

规整填料技术在空气低温精馏中的应用

丁浩, 张雁, 俞旭峰

(天津市天大北洋化工设备有限公司, 天津 300072)

摘要:介绍了规整填料技术在空气低温精馏过程中的应用, 列举了空分精馏塔内件设计制造等过程中需要注意的问题, 指出了今后的发展方向。

关键词:空分设备; 规整填料; 液体分布器; 精馏; 进展

中图分类号: TQ028.31; TQ053.5

文献标识码: A

文章编号: 0253-4320(2009)10-0066-04

Advances in air cryogenic distillation with structured packing technology

DING Hao, ZHANG Yan, YU Xu-feng

(Tianda Beiyang Chemical Equipment Co., Ltd., Tianjin 300072, China)

Abstract: The application of structured packing technology in air cryogenic distillation process is introduced, the problems which exist in the design and manufacture process of air separation column internals are described, and the further development trend of this area is put forward.

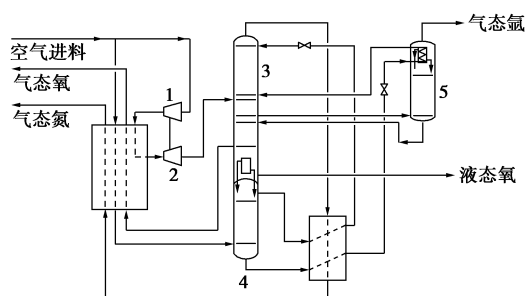
Key words: air separation equipment; structured packing; liquid distributor; distillation; progress

近几年来, 冶金、煤制油、甲醇、化肥、乙烯等行业的稳定发展, 带动了气体市场的快速扩张, 国内对空分设备的需求不断加大, 相关行业的发展为空分设备的未来营造了可观的市场。据预测, 近 10 年中冶金行业对空分装置的总需求量 (O_2) 将达到 300 万 ~ 375 万 m^3/h ^[1], 到 2015 年煤制油项目对气体氧的需求量为 415 ~ 420 m^3/h , 甲醇新增配套空分装置将制氧气 253 m^3/h , 且多为大型空分装置 (5 万 m^3/h 以上), 乙烯行业将需要配套 30 套左右 3 万 m^3/h 等级的空分设备。市场的特点是: ①要求空分装置大型化; ②采用更新的技术, 以满足低能耗、环保、高品质、多产品的发展要求。

目前, 我国已能生产 30 000 ~ 50 000 m^3/h 的空分设备, 国产空分设备实现了规整填料、无氢制氩、内压缩流程等第 6 代先进技术, 并且具备了大型化、高品质、多工况、自动化、低能耗、长周期等特点, 与国际先进水平相比已具有一定的竞争力。

1 三塔流程特点

低温法制工业气体仍将是市场的主流, 这种技术已有上百年的历史, 技术也相当成熟, 尽管目前在流程上已有不断的发展, 但主要的流程特点还是三塔流程, 如图 1 所示。



1—压缩机; 2—膨胀机; 3—上塔(低压塔);
4—下塔(高压塔); 5—粗氩塔(包括精氩塔)

图 1 三塔流程

三塔流程由上塔(低压塔)、下塔(高压塔)和粗氩塔(包括精氩塔)组成, 上塔和下塔的操作压力不同, 上塔约为 140 kPa, 下塔约为 600 kPa, 以实现双效精馏, 即上塔的再沸器也是下塔的塔顶冷凝器, 原料空气压缩到 600 kPa, 除去水、 CO_2 后在主换热器中被逆流的产品气体冷却后送入下塔, 在下塔原料气被分离成顶部的纯氮和底部的富氧液空, 富氧液空送入上塔进一步分离, 在上塔的顶部得到高纯氮气产品, 底部得到高纯氧产品, 部分带压原料气进入膨胀机, 为装置提供冷量, 然后送入上塔。

氩的富集部位在上塔下部, 氩体积分数 9% ~ 12%, 在此位置抽出一股馏分到粗氩塔进行精馏,

收稿日期: 2009-07-01; 修回日期: 2009-08-28

作者简介: 丁浩(1972-), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为化工分离过程; 俞旭峰(1968-), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为化工分离过程, 通讯联系人, 022-87892760, dhjtj@163.com。

来自下塔的富氧液空冷凝粗氩塔顶的气相,粗氩塔底部回流液仍返回上塔。

2 规整填料在空分领域中的应用

2.1 能耗

空气产品的成本主要取决于能耗,能耗主要是由压缩机的出口压力决定的,在上下塔的冷凝再沸器温差一定的情况下,当上塔底部压力降低时,必然导致下塔顶部压力的降低,计算结果表明^[2]:当上塔底部压力降低 $1\Delta p$ 时,下塔顶部压力会降低 $3\Delta p$,因此,降低上下塔的阻力可直接降低空压机的出口压力,成为降低能耗的重要手段。

20世纪90年代中期前,空分精馏主要采用筛板塔,板间距为100~200 mm,具有效率高、阻力较大的特点,规整填料效率高、压降小,其阻力只有筛板的1/5~1/10,将其用于上塔,由于上塔一般需要60~80块理论板,大约可使上塔压力降低20 kPa,从而使产品的整体能耗下降5%~8%,由于下塔理论板数少,又是加压操作,相对而言,使用规整填料的技术经济性就不那么明显,但由于规整填料的操作弹性大,近来在很多设计中,下塔也有使用规整填料的趋势。

2.2 对氩产品的影响

氩馏分从上塔的下部抽出,经粗氩塔的分离在顶部获得粗氩产品,由于其塔顶冷凝介质来自下塔的富氧液空,富氧仍要回上塔上部精馏,而塔底进料(氩馏分)也来自上塔下部,因而粗氩塔的整体压降是一定的,所以,粗氩塔有2个特点:①Ar/O₂的相对挥发度接近于1,比较难分离,氩产品的纯度要求高,因而需要大量的理论板数;②粗氩塔允许的压降是限定的。

如果粗氩塔过去常采用筛板塔,则只能设置40~70块理论板,粗氩产品的氧体积分数高达2%~5%,需要后续的加氢工艺去掉其中的氧,这将是1个复杂而不安全的过程。但采用规整填料以后,粗氩塔的理论板数可以高达200块以上,压降只有14~16 kPa,这样,在粗氩塔的顶部便可以直接获得氧气体积分数 $<2 \times 10^{-6}$ 的产品,省掉了制氢加氢的过程,这就是无氢制氩技术。

另外,在上塔采用规整填料以后,由于操作压力降低,有利于Ar/O₂的分离,在上塔常规当量理论板数的情况下,氧的提取率可以提高1%~3%,氩的提取率可以提高5%~10%。

2.3 对其他参数影响

(1)塔径缩小,规整填料塔可以比筛板塔直径缩小约30%。空分精馏塔一般需要整体运输,在空分装置大型化的趋势下,塔径缩小后对于运输是一个有利条件,也节省了整体投资成本。

(2)操作弹性大,变工况迅速。筛板塔的操作弹性一般在80%~105%,而填料塔的操作弹性可以达到40%~120%,适合目前市场需要,变工况时反应迅速,操作稳定。

(3)装置启动时间大幅缩短。启动时间是指启动膨胀机到出氧的时间,无氢制氩设备及纯度合格大约需要48 h,采用规整填料技术后,一般启动时间为26~30 h。缩短启动时间是空分设备节能降耗的途径之一。

3 应用中存在的问题

3.1 填料塔的设计

空分低温精馏用的填料,由铝材制作,主要使用的型号有750Y、500Y、350Y或其相应的改进型,在设计方面,空分上塔的主要特点是:①分离精度高,塔顶、塔底都要出高纯度的产品;②气液相进出口多,引起各塔段的负荷变化大;③氩馏分的抽口位置很重要,不仅氩馏分要富集,而且其中的氮含量要严格控制,因此,各段的理论板数需要精确控制。一般而言,750Y型填料在N₂/O₂物系中的HETP为250~300 mm,在O₂/Ar系统中的HETP为175~250 mm,为了尽量统一塔径,往往在负荷比较大的第2段、第3段采用500Y或350Y型填料。粗氩塔共需要45 m高的填料,一般分8或9个填料床层,粗氩塔内操作工况稳定,填料效率比较高,但由于分离精度要达到百万分之一级,开车出问题的也往往是粗氩塔,需要引起特别重视。

3.2 填料的制作安装

与化工塔器现场安装填料的方式不同的是,空分填料一般是在设备厂安装,再和塔体一起整体运输到现场,制造和安装过程中要考虑到这方面引起的问题。空分填料有分块和整盘2种形式,整盘填料需要立式安装,填料盘与塔体的间隙必须严密配合,分块填料采取卧式安装。在长途运输过程中,可能会发生填料盘与塔体“偏心”的现象,造成填料和塔壁的间隙过大,影响填料效率,所以填料的防壁流装置要有特别的设计。为避免填料表面的润滑油脂带入塔内,可能由于油气-氧气混合引起填料燃烧,必须将表面残余的油脂含量控制在50 mg/m²以内。

另一种引起危险的因素是氢气,规整填料在安装完成后需密封塔体运抵现场,但是由于昼夜温差等因素,常常有水汽的进入,铝是一种活性金属,特别是铝合金材料,甚至在常温下都能与水发生反应生成氢气^[3]。即便是微量的氢气生成,由于规整填料的比表面积大,在相对密闭的塔体内也容易积聚氢气达到闪点,在施工遇到明火时极易爆燃,这样的事故已经发生多次。因此,施工时必须符合安全程序。

3.3 液体分布器

3.3.1 空分精馏常用的液体分布器

空分精馏的主要特殊性上文已有论述,这些特殊性要求用于空气分离的液体分布器必须具有更高的分布质量:空间占位小,压降低,液相混合能力强等。此外,分布器的设计安装还要考虑到长途运输过程中的紧固问题,要求结构简单可靠。常用的空分精馏塔液体分布器主要有 2 种形式:槽式分布器和槽筒式分布器,如图 2 和图 3 所示。

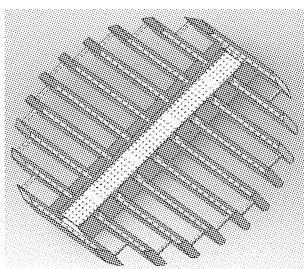


图 2 槽式液体分布器

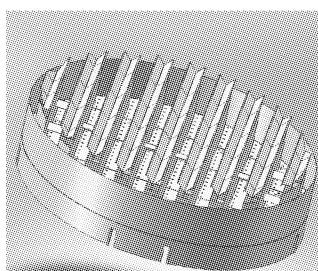


图 3 槽筒式气液分布器

空分用的槽式分布器是将一级槽和二级槽合二为一,结构上是整体的,各二级槽互相联通,能保持液面一致,同时降低占位高度,缺点是要和液体收集器配合使用,大约需要 1 100 mm 的空间,导致整个精馏塔在高度上相当可观。槽筒式分布器是从化工型的槽盘式分布器演化而来,过去在化肥行业的铜洗塔等高压塔器的改造中也经常使用,它的优点是将液体分布器与收集器合为一体,兼具气体分布作用,占用空间高度大大降低,缺点是液体横向混合能

力较差。图 4 是采用 CFD 软件对这种分布器的气体分布情况的模拟结果。计算表明:当距分布器底板约 400 mm 时,气相已基本分布均匀。图 5 是其轴向气体分布均匀度变化情况。采用这种分布器时,二段填料之间的空间为 600 ~ 700 mm 即可,与槽式分布器相比,用于粗氩塔可使整个冷箱高度或泵扬程降低 2 ~ 3 m。

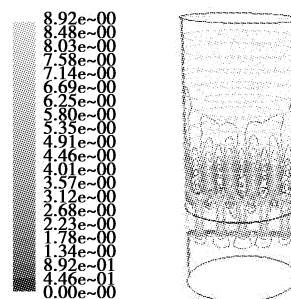


图 4 轴向截面及速度分布图

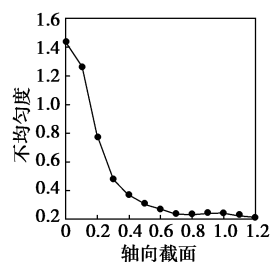


图 5 轴向截面不均匀度分布图的变化情况

3.3.2 液体分布器设计安装应考虑的问题

上塔和粗氩塔每段填料的理论板数往往超过 25 块,实际上在化工领域每段填料的理论板数一般控制在 10 ~ 15 块,在这种情况下,液体分布器的初始分布好坏常常是关键,设计时需要更精细的考虑:

(1) 单纯的追求液体喷淋点数,并不意味着液体的良好分布,分布点数应与布液方式、填料结构、小孔直径等结合起来考虑。

(2) 沿塔壁周边喷淋非常重要,如果周边区域喷淋点密度低,造成塔壁周边区域液体流动不足,将引起严重的效率下降,据文献^[4]报道:一个直径 1 200 mm 的分布器周边喷淋不足时,填料的 HETP 增加了 1 倍。图 6 是 1 套产能 25 000 m³/h 空分装置粗氩塔液体分布器的分布点示意图,从表面上看,分布点均匀,而且布点密度达到 254 个/m²,但是如果把塔截面从内到外分成等面积的 3 部分,将每区内的布点数与平均值相比较,则发现 3 个区的比值分别为 112%、111%、75%,显然,外圈也就是塔壁区存在大规模布液不均,事实上该塔开车效果很差,远没达到

设计要求,后来,重新设计分布器,甚至减少了布液点数,但改善了大规模不良分布,更换分布器后,开车完全达到设计要求。

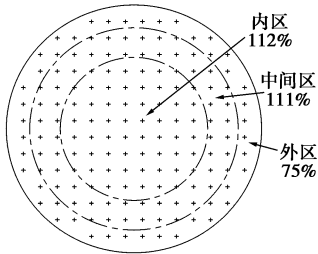


图6 塔截面喷淋点分布情况

近几年,由于分布器设计缺陷造成的开车不理想的案例也经常发生。大量的工业装置的检测结果表明:绝大多数填料塔存在壁区喷淋不足的问题。

(3)槽筒式分布器的使用要特别注意与之配合的填料压板的结构,设计与安装填料压紧装置时,必须避开分布器的布液孔,以免引起分布不良。

(4)水平度。化工型分布器其安装位置一般就是操作工况位置,水平度容易直接控制,空分型分布器常是卧装,只能间接控制水平度。塔体吊装后无法再测定、调整,这将是一个隐患。

(5)强度。液体分布器及其他塔内件的设计必须考虑卧式长途运输造成的松动,曾经发生过分布器焊缝开裂的事故。必须对关键部位进行加强设计。对于连接件、密封部位,还要考虑到低温工况对其造成的影响。

4 进展与方向

4.1 高效填料

目前,生产能力 $50\,000\text{ m}^3/\text{h}$ 以上的空分装置,精馏塔直径一般都超过 $4\,000\text{ mm}$,对填料的制作和设备运输提出了挑战,一些新的高效填料可大幅度提高通量,使得精馏塔的结构更加紧凑,用更小的塔径就可以满足大负荷的要求,如 Sulzer 公司开发的 Mellapakplus 填料,可使精馏塔的通量增加 30% 或压降明显减小^[5],天大北洋化工设备有限公司也开发了一种新的填料(BY 系列)(如图 7 所示)。该填料可以改善气液流道,提高通量而保持效率基本不变。图 8 是该填料和传统 750Y 型的压降性能比较,相比 750Y 型填料其压降降低了 20% ~ 30%。

4.2 塔内件

空分精馏塔向着大型化发展,设计可分拆安装,

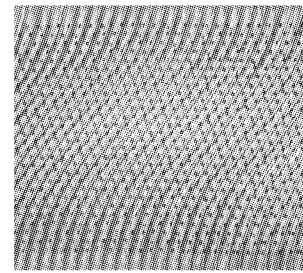
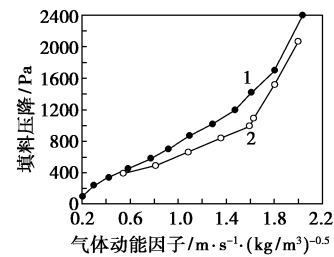


图7 BY750 填料



1—750Y 型填料;2—BY750 型填料

图8 填料压降性能比较

低占位空间的液体分布器非常关键,它还必须有较强的横向混合能力,就目前而言,还没有一种液体分布器非常适合直径 4 m 以上的空分精馏塔使用。

4.3 气体分布

到目前为止,空分精馏塔的设计中,还没有考虑气体分布的问题,关于气体分布不良对填料效率的影响的实验也比较少,可能是因为过去大部分情况都是小直径塔。但是根据在石油化工领域的经验,可以预料在大直径呈低高/径比的情形下,空分填料床层的效率将更易受到气体分布不良的影响,在今后的大空分装置设计中必须考虑气体分布器的设置,并研究气体分布对效率的影响。

4.4 技术推广

规整填料技术的应用,已经使低温空分技术获得了革命性的发展,应该说这种进步和规整填料技术在石油化工领域的广泛而成熟的运用是分不开的,同样的道理,在其他领域已经成功使用的技术也可以借鉴应用到空分过程中,可能会有很好的效果。如石油化工方面的塔盘新技术,炼油乙烯中开发的大直径填料塔技术、高效散堆填料等。

5 结语

以规整填料技术为标志的第6代空分技术已经获得了革命性的进步,简化了低温法制气体产品的流程,提高了氧/氩的提取率,有效降低了空气产品的

(下转第71页)

将吸收剂富液送入原料液罐,打开蒸汽阀门,调整蒸汽量分别将原料液和反应系统加热至相应的温度,通过变频调速器调整超重力反应器的转数,启动超重力反应器,待超重力反应器稳定后,打开反应器液体入口阀门,通过液体流量计向反应器送入液体,反应一段时间后采样分析。

2.2 实验方法

将吸收剂富液通过泵送入原料液罐;打开蒸汽阀门,调整蒸汽量给原料液和反应系统加热至相应的温度;打开循环冷却水,通过变频调速器调整超重力反应器的转数,启动超重力反应器;待超重力反应器稳定后,通过液体流量计向反应器送入液体。

2.3 分析方法

吸收液中 HCO_3^- 含量的测定采用 Q/SY DH0126.02—2001,解吸气中 CO_2 体积分数采用气相色谱 HP6890 按面积归一法分析。

3 实验结果与讨论

3.1 再生温度对再生效果的影响

实验温度范围为 $100 \sim 135^\circ\text{C}$, 转子转速 $1\ 100\ \text{r/min}$, 蒸汽压力 $0.3 \sim 0.5\ \text{MPa}$, 蒸汽消耗量 $2\ \text{kg/h}$, 吸收剂富液量 $100\ \text{kg/h}$, 压力 $0.3\ \text{MPa}$ 的条件下, 考察了温度对再生效果的影响, 结果如图 2 所示。

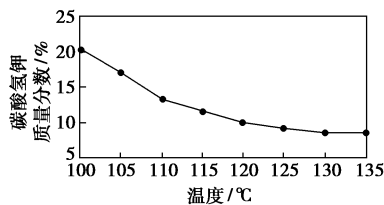


图 2 温度对再生效果的影响

从图 2 中可以看出,随着温度的升高,溶液中 KHCO_3 浓度逐渐下降,也就是说 KHCO_3 的分解率提高;当反应温度达到 120°C 之后,曲线趋于平稳,吸收剂 KHCO_3 质量分数降低到 10% 以下,已低于工厂塔式再生贫液 KHCO_3 含量(工厂塔式再生贫液 KHCO_3 质量分数 $11\% \sim 12\%$),从节能降耗角度考

(上接第 69 页)

单位能耗,在低温精馏中使用规整填料技术需要更细致的设计,空分装置的大型化需要更高效的填料和配套的塔内件。

参考文献

[1] 冷兵.我国空分设备产业发展形势研究[J].商场现代化,2009

虑,适宜的反应温度为 120°C 。

3.2 转子转速对再生效果的影响

在温度 120°C , 蒸汽压力 $0.3 \sim 0.5\ \text{MPa}$, 蒸汽消耗量 $2\ \text{kg/h}$, 吸收剂富液量 $100\ \text{kg/h}$, 压力 $0.3\ \text{MPa}$ 的条件下,考察了转子转速对再生效果的影响,结果如图 3 所示。

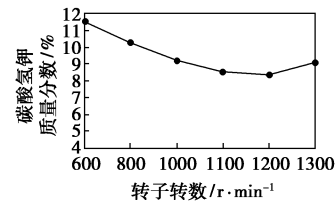


图 3 转子转速对再生效果的影响

从图 3 中可以看出,在较低转速时,吸收剂中 KHCO_3 的浓度,随转速的增加逐渐降低,但当转子转速高于 $1\ 200\ \text{r/min}$ 时,溶液中 KHCO_3 浓度开始增加。分析其原因,转子的转数越高,可以把液体切割成的液膜、液丝和液滴的尺寸变得更小,热量吸收效果会更好一些,利于分解反应的进行;但由于转速的高低会影响物料在反应器内的停留时间,当转速超过 $1\ 200\ \text{r/min}$ 时,会造成部分 KHCO_3 没有来得及分解就被转子甩出填料层,致使 KHCO_3 分解效率降低。比较适宜的转子转速为 $1\ 200\ \text{r/min}$ 。

3.3 吸收剂富液流量对再生效果的影响

在实验温度 120°C , 转子转速 $1\ 100\ \text{r/min}$, 蒸汽消耗 $2\ \text{kg/h}$, 蒸汽压力 $0.3 \sim 0.5\ \text{MPa}$, 压力 $0.3\ \text{MPa}$ 的条件下,考察了吸收剂富液流量对再生效果的影响,结果如图 4 所示。

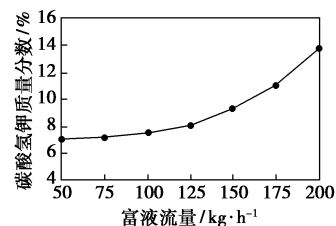


图 4 吸收剂富液流量对再生效果的影响

(1):250-251.

[2] 俞旭峰.空气分离过程的模拟及优化[D].天津:天津大学,1996.

[3] 范美强.铝水反应制氢技术[J].电源技术,2007,131(7):356-359.

[4] Fractionation Research Inc. Tray Design Handbook[M].北京:中国石化出版社,2005.

[5] 菲利克斯·摩舍,奥尔文·凯斯勒,孙德盛.改进规整填料几何形状提高分馏塔负荷容量[J].深冷技术,2000(2):11-12. ■