



空分装置中蒸发/冷凝器的安全运行

SAFE OPERATION OF REBOILERS/CONDENSERS IN AIR SEPARATION UNITS

AIGA 035/13

对AIGA 35/06的修订

Asia Industrial Gases Association

亚洲工业气体协会

N0 2 Venture Drive, # 22-28 Vision Exchange, Singapore 608526

Tel电话 : +65 6760160 Fax 传真 : +65 62749379

Website 网址 : [http // www.asiaiga.org](http://www.asiaiga.org)



空分装置中蒸发-冷凝器的安全运行

SAFE OPERATION OF REBOILERS/CONDENSERS IN AIR SEPARATION UNITS

致谢

本文件采纳了欧洲工业气体协会(EIGA)文件 IGC 65/13 “空分装置中蒸发-冷凝器的安全运行”。对于EIGA允许使用其文件，特此致谢。

免责声明

所有AIGA或带AIGA名称的出版物包含的信息，包括业务守则、安全程序及技术信息均从AIGA认为可靠的来源获得，并且/或者基于AIGA及其他组织成员在出版之日提供的技术信息和经验。有鉴于此，我们无法对这些出版物所含信息的精确性、完整性或正确性作出保证，也不为此承担任何法律责任。

尽管AIGA建议其成员参考或使用协会出版物，成员或第三方对出版物的参考或使用行为纯粹出于自愿，不具有约束力。

AIGA或其成员对参考或使用AIGA出版物所含信息或建议产生的结果不作任何担保，亦不承担任何相关的法律责任。

AIGA无法控制任何个人或团体（包括AIGA成员）执行或不执行、误解、正确或不正确使用任何AIGA出版物所含任何信息或建议，AIGA明确声明不承担任何与之相关的法律责任。

AIGA出版物接受定期审查，用户请注意获取最新版本。

如有任何内容方面的分歧、或经授权翻译的文件内容与本出版物的英文内容不相符合时，应以AIGA提供的官方英文版的内容为准。

Any ambiguities or interpretive differences between an authorized translated version and the English version of this publication shall be construed and applied to preserve the meaning set forth in the official English version which is available from AIGA.

目 录 表

1 引言	1
2 范围和目的	1
2.1 范围	1
2.2 目的	1
3 定义	1
3.1 用词	1
3.2 辅助蒸发器 (Auxiliary vaporizer) :	1
3.3 装置分析性加热解冻 (Analytical Plant Derime) :	1
3.4 氩冷凝器	2
3.5 ASU	2
3.7 冷态备用 Cold Standby)	2
3.8 盲盲端蒸发 (Dead End Boiling) :	2
3.9 加温解冻 (Deriming) :	2
3.10 干沸腾 (Dry Boiling) :	2
3.11 前端净化 (FEP = Front-End Purification) :	2
3.12 气相吸附器 (Gas Phase Adsorbers) :	2
3.13 内压缩 (Internal Compression) :	2
3.14 液氧 (LOX) :	2
3.15 液氧吸附器 (LOX Adsorbers) :	2
3.16 主蒸发器 (Main Reboiler) :	2
3.17 堵塞 (Plugging) :	2
3.18 蓄冷器 (Regenerators) :	3
3.19 反流式换热器 (REVEX) :	3
3.20 富氧液空吸附器 (Rich Liquid Adsorber) :	3
3.21 浸没 (Submergence) :	3
4 蒸发器事故调查	3
4.1 重大爆炸	3
4.2 局部爆炸	3
4.3 内部泄漏	4
5 空气污染物	4
6 设计要考虑的问题	4
6.1 装置的环境	5
6.2 预净化系统的设计	5
7 运行	5
7.1 清除二氧化碳的重要性	5
7.2 蒸发器的正确操作	6
7.2.1 浸没式蒸发器	6
7.2.2 下流型蒸发器	7
7.2.3 液位/流量仪表	8
7.3 防止污染物浓缩	8
7.3.1 液氧吸附器	8
7.3.2 排放 (置换性排放)	9

7.4 污染物的分析	10
7.5 临时工况	11
7.5.1 装置负荷变化	11
7.5.2 装置停车和冷待机	11
7.5.3 装置重新启动	12
7.6 加温解冻	12
7.6.1 程序	13
7.6.2 周期	13
7.7 清洗和维护	13
7.7.1 施工安装过程引起的异物污染	14
7.7.2 由装置运行形成的异物污染	14
7.7.3 由装置维修产生的异物污染	14
7.7.4 蒸发器和空分塔底部的清洗	15
7.7.5 气相和液相吸附器	15
8 参考资料	16
附件A: 空气中的堵塞性、易燃性和腐蚀性污染物	17
附件B: 空气污染物的性质	17
附件C: 吸附剂对空气污染物的吸附能力	19
附件D: 作为设计基础的空气质量默认指标	20
附件E: 运行在1.2 bara 的热虹吸型蒸发器液氧中污染物的最大控制值	21
附件F: 运行在1.2 bara 的下流型蒸发器液氧中污染物的最大控制值	22
附件G: 蒸发器板式单元浸没程度示意图	23

Amendments to AIGA 035/06

Section	Change
1	Addition of IHC Association language
3.1	IHC terminology language
3.4	Definition of argon condenser
3.14	Clarification of oxygen concentration to align with the document
7.1	Information on plants with downflow reboilers
7.2.1	Additional information on operation of bath type reboilers
7.2.3	Information on instrument calibration
7.3	Information on purge to control contaminants
7.5.2	Further advice on plant shutdown and cold standby
7.5.3	Further advice on plant restart
7.5.3.2	Additional precautions to be taken after a long shutdown
7.7.2.1	More information on dust build up
7.7.4	Advice on cleaning contaminated reboilers and column sumps

注： 技术方面的变化均有下划线

1 引言

此文件由国际协调委员会协会成员编制,基于EIGA, 面向全球所有国际协调委员会成员使用。国际协调委员会的成员是由从亚洲工业气体协会,压缩气体协会 (CGA),欧洲工业气体协会 (EIGA) 和日本工业和医疗气体协会组成。区域版本可以用于非国际标准单位制国家。可以用于国家标准的参考或者或区域立法。

工业上用于生产氧、氮、氩和稀有气体的低温空气分离技术长期以来保持着非常良好的安全记录。但是, 因为当前许多生产工艺本身存在着潜在的危险, 必须通过适当的设计和运行规范对这些危险进行识别和处理。

2 范围和目的

2.1 范围

本文件专门针对空气分离装置蒸发器的运行。包括现有知识以及它们在安全应用中所使用的行业实施规范的一个归纳总结。它仅适用于液相氧浓度在75%以上主冷凝-蒸发器和氧产品蒸发器。其指导原则也可用于空分装置中的其他蒸发器, 包括辅助蒸发器, 防穿透保护型吸附器的汽化器, 氩冷凝器, 以及制氮机的主蒸发器。

氮/氩塔的提馏蒸发器和氮/氩精馏系统不包括在该文件范围内。这些系统以及它们处理碳氢化合物积聚的方法是完全不同的。带有这些单元的装置, 其蒸发器的运行和安全应根据装置的具体情况与供应厂家进行讨论。

2.2 目的

本文件的目的是描述低温空分装置蒸发器部分应遵循的设计和运行规范。特别是, 对于环境空气中可能存在的碳氢化合物和其他污染物的污染而产生的潜在危险如何进行对待和处理。这一问题正是已经报道的大多数蒸发器事故的主要原因。

本文件并不打算成为一个强制性的法规。它以空分装置的主要生产者和运行者的实际数据、运行经验和设计实施规范为基础。应认识到, 法律和规定可能对装置的设计和运行提出更严格的要求。

3 定义

用于该文件的主要术语:

3.1 用词

虽然AIGA文件并没有强制性, 但是必须对“应”和“宜”进行明确区分。

“应”表示强烈关注或指示。

“宜”表示建议。

“可以”和“不需要”表示任选。

“将”仅表示将来而不是要求。

3.2 辅助蒸发器 (Auxiliary vaporizer) :

空气分离装置补充性的工艺热交换器, 它使低压塔的液氧在其中蒸发, 其热源通常是工艺空气或氮气, 目的是提供热虹吸效果或者得到静压头。热虹吸效果可以用于确保液氧在液氧吸附器内循环。

3.3 装置分析性加热解冻 (Analytical Plant Derime) :

在加热解冻的过程中, 测量某些微量组分的流量和浓度, 允许对这些组分的积聚总量进行计算。

3.4 氩冷凝器

一组热交换器，用于在ASU氩塔顶部实现冷凝功能。通常通过粗液氧的蒸发（氧含量低于75%）来提供冷量。

3.5 ASU

空气分离单元

3.6 冷箱（Cold box）

钢结构，里面容纳低温精馏塔以及其它工艺设备、管道、绝热保温材料。也指ASU的低温部分。

3.7 冷态备用Cold Standby）

设备处于低温状态，可以根据需要立即投入使用。

3.8 盲盲端蒸发（Dead End Boiling）：

在热虹吸式蒸发器中，由于蒸发器换热通道中液体的流动量因阻塞而受到限制，通过液体的闪蒸作用使杂质的清除能力下降的一种状态。也称之为罐内沸腾。当富氧液体被截留在空腔和管段中因漏热而汽化蒸发的时候也可能发生这种现象。

3.9 加温解冻（Deriming）：

定期的预防性维护程序，用清洁、干燥气体吹扫的同时加热工艺设备，目的是清除积聚的所有水分，二氧化碳和大气中的污染杂质。也称之为除霜，化冰，和加热融化。

3.10 干沸腾（Dry Boiling）：

在热虹吸式蒸发器中，由于蒸发器板式单元浸入程度不足，进入蒸发器的液体被全部汽化，因而使所有低挥发性的杂质以极大的倍数浓缩的一种状态。也称之为干蒸发。

在下流型蒸发器中，液体在到达蒸发器的底部之前完全被汽化的状态也是干沸腾现象。其原因是液体流量太低，或者是液体的分配不均匀。

3.11 前端净化（FEP = Front-End Purification）：

在空气送入冷箱之前，使用在0 °C以上温度运行的吸附剂，清除水分、二氧化碳以及全部或者部分来自空气中的多种碳氢化合物。

3.12 气相吸附器（Gas Phase Adsorbers）：

通过在低温下从气相中吸附，降低大气中杂质浓度的一种方法。也称之为冷端吸附阱。

3.13 内压缩（Internal Compression）：

将塔中的液氧用泵增压，在热交换器冷箱中蒸发汽化来生产高压气态氧的一种工艺。也称之为液态增压。

3.14 液氧（LOX）：

LOX是“Liquid Oxygen”的缩写。在本文件中，对LOX的所有要求适用于氧浓度大于75%的液体。

3.15 液氧吸附器（LOX Adsorbers）：

通过从液相的低温吸附，降低蒸发器底部液氧中杂质浓度的一种方法；也称之为防穿透保护型吸附器或液氧过滤器（尽管不是物理过滤作用，而仅仅是吸附）。

3.16 主蒸发器（Main Reboiler）：

用于将空分装置的两个主要精馏塔通过传热相互联接的一个综合性热交换器，在高压气体冷凝的同时使低压液体蒸发汽化，从而使一个塔（下塔）产生回流液，而另一个塔（上塔）产生上升蒸汽。

3.17 堵塞（Plugging）：

通过外部微粒（例如硅胶或珠光砂）或者大气杂质（例如二氧化碳或氧化亚氮）凝固引起再沸器传热通

道的阻塞，有可能导致盲端蒸发。

3.18 蓄冷器 (Regenerators) :

是从空分装置供气中清除水分和二氧化碳的预净化工艺，这种工艺是通过使水分和二氧化碳在石英石或不锈钢这样的冷结构上冻结出来的方式清除它们。

3.19 反流式换热器 (REVEX) :

REVEX是反流式换热器 (reversing heat exchanger) 的缩写。是从空分装置供气中清除水分和二氧化碳的预净化工艺，这种工艺是通过使水分和二氧化碳在板式热交换器中冻结出来的方式清除它们。某个通道首先用于空气进气，然后在同一通道反方向通过低压的，清洁干燥的气流，使污染物升华以达到清除的目的。

3.20 富氧液空吸附器 (Rich Liquid Adsorber) :

通过低温吸附从高压塔到低压塔的富氧液体中除去大气中杂质（尤其是碳氢化合物），从而降低其浓度的一种方法。也称之为碳氢化合物吸附器。

3.21 浸没 (Submergence) :

对于热虹吸式蒸发器，用于表示蒸发器板式单元实际高度在低温液体中淹没的程度。因此，100%的浸没就意味着低温液液达到蒸发器换热单元的顶部。

注释：这个浸没程度不同于蒸发器液位指示，液位指示表示液体界面在仪表的高/低位取样点之间的相对高度。但是，浸没程度和液位指示是相互关联的，通过高/低位取样点和蒸发器顶部的标高，以及蒸发器本身的高度可以相互换算。请参考附件G中图1的说明。

4 蒸发器事故调查

蒸发器事故根据它们的严重程度分为三类：

- 重大爆炸
- 局部爆炸
- 内部泄漏

但是，应该认识到，导致有限量碳氢化合物燃烧的小爆炸与导致大量铝在液氧中燃烧的大爆炸之间并没有一个清楚的界限，根本的问题是要预防在液氧蒸发器中碳氢化合物的任何积聚。

4.1 重大爆炸

重大爆炸会破坏冷箱并对空分装置造成不可恢复的损坏。其冲击波也有可能对场外产生影响。

在非常特殊情况下，空分装置的蒸发器中猛烈的能量释放，对装置及其周围环境造成灾难性的后果。如果冷箱中的铝作为燃料与空分精馏塔釜液中的氧发生反应，就有可能发生极其猛烈的爆炸。

在1997年发生了两次这种性质的严重事故。而以前仅在1964年发生过一次。1997年两个爆炸事件的其中一个是非常猛烈的，空气分离装置被完全摧毁，临近的氧气生产装置也受到严重破坏。

对所有这三个事故进行思考，有下列共同的发展过程：

1. 自燃并使积聚在蒸发器通道中的易燃污染物燃烧；
2. 蒸发器的大部分本体铝材料被（氧）促进点火并燃烧；
3. 液氧大量闪蒸；
4. 低温精馏塔和冷箱壳爆炸破裂。

4.2 局部爆炸

局部爆炸可以造成冷箱内部的损坏，但不会破坏冷箱。一般是限于冷箱内部设备的损坏。管道和其他设备有可能受到损坏，但可以在装置大停车期间修复。

4.3 内部泄漏

内部泄漏事故一般是蒸发器内部发生的小爆炸，在冷箱的外面是不能发现的。这些泄漏只能通过以后发生的精馏塔运行问题才能察觉，需要对蒸发器进行修理才能消除这些问题。精馏塔以外的设备很少涉及，一般不会受到影响。

5 空气污染物

低温空分装置的安全设计和运行需要清楚空气的全部组分，并要知道这些组分在通过空分装置的过程中会发生什么问题。主流空气和一些微量成分被分离，从而生产出需要的产品，例如氧，氮，氩以及氦，氙，氪。一些组分在低温下会冻结出来，有可能引起运行或安全问题。其他一些组分有可能在空气分离装置内部浓缩，并与氧或富氧空气形成易燃性混合物。另有一些组分可能是腐蚀性的，将导致运行问题增加并降低装置寿命。

附件A列出空气中可能引起空分装置故障的许多组分。按照它们引起的问题分类。

由于本文件的主要焦点是安全，腐蚀性组分将不做进一步的考虑。堵塞性组分本身并没有安全问题，但它们有可能积聚并引起干沸腾或盲端蒸发，造成蒸发器中碳氢化合物的聚集。

要了解空气中各种组分可能在空气分离装置的什么地方浓缩以及积累到什么浓度会产生危险，其物理和热力学性质数据是非常需要的。附件2给出这些组分的相关性质。

蒸发器是空气分离装置的关键部位，因为进入装置低温部分的碳氢化合物和堵塞性组分将会在这些部位积聚。附件5列出为确保装置安全运行，在热虹吸型主蒸发器中污染物的最大允许含量。附件6列出为确保装置安全运行，在下流型主蒸发器中污染物的最大允许含量。主蒸发器中污染物含量允许值的进一步情况参考7.4节。

也应注意到，碳氢化合物有可能在其他部位积聚，例如富氧液体吸附器，液氧吸附器，以及管道支段因盲盲端蒸发形成碳氢化合物的积聚。

通过附件3与附件2相互对照可以看出，对于带有以吸附为基础的前端净化（FEP）的装置，要考虑的关键性的污染物是氧化亚氮，乙烷，乙烯和丙烷。由于吸附器的波动和故障有可能使二氧化碳进入装置，对二氧化碳也应进行监测。

这些关键性的组分：

- ① 在前端净化吸附器中不能清除或只能部分地清除；
- ② 具有很低的K值，即在气态氧产品中被清除的数量非常小；
- ③ 具有较低的溶解度（除乙烷外）。

在可逆式热交换器或蓄冷器的装置中所关注的除了这些组分还有一些其他污染物。清除和限制这些组分和其他污染物的方法将在本文件以后的章节中叙述。

6 设计要考虑的问题

与其他的加工工艺行业不同，工业气体行业是通过处理周围空气以生产其最终产品。为此，空气分离装置的安全与空气中所存在的微量污染物紧密相关。因为周围空气的状况是不受工厂装置控制的，所以，为了装置设计和运行的安全就必须通晓清除污染物的工艺技术，必须了解装置现场特有的空气成分。

空分装置吸入的空气中存在的碳氢化合物和各种其他污染物，如果一旦到达精馏设备，就可引起安全和运行问题。沸点高于氧的那些污染物倾向于在蒸发器的富氧液中聚积，特别是其中大多数在低压精馏塔的釜液中聚积。如果它们的浓度不断升高，就可能与氧形成易燃性混合物，或者在惰性污染物存在的情况下，一旦局部性地达到其溶解度极限就会从液空中沉淀出来导致蒸发器的通道堵塞。由惰性污染物形成的这种堵塞可以导致盲端蒸发致使局部碳氢化合物积聚。

因此，这些危险的碳氢化合物以及其他污染物必须在随着空气进入空分塔之前将其清除。其在进入空分塔空气中允许残留的最大浓度应小于表5和表6中所给出的数值。

6.1 装置的环境

对于一个空气分离装置的设计和安全运行来说，周围的空气质量是一个重要的因数（见 AIGA 056(EIGA147, CGA P-8) “低温空气分离装置的安全规范”）。

在空气分离装置的设计中必须将以下三种物质清除或者减少到可接受的程度：在低温下冻结的成分；可能与氧或富氧空气形成易燃性混合物的成分；有腐蚀性的成分。因为这些成分的含量随着地区的不同差别很大，对于每一个装置现场应由设计者和运行者联合进行空气质量检查评估。

如果缺乏特定装置现场的具体数据，空气分离装置也可以根据默认的空气质量指标为基础进行设计。表4列出工业区域的空气中每种污染物的最大含量，按照这个含量进行安全设计的空分装置就不需要另外的设计修改。附件4所列出的最大含量的典型数值是针对带有前端（吸附）净化系统的装置而言。

如果了解到实际的浓度值高于表中所列出的值，设计者应该分析其影响并确定是否需要对设计或者操作手册进行附加的修改。

应该制定一个程序对周围空气质量的变化进行定期的检查。在空分装置安装以后，装置现场周围可能会有不断建成投产的工业设施，这些新的设施有可能释放化学物质，从而影响空分装置的安全运行。化学物质的释放可能以固定的形式释放，也可能仅在紧急情况下释放（例如通风排放口，烟囱，车辆排放，或者其他偶然性的释放）。由于环境事故，例如森林失火引起的阴霾和浓烟，农作物或其它生物的焚烧等引起的空气质量变化也应给以考虑。

6.2 预净化系统的设计

污染物清除有各种方法。目前大多数空分装置采用前端净化系统，它可以将经过压缩的空气中全部的水分和二氧化碳以及大多数危险的碳氢化合物充分的吸附掉。这种单元也可以部分地清除某些其他的污染物。许多老的装置使用REVEX或蓄冷器，在空气供气气流被冷却到低温时将许多污染物冻结出来。这些装置通常需要另外手段来清除污染物，例如低温运行的气相或液相吸附器。这些预净化系统运行的详细说明见AIGA 056 (EIGA 147, CGA P-08)。

7 运行

7.1 清除二氧化碳的重要性

在碳氢化合物问题上，保证空气分离装置安全最基本和最重要的因素之一就是预净化系统的运行。无论是使用FEP的装置还是使用REVEX/蓄冷器的装置，确保预净化系统的运行以防止二氧化碳进入空分冷箱。如果二氧化碳进入空分冷箱，由于它的溶解度很低，就可能堵塞蒸发器通道并导致局部的盲端蒸发或干沸腾。

对于使用FEP系统的装置，防止二氧化碳穿透也是控制蒸发器中碳氢化合物含量的关键。有些空气污染物，特别是丙烷，乙烯和氧化亚氮在分子筛中是被部分地吸附，但可以被二氧化碳的吸附置换。当二氧化碳在分子筛床层的产品端（末端）发生穿透时，这些部分吸附的组分就被解吸并进入空分装置的深冷部分。

为此，对于使用FEP系统的装置，在吸附循环结束时二氧化碳的穿透不应达到可发觉的极限以上。如果发现穿透，立即参照操作手册中关于如何调整时序或分子筛参数以消除穿透现象的指导方法进行调整。如果需要，应该进行进一步的调查，包括环境空气分析和流程设备参数故障处理。

对于有氧产品的ASU，分子筛吸附容器的出口应该对二氧化碳的浓度进行监测（这个分析仪可以用于主冷底部液的分析）。应设置二氧化碳含量高报警（1ppm）。出现高报警就表示二氧化碳穿透，另外还有

一些被吸附的碳氢化合物也穿透了。如果可能，操作员应切换到另一个已经再生好的分子筛吸附器床层并尽可能增大液体置换性排放量，监测主冷液中碳氢化合物，氧化亚氮，和二氧化碳的浓度，保证它们不会超过表5和表6中所给出的数值。

在没有主冷底部液体分析手段的情况下，如果吸附器不能在30分钟之内切换，或者二氧化碳浓度达到10ppm/v，应该立即全厂停车。

对于使用降膜式主冷的设备，主冷底部液中污染物的最大允许浓缩量低于浸没式主冷，所以对于FEP的穿透报警值的设定应该低于1ppm/v且停机值应该低于10ppm/v。具体的值的设定应该依据设备制造厂家的参数。

二氧化碳持续低浓度地穿透，其危险性与在吸附循环末期的重大穿透完全一样，因为它意味着像乙炔，其他碳氢化合物和水分这样的污染物也会穿过吸附器床层。如果二氧化碳持续性穿透的浓度值达到0.2到0.5 ppm/v（按照分析仪器的检测能力），应立即与装置的供应厂家咨询协商。无论如何，装置决不应该在这种状态下继续长时间的运行。

在REVEX或蓄冷器的装置中，控制热交换器中点和冷端温度以确保热交换器清除二氧化碳和水分。如果严重的工况波动持续，应考虑缩短富氧液体吸附器的切换周期以防止主冷底部液中二氧化碳的累积。

7.2 蒸发器的正确操作

目前空气分离装置的设计提供了两种主要的蒸发器技术：

- 浸没式主冷（常称为热虹吸式主冷）
- 降膜式主冷

7.2.1 浸没式蒸发器

浸没式蒸发器就是在空气分离装置中使用的，运行时淹没在液体中的热交换器。本文件特别感兴趣的是那些浸浴液体中含氧量大于75%的蒸发器。这可以包括主蒸发器（内置或外置），辅助蒸发器，保护吸附器蒸发器，和氧产品汽化器。

这些不同的浸没式蒸发器的运行原理是类似的。为了使这种运行的表达简单化，主冷凝器使用的浸没式蒸发器可以作为一个例子来说明。

在液浴（开放通道）中的氧汽化的同时使来自高压塔的气态氮冷凝。在主冷蒸发器下部作为液相的氧，随着它向板式单元中心流动，在通道内不断地蒸发汽化。由于密度差的作用（釜液的密度大于换热器通道中的两相混合物）就使氧向上的流动（热虹吸效应）。

随着两相混合物向上流动并穿过主冷蒸发器板式单元的开放通道，所夹带的一定量未汽化液体就落回到底部液体中。这称之为液体再循环。

随着液氧的部分汽化，进入通道的液氧中的碳氢化合物不断地被浓缩。

如果再循环的流量比较高，碳氢化合物在通道中的浓缩程度会比较低，不大可能在通道内产生危险的积聚。反之，如果再循环流量下降或者完全没有，通道中碳氢化合物的局部浓缩将会显著地增加。再循环完全停止的地方，就会发生干沸腾。在这种情况下，有可能分离出碳氢化合物含量高的第2液体相，或者可能形成固体污染物在主冷蒸发器板式单元通道中沉淀积聚。

在较低的循环流量时，这种情况特别危险因为这将导致可燃的碳氢化合物在孤立的通道中快速积聚。

警告：不可能通过对主冷蒸发器底部液体的分析或其他方法来探测出碳氢化合物在通道内的积聚或沉淀。

当主冷的液位降低到一定高度运行时，液体静压头和再循环速度会降低，液氧在沿通道向上流动的过程中有可能被完全蒸发汽化。

提高主冷液位就可以使再循环流量自发地重新建立，并消除干蒸发的可能性。在装置减量生产的情况下，仍要保持较高的液位。

应该认识到，浸没式主冷蒸发器安全运行所必需的最小淹没程度是与所使用的热交换器型式有关的。为了确保运行安全，主冷液位必须保持在装置供应厂家规定数值范围。如果不知道这个数值，主冷应在全部淹没的状态下运行（100%淹没），即液体的高度必须达到主冷换热单元的上端。要注意，仪表上所显示的液位通常与单元高度相对的淹没百分比是不一致的。进一步的解释参考图1。如果通过操作手册不能确定液位指示与板式单元淹没比例的关系，必须咨询装置的供应厂家。

如果主冷浸没液位低于最小值持续时间超过厂家建议的时间，空分装置应该停机。在高于100%淹没的液位高度上运行可以提供附加的安全余量。但是，必须注意到液位过高对装置运行带来的不利影响，例如液体夹带进入气体管道，或者对精馏塔下部液体分配或精馏过程产生干扰和冲击。过高的液位还有可能对精馏塔下部的内部构件（分配器，塔板，填料）造成机械损坏。

7.2.2 下流型蒸发器

下流型蒸发器也称之为降膜型蒸发器，在其中，要汽化的液体从上到下流过板式单元的通道。通过重力产生流动，液体通过分配器分送到单元通道上部的各个入口。在ASU中，下流型蒸发器有时被用作主蒸发器，或者辅助蒸发器。像浸入式蒸发器一样，也以主（蒸发）再沸器为例说明下流型蒸发器的工作原理。

液氧供给位于蒸发器顶部的分配器。通过重力使液体向下流过氧通道。汽化的氧连同过量的液体流到热交换器底部液池中。高压塔的气态氮在蒸发器的氮通道内冷凝。

下流型蒸发器有几种配置，包括“一次通过式”或“再循环式”。对所有的下流型蒸发器来说，使用供应厂家规定的方法，在分配系统中保持必需的液位是最重要的。另外，为了确保有足够的流量通过下流型蒸发器的蒸发侧，对其流量进行测量也是另一个可以接受的方法。

同浸没式蒸发器一样，随着通道中氧的汽化，液氧中碳氢化合物的浓度将不断地增加。必须有足够液氧量从蒸发器单元通道的底部流出，以确保液氧中碳氢化合物的最大含量不会达到危险的水平，并确保所有通道保持湿润状态。因此，操作时最小液体流量数值应该遵守制造厂家提供的数据。

“一次通过式”蒸发器单元的液体直接由低压塔的填料或塔板供给。液体中所含的污染物浓度与进入冷箱的净化后空气接近。

有些“一次通过式”蒸发器必须提供附加的再循环流量，以确保单元通道底部的流出量达到必需的最小值。

供给“再循环式”蒸发器单元的液氧是已经通过“一次通过式”单元的液体（在主蒸发器情况下是来自低压塔的底部液体）。一般情况下，这种形式蒸发器的污染物浓度要高于“一次通过式”单元。

如果需要再循环，总是要通过泵将液体从低压塔底部输送到循环型蒸发器顶部的分配器中。控制这个输送流量就可以确保足够的液体供应给汽化器的分配器。

循环泵上必须设置一个低流量报警，在流量达到低限时提醒操作人员。操作人员可以调整泵的运行或者开启备用的泵。如果低流量报警时间超过制造厂家建议的时间而问题仍不能解决，ASU应该停机。如果没有厂家建议时间，达到60分钟以上，ASU装置应该停车。

警告：由泵提供的液体流量必须始终保持在装置设计人员规定的正常数值范围，即使是在装置的减负荷运行模式中也必须保持。如果装置可以运行在设计能力以上，应考虑随着空气量的增大而增加液氧循环量。

建议在下流型蒸发器供液分配系统的上游设置一个滤网，防止颗粒物进入分配器。如果安装，滤网孔的大小要与蒸发器单元和分配系统的几何尺寸相关，应由装置供应厂家确定。

下流型蒸发器与浸没式蒸发器的运行要求是不同的。一个区别是，下流型蒸发器运行时在蒸发器的出口气相分率更高。因为出口有更高的气相含量，据报道，下流型蒸发器中能积聚溶解度相对较低的微量组分，即使是这些组分在液体中的浓度远低于其溶解度极限的情况下也能积聚。

要完全防止像二氧化碳，氧化亚氮和某些碳氢化合物在下流型蒸发器中积聚是几乎不可能的，但是积聚的量必须得到严格的控制。装置的分析性加热解冻以及实验性工作显示，影响积聚程度的关键因数是流出蒸发器液体中的微量组分浓度。微量组分的浓度越高，积聚的程度就越高。装置操作人员应保持氧化亚氮，二氧化碳和碳氢化合物的浓度尽可能地低，并且任何时候该浓度都应维持在ASU制造厂家规定的极限之内。表6给出了最大停车值，但是对于特殊的设计和运行条件，制造厂家可能会规定更低停车值。应注意到，正常的运行浓度要比表6给出的停车值低得多。如果装置的设计是在高浓度参数下运行，它可能会包含一些特殊的保护措施，例如低温硅胶吸附器或其他相应的措施。

应进行周期性的加温解冻以清除所有积聚的组分。严格遵守制造厂家规定的解冻周期。固体的二氧化碳和氧化亚氮可以将碳氢化合物保留在蒸发器中，因此必须通过周期性的加温解冻将这些组分清除。

警告：在加温解冻期间如果不能清除积聚的二氧化碳和氧化亚氮，就可能导致碳氢化合物积聚到危险的程度，进而可能产生爆炸。

7.2.3 液位/流量仪表

由于蒸发器液位和流量的控制对于防止盲端蒸发或干沸腾非常重要，液位和流量指示仪表的运行情况以及它们的报警和停车连锁的设定点必须定期进行校验并记录。校验频度至少每年一次。如果有条件，可以在暂时性运行到需要的高液位时观察液位计气相取样管是否有液体，来校验液位计的刻度。

在提供备用取样管以防偶然性堵塞的场合，这些备用取样管应定期检查并吹除排放。如果两个中有一个发生堵塞，应通过氮气吹除或下次装置加温解冻时加热，千方百计地消除堵塞。正确的校验液位和流量传感器是装置安全运行的基本要求。在装置的运行手册中应该明确传感器的校验频率。如果所有的取样管都堵塞，或者如果蒸发器的液位计因故不能正确指示，装置应停车，对液位计进行修复。

7.3 防止污染物浓缩

无论使用什么类型的预净化系统，总有一定量的轻碳氢化合物和其他潜在的污染物达到精馏塔，并倾向于在低压塔的釜液中聚集。这些组分积聚所达到的浓度必须限制在一定极限范围内，以避免危及运行且应该从液相中清除。甲烷是唯一能充分挥发的碳氢化合物，它会以气相部分随气态氧产品气流离开装置。

维持液氧中其他的碳氢化合物的安全含量主要有两种方法：

- 液氧吸附器（见7.3.1）；
- 置换性排放（见7.3.2）。

即使安装了液氧吸附器，也应该保持排放。因为液氧吸附器不能完全的取除液氧中的碳氢化合物。排放应该依据制造厂家的定义进行。当没有特别定义时，按照7.3.2的最小量排放。

7.3.1 液氧吸附器

液氧吸附器用于从低压塔釜液中抽取的液氧流中清除某些污染物，之后液氧流再返回到低压塔底部中。可以使用单个吸附器，也可以采用一对（两个）吸附器。使用两个吸附器时可以实现连续的吸附（一个工作；一个再生）。

对于污染物清除的总体效果可参考表3。特别对于REVEX和蓄冷器的装置，液氧吸附器可以有效地清除

残余的乙炔，二烯，和C4碳氢化合物；可以部分地清除氧化亚氮。它们也可以作为一个后备手段，清除可能进入空分塔的二氧化碳，特别是在工况波动的情况下。

7.3.1.1 热虹吸驱动的液氧吸附器回路

空分装置若采用热虹吸驱动液氧吸附器回路，在运行中应遵循下列附加的预防措施：

- 保持装置供应者程序规定的液氧循环运行参数。如果程序规定：通过相关装置（阀门）的调节必须维持指示的流量或压差，那么，这些指示仪表应当作为重要的安全装置对待。
- 如果产生任何缺陷或给出反常的读数，不允许仪表退出服务。这些安全装置应当通过风险评估识别其关键的安全问题，从而制订适当的维护程序。如果这些仪表失灵，装置不应该（基于介绍基础）继续运行。
- 再生时遵循制造厂家建议的再生流量，避免硅胶的流态化和碎裂。
- 遵循制造厂家建议的再生温度和时序，确保所吸附的污染物被完全清除。
- 按照装置供应厂家的程序操作运行吸附器。在冷却过程中要避免过多的液氧通过再生床层时闪蒸，因为这会使床层上升，还增加吸附材料的磨损。这些事件增加了吸附剂粉尘返回液氧回路中积聚的可能性，或者在热虹吸驱动换热器或主再沸器中积聚的可能性。
- 避免引入液态水分，它将使硅胶破裂。
- 作为用于ASU的运行程序的一个部分，确保吸附器回路蒸发器和管道正确地加温解冻，再重新冷却到工作温度。如果让液氧在回路中沸腾蒸发而不是将其排放掉，就可能产生两个问题：1是液氧中的碳氢化合物聚积；2是由于二氧化碳溶解度低而形成固体沉淀物。在重新投入使用时，固体沉淀物可能会妨碍液体通过汽化器循环，从而促成干沸腾现象产生。

7.3.2 排放（置换性排放）

对于有一定百分比的氧作为液体产品的装置，或对于氧作为液体从低压塔取出并泵送到塔系统以外的蒸发器中汽化的装置，上游处理过程中漏网逃逸的碳氢化合物将不会在装置中积聚到很高的浓度。

但是，对于仅生产气态氧产品（直接从塔中取出）或液体量很小的装置，就必须从蒸发器底部液中有意识地取出一定可计量的液体，目的是将轻碳氢化合物（特别是乙烯，丙烷和乙烷），氧化亚氮和二氧化碳这些污染物的浓缩限制在可接受的范围内。**建议：连续的置换性排放量最低应为加工空气量的0.1%到0.2%。**对于小型装置，如果连续的排放难以实施，应按规定的连续排放量计算，至少每8小时排放一次。

下列公式用于计算液氧中高沸点组分（即污染物）的浓度：

$$CF_{\text{Trace contaminant t}} = \frac{x_{\text{Trace contaminant t, LOX}}}{y_{\text{Trace contaminant t, Feed}}} = \frac{F_{\text{feed}}}{F_{\text{LOX}} + K_{\text{Trace contaminant t}} F_{\text{GOX}}}$$

其中：

- CF = 相对与空气中浓度的浓缩因子
- x = 该组分在液相中的摩尔分数
- y = 该组分在气相中的摩尔分数
- F_{feed} = 空气进塔的摩尔流量
- F_{LOX} = 从蒸发器出来液氧的摩尔流量
- K = 平衡常数（达到平衡时的组分比例（ y/x ））
- F_{GOX} = 从蒸发器出来气态氧的摩尔流量

对于内压缩循环，从蒸发器中不取出气态氧，取出的液氧产品流量约为加工空气量的20%，对于所有污染物成分来说其浓缩因子大约是5。对于仅生产气态氧的情况，如果置换性排放为空气量的0.2%而且取小的K值，则浓缩因子为500。

注释：对于甲烷，K值是很大的（见附件B中表2）。在这种情况下，浓缩因子大约为16，绝大多数甲烷随气态氧产品离开。

7.4 污染物的分析

无论在设计和运行中采取了多少保护措施，碳氢化合物和其他污染物大量进入装置的风险始终是存在的。为此，有必要对于这种危险状况何时出现进行分析。

特别是在污染严重的工业区域，例如化学工业，石化工业，以及金属工业区域，装置的操作人员必须及时了解装置周围环境状态的变化。应了解的信息包括：

- 对于附近有可能向大气释放大量污染物的装置设施（无论是正常运行期间释放，或者是在故障情况下偶然释放）进行调查列表；
- 这些潜在的污染源与ASU装置空气吸入口的距离；
- 当地的大气状况。

应当注意的是，一个空气分离装置现场的潜在风险并不仅仅取决于周围空气的正常质量，还取决于污染物释放的频率和大小。

如果认为有必要，应在控制室中设置风速和风向的实时监测。

根据装置周围空气的状态特性，根据其特殊的工艺设计以及污染物释放的可能性，应考虑下列污染物连续测量装置：

- 在预净化系统的出口设置二氧化碳分析仪。
- 蒸发器中总烃分析仪，检测其中污染物可能达到的最高浓度。这一般是主蒸发器底部。
- 可以探测蒸发器中个别碳氢化合物样品的分析仪，检测污染物可能达到的最高浓度。

对于REVEX或蓄冷器的装置，还必须进行常规的乙炔分析。

表5和表6列出蒸发器中污染物允许的最大浓度。这些污染物的最大允许含量值比预期的正常运行含量值要大得多。

污染物正常运行值取决于蒸发器吹扫的速率、前段空气净化单元的设计、总体流程循环以及装置周围空气的质量等参数。

在这些参数的基础上，通过与设计人员的咨询和商讨，计算出主蒸发器运行中预期的污染物控制水平。

另外，在试运行期间，当装置运行到设计范围的上下限以外时，设计人员和运行人员应对主冷凝蒸发器中的液氧取样分析，以检验预期的污染物控制水平并为以后的测量设定基准线。

如果任何位置上任何一种测量组分超过其预期正常值的4到5倍，应有一个报警，表明需要对其进行调查和了解。同样重要的是，如果污染物浓度发生快速的变化，无论增加还是下降，也应查明原因。

应设置第二级报警，表示装置需要停车。这个更高的设定值必须由制造厂家提供。停车值的设置必须以制造厂家特殊的设计特征，操作方法和经验为基础。除非经制造厂家明确认可，不得超过表5和表6中所列出的停车设定值。

应该特别注意保证蒸发器液位（浸入式蒸发器见7.2.1）和循环流量（下流型蒸发器见7.2.2）保持在规定的范围之内。如果这一液位和流量不能保持在规定的范围之内，所测量出的底部液体中污染物平均浓度就可能存在错误，并低于蒸发热交换器中局部的实际浓度。蒸发器底部液体浓度的快速下降可能正好表明污染物在蒸发器内聚积。

分析设备和液位变送器的正确校验对于装置持续的安全运行至关重要。必须按照供应商操作手册中规定的周期对上述仪器进行维护校验。

低温液体的取样应该特别注意，避免样品液体的部分蒸发，使高沸点组分，特别是碳氢化合物的测量发生错误。

分析和操作记录应长期保存，以便长时间地对装置环境和运行的变化进行监测。在6.1部分中定义的任何影响装置运行的变化如果发生，应该被特殊考虑

7.5 临时工况

临时工况可能引起比正常运行更大的危险。在这些情况下，装置单元中发生的工艺变动有可能未被操作人员注意到。

造成暂时性工况的原因可能有：

- 装置负荷变化；
- 装置计划停车或非计划停车；
- 装置冷启动（带液或不带液）；
- REVEX，蓄冷器和EFP系统发生的切换问题。

7.5.1 装置负荷变化

7.5.1.1 浸没式蒸发器

一般情况下，当装置负荷减少时蒸发器液位上升；当装置负荷增加时液位下降。

根据负荷增加的速度，底部液位以及相应的蒸发器再循环率可能会非常迅速地下降。这些蒸发器浸没程度的下降和允许运行在低浸没程度的时间的最大允许极限必须由装置设计者提供。如果没有提供，可以采用浸没程度低于正常运行数值的30%，最长允许时间为60分钟。

7.5.1.2 下流型蒸发器

循环流量必须维持在正常运行所要求的水平。任何装置负荷变动期间，分配器的液位，或测量的去分配器的液体流量不得下降到允许的最低值以下。在负荷变动时，为下流型蒸发器供液的分配器的液位有可能会暂时性的下降到正常运行范围以下。只要稳定状态的液位在最低点以上，是可以接受的。应注意到在许多情况下，可以使用循环流量的测量替代直接的液位测量。

应保持对塔下部液封的控制。应特别注意循环泵的吸入过滤器，因为二氧化碳和其他污染物的冻结可能引起过滤器的堵塞。

7.5.1.3 液氧生产

对于连续性地大量生产（大于加工空气量的2%）液氧的装置，进入空分装置的污染物可以得到有效的稀释。对于不设置可测量置换性排放管道的装置，液氧生产量必须保持在可测量的最低流量以上。

7.5.2 装置停车和冷待机

装置停车以后，填料或塔板上的液体将全部流到塔的底部。在这种情况下，再沸器的液位会远高于液位指示的100%。一般情况下会保留这些液体，以使装置重新启动时可以快速地达到工况。这种模式也可称之为“冷待机”状态。

注释：装置停车以后，由于液位计上取样管有可能充满液体，液位指示仪表可能会发生问题和故障。可能需要对关键的变送器进行校验，或许要重新进行刻度标定。另外，液体密度的改变将导致主冷液位指示的不准确。

在一到两天的冷待机期间，如果安装有液氧吸附器，通过液氧吸附器的液体循环应持续。为了以安全的方式维持更长时间的冷待机，必须遵守下列指导原则：

- 关闭循环泵的进出口阀。
- 排出泵和吸入过滤器中的液体。
- 液氧吸附器排液并再生；再生应该在完全排放液体和用氮吹扫吸附器后尽快进行，以避免污染释放到气态氧中。

由于外部热量会慢慢传入冷箱，主冷中液体会蒸发，最终会使蒸发器中的液体量减少到正常运行的水平

以下。当液体减少到其正常水平的一半时，必须通过液氮或液氧注入增加装置中的液体，否则必须将装置中所剩的液体完全排出。

在长期冷待机时，如果注入液体时，最好是采用液氮而不是液氧。如果采用液氧，应该知道有另外的碳氢化合物，CO₂、N₂O等，总之就是污染物被加入系统，这将导致污染物积聚且超过最大允许极限。

如果碳氢化合物分析仪可以使用，在冷待机期间应连续监测碳氢化合物含量。如果污染物的水平达到表5或表6规定的值，必须排出所有的液体。当然，由于在非运行期间的取样可能不具有代表性，一个较低的结果并不能证明需要坚持采取建议的其他行动（如本节前面所述）。

对于REVEX和蓄冷器的装置，在排液之后最好是将装置彻底加温。如果不这样做，在重新启动过程中很可能使二氧化碳进入精馏塔。

7.5.3 装置重新启动

下面所描述的一些暂时性工况彼此之间可能有许多共同之处。

根据装置的类型以及它们的设计，可能难以确定一个装置在重新启动之前是否保留有足够的液体。实际上，适当的程序可能就是在7.5.3.1和7.5.3.2中所述内容的有机结合。如果在启动时主冷蒸发器液位不足，低于50%浸没。需要将残余的液体排放，以消除塔底部中污染物的聚集。相关高或者低液位下的预防措施参见7.2。

7.5.3.1 短期停车后的冷启动

一般来说，停车后8小时以内重新启动时，装置中有足够的液体维持主冷蒸发器必要的液位。

在浸没式蒸发器中，保持对液位的控制并至少达到其正常淹没高度的80%。然后，尽快地将淹没高度提升到正常运行的水平。如果具备条件，建议在此阶段进行液体注入。淹没高度暂时性地降低到50%，如果持续时间不长是可以允许的。如果没有条件进行液体注入，应考虑其他的工艺措施（例如降低入塔空气量）。

对于下流型蒸发器，通过循环泵流量控制板式单元分配器中的液位。应确保液槽中有足够的液体以维持循环泵的流量。为了维持这个液位，可以控制进入下塔的空气量。

7.5.3.2 长期停车后的冷启动

如果蒸发器中液体降低到正常运行水平的50%以下，在重新启动之前需要排出蒸发器中的残留液体。在此低位下的液体将含有较多的碳氢化合物，氧化亚氮，甚至二氧化碳，它们可能在蒸发器板式单元的通道中形成沉淀。应该编写程序以防止CO₂浓度超过主冷中液体在大气压力下CO₂溶解度的一半。（根据实际组分）

如果可以通过液体后备系统注液，启动过程中液位低的问题将很容易解决。如7.5.3.1所述，最好使用液氮，但如果采取正确的安全预防措施也可以使用液氧。

在启动过程中，开始时蒸发器的淹没高度是远低于正常值的，因此在调节氧纯度之前首先的任务是积累液体到正常液位。

对于内压缩装置，一旦液位积累到正常值的80%左右，就要尽早启动氧产品泵，其流量至少要达到泵的最低流量。

确保液氧吸附器和富氧液空吸附器（如果有）在启动前得到再生。

对于REVEX装置，最初积累的蒸发器底部液，其液位达到正常值的20~30%时应将它们全部排放。

7.6 加温解冻

空气分离装置应该定期地加温解冻。加温解冻的目的是清除任何过量的杂质，例如碳氢化合物，二氧化

碳和氧化亚氮等，这些杂质特别是在工况波动时有可能进入装置。由于主冷凝蒸发器是碳氢化合物最容易积聚的部位，它的加热应该依据程序7.6.1特别认真对待。

7.6.1 程序

加温解冻程序在操作手册中应该有非常详细的描述。尽管各种类型空气分离装置的加温程序有所差别，这些基本指导原则都必须坚持。

下列要点是要特别强调的重要步骤：

- 排出全部液体。
- 制订各个回路加温的顺序。按照该顺序加温各个回路。
- 强制加温气流尽可能地通过工艺流程所有单元。
- 如果不能确保隔离效果，应避免局部加温。经验证明会有杂质迁移的风险，或者沉淀物从一部分迁移到其他地方。
- 检查所有加温出口流出的气流。
- 在加温过程接近结束时打开所有仪表管线。
- 如果操作手册没有给出明确的说明，对于带有FEP的装置而言，加温过程完成的典型标志是：所有加温出口的温度达到15 °C左右并至少保持两个小时。在加温将要结束的时候，应选择几个加温出口进行水分含量分析，以确保加温过程的圆满成功。出口气流的露点在-40 °C 到 -60 °C，表示该回路符合加温要求。

对于带有REVEX和带有加温器的装置，需要更高的出口温度。最低温度最好应达到30 °C，最高温度以60 °C为限。在达到目标温度之后，应维持在目标温度继续加温至少两个小时。

7.6.2 周期

加温的周期取决于装置的设计，工艺循环以及所处位置。对于一个特定的装置来说，正常的加温周期必须在装置的设计和施工阶段确定并写入供应商的操作手册。应由称职人员完成风险评估，以确定这个位于特定地点的特定空分装置所需要的加温周期。风险评估中应包含下列因素：

- 设计因素，例如FEP/REVEX，蒸发器的型式，置换吹扫速率，液氧纯度；
- 操作因素，例如液体分析的安排，有人/无人现场，装置记录；
- 环境因素，例如装置的安装位置/周围的工业设施，潜在的空气污染物，空气质量；
- 历史因素，例如FEP/REVEX管理经验，装置联锁停车动作的频繁程度，主冷液位的变化，以前发现的问题。

如果操作手册中没有另外的说明，或者风险评估没有特别要求，装置的加温周期为3年一次。

根据运行经验，加温周期可以适当延长；但是如果出现下列异常情况，应缩短加温周期：

- 低温设备（热交换器，精馏塔塔盘）压力降异常；
- 入口空气中碳氢化合物含量升高；
- 切换故障频繁发生（REVEX，蓄冷器，FEP系统）；
- FEP系统反复出现的少量二氧化碳穿透；
- 环境条件改变（偏离设计时的环境条件）；
- 装置多次非计划停车（例如供电故障）。

正常运行模式的重大变更（如前面目录所述）可能迫使采用更短的加温周期。

进一步的建议是：如果要进行重大维修工作，总是首先应考虑装置的加温。

7.7 清洗和维护

如果装置的设计完备并且有长期正常运行的历史，那么对于蒸发器的例行维护或清洗是不需要的。

但是，在某些情况下，外部物质有可能进入空分精馏塔塔底，或在板翅式蒸发器中积聚。在这些情况

下，进入的物质虽然是惰性的，但必须清除，因为它可能引起局部干沸腾或盲端蒸发并造成爆炸的危险。

7.7.1 施工安装过程引起的异物污染

装置的安装施工是在非常严格的监督下进行的，确保在施工期间不会有外部异物进入装置。使用清洁脱脂的管道并防止在储存和施工期间异物进入装置。在装置试运行期间，对管道要进行全面的吹扫，以确保在装置开车前从工艺装置中清除所有施工材料。以这种方式清除所有的微粒，例如铝或不锈钢削片，氧化铝，灰尘和焊渣等。

7.7.2 由装置运行形成的异物污染

空分装置运行期间，下列异物可能在装置中形成或进入装置。通过常规的装置加温不能清除这些异物。

7.7.2.1 吸附剂粉尘

吸附剂粉尘有可能存在的设备有FEP吸附器，蓄冷器，以及低温的气相或液相吸附器。通过沸腾和循环，这些粉尘可以进入蒸发器板式单元的翅片，堵塞个别通道，并导致盲端蒸发。在所有情况下，粉尘最终会在液氧底部聚积。通过特殊设计的吸附器系统或者安装过滤器，粉尘的生成或者向下游的迁移可以被预防。

7.7.2.2 油污染

只要使用油润滑的机器作为工艺设备，就有可能产生油污染。例如低温透平在密封气失效或轴承故障时就会产生油污染。油润滑的膨胀机也可能发生这种污染。

从这类设备泄露出来的油会污染与其相邻设备的冷端部分，并且通常会在这些部位沉淀下来。

但是，连续的运转也会使这些油迁移到工艺装置的其他部分，并有可能在上塔底部液氧中聚积。装置停车或加温解冻可以使油/脂的流动性增大，并使其迁移到工艺装置的其他部分。因此，这种污染的清除是非常必要的，它可能涉及到溶剂的使用。如果要进行溶剂清洗，必须与装置的制造厂家或供应商家联系并商议（见7.7.5）。

7.7.2.3 珠光砂

曾发生过珠光砂引起蒸发器堵塞的事故。其原因是珠光砂绝热的冷箱中某些部件或管道破损。像任何其它的异物一样，珠光砂最终会到达蒸发器并可能造成热交换器通道危险的堵塞。在装置运行之前，无论通过何种方法都必须将这些珠光砂清除出去。

7.7.2.4 液氧泵过滤器

如果运行的装置上配备有液氧泵过滤器，这些过滤器绝对不能拆除。这些过滤器的目的是保护泵体以及确保清除通过泵的微粒，避免它们在蒸发器分配器或其它设备中聚积。如果这些过滤器经常发生堵塞，应查明原因。

7.7.3 由装置维修产生的异物污染

在装置和设备维修时，应采用良好的氧设备维护实施规范，确保不产生碳氢化合物污染，例如油和脂或其它粒子到工艺管道或设备。应遵循第8章中所列出的几个文件提供指导原则。对于要安装的部件，应该密封地储存在标有“已按氧清洁脱脂处理”的塑料封袋里。清洗和脱脂要达到氧兼容产品所使用的标准。溶剂或清洁剂的使用需要得到严格的控制，必须确保在装置重新投入使用前，残留的溶剂或清洗剂完全清除。在某些情况下可能需要使用分析管或紫外线灯检验。

如果需要油润滑而润滑油又可能与富氧气流接触，就必须使用与氧兼容的润滑油。

对于有可能传输或接触富氧的气态或液态流体管道系统，应特别注意氧兼容垫片的使用。

7.7.4 蒸发器和空分塔底部的清洗

清洗主冷、塔、塔底部和其它冷箱内部设备时的一项重要任务是风险评估。通常由制造厂商做技术支持。

7.7.4.1 重质碳氢化合物、油和脂的清除

重质碳氢化合物、油和脂的污染只能通过溶剂脱脂方法清除。清洗有不同方法，可以用泵使低温液体循环通过板式单元闪蒸，也可以向各个通道或交叉喷射。溶剂应定期取样分析其碳氢化合物含量，可以知道已经清除的碳氢化合物数量以及是否达到清洗目标。为了达到要求的清洁程度可能需要进入空分塔。

另外，也可以使用热蒸汽再冷凝技术。步骤是将热的溶剂蒸汽送入设备，使其在设备中冷凝并溶解碳氢化合物，再将收集到的含有碳氢化合物的冷凝液处理后再用。这种方法不需要人员进入空分塔内。

警告：这两种方法都依赖于溶剂要能达到所有表面，如果某些通道堵塞，或者如果发生偏流，就不能保证达到良好的效果。如果怀疑有堵塞，应该在溶剂清洗前清除阻塞。

对于任何一种技术，关键是要确保所使用的溶剂与氧是兼容的，并且是可以完全清除的。（见AIGA 012(EIGA Doc. 33或CGA G-4.1)“用氧设备清洗”

如果溶剂是不可燃的，使用后用氮气吹扫是非常重要的，要确保在装置重新试车前清除所有液态和气态溶剂，特别是取样管线，排放吹除管线和盲角部位应无溶剂残留。

7.7.4.2 微粒和珠光砂的清除

珠光砂和其它永久性固体颗粒的清除非常关键，其目的是避免盲端蒸发这样的重大风险。而且只能通过人员进入蒸发器和空分塔内部工作才能达到清除的目的。

技术要点包括：

- 爆破片技巧（用于热交换器）；
- 采用震动，鼓风和真空吸尘等机械清洗技术。

爆破片技巧包括充压 - 然后突然泄压，以形成冲击和极高的流速使珠光砂脱离并排出。在受污染的热交换器进口附近找一个可以利用的管口法兰，在法兰上装一个开槽的、薄的盲垫片。从另一个管口接氮气（或空气）源，缓慢地向热交换器充压，直到垫片爆破，珠光砂随气流释放。可以逐步增加垫片厚度以提高爆破压力（不得超过容器或设备的安全工作压力）。持续这一操作，直到爆解释放出的气流中看不到珠光砂为止。在FEP粉尘夹带进入主热交换器的故障处理中，以及在吸附器粉尘夹带进入过冷器的故障处理中，这种技巧都曾得到成功的应用。由于可能造成塔板的损坏，这种技巧不能用于空分精馏塔。机械清洗包括在交换器的侧面施加震动头，使板式单元内捕获的珠光砂颗粒松动。珠光砂颗粒的清除可以通过压力吹除，也可以采用真空吸尘。

清除效果的检查可以使用内窥镜：将内窥镜伸入每个翅道，沿交换器整个长度观察，应看不到遗留的珠光砂。

7.7.5 气相和液相吸附器

如果发现任何迹象表明气相或液相吸附器中的吸附剂大量损耗或严重粉化（例如通过维修停车时开盖检查床层材料）应对整个回路做进一步的调查。确定流失的材料是否积聚在下游的某个汽化器中，或者积聚在低压塔的回流液氧中。如果确定吸附剂明显地流失，应与装置的制造厂家联系。

警告：蒸发器中如果有微粒物质并使某些通道部分地或完全地堵塞，就可能导致碳氢化合物聚积，甚至有潜在爆炸的危险。

8 参考资料

EIGA参考文件

欧洲工业气体协会, 3-5, avenue des Arts, 1210 Brussels. www.eiga.eu

CGA参考文件

美国压缩气体协会 14501 George Carter Way, Suite 103, Chantilly, VA 20151. www.cganet.com

除非另外说明, 一律应用最新版本:

[1] AIGA 056 (EIGA 147, CGA P-8): “*Safe Practices Guide for Cryogenic Air Separation Plants*空气低温分离装置的安全指南”

[2] AIGA 57(EIGA 145, CGA G-4.9): “*Safe Use of Brazed Aluminium Heat Exchangers for Producing Pressurized Oxygen*用于高压氧的铝钎焊板式热交换器的安全使用”

[3] CGA G-4.1: *Cleaning Equipment for Oxygen Service*用于氧设备的清洗”

[4] AIGA 012 (EIGA Doc 33): *Cleaning of Equipment for Oxygen Service Guidelines*用于氧设备的清洗指导

[5] McKinley, C., and E.S.J. Wang. “Hydrocarbon System Solubility碳氢化合物的溶解度”, *International Advances in Cryogenic Engineering* 《低温工程》, Volume 4, pp.11-25 (1958).

[6] Karwat, Ernst. “Hydrocarbons in Air Separation Plants空气分离装置中的碳氢化合物,” *Chemical Engineering Progress*, 《化学工程进展》 Vol. 54, No. 10, October 1958. www.aiche.org

[7] Houghton, Sunder, Weist, and Trexler, “Trace Component Accumulation in Downflow Reboilers下流型蒸发器中微量组分的聚积,” *AIChE Spring Meeting* 《美国化学工程师学会春季会议》, Atlanta, GA, March 2000. www.aiche.org”

[8] Lassmann and Meilinger, “Determination of Hydrocarbon Adsorption on Solid CO₂ and N₂O at Ambient Pressures大气压力下CO₂ 和 N₂O固体上碳氢化合物吸附量的确定” *Flammability and Sensitivity of Materials in Oxygen-Enriched Atmospheres: Ninth Volume富氧气氛中材料的可燃性和敏感性* 第9卷。 , ASTM STP 1395; Steinberg, Newton, Beeson, Eds.; ASTM International, West Conshohocken, PA; 2000. www.astm.org” ,

[9] E. Miller, Auvil, S., Giles, N., and Wilson, G., “The Solubility of Nitrous Oxide as a Pure Solute and in Mixtures with Carbon Dioxide in Air Separation在空气分离装置中氧化亚氮（作为纯溶质以及与二氧化碳的混合物）的溶解度” *AIChE Spring Meeting* 《美国化学工程师学会春季会议》, Atlanta, GA, March 2000. www.aiche.org

[10] D. Meneses, Thonneller, J., Szulman, C., and Werlen, E., “Trace Contaminant Behavior in Air Separation Units空气分离装置中微量污染物的行为,” *Cryogenics 2000 Conference* 《2000年低温学大会》, Praha, Czech Republic, October 2000. www.isibrno.cz/cryogenics2000/

[11] R.M. Hardeveld, Groeneveld, M.J., Lehman, J.-Y., and Bull, D.C., “Investigation of an Air Separation Unit Explosion一个空分装置爆炸的调查” *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 《工艺行业损失预防》杂志 Vol. 14, pp. 167-180, 2001. www.elsevier.com”

[12] J.-Y. Lehman, Wei, X.C., Hua, Q.X., Delannoy, G., “Investigation of the Fushun ASU Explosion in 1997,” *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Vol. 16, pp 209-221, 2003. www.elsevier.com “1997年抚顺空分装置爆炸的调查”, 《工艺行业损失预防》杂志

附件A：空气中的堵塞性、易燃性和腐蚀性污染物

堵塞性污染物	易燃或反应性污染物	腐蚀性污染物
Water H ₂ O 水分	Methane 甲烷 CH ₄	Sulphur Dioxide 二氧化硫 SO ₂
Carbon Dioxide CO ₂ 二氧化碳	Acetylene 乙炔 C ₂ H ₂	Sulphur Trioxide 三氧化硫 SO ₃
Nitrous Oxide N ₂ O 氧化亚氮	Ethylene 乙烯 C ₂ H ₄	Hydrogen Sulphide 硫化氢 H ₂ S
	Ethane 乙烷 C ₂ H ₆	Chlorine 氯 Cl ₂
	Propylene 丙烯 C ₃ H ₆	Hydrochloric Acid 盐酸 HCl
	Propane 丙烷 C ₃ H ₈	Ammonia 氨 NH ₃
	Other Hydrocarbons 其它烃类	Other Sulphur Compounds 其他硫化物
	Oxides of Nitrogen 氮氧化物 NO _x	Other Chlorides 其他氯化物
	Ozone 臭氧 O ₃	

注释：本表引自CGA P-8，“空气低温分离装置的安全指南”。

附件B：空气污染物的性质

	Acetylene C ₂ H ₂	Carbon dioxide CO ₂	Propylene C ₃ H ₆
90.2 K, 1.013 bar在液氧中的溶解度(ppm/v) ¹	4 - 6	4 - 5	3600 - 6700
90.2 K, 1.013 bar在液氧中的K值	2 x 10 ⁻²	10 ⁻³	3 x 10 ⁻⁶
293 K, 1.013 bar空气中的爆炸极限下限(%)	2.5	不可燃	2.1
浓缩相(固态或液态)	固态	固态	液态
90.2 K, 1.013 bar与液氧的相对密度abs	0.64	1.4	

	Nitrous oxide N ₂ O	Ethylene C ₂ H ₄	Propane C ₃ H ₈
90.2 K, 1.013 bar在液氧中的溶解度(ppm/v) ¹	140 - 160	13 000 - 30 000	9800
90.2 K, 1.013 bar在液氧中的K值	5 x 10 ⁻⁴	2 x 10 ⁻³	3 x 10 ⁻⁷
293 K, 1.013 bar空气中的爆炸极限下限(%)	不可燃	2.7	2.1
浓缩相(固态或液态)	固态	固态	液态
90.2 K, 1.013 bar与液氧的相对密度abs	1.4	0.66	

	Methane CH ₄	Ethane C ₂ H ₆
90.2 K, 1.013 bar在液氧中的溶解度(ppm/v) ¹	Miscible	128 000 - 250 000
90.2 K, 1.013 bar在液氧中的K值	0.3	2 x 10 ⁻⁴
293 K, 1.013 bar空气中的爆炸极限下限(%)	5	3
浓缩相(固态或液态)	不形成第2液相	液态
90.2 K, 1.013 bar与液氧的相对密度abs	不形成第2液相	

*溶解度中的范围反映了不同来源实验数据的差别。最广泛引用的两个来源是Karwat 和 McKinley。在更高的温度和压力下，在饱和液体中的溶解度会更高一些。

**K值数据仅精确到1位有效数字。这些数据随温度和压力的变化相当大。

附件C：吸附剂对空气污染物的吸附能力

	不吸附	部分吸附 ¹	全部吸附
Alumina 氧化铝 (前端净化系统)	Methane 甲烷 CH ₄ Ethylene 乙烯 C ₂ H ₄ Ethane 乙烷 C ₂ H ₆ Propylene 丙烯 C ₃ H ₆ Propane 丙烷 C ₃ H ₈ Nitric Oxide 氧化氮 NO n-butane 正丁烷 nC ₄ H ₁₀	² Carbon Dioxide 二氧化碳 CO ₂ Nitrous Oxide 氧化亚氮 N ₂ O Acetylene 乙炔 C ₂ H ₂	³ Ozone 臭氧 O ₃ Oxides of Nitrogen 氮氧化物 NO ₂ N ₂ O ₃ Moisture 水分 H ₂ O
Molecular Sieve 分子筛 (前端净化系统)	Methane 甲烷 CH ₄ Ethane 乙烷 C ₂ H ₆ ⁴ Nitric Oxide 氧化氮 NO	Ethylene 乙烯 C ₂ H ₄ Propane 丙烷 C ₃ H ₈ Nitrous Oxide 氧化亚氮 N ₂ O	Carbon Dioxide 二氧化碳 CO ₂ Acetylene 乙炔 C ₂ H ₂ Propylene 丙烯 C ₃ H ₆ ³ Ozone 臭氧 O ₃ Oxides of Nitrogen 氮氧化物 NO ₂ N ₂ O ₃ n-Butane 正丁烷 nC ₄ H ₁₀ Moisture 水分 H ₂ O Oxygenates 氧化剂类 Chlorinated 氯化烃类 Hydrocarbons
Silica Gel 硅胶 (液氧、液空、气相吸附器)	Methane 甲烷 CH ₄ Ethane 乙烷 C ₂ H ₆	Carbon Dioxide 二氧化碳 CO ₂ Ethylene 乙烯 C ₂ H ₄ Propylene 丙烯 C ₃ H ₆ Propane 丙烷 C ₃ H ₈ Nitrous Oxide 氧化亚氮 N ₂ O	Acetylene 乙炔 C ₂ H ₂ Ozone 臭氧 O ₃ Dienes 二烯烃

假定条件：每种大气污染物低于10 ppm/v；二氧化碳含量为425 ppm/v；
重碳氢化合物（碳4以上）全部吸附。

- 1、部分吸附中清除的程度取决于设计和运行参数。如果设计比较充分，可以达到完全清除。
- 2、二氧化碳通常用分子筛清除。参考第7章关于预防穿透要求的运行条件。
- 3、臭氧是通过分解后吸附的。
- 4、氧化氮先被空气氧化（为氮氧化物），然后再被吸附。

附件D：作为设计基础的空气质量默认指标
(用于前端吸附净化系统)

组分		默认值 (ppm/v)
Methane	甲烷	5
Ethane	乙烷	0.1
Acetylene	乙炔	0.3
Ethylene	乙烯	0.1
Propane	丙烷	0.05
Propylene	丙烯	0.2
C4+ hydrocarbons	碳4以上重碳氢化合物	1
Carbon Dioxide	二氧化碳	425
NOx (NO+ NO2)	氮氧化物	0.1
N2O	氧化亚氮	0.35
注释：表中所列为装置吸入空气中同时存在的各种组分的最大浓度。在缺乏特定数据时可以用做为设计基础。如果实际情况超过这些浓度值，可能需要变更不同部件的设计。应尽可能提供当地的实际数据，对于供应厂家来说，无论什么时候这种信息都是有用的。		

附件E:运行在1.2 bara 的热虹吸型蒸发器液氧中污染物的最大控制值

组分			最大许可浓度(ppm/v)
Methane	甲烷	CH ₄	500
Acetylene	乙炔	C ₂ H ₂	0.5
Ethylene	乙烯	C ₂ H ₄	200
Ethane	乙烷	C ₂ H ₆	250
Propylene	丙烯	C ₃ H ₆	35
Propane	丙烷	C ₃ H ₈	100
C ₄ Hydrocarbons	碳4碳氢化合物	C ₄	5
Total hydrocarbons (THC) 总烃		THC	500
Carbon Dioxide	二氧化碳	CO ₂	4.0
Nitrous Oxide	氧化亚氮	N ₂ O	100
注意:			
1. 应该特别注意低温液体的取样,以便得到准确、合理的结果。连续液体流中的所有液体必须快速地蒸发汽化,以确保气相中的浓度与母体液体的成分相同。否则可能导致母体液体中碳氢化合物浓度被低估。			
2. 内压缩流程生产压力氧的设备见EIGA IGC 145(CGA G-4.9)			

附件F：运行在1.2 bara 的下流型蒸发器液氧中污染物的最大控制值

组分			最大许可浓度(ppm/v)
Methane	甲烷	CH ₄	500
Acetylene	乙炔	C ₂ H ₂	0.5
Ethylene	乙烯	C ₂ H ₄	15
Ethane	乙烷	C ₂ H ₆	15
Propylene	丙烯	C ₃ H ₆	1
Propane	丙烷	C ₃ H ₈	1
C4 Hydrocarbons	碳4碳氢化合物	C ₄	1
Total hydrocarbons (THC) 总烃		THC	500
Carbon Dioxide	二氧化碳	CO ₂	0.5
Nitrous Oxide	氧化亚氮	N ₂ O	5
注意：			
1. 如果装置负荷变化或停车期间蒸发器底部液中碳氢化合物的浓度显著增大，就表示碳氢化合物的聚积已经形成。应考虑排出蒸发器中的液体，或者对蒸发器加温。			
2. 必须特别注意低温液体的取样，以便得到准确、合理的结果。连续液体流中的所有液体必须快速地蒸发汽化，以确保气相中的浓度与母体液体的成分相同。否则可能导致母体液体中碳氢化合物浓度被低估。			
3. 内压缩流程生产压力氧的设备见AIGA 057,(EIGA IGC 145, CGA G-4.9)			

附件G：蒸发器板式单元浸没程度示意图

