

# 空分设备在新型发电系统 IGCC 的工程应用

毛绍融 卢杰 何晖 李隽 胡明辉  
(杭州杭氧股份有限公司, 310004, 杭州)

**摘要:** 空分设备是整体煤气化联合循环 (IGCC) 发电系统的重要组成部分。本文探讨了不同空分工艺流程及其与 IGCC 的连接匹配对 IGCC 整体性能的影响; 并对与空分设备连接的 IGCC 的煤气化部分进行了讨论, 通过分析现有工程上不同的煤气化工艺, 为 IGCC 系统方案的优化选择提供依据。

**关键词:** IGCC, 空分设备, 煤气化, 优化, 工程

## 前言

整体煤气化联合循环 (Integrated Gasification Combined Cycle, IGCC) 发电系统以其高效、低污染等优势, 被认为是世界上最具发展前途的洁净煤发电技术之一。它由两大部分组成: 煤的气化与净化以及燃气-蒸汽联合循环发电部分。煤的气化与净化部分主要有气化炉、空分装置、煤气净化设备, 燃气-蒸汽联合循环发电主要有燃气轮机发电系统、余热锅炉、蒸汽轮机发电系统。经过几十年研究与发展, 一些单项技术如气化炉、空分设备、燃气轮机、蒸汽轮机、煤气脱硫、余热锅炉等有一定的技术基础, 但设备与设备之间关联匹配的研究较少。空分设备是 IGCC 发电系统的一个重要组成部分, 它为气化炉提供助燃氧气以及输煤氮气, 保证 IGCC 系统能够长期、安全可靠运行。因此, 研究空分工艺流程及其与 IGCC 的结合, 使得空分设备作为 IGCC 的子系统更加高效的运行, 对有效的提高 IGCC 整体的发电效率具有十分重要的意义。

## 1. IGCC 系统对空分设备的要求

IGCC 的工艺过程: 煤经气化成为中低热值煤气, 经过净化, 除去煤气中的硫化物、氮化物、粉尘等污染物, 变为清洁的气体燃料; 然后送入燃气轮机的燃烧室燃烧, 加热气体工质以驱动燃气透平作功; 燃气轮机排气进入余热锅炉加热给水, 产生过热蒸汽驱动蒸汽轮机作功。可见, 煤的气化工艺是 IGCC 系统的龙头, 煤气化炉则是煤气化的核心设备, 需要空分设备提供氧气和氮气, 其中氧气是煤的气化剂, 氮气或污氮气用于稀释煤气, 降低煤气的闪点温度以抑制  $\text{NO}_x$  的形成, 使废气中的  $\text{NO}_x$  含量低于排放标准。

因此, 煤气化工艺决定了与之结合的空分设备的工艺参数, 目前 IGCC 各示范工程煤气化炉主要包括: 喷流床、流化床、固定床气化炉等。

固定床气化炉开发最早, 炉子下部为炉排, 支承炉体上部的煤层, 工作原理与燃煤的层燃炉相似。煤从气化炉的顶部加入, 作为气化剂的压力氧气则从炉下部加入, 气固两相逆向流动传热与传质。固定床气化炉设计有两个煤气出口, 从干燥区上部的出口引出一半的煤气; 另一半的煤气则从气化区的顶部引出。

在 IGCC 系统工程上应用的固定床气化炉是鲁奇炉。最初使用的鲁奇固定床是单段固态排渣气化炉, 容易造成床体阻塞, 煤气质量不稳定。此后在固态排渣鲁奇炉的基础上发展了液态排渣鲁奇炉, 提高了煤的氧化速率和碳的转化率, 对煤粒直径的要求也比固态排渣炉

的要宽，但是液态排渣气化炉排渣的物理热损失大，并且煤气生产能力有限，限制了其在 IGCC 系统工程上的应用。

流化床气化炉改善了固定床气化炉的缺点，床内采用气固两相间的高强度的传热和传质，用氧压力一般在 3~8MPa。同时，通过加入脱硫剂，脱除 SO<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub>S，进行初级的净化。但在工艺及辅机配套、连续运行时间、负荷、磨损、漏烟、脱硫等技术方面还有待完善，影响了它的工程应用普及，目前市场上只有 U-Gas 炉，KRW 炉、温克勒炉。

喷流床气化炉单炉生产能力大，在目前 IGCC 各示范工程中采用最多，主要有美国的 DEXCO 炉、GE 炉，荷兰的 Shell 炉，德国的 Prenflo 炉等。其中 Shell 和 Prenflo 是干法进煤的气化炉；DEXCO、GE 和 CE 属于水煤浆进煤的气化炉。近年来，华电半山电厂、兖矿分别与华东理工大学对水煤浆进煤的喷流床气化炉进行了联合研制。喷流床气化炉用氧压力一般在 3~8 MPa，每公斤煤需要消耗 0.82~1.0kg 的氧气。氧气纯度为 90%~99%；稀释煤气的氮气或污氮纯度为 96%~99.9%。由于喷流床气化炉的优点，其在今后发展大容量高效率的 IGCC 电站中具有强有力的竞争地位。

### 3. 空分装置流程的选择与 IGCC 的结合方式

#### 3.1 基于 IGCC 的空分流程形式

IGCC 系统用氧量一般在 4~6 万立方米氧气范围，只有低温精馏法才能满足 IGCC 系统大量的工业化用氧。目前单套空分设备已达到制备 6 万标准立方米氧气以上的水平。

空分流程一般分为外压缩、内压缩流程，可以满足 IGCC 系统对用氧、用氮压力和纯度的要求。外压缩流程通过生产低压氧气，再经过氧压机增压后供给用户。内压缩流程则取消了氧压机，直接从冷凝-蒸发器抽取液氧，由液氧泵加压，复热后供给用户。增压空压机或增压氮压机（氮气循环流程）在内压缩流程中代替了氧压机，在国内、外均有大量运行业绩；同时内压缩流程成熟可靠的，安全性好。外压缩流程对氧压机安全要求较高，但适用于用氧量变化频繁的情况。

由于 IGCC 系统中煤气透平的部分空气可以利用，这部分空气的压力通常高于全低压空分流程的空气压力；同时空分的污氮产品可以喷入煤气透平的燃烧器以稀释煤气，这部分污氮的量可以变化而且必须加压；IGCC 对空分设备变负荷的要求。这就造成空分流程有诸多可变因素。应当综合考虑以上因素，确定合适与优化的空分流程。

#### 3.2 空分装置与 IGCC 的结合方式

空分设备与 IGCC 结合的目的是降低设备投资与生产成本，提高由煤转化为电的热效率，控制 NO<sub>x</sub> 含量在可接受的水平。燃气透平在使用低热值的燃气时，为保持平衡通常要排放一部分的空气，IGCC 空分设备的流程选择应考虑合理利用这部分空气，作为加工空气，因此空分设备与 IGCC 结合方式主要有：独立空分、完全整体化、部分整体化方式，如图 1~3 所示。

如图 1 所示，独立空分不抽取带压空气，这种形式，原料空气压缩机的投资较高，厂用电率较大，但它运行灵活，且此时燃气轮机的效率较高；如图 2 所示，完全整体化空分则全部采用带压空气，原料空气压缩机的投资较低，厂用电率较低，但运行不够灵活，燃气轮机的效率较低；如图 3 所示，部分整体化方式采用煤气透平来的带压空气，可以提高压力操作使氧、氮产品的出口压力提高，原料空压机压缩比下降，这种变化带来的好处是空分设备的压力损失和外形尺寸大大减少，产品氧、氮压缩机的能耗下降，总能耗下降。但压力升高后氧、氮、氩之间的相对挥发度也相应减少，相同的纯度和回收率时需要更多的理论塔板数。需要对此方案优弊进行比较，使投资及运行成本达到一个较好的平衡点。

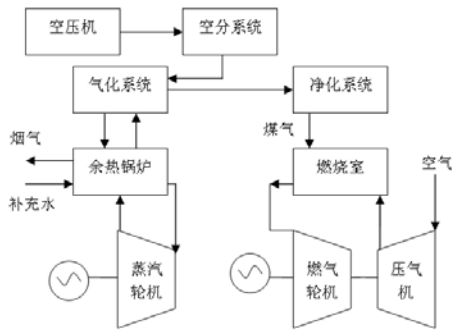


图 1 独立空分示意图

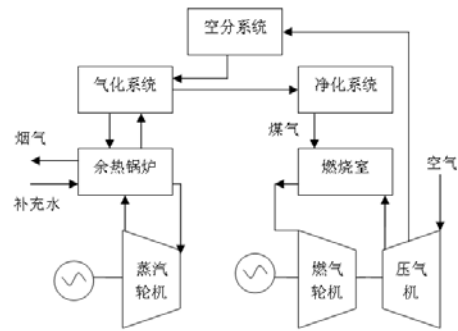


图 2 完全整体化空分示意图

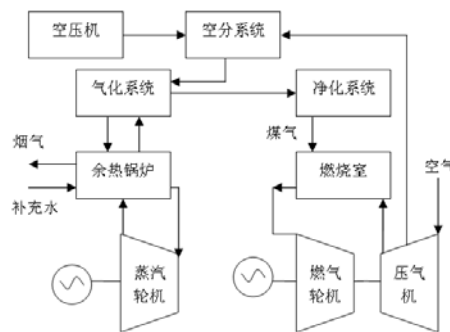


图 3 部分整体化空分示意图

### 3. IGCC 系统空分流程的工程设计

#### 3.1 空分流程方案的提出

华电半山电厂将新建一套 200MW 级 IGCC 发电示范工程，以下以该工程为例分析一下 IGCC 系统中空分设备流程的选择。

该项目经过对整个系统的平衡计算，对氧气产品的产量要求为 48,000 Nm<sup>3</sup>/h、压力要求为出冷箱压力为 56bar、纯度为 99%的氧；因为燃气轮机的采取了水蒸气回注的方式，则不需要空分设备提供带压氮气；同时，燃气轮机可以提供流量为 20,900 Nm<sup>3</sup>/h、压力为 6~7bar、温度为 50℃的带压空气。

根据上述条件，经过初步选择，提出了以下三个流程方案进行比较。

方案一：常规外压缩+氧气压缩机空分流程

如图 4 所示，净化后的加工空气分为三股：一小股被抽出作为仪表空气；一股空气进入主换热器，被返流气体冷却至饱和温度进入下塔。另一股相当于膨胀量的空气进入增压机增压，冷却后进入主换热器，从中部抽出进入膨胀机，膨胀后的大部分空气送入上塔，其余进入污氮管道。空气经下塔初步精馏后，在下塔底部获得液空，在顶部获得纯液氮。下塔抽取的液空和液氮进入液空液氮过冷器过冷后送入上塔进一步精馏，液氧从冷凝蒸发器底部抽出送入贮存系统，在上塔底部获得产品氧气由氧气透平压缩机压缩至所需压力进入氧气管网。从下塔顶部抽出的压力氮气经主换热器复热后作为氧透的密封气及其它用途。从下塔顶部抽取部分液氮经液空液氮过冷器过冷后送入贮存系统。

方案二：膨胀空气进下塔内压缩空分流程

如图 5 所示，净化后的空气分成三股：第一股进入低压板式换热器，出换热器底部后进入下塔；第二股进入膨胀机的增压风机中增压，然后被冷却器冷却至常温后进入低压板式换热器，再从换热器中部抽出进入膨胀机去膨胀。膨胀后的空气进入上塔；第三股空气经增压空压机的增压后过冷器冷却至常温后进入高压板式换热器，与高压液氧及返流污氮气体换

热。这部分高压空气从换热器底部抽出经节流进入下塔。空气经下塔初步精馏后，获得液空、纯液氮和污液氮，并经过冷器过冷后节流进入上塔进一步精馏，在上塔底部获得液氧，并经液氧泵压缩后进入高压板式换热器，复热后出冷箱，进入氧气管网。

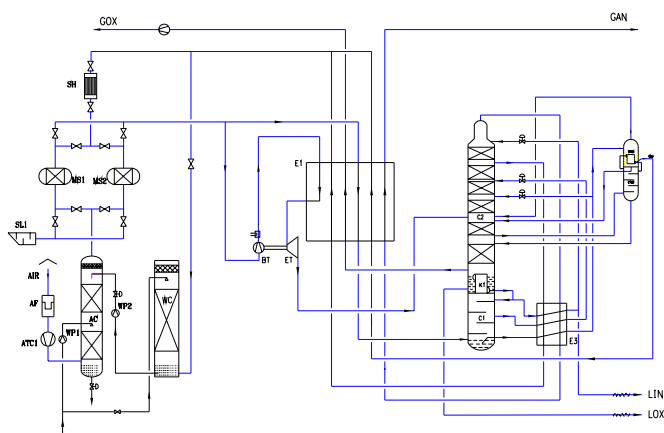


图 4 常规外压缩+氧气压缩机空分流程

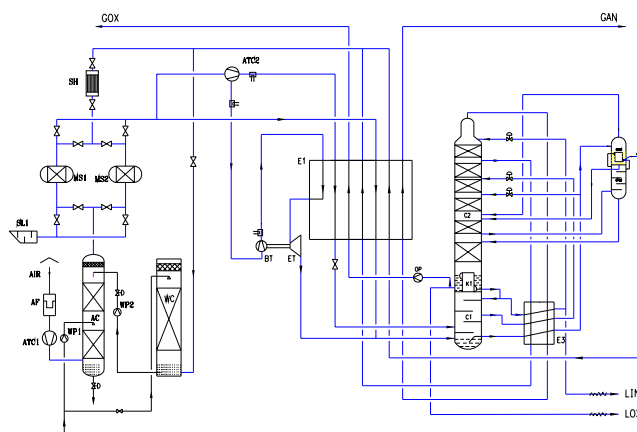


图 5 膨胀空气进下塔内压缩空分流程

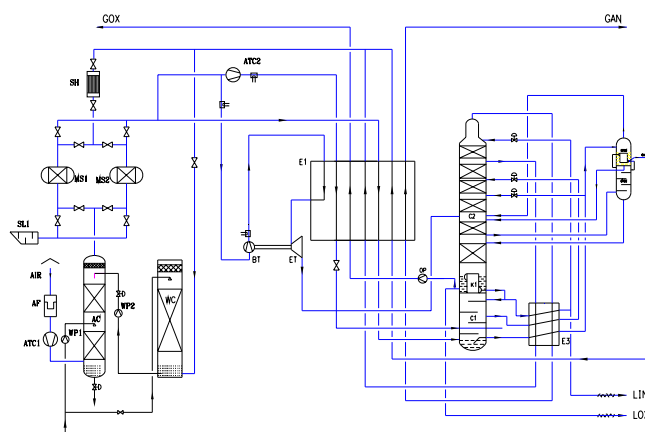


图 6 膨胀空气进上塔内压缩空分流程

AF—空气过滤器，ATC1—原料空压机，ATC2—增压空压机，AC—空冷塔  
 WC—水冷塔，SH—蒸汽加热器，ET—膨胀机，MS——分子筛吸附器  
 BT—膨胀机增压端，E1—板式换热器，E3—过冷器，WP—水泵，OP—液氧泵  
 C1—下塔，C2—上塔，K1—主冷凝蒸发器，C701—增效塔

### 方案三：膨胀空气进上塔内压缩空分流程

如图 6 所示，净化后的空气分成三股：第一股进入低压板式换热器，出换热器底部后进入下塔；第二股进入膨胀机的增压风机中增压，然后被冷却器冷却至常温后进入低压板式换热器，再从换热器中部抽出进入膨胀机去膨胀。膨胀后的空气进入上塔；第三股空气经增压空压机的增压后过冷器冷却至常温后进入高压板式换热器，与高压液氧及返流污氮气换热。这部分高压空气从换热器底部抽出经节流进入下塔。空气经下塔初步精馏后，获得液空、纯液氮和污液氮，并经过冷器过冷后节流进入上塔进一步精馏，在上塔底部获得液氧，并经液氧泵压缩后进入高压板式换热器，复热后出冷箱，进入氧气管网。

## 3.2 空分流程方案的比较与优化

针对上述流程方案，对能耗、机器设备以及投资等关键指标进行了计算和比较，具体计算如表 1 所示。

表 1 不同空分流程方案的比较

项 目	流程型式		
	方案一	方案二	方案三
原料空压机轴功率 (kW)	~17576	~17000	~17576
空气增压机轴功率 (kW)	—	~10000	~8805
氧压机轴功率 (kW)	~9450	—	—
液氧泵轴功率 (kW)	—	~165	~165
总轴功率 (kW)	~27026	~27165	26546
空分操作灵活性	好	较好	较好
设备投资比较	高	低	低
能耗比较	较高	高	低
循环压缩机制造难度	—	较高	较低
氧压机制造难度	高	—	—
占地面积比较	大	小	小

内压缩流程按膨胀空气进行入精馏塔的位置不同可以分为膨胀后空气进上塔和膨胀后空气进下塔两种方式。根据上述计算结果可以看出，膨胀进下塔的流程的能耗最高，外压缩+氧压机流程的能耗低于膨胀进下塔的流程，而膨胀后进上塔流程的能耗最低。原因是膨胀进上塔采用低压增压透平膨胀机，中压增压空压机，设备效率更高。同时膨胀进下塔流程的空分操作灵活性、设备投资比较、循环压缩机制造难度在上述方案中最低。因此对此 IGCC 发电示范工程优选方案三——膨胀后进上塔流程。

此后，对空分流程进行了优化，考虑到空分需要的原料空气量约为 227,000 Nm<sup>3</sup>/h，要求压力 6.05 bar，IGCC 系统的燃气轮机可以提供约 9.2% 的带压空气 (6.05 bar)，可以将这股带压空气送入空气冷却塔的中部，和经原料空压机增压后的气体混合、冷却、纯化后送入冷箱参与精馏。这样可以大大降低原料空压机的排量，节省能耗。

另外针对电力系统负荷调整较为频繁及要求负荷调整速度较快，下塔采用规整填料来满足整体变负荷的要求。一方面可以满足工程的要求，另外也可以有效的降低整体运行能耗。

该 IGCC 项目对于氮气没有要求，则可以利用出空分冷箱的多余部分污氮气，在水冷塔中就可将常温水冷却下来，供空气冷却塔上部用。这是因为水和干燥污氮气直接接触的过程中，由于水的蒸发吸收大量蒸发潜热，从而使水获得了降温效应。这样可以取消冷冻机组，从而减少厂房面积、投资及维修费用和放宽系统对水质的要求。

由于 IGCC 系统对于氧气的需求量会根据外部温度及负荷等参数的影响变化，由于空分设备变负荷相对系统的要求较慢，考虑设置液氧后备汽化系统。平时产出一定的液氧送入液氧储罐以低温液体的形式储存，当需求量上升时，抽取储罐中的液氧经液氧泵增压后再经液氧汽化器汽化后并入氧气管网，起一定的平衡作用。

空分装置产出的高纯度氮气可用作灭火和系统清扫等作用。由于该股气体非常用气体，一般可以采取由空分装置生产液氮进入低温储罐后气化的方式得到。在使用时，从低温储罐抽取液氮经过低温液体泵增压后得到高压液氮，进入汽化器汽化后得到高压氮气送入 IGCC 管网。

#### 4. 小结

随着近年来石油和天然气价格的飞涨，各国政策将发电技术的研发经费倒向了环保性能优异的 IGCC 发电技术，特别是在以煤为主要一次能源的我国，IGCC 发电技术将具有更加广阔的发展前景。

本文对基于 IGCC 的空分流程形式进行了介绍；对空分装置与 IGCC 的结合方式进行了初步探讨；并结合华电半山电厂一套 200MW 级 IGCC 发电示范工程，对该 IGCC 系统中空分流程进行了比较和优化，为实际工程提供依据。

由于 IGCC 系统复杂，不同的 IGCC 项目对于空分装置的产品需求也不尽相同，所以在总体流程设计中应注重整体流程的匹配及优化，使得从投资及运行能耗上达到最佳平衡点。同时，IGCC 系统是一个动态系统，影响到空分设备的动态负荷变化，考察基于 IGCC 系统的空分设备的动态特性是 IGCC 工程应用的一个重要的研究方向。