

空分产品能耗成本计算方法的探讨

西安交通大学低温技术教研室 陈芹元

【内容摘要】 本文从制取空分产品所耗电量的差异出发,提出了获得多种产品的空分设备能耗成本的计算方法。文章首先分析了空分设备中产品氧、氮和氩的能耗关系,在此基础上进行了空分产品能耗成本计算方法的探讨,并以“10000”和“6000”空分设备各种空分产品的能耗成本作了计算举例。表2参3。

除了单纯制取氧气产品的空分设备以外,对于同时获得氧、氮和氩产品的空分设备,在空分产品能耗成本的计算上,目前各氧气厂都以经验折算而定,缺乏统一标准,造成经济上的混乱。国内各空分设备制造厂所提供的空分设备能耗指标中也有此问题,因而不能确切地表达空分设备的经济性能。鉴于上述情况,对于获得多种产品的空分设备如何计算空分产品能耗成本,是“空分”工作者十分关注、急待明确的问题。本文从制取空分产品所耗电量的差异出发,提出空分产品能耗成本的计算方法,以供制取氧、氮和氩的空分设备使用,是否恰当,希望引起讨论。

一、空分设备中产品氧、氮和氩的能耗关系

空分设备是将加工空气分离成氧、氮和氩等产品的设备,每 1m^3 空气进入空分设备后,如果得到完善的分离,可得到 0.2095m^3 的氧气、 0.7809m^3 的氮气和 0.0093m^3 的氩气。能将空气完善分离的空分设备的能量消耗是最低的、理想的、达不到的,但是从中可揭示出空分设备中氧、氮和氩等产品所需能耗的基本关系。

设空分设备加工 1m^3 空气,并能将它完善分离,理想能耗为 N^0 。如果环境状态 $T_0 = 300\text{K}$ 时,理论上分离最小功 $N^0 = 0.01448\text{kwh}/\text{m}^3$ 空气^[1]。因此,

制取 1m^3 氧气产品的能耗 $N_{\text{O}_2}^0$ 为

$$N_{\text{O}_2}^0 = N^0 / 0.2095 = 4.7733N^0 \text{ kwh}/\text{m}^3\text{O}_2 \quad (1)$$

制取 1m^3 氮气产品的能耗 $N_{\text{N}_2}^0$ 为

$$N_{\text{N}_2}^0 = N^0 / 0.7809 = 1.2806N^0 \text{ kwh}/\text{m}^3\text{N}_2 \quad (2)$$

制取 1m^3 氩气产品的能耗 N_{Ar}^0 为

$$N_{\text{Ar}}^0 = N^0 / 0.0093 = 107.53N^0 \text{ kwh}/\text{m}^3\text{Ar} \quad (3)$$

如果设制取 1m^3 氧气产品的能耗为1,每一台空分设备完善分离时制取 1m^3 氧、氮和氩的能耗比例为

$$\begin{aligned} N_{\text{O}_2}^0 : N_{\text{N}_2}^0 : N_{\text{Ar}}^0 &= 4.7733N^0 : 1.2806N^0 : 107.53N^0 \\ &= 1 : 0.26828 : 22.527 \end{aligned} \quad (4)$$

这就是说,对于一台空分设备制取 1m^3 氧气产品能耗 $N_{\text{O}_2}^0$ 为1时,则在此空分设备中空气完善分离时,制取 1m^3 氮气产品的能耗为 $0.26828N_{\text{O}_2}^0$,即

$$\alpha_{\text{N}_2, \text{O}_2} = N_{\text{N}_2}^0 / N_{\text{O}_2}^0 = 0.26828 \quad (5')$$

制取 1m³ 氩气产品的能耗为 22.527N_{O₂}⁰，即

$$\alpha_{Ar, O_2} = N_{Ar}^0 / N_{O_2}^0 = 22.527 \tag{5''}$$

从产品成本角度看，某种气体产品能耗大，则其价值亦高。因此，上述关系也反映了产品氮、产品氩和产品氧之间的价值之比。

实际上，空分设备不可能将氧、氮和氩等组分完善分离，每台空分设备对于氧、氮和氩产品有一定的提取率 ρ。此时，制取 1m³ 的氧、氮和氩产品的能耗，将比完善分离时的理想能耗 N_{O₂}⁰、N_{N₂}⁰、N_{Ar}⁰ 大，其之间关系如下式所示

$$N_i = (1/\rho_i)N_i^0 \tag{6}$$

式中 N_i——空分设备实际制取 1m³ i 种产品的能耗；

ρ_i——空分设备 i 种产品的提取率；

N_i⁰——空分设备完善分离时制取 i 种产品的单位能耗。

如果空分设备氧、氮和氩产品的提取率为 ρ_{O₂}、ρ_{N₂} 和 ρ_{Ar}。设制取 1m³ 氧气产品的能耗为 1，空分设备实际制取 1m³ 氧、氮和氩产品的能耗比例为

$$N_{O_2} : N_{N_2} : N_{Ar} = 1 : (\rho_{O_2} / \rho_{N_2}) 0.26828 : (\rho_{O_2} / \rho_{Ar}) 22.527 \tag{7}$$

公式(7)表示的空分产品能耗关系是计算空分产品能耗成本的基础。公式(7)中的 N_{Ar} 应是指粗氩塔出来的粗氩产品而言。

有些空分设备生产的是液体产品或者是带压力的气体产品，由于液体产品和带压力的产品所需能耗比常压气体产品要高，从而影响如公式(7)所示氧、氮和氩产品的能耗关系，空分产品能耗比例的变化视具体情况而定。

如果从空分设备中获得的是氧、氮和氩的液体产品，各种液体产品多消耗的能量为液化该气体所消耗的能量。

当初始状态 T₁ = 300K, P₁ = 1kg/cm² (绝压)时，各种气体液化所需的理论最小功 W_{最小} 如表 1^[2] 所示。

表 1 气体液化所需的理论最小功

气体名称	气体液化	
	理论最小功 W _{最小} (kwh/kg)	理论最小功 W _{最小} (kwh/Nm ³)
氧 气	0.205	0.265
氮 气	0.177	0.2529
氩 气	0.22	0.2751
氪 气	0.134	0.2391

空分设备采用的制冷循环并不相同，因而液化各种气体实际所耗能量也不一致，一般为理论最小功的几倍到十几倍。

以液态取出的某种产品(液氧、液氮或液氩)，每 1m³ 某种液体产品的能耗按下式计算。

$$N_{L_i} = \frac{1}{\rho_i} (N_i^0 + W_i)$$

式中 N_{L_i}——制取 1m³ i 种液体产品的能耗；

ρ_i——i 种产品的提取率；

N_i⁰——完善分离时制取 1m³ i 种气体产品的能耗；

W_i——液化 1m³ i 种产品的能耗。

由于液态产品的能耗增加，因而制取液态产品时，形成了与公式(7)不同的产品能耗的比例关系。

如果从空分设备获得的是带压力的氧、氮和氩气体产品，每一种压力为 P 的气体产品多消耗的能量为压缩该种气体至所需压力 P 所消耗的功，气体的压缩功按下式计算

$$AL_i = \frac{RT_0 \cdot \gamma_0' \cdot \ln(P/P_0)}{860 \times 427 \cdot \eta_T \cdot \eta_M} \quad \text{kwh/Nm}^3 \quad (9)$$

式中 AL_i ——压缩 i 种产品气体从常压到压力 P 所需的压缩功；

R —— i 种产品气体常数；

T_0 —— i 种气体产品进入压缩机的温度(K)；

γ_0' —— i 种气体产品在标准状态下的重度(kg/m³)；

P —— i 种气体产品经压缩机压缩后的压力(kg/cm²)；

P_0 —— i 种气体产品进入压缩机的压力(kg/cm²)；

η_T ——压缩机的等温效率；

η_M ——压缩机的机械效率。

此时，带压力 i 种气体产品的能耗计算公式为：

$$N_{Ci} = \frac{1}{\rho_i} (N_i^0 + AL_i) \quad (10)$$

由于带压力气体产品的能耗增加，相应改变了与其它产品能耗的比例关系，因而形成了公式(7)不同的能耗比例关系。

氧、氮和氩产品离开分离单元后，有的仍需压缩或进一步净化，才能使用或成为商品。例如，纯氧和纯氮需进一步压缩，才能充瓶或送至用户；粗氩需经净除氧、氮组分后成为精氩，然后才加压充瓶……等。因此如用于某种产品再加工所需能量消耗为 $N_i(\text{再})$ ，则某种空分产品的单位总能耗 $N_i(\text{总})$ 为 $N_i(\text{再})$ 和上述分离能耗 N_i 之和；即

$$N_i(\text{总}) = N_i + N_i(\text{再}) \quad \text{kwh/Nm}^3 \quad i \text{ 种产品} \quad (11)$$

二、空分产品能耗成本的计算方法

制取氧、氮和氩产品的空分设备，其总能耗应按上述气体产品所耗能量的比例关系分配到每种气体产品上，从而确定氧、氮和氩产品的能耗成本。因此，在计算 i 种气体产品的能耗成本时，其它气体产品，其数量用折合系数 $\alpha_{j,i}$ [$\alpha_{j,i}$ 表示 j 种产品能耗与 i 种产品能耗之比，如 $\alpha_{N_2, O_2} = N_{N_2}/N_{O_2}$]

折算后，合并到 i 种产品之中，然后计算，如公式(12)所示

$$N_i = \frac{\Sigma N}{V_i + \Sigma \alpha_{j,i} V_j} \quad \text{kwh/Nm}^3 \quad i \text{ 种产品} \quad (12)$$

式中 N_i ——制取 1m³ i 种气体产品的能耗；

ΣN ——空分设备总的能量消耗，包括空压机、水泵、油泵液氧泵等消耗的能量、纯化器消耗的能量、膨胀机回收的能量等总和；

V_i —— i 种气体产品的数量；

V_j —— j 种气体产品的数量；

$\alpha_{j,i}$ —— j 种气体产品折算到 i 种气体产品的折合系数。

如果运行中空分设备的 i 种气体产品纯度，与设计时所取的提取率 ρ_i 相对应的纯度不同时，此时， i 种气体产品的数量 V_i 之前要加一纯度校正系数 β ，公式(12)改变为

$$N_i = \frac{\Sigma N}{\beta_i \cdot V_i + \Sigma \alpha_{j,i} V_j \beta_j} \quad \text{kwh/Nm}^3 \quad i \text{ 种产品}$$

式中 $\beta_i = \xi_i^{Pr} / \xi_i^S$

ξ_i^{Pr} ——运行中 i 种气体产品的实际纯度;

ξ_i^S ——设计时当提取率为 ρ_i 相应的 i 种气体产品的纯度。

例: $\xi_{O_2}^S = 99.6\%$, 运行中实测 $\xi_{O_2}^{Pr} = 99.2\%$, 此时

$$\beta_{O_2} = \xi_{O_2}^{Pr} / \xi_{O_2}^S = 99.2 / 99.6 = 0.996$$

知晓了 i 种气体产品的能耗成本之后, 根据气体产品能耗的比例关系, 就能确定其它气体产品能耗成本的数值。

从上可知, 对于每一台空分设备, 制取的气体产品品种多, 数量大, 则每一种气体产品的能耗成本亦低, 反之亦然。因此, 对于空分设备应尽可能多提取各种纯产品。

三、空分产品能耗成本计算举例

1. 制取氧和氮气体产品的林德 10000Nm³/h 空分设备

(1) 气体产品的参数

加工空气量	55000 Nm ³ /h
气态氧产量	10000 Nm ³ /h, 纯度 99.5%O ₂
气态氮产量	10000 Nm ³ /h, 纯度 99.99%N ₂

氧提取率 ρ_{O_2}

$$\rho_{O_2} = \frac{10000 \times 99.5}{55000 \times 20.95} = 0.86353$$

氮提取率 ρ_{N_2}

$$\rho_{N_2} = \frac{10000 \times 99.99}{55000 \times 78.09} = 0.23281$$

(2) 10000m³/h 空分设备电耗值 (如表 2 所示)

表 2 “一万”空分设备电耗

设 备 名 称	实际消耗功率 (kw)
空气透平压缩机	4850
空气透平压缩机油泵	30
透平膨胀机(回收电功率)	-82
循环液氧泵	2.2
喷淋冷却塔水泵	39.5
总的消耗功率	$\Sigma N = 4839.7$

(3) 气体产品的单位能耗成本

氧气的单位能耗

$$N_{O_2} = \frac{\Sigma N}{V_{O_2} + \alpha_{N_2, O_2} \cdot V_{N_2}} = \frac{4839.7}{10000 + (0.86353 / 0.23281) 0.26828 \times 10000} = 0.24258 \text{ kwh/Nm}^3 \text{ O}_2$$

氮气的单位能耗

$$N_{N_2} = \alpha_{N_2, O_2} \cdot N_{O_2} = (0.86353 / 0.23281) 0.26828 \times 0.24258 = 0.24139 \text{ kwh/Nm}^3 \text{ N}_2$$

核算

$$N_{O_2} \cdot V_{O_2} + N_{N_2} \cdot V_{N_2} = 0.24258 \times 10000 + 0.24139 \times 10000 = 4839.7 \text{ kw}$$

(4) 如果采用分子筛流程, 氮气产量提高到 25000Nm³/h, 氮气纯度仍为 99.99%N₂, 则

$$\rho_{N_2} = (25000 \times 99.99) / (55000 \times 78.09) = 0.58202$$

氧气的单位能耗

$$N_{O_2} = \frac{\Sigma N}{V_{O_2} + \alpha_{N_2, O_2} \cdot V_{N_2}}$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{4839.7}{10000 + (0.86353/0.58202)0.26828 \times 25000} \\
 &= 0.24258 \text{ kwh/Nm}^3\text{O}_2
 \end{aligned}$$

氮气的单位能耗

$$\begin{aligned}
 N_{\text{N}_2} &= \alpha_{\text{N}_2\text{O}_2} \cdot N_{\text{O}_2} = (0.86353/0.58202)0.26828 \times 0.24258 \\
 &= 0.096557 \text{ kwh/Nm}^3\text{N}_2
 \end{aligned}$$

核算
$$\begin{aligned}
 N_{\text{O}_2} \cdot V_{\text{O}_2} + N_{\text{N}_2} \cdot V_{\text{N}_2} &= 0.24258 \times 10000 + 0.096557 \times 25000 \\
 &= 4839.7 \text{ kw}
 \end{aligned}$$

2. 制取氧、氮和氩气体产品的林德 10000Nm³/h 空分设备

(1) 气体产品参数

加工空气量	55000 Nm ³ /h
气态氧产量	10000 Nm ³ /h, 纯度 99.5%O ₂
气态氮产量	10000 Nm ³ /h, 纯度 99.99%N ₂
气态氩产量	190 Nm ³ /h, 粗氩纯度 95%Ar
氧提取率	$\rho_{\text{O}_2} = 0.86353$
氮提取率	$\rho_{\text{N}_2} = 0.23281$
氩提取率	$\rho_{\text{Ar}} = (190 \times 95)/(55000 \times 0.93) = 0.35288$

(2) 总消耗功率 $\Sigma N = 4839.7 \text{ kw}$

(3) 气体产品的单位能耗成本

氧气的单位能耗

$$\begin{aligned}
 N_{\text{O}_2} &= \frac{\Sigma N}{V_{\text{O}_2} + \alpha_{\text{N}_2\text{O}_2} \cdot V_{\text{N}_2} + \alpha_{\text{ArO}_2} \cdot V_{\text{Ar}}} \\
 &= 4839.7 / [10000 + (0.86353/0.23281)0.26828 \times 10000 \\
 &\quad + (0.86353/0.35288)22.527 \times 190] = 0.15907 \text{ kwh/Nm}^3\text{O}_2
 \end{aligned}$$

氮气的单位能耗

$$\begin{aligned}
 N_{\text{N}_2} &= \alpha_{\text{N}_2\text{O}_2} \cdot N_{\text{O}_2} = (0.86353/0.23281)0.26828 \times 0.15907 \\
 &= 0.15829 \text{ kwh/Nm}^3\text{N}_2
 \end{aligned}$$

氩气的单位能耗

$$\begin{aligned}
 N_{\text{Ar}} &= \alpha_{\text{ArO}_2} \cdot N_{\text{O}_2} = (0.86353/0.35288)22.527 \times 0.15907 \\
 &= 8.7688 \text{ kwh/Nm}^3\text{Ar}
 \end{aligned}$$

核算
$$\begin{aligned}
 N_{\text{O}_2} \cdot V_{\text{O}_2} + N_{\text{N}_2} \cdot V_{\text{N}_2} + N_{\text{Ar}} \cdot V_{\text{Ar}} \\
 = 0.15907 \times 10000 + 0.15829 \times 10000 + 8.7688 \times 190 = 4839.7 \text{ kw}
 \end{aligned}$$

3. 制取氧、氮气态产品和部分液氧产品的日立 6000Nm³/h 空分设备

(1) 气体和液体产品参数

加工空气量	37500 Nm ³ /h
气态氧产量	6000 Nm ³ /h, 纯度 99.6%O ₂
气态氮产量	6000 Nm ³ /h, 纯度 99.99%N ₂

液态氧产量 $200 \text{ Nm}^3/\text{h}$, 纯度 $99.6\% \text{ O}_2$

氧提取率 $\rho_{\text{O}_2} = (6000 \times 99.6) / (37500 \times 20.95) = 0.78602$

氮提取率 $\rho_{\text{N}_2} = (6000 \times 99.99) / (37500 \times 78.09) = 0.20487$

(2) 总的功率消耗 $\Sigma N = 3250 \text{ kw}$ (设计值)

(3) 气体和液体产品的单位能耗成本

液态氧的单位能耗

$$\begin{aligned}
 N_{\text{LO}_2}^0 &= N_{\text{O}_2}^0 + W_{\text{O}_2} = 4.7733N^0 + (0.2529/0.01148)N^0 \\
 &= 4.7733N^0 + 17.466N^0 = 4.7733N^0 \times 4.659 = N_{\text{O}_2}^0 \times 4.659
 \end{aligned}$$

所以 $N_{\text{LO}_2}^0 : N_{\text{O}_2}^0 = 4.659$

氧气的单位能耗

$$\begin{aligned}
 N_{\text{O}_2}^* &= \frac{\Sigma N}{V_{\text{O}_2} + \alpha_{\text{LO}_2, \text{O}_2} \cdot V_{\text{LO}_2} + \alpha_{\text{N}_2, \text{O}_2} \cdot V_{\text{N}_2}} \\
 &= 3250/6000 + 4.659 \times 200 + (0.78602/0.20487)0.26828 \times 6000 \\
 &= 0.24795 \text{ kwh}/\text{Nm}^3 \text{ O}_2
 \end{aligned}$$

液氧的单位能耗

$$N_{\text{LO}_2} = \alpha_{\text{LO}_2, \text{O}_2} \cdot N_{\text{O}_2}^* = 4.659 \times 0.24795 = 1.1552 \text{ kwh}/\text{Nm}^3 \text{ LO}_2$$

氮气的单位能耗

$$\begin{aligned}
 N_{\text{N}_2} &= \alpha_{\text{N}_2, \text{O}_2} \cdot N_{\text{O}_2}^* = (0.78602/0.20487)0.26828 \times 0.24795 \\
 &= 0.25521 \text{ kwh}/\text{Nm}^3 \text{ N}_2
 \end{aligned}$$

核算

$$\begin{aligned}
 N_{\text{O}_2} \cdot V_{\text{O}_2} + N_{\text{LO}_2} \cdot V_{\text{LO}_2} + N_{\text{N}_2} \cdot V_{\text{N}_2} \\
 = 0.24795 \times 6000 + 1.1552 \times 200 + 0.25521 \times 6000 = 3250 \text{ kw}
 \end{aligned}$$

参 考 文 献

- [1] С. И. Герш: Глубокое охлаждение. Часть I. Госэнергоиздат. Москва. 1957
- [2] С. С. Будневич: Процессы глубокого охлаждения. «Машиностроение». 1966
- [3] 《空分产品能耗和成本的计算方法》, 机械工业部空分设备科技情报网研究专题, 1983.12

充液氮的水果饮料罐头

日本麒麟啤酒公司生产一种充液氮的水果饮料罐头。原先的水果饮料罐头, 由于在封罐时要加热, 因此当罐内饮料冷却时, 就会因体积收缩造成罐内负压, 从而造成罐体凹陷, 因此罐体壁要做得较厚。

充液氮后, 就可防止上述现象。并可减小罐壁厚度, 节约用材。此外, 在水果饮料罐中充液氮后, 排除了部分空气, 还有利于饮料的贮存。据试验, 每罐饮料共约 1.5

0.7克液氮(其中实际封入罐内的液氮只有0.1克, 其余均在充填过程中气化了)。由于罐壁变薄, 价格降低较多, 即使增加充填液氮的成本, 其包装费用仍只有原来的 91%。

——摘自上海《国外科技消息》

1985年第7期 (顾)