

现代空分设备的节电问题

燃气室 贾德训

【摘 要】 本文介绍了现代空分设备的特征, 论述了降低蒸发冷凝器温差和塔板压损是空气分离节电的重要措施。对上塔采用规整填料的效果明显优于下塔进行了分析研究。提出国产空分设备与国外的差距并指出解决的途径。

【关键词】 空分设备 降低压力 产品纯度 节电效果

1 现代空分设备特征

带分子筛纯化器和增压透平膨胀机的空分设备是第五代产品, 1990 年以来又开发了具有以下特征的第六代空分设备。

- 1) 调峰型流程, 调峰范围达 50 % ~ 100 %。
- 2) 空分塔采用规整填料, 全精馏无氢制氮。
- 3) 采用薄膜板式或多孔表面管冷凝蒸发器(主冷器), 使主冷器温差降至 0.8 ℃。
- 4) 采用径向流双层床纯化器, 加热再生温度在 100 ℃ 以下。
- 5) 应用大截面真空钎焊板翅式换热器。
- 6) 离心—轴流式空压机。
- 7) 实现具有高级智能负荷跟踪功能的控制系统。

第六代空分设备要求达到的技术指标是: 空压机出口压力 0.52MPa (绝压), 制氧电耗 $\leq 0.4 \text{ kWh/m}^3 \cdot \text{O}_2$, 氧提取率大于 98 %, 氮提取率达 90 %。

在国际上林德、法液空、APCI 等公司生产的空分设备已进入第六代产品, 国产空分设备差距较大。

2 空分塔采用规整填料

降低空压机出口压力, 是空分设备节电的重要措施。空压机出口压力是由下塔底部压力决定的。要降低下塔底部压力, 主要是降低塔板压损或减小主冷器温差、采用规整填料对降低塔板压损效果显著。

规整填料具有形状规则、对称、规定了气液流路、比表面积大、传质传热效率高和压损很小的优点。1985 年, 在国外规整填料开始用于空分设备, 效果明显, 发展迅速。每块理论塔板压损仅为筛板塔的 1/6 ~ 1/8, 筛板塔 300Pa, 规整填料塔 40Pa ~ 50Pa。一般来说下塔塔板为 35 块 ~ 40 块, 上塔塔板为 75 块 ~ 85 块。对筛板塔下塔压损为 10.5kPa ~ 13.5kPa, 上塔压损为 22.5kPa ~ 25.5kPa, 采用规整填料后, 下塔压损降低 8.7kPa ~ 11.3kPa, 上塔压损降低 18.8kPa ~ 21.3kPa, 上塔压降是下塔的 2 倍。

3 空分设备的节电

3.1 基本概述

3.1.1 主冷器换热

主冷器设在上塔底部和下塔顶部之间,上塔底部为液氧,下塔顶部为气氮,液氧、气氮在此进行热交换,液氧吸热而蒸发,气氮放热而冷凝(液化)。热交换是通过相变来进行的,它们之间温差是不变的,因此,液氧的蒸发压力和气氮的冷凝压力也是一定的。液氧的蒸发压力取决于上塔底部压力,气氮的冷凝压力取决于上塔顶部压力和保证主冷器换热所需的温差,当主冷器结构形式和材质选定后这

个温差也是恒定的。

3.1.2 浓度、压力与蒸发(或冷凝)温度的关系

当液氧浓度一定,上塔底部压力降低,液氧的蒸发温度也降低。当压力一定时,上塔底部液氧浓度提高,液氧蒸发温度也提高。当气氮浓度一定时,下塔顶部压力降低,气氮冷凝温度也降低,当压力一定时,下塔顶部气氮浓度提高,气氮冷凝温度反而降低。

3.1.3 压力变化对氧氮沸点的影响

表 1 不同压力下的氧氮沸点

压力 MPa (绝压)	0.10	0.15	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60
氧 °K	90	93	97	102	105	109	111
氮 °K	77	81	84	88	91	94	96

从表 1 数据可看出,在压力低的情况下,单位压力降低所引起的氧氮沸点变化的幅度大,随着压力的提高,氧氮沸点变化的幅度减小。

氧气压力从 0.2MPa 降至 0.1MPa,沸点由 97°K 降到 90°K,即, 7°K /0.1MPa, 或 14.3kPa/°K。从 0.6MPa 降至 0.5MPa,沸点由 111°K 降到 109°K,即 2°K/0.1MPa, 或 50kPa/°K。

氮气压力从 0.2MPa 降到 0.1MPa,沸点由 84°K 降到 77°K,即 7°K/0.1MPa 或 14.3kPa/°K。从 0.6MPa 降至 0.5MPa,沸点由 96°K 降到 94°K,即 2°K/0.1MPa, 或 50kPa/°K。

3.2 空分设备节电措施

3.2.1 降低塔板压损

上塔底部压力一般为~0.14MPa,当压力降低时,液氧蒸发温度降低幅度大,在保持主冷器温差不变的情况下,要求下塔顶部

氮气冷凝温度相应降低,虽然两者温度降低度数相同,但由于下塔压力高(~0.5MPa),相应压力降低幅度大,粗略计算为:

$$0.5/0.143 = 3.5 \text{ 倍}$$

考虑到具体压力区间,氧、氮浓度以及应该用 T-i-P-X-Y 图作精确计算,实际效果为>3 倍~<3.2 倍。

上塔采用规整填料后,下塔实际压降为 57kPa~65kPa,为下塔采用规整填料的 5.7 倍~6.5 倍。规整填料比筛板塔造价高,因上塔效果明显,可优先采用。

此外上塔采用规整填料后压力降低有利于氧氮分离,以提高氮的提取率。国外氮提取率可达 90%以上,国内设备仅为 60%~70%。

国内供货的空分设备采用规整填料的有以下 5 套。

三明钢铁厂 3200m³/h 机组上塔改为填料塔,鄂钢 6000m³/h 机组采用无氢制氮,

4500m³/h 机组为无氢制, 鲁南化肥厂 14000 m³/h 机组上塔采用规整填料。

三明钢铁厂原 3200 m³/h 机组由开空厂将上塔改为规整填料, 于 1995 年 10 月 18 日投产, 根据该厂计算得出以下数据 (见表 2)。

表 2 计算数据

序号	项目名称	单位	筛板塔	规整填料
1	上塔液氧温度	°K	94.7	93.8
2	主冷器温差	°C	1.8	1.8
3	下塔气氮温度	°K	96.5	95.6
4	下塔底部压力	kPa	606	564
5	上塔底部压力	kPa	141.8	127.9

上塔压力降低: $141.8 - 127.9 = 13.9\text{kPa}$;

下塔压力降低: $606 - 564 = 42\text{kPa}$;

$42/13.9 = 3.02$ 倍

3.2.2 降低主冷器温差

降低主冷器温差, 也是降低下塔压力的重要措施, 缩小主冷器温差应从改进主冷器的结构和材质着手, 提高传热系数。不同结构的主冷器参数列于表 3。

表 3 不同结构的主冷器参数

序号	结构形式	传热系数 W/m ² K	温差 °K (°C)
1	管式、液氧管外蒸发	580 ~ 770	2 ~ 3
2	管式、液氧管内蒸发	810 ~ 830	1.6 ~ 1.8
3	板翅式	835 ~ 900	1.2 ~ 1.6
4	薄膜板式	>930	0.8

主冷器温差每降低 1 °C, 下塔压力就降低 ~ 50kPa, 降压效果显著。国内主冷器温差 1.2 °C ~ 1.5 °C, 国外可达 ≤ 1 °C。温度从 3 °C 降至 0.8 °C, 使下塔压力降低 ~ 0.11Mpa。

3.2.3 提高空压机等温效率

苏尔寿 (Sulzer) 生产的离心—轴流

(ARI) 型为空压机等温效率可达 78 %, 德马克 (DEMAG) 生产的为 75 %, 沈鼓生产的 DH 型为 73 %。空压机等温效率每提高 1 %, 节电 1.5 % ~ 2 %, 等温效率从 73 % 提高至 78 %, 可节电 8 %。

3.2.4 提高氧气提取率

氧气提取率提高, 相应减少了空压机加压缩空气量, 提取率每增加 1 %, 节电约 1 %。国外一般达 98 %, 最高如 APCI 达 99.5 %, 国内仅达 88 % ~ 93 %。

氧气提取率达到 98 %, 污氮中氧含量应不大于 0.8 %。对常规只提取小量液体产品的空分设备, 氧气提取率要达到 98 %, 必须降低膨胀空气量, 国外空分设备膨胀空气量达 10 % 以下, 国内为 10 % ~ 14 %。

3.2.5 其它节电措施

a) 利用空压机后空气高温与污氮进行换热, 既减少纯化器再生加热污氮电耗, 又降低空气进空冷塔的热负荷, 可节电 1 % ~ 2 %。

b) 尽量提高产品气出冷箱温度, 在未采用纯化器前, 产品气出冷箱温度为 20 °C。采用纯化器后, 为保证空气进纯化器为 10 °C, 加热再生后用污氮冷却, 因而产品气出冷箱温度降为 11 °C ~ 12 °C。根据计算, 产品气出口温度每提高 3 °C 可节电 1.2 % ~ 1.4 %。采用双层床纯化器后, 空气入口温度可提高至 16 °C 以上, 因此产品气温度可适当提高。

c) 规整填料无氢制氮。无氢制氮能耗仅为传统加氢流程的 15 %, 节能效果显著。

4 节电计算

下塔压力降低, 空压机排出压力也相应降低, 电机功率下降, 可按以下公式计算出节电量。

$$N = \frac{RT\gamma^\circ G \ln \frac{P_2}{P_1}}{\eta_T \eta_m \times 3600} \quad (1)$$

式中:

N 空压机功率, kW

R 气体常数, 0.287kJ/kg · °K

T 环境温度, 303°K

γ° 空气比重, 1.293kg/m³

G 空气流量, m³/h

P₁ 空压机入口压力, kPa (绝压)

P₂ 空压机排出压力, kPa (绝压)

η_T 空压机等温效率, %

η_m 空压机机械效率, %

根据(1)式可计算出下塔压力降低前、后的空压机功率,从而求出节电量,但一般只求出节电百分比即可,(1)式可简化为:

$$\text{令 } K = \frac{R \cdot T \cdot \gamma^\circ \cdot G}{\eta_T \eta_m \cdot 3600}$$

$$\Delta N = \frac{\ln \frac{P_2}{P_1} - \ln \frac{P_2'}{P_1}}{\ln \frac{P_2}{P_1}} \times 100\% \quad (2)$$

可按式求出压力降低百分比:

$$\Delta P = \frac{P_2 - P_2'}{P_2} \times 100\% \quad (3)$$

式中:

P₂' 上塔压力降低后空压机排出压力, kPa。

ΔP 压力降低百分比, %

ΔN 节电百分比, %

根据表2数据,上塔未改规整填料前空压机排出压力 626kPa (设定主换热器、氨水预冷等压损为 20kPa 不变),改造后为 626

— 42 = 584kPa。空压机入口压力 98.5kPa。

$$\Delta P = \frac{42}{626} \times 100\% = 6.93\%$$

$$\Delta N = \frac{\ln \frac{626}{98.5} - \ln \frac{584}{98.5}}{\ln \frac{626}{98.5}} \times 100\% = 3.8\%$$

一般来说,空分塔采用规整填料后压力降和节电百分比大致范围如下。

上、下塔采用: $\Delta P = 7.62\% \sim 10.42\%$

$\Delta N = 4.8\% \sim 7.0\%$

上塔采用: $\Delta P = 6.2\% \sim 8.34\%$

$\Delta N = 3.7\% \sim 6.0\%$

5 结束语

中国与国外先进空分设备电耗主要差距是:

a) 空压机排出压力为 0.62MPa, 高 0.1MPa;

b) 制氧电耗为 0.52kWh/m³ · O₂, 高 0.12kWh/m³ · O₂。

解决以下关键技术,才能达到国外先进指标:

a) 主冷器温差缩小达 1 °C 以内,空分塔采用规整填料后,空压机排出压能降低 0.09MPa ~ 0.1MPa, 电耗降低 9%。

b) 增压透平膨胀机膨胀效率从 85% 提高至 90% 以上,氧提取率达 98% 以上。空压机等温效率提高至 76%, 电耗降低 15%;

c) 空压机排压出可达 0.62 - 0.09 ~ 0.1 = 0.52MPa ~ 0.53MPa;

d) 制氧电耗可达到 0.52 × (1 - 0.09 + 0.15) = 0.4kWh/m³ · O₂。