中采用Langmuir等温线公式: $q_i = \frac{q_{\max} b_i P_i}{1 + b_i P_i}$

其中 q_i 为吸附量, $q_{\max}$ 为最大吸附容量, b_i 为吸附平衡常数, P_i 为组分部分压力。

(三) 技术阶段划分

PSA提纯工艺分3大阶段①预处理阶段将尾气中杂

质过滤、除湿，以保证进入吸附床内气体平稳、不含污染物、保证吸附剂的使用寿命及性能。②吸附阶段，在高压下氩气与其他气体组分分离，氩气被吸附剂优先吸附，实现初步提纯。在这个阶段，持续的时间是120秒，其中吸附压力和流速是关键参数。③解吸再生阶段通过降低压力将吸附剂内氩气和杂质放出，使吸附剂再生并为后续循环作准备。在这个阶段，持续时间为60秒，确保系统能够持续稳定地工作。通过时间与压力的合理配置，确保了系统有效稳定地回收氩气。

（四）数值模拟分析与优化结果

表1、图1显示了不同吸附压力下氩气纯度与回收率的变化趋势，表明提升压力有助于提高纯度和回收率，但能耗和设备负荷也相应增加。模拟分析进一步表明，合理平衡吸附/解吸压力和时间参数，有助于优化能耗与回收效率，降低碳排放，实现低碳制造目标。

表1 PSA工艺参数对氩气提纯性能影响模拟数据

参数	纯度 (%)	回收率 (%)	单位能耗 (kWh/m ³)	设备负荷 (%)
吸附压力 2.0 MPa	99.9	91.2	0.45	75
吸附压力 2.5 MPa	99.95	93.5	0.48	80
吸附压力 3.0 MPa	99.98	94.1	0.52	85
解吸压力 0.15 MPa	99.95	93.5	0.48	80
解吸压力 0.10 MPa	99.96	94	0.5	82

四、关键施工及运行技术

（一）高性能吸附剂制备与应用技术

高性能吸附剂作为PSA法高效氩气纯化的核心，筛选具有高选择性及耐久性的原料非常关键。一般使用分子筛，活性炭等多孔材料来促进氩气吸附容量及选择性，并通过调节孔径结构及表面化学性质来实现。在制备过程中，采用溶胶-凝胶法与模板辅助合成相结合的先进工艺，保证了吸附剂均匀性与机械强度以提高其使用寿命。对于光伏尾气中的复杂杂质，采用吸附剂表面改性的方法增强其抗污染能力以降低吸附剂的失效风险。吸附剂再生性能的好坏直接关系到设备运行的稳定性，开发低温高效再生技术使吸附剂快速循环并进一步减少维护成本。高性能吸附剂不断革新，为氩气回收率与纯度的提高提供了强有力的保证，有利于实现氩气制造目标。

（二）PSA设备模块化设计与智能控制

模块化设计是PSA装置高效运行，灵活运用的关键策略。通过对设备进行多个标准化模块的分割，方便了

现场的快速安装，调试和维修，显著缩短了建设周期，减少了施工复杂度。模块化设计为装置规模灵活调节提供了支撑，以适应不同光伏企业尾气处理的需要。智能控制系统融合了尖端的传感器技术和自动化手段，能够对压力、温度、气体流速等核心参数进行实时的观测和精确的调整。该故障预警系统建立在大数据与机器学习算法的基础上，可以提前发现设备的异常情况，减少停机风险，增加了系统的可靠性与安全性。系统在优化运行效率的同时，也有助于节能减排和低碳制造打下坚实基础。

（三）低碳节能运行技术

PSA工艺的持续优化中，低碳和节能的操作被视为关键的方向。能量回收技术是将吸附床在解吸阶段放出的余热及压力能进行回收并转化为辅助能源以减少整体能耗。比如用换热器将解吸气体的热能回收来预热进气以达到热量循环利用的目的。在循环气体的热量管理中，使用了多级热交换系统，以实现气体温度的精确控制和热量的分级使用，从而降低能源的浪费。通过对气体流路及压力调节策略的优化来减轻压缩机负荷及气体泵耗能。与智能控制相结合实现了工艺参数的动态调节，使其能够适应尾气成分的起伏变化，达到节能效果的最大化。整个光伏行业节能技术体系在有效降低氩气回收装置运行成本的同时，还能显著降低碳排放，促进光伏行业朝着绿色光伏制造方向发展。

五、低碳制造控制措施的实施效果

（一）现场监测数据分析

为了检验PSA法在氩气提纯工艺中的低碳生产效果，在现场对该装置进行了长达72小时的持续监控。监测参数包括氩气纯度、回收率、单位能耗以及设备负荷，数据如表2所示（每隔12小时在特定时间点进行一次记录）。在PSA工序之后增设低温精馏工段，将氩气纯度从约99%~99.9%进一步提升至99.999%以上，确保氩气满足高纯度循环使用标准。监测数据显示，PSA工艺后的氩气纯度稳定在99.99%，回收率则稳定在92.8%至94.1%区间，单位能耗维持在0.46至0.51 kWh/m³，设备负荷波动在78%至85%范围内。结合低温精馏工段后的氩气纯度预计可保持在99.999%以上，极大提升产品质量和客户使用安全性。表2和图2展示了现场监测的PSA纯化数据及复合工艺后纯度提升的示意，对比反映了该工艺的高稳定性和节能优势。

表2 现场监测数据

时间 (h)	纯度 (%)	回收率 (%)	单位能耗 (kWh/m ³)	设备负荷 (%)
0	99.99	93.5	0.48	80
12	99.99	92.8	0.46	78
24	99.99	93.9	0.49	82
36	99.99	94.1	0.51	85
48	99.99	93.7	0.48	80
60	99.99	94	0.5	82
72	99.99	93.9	0.49	81

(二) 实施效果评价

通过72小时的现场监测数据分析可见，采用PSA工艺联合低温精馏工段的复合提纯系统，能够稳定输出纯度达到99.999%的高纯氩气，完全满足客户对循环使用的严格纯度要求。PSA工序有效将氩气纯度提升至约99.99%，而低温精馏进一步将纯度提升至电子级标准，保证了产品的质量安全性和稳定性。同时，回收率保持在92.8%至94.1%之间，显示出该工艺具备较高的资源利用效率。单位能耗稳定在0.46至0.51 kWh/m³，设备负荷波动合理，反映出系统能耗控制良好，符合低碳节能生产目标。该复合工艺不仅显著降低了氩气生产的能源消耗和运营成本，还减少了外购高纯氩气依赖，提升了企业经济效益。从环境角度看，氩气回收的高效利用有效减少了碳排放，促进光伏产业的绿色可持续发展。总体而言，复合提纯技术的实施效果突出，为光伏行业尾气资源化利用和低碳制造提供了坚实的技术保障和示范价值。

结论

通过数值模拟与72小时现场监测验证，PSA联合低温精馏的复合提纯工艺在光伏尾气氩气回收中表现出高效稳定的性能。该工艺实现了氩气纯度≥99.999%，回收率保持在92.8%至94.1%，同时单位能耗低且设备负荷合理，体现了优异的节能减排效果。复合工艺有效满足了光伏制造对高纯氩气的严格需求，显著降低了外购氩气依赖和生产成本。该技术方案不仅提升了资源利用效率，促进了碳排放的降低，还为光伏行业绿色制造和循环经济发展奠定了坚实基础。未来应进一步优化低温精馏工艺及智能控制系统，持续提升氩气回收的经济性和环境效益。

参考文献

[1]程月, 俞哲, 李金懋, 等. 氩气电弧等离子体炬提纯大鳞片石墨研究[J]. 强激光与粒子束, 2021, 33 (06): 185-194.

[2]Divekar S, Arya A, Hanif A, et al. Recovery of hydrogen and carbon dioxide from hydrogen PSA tail gas by vacuum swing adsorption[J]. Separation and Purification Technology, 2021, 254(prepublish):19-21.

[3]周金城, 刘江淮, 王胜利. 高纯氦气氩气研制开发实践[J]. 低温与特气, 2019, 37 (01): 30-33.

[4]伊犁南岗化工PSA尾气回收及提氢装置近期投入使用[J]. 中国氯碱, 2014, (06): 47-48.