

异质结光伏工厂现场制氮方式的研究

吴龙海¹ 宋新军² 杨书彬²

1. 连云港太瓦新能源有限公司 江苏 连云港 222000

2. 新疆丝路新能源开发有限公司 新疆 伊犁哈萨克 835221

摘要: 工业现场制氮一般采用深冷法(低温精馏法)、变压吸附法、膜分离法等多种方式。根据比较,变压吸附法现场制氮最为经济。丝路公司是异质结光伏行业内第一家使用“变频压缩机+PSA方式”制氮的单位,其经济效益十分明显,将起到积极的示范作用。

关键词: 变压吸附;深冷;异质结电池;经济性

引言:新疆丝路新能源开发有限公司正在新疆霍尔果斯大规模建设异质结电池片和组件工厂,工艺设备需要 $20\text{ Nm}^3/\text{min}$ 的氮气主要用于工艺设备腔体吹扫使用,以及关键设备阀件的驱动,主要技术特征为:

- 纯度99.99%及以上
- 压力0.3~0.4 MPa
- O_2 含量 $\leq 5\text{ ppm}$
- 露点 $\leq -70\text{ }^\circ\text{C}$

1 在建设过程中,主要考虑使用以下几种方式

1.1 液氮储罐

用槽车进行充灌,自建(或租赁)蒸发器(也称作汽化器, Vaporizer),高压的液态气体经蒸发器蒸发为气态后,供工厂使用。一般的光伏工厂用气量适中时这种方式较为合适,这也是目前采用最多的一种方式。

1.2 采用空分装置现场制氮

这适用于 N_2 用量很大的场合。集成电路芯片制造厂多采用此方式供气,而且还同时设置液氮储罐作备用。

1.3 钢瓶供氮方式(bundle)

一般市场上纯度为99.999%的氮气的价格是120元/瓶,一瓶氮气在12 MPa压力下标准体积是40升,实际上每瓶只有 0.04 m^3 左右,这样计算出来3元/升,折算到每立方米普通氮气价格是3000元左右。

使用钢瓶氮的费用: $20\text{ Nm}^3/\text{min}\times 3000\text{元}=60000\text{元}/\text{min}$

年使用费用: $60000\times 480000\text{ min}/\text{年}=288\text{亿元}/\text{年}$

由此可以看出,钢瓶供氮方式只适用于用气量非常小的用户,对有一定用气量需求的场合来讲,是不经济的。

1.4 膜分离法

膜分离法是利用有机聚合膜的渗透选择性,从气体混合物中分离出富氮气体。若产气需求量大,则所需薄膜面积太大,造价高,尽管膜分离法装置简单,操作

方面,由于其技术未被工业界广泛应用^[1],因此丝路公司项目未予考虑。

1.5 附近大宗气体公司管道供应

由于项目所在位置以及周边工业配套条件的限制^[2],因此主要考虑液氮储罐蒸发供应、和空分现场制氮。

2 液氮储罐蒸发方式

针对丝路项目需求,可以选用 $1200\text{ Nm}^3/\text{h}$ 汽化器,配置相应液氮储槽,加上汇流排,减压、调压、稳压装置,丝路固定资产总投资约70万元左右。按5年折旧,年度折旧分别是14万元。若使用租赁汽化器的方式,一般价格在9000~15000元/月。

1 m^3 液氮可汽化约 648 Nm^3 气态氮,液氮年需求量:

液氮年需求量: $20\text{ Nm}^3/\text{min}\times 60\text{ min}\times 24\text{ h}\times 360\text{ 天}\div 648\text{ Nm}^3/\text{min}=16000\text{ m}^3$

液氮年度费用: $16000\text{ m}^3\times 760\text{元}/\text{m}^3=12160000\text{元}$

其中760元/ m^3 液氮终端零售价格,包含液氮槽罐车运费、注入费、税费等。另外该价格受市场供求关系以及国内经济状况变动而发生变化。

气站无电费支出,维修费也可忽略不计,不计人工费用(下同),则年度成本总计为:

a, 自建: $12160000\text{元}+140000\text{元}=12300000\text{元}$

b, 租赁: $12300000\text{元}+15000\text{元}=12315000\text{元}$ 。

特点:

1, 随用随开汽化器,出口压力可调,一般在 $4\sim 5\text{ Kg}/\text{cm}^2$,可满足工艺设备需要。

2, 液氮储槽全负荷使用情况下,需定期充填,加注时结算货款,成本计算简便。

3, 占地面积较大,危险因素主要是液氮的低温防冻,汽化的气体也是低温的。

4, 若工艺设备用气需要恒温,则需要电辅助加热或其它热源,消耗电能,产生开支。

3 空分现场制氮方式

空分现场制氮主要有传统的深冷法和现代比较流行的变压吸附 (PSA: Pressure Swing Adsorption) 制氮法。

其中使用深冷法是工业常用的方法, 主要工作原理是: 先将空气压缩, 再膨胀降温、冷却后液化, 然后利用氧、氮的沸点温度不同, 在精馏塔中实现氧氮分离的方法。

深冷法制出液态氮后, 同样需要汽化器蒸发的方式, 将液氮转变成气态氮, 而纯度基本上不受损失, 达到99.999%的工艺设备接受标准。

固定资产投资方面, 由于深冷法是在汽化器投资基础上的进一步追加投资, 采购并建设空气压缩机、空冷器、净化干燥器、换热器、透平膨胀机和精馏塔等。尽管从长期来看比从专业气体公司购买液氮商品划算, 但短期内 (5年以内)、以及基于降低管理人员的劳动和专业技能要求方面的考虑, 外购液氮使用液氮储罐蒸

发方式, 是有利的。另外深冷法生产中必须考虑空气中微量甲烷、乙炔液化会混入液氧中, 造成严重的爆炸事故, 这也是让人顾虑的地方^[3]。

另一种空分现场制氮的方式, 是使用变压吸附 (PSA) 现场制氮。

一般而言, PSA能在常温下7~10 kgf/cm²的工作压力下较为容易的生成99.99% 的N₂ (非氧含量), 这比液氮储罐、汽化器零下196 °C的超低温工作温度给操作人员带来的危险低很多, 而PSA比较明显的缺点是纯度略有不足。

提高PSA氮气纯度的方法一般是后接纯化器, 比如本项目所使用的带压氨分解方式, 相比于加碳除氧, 其优点在于, 不引入异质结生产所担忧的碳元素 (C) 污染; 相比于直接加氢除氧, 减轻氢气瓶在高温高热场合、以及泄露造成的局部浓度达到4.1% 引发爆炸的危险; 尽管NH₃在空气中的混合气爆炸极限为16~25%, 相比于无色无味的H₂, NH₃具有强刺激气味, 提高了操作人员预警时间。

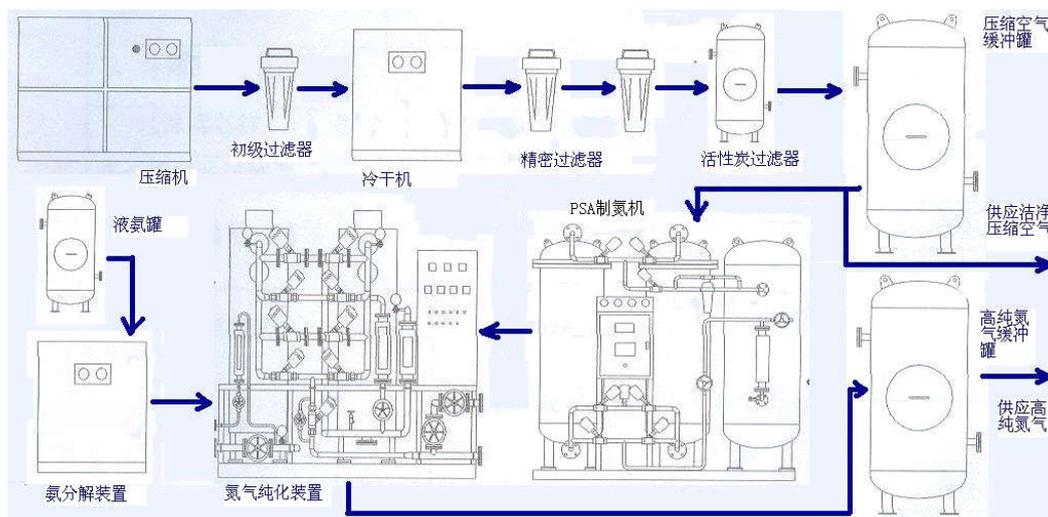


图1 带压氨分解变压吸附制氮系统图

如图1所示, PSA系统需要压缩机提供洁净压缩空气 (CDA) 给PSA制氮机, 液氮罐通过氨分解装置提供H₂, 与PSA制出氮气共同进入纯化器中的高温合成桶, 反应生成H₂O以降低普氮中的含氧量, 最后再经后级冷干和分子筛吸附, 达到半导体行业要求的 ≤ -70°C的露点。丝路公司制氮现场一次性达到-70摄氏度的露点和5ppm的氧含量, 证明整个系统工作良好, 其缺点是高纯氮气出气含有500~10000 ppm的H₂, 这在不需要H₂的应用场合是不利的, 丝路公司项目中恰恰相反, 高纯N₂中含有微量H₂, 有助于工艺设备高温炉管中改善硅片表面键合力, 减轻氧杂质在硅片表面生长自然氧化层 (native oxide) 的几率。

在很多工业场合, 如异质结工厂, 也同时需要稳定

的压缩空气, 而CDA系统和PSA制氮系统合二为一, 是降低固定资产投资的一个有益的尝试。在丝路公司项目建设中, PSA系统需要188 m³/min的CDA, 而CDA系统的200 KW螺杆压缩机可提供60 m³/min, 每台597 KW离心机可提供120 m³/min, 剩余的流量完全能满足丝路公司项目工艺设备对CDA流量的需求。再加上PSA的前置过滤系统完全使用CDA系统标准配置的前置过滤器、前置冷干机、精密过滤器、活性炭过滤器 (除油), 系统实现无缝整合。

PSA系统的成本计算比较复杂, 可分以下几个方面进行测算:

3.1 PSA全套设备 (不含压缩机) 按5年折旧, 年度费用: 30万元 ÷ 5年 = 60000元/年;

为考虑工艺设备负载的变化，丝路公司项目使用变频压缩机产生CDA，则普通压缩机和变频压缩机两种情况下为满足制氮机工作的开支如下分开计算，

普通597 KW压缩机采购和安装费用242.02万元，按5年折旧，年度费用： $242.02 \text{万元} \div 5 \text{年} \times 3 \text{台} = 145.2 \text{万元/年}$ ；

变频200KW压缩机采购和安装费用81.07万元，按5年折旧，年度费用： $81.07 \text{万元} \div 5 \text{年} = 16.22 \text{万元/年}$ ；

3.2 运行电费：

20 Nm³/min满负荷生产情况下，

制氮机（带氨分解装置、纯化器）0.15 KW，三台全天耗电10.8度；

PSA需要压缩空气气量145 m³/min，CDA使用量为355 m³/min，启动3台120 m³/min离心式压缩机，制氮用量占离心式压缩机40.85%。

离心式压缩机耗电597 KW×3×40.85% = 731.6 KW，全天耗电17558.4度，

电价按0.8元/度计算，一年360天工作日，

PSA年度耗电10.8度×360天×0.8元 = 3110.4元

离心式压缩机年度耗电17558.4度×360天×0.8元 = 5056819.2元

3.3 冷却水（不计费用）、工人工资（不计费用）：

对劳动量而言，PSA仅需日常维护，以及每周更换一次钢瓶。

3.4 设备维修费用：

PSA每年维护费用10000元，

压缩机年度维护费用50000元。

上述年度总成本，

A，氮气（99.99%）、离心压缩机：60000+1452000+3110.4+5056819.2+10000+50000 = 6631929.6元

特点：

1，液氨需求可跟末端要求进行灵活掌握，更换方便，更换周期为一周；

2，上述费用已包含压缩机年度折旧和维护费用，计算CDA成本时不需重复计入；

3，危险因素主要是液氨，以及CDA的7 kgf/cm²的工作压力；

4，使用变频螺杆压缩机比普通螺杆压缩机总成本低。

4 结论

如果工艺设备支持在不生产待机状态下不使用N₂和CDA，白天工作8小时，夜间不工作，CDA管道和N₂管道关断后能保压，则PSA现场制氮方式（高纯氮、变频压缩机），年度费用约为： $60000+1452000+1036.8+1685606.4+10000+50000 = 3258643.2 \text{元}$

液氮储罐蒸发方式： $4053333.3 \text{元} + 140000 \text{元} = 4193333.3 \text{元}$

汇总如下表，

项目	PSA现场制氮方式	液氮储罐蒸发方式
每天24小时运行年度成本	6631929.6元	12300000元
每天8小时运行年度成本	3258643.2元	4193333.3元

这表明，

1.在全负荷生产状态下，变压吸附现场制氮成本最低。由于受大型PSA装置制造技术的限制，研究表明国内10000 m³/h以下的空分制氮，从工艺过程、运行参数、技术指标、水电消耗、基建投资、经营成本、技术安全、占地面积、建设要求、操作维护和操作人数等多方面比较，使用PSA法是有利的。

2.在部分负荷生产状态下，如8小时工作制，PSA法和液氮法相差不大；工作时间越少，越适合使用液氮蒸发法。国内研究也表明，对于生产高纯度氮气（99.9%以上）深冷制氮与PSA制氮的单位电耗相差不大^[4]，但对于生产低纯度氮气，PSA具有明显的优势，主要原因在于深冷法生产的液氮本身就是高纯度的。

3.PSA法跟CDA关联性强，液氮法工作与CDA无关。是否考虑与CDA的联动，取决于不同的工业场合具体需求。

4.钢瓶供氮最不经济，一般适合科研、教学、实验等微量应用场合。

5.基于相同的比较原理，PSA制氧的经济性也较突出^[5]。

6.与国内近二十年来开始石油、化工、医药、造纸等行业中小规模现场制氮场合陆续使用PSA制氮、制氧不同，丝路公司是异质结光伏行业内第一家使用“变频压缩机+PSA方式”制氮的单位，其经济效益十分明显，将起到积极的示范作用。

参考文献：

[1]汪红.深冷制氮与变压吸附制氮的技术经济比较[J].全国化工热工设计技术中心站建站四十周年庆典2003年年会暨大型学术技术交流会,2003

[2]邢国栋.一种先进的纯氮制造系统APSA-介绍法国液化空气集团的最新专利技术[J].低温工程,1999(4)

[3]黄小武等.制氧事故综合统计分析[J].深冷技术,2002,(1),p44-46.

[4]刘汉钊,王华金,杨书春.变压吸附制氧法与深冷法的比较[J].冶金动力,2003(2),p26-29.

[5]杨玉平,岳文元,郭阳初.变压吸附制氧机经济性分析[J].深冷技术,2000(5),p19