

富氧深冷空分工艺在铜冶炼中的应用

葛晓鸣 杨仁记 宫兆庆

(烟台国润铜业有限公司, 山东烟台 264010)

[摘要] 某铜冶炼企业采用一台下塔一台辅塔的双下塔富氧深冷空分工艺制备浓度85%的富氧。本文分析了该工艺的流程,将其与变压吸附工艺、常规纯氧空分工艺进行对比,并就该工艺运行中存在的问题提出优化措施。通过工艺对比可知,富氧深冷空分工艺不存在变压吸附产量逐年衰减的问题,比常规纯氧空分工艺节能15%~20%,具有氧气回收率高、投资成本和能耗低、操作和维护简单、运行稳定等优点,且经过不断优化,将显示更大的优势。

[关键词] 双下塔富氧深冷空分; 常规深冷空分; 变压吸附; 铜冶炼; 应用

[中图分类号] TF811; TB657.7 [文献标志码] B [文章编号] 1008-5122(2021)01-0027-05

DOI:10.19610/j.cnki.cn11-4011/tf.2021.01.005

Application of Oxygen-enriched Cryogenic Air Separation in Copper Smelting

GE Xiao-ming, YANG Ren-ji, GONG Zhao-qing

Abstract: A copper smelting enterprise used a double lower tower oxygen-enriched cryogenic air separation process with one lower tower and one auxiliary tower to prepare oxygen with a concentration of 85%. This paper analyzed the process, compared it with pressure swing adsorption process and conventional pure oxygen air separation process, and put forward optimization measures for the problems existing in the operation of the process. Through the process comparison, it can be seen that there was no problem of pressure swing adsorption production declining year by year in the oxygen-enriched cryogenic air separation process. Compared with the conventional pure oxygen air separation process, it can save energy by 15%~20%. It had the advantages of high oxygen recovery rate, low investment cost and energy consumption, simple operation and maintenance, and stable operation. After continuous optimization, it would show greater advantages.

Key words: double lower tower oxygen-enriched cryogenic air separation; conventional cryogenic air separation; pressure swing adsorption; copper smelting; application

0 前言

烟台国润铜业有限公司(以下简称“国润铜业”)在2017年以前采用“侧吹炉熔炼+侧吹吹炼”工艺,粗铜产能为60 kt/a,配套的硫酸系统产能为

200 kt/a。为解决产能达不到行业准入100 kt/a的要求及综合能耗高的问题,中国恩菲工程技术有限公司、国润铜业联合开发了“富氧侧吹熔炼+多枪顶吹连续吹炼+火法阳极精炼”热态三连炉连续炼铜生产工艺,并实现了工业化应用。熔炼及配套改造项目由中国恩菲工程技术有限公司设计,粗铜设计产能为100 kt/a,硫酸设计产能为370 kt/a。铜冶炼过程中需要纯度85%的氧气、氮气以及少量的纯氧。

[收稿日期] 2020-09-15

[作者简介] 葛晓鸣(1969—),男,山东蓬莱人,硕士,高级工程师,主要从事生产技术管理工作。

公司周边有几家大型空分企业,液氮、液氧、氩气等产品竞争激烈,相关产品的销售利润空间较少。国润铜业采用常规深冷空分法制取氧气,氧气的纯度通常大于 99.2%,需要通过增加空压机补充一定量的空气,来混合制成纯度 85% 的氧气,这种方法能耗较高。经过多次论证,公司决定采用富氧深冷空分技术制氧^[1]。铜冶炼及配套制氧系统于 2017 年 7 月一次性试生产成功,经过 3 年多的生产实践,制氧指标达到或优于设计指标。

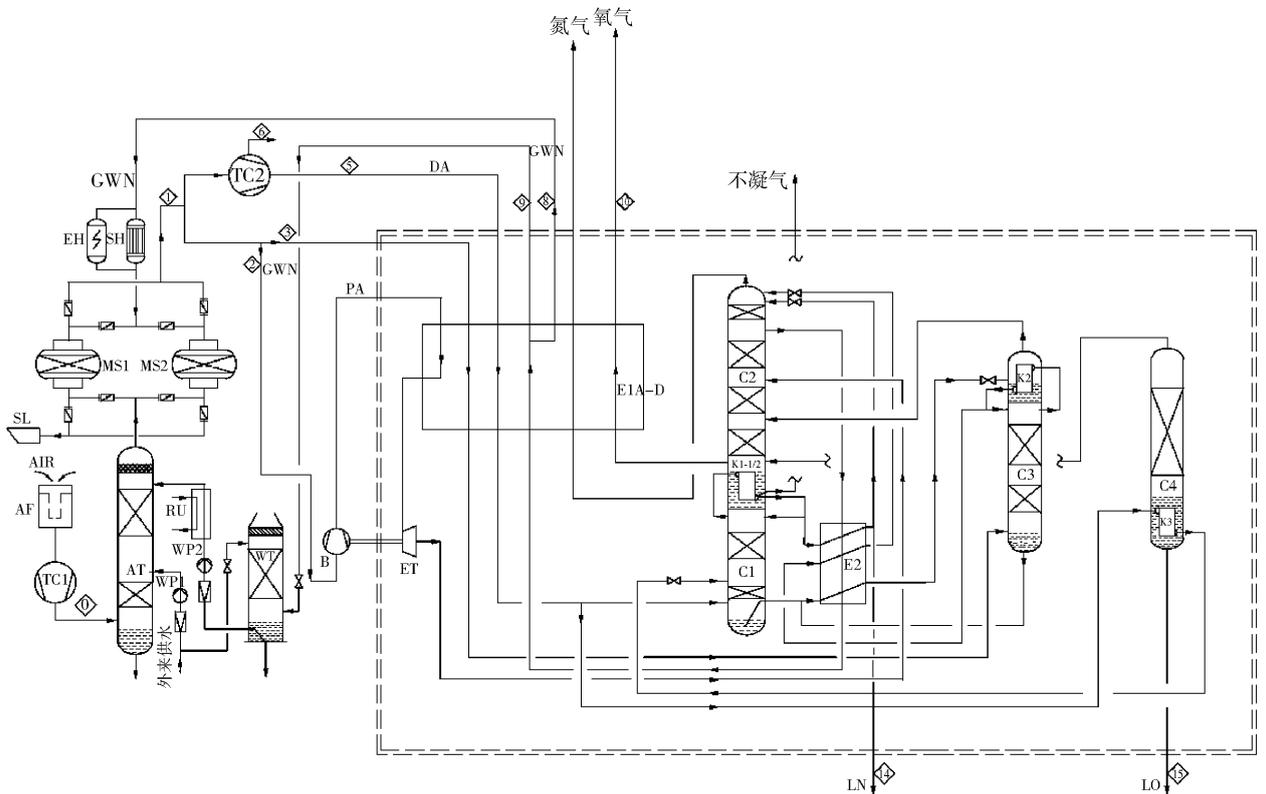
本文介绍了富氧深冷空分的工艺流程,并与变压吸附、常规纯氧空分工艺对比,分析该工艺的优点及运行中存在的问题,并就问题提出了相应优化

措施。

1 富氧深冷空分装置简介

1.1 装置构成

经过现场考察不同设备生产厂家、不同设备的使用状况及多方论证,于 2016 年 5 月选择了福斯达 KDON-18800(150Y)/3000 型空气分离设备。该装置组成如图 1 所示。该系统主要由 1 台主换热器 E1A-D,1 台下塔 C1、1 台主冷凝蒸发器 K1-1/2、1 台上塔 C2、1 台过冷器 E2、1 台辅助下塔(以下简称辅塔)C3、1 台辅塔冷凝蒸发器 K2、1 台纯氧塔 C4 及 1 台纯氧塔蒸发器 K3 组成。



C1 - 下塔;C2 - 上塔;C3 - 辅塔;C4 - 纯氧塔;ET - 膨胀机膨胀端;E1 - 主换热器;E2 - 过冷器;K1 - 主冷凝蒸发器;K2 - 辅塔冷凝蒸发器;K3 - 纯氧塔蒸发器;SL - 放空消音器;TC2 - 空气增压机;RU - 冰机;SH - 蒸气加热器;EH - 电加热器;B - 膨胀机增压端;AF - 空气过滤器;TC1 - 原料空压机;AT - 空气冷却塔;WT - 水冷塔;WP - 水泵;MS - 吸附器

图 1 18800 富氧深冷空分双下塔工艺示意图

1.2 富氧深冷空分工艺流程

需加工的空气在下塔 C1 中精馏,在下塔顶部和底部分别得到纯氮气和富氧液空。下塔顶部的纯氮气全部进入主冷凝蒸发器 K1 中进行冷凝,然后大部分作为下塔的回流液回流至下塔顶部,小部分则送入过冷器进行过冷。过冷后的液氮经过节流

后,全部送入上塔顶部作为上塔回流液,参与上塔精馏。

在下塔底部获得的富氧液空,经过冷器过冷后全部送入辅塔冷凝蒸发器 K2 作为冷源,富裕液氮回流至上塔中部参与上塔精馏,辅塔液空闪蒸汽返回上塔参与上塔精馏。

液氮、膨胀空气、辅塔液空和辅塔液空闪蒸汽经过上塔的精馏过程后,在上塔 C2 底部、下部、顶部分别得到液氧、产品氧气、氮气,在上塔中上部抽取污氮气。底部的液氧在主冷凝蒸发器 K1 中与下塔顶部的氮气换热,被汽化后,一部分作为上升气参与上塔精馏,一部分作为产品从主冷凝蒸发器顶部抽出,一部分进入纯氧塔 C4 中进行精馏。在纯氧塔底部设置蒸发器 K3,该蒸发器的热源由从主换热器出来的经过增压机的中压空气提供。在纯氧塔底部得到 99.6% 纯度的液氧,接着该部分液氧送入液氧贮槽。

在上塔中上部抽取的污氮气和在顶部得到的氮气经过冷器 E2 和主换热器 E1A-D 复热后送出冷箱。污氮气除一部分气作为纯化系统的再生用气外,其余全部送入水冷塔回收冷量,之后氮气作为产品气送给用户。

为满足 85% 纯度氧气以及工艺流程的要求,精馏塔还设置了一个辅塔系统。低压空气在主换热器 E1A-D 中被精馏塔系统产生的低温低压污氮气、氮气和氧气冷却至接近液化温度,随后进入辅塔参与精馏。在辅塔顶部和底部分别得到纯氮气、富氧液空。辅塔顶部的氮气全部进入辅塔冷凝蒸发器 K2 中进行冷凝,随后大部分液氮作为下塔的回流液回流至下塔顶部,其余部分送入过冷器进行过冷。过冷后的液氮经过节流后,全部送入上塔顶部作为上塔回流液,参与上塔精馏。

辅塔底部的富氧液空经过冷器过冷后,全部送入辅塔冷凝蒸发器 K2 作为冷源。大部分富氧液空被蒸发成液空蒸汽回到上塔,作为上升气参与精馏,其余富氧液空回流至上塔中部参与上塔精馏。

1.3 富氧深冷空分设计参数

该装置的产品设计产量、纯度及压力见表 1。

表 1 产品设计产量、纯度及压力

项目	产量/ $\text{Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	纯度/%	使用方式	出冷箱压力/ MPa·G
氧气 I	18 800.000	≥85.000%	连续	≥0.020
氧气 II	150.000	≥99.600%	每天 3 h	≥0.020
氮气	3 000.000	≥99.999%	连续	≥0.015

2 制氧工艺对比

2.1 富氧深冷空分装置的改进

在常规纯氧空分装置中,因受精馏塔中下部

产品纯度要求以及主冷凝蒸发器上部与底部不可避免的温差影响^[2],精馏塔下塔的操作压力已被限定,再加上压缩空气从空压机出口流动至下塔入口受到的沿程阻力,空压机的排气压力也被限制。而在常规空分装置中,空压机的能耗占到空分装置总能耗的 90% 以上,即空分装置的能耗已然确定,所以常规空分的能耗基本是固定值,可优化的余地很少。

富氧深冷空分装置采用一台下塔一台辅塔的双下塔制取低纯氧的工艺,氧气的供应采用冷箱外压缩方式,经换热器气化复热后送出冷箱,精馏塔构造及原理与常规深冷空分装置基本相同^[3],区别在于富氧深冷空分装置精馏工艺改变了常规深冷空分的流程,增设了 1 台低压力辅塔;且为了满足少量纯度 99.6% 氧气的要求,增加了 1 台小型纯氧塔。

与常规深冷空分流程相比,富氧深冷空分装置精馏工艺的上塔回流液过剩,因此通过减少上塔理论板数,降低上塔的液气比,在上塔底部直接得到相应纯度的氧气,从而降低上塔高度、空压机排气压力和能耗。上塔多余的回流液转移至辅塔 C3,建立压力更低的工况,进一步降低空压机排气压力和能耗。为了满足富氧深冷空分两种压力的设计要求,增加了一台增压机。空压机中占总气量 60% 左右的较低压空气进入辅塔,其余空气则经过增压机增压后进入下塔 C1。

富氧深冷空气装置采用空压机与增压机一体的结构。高压部分配 6 kV 的电机,功率为 5 800 kW,轴功率为 5 150 kW;低压部分配 380/220 V 电机,功率为 1 415.5 kW,不含备用水泵、油泵,轴功率为 562.2 kW;纯化器功率为 1 200 kW,在 240 min 内开启 90 min,因此轴功率按 450 kW 计。

2.2 常规深冷空分、变压吸附、富氧深冷空分的对比

目前制氧工艺包括富氧深冷空分、常规深冷空分、变压吸附,这三种工艺的比较见表 2。

从表 2 可知,富氧深冷空分工艺的能耗与变压吸附基本相当,但不存在变压吸附产量逐年衰减的问题;相对常规纯氧空分工艺,富氧深冷空分工艺可实现节能 15% ~ 20%,符合国家节能减排的要求。双下塔富氧深冷空分既具有变压吸附制氧的成本优势,可生产富氧,满足铜冶炼炉的需求,又可生产氮、纯氧的气体 and 液体产品,满足不同的需求,具有较好的经济效益。

表2 常规深冷空分、变压吸附与富氧深冷空分的比较

项目	常规深冷空分装置	变压吸附装置	富氧深冷空分装置	备注
产品气量/ Nm^3	16 000	18 800	18 800	
产品纯度/%	99.6	85	85	
设备投资	略高	约1.4倍	作为基准	
副产品	氮气及氧氮液体产品	氧气	少量纯氧、氮的气体及液体产品	液氧可以作为应急储备气源
噪声	压力高,噪声大	气流脉冲及罗茨风机噪声较大	压力低,噪声较低	
操作	启停时间长,调整幅度75%~105%	启停方便,负荷调整幅度大,操作简单,对操作工要求低	启停时间长,调整幅度75%~105%,双下塔操作稍复杂	
空压机气量及压力	80 000 Nm^3/h 排压:0.59 $\text{MPa}\cdot\text{A}$	主要设备是罗茨真空泵与罗茨鼓风机	80 000 Nm^3/h 排压:0.37 $\text{MPa}\cdot\text{A}$ (进辅塔)/0.495 $\text{MPa}\cdot\text{A}$ (进下塔)	
理论稳定运行电耗/ kWh	6 720	变动负荷	5 680	
理论电单耗/ $\text{kWh}\cdot\text{Nm}^{-3}$	0.408 5	0.340 0	0.347 3	
实际电单耗/ $\text{kWh}\cdot\text{Nm}^{-3}$	0.420 0	0.348 0	0.362 7	变压吸附为前两年分子筛衰减开始前的数据
稳定性	稳定运行1.5年以上	阀门动作、压力变化频繁,造成故障频繁,不利于稳定生产	可以稳定运行1.5年以上	变压吸附的产量,随着分子筛的老化会逐渐衰减
日常维修量	很少	日常维修量较大	很少	

3 富氧深冷空分装置的运行情况

3.1 氧气回收率

通过减少分馏塔填料层数和精馏次数,降低上塔液气比、分离氧氮所需的分离功和氧气纯度,提高氧气的回收率。

在深冷空分领域,污氮气中的含氧量体现了空分装置的先进性。污氮气中含氧量越低,说明氧气损失越少,空分装置的氧提取率越高,性能越好。在正常运行工况下,富氧深冷空分装置污氮气中的含氧量仅为0.258%。总气量为80 000 Nm^3/h ,仪表气400 Nm^3 ,空气中氧气含量按20.95%计算,污氮气带走的氧气为 $(80\,000 - 400 - 18\,800 - 3\,000 - 150) \times 0.258\% = 149\ \text{Nm}^3/\text{h}$,氧气回收率为 $(16\,676 - 149)/16\,676 \times 100\% = 99.1\%$ 。这表明富氧深冷空分装置的氧回收率非常高。

3.2 能耗和投资成本

由于富氧深冷空分装置的上塔填料层数减少,上塔的高度比常规上塔降低了一半,使上塔受到的阻力减少,氧气饱和压力、饱和温度降低。由于上塔和下塔的主冷凝蒸发器温差不变,下塔顶部的氮气

饱和温度、下塔压力降低,从而降低了空压机的压力和能耗。

2018年12月29日至2019年11月28日,根据国润铜业生产统计,富氧深冷空分装置生产的氧气量为119 733 084 Nm^3 ,液氧量为1 174 284 Nm^3 ,负荷率为93.5%,用电量为44 701 182 kWh ,因此制氧综合电单耗为0.362 7 kWh/Nm^3 。而常规纯氧深冷空分的电单耗一般为0.42~0.45 kWh/Nm^3 。因此,常规单下塔纯氧深冷空分与双下塔富氧深冷空分工艺相比,出冷箱压力均按0.02 MPa 算,不含氧压机能耗,后者的电单耗降低非常显著。

此外,由于上塔高度降低,整个冷箱的高度也降低,下塔中约60%的气量会分到辅塔,因此辅塔投资增加,但下塔和上塔的投资均降低,整个设备的投资会随之下降。

3.3 运行和维护

本装置主体采用空压机与增压机一体的结构,其余均为小型电机驱动设备及静设备,操作维护简单,运行稳定,故障率低。运行3年多,没有出现故障停车问题,维修费用主要是一些备件提报的费用。此外,该装置的噪声可以达到《工业企业厂界环境

噪声排放标准》(GB 12348—2008)的要求。

3.4 开车时间

由于富氧深冷空分装置增设了一个低压力辅塔,增加了一部分增压气体,对气体分配、主冷凝蒸发器的液面控制的要求更加严格。截至2019年11月28日,共经历了4次开车。通过摸索实践,得到以下经验:先开主塔,后开辅塔,充分利用膨胀机冷量,尽快建立工况,可以提前满足熔炼开车的少量用氧需要。从启动膨胀机到出现液体,共需要20 h 23 min,达到设计液面需要5 h 50 min,调纯需要9 h 47 min,达到设计纯度共需要36 h^[4]。由于熔炼开车对气量及纯度要求比较低,可以在调纯期间开始使用氧气,因而开车时间会比正常开车时间快约10 h。

4 运行存在的问题及改进

这套装置是国内首套双下塔富氧深冷空分装置,比较成熟,但在纯化器入口温度控制、膨胀机出口温度控制、噪音、DCS控制等方面还存在一些不足。经过3年多的实际应用,对该装置进行了以下改造:

4.1 冰机改造

该套富氧空分空压机的出口压力低,进入纯化器的饱和空气中含水量偏高,到了夏季,冰机经常超负荷运行,发生连锁停车。为了确保冰机在规定负荷下工作,增加了一台小型冰机专供夏天运行使用。2019年夏季,冰机运行平稳。

4.2 膨胀机增加换热器

按照阻力及热平衡理论设计,膨胀机增压端出口不需要配备换热器^[5],但是调试及后续开车过程中出现了冷量不足及增压端出口气体在夏季超温报警等问题。在2018年底增加了换热器,到目前为止,膨胀机运行平稳。

4.3 空压机油冷器冷却水改造

空压机油冷器为板式换热器,对水质要求很高。经过多次数据分析,决定把系统补水点由循环水池补水改为在油冷器处补水,并增加了一台自动控制加压泵。现在水温水压稳定,油温控制得到了明显改善。

4.4 噪声治理

该项目距离居民区较近,适用的噪声控制标准较高,空压机厂房、管道、进口过滤器是主要噪声源。通过对管道加装隔音棉,对空压机厂房及进口过滤器加装隔音棉帘,噪声达到了标准要求。

4.5 电气及程序优化

开车初期,纯化器电炉加热过程中,8台电炉的开关柜同时打开,电网受到的冲击大,不利于设备的运行,容易发生设备事故,并且经常有个别开关或接头烧毁。通过修改DCS程序及开关选型,设备一直运行稳定。

4.6 液氧泵

熔炼瓶氧气用量大一直是个突出问题,通过对原设备配置的液氧储罐加装液氧泵进行改造,为熔炼直接输送高压管道氧气,熔炼瓶氧气用量减少至原来的10%左右。

5 结束语

富氧深冷空分工艺具有氧气回收率高、投资成本和能耗低、操作和维护简单、运行稳定、故障率低、开车时间快等优点。富氧深冷空分流程作为生产应用上的新生事物,在理论设计走向实际应用的过程中,通过不断的完善,一定会显现出更大的优势。双下塔富氧深冷空分装置的成功运行,为铜冶炼行业富氧深冷空分工艺的应用开创了具有竞争力的探索,也可为其他用氧行业提供借鉴。

[参考文献]

- [1] 陈彩霞. 富氧燃烧用低纯氧空分技术的开发[J]. 深冷技术, 2017(1): 12-15.
- [2] 朱兆华, 沈振国. 制氧工安全技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2012.
- [3] 汤学忠, 顾福民. 新编制氧工问答[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2001.
- [4] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 空分制氧设备安装工程施工与质量验收规范: GB 50677—2011[S]. 北京: 中国计划出版社, 2012.
- [5] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 氧气站设计规范: GB 50030—2013[S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.