



低温空分装置安全规范指南

**SAFE PRACTICE GUIDE FOR
CRYOGENIC AIR SEPARATION PLANTS**

AIGA 056/08

全球协调文件

根据 **CGA P-8**
2005 年第 4 版

亚洲工业气体协会

地址：新加坡，3 港湾坊 #09-04 港湾大厦二，邮编：099254

电话：+65 6276 0160 传真：+65 6274 9379

网址：<http://www.asiaiga.org>



AIGA 056/08

全球协调文件

低温空分装置安全规范指南

SAFE PRACTICE GUIDE FOR CRYOGENIC AIR SEPARATION PLANTS

免责声明

亚洲工业气体协会（AIGA）的所有技术出版物或以 AIGA 名义出版的所有技术出版物（其中包括这些出版物中包含的操作规范、安全规程和所有其它技术信息）是从被视为可靠的来源获得的，并且以 AIGA 成员和第三方在截至这些技术出版物的发布日期的现有技术信息和经验作为基础。

尽管 AIGA 建议其成员参考或使用 AIGA 的出版物，但是 AIGA 成员或第三方对这些出版物的参考或使用完全是自愿的。

对于参考或使用 AIGA 出版物中包含的信息或建议，AIGA 或其成员对相关结果不作任何保证并且对此不承担任何责任。

AIGA 无法控制任何人员或实体（其中包括 AIGA 成员）对其出版物中包含的信息或建议的执行或不执行、错误判读、正确或不正确使用，AIGA 明确排除任何相关责任。

AIGA 的出版物将定期进行评审，在此提请使用者应获得最新的版本。

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.

© 本翻译文件经压缩气体协会授权出版，保留一切法律权利。

亚洲工业气体协会

地址：新加坡，3 港湾坊 #09-04 港湾大厦二，邮编：099254

电话：+65 6276 0160 传真：+65 6274 9379

网址：<http://www.asiaiga.org>

致谢

本翻译文件经压缩气体协会授权出版，保留一切法律权利。

目录

页码

1	前言	1
2	适用范围	1
3	空分装置的典型特征	1
4	定义	2
5	健康危害	7
5.1	低温液体	7
5.2	气体产品	7
5.3	窒息	7
5.4	氧危险	8
5.5	防护服	9
6	空分装置的一般考虑因素	9
6.1	现场选择	9
6.2	空分装置布局的安全因素	9
6.3	结构材料	9
6.4	保温 — 冷箱除外	10
6.5	清洗	10
6.6	电气要求	10
6.7	噪声	11
7	进气质量	11
7.1	污染物	11
7.2	在氧中浓缩的反应性污染物	12
7.3	在氮中浓缩的反应性污染物	13
7.4	堵塞性组分	13
7.5	燃烧产生的雾霾和烟雾	13
7.6	污染物来源	14
7.7	确定污染物	14
7.8	空气进口的位置	14
7.9	进气监测	14
8	压缩机	14
8.1	轴流式压缩机	14
8.2	离心式压缩机	15
8.3	动力式压缩机的其它考虑因素	15
8.4	往复式压缩机	15
8.5	膜片式压缩机	17
8.6	回转容积式压缩机	17
8.7	制冷剂气体压缩机	17
8.8	螺杆式压缩机	17
8.9	润滑系统	18
8.10	冷却器和分离器	19
8.11	吸入口过滤器或筛滤器	19
8.12	压缩的特殊考虑因素	19
8.13	操作和维修规程	20
9	空气污染物脱除	20
9.1	脱除方法	20
9.2	污染物脱除阶段	21
9.3	预纯化装置的运行	22
9.4	切换式换热器的运行	25

9.5	辅助机械冷冻器	26
9.6	碱洗塔	27
10	膨胀机	27
10.1	加载损耗和超速	27
10.2	过程受到油污染	28
10.3	异常低温	28
10.4	气流中存在固体	29
10.5	润滑损耗	29
10.6	轴承异常温度	29
10.7	异常振动	29
10.8	异常速度	29
10.9	冰或二氧化碳导致膨胀机结垢	30
10.10	机和停机	30
10.11	操作和维修规程	30
11	低温泵	30
11.1	总则	30
11.2	泵的种类	31
11.3	结构材料	31
11.4	泵系统的一般设计	31
11.5	氧泵的特殊考虑因素	32
11.6	泵电机	32
11.7	泵的运行	32
11.8	操作和维修规程	33
12	冷箱	33
12.1	基础	33
12.2	外壳	33
12.3	保温材料	33
12.4	内部支架	33
12.5	冷箱和管道吹扫	33
12.6	工艺泄漏	34
12.7	脱除颗粒材料	34
12.8	低温吸附器	34
12.9	液位	35
12.10	污染物监测	36
12.11	氩分离和纯化	36
12.12	不凝气体吹扫	37
12.13	冷箱清洗	37
12.14	液氧的安全保持时间	37
12.15	主换热器中的空气液化	37
12.16	工艺扰动	38
13	控制系统	39
13.1	仪表系统功能	39
13.2	临界安全系统	39
13.3	运行安全系统	40
13.4	例行装置运行	40
13.5	无人值班或部分有人值班运行	40
13.6	远程运行	41
13.7	计算机控制系统的额外考虑因素	41
13.8	失效保险系统的额外考虑因素	41
14	产品处理设备	41
14.1	液体储存容器	42

14.2	高压气体储存容器.....	42
14.3	液体蒸发器.....	43
15	空分装置管道.....	43
15.1	空分装置管道的一般设计考虑因素.....	43
15.2	止回阀的一般设计考虑因素.....	43
15.3	氧管道危险.....	43
15.4	泄压装置.....	43
15.5	低温管道.....	44
15.6	死角.....	45
15.7	碳钢管道.....	45
15.8	排气.....	45
15.9	产品输送.....	45
16	停机规程.....	46
16.1	冷箱停机.....	46
16.2	液体和气体处置.....	46
16.3	空分装置解冻.....	47
17	修理和检查.....	47
17.1	一般维修考虑因素.....	47
17.2	监督控制.....	47
17.3	施工和修理的特殊考虑因素.....	47
17.4	冷箱危险.....	47
17.5	在富氧或缺氧气氛中作业的危险.....	48
17.6	清洗.....	48
18	操作与培训.....	48
18.1	操作规程.....	48
18.2	应急规程.....	48
18.3	变更管理.....	49
19	参考文献.....	49
表格		
表 1	在不同吸氧量水平上产生的影响.....	8
表 2	空气中的堵塞性、反应性和腐蚀性污染物.....	11
表 3	典型的空气质量设计基础.....	12
表 4	预纯化装置过程中的典型脱除.....	22
表 5	切换式换热器过程中的典型脱除.....	24
表 6	低温吸附器名称.....	35
图示		
图 1	典型的空分装置流程图.....	2

1 前言

作为一项行业标准协调方案的一部分，亚洲工业气体协会（AIGA）现已采纳压缩气体协会（CGA）标准 P-8。

这是一项适用于全球范围的国际协调标准，同时也适用于亚洲工业气体协会、压缩气体协会、欧洲工业气体协会（EIGA）和日本工业与医用气体协会（JIMGA）的所有成员。亚洲工业气体协会的版本与压缩气体协会的版本在技术内容上是相同的，但是前者主要在格式、计量单位和拼写方面经过了编辑修改。

本出版物提供了低温空分装置（ASU）的安全运行指南。本出版物是根据各个协会的运行低温空分装置的成员公司的经验加以编制的。

工业低温空分涉及某些必须加以识别和处理的潜在危险。这些危险包括电力、加压气体、极端低温、氧的促燃能力以及氮、氩和稀有气体的窒息性 [1]。¹

低温空分技术并不是固定不变的。在行业工程开发的推动下，低温空分技术已历经多年发展并且将继续不断发展。因此，可能存在各种不同的空分装置过程循环、设备和运行条件。为此，对于存在不同观点或实践的事项，必须在本出版物中包括某些一般性的陈述和建议。本指南的使用者宜认识到本指南并不能取代良好的工程判断、培训和经验。本指南并不构成并且不宜被视为一项强制实施的规范。

2 适用范围

本指南的目标读者是与空分装置运行有关的全体人员。本指南旨在帮助不熟悉空分技术的人员了解重要的安全因素。

本指南适用于低温空分装置的设计、选位、建造、安装、运行和维修安全。本指南主要阐述了低温空分过程特有的设备以及运行和维修特征。本指南还以有限的篇幅介绍了应用于其它工业用途而且已确立了安全设计、安装和使用规范的空分装置设备（例如空气压缩机）。此外，由于本出版物并不是关于具体设计和安全特征的通用安全规范手册，因此同时还需要参阅设备供应商提供的操作手册。

本指南并不涉及附属于某些空分装置的气瓶充装设施，也不涉及稀有气体回收和纯化设施或者位于空分装置界区以外的产品输送管道。

3 空分装置的典型特征

所有的低温空分装置都具有以下特征：

- 空气压缩
- 空气污染物脱除
- 换热器
- 蒸馏
- 膨胀（或其它冷源）

图 1 是一个通过低温蒸馏对空气进行分离从而生产氧、氮和氩产品的典型流程图。在主空气压缩机（MAC）中将空气压缩到 4~10 atm。然后将空气冷却到环境温度。通常在预纯化装置（PPU）或切换式换热器（REVEX）中脱除痕量污染物（例如水、二氧化碳和重质碳氢化合物）。在空气进入高压蒸馏塔之前，在主换热器中将空气冷却到接近空气液化温度的水平。在膨胀机中对某些空气减压从而产生冷量以克服热泄漏和过程效率低下。采用再沸器对高压塔顶排出的气态氮进行冷凝，液体被用于高压塔和低压塔回流。氮冷凝过程中释放出的热量对低压塔集液池中的液氧进行蒸发，然后将氧气作为产品抽出或者作为汽提气导入低压塔。

¹ 括号中的编号代表参考文献，在“参考文献”部分中按照它们在本文件中出现的顺序将其列出。

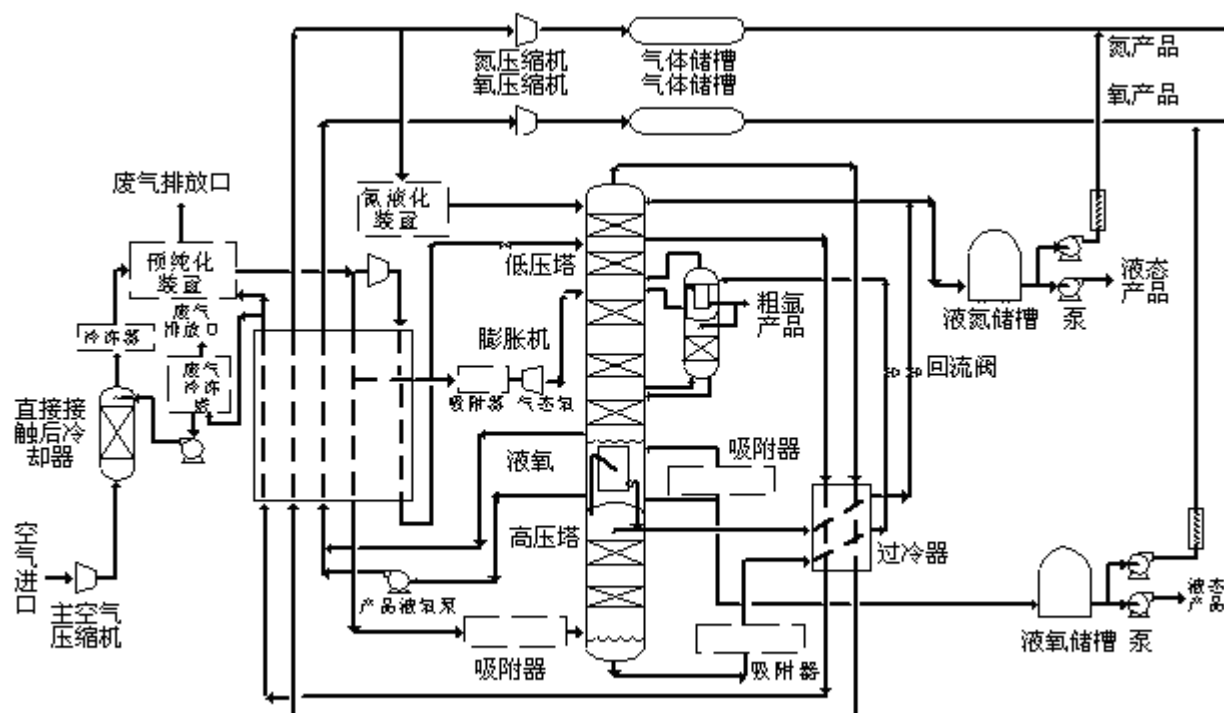


图 1 — 典型的空分装置流程图

在三种主要组分中，氧的沸点是最高的，从低压塔底抽出氧。从低压塔顶或高压塔顶抽出氮。可从低压塔中间抽出富氮流，在其它蒸馏塔中将富氮流提纯为纯氮产品。在主换热器中采用进气将产品流加温到环境温度从而回收冷量。如果可提供充分的冷量，还可从蒸馏系统中抽出液态产品。生产大量液态产品需要提供额外冷量（通常由氮液化器提供）。可对液体进行储存用于管路后备或商业销售。

两种典型的空分装置配置被用于生产加压氧。在气体装置配置（也称为“气态氧工艺”或“典型气体工艺”）中，从低压塔底抽出氧蒸气，在主换热器中采用进气对氧蒸气加温。如果需要高压氧产品，将氧压缩到所需的压力。从低压塔集液池抽出液氧吹扫流以防止痕量污染物浓度超过容许的安全极限。在泵抽液氧工艺（也称为“内部压缩工艺”）中，从低压塔集液池抽出液氧、将液氧泵抽到到所需压力、在主换热器中采用来自增压空气压缩机的高压空气对液氧进行蒸发。泵抽氧流脱除低压塔集液池中的痕量污染物，因此可消除来自低压塔集液池的另一股液氧吹扫流。

空分装置过程涉及许多根据不同的产品组合和客户需求专门定制的其他配置。对这些配置的详细说明不包括在本文件的范围内。

4 定义

4.1 酸性气体

与水结合时可形成酸的空气污染物（例如氯、氮氧化物和硫氧化物）。

注 — 酸性气体可在铝钎焊换热器和其它设备中形成腐蚀性条件。

4.2 吸附

一种气体或液体中的一种或多种组分被优先吸附在固态干燥剂或其它吸附剂上的纯化过程。

注 — 典型的吸附剂包括：

- 分子筛 — 在空气预纯化装置中用于脱除水、二氧化碳和碳氢化合物的颗粒吸附剂（通常是 13X）
- 氧化铝 — 通常在空气预纯化装置中用于脱水的颗粒吸附剂

- 硅胶 — 通常在低温吸附器中用于脱除二氧化碳和碳氢化合物的颗粒吸附剂

4.3 窒息

由于缺氧而丧失意识甚至死亡。

4.4 吹除

在管道和设备中对流体进行吹送从而消除污物、水分或其它杂质的维修或试运行规程。

4.5 铝钎焊换热器 (BAHX)

由隔板分隔的波纹板以及一个由杆件构成的外部框架（杆件上设有用于流体进口和出口的开口）组成的铝制板翅式换热器，配有集管和喷嘴以接入外部管道。

注 — 波纹板的厚度约为 0.2~0.5 毫米，隔板的厚度约为 1.0~2.4 毫米。关于更多信息，参见 AIGA 057/08 《用于生产加压氧的铝钎焊换热器的安全使用》[2]。

4.6 外壳

冷箱或低温管道的外壁。横截面可以是圆形或矩形。

4.7 催化剂

有助于促进反应、但是自身并不发生变化的材料。

4.8 空化

泵中的饱和或略微过冷液体形成的蒸汽泡以及蒸汽泡随后破裂，可能导致扬程损失以及泵受到损坏。

4.9 离心式

在旋转叶轮中对流体进行加速并且随后将这个能量转化成压力的动力式压缩机或泵。

4.10 净化

脱除流体或工艺设备中的痕量污染物。

4.11 箱

含有低温蒸馏塔、其它工艺设备、管道和保温材料的结构，也称为“空分装置的低温部分”。

4.12 控制系统

对来自过程和/或操作人员的输入信号作出响应并且产生一个输出从而使过程以预期方式运行的系统。

4.13 粗氩纯化系统

用于脱除粗氩中的氧的暖设备（其中包括压缩机、催化反应器、换热器、干燥器和冷冻器）。

4.14 低温液体

温度低于-130°F（-90°C）的极冷液体。

4.15 死端沸腾

富氧液体可能被截留在空穴和管段或设备段中并且可能被蒸发的条件。随着蒸气被脱除，新鲜液体被不断添加。

注 — 如果富氧液体中含有在蒸发过程中被浓缩的碳氢化合物，这个过程特别危险。死端沸腾也称为“池沸腾”或“罐沸腾”。

4.16 温差 (ΔT)

换热器中的两种流体之间的温差，用于指明换热器的性能或效率。

4.17 解冻

对工艺设备加温，同时使用清洁干气体对工艺设备进行清扫以脱除所有积聚的水分、二氧化碳和大气杂质的定期预防性维修规程。

注 — 解冻也称为“除霜”和“除冰”。

4.18 脱氧

通过与氢发生反应，对气体中的痕量氧污染物进行催化脱除。

4.19 脱氧系统

用于氩提纯的催化系统，以此达到的氧浓度低于仅采用空分装置通常达到的氧浓度。氢被添加到粗氩流中，然后与氧发生反应从而形成水。

4.20 间隔片

对泵或压缩机的工艺端与泵或压缩机的电机或轴承进行隔离的延伸隔片，用于防止工艺流体、油、热量或冷量迁移。

4.21 双隔断泄放

当两个或两个以上的系统或系统零件需要完全相互隔离时采用的管道/阀门系统，通常由两个管路尺寸的隔断阀以及一个位于隔断阀之间的小尺寸泄放阀组成。

注 — 当需要隔离时，关闭隔断阀并且打开泄放阀。泄放阀将隔断阀的所有泄漏排出，从而防止泄漏到其它系统中。

4.22 干沸腾

富氧液体进入空穴和管段或设备段并且被完全蒸发，从而以极高的系数对挥发度较低的所有杂质进行浓缩。

注 — 干沸腾也称为“干蒸发”。

4.23 放热反应

产生热量的反应。

4.24 膨胀机

将流体从较高的压力膨胀到较低的压力从而消除能量（功）并且产生冷量的机器。

4.25 失效保险

当系统的某个部件失效时，由此导致的情况不会造成安全问题。

注 — 例如当装置空气供应或电源中断时，隔离阀关闭。

4.26 过滤装置

用于脱除和阻滞液流或气流中的颗粒的装置。

注 — 脱除粒度取决于实际装置设计。术语“过滤器”、“筛滤器”和“粗滤器”有时可互换使用，但是通常按照脱除粒度对它们进行划分：

- 粗滤器 — 用于脱除和阻滞相对较粗的颗粒的装置
- 筛滤器 — 用于脱除和阻滞相对较细的颗粒的装置
- 过滤器 — 用于脱除和阻滞非常细的颗粒的装置

4.27 结垢

换热器中的污染物堵塞或表面覆盖从而对压降或热性能产生不利影响。

注 — 在空分装置中，堵塞通常是由低温换热器中冻结的二氧化碳、水或碳氢化合物导致的。

4.28 吸气剂

脱除气体中的痕量污染物的反应性材料。

注 — 由于污染物被吸气剂化学吸附，因此吸气剂可能被消耗或再生。

4.29 热修

至少由以下一个要素构成：

- 使用危险的高热工具（例如焊枪）
- 对运行中的装置进行修理
- 在危险区域中进行修理（有必要在作业前后或作业过程中采取特殊预防措施）

注 — 所有的热修都需要仔细、安全监督和具体规程。建议采用检查单或危险作业许可证。

4.30 惰性

非反应性。

注 — 氮和氩属于惰性气体。

4.31 进口导流叶片

位于压缩机进口的装置，与吸入节流阀相比，可更加高效地调节压缩机容量。

4.32 进口喷嘴

位于膨胀机进口的装置，是膨胀过程的一部分。

注 — 可采用移动式进口喷嘴对膨胀机容量进行调节。

4.33 仪表系统

通常由传感器（例如压力、流量和温度变送器）、逻辑解算器或控制系统（例如可编程控制器和分布式控制系统）和执行元件（例如控制阀）组成的用于执行特定功能的系统。

注 — 关于更多信息，参见 IEC 61511《功能安全 — 过程工业部门安全仪表系统 — 第 1 部分：框架、定义、系统、硬件和软件要求》[3]。

4.34 焦耳-汤姆逊（JT）膨胀

通常通过一个阀门将流体从较高的压力绝热膨胀到较低的压力（并不消除功）的过程。

注 — 对于空分装置中的气体应用，这将导致温降。

4.35 迷宫密封

采用一系列迷宫齿来尽量减少工艺流体泄漏的气封。

4.36 上锁

如果不采取刻意的措施，无法对装置进行操作，以此对能量源（压能、电能、热能和化学能）进行有效隔离从而确保安全。

注 — 例如当电力被切断时，如果不移除防护装置（例如执行装置的挂锁）就无法恢复电力。又例如，移除并且安全地储存阀柄，直至可以安全地操作阀门。上锁装置应立即挂牌。

4.37 爆炸下限（LEL）

某种易燃气体在某种氧化剂中的最低浓度，在这个浓度水平上，被引燃的易燃气体将扩散。

注 — 爆炸下限有时被称为“易燃下限”（LFL）。

4.38 材料安全数据表（MSDS）

政府要求材料供应商提供的对材料及其相关危险进行描述的文件。

4.39 净正吸头（NPSH）

流入泵的液体的实际压力与液体的蒸气压力之间的差幅（高度）。

4.40 氮 NF

符合《美国药典和国家处方集》（USP-NF）要求的氮[4]。

注 — 关于补充信息，参见 CGA G-10.1《氮的商品规格》[5]。

4.41 喷嘴

与任何容器相连的管道。

4.42 缺氧气氛/富氮气氛

氧浓度（按体积）低于 19.5%的气氛。

4.43 富氧气氛

氧浓度超过 23.5%的气氛。

4.44 氧 USP

符合《美国药典和国家处方集》（USP-NF）要求的氧[4]。

注 — 关于补充信息，参见 CGA G-4.3《氧的商品规格》信息[6]。

4.45 罐沸腾

参见 4.15。

4.46 池沸腾

参见 4.15。

4.47 沉淀

当超过某个组分的溶解度极限时，从液体或蒸气溶液中形成固体。

4.48 泄压装置（PRD）

避免容器或管道压力高于或低于（真空）设计压力从而避免管道或容器失效的独立装置，包括安全泄压阀和爆破片。

4.49 吹扫

通过其它流体置换来消除污染物。

注 — 对工艺设备进行氮吹扫以防止水分与低温设备接触。采用清洁液氧对再沸器集液池中含有碳氢化合物的液氧进行吹扫。

4.50 往复式

采用活塞的容积式压缩机、膨胀机或泵。

4.51 再生

采用高温和/或低压气体对废吸附剂容器进行再活化。

4.52 安全区域

可安全排气以避免对工作人员或财产造成危害的场所。

注 — 安全区域还包括周围材料与排气相容的场所。

4.53 安全仪表系统（SIS）

用于执行一项或多项功能以防止产生危险并且/或者减轻危险后果的系统。

注 — 安全仪表系统由传感器（例如压力、流量和温度变送器）、逻辑解算器或控制系统（例如可编程控制器和分布式控制系统）和执行元件（例如控制阀）组成。使用术语“安全仪表系统”意味着按照 IEC 61511 对安全系统进行设计、操作和维护[3]。

4.54 安全许可证

强调指出特殊安全考虑因素并且允许在特定地点进行作业的规程文件。

4.55 溶解度

某种组分在不沉淀为固体的情况下在液体或蒸气中保持溶解状态的数量。

4.56 规整填料

布置在蒸馏塔中用于促进上流蒸气与下流液体之间的密切接触的波纹金属板。

4.57 集液池

蒸馏塔或其它容器的底部，可容纳一定的液体存量。

4.58 挂牌

关于设备被停用并且在没有获得经授权人员的批准的情况下不得对设备进行操作的书面通知。

注 一 挂牌设备通常直接装设了一个指明设备被停用的标签。

4.59 爆炸上限（UEL）

某种易燃气体在某种氧化剂中的最高浓度，在这个浓度水平上，被引燃的易燃气体将扩散。

注 一 爆炸上限有时被称为“易燃上限”（UFL）。

5 健康危害

压缩气体行业直接涉及某些健康危害。某些气体产品的性质导致工作人员暴露在极端低温、缺氧（窒息）气氛或富氧（火灾风险升高）气氛中。适当的预防措施、关于这些材料的性质的基本知识以及配备适当的防护转变能够减轻这些危险暴露。关于在空分装置中处理的材料的具体信息，参见生产商提供的材料安全数据表。

5.1 低温液体

低温空分装置的产品涉及的危险包括：

- 皮肤与极低温蒸气、液体或表面接触导致的低温伤害或灼伤。低温灼伤产生的健康影响类似于热灼伤。低温灼伤的严重程度随温度和暴露时间而变。由于可供水分快速冻结，暴露的身体部位或防护不充分的身体部位可能粘在低温表面上，在脱离低温表面时皮肤和肌肉可能被撕破。
- 在低温环境中的冻伤或低体温（全身和脑部低温）风险。当身体部位感到寒冷时，这可能是冻伤的前兆。当体温降低时，低体温的第一个指征是行为异常，然后经常是快速丧失意识。
- 吸入低温气体导致的呼吸问题。短时间暴露通常导致不适，但是长时间吸入可能导致严重疾病（例如肺水肿或肺炎）。
- 在排放点的远距离以外也可能存在危险浓度或/和能见度降低（取决于地形和天气）。由于低温气体的重量超过空气，因此低温气体将下沉、流向低位并且可能形成水蒸气浓雾。

关于补充详细信息，参见 CGA P-12《低温液体的安全处理》[7]。

5.2 气体产品

氮和氩是单纯窒息剂，充分数量的氮和氩可能导致局部气氛中的氧减少并且低于支持生命所需的水平。如果存在可检测出的碳氢化合物污染物，可能导致恶心、昏迷或头晕。在脱离暴露之后，通常可恢复正常的身体和行为功能。富氧气氛将导致易引燃性提高，燃烧速率可能达到正常气氛的许多倍。

5.3 窒息

空气中的正常氧浓度约为 21%（按体积）。在美国，按照《美国联邦法规》第 29 条（29 CFR）第 1910.146 部分[8]的定义，氧浓度低于 19.5%的气体构成危险工作环境。如果惰性气体置换导致特定数量的空气中的氧数量被消耗，这构成对工作人员的潜在危险（参见 AIGA 008/04《惰性气体的危险》[10]）。另请参见 EIGA 关于窒息预防活动的文件[82、83]以及其它文件[9、11、12、13]。

如果空气中的氧含量被降至大约 15%或 16%，可燃材料的燃烧速率将显著提高。普通可燃材料（其中包括常用作取暖或照明燃料的可燃材料）的火焰将被熄灭。这可能是缺氧危险的第一个迹象。在略低于这个浓度的水平上，吸入这种气氛的个人在心智上无法对情况作出判断。困倦、疲劳、疲乏、丧失协调性、判断错误和精神混乱这些症状被欣快状态掩盖，从而导致个人产生错误的安全感和健康感。关于缺氧气氛的其它典型症状，参见表 1 [9]。

如果个人暴露于氧含量不高于 12%的气氛中，将导致在没有前兆的情况下迅速丧失意识，以至个人无法采取自救措施。如果由于环境即刻发生变化或者氧被逐渐消耗从而达到这种条件，将发生上述情况。个人身体条件和活动程度可对各种氧含量水平上的体征和症状产生明显影响。在某些情况下，如果长时间缺氧，即使能够获救，也可能导致脑损伤。

表 1 — 在不同吸氧量水平上产生的影响

海平面的氧百分比浓度 (大气压力 = 760 mmHg)	影响
20.9	正常
19.0	产生某些不良生理影响，但是并不显著。
16.0	脉搏和呼吸速率加快。思维能力和注意力减退。协调性降低。
14.0	在发力时感到异常疲劳。情绪紊乱。协调性不完善。判断力低下。
12.5	判断力和协调性非常低下。可能导致永久心脏损伤的呼吸能力减退。恶心和呕吐。
<10	无法进行各种运动。丧失意识。惊厥。死亡。
注： 1 改编自 ANSI Z88.2 《呼吸保护》[14]。 2 这些是普通健康个人在静止不动时的指征。可能对这些症状以及出现这些症状的氧含量水平产生影响的因素包括个人健康状况（例如吸烟）、身体发力程度和高海拔。	

对于有可能存在低氧含量的区域，应提供良好的通风条件。惰性气体排放口宜管接到建筑物以外或者管接到安全区域。如果有可能存在缺氧气氛，应采取特殊预防措施（例如安装配有警报器的氧分析仪、确保每小时最低换气次数和/或实施特殊进入规程）。应在所有的入口设置警告标志以提醒工作人员注意缺氧气氛的潜在危险。氧分析仪传感器宜位于最有可能存在缺氧气氛的位置，在工作人员的进入点宜安装可视和/或音响警报器。

如果对保持安全呼吸气氛感到不确定，宜采用自给式呼吸装置或经批准的空气管路和空气面具，特别是在工作人员进入封闭区域或容器时。宜通过合格的独立来源提供呼吸用气，装置的仪表空气系统不应用作呼吸用气来源。

在缺氧气氛中或缺氧气氛周围工作的人员应执行相应的规程（其中包括封闭空间进入规程）。

危险：在不实施相应规程的情况下进入存在缺氧气氛的区域将导致重伤甚至死亡。

5.4 氧危险

超过 23.5%的氧浓度将导致火灾危险，但是不会导致窒息危险。虽然氧是不可燃的，但是氧能够促进易燃材料以及通常被视为相对不易燃的某些材料非常快速地燃烧。虽然引燃能量源总是需要与易燃材料和氧相结合，但是控制或消除易燃物是一项预防步骤。润滑油和其它碳氢化合物材料能够与纯氧发生剧烈反应，应避免这些材料与纯氧相结合。

由于在富氧气氛中存在更高的火灾风险，因此工作人员不宜暴露富氧气氛中。当氧浓度超过 23.5%时，服装的易引燃性将显著提高。一旦被引燃，即使是被相对较弱的引燃源（例如火花或香烟）引燃，服装也可能快速着火燃烧。当氧浓度超过 60%时，服装上的绒毛甚至体毛和体油可能暴燃并且快速扩散到整个暴露表面上。

对于有可能存在高氧含量的区域，应提供良好的通风条件。排气口应管接到建筑物以外或者管接到安全区域。如果有可能存在富氧气氛，应采取特殊预防措施（例如安装配有警报器的氧分析仪、确保每小时最低

换气次数和/或实施特殊进入规程)。应在所有的入口设置警告标志以提醒工作人员注意富氧气氛的潜在危险。关于氧危险的其它信息, 参见 AIGA 005/04《氧和富氧气氛的火灾危险》[15]。

5.5 防护服

虽然适当的服装和特殊装备能够减轻火灾危险(在对氧进行处理时)或燃烧风险(在对低温液体或气体进行处理时), 但是预防危险宜为首要目标。

在对被低温液体冷却或可能已被低温液体冷却的任何物体进行处理时或者在参与液体装卸活动时, 宜佩戴保温手套或皮革手套(非鞣制并且不含油的氧用手套)。手套应松紧适度, 以便在液体溅在手套上或手套内时将手套摘除。

在对低温液体进行处理时, 应佩戴面罩或护目镜。

宜穿戴绒毛尽可能少的服装。现有许多阻燃材料(例如用于工作服的 Nomex[®]), 但是这些材料可能在高氧气氛中燃烧。这些材料的一个优点在于, 当重新进入正确空气气氛中时, 大部分这些材料都能够自熄。宜穿戴清洁并且不含油的服装。不宜携带任何引燃物品。鞋类不宜配有可能会发出火花的鞋钉或外露金属护罩。

如果不小心进入或暴露于富氧气氛, 应尽快脱离富氧气氛、避免接触引燃源、至少半小时内不吸烟并且敞开和拍击服装以消散被截留的蒸气。

6 空分装置的一般考虑因素

6.1 现场选择

为了确保空分装置安全, 宜首先对提议的空分装置现场进行安全评估。空分装置通常位于工业区内或工业区附近, 作为其它工业装置或化工装置的附属装置。空分装置的安装应符合适用的行业公认标准以及所有适用的全国法规。

宜对空分装置运行与周围区域的适合性进行评审。宜考虑到冷却塔或低温雾对附近装置或车辆交通造成的潜在危险。宜提供充分的低温液体处置空间。

6.2 空分装置布局的安全因素

不建议在低温气体或液体管道系统中使用阀坑和/或阀沟, 因为在这类设施中非常有可能存在富氧或缺氧气氛。如果气体和液体管道系统被安装在封闭空间中, 建议采取预防措施(例如强制通风和警报系统)。应设置相应的警告标志。

不宜将富氧液体排放管路安装在沟渠中。否则, 经过一段时间之后, 沟渠中可能积聚油、油脂、垃圾或其它碎屑; 如果管路发生泄漏, 可能导致火灾。

宜采取措施以防止溢漏液体进入地面排水管或下水道系统。

6.3 结构材料

用于空分装置的材料在运行过程中暴露于各种温度、压力和纯度条件中。应选用与预期条件(其中包括正常运行、开机、停机和工艺扰动)相容的材料。

为了确保氧系统的安全运行, 宜对系统的所有零件在所有条件下与氧的相容性进行评审[16、17]。系统在设计上应通过以下方式防止氧燃烧:

- 选用适当的材料
- 在设计压力、温度和流量极限内运行
- 保持管路清洁

在对材料进行替换时, 宜首先咨询合格工程人员。如果需要相关信息, 还可联系材料供应商。

6.3.1 金属

虽然普通结构材料（例如碳钢、铝和铜）被广泛用于空分装置部件的制造，但是需要注意这些材料的使用是选择性的，而且这些材料必须与运行条件相容[17]。例如，普通碳钢不被用于低于 -20°F (-29°C) 的温度条件下，因为在这些温度条件下，普通碳钢将失去延性、变脆并且在冲击条件下易失效。可以被安全用于低于 -20°F (-29°C) 的温度条件下的金属包括奥氏体不锈钢、铝、铜、蒙乃尔合金、黄铜、硅铜合金和 9% 镍钢（ASTM A-353 钢）。参见与金属（其中包括不锈钢、铝、铜、蒙乃尔合金和黄铜）的使用有关的信息 [18~25]。

由于成本原因，碳钢通常被用于低于 -20°F (-29°C) 的温度以及环境温度条件下的氧、空气或任何惰性气体（例如氩或氮）互连工艺管道、储存容器和管路[26、27]。在特殊情况下（例如当存在水分时），宜考虑采用不锈钢或某些其它同样适当的金属以防止腐蚀。

6.3.2 非金属

应对非金属材料（例如垫片、阀门填料、保温材料和润滑剂）进行仔细检查，以确定这些材料是否可用于特定用途[28]。在确定使用某种材料是否不会导致氧系统的设计安全完整性降低时，应考虑到与这些材料的使用有关的所有因素（例如温度和压力）。在氧系统中，宜尽可能减少非金属材料的使用，在可能的情况下宜将非金属材料保持在气流的直流以外。

6.4 保温 — 冷箱除外

低温运行的空分装置部件之间的互连工艺管路要求采取保温措施，从而将工艺热泄漏降至最低容许水平，并且防止暴工作人员暴露于极端低温。保温材料的选用取决于管路的温度和用途。

液氧管路或可能与液氧相接触的其它管路宜采用不燃保温材料，以防止在液体泄漏时发生反应。运行温度高于空气液化点（大约 -313°F [-192°C]) 的其它工艺管路可采用符合设计要求的合格保温材料。宜优先采用在空气中不燃的保温材料。输送氧或富氧气体或液体的管路宜采用氧相容粘合剂、密封剂和蒸气障。

运行温度低于空气液化点的工艺管路宜采用与氧相容的材料。如果保温材料在这些温度条件下破裂或劣化，空气将弥散到保温材料中、在管道表面冷凝并且导致保温材料暴露于富氧液体。

宜对高温（超过 140°F [60°C]) 管路采取保温措施或者防止接达高温管路从而保护工作人员。

6.5 清洗

在系统投运前，宜对用于氧系统或与氧系统互连的所有材料进行适当的清洗。应脱除氧化皮、铁锈、粉尘、污物、焊渣、油、油脂和其它有机材料。由于颗粒、油脂、油和其它有机材料可能引燃，因此没有经过适当清洗的氧用管路可能具有危险性。宜对制造和修理规程进行控制，从而尽量减少这些污染物并且简化最终清洗规程。参见 AIGA 012/04《氧用设备清洗》、CGA G-4.1《氧用设备清洗设备》和 ASTM G93《关于用于富氧环境中的材料和设备的清洗方法和清洁度水平的标准规范》[29、30、31]。

宜对处理惰性流体的低温工艺设备和管道进行氧用清洗，以防止外物进入空分装置的其它零件。

6.6 电气要求

应遵守适用规范。在美国，对于 NFPA 70《全国电气规范®》第 500 条定义的电气设备，空分装置不被视为危险区域[32]。在欧洲的情况也是这样，因此容许采用通用型或防风化型电线和电气设备（取决于空分装置位于室内或室外）。

在可能存在高氧浓度的区域中，宜避免使用配有常开或无防护的闭开触点的电气设备。简易的临时措施是确保电气设备远离可能存在高氧浓度的区域，从而消除在这些情况下的潜在危险。

某些空分装置可能涉及需要加以特殊考虑的具体区域或设备（例如采用碳氢化合物或氨制冷剂的制冷系统或者涉及氢的使用和处理的氩纯化装置）。在这些情况下，宜对相应的行业规范中规定的设计因素加以考虑。

6.7 噪声

在对雇员听力造成损害的潜在危险方面，应对压缩机及其传动装置、膨胀涡轮、管道和阀门的高气体流速、泄压阀、排气口或旁路产生的噪声加以考虑。为了对危险进行评估，宜在初始检查之后或者在可能导致噪声排放量发生变化的改动过程中进行噪声检测[33~37]。噪声抑制和工作人员听力防护装备的使用应遵守全国指南（在美国，应遵守《美国联邦法规》第 29 条第 1910.95 部分[8]）。

新投运的设备以及不断变化的运行条件要求对噪声水平进行持续监测。有必要定期对工作人员进行听力检查（取决于暴露时间和噪声水平）。

7 进气质量

空气质量会对空分装置现场的选择产生影响，宜对空气质量进行仔细评估。空分装置通常位于工业区中，因此空气中可能存在工业装置和/或化工装置运行过程中释放出的某些污染物。大气空气中的痕量污染物（特别是碳氢化合物）将对空分装置的安全运行产生直接影响。应确定这些污染物及其在大气空气中的浓度。短期空气质量分析可能并未反映出长期空气污染物浓度。不断变化的现场条件可能对空气质量产生影响，宜定期或者在周围工业现场发生变动时对现场条件进行评估。

7.1 污染物

如表 2 所示，根据痕量污染物在空分装置中可能导致的问题，将痕量污染物分为三个大类（堵塞性污染物、反应性污染物或腐蚀性污染物）。关于如何在空分装置过程中对表 2 中列出的每一种污染物进行处理的详细信息，参见 9.1。

表 2 — 空气中的堵塞性、反应性和腐蚀性污染物

堵塞性污染物		反应性污染物		腐蚀性污染物	
化学名称	符号	化学名称	符号	化学名称	符号
水	H ₂ O	甲烷	CH ₄	二氧化硫	SO ₂
二氧化碳	CO ₂	乙炔	C ₂ H ₂	三氧化硫	SO ₃
一氧化二氮	N ₂ O	乙烯	C ₂ H ₄	硫化氢	H ₂ S
		乙烷	C ₂ H ₆	氯	Cl ₂
		丙烯	C ₃ H ₆	盐酸	HCl
		丙烷	C ₃ H ₈	氨	NH ₃
		其它碳氢化合物		其它硫化物	
		氮氧化物	NO _x	其它氯化物	
		臭氧	O ₃		

注 — 上表是为 AIGA 035/06 《空分装置再沸器/冷凝器的安全运行》编制的[38]。

堵塞性污染物在空分装置过程中浓缩和/或沉淀为固体。虽然堵塞是一个运行问题，但是堵塞还可能导致干沸腾或池沸腾，这将导致反应性污染物浓缩从而形成易燃混合物。最重要的堵塞性污染物包括水、二氧化碳和一氧化二氮。

反应性污染物可能在空分装置中浓缩并且与氧或富集空气形成易燃混合物。空气中最重要反应性污染物包括甲烷、乙烷、乙烯、乙炔、丙烷和丙烯。通常对其它高沸点碳氢化合物进行整体集中处理。烟雾和雾霾产生的碳氢化合物悬浮微粒是一种特殊的反应性污染物，我们将在第 7.5 条中对此进行探讨。虽然氮氧化物和臭氧也具有反应性，但是如果对空分装置加以正确运行，它们不会产生重要问题。

前面探讨的污染物在氧中浓缩。氢和一氧化碳在氮和/或废氮产品中浓缩，通常不构成安全危险。

腐蚀性污染物（酸性气体和氨）可能与设备和管道发生反应，从而导致运行问题并且缩短空分装置的使用寿命。由于本文件主要涉及安全问题，因此将不对这些污染物进行深入探讨。

表 3 提供了一个典型的空气质量设计基础；如果缺乏其它数据，可将这个设计基础用作空分装置进气中的最高污染物浓度。如果超出这些浓度，要求对空分装置部件设计进行改动。宜向空分装置供应商提供现场的所有实际数据。

表 3 — 典型的空气质量设计基础

污染物	设计空气质量 (ppm/v)
乙炔	0.3
二氧化碳	400
C ₄ +碳氢化合物	1
乙烷	0.1
乙烯	0.1
甲烷	5
氮氧化物（一氧化氮和二氧化氮）	0.1
一氧化二氮	0.35
丙烷	0.05
丙稀	0.2

7.2 在氧中浓缩的反应性污染物

碳氢化合物和大部分其它反应性污染物的沸腾温度都高于氧的沸腾温度。这些污染物在塔和再沸器集液池中的富氧液体中浓缩。最重要的危险是碳氢化合物在液氧中浓缩。如果这些污染物浓缩达到爆炸下限，可能与氧发生反应。碳氢化合物在气态氧中的爆炸下限是 5~10%（甲烷当量），在液氧中的爆炸下限略高 [39]。

下面列出了每一种碳氢化合物的具体危险：

- **甲烷**的挥发度略低于氧并且完全溶于液氧。在大部分空分装置过程中，甲烷难以浓缩到不安全的浓度。
- **乙烷**在液氧中的挥发度和溶解度低于甲烷，乙烷浓缩到不安全的浓度或者形成次液相的可能性并不显著，只要对再沸器集液池保持充分的液体吹扫。
- **乙烯**具有特殊危险，因为乙烯在某些空分装置运行条件下（主要是在将液氧沸腾到低于 44 psia [3 bara]的压力水平上时）沉淀为固体（参见 AIGA 057/08）[2]。如果附近存在乙烯源，宜对空分装置的设计加以考虑，通过过程变更、增设分析仪表或增加再沸器集液池的液体吹扫，以确保将乙烯保持在安全极限内。
- **乙炔**是一种非常危险的反应性污染物。由于乙炔在液氧中的溶解度较低，如果进入冷箱，乙炔将在液氧中浓缩并且在 4~6 ppm 的低浓度水平上沉淀为固体（取决于液氧压力）。固体相对比较不稳定，只需很少的能量即可引燃。配有预纯化装置的空分装置可脱除空气中的所有乙炔，因此不会有乙炔进入冷箱。配有切换式换热器的空分装置并不脱除进气中的乙炔，应在冷箱中对乙炔进行处理（通常采用低温吸附器进行处理）。
- **丙烷**是一种相对比较危险的碳氢化合物，这是因为丙烷的挥发度低于氧而且丙烷能够形成次液相（如果丙烷浓度达到足够高的水平）。在低压条件下，在丙烷在液氧中的浓度达到爆炸下限之前将形成次液相。如果被引燃，相对较纯丙烷的次液相可能与富氧相发生反应。切换式换热器并不脱除丙烷，预纯化装置仅部分脱除丙烷，应采用液体吹扫来脱除残留的丙烷。
- **丙稀**类似于丙烷，也会在液氧中形成次液相（如果丙稀浓度达到足够高的水平）。次液相具有反应性。但是可采用预纯化装置或低温吸附，相对比较方便地脱除丙烷。

- **其它碳氢化合物**是高沸点碳氢化合物 (C_4+)。随着分子量升高, 这些碳氢化合物在液氧中的溶解度降低。可采用痕量污染物脱除系统, 相对较方便地脱除这些碳氢化合物, 只要对这些系统进行正确的操作。
- **氮氧化物**可能与氧发生反应, 可采用预纯化装置或低温吸附脱除氮氧化物。大气空气中的氮氧化物主要包括一氧化氮和二氧化氮, 这些氮氧化物是不完全燃烧的副产物。如果进入冷箱, 一氧化氮和二氧化氮将形成分子量更高的氮氧化物 (三氧化氮、四氧化二氮和五氧化二氮), 这些氮氧化物可能沉淀并且导致设备被堵塞。在低温条件下, 氮氧化物可能与切换式换热器中的所有不饱和和二烯类发生反应从而形成爆炸性胶质[40、41、42]。

注 — 氮氧化物 (一氧化氮和二氧化氮) 是不同于一氧化二氮的化合物。

- **臭氧**不稳定并且分解成释氧热量, 这是一种潜在危险。采用预纯化装置或低温吸附脱除臭氧。

7.3 在氮中浓缩的反应性污染物

氢和一氧化碳的沸点低于氧, 因此在氮中浓缩。氢和一氧化碳的浓度系数通常仅为 2~10 倍, 因此它们保持在低浓度水平上。在生产超高纯度氮时, 氢和一氧化碳可能导致纯度问题。在生产氮 NF 时, 一氧化碳也可能导致问题。应采用其它方式 (例如前端催化氧化或氮纯化) 脱除氢和一氧化碳。

7.4 堵塞性组分

下面对具体的堵塞性组分的特性进行了描述:

- **水**非常不易溶于低温流体, 应在达到蒸馏塔之前将水完全脱除。在切换式换热器或预纯化装置中将水完全脱除。
- **二氧化碳**相对比较不易溶于液氧, 采用采用预纯化装置、切换式换热器或低温吸附进行脱除。再沸器液体吹扫流量有助于保持再沸器集液池中的二氧化碳浓度低于安全极限 (参见 AIGA 035/06) [38]。
- **一氧化二氮**相对比较不易溶于液氧, 但是溶解度高于二氧化碳。因此, 大部分应用都无需脱除一氧化二氮。采用标准设计的预纯化装置部分脱除一氧化二氮, 特殊设计的预纯化装置可提高脱除效率。还可采用低温吸附脱除一氧化二氮。再沸器液体吹扫流量有助于保持再沸器集液池中的一氧化二氮浓度低于安全极限[38、43]。

注 — 氮氧化物 (一氧化氮和二氧化氮) 是不同于一氧化二氮的化合物。

如果同时存在一氧化二氮和二氧化碳, 它们将形成固溶体, 因此一氧化二氮和二氧化碳在液态冷冻剂中的混合物的溶解度极限低于这些混合物的单个组分的溶解度极限 (参见 12.10)。

7.5 燃烧产生的雾霾和烟雾

森林火灾、农田燃烧或其它生物燃料燃烧产生的雾霾和烟雾可能对空分装置造成重大危险。对某个特定区域进行的分析表明, 森林火灾排放物中包括正构烷烃、芳烃和某些含氧化合物的蒸气组分以及直径为 $0.1\sim 2\ \mu$ 的微滴构成的 $C_3\sim C_{21}$ 碳氢化合物和悬浮微粒 (主要是 $C_8\sim C_{36}$ 碳氢化合物) [44]。

预纯化装置仅吸附蒸气化合物; 但是, 悬浮微粒的尺寸通常太小, 进气或预纯化装置粉尘过滤器无法阻滞悬浮微粒, 这些过滤器捕集的通常是直径为 $2\sim 5\ \mu$ 和更大直径的颗粒。悬浮微粒在再沸器集液池中积聚; 经过一段时间之后, 可能产生重大危险。

在雾霾/烟雾环境中多天或多周运行空分装置可能产生重大危险。在大部分情况下, 发生这样的事件的可能性较低, 无需在设计中采取额外的预防措施。但是, 如果有可能存在这些条件, 可能要求采用高效过滤以防止悬浮微粒进入冷箱。可将过滤器安装在主空气压缩机吸入口或者直接安装在空分装置之前。

如果空分装置在雾霾/烟雾环境中运行并且在设计上无法对大量悬浮微粒进行处理, 宜尽可能提高液体吹扫速率。宜非常仔细地空分装置进行监测, 以确定所有的潜在积聚迹象 (例如压降升高、筛滤器堵塞、再沸器温差升高、再沸器集液池碳氢化合物浓度升高)。宜考虑将空分装置停机或/或解冻 (取决于雾霾条件的持续时间和严重程度)。

注 — 根据 Meilinger 的报告，解冻无法有效地脱除悬浮微粒[45]。

7.6 污染物来源

气载污染物包括许多来源。排气口、烟道、火炬、沼泽区、工艺泄漏、天然气加热器排放物、内燃机排气、机械润滑系统排放口、填埋、森林火灾或农田燃烧是最常见的来源。应对相邻现场的石化过程以及空分装置现场的其它过程进行仔细检查以确定潜在污染源。

不应在运行中的主空气压缩机的空气进口附近储存或使用乙炔气瓶。

宜在空气压缩机进口设置标记，禁止在该区域停放车辆和运行内燃机或焊机。此前曾经发生过铁路柴油机车排气导致主冷凝器液体中存在乙炔的事故。

7.7 确定污染物

可对环境空气进行分析以确定污染物。如果缺乏分析设备，可对烟道、排气口或火炬涉及的反应流或工艺流进行评审，以确定给定污染源在大气污染中产生的作用。例如，在处于扰动条件下的石化装置中，可对化学排放物的种类和数量进行计算或精确估算，同样也可对泄压装置或排气口的出口流量进行计算或精确估算。表 3 提供了一个典型工业环境的空气质量设计基础；如果缺乏其它信息，可采用这个设计基础。

7.8 空气进口的位置

空气压缩机进口与气载污染物的所有潜在来源之间应保持的距离取决于空分装置的杂质脱除能力（以避免污染物在空分装置中达到危险浓度）以及可对污染物稀释和消散产生影响的风速和其它天气条件。

可提高空气进口的高度，以利用可对污染物稀释和消散产生影响的风速和其它天气条件。在极端情况下，可考虑设置两个空气进口，以确保当一个进口的空气被污染时，另一个进口处于迎风面或侧风面从而避免被污染。

7.9 进气监测

如果大气空气污染的可能性较高，有必要对进气进行分析。可采用不同的分析方法（例如定期测定总碳氢化合物浓度、进行连续分析以确定每一种碳氢化合物及其浓度）。应针对每一个特定的空分装置来确定分析方法的种类和频率，同时考虑到空分装置的工艺设计和运行环境。

在进行连续分析的现场，宜对污染物数据进行记录。宜定期对记录进行评审以确定所有的趋势。宜尽快对污染水平的显著升高进行调查和处理。

可将监测进气的分析仪用于监测再沸器集液池液体或产品液氧，从而定期对液体中的污染物浓度进行分析。

如果空分装置现场存在这种危险而且采用无人值班或自动化运行方式，宜在空分装置中包括一个控制系统功能，从而在污染水平较高时将空分装置停机。

8 压缩机

这个部分介绍了用于空分装置及其辅助系统的各种压缩机以及特殊应用考虑因素。动力式压缩机或涡轮压缩机（其中包括轴流式压缩机和离心式压缩机）和容积式压缩机（其中包括包括往复式压缩机、膜片式压缩机、回转式压缩机和螺杆式压缩机）是两种主要的压缩机。

8.1 轴流式压缩机

轴流式压缩机通常被用于大型空分装置的主空气压缩机。如果采用轴流式压缩机，宜对压缩机的动态性能特征（特别是对喘振条件）加以考虑。要求对整个压缩机齿轮传动系统进行严格的扭转和横向临界值评审。通常采用一排或多排可调静叶对压缩机容量进行控制。宜对静叶片执行机构的设计加以考虑，重点是防止生锈和污物沉积（这将导致运行过程中的粘着）。还宜对水分可能导致生锈和不平衡的前三排静叶片加以特殊考虑。宜根据在任何运行条件下（其中包括喘振）可能达到的最高压力进行压缩机外壳设计。关于压缩

机安全标准，参见 ASME B19.1《空气压缩机系统安全标准》和 ASME B19.3《过程工业压缩机安全标准》[46、47]。

8.2 离心式压缩机

离心式压缩机被广泛用于主空气压缩机以及氧产品、氮产品和氮再循环。和轴流式压缩机一样，宜对相对于空分装置预期运行要求的性能特征加以仔细考虑。宜对每一个设施进行扭转和横向临界值评审（将齿轮和传动装置包括在内）。宜根据在任何运行条件下（其中包括喘振）可能达到的最高压力进行压缩机外壳设计。通常至少在压缩机首级安装可调进口导流叶片，以此进行容量控制。

8.3 动力式压缩机的其它考虑因素

8.3.1 抗喘振控制

所有的轴流式压缩机和离心式压缩机都应配有一个自动抗喘振控制系统（设有一个适当的旁通阀或吹除阀）。抗喘振系统的响应时间宜与工艺系统的动态特性相一致。

8.3.2 止回阀

应在排出管路中安装一个止回阀（紧接在所有的动力式压缩机的排气口或再循环旁路之后），以防止喘振和反转。在湿气体应用中，运动部件宜采用防锈材料制成以确保止回阀正确运行。

8.3.3 监测装置

应执行制造商关于对运行参数、警报和停机进行监测的建议。

所有的轴流式压缩机或离心式压缩机都应安装感应式振动探头和监测器，对轴运动进行检测并且启动警报和停机系统。宜定期对这些传感器提供的数据进行分析。如果读数异常或者压缩机在严重振动时停机，可由专家对数据进行仔细评审，从而确定导致高振动读数的原因。在导致过高振动读数的原因得以消除之前，不应将压缩机重新开机。

在冬季或异常运行条件下，电机驱动的动力式压缩机可能过载。可考虑安装电流极限控制器，从而对压缩机进行容量超驰控制。

8.3.4 级密封

所有的动力式压缩机或涡轮压缩机都采用轴级密封，以尽量避免或杜绝加压工艺气体泄漏到大气中，并且防止工艺气体受到油污染。级密封还被用于控制共用轴上的压缩机级间的工艺气体泄漏。最常用的轴级密封是迷宫密封系统（容许一定的泄漏）。海可采用其它类型的密封（取决于与压缩气体有关的工艺要求和/或危险），例如：

- 单缓冲或多缓冲迷宫密封允许在迷宫密封之间注入缓冲气体（根据工艺气体的最大容积），通常用于氧和氮压缩机。氮是常用的缓冲气体。
- 浮动碳环密封被用于工艺气体泄漏最小化，通常被用于氮和某些空气压缩机。浮动碳环密封被广泛应用于压缩气体压力较高和泄漏成本较高的情况下。
- 动态干气密封被用于运行过程中的工艺气体泄漏最小化以及停机过程中的有效密封。动态干气密封通常被用于工艺气体泄漏可能导致危险或泄漏成本较高的情况下。

迷宫密封还被用于防止润滑油从压缩机轴承座迁移到大气或工艺气体中。压缩机润滑油箱通常保持一个低真空度，以确保轴承轴封存在内流空气缓冲密封。

8.4 往复式压缩机

往复式压缩机被广泛用于氧、氮、粗氩产品和高压空气压缩。往复式压缩机包括无润滑气缸压缩机和润滑气缸压缩机两种。影响往复式压缩机选型因素包括：

- 气体成分
- 压缩比
- 气体对油污染的容限
- 维修要求

8.4.1 无润滑气缸

某些材料可用于无润滑活塞环、导向环和活塞杆填料。聚四氟乙烯（特氟隆®）和填充特氟隆是最常用的材料。宜特别注意无润滑活塞杆和气缸壁的表面光洁度（不仅在试运行，而且在设备的使用寿命期间内）。无润滑压缩机阀门可采用特氟隆或等同材料制成的耐磨按钮或导套。

8.4.2 油润滑气缸

压缩机制造商提出了气缸润滑剂规格建议（取决于预期温度、气缸尺寸、活塞速度和压缩气体的特性）。不同的润滑剂被用于气缸和走行部（曲轴箱）润滑。气缸和曲轴箱润滑剂不宜互换或混合。如果矿物油被用于曲轴箱，宜定期对矿物油进行试验，以确定合成油是否从气缸中沿着活塞杆迁移并且进入曲轴箱。如果合成油的浓度超过制造商的建议水平，应更换曲轴箱油。

如果矿物油被用于空气压缩机，应定期对压缩机下游设备和管道中的积碳进行检查。宜在开机后不久对阀套和管道进行检查，以确定进给速率是否正确。进给速率过高将导致更多的积碳并且可能导致液击。

如果将现有的压缩机油从矿物油改为合成油，宜向压缩机制造商和润滑剂制造商咨询。应对气缸、润滑器、中间冷却器和互连管道的整个内部进行彻底清洗；在某些情况下，还宜清除现有的内部涂漆。宜采用玻璃观察窗来替换润滑器的塑料观察窗。应使用特氟隆或填充特氟隆来替换所有的橡胶和氯丁橡胶垫片。压缩机制造商宜提供双向有效的曲轴箱和活塞杆刮油环，以避免气缸合成润滑剂进入仍然使用矿物油的曲轴箱中。

宜将气缸润滑速率保持在润滑整个气缸壁所需的最低水平上。润滑速率较高将导致阀门上和通道中的过量碳沉积。在阀室或互连管道中不宜形成油池。润滑器向每一个气缸每分钟提供 1 滴润滑油通常足以每分钟润滑 1000 平方英尺（92 平方米）的气缸表面（取决于油和润滑器的种类）。虽然压缩机制造商提出了每一个气缸在开机时的进给速率建议，但是宜参照后续检查结果进行进一步的调整。

从每一级中间冷却器下游的分油器和集油器以及末级后冷却器下游的分油器开始，对往复式压缩机进行脱油。被蒸发到气流中的许多油在油冷却器中冷凝成油雾，在分油器中形成油滴，然后被排放。某些油蒸气残留在气流中，要求采用其它方法进行脱除。宜定期放空集油器以防止油积聚，否则这可能成为压缩机火灾的燃料源。应按照国家环境法规对排油进行处理。

对于油润滑压缩机，要求安装下游设备以脱除工艺气流中的油。这些下游设备通常依次包括机械分离器、过滤器、聚结器和/或吸附床。应按照国家建议对这些系统进行维护以确保完全脱油，特别是在压缩机是主空气压缩机而且油夹带将导致冷箱结垢的情况下。

8.4.3 水润滑气缸

宜按照制造商提供的说明书，对皂水或水润滑压缩机气缸进行操作。不宜采用洗涤剂皂。宜考虑采用蒸馏水或脱盐水以避免重质皂沉积在阀门上。

8.4.4 卤代油润滑气缸

宜按照制造商提供的说明书，对卤代油润滑压缩机气缸进行操作。卤代润滑剂可安全用于氧压缩机系统。

8.4.5 间隔片

单室开放式间隔片可用于空气或惰性气体压缩机。无润滑氧压缩机应采用双室间隔片，并且应在压缩机曲轴箱中保持低度真空。适当的间隔片设计宜容纳一个全行程长度以及活塞杆抛油环所需的空

用曲轴箱油润滑的活塞杆的任何部分接触到与工艺气体相接触的部件。在高纯度气体压缩机中，可对气缸端间隔片加压以防止防止空气对工艺气体造成污染。

8.4.6 迷宫密封压缩机

立式迷宫密封压缩机被用于氧和惰性气体压缩，密封取决于紧密配合的迷宫密封有槽活塞。碳迷宫密封环被用于活塞杆填料箱中。

8.4.7 容量控制

通常采用隙囊、起阀器、卸阀器或自动再循环阀，对往复式压缩机进行容量控制。宜仔细选用隙囊从而对气缸一端的容量降低进行限制（不超过 50%），以防止过量气体再压缩以及由此导致的过热。多级机组要求各级容量降低匹配，以防止压缩比不平衡导致高排出温度。

8.4.8 脉动瓶

对于所有的润滑压缩机，应定期对脉动瓶进行积碳检查并且在必要时进行清洗。

8.4.9 氮压缩机的特殊考虑因素

在润滑往复式氮压缩机的运行过程中，可能有大量的未氧化含碳材料发生积聚。当气体中的氧含量显著超过正常水平时，这些系统中将发生爆炸。宜对氮系统进行监测，从而对氧浓度的显著升高进行检测。在将长时间用于氮或任何其它惰性气体压缩的润滑往复式压缩机用于空气压缩之前，应进行检查并且清除磨损颗粒或润滑剂沉积。

8.4.10 监测装置

应按照制造商的建议，对指示器、远程警报或停机装置的位置加以考虑（取决于压缩机的尺寸和用途）。

所有的往复式压缩机都应安装一个地震振动开关。对于大型机组，宜考虑每两个压缩行程至少安装一个开关。

8.5 膜片式压缩机

如果要求高压和无污染物压缩，通常采用膜片式压缩机。走行部、冷却和监测要求与往复式压缩机类似。宜考虑安装膜片泄漏检测系统。

如果膜片式压缩机被用于氧压缩，膜片下的液压流体宜采用可安全用于氧压缩的皂水溶液或卤代流体。由于膜片可能发生疲劳破裂，因此液压流体可能接触到氧气，为此建议安装流体泄漏检测装置。

8.6 回转容积式压缩机

回转容积式压缩机通常被用于低压空气和惰性气体压缩。回转容积式压缩机宜配有密封，以避免工艺气体受到油污染。

8.7 制冷剂气体压缩机

离心式和容积式压缩机被用于制冷剂压缩。由于油可能与制冷剂混合，因此宜特别注意分油装置的运行。应保持卸阀器和/或高温气体旁路的正确运行，以防止液态制冷剂在低载荷条件下进入压缩机从而导致设备受到严重损坏。在将压缩机改用于另一种制冷剂压缩时，应执行制造商的建议。

8.8 螺杆式压缩机

螺杆式压缩机可用于空气、惰性气体或制冷剂压缩，螺杆式压缩机可以是油润滑压缩机或无润滑压缩机。对于油润滑压缩机，要求安装下游设备以脱除工艺气流中的油。这些下游设备通常依次包括机械分离器、过滤器、聚结器和/或吸附床。应按照制造商建议，对这些系统进行维护以确保完全脱油，特别是在螺杆式压缩机是主空气压缩机而且油夹带将导致冷箱结垢的情况下。

8.9 润滑系统

宜根据相关设备的个别要求进行润滑系统的设计。润滑系统通常包括油油箱、冷却器、过滤器、泵和辅助控制设备。

8.9.1 泵

润滑系统至少宜配有一个主油泵和一个备用油源。主泵可采用轴驱动泵、电机驱动泵、蒸汽驱动泵或气动驱动泵。备用源可采用电机驱动泵、蒸汽驱动泵、气动驱动泵或加压油储油器系统。如果采用两个泵，两个泵不宜共用一个电源。宜在每一个泵的进口安装一个粗滤器并且在排出口安装一个止回阀。如果采用储油器油箱系统，在主泵失效的情况下，这个系统宜自动启动从而在惰走过程中向压缩机轴承供油。

宜在压缩机计划内维修过程中对储油器压力进行检查。

宜采取措施以确保在主润滑油泵失效过程中对动力式压缩机进行充分润滑。这些方案包括：

- 主油泵反转防护
- 在惰走过程中提供充分油量的囊式储油器
- 在惰走过程中提供充分油量的高架油槽

8.9.2 过滤器

在油过滤过程中，宜脱除大于 $10\ \mu$ 的颗粒。在达到制造商规定的最高容许压差时，宜更换过滤器。可采用双过滤器。宜在吸入口和排出口安装连续流动输送阀，从而对这些过滤器进行并联管接。宜采取措施以确保可在正常运行过程中更换过滤元件。宜在每一个过滤器外壳中安装排放阀和充装阀，以确保可在受控条件下将油添加到刚更换的过滤器中，并且宜安装泄油阀以便拆除过滤器。

8.9.3 冷却器

宜按照 TEMA、ASME 或其它行业规范或全国规范进行换热器设计[48、49]。润滑油压宜高于冷却介质压力，以防止水在运行过程中泄漏到油中。

8.9.4 油箱

由于在停机时油排回到油箱中，因此油箱的容积宜足以容纳润滑系统中的所有的油。针对高架油槽或储油器在紧急惰走情况下被投运，油箱应有充分的额外容积。应将这个容器密封以防止污物和水分进入油中。

8.9.5 控制和仪表

对于大型压缩机，宜在润滑油压系统中安装双润滑油压传感器。这个仪表宜将辅助油泵开机、将压缩机停机并且提供容许开机信号。

宜将用于检测以下条件的仪表包括在内：

- 低油压（警报和停机）
- 高油温（警报）
- 润滑油池低油位（警报和润滑油加热器停机）
- 油过滤器高压差（警报）
- 低油温（仅容许开机）
- 备用泵运行（警报）

宜在每一个容积式泵的下游安装一个泄压阀，并且安装一个压力调节阀对系统压力进行控制。宜将调节阀的压力传感器设置在设备供油管路中。

油冷却器宜安装一个油温控制阀以保持所需的供油温度。

8.9.6 走行部、齿轮箱和曲轴箱润滑剂

这个部分描述了用于所有类型的压缩机的走行部、齿轮箱和曲轴箱的润滑剂。关于往复式压缩机气缸润滑剂，参见第 8.4.2 条。

通常宜按照制造商的建议采用优质润滑油。这些润滑油可以是矿物油或合成混合油。

宜定期进行润滑油试验。至少宜进行以下试验：

- 光谱化学分析 — 化学含量
- 物理性质分析 — 颗粒计数、重量百分比和体积
- 粘度
- 中和值试验 — 酸含量
- 水含量

8.10 冷却器和分离器

宜按照 TEMA、ASME 或其它行业规范或全国规范进行冷却器设计[48、49]。宜对气氛中的化学杂质加以特殊考虑（这些杂质可能导致空气压缩机中间冷却器和后冷却器中的酸性条件从而导致冷却器管子受到应力腐蚀。必需确保经过处理的清洁冷却水的充分供应。

8.11 吸入口过滤器或筛滤器

每一个压缩机都应配有一个吸入口过滤器或筛滤器以防止外来颗粒进入压缩机。过滤器或筛滤器应符合制造商的建议。

8.11.1 空气进口过滤器

应要求两级过滤。在严重污秽环境中，应考虑额外过滤。在必要时应安装昆虫筛网和防雨罩。

建议在大型空分装置上安装一个压差警报器。宜对大型过滤器外壳提供超量压差防护（超量压差可能导致过滤器堵塞从而导致崩裂）。

8.11.2 其它吸入口筛滤器

筛目尺寸宜符合压缩机制造商的建议。筛滤器在设计上宜能够承受系统中这个部位的最高运行压力。可在这个过滤器中安装一个压差计以确定是否需要清洗。

8.11.3 往复式压缩机的过滤器考虑因素

往复式压缩机的吸入口过滤器的选型和设计应考虑到脉动气流产生的影响。

8.12 压缩的特殊考虑因素

氧压缩和处理涉及特殊危险，需要加以特殊考虑。应执行关于材料和运行条件的特殊要求，以确保氧压缩机的安全运行。特别是每一级的排出温度都应保持在制造商规定的水平上或低于这个水平。关于详细信息，参见 CGA G-4.1、AIGA 021/05（CGA G-4.4）《氧管路系统》、CGA G-4.6《氧压缩机安装和运行指南》、EIGA 文件 27/01《离心式氧压缩机》和 AIGA 048/08《往复式氧压缩机》[29、50、51、52、53]。

宜在每一个氧压缩机的进口管和排出管中安装隔离阀。为了尽可能确保安全，宜采用手动和自动控制对隔离阀进行远程操作。宜在隔离阀与压缩机出口法兰之间安装一个排气阀。

对于无润滑往复式氧压缩机，可采用水冷式活塞杆填料。隙囊、起阀器和卸阀器不应用于往复式氧压缩机。

8.13 操作和维修规程

应采用书面规程对每一个压缩机进行开机、操作和停机。应定期对关键运行参数进行监测。应对异常条件和趋势进行调查和解决。特别是宜在低吸入压力时将产品压缩机停机以防止低温设备产品污染和/或抽真空。

宜对每一个压缩机制订一项预防性维修计划。最初宜根据供应商的建议来确定维修频率，并且最终根据历史数据来确定维修频率。

9 空气污染物脱除

9.1 脱除方法

可采用各种方法来脱除痕量组分[54]:

- **预纯化装置**由两个或两个以上吸附剂容器组成。使用在线容器脱除空气中的污染物，同时对离线容器进行再生。可采用一层或多层吸附剂脱除特定组分。典型的吸附剂包括氧化铝（用于脱水）和 13X 分子筛（用于脱除水、二氧化碳和碳氢化合物）。预纯化装置可脱除空气中的所有的水、超过 99.9% 的二氧化碳以及许多碳氢化合物。某些轻质碳氢化合物没有被脱除，必须在冷箱中结合采用液体吹扫和低温吸附器，对这些轻质碳氢化合物进行处理。
- **切换式换热器**由一个或多个铝钎焊换热器组成。空气连同空气含有的所有污染物被导入铝钎焊换热器。在切换式换热器中，水、超过 99% 的二氧化碳以及高沸点碳氢化合物被冻析和脱除。经过一段时间（2~15 分钟）之后，空气通道被减压，工艺废气被导入同一个通道（与空气流向相反）。杂质被低压废气流脱除而且通道被清洁。定期对两组交替通道进行转换，从而保持恒定流量的纯化空气进入蒸馏塔。在切换式换热器中，某些污染物没有被脱除，主要是痕量二氧化碳和低沸点碳氢化合物（其中包括乙炔）。低温吸附器和液体吹扫可防止这些化合物在下游设备中达到不安全的浓度。
- **再生器**类似于切换式换热器，但是再生器并不采用铝钎焊换热器，而是采用石英岩卵石容器，这些容器起到热沉的作用。当空气被卵石中储存的冷量冷却时，污染物被冻结在卵石上并且从空气流中被脱除。经过一段时间（2~15 分钟）之后，容器被转换，废气脱除被冻结的污染物并且将卵石冷却到运行温度。定期对两组交替再生器进行转换，从而保持恒定的纯化空气流量进入蒸馏塔。有时将含有产品氧或氮的管子通过卵石床，从而将气体加温到环境温度。此外，一部分空气可绕过再生器并且被高压干燥器、切换式换热器和/或碱洗塔净化。在再生器中，某些污染物没有被脱除，主要是痕量和低沸点碳氢化合物（其中包括乙炔）。低温吸附器和液体吹扫可防止这些化合物在下游设备中达到不安全的浓度。
- **碱洗塔**通常被用于老式高压空分装置。从空气压缩机排出的中压空气首先流经碱洗塔；在碱洗塔中，二氧化碳与循环氢氧化钠水溶液在吸收塔中发生化学反应，从而脱除所有的二氧化碳。在主空气压缩机中，将这些空气进一步压缩到高压。所有的油和高沸点碳氢化合物在一个油吸附器中被脱除，空气被导入氧化铝干燥器，对水进行脱除。空气流然后进入主换热器，剩余的碳氢化合物在低温吸附器和液态产品中被脱除。
- **催化氧化器**位于空气压缩机级排除口，用于氧化污染物（例如碳氢化合物、氢和一氧化碳）。乙炔所需温度约为 305~315 °F（152~157 °C）。其它污染物所需温度可能高达 800°F（427°C）。宜安装分析仪以核实催化氧化器的性能。
- **直接接触后冷却器（DCAC）**被用于主空气压缩机下游的某些设施。直接接触后冷却器的主要用途是在高温空气进入预纯化装置或切换式换热器之前对其进行冷却。直接接触后冷却器有助于清除空气中的粉尘和水溶性污染物（例如二氧化硫、硫化氢和氨）。

注 一 如果需要清除空气中的粉尘和水溶性污染物，需要进行适当的水处理。

由于大量的液态水与空气直接接触，因此液体分离是一个关键步骤。水夹带对下游设备（特别是预纯化装置）施加大量负载。此外，应正确地操作和维护液位控制器。如果液位控制器失效而且没有对直接接触后冷却器脱水，直接接触后冷却塔将迅速充水并且大量的水被夹带到下游设备中。这将导致下游设备受到严重

损坏。如果脱水量过多，直接接触后冷却器底部液封将失效，高压空气将进入接入冷却塔的冷却水回水管路。这将导致冷却塔受到严重损坏，除非冷却水回水管被接入安全排放地点。

在切换式换热器系统中，在通道对空气和氮流量进行转换的短时间内，空气流量较高。应在直接接触后冷却器和脱水系统的设计中考虑到这一点。

在许多空分装置中，在直接接触后冷却器中添加一个冷却段；在这个冷却段中，采用冷冻水对空气进行进一步冷却。可在机械冷冻器或蒸发冷却器中制造这些冷冻水；在机械冷冻器或蒸发冷却器中，一部分富氮废气直接与水接触。一小部分水蒸发从而对残留水进行冷却。冷却可能涉及很大的范围，因此在冬季运行过程中，应注意防止水冻结。

注意：塔内气体缺氧，可能导致窒息。

还应考虑到废气在开机或工艺扰动过程中富含氧的可能性。

9.2 污染物脱除阶段

表 4 和表 5 列出了污染物脱除阶段和其它痕量污染物消除方法。表 4 列出了与每一种痕量污染物和每一种过程有关的有效的脱除方法。

注 — 没有任何一个过程包括所有这些阶段。

第 1 阶段 — 吸附在空气预处理前端吸附器中的分子筛和氧化铝上。

第 2 阶段 — 在切换式换热器中从空气中沉积并且再蒸发到低压废气流中。

第 3 阶段 — 从主换热器排出并且进入蒸馏塔的空气中吸附在硅胶上。

第 4 阶段 — 在液相吸附器中，从高压塔集液池排出的粗液氧中吸附在硅胶上。

第 5 阶段 — 在防护吸附器中，从低压塔集液池中的纯液氧中吸附在硅胶珠上。

第 6 阶段 — 在低压塔集液池排出的液氧产品（或吹扫）中脱除。

第 7 阶段 — 在低压塔集液池排出的气态氧产品中脱除（如果液氧从集液池抽出并且在主换热器中蒸发，这就是第 6 阶段的脱除类型）。

表 4 — 预纯化装置过程中的典型脱除

污染物	阶段				
	1 (预纯化 装置)	3 和 4 (蒸气或富液 吸附器)	5 (防护 吸附器)	6 (液氧吹扫 或产品)	7 (气态氧)
甲烷				X 或 P	O
乙烷				X	
乙炔	X		O	T	
乙烯	P		O	P	
丙烷	P		O	P	
丙烯	X			T	
C ₄ +	X			T	
水	X				
二氧化碳	X		O	T	
一氧化二氮	P		O	P	
氮氧化物	X				
臭氧	X				
字母释义： X — 在步序中基本上完全脱除 P — 在步序中部分脱除 O — 任选步序（如果被包括在内，部分或完全脱除组分） T — 脱除可能存在的所有痕量					

9.3 预纯化装置的运行

预纯化装置运行通常由以下步序组成：

- 在线** — 容器在线，空气流经容器。通过吸附脱除痕量杂质。二氧化碳通常被用作控制组分，通常采用一个分析仪来确定吸附剂何时饱和。在吸附剂饱和时（或吸附剂饱和之前），停止在线步序。
- 减压** — 容器离线并且将气体排放到大气中。
- 再生** — 将干废气导入容器，脱除痕量污染物。这些气体被排放到大气中。
- 再加压** — 使用在线容器中的一部分不含二氧化碳的干空气，使容器重新达到冷箱进给压力。
- 并联** — 打开阀门，让空气流经刚被再生的容器。当前在线容器的阀门也是打开的，允许空气流经两个并联的吸附床。这个步序旨在确保在已饱和的容器离线之前，新的吸附床能够完全起作用。

在再生过程中，通常采用高温干气体来消除杂质。在这种情况下，再生气体将在一段时间内保持高温，然后成为一个冷却流，从而使吸附床在重新在线之前重新接近运行温度。由于温度在接近环境在线温度与一个更高的再生温度之间变动，因此这个过程被称为“变温吸附”（TSA）。在变温吸附过程中，在线时间通常是 2~12 小时。

还可采用再生气体的较低压力来脱除杂质从而进行再生。这个过程被称为“变压吸附”（PSA），在线时间通常是 5~30 分钟。

宜按照制造商提供的说明书对预纯化装置进行操作。

预纯化装置系统在设计上通常用于脱除空气中的所有的水、大部分二氧化碳和许多碳氢化合物。预纯化装置可脱除所有的 C_4+ 、乙炔和丙稀。预纯化装置通常脱除一部分乙烯和丙烷，基本上不脱除任何甲烷和乙烷。特殊吸附剂可脱除更多的污染物。二氧化碳是标记化合物，通常安装一个分析仪以确保预纯化装置的正确运行。

注意：预纯化装置可脱除二氧化碳和碳氢化合物，这是一个关键安全特征。预纯化装置的正确运行是确保空分装置的安全运行所必需的。应脱除二氧化碳以防止沉淀和堵塞，否则可能导致干沸腾或池沸腾、碳氢化合物积聚并且最终导致碳氢化合物与氧发生反应。虽然预纯化装置在设计上用于脱除许多碳氢化合物，但是如果预纯化装置的运行不正确，这些碳氢化合物可能在工艺中积聚。

宜将二氧化碳突破限制在不超过制造商建议的水平上。典型的警报水平是 **1 ppm**；如果制造商没有提出建议，宜采用这个值。在发生突破的情况下，如果离线容器被完全再生，宜立即对吸附容器进行转换。可采取的其他步骤包括：

- 缩短后续在线时间
- 降低空气流量
- 对再沸器集液池中的二氧化碳、一氧化二氮和碳氢化合物浓度进行监测，并且尽量提高液氧吹扫速率以确保这些浓度保持在安全极限内

如果发生以下任何情况，宜将装置停机：

- 预纯化装置排出的二氧化碳超过 **10 ppm**
- 再沸器集液池浓度超过安全极限
- 在高二氧化碳警报后 **30 分钟**内无法对吸附容器进行转换而且没有进行再沸器集液池分析

少量连续二氧化碳滑脱或排放的危险性不亚于循环结束时的严重突破，因为这表明空气污染物（例如乙炔、其它碳氢化合物和水分）也正在绕过吸附床。如果二氧化碳连续滑脱达到 **0.2~0.5 ppm**（按照分析仪的检测能力），空分装置不应长时间运行。如果发生这种情况，应对导致二氧化碳滑脱的原因进行调查并且寻求技术协助。

为了确保预纯化装置的有效运行，每一个再生步序都应完整和正确，以确保吸附剂在下一个在线步序中具有最高容量。

应对每一个过程的关键变量进行监测和保持。对于变温吸附，由于使用热量对吸附剂进行再生，因此必须将适当的热量引入容器。应在正确的时间内达到正确的温度并且确保充分的再生流率和加热时间。

还应确保充分的冷却步序，从而在吸附容器重新在线之前将其完全冷却。如果冷却步序不充分，吸附剂容量将被降低，高温气体将被引入下游设备从而导致损坏。对于变温吸附预纯化装置排出的空气，宜安装一个高温警报和停机装置，以防止下游过滤器和低温设备受到损坏。

在所有的情况下，应使用干再生气体。如果存在进入再生气体的潜在水源，宜采用露点分析仪（在使用蒸汽加热器并且蒸汽加热器发生泄漏时，这是最常见的进入再生气体的水源）。如果露点分析仪发出警报，宜迅速对水源进行调查和解决，否则吸附剂将受到永久损坏。

通常通过燃气加热器、蒸汽加热器或电加热器来获得再生热量。每一个系统都宜有充分的温度和低流量停机防护，以保持加热器以及系统其它部件的完整性（特别是在再生气流损耗的情况下）。

对于变压吸附，关键变量是再生气体流量和压力。宜对这些变量进行监测以确保适当的再生。应安装低再生流量警报器以提醒操作人员注意再生不充分。

变压吸附通常导致冷箱进气中存在更加严重的压力波动。为了确保冷箱的稳定运行，应对再加压速率进行控制。

在再生过程中，吸附容器处于低压。在打开进气阀从而将吸附容器重新投运之前，吸附容器的压力基本上应达到进气压力。如果在吸附容器达到进给压力之前将进气阀（进口或出口）打开，快速再加压流量将导致严重和永久损坏。宜采用压力联锁以防止在不正确的时间将进气阀打开。

应将进气中的水含量保持在低于设计最大值的水平上，否则当过量水置换二氧化碳时，将发生二氧化碳过早突破。最常见的过量水源是预纯化装置高进给温度。

注 — 小幅温升表明存在大量的过量水，因为进给温度每升高 **18°F (10°C)**，空气中的水含量将增加大约一倍。

还应避免液态水从上游设备被夹带到预纯化装置中。这些液态水将导致吸附剂过载，从而置换二氧化碳并且导致二氧化碳过早突破。此外，液态水可能导致吸附剂受到损坏，并且导致吸附床内部和排出温度超过 **37.8°F (100°C)**。

吸附剂通常是颗粒材料，尺寸为 **1~5 毫米**。如果预纯化装置运行不正确，这些材料易突破或粉化。此外，在初始加载过程中，吸附剂中存在少量粉尘。建议安装一个下游过滤器以防止这些粉尘进入低温设备。

吸附剂属于特效干燥剂，在装卸过程中应小心搬运。吸附剂可非常迅速地吸附水并且具有很高的温度，可超过 **37.8°F (100°C)**。在进行这些作业之前，宜参阅制造商提供的说明书和材料安全数据表。

在许多情况下，再生气体富含氧（在正常运行、开机或工艺扰动过程中）。应在设计过程中考虑到这个可能性。再生材料和清洗应适合可能存在的最高氧浓度。再生加热器可能是引燃源。

分子筛吸附剂首先吸附氮而不是氧。当容器被减压时，空隙空间中的气体被排放并且被吸附剂释放出的富氮气体置换。

警告：分子筛容器中可能含有富氧气氛，可能导致进入容器或者在容器开口附近作业的人员窒息。在容器中或容器附近作业的人员应执行相应的封闭空间进入规程。

表 5 — 切换式换热器过程中的典型脱除

污染物	阶段				
	2 (切换式 换热器)	3 和 4 (蒸气或富液 吸附器)	5 (防护 吸附器)	6 (液氧吹扫 或产品)	7 (气态氧)
甲烷				X 或 P	O
乙烷				X	
乙炔		X	T	T	
乙烯			P	P	
丙烷			P	P	
丙烯		P	P	T	
C ₄ +	X	T			
水	X	T			
二氧化碳	P	P	T	T	
一氧化二氮		P	P	P	
氮氧化物	X	T			
臭氧		X	T		
字母释义： X — 在步序中基本上完全脱除 P — 在步序中部分脱除 O — 任选步序（如果被包括在内，部分或完全脱除组分） T — 脱除可能存在的所有痕量					

9.4 切换式换热器的运行

在切换式换热器中，空气从主空气压缩机排出，被冷却到环境温度，然后进入主换热器，在主换热器中被进一步冷却到低温。当空气被冷却时，水、二氧化碳和某些碳氢化合物冻析在换热器表面。低沸点碳氢化合物、少量二氧化碳以及一氧化二氮从主换热器排出并且进入空分装置的低温蒸馏段。应通过各个产品流（气态或液态）将这些痕量污染物排出系统，或者采用低温吸附脱除这些痕量污染物。

对空气进行冷却，同时对氧、氮和废气流加温。在几分钟之后，对阀门进行开关，将空气流导入以前含有废气的通道，将废气导入以前的空气通道。当废气在铝钎焊换热器中加温时，废气蒸发并且扫除沉积在换热器表面的组分从而对通道进行净化。

应在换热器中保持精细的平衡，以确保脱除沉积的污染物。由于压力较低，因此废气脱除痕量污染物的容量较高；但是，废气的温度略低于空气流的温度，这导致废气脱除痕量污染物的容量降低。空气和废气的物理性质决定了如果不采取某些额外措施，废气在换热器冷端的温度过低而无法脱除痕量污染物。经过一段时间之后，换热器冷端没有被完全净化并且最终被堵塞。

换热器冷端需要更多的低温气体以促进净化。最常用的方法是从高压塔顶抽出一部分氮，在主换热器中对这些氮加温。现在可以对这些温度较高的高压气体进行膨胀。当气体被膨胀时，气体达到足够低的温度，可将气体添加到主换热器冷端的低压氮流中，从而提供额外的低温气体。这个气流被称为“再热流”（或“不平衡流”），必需对其进行适当的控制以确保切换式换热器的完全净化。

虽然高压塔排出的氮是这个再热流的最常见来源，但是也可以采用其它流体（取决于过程）。

宜对切换式换热器中点温度进行仔细监测。如果中点温度过低，表明再热流量过高，这将导致二氧化碳净化容量降低以及暖端温差（ ΔT ）升高（暖端温差升高将增加过程的制冷要求并且导致效率低下）。如果再热流量过低，表明中点温度过暖而且换热器冷端温差过大，从而导致二氧化碳净化不充分。容许中点温度的确切范围取决于特定过程，宜要求制造商提供这个范围，但是容许中点温度范围通常是 $-94 \sim -184^{\circ}\text{F}$ （ $-70 \sim 120^{\circ}\text{C}$ ）。

大部分空分装置都设有两个或两个以上的并联主换热器。应测定每一个主换热器的中点温度。为了确保二氧化碳净化，应将每一个中点温度控制在容许范围内。每一个主换热器应安装一个非切换流（通常是氧）平衡阀，对各个管道和换热器流阻差导致的流量偏差进行校正。可对平衡阀进行调节，增加或减少进入每一个换热器的流量，从而将各个中点温度保持在容许极限内。在空分装置的初始试运行过程中对平衡阀进行设置，此后一般不再重新调节。

应将冷端温度保持在高于空气液化温度的水平上。在对换热器进行转换时，如果空气在主换热器中液化，液体存量将被损耗。这个冷量损耗是不容许的，而且还可能导致设备受到损坏。

应将冷端温度保持在低于最高容许温度（制造商对此作出规定）的水平上，以确保碳氢化合物被保持在切换式换热器中（而不是高浓度碳氢化合物被夹带到空分塔中）。如果冷端温度高于最高容许温度，应立即切断流经该容器进入空分塔的空气流。只有在达到安全温度之后才应重新接通空气流。

如果没有对换热器进行适当的净化，沉积的二氧化碳将残留在切换式换热器中。这将导致传热降低和暖端温差升高，因此增加制冷载荷，从而对空分装置的性能产生影响。暖端温差升高通常是出现净化问题的最初迹象。如果不充分的净化在长时间内持续存在，空气和废气压降也将升高，但是这种情况通常发生在暖端温度长时间超标之后。

换热器的典型运行时间是 4~10 分钟。虽然缩短运行时间可提高系统的净化容量，但是这需要更多的冷量并且导致开关损耗增加。

当空分装置停机时，应排放切换式换热器中的水，否则水可能冻结并且导致换热器堵塞或受到损坏。需要进行适当的暖端吹扫，以防止换热器暖端温度过低。如果换热器暖端温度低于 32°F （ 0°C ），在重新运行空分装置之前，宜执行制造商规定的特殊规程。

通过转换阀将换热器暖端的空气和废气流导入适当的通道。换热器冷端通常安装了止回阀。应对这些转换阀和止回阀进行适当的维护以确保可靠运行。

当空气冷却时，水在主换热器中冷凝。进气中的所有腐蚀性气体都溶解于这些水，对主换热器可能具有很强的腐蚀性。如果存在大量的酸性气体，宜对空气进行预处理以防止这些组分进入主换热器。铝钎焊换热器中的铝特别易受氯和硫化物腐蚀。

切换式换热器每隔几分钟经历一次压力和温度循环。经过多年运行之后，这可能导致换热器疲劳失效，并且通道开始泄漏。宜对产品流进行例行泄漏监测并且对换热器进行必要的修理。宜仅由合格工作人员进行这些专门的修理。

某些痕量污染物进入主切换式换热器，这是因为这些污染物的沸腾温度相对较低。其中最主要的污染物是不在切换式换热器中冻析的乙炔。乙炔仅略溶于液态冷冻剂，形成的任何固态晶体都可能发生爆炸性分解。此外，主换热器排出的二氧化碳浓度较低，二氧化碳可能在下游设备中沉淀，从而导致某些部位可能发生干沸腾。采用低温吸附（参见 12.8）以及来自低压塔集液池的吹扫来脱除这两种组分。AIGA 035/06 对最低吹扫速率作出了规定 [38]。

由于切换式换热器的进气中含有堵塞性杂质，因此在开机时需要非常仔细。制造商提供了具体的说明书。典型的基本规程如下所述：

- a) 将一部分空气导入加热器，然后使这些暖湿空气（110~150°F [43~66°C]）流经低温设备，从而对空分装置中的所有液态水进行蒸发。
- b) 对蒸馏塔进行隔离。
- c) 使空气流经主换热器、将空气减压并且使空气回流到废气通道中。对换热器进行时间相对较短的循环转换。将一部分空气导入膨胀机，从而提供冷量对换热器进行冷却。宜将膨胀机排气导入废气环路，从而尽量提高净化流量。
- d) 均匀地对主换热器进行冷却，以防止二氧化积碳和堵塞。
- e) 当主换热器冷端温度达到大约-100°F（-73°C）时，空气中基本上不含水。然后采用这些干空气来吹除空分装置的低温部分，以确保系统中不含蒸气水。
- f) 在对低温系统进行吹除之后，冷却到液空温度，然后建立正常流量。

某些高沸点组分并没有在切换式换热器中完全净化，即使是在中点温度得到适当保持的情况下。应通过定期解冻来脱除这些组分。在解冻时，所有这些组分在几个小时内被释放。特别是氮氧化物组分可能以相对较高的浓度被释放。在这个过程中，工作人员宜注意将暴露保持在安全极限内。如果气氛中含有氮氧化物和共轭二烯，这些组分可能发生反应从而形成残留在切换式换热器中的胶质。应通过定期解冻来脱除这种胶质。如果这种胶质达到充分的浓度，可能发生自爆[40、41、42]。

如果将切换式换热器停机，应执行适当的规程以确保无故障和安全重新开机。宜将换热器完全封堵，以防止低温气体流经换热器。

如果换热器暖端过冷，水将冻结并且导致换热器受到损坏。换热器暖端温度应高于制造商规定的重新开机最小值。如果换热器暖端温度低于制造商规定的最小值，宜制订规程从而在对换热器进行转换运行之前对换热器加温。

9.5 辅助机械冷冻器

有时采用机械冷冻器对压缩空气中的水分进行冷凝，从而减少预纯化装置或切换式换热器的水载荷、提高预纯化装置吸附剂容量并且提高过程运行效率。在冷冻器中对制冷剂进行蒸发来获得冷量。冷冻器宜有低温控制以防止水在冷冻器处理的工艺流中冷冻。

应考虑到制冷剂系统发生泄漏的可能性。空气可能泄漏到制冷剂系统中从而形成爆炸混合物（取决于压力）。或者，制冷剂可能泄漏到过程中从而形成爆炸混合物。制冷剂然后可能进入下游设备，应考虑到制冷剂对过程和设备产生的影响。

应考虑到正常运行、开机和停机过程中的泄漏可能性和危险。

如果在这个设备的维修过程中，需要打开系统或者可能暴露于制冷剂，应考虑到使用的制冷剂的毒性或易燃性。《关于消耗臭氧层物质的蒙特利尔议定书》以及政府法规对许多碳氟化合物的使用进行限制，并且禁止将这些碳氟化合物排放到大气中[55]。在维修过程中，有必要采用特殊设备和规程以防止这些制冷剂泄漏。如果制冷剂泄漏到大气中，宜立即进行修理。

9.6 碱洗塔

有时采用碱洗塔来脱除空气中的二氧化碳。碱洗塔涉及的最主要的危险是苛性碱溶液的处理。暴露于苛性碱溶液可能导致严重灼伤。应执行制造商关于苛性碱溶液的安全处理建议。在苛性碱系统周围进行作业时，应始终佩戴防护橡胶服和防护面罩。

应在邻近泵密封的接头和轴周围安装防护罩，以防止泄漏的苛性碱溶液飞溅到周围区域中或工作人员身上。

在许多应用中，在碱洗塔下游安装干燥器以脱除空气中的残留水。宜注意干燥器在设计上并非用于脱除二氧化碳和其它杂质，而是仅仅用于脱水。应按照制造商提供的说明书，对所有用于防止苛性碱被夹带到干燥器中的系统进行维护。

10 膨胀机

膨胀机被用于向过程提供冷量。膨胀机包括涡轮膨胀机和往复式膨胀机这两种类型。

膨胀机通过附带的加载电气、机械或液压装置，从工艺流中提取能量。通常采用发电机、鼓风机、增压压缩机或油测功机对涡轮膨胀机加载。对于往复式膨胀机，通常将膨胀机与压缩机直连从而对膨胀机加载，或者采用发电机对膨胀机进行皮带加载。

在膨胀机的运行过程中，宜考虑到以下因素：

- 加载损耗和超速
- 过程受到油污染
- 异常低温
- 气流中存在固体
- 润滑损耗
- 轴承异常温度
- 异常振动
- 异常速度
- 冰或二氧化碳导致膨胀机结垢
- 开机和停机

可在运行时数或日历基础上制订最适于具体设备的维修计划。

10.1 加载损耗和超速

如果由于任何原因而导致加载装置没有持续对膨胀机轴加载，膨胀气体产生的功将导致膨胀机快速加速从而可能导致机械损坏。

膨胀机应配有超速停机控制系统，从而在加载损耗时将膨胀机停机。发电机加载膨胀机还应配有仪表用于检测电网脱离，并且在可能发生损坏之前将膨胀机停机。

10.2 过程受到油污染

10.2.1 涡轮膨胀机

涡轮膨胀机设有迷宫气封系统，以防止极端低温工艺气体泄漏到大气或轴承中，并且防止过程受到油污染。密封系统空穴中的相对流体压力不当或者密封气压力损耗将导致低温工艺气体泄漏或者油沿着轴迁移并且进入工艺气流。可通过工艺气体或外部气源提供密封气（取决于涡轮膨胀机的设计）。如果将膨胀机停机以防止低温和/或富氧气体迁移到膨胀机的油润阶段，宜提供外部密封气源。

密封气应干燥、不含油并且进行过滤，以防止系统受到污染以及膨胀机受到损坏。

应将密封气压力测定包括在膨胀机控制系统中。应将密封气压力保持在制造商建议的最小值以上，以确保膨胀机的安全开机和运行。如果密封气压力低于制造商建议的最小值，应立即将膨胀机和润滑油泵停机。如果在将膨胀机停机时，密封气压力低于制造商建议的最小值，控制系统应将润滑油泵停机。

如果在密封气排放口出现油，表明润滑油消耗量大幅增加，或者如果有任何原因怀疑发生油污染，宜将膨胀机停机，并且进行修理或者更换膨胀筒。宜对接入膨胀机的工艺管道进行油污染检查并且进行必要的清洗。

10.2.2 往复式膨胀机

往复式膨胀机包括无润滑膨胀机和润滑膨胀机这两种类型。

10.2.2.1 无润滑往复式膨胀机

无润滑膨胀机设有加长开放式间隔片以及配有抛油环套圈的活塞杆，以防止膨胀机润阶段中的油迁移。宜频繁地对开放式间隔片进行检查以确保这个部位没有油积聚。

10.2.2.2 润滑往复式膨胀机

虽然油润滑膨胀机设有油净化系统，但是过量油可能导致净化系统过载并且最终导致空分装置受到污染。

宜将气缸腔的进油速率保持在最低水平上并且与气缸环使用寿命和气缸条件相适合。

流经润滑膨胀机气缸的油量并不限于通过气缸润滑器引入的油量。可能在气缸曲轴端引入有时远远超过这个润滑器流量的曲轴箱油。导致这种条件的原因通常是活塞杆刮油器发生故障或者没有排放间隔片中积聚的油。

对于润滑膨胀机膨胀，应密切注意脱油设备。脱油设备通常是填充床或机械过滤器。脱油设备在固定时间内运行或者在系统发生给定压降之前运行。此时，将系统停运并且通常采用高温气体（建议采用惰性气体）对系统进行再生。必需将再生流量及其最终排出温度保持在制造商规定的水平上。

在再生之后，在将系统重新投运之前，宜将系统冷却到操作说明书中规定的温度，特别是在工艺流中含有充分的氧从而支持燃烧的情况下。

对于某些机械过滤系统，将过滤器中的过滤介质取出，在溶剂中进行洗涤，然后对介质进行干燥并且重新安装在过滤器中，以此对机械过滤系统进行再生。应注意确保对介质进行完全洗涤和干燥并且正确地将介质重新安装在过滤器中以防止过滤器旁通。

在初始运行过程中，宜频繁地对填充床或机械过滤器下游管道进行检查，以确认没有发生过滤器旁通或突破。

至少宜按照制造商的建议更换填充床，除非充分的运行历史可确保延长填充床的使用寿命。

10.3 异常低温

如果膨胀机在膨胀气体的露点温度以下运行，将在膨胀机中形成液体。如果在往复式膨胀机气缸中存在液体，将导致严重损坏。如果在并非用于部分液化的涡轮膨胀机中存在液滴，可能导致喷嘴或叶轮受到侵

蚀，这都将导致效率损耗和不平衡并且最终导致机械失效。容许排气中存在液体的涡轮膨胀机在运行过程中不存在侵蚀损坏风险。

为了确定膨胀机排出口的流体状态，宜对照膨胀气体的物理性质（温度-焓图），对膨胀机的设计运行条件进行检查。

为了防止在并非这种设计用途的膨胀机中形成液体，宜将膨胀机排出温度保持在膨胀气体露点以上不低于 5~15°F (2.8~8.3°C) 的水平上。

宜在不容许液体形成的膨胀机的排出口安装一个温度监测装置，从而在低温时发出警报。

宜按照制造商的建议保持膨胀机进口温度宜。在极端情况下，极低进口温度可能导致在涡轮膨胀机的进口喷嘴形成液体。

10.4 气流中存在固体

膨胀机进口气流中存在的管垢颗粒或干燥剂细粉可能导致膨胀机内部构件受到侵蚀损坏。涡轮膨胀机的喷嘴、叶轮和迷宫气封特别易受磨损。往复式膨胀机的气缸环和气缸套将受到加速磨损。

宜采用进口筛滤器来尽量减少进入膨胀机的固体颗粒数量。这些筛滤器通常采用细织筛网制成。宜采用警报器对进口筛滤器的压降进行监测，以确定何时有必要进行清洗或更换并且避免发生可能导致破裂的过度压降。筛滤器在结构上宜确保其额定崩裂压力高于膨胀机的预期运行压力。

10.5 润滑损耗

膨胀机润滑损耗将迅速导致膨胀机受到严重损坏。采用直连油泵或电动泵对涡轮膨胀机轴承进行强制润滑。对于往复式压缩机，通过曲轴箱对膨胀机轴承进行飞溅润滑，或者采用通过曲轴箱直接驱动或远距离驱动的电动泵对膨胀机轴承进行强制润滑。

如果采用直连油泵进行润滑，还需要一个辅助电动泵或储油器油箱。应采用压力传感器对系统油压进行监测，从而在油压降低时将辅助油泵开机，并且在油压进一步降低时将膨胀机停机。如果采用电动油泵进行润滑，需要一个储油器油箱在电力中断后的膨胀机惰走过程中提供润滑。如果采用储油器油箱，储油器油箱宜自动启动。

宜在膨胀机计划内维修过程中对储油器压力进行检查。

10.6 轴承异常温度

在膨胀机运行过程中可能出现轴承异常高温或低温。如果进入轴承的油流量受到限制、轴承加载异常或者轴承受到损坏，可能出现轴承异常高温。轴承异常低温最常见于涡轮膨胀机。如果密封严重泄漏或者如果油流量受到限制，可能出现轴承异常低温。涡轮膨胀机和大部分往复式膨胀机都设有温度测定仪表。这个仪表还宜提供警报和停机功能。操作人员宜注意正常运行温度的显著偏差并且对原因进行调查。冷端轴承低温检测通常是涡轮膨胀机的容许开机环路的一部分。

10.7 异常振动

过高振动可能导致涡轮膨胀机受到严重损坏。所有的涡轮膨胀机都应安装感应式振动探头和监测器，对轴运动进行检测并且启动警报和/或停机系统。宜定期对这些传感器提供的数据进行分析。如果读数异常或者如果涡轮膨胀机在高振动时停机，可由专家对数据进行仔细评审从而确定导致高振动读数的原因。在导致过高振动读数的原因得以消除之前，不应将涡轮膨胀机重新开机。

往复式膨胀机通常设有一个地震开关。

10.8 异常速度

如果在设计速度极限以外（超速或接近临界共振频率）连续运行，涡轮膨胀机易受损坏。这些临界速度和共振频率（非滞留区）是制造商规定的。在开机过程中，在涡轮膨胀机加载的同时，有必要迅速通过所有

的临界共振频率。良好设计实践是将速度极限纳入膨胀机控制系统。如果制造商规定了非滞留区，宜安装相应的停机系统。

10.9 冰或二氧化碳导致膨胀机结垢

进口筛滤器上或膨胀机本身内部的结冰或二氧化碳沉积可能对膨胀机性能产生不利影响。这些污染物的典型来源包括：

- 预纯化器突破
- 压缩机冷却器水泄漏
- 切换式换热器扰动
- 在停机过程中吸入大气空气
- 解冻不当

如果发生任何这些事件，或者当运行条件发生变化时，积聚的污染物从冷箱内部的其它部位迁移，在这些情况下膨胀机可能立即结垢。

操作人员宜对膨胀机性能以及膨胀机进口筛滤器的压差进行监测。性能降低或高压差表明膨胀机可能结垢。如果膨胀机需要频繁解冻，表明可能持续存在结垢问题。

10.10 机和停机

宜执行设备制造商建议的开机加载规程。宜特别仔细地膨胀机加载。涡轮膨胀机可能要求迅速加载以避免可能导致膨胀机受到损坏的低速或临界速度运行。

停机系统在设计上应关闭膨胀机进口阀从而切断进入膨胀机的气流。良好实践是关闭涡轮膨胀机进口喷嘴，或者将往复膨胀机凸轮移到中间位置。对于发电机加载膨胀机，控制系统在设计上应防止发电机在气流被切断之前脱开，否则可能导致膨胀机机器受到损坏。在膨胀机的计划内维修过程中，宜总是对膨胀机安全控制系统进行完整的功能试验。

由于发电机加载膨胀机的设计，如果发电机作为电机运行，膨胀机可作为压缩机运行。这可能导致过热和严重机械损坏。控制安全系统在设计上宜采用特殊电气传感装置以防止膨胀机作为电机运行。虽然某些早期膨胀机控制系统在设计上允许首先将发电机作为电机运行从而将膨胀机开机，但这并不是当前设计实践。

10.11 操作和维修规程

应采用书面规程对每一个膨胀机及其加载装置进行开机、操作和停机。应定期对关键运行参数进行监测。应对异常条件和趋势进行调查和解决。

宜对每一个膨胀机及其加载装置制订一项预防性维修计划。最初宜根据供应商的建议来确定维修频率，并且最终根据历史数据来确定维修频率。

通常每年对往复膨胀机进行一次维修。

11 低温泵

11.1 总则

空分装置的功能设计和运行取决于一个或多个低温液泵的应用。泵的选型取决于过程或最终用户的要求。这些泵的用途包括：

- 将工艺液体从一个蒸馏塔输送到另一个蒸馏塔
- 在再沸器中对液氧进行循环
- 在吸附器中对工艺液体进行循环

- 在过程和储槽液态产品之间泵抽液态产品
- 在空分装置主换热器中将液态产品泵抽到更高的压力用于蒸发
- 将液态产品从低压储槽泵抽到高压储槽和/或后备蒸发器中
- 在储槽和拖车或轨道车之间泵抽液态产品

11.2 泵的种类

11.2.1 离心式泵

离心式泵在设计上可满足各种流量和压头发生要求。这些泵可卧式或立式安装。叶轮尺寸、轴转速以及泵级数决定了可达到的流量和压力。

11.2.2 往复式泵

往复式泵是一种低流量/高压头发生装置。进口管和气缸套通常采用真空保温，从而尽量减少热泄漏并且防止进口液体蒸发。可将脉动减震器包括在设计中从而尽量减少活塞往复高速导致的液击效应。

可在空分装置中连续运行往复式泵来脱除液态产品（通常是氧），并且在液态产品在主换热器中被蒸发之前将其泵抽到非常高的压力。还可间断运行往复式泵来抽除储槽中的液态产品，并且在液态产品在换热器中被蒸发之前将其泵抽到非常高的压力。被蒸发的产品可被用于充装高压气瓶或气柜。

由于往复式泵能够产生非常高的排出压力，因此：

- 应提供充分的泄压装置，从而为工作人员和设备提供超压和死端流量条件防护
- 泵仪表和电气控制应包括一个自动高压和一个电机低电气载荷停机装置
- 高压排出压力计宜配有缓冲器、塑料观察窗和吹除口

11.3 结构材料

所有的低温泵都应采用适于预期工艺条件的结构材料以确保安全和可靠运行。低温泵处理的流体中的氧含量在纯度上可能存在差异——从非常高的纯度到非常低的纯度（取决于工艺条件）。在确定是否宜对泵进行氧用设计时，宜考虑到整个运行范围内（其中包括正常运行、开机、停机和工艺扰动）的流体纯度。更加严格的设计规则适用于氧泵的结构材料选用。关于离心式氧泵的指南，参见 AIGA 055/08《固定式电气驱动离心式液氧泵的安装指南》[56]。制造商可提供关于往复式氧泵的具体建议。

11.4 泵系统的一般设计

在低温泵的设计和安装过程中，应注意确保将管道冷却收缩、液体重量、结冰和泵运行动力导致的管道应力与泵壳隔离以防止损坏。可对泵的吸入管和排出管系统进行挠性设计并且为这些管路提供适当的管架从而实现这个目标。隔离的首选设计方法是在泵接入管道系统的连接点采用挠性接头（例如编织挠性软管）。

应在吸入管路中安装一个泵进口筛滤器，以防止颗粒导致泵受到损坏。应由泵制造商提出进口筛滤器筛目尺寸的建议（参见 AIGA 055/08）[56]。建议在泵与挠性接头之间安装进口筛滤器。

低温泵的管道系统在设计上应尽量减少螺纹和法兰接头的使用以避免泄漏。泄漏的低温流体可能导致碳钢外壳、安装架和电机外壳破裂，还可能导致电机轴承冻结。

注意：泵驱动电机周围的氧泄漏可能导致极端危险的火灾或爆炸条件。

建议采用不锈钢板、结构件或防护罩为工作人员和设备提供液体泄漏防护。管道布局和泵位宜确保在发生泄漏时，泄漏的液体排放口远离所有的设备、泵基础或者受到低温流体或高氧含量气氛危及的任何其它区域。

应在泵吸入管路上安装一个泄压装置，从而避免被截留的液体导致泵壳和密封超压。这个泄压装置的设定压力应低于泵壳和密封的最高容许工作压力。

宜仔细地进行泵及其管道的选位和布置，以确保以最低的难度和产品损耗对泵进行冷却和启动。储液器引出的泵吸入管宜尽可能短并且尽量减少弯头和接头的使用。宜在所有的储液器液位上提供充分的净正吸头以避免泵空化。在泵的冷却或运行过程中，宜通过配有适当的控制阀的泵冷却和再循环管路，使低温气体和过量泵抽液体回流到储液器中。可采用压力控制仪表使再循环功能实现自动化。宜将所有的液体排放到安全地点（参见 16.2）。宜提供阀门从而在泵不使用时或者在紧急情况下将泵与供液隔离。还宜提供一个排出止回阀。

应采用干惰性气体对泵机械轴封部位进行吹扫，从而对密封周围的结冰进行限制。

必需对低温泵吸入管进行适当的保温以尽量减少热量泄漏到吸入液体中，从而确保方便地将泵启动并且确保泵的良好运行。应将吸入管热泄漏包括在泵净正吸头的计算中。采用的保温系统可包括一个金属管道和泵箱或各个管道部件的保温（闭孔保温或真空夹套保温），并且宜对保温系统进行密封以防止水分渗入。如果采用金属管道和泵盒保温设计，应采用惰性气体进行吹扫。如果采用泵盒设计，所需的所有吸入和排出隔离阀、进口粗滤器、挠性接头和止回阀通常都位于泵盒中。

可不对泵排出管（其中包括泵冷却和再循环管路）进行保温（取决于工艺设计要求）。

11.5 氧泵的特殊考虑因素

需要特别仔细地进行液氧泵的设计、制造、安装和操作[56]。

11.6 泵电机

泵电机宜具有适当的尺寸，从而能够对泵所需的所有预期载荷进行处理。在低排出压力条件下，离心式泵可能超过电机的额定功率输出，宜提供电机过载防护。对于采用直连延长电机轴驱动的立式和卧式离心式泵，应对电机轴的轴向位置进行固定（通常采用推力轴承进行固定）。

宜采用间隔片或保温材料，在泵与电机驱动端轴承座之间提供充分的热障，从而为轴承提供极端低温防护。如果电机轴与泵直接连接而且泵在低温条件下长时间停机，可提供一个电机驱动端轴承电加热器。这种电机还可配有一个电机空间加热器。

宜采用完全封闭的风机冷却式电机。

如果电机在设计上将润滑部件与泵隔离，可采用低温矿物油基油脂和油对液氮或液氩泵电机轴承进行润滑。宜特别注意避免电机轴承润滑剂进入工艺管道。

11.7 泵的运行

应避免在泵达到预定运行温度之前将泵开机，以确保保持泵扬程并且防止设备损坏。液体过冷不充分、储液器液位不充分或进口筛滤器高压降可能导致泵扬程损耗。如果排出压力过高或过低，离心式泵也可能发生扬程损耗。

低温泵的良好运行实践如下：

- 如果存在任何故障迹象（例如过量密封泄漏、内部摩擦或异常噪声），应立即将液泵停机
- 宜采用新鲜液体定期对冷备用氧泵进行排放和吹扫，以防止碳氢化合物在泵液中积聚
- 配有外部轴承的泵不宜保持在停机和液泛状态下，除非已采取措施防止泵外部轴承过度冷却
- 应在手动泵的整个运行过程中对泵进行局部监测，以确保采取必要的纠正措施

槽车装车泵可采用自动泵或手动泵。关于补充信息，参见 CGA P-31《液氧、液氮和液氩低温槽车装车系统指南》[57]。

可对电机低电气载荷、泵低排出压力、泵低压差或低净正吸头进行监测，从而提供泵流量损耗或空化防护。还可提供净正吸头装置，以防止在泵冷却不充分或者没有达到所需进口压头的情况下将泵开机。

11.8 操作和维修规程

应采用书面规程对每一个泵进行开机、操作和停机。应定期对关键运行参数进行监测。应对异常条件和趋势进行调查和解决。

宜对每一个泵制订一项预防性维修计划。最初宜根据供应商的建议来确定维修频率，并且最终根据历史数据来确定维修频率。

宜在泵维修之后对泵轴的自由旋转进行确认。

12 冷箱

这个部分简要回顾了对冷箱及其工艺设备的安全运行和维修产生影响的一系列设计因素。

关于具体的冷箱设备的设计和运行的补充信息，参见 AIGA 057/08、AIGA 035/06 和 CGA G-4.8《氧蒸馏铝规整填料的安全使用》（EIGA 文件 701/04）[2、38、58]。

12.1 基础

所有的冷箱都宜采用符合当地规范（其中包括地震载荷和风载荷要求）的整体式基础。

宜将基础的初始或未来加热方式（强制加热或环境加热）包括在初始设计中，以防止低温设备导致冻胀。安装在基础中的热电偶可有助于检测异常温度条件。

12.2 外壳

宜在冷箱外壳上安装超压防护和欠压检测装置。宜根据冷箱配置、工艺流压力和流量、吹扫气体压力和保温材料种类（例如矿棉、蛭石或珍珠岩）来确定这些装置的数量和类型以及设定压力。这些装置的位置应避免排气对工作人员或设备造成冲击。

外壳应保持密封。应对阀门密封套和检修门密封进行例行检查和必要的修理。外壳（特别是顶段）应保持涂漆和水密性。

水分在冷箱内部积聚可能导致形成冰块，这将导致保温性能降低、对管道移动造成限制并且可能导致管道受到损坏。管道损坏通常发生在管道经历极端温度变动的解冻和冷却过程中。在珍珠岩冷箱中，在冷箱中形成的冰块崩落将对工作人员和工艺设备造成额外危险。

12.3 保温材料

保温材料宜与氧相容。珍珠岩是最常用的冷箱保温材料（参见 AIGA 032/08《珍珠岩管理》）[59]。蛭石和矿棉也是容许采用的保温材料。由于蛭石中可能含有石棉，因此需要小心搬运。油在矿棉保温材料的制造过程中被用作粉尘控制介质，但是油含量不宜超过 0.175%（按重量）（1.6 公斤/吨）。宜指明低氯化物矿棉的规格，以防止不锈钢在保温材料受潮时发生应力腐蚀破裂。

12.4 内部支架

应采用可暴露于氧和低温的适当材料。宜进行检查以确保在安装保温材料之前拆除所有的运输支架。

12.5 冷箱和管道吹扫

为了排除水分和空气，宜采用干氮气对冷箱和管道进行吹扫，并且将冷箱和管道始终保持在微正压条件下。氮气中可含有不超过 5% 的氧，从而：

- 防止与低温工艺设备接触的空气液化。液化空气可能导致在冷箱中形成富氧液池。如果保温材料受到扰动或者如果冷箱被加温，这些富氧液池可能快速蒸发。这种快速蒸发可能导致珍珠岩流化或冷箱超压。
- 防止水分渗入从而保持保温材料的性质。水分渗入将导致 12.2 中所述的问题。

- 将氧含量保持在最低水平。氧浓度升高表明工艺泄漏或空气渗入。

宜定期对冷箱内部的纯度和压力进行检测。冷箱外壳上的压力指示器还有助于检测冷箱内部发生的泄漏。氮吹扫系统在设计上宜防止在冷箱的任何部位中存在次大气压力。

12.6 工艺泄漏

由于液体和低温气体泄漏可能导致基础冻胀、珍珠岩对工艺设备造成侵蚀、冷箱超压以及碳钢结构件和板件破裂，因此宜尽快对液体和低温气体泄漏进行修理。液体泄漏导致的后果通常更加严重，要求立即更加迅速地加以处理。

对于干粉保温冷箱，宜尽快对冷箱内部的任何泄漏进行调查和修理。如果采用干粉保温材料，轻微泄漏可能导致干粉循环从而导致漏洞扩大，并且可能非常迅速地对相邻管道或设备造成侵蚀。这种情况可能将保温材料引入工艺流。

霜点以及冷箱外壳吹扫气体纯度和压力变动是工艺泄漏的最初迹象。

机械接头（例如法兰或螺纹接头）是潜在泄漏源。宜尽可能避免在冷箱内部使用这些机械接头。如果采用珍珠岩保温，可采用填充了矿棉或其它适当的保温材料的非易燃隔板，将法兰阀与冷箱的其它部位隔离，以确保可以在无需清空全部珍珠岩的情况下对阀门和法兰进行维修。

12.7 脱除颗粒材料

要求采用机械过滤装置以防止材料通过工艺系统迁移。机械过滤装置通常位于潜在迁移材料源以及对迁移材料敏感的设备进口。例如：

- 宜提供进口和出口筛滤器来阻滞容器中的吸附剂
- 宜在泵或膨胀机和压缩机吸入口提供筛滤器
- 在将氧沸干时，可提供筛滤器（参见 AIGA 057/08）[2]

由于这些装置被用于阻滞或积聚潜在迁移材料，因此宜定期对这些装置进行检查和清洗。

以前曾经发生过由于颗粒（例如珍珠岩和硅胶）进入低压塔集液池并且堵塞再沸器通道而导致的重大事件。这可能导致池沸腾以及碳氢化合物的危险积聚。如果有证据表明颗粒进入低压塔集液池，应将空分装置停机并且脱除这些颗粒。

12.8 低温吸附器

可在过程中的不同位置安装低温吸附器以脱除碳氢化合物和二氧化碳。

在配有切换式换热器的空分装置中，应提供低温吸附器以脱除流经切换式换热器并且进入低温蒸馏塔的空气的碳氢化合物和痕量二氧化碳。可在配有预纯化装置的空分装置中提供低温吸附器，以脱除可能突破预纯化装置的污染物。

虽然低温吸附器在设计上通常并非用于吸附一氧化二氮，但是行业经验表明大部分低温吸附器可有效地脱除液流中的一氧化二氮。

宜按照制造商的建议对低温吸附器进行操作，以防止被吸附的污染物突破。宜采用不含油的干氮气对低温吸附器进行再生。在不利的工艺条件下或者如果发生吸附器突破，宜更加频繁地对吸附器进行再生。

如果制造商规定了低温吸附器的最低流量要求，应严格执行这些要求以确保脱除污染物。可采用流量测定或压差来指明低温吸附器的最低流量。对于脱除蒸气相中的污染物的低温吸附器，流体大幅温升可能导致污染物突然解吸附，从而将污染物释放到下游设备中。这是一项重大危险。

吸附器在工艺系统中的实际位置取决于具体的工艺设计。表 6 提供了某些示例。

表 6 — 低温吸附器名称

位置	常用名称
高压塔进气	冷端凝胶阱、碳氢化合物吸附器
低压塔进气	侧泄凝胶阱
高压塔集液池排出的液流	碳氢化合物吸附器、富液吸附器、釜液凝胶阱
低压塔集液池	防护吸附器、液氧过滤器、再循环凝胶阱
液氧泵排除口	防护吸附器、液氧过滤器、再循环凝胶阱

如果提供不同类型的单一吸附器，宜一次对一个吸附器进行再生，从而尽量减少污染物突破导致的暴露。如果提供同类型的双吸附器，这项预防措施并不适用。

硅胶是一种常用的吸附材料。

在低温吸附器的再生和冷却过程中应采取的预防措施包括：

- 执行制造商的再生流量建议以避免硅胶流化和分解
- 执行制造商的温度和步序时间建议以确保完全脱除被吸附的污染物
- 避免快速温度变动（加热或冷却）以防止硅胶分解
- 在冷却过程中，缓慢引入低温液体以防止硅胶流化和分解
- 避免引入液态水以防止硅胶分解

当硅胶分解成小颗粒和粉尘时，可能导致重大安全问题，因此宜尽快更换硅胶。硅胶分解迹象包括低温吸附器性能低下、吸附器中的硅胶水平度降低、再生气体排放口出现粉尘或硅胶颗粒或者低温吸附器环路中的压降升高。如果发现任何这些迹象，应立即进行调查和解决。硅胶迁移可能导致下游换热器堵塞，这可能导致干沸腾以及能量释放风险升高。

宜在空分装置计划内维修停机过程中测定所有低温吸附床的水平度。

关于进一步的运行指南，参见 AIGA 035/06 《空分装置再沸器/冷凝器的安全运行》[60]。

12.9 液位

12.9.1 高压塔

在正常运行过程中，高压塔集液池需要达到充分的液位以提供液封，从而防止蒸气旁通并且确保进入低温吸附器的液体流量。应将高压塔液位保持在制造商规定的最大值或低于这个最大值，以防止对塔内部构件造成静水压损坏（水击）。在开机之前，应将高压塔集液池液位降至制造商规定的最大值以下。

12.9.2 低压塔

对于热虹吸式再沸器，应将低压塔集液池液位保持在制造商建议的液位范围内，以确保适当的液体再循环流经再沸器，从而防止污染物在液氧中浓缩到危险的浓度。关于详细信息，参见 AIGA 035/06 [38]。

对于配有下流再沸器的空分装置或者对于不包括再沸器的塔，应将低压塔集液池液位保持在制造商建议的液位范围内，以确保为所有相连工艺泵提供充分的静水压头。

如果空分装置扰动或停机导致进入蒸馏塔的空气被突然切断，可能导致低压塔和粗氩塔中的液体排放到低压塔集液池中。低压塔集液池液位升高，可能覆盖气态氧排出喷嘴。塔、气态氧环路和/或集液池中的液头之间的压差可能推动集液池中的液体流经主换热器并且进入气态氧环路的暖温管道中。在设计中宜考虑在低

温气态氧管道中安装一个上升回路、确保低压塔集液池的充分容积或采取其它适当的措施以防止发生这种危险。在空分装置停机时，宜关闭暖端氧阀门以防止液体夹带。

在低温空分装置重新开机之前，应将低压塔集液池排放到制造商建议的液位，以避免低压塔集液池中的高液位导致设备受到损坏或者液体被夹带到空分装置的暖端。

12.10 污染物监测

污染物监测采用典型的环境空气质量（参见 7.1）。关于建议进行的分析以及低压塔集液池液体中的污染物极限，参见 AIGA 035/06 [38]。

分析频率取决于空分装置循环、空分装置的位置、天气条件和所有的异常条件。对于配有切换式换热器和/或再生器的空分装置，宜按照制造商的建议进行例行乙炔分析。应按照制造商的建议，定期对所有空分装置中的总碳氢化合物和具体碳氢化合物进行检查。宜对正常浓度的所有偏差进行调查并且确定导致变动的原因为。

对低压塔集液池液体进行二氧化碳监测是一个重要的运行参数或停机指南。在采用低温吸附器的空分装置中，并非由于临时扰动或低温吸附器旁通而导致的低压塔集液池液体中的二氧化碳浓度升高表明低温吸附器可能突破。如果不对此进行纠正，随后将发生乙炔突破。

对于配有预纯化装置的空分装置，通常在预纯化器出口进行二氧化碳监测。良好运行实践还包括定期对低压塔集液池液体中的二氧化碳进行分析。关于进一步的指南，参见 AIGA 035/06 [38]。

二氧化碳浓度超过溶解度极限表明可能发生问题。固态二氧化碳可能导致再沸器通道堵塞。干沸腾然后可能导致超过爆炸下限的碳氢化合物局部危险浓度。通过红外分析对二氧化碳进行监测有助于避免发生二氧化碳堵塞问题。或者，可将提取的液样置于透明玻璃细颈真空中并且对液体澄清度进行观察（如果二氧化碳浓度超过 5 ppm，液样将呈乳状外观，并且最终将出现明显的固态二氧化碳薄片），从而对低压塔集液池进行二氧化碳监测。

注意：低温液体涉及极端低温。低温液体及其低温沸腾蒸气可能导致人体组织快速冻结。在对低温液体取样时，应配备适当的个人防护装备。参见 CGA P-12 [7]。

一氧化二氮可能在低压塔集液池液体中浓缩和沉淀[38]。固态一氧化二氮可能导致再沸器通道阻塞。干沸腾然后可能导致超过爆炸下限的碳氢化合物局部危险浓度。按照制造商提供的说明书对空分装置进行操作通常可防止一氧化二氮浓度超过安全运行极限。可通过定期监测（例如批次试验或澄清度试验）对一氧化二氮进行检测。如果一氧化二氮浓度升高，有必要更加频繁地对低压塔集液池液体进行一氧化二氮监测。

二氧化碳在液氧中的溶解度极限约为 5 ppm（在大气压力条件下）。一氧化二氮在液氧中的溶解度极限约为 140~160 ppm（在大气压力条件下）（参见 AIGA 035/06 [38]）。这些溶解度极限随着压力的升高而提高。如果同时存在二氧化碳和一氧化二氮，它们将形成固溶体。固溶体的实际重要性在于，如果同时存在这两种组分，每一种组分的溶解度极限较低[61、62]。为了确定观察到的沉淀物的成分，有必要进行更加详细的分析。

12.11 氩分离和纯化

12.11.1 过程描述

在空分装置冷箱中，氩分离和纯化的第一步是在低压塔中间将氩浓缩到大约 8~20%。然后将氩导入侧蒸馏塔，将氩进一步浓缩到至少 96~99.9%。在配有填充塔的某些空分装置中，侧塔的塔顶产品无需进一步脱氧脱水。在大部分其它空分装置中，粗氩中的氧含量为 0.1~4%，需要在粗氩纯化系统中进行进一步处理。最常用的技术是与氢发生催化放热反应从而将氧脱除到痕量水平（脱氧）。采用氢进行再生的吸氧剂是一项不太常用的技术。

在脱氧之后，可采用最终蒸馏程序来脱除氩中的氢和痕量氮。

12.11.2 危险

在粗氩纯化系统中使用氢涉及以下危险：

- 氧含量超过 4% 的气体与浓度高于 4% 的氢将形成潜在爆炸混合物。应采取特殊预防措施以避免氢浓度和氧浓度同时超过 4%。在大部分脱氧装置中，氢浓度几乎总是超过 4%，因此必需对粗氩中的最高氧含量进行限制。
- 如果粗氩中的氧含量过高，由于反应将产生热量，因此催化反应器可能过热并且超过设计温度。如果有必要从脱氧装置出口对不含氧的氩进行再循环，从而将氧含量降至安全极限。如果氧浓度超过设备制造商规定的最高容许浓度，宜将反应器停机。如果制造商没有规定最高容许浓度，通常将 2% 作为安全氧浓度。在氩纯化系统的开机过程中，在引入氢之前，粗氩中的氧含量应低于氧阈限。
- 放热反应可能导致温度超过 1000°F (538°C)。宜安装一个高温停机装置以保护容器和管道。通常不对反应器进行保温以消散热量。应在反应容器和高温管道周围设置适当的防护障以保护工作人员。
- 氢宜对反应器排出的氢浓度进行监测。如果氢浓度超过制造商建议的极限，宜采取适当的措施从而将氢浓度降至安全水平。粗氩纯化系统的供氢系统应安装自动双隔断阀泄放系统，从而在系统停机过程中对氢进行隔离。
- 应防止氢迁移到空分装置的含氧段中。应采用适当的隔离系统（例如止回阀和自动隔断阀）。氩纯化系统应采用单独的吹扫和处置集管，以防止氢通过这些集管进入空分装置排放口。
- 在采用吸气剂的空分装置中，应对粗氩中的氧浓度以及再生气体中的氢浓度进行限制以避免过热。过热将对吸气材料造成不可逆的损坏。
- 氢是一种易燃气体，燃烧时发出肉眼看不到的火焰，在对氢进行处理时要求采取特殊预防措施。参见 CGA G-5《氢》、CGA G-5.4《客户现场的氢管道系统标准》、CGA G-5.5《氢排放系统》和 CGA P-28《散装液态氢系统风险管理计划指导文件》[63、64、65、66]。
- 用于氩纯化的氢有许多来源：纯气体或液体、离解氨、甲醇、电解池、精炼装置或化工装置排气。氢纯度应在容许极限内。痕量污染物可能对材料选用和产品纯度产生影响并且/或者导致反应器催化剂或吸气材料中毒。
- 干燥器系统应正确运行以防止水分夹带从而导致下游低温设备冻结。

12.12 不凝气体吹扫

空气中的低沸点痕量污染物（例如氢、氦和氖）在高压塔顶浓缩。低沸点污染物可能充分浓缩从而导致再沸器冷凝器性能降低。可采用以下流体脱除这些污染物：

- 从高压塔抽出的气态工艺流；或者
- 再沸器冷凝器排出的氮流（这股氮流通常被导入进入低压塔的废气或工艺流或者低压塔排出的废气）

12.13 冷箱清洗

需要对油和/或其它碳氢化合物可能积聚的空分装置进行清洗。关于清洗材料和规程的详细信息，参见 AIGA 057/08/AIGA 012/04 和 CGA G-4.8 [2、31、58]。

12.14 液氧的安全保持时间

运行条件可能要求将冷箱停机并且保持在冷备用条件下。如果液体存量在冷备用过程中得到保持，可更加快速地重新开机；但是，热泄漏将蒸发这个液体存量中的某些液体，从而导致污染物在剩余液体中浓缩。关于安全冷备用和重新开机规程，参见制造商提供的说明书和/或 AIGA 035/06[38]。

12.15 主换热器中的空气液化

主换热器冷端的空气液化可能导致危险的情况。大部分切换式换热器在设计上不适合于空气液化，宜在运行过程中防止空气液化。形成的液体富含氧（氧含量 35~40%），并且可能含有高浓度大气污染物（例如 C₂ 和 C₃ 碳氢化合物）。除非空气环路的所有部件在设计上可确保液体直接和连续流入蒸馏塔，否则可能导致高度反应性的混合物积聚。

12.16 工艺扰动

宜考虑到工艺扰动对下游设备、管道和液体使用产生的影响。

12.16.1 富氧

对于氩、氮或由于泄漏或空分装置装置扰动而可能富含氧的其它流体，宜安装分析警报和停机系统。空气或惰性气流富氧可能导致燃烧危险。在扰动过程中可能富含氧的工艺流包括：

- 空气或氮再循环流
- 再生气流
- 氮产品流
- 导入氩纯化系统的粗氩

12.16.2 缺氧

如果采用氮源作为仪表空气系统的后备，宜注意避免窒息危险的可能性。宜安装系统警报器从而提醒工作人员注意仪表空气系统中存在氮（参见 5.3）。

12.16.3 异常低温

在许多应用中，在低温液体或气体排出冷箱之前，在换热器中采用其它加热介质对低温流体或气体加热。如果这个热源损耗，低温液体或气体可能被导入不适合于低温液体或气体的设备或过程，从而导致碳钢脆化和失效。宜采用安全仪表系统（SIS）来防止这种潜在危险。

易受低温扰动影响的过程包括那些对主换热器中的加压液氧以及冷箱换热器排出的工艺气体进行沸腾的过程。

当空分装置停机时，应关闭暖端阀门。如果停机时间超过几个小时，应对暖端温度进行监测以确保暖端温度高于产品管道脆化温度（通常是 -20°F [-29°C]）。如果温度过低，宜对液体进行排放。

警告：碳钢低温脆化可能导致管道破裂，从而导致工作人员受伤或设备损坏。宜特别注意避免发生脆化。

12.16.4 其它工艺扰动和停机

如果出现某些异常运行条件，宜立即采取纠正措施从而使冷箱恢复正常运行条件。如果无法在规定的时间内恢复正常运行条件，应将冷箱停机。连续异常运行可能导致工作人员受伤、设备损坏或者在现场以外导致重大后果。恢复正常运行条件的时间要求由制造商确定并且因每一种异常运行条件而异。

可能导致停机的异常运行条件包括：

- 低压塔集液池液体中的高浓度碳氢化合物和/或乙炔[38]
- 低压塔集液池液体和/或预纯化器出口中的高浓度二氧化碳[38]
- 再沸器中的低液位和高液位[38]
- 高压塔中的高液位
- 再沸器集液池排出的低液体吹扫速率[38]
- 泵液氧换热器。每一个制造商都规定了运行极限以确保这些换热器的安全运行（参见 AIGA 057/08 [2]）。这些极限包括：
 - 最低氧压力
 - 最低空气压力

- 最低空气流率
- 最低氧流率
- 空气与氧之间的压差
- 进入冷箱的高温空气
- 下流再沸器循环泵的低流量

13 控制系统

13.1 仪表系统功能

要求采用仪表系统来执行低温空分装置的安全相关功能和传统控制功能[3]。系统结构包括具有继电器逻辑的简单气动控制回路乃至可进行自动化开机和停机以及无人值班和远程运行（根据复杂的控制算法）的尖端计算机控制系统。仪表系统可分为以下三个主要功能：

- 临界安全系统，用于防止：
 - 有毒或危险物质失控泄漏
 - 火灾
 - 爆炸或能量突然释放
- 可能导致雇员、承包商或现场以外的人员死亡或重伤或者严重的环境、现场或社区影响的其它意外事件，需要立即对此作出响应
- 运行安全系统，用于防止可能导致工作人员轻伤、有限的设备损坏或现场以外的轻微影响的意外事件
- 用于例行装置运行和设备防护的例行装置运行控制系统

13.2 临界安全系统

应提供失效保险的临界安全系统。任何临界部件失效都应导致采用预定方式将系统停机和隔离。应采用密码、钥匙锁或其它方法以防止临界安全系统被意外改动。

临界安全系统可独立于例行装置运行所需的控制系统。临界安全系统可能还要求采用重复的临界部件或功能来提供冗余度。如果能够证实例行装置控制系统失效不会对临界安全系统产生影响，临界安全系统可与例行装置控制系统共用部件。

应对临界安全系统的正确运行进行核实并且在相关文件中对此进行记录：

- 在控制系统初始试运行和开机过程中
- 在对系统进行维修之后
- 每隔一段时间
- 在长时间停机之后

对临界安全系统（其中包括临时运行的旁通功能）进行的改动应执行形成文件的变更管理（MOC）规程（其中包括由技术适任人员进行评审并且获得相关人员的批准）（参见 18.3）。

应提供一个外部超驰控制系统（一个独立于装置控制系统的装置紧急停机系统），用于立即将装置部分或全部停机，从而保护工作人员并且减轻重大运行安全事件导致的潜在后果。外部超驰控制系统应要求采用独立和安全的方式进行手动重设以防止意外重新开机。应对外部超驰控制系统进行明确标识，并且确保装置工作人员了解外部超驰控制系统的位置。

13.3 运行安全系统

应提供与例行装置运行所需的控制系统相独立的运行安全系统。宜采用密码、钥匙锁或其它方法以防止运行安全系统被意外改动。

应对运行安全系统的正确运行进行核实：

- 在控制系统初始试运行和开机过程中
- 在对系统进行维修之后
- 每隔一段时间
- 在长时间停机之后

对运行安全系统（其中包括临时运行的旁通功能）进行的改动应执行形成文件的变更管理规程（其中包括由技术适任人员进行评审并且获得相关人员的批准）（参见 18.3）。

应提供一个独立于装置控制系统的外部超驰控制系统，用于立即将选定的设备停机，从而保护工作人员并且减轻安全事件导致的潜在后果。外部超驰控制系统宜要求采用独立和安全的方式进行手动重设以防止意外重新开机。应对外部超驰控制系统进行明确标识，并且确保装置工作人员了解外部超驰控制系统的位置。

宜考虑提供失效保险的运行安全系统，以确保任何临界部件失效都将导致采用预定方式将系统停机和隔离。

13.4 例行装置运行

应提供例行装置运行控制系统。虽然例行装置运行控制系统通常无需冗余部件或失效保险运行，但是应将良好工程和设计实践纳入例行装置运行控制系统。

宜对例行装置运行控制系统的正确运行进行核实：

- 在控制系统初始试运行和开机过程中
- 在对系统进行维修之后
- 每隔一段时间

对例行装置运行控制系统进行的改动应执行形成文件的变更管理规程（其中包括由技术适任人员进行评审并且获得相关人员的批准）（参见 18.3）。

13.5 无人值班或部分有人值班运行

计算机控制系统可确保低温空分装置在无人值班或最低人员配置情况下的安全运行。无人值班或最低人员配置运行对控制系统的条件监测和反应能力提出了更高的要求，而全自动化设施则没有这些要求。应进行专门的设计，将全自动化设施日常处理的工艺条件响应纳入无人值班或最低人员配置设施的控制中。

仪表系统在设计上应确保在发生意外工艺扰动或停机时，无需任何手动干预即可安全地将过程和空分装置设备停机并且确保其安全。

无人值班设施具有较高的自动化水平（特别是设备自动开机）。当设施有人值班时，应加以特殊考虑以防止工作人员在这种情况下受伤。还应考虑哪些条件可防止设备自动重新开机。

宜对其它工艺和设备条件监测加以考虑。还宜考虑对选定的工艺变量和/或设备状态或条件进行远程监测。

应提供一个经过适当设计的紧急通知系统。紧急通知系统应将异常事件（例如空分装置停机）通知现场以外的工作人员。如果仅有一人位于空分装置现场，应提供一个通知系统从而将紧急情况（例如人员伤亡）通知相关工作人员。

13.6 远程运行

和无人值班运行一样，计算机控制系统可确保设施远程运行安全。远程运行与无人值班运行之间的区别在于，远离设施现场的工作人员可通过通讯线路将设备开机和/或停机或者对过程控制点进行改动。

应采用适当的密码和软件安全规程来提供安全防护，以防止未经授权擅自接近和操作控制系统，从而确保只有经授权人员可进行改动。

宜对允许远程工作人员进行的改动类型（其中包括防止远程重新开机的条件）加以考虑。如果在进行改动时通讯中断，宜对控制系统在这种情况下的运行加以考虑。

由于可对设备或工艺进行远程变动，因此当设施有人值班时，应加以特殊考虑以防止工作人员在这种情况下受伤。当设施有人值班时，应提供规程从而在这种情况下确立完全就地控制。同样，当工作人员离开设施时，还需要提供规程从而在这种情况下重新确立远程控制。

13.7 计算机控制系统的额外考虑因素

电源波动和中断可能导致计算机控制系统受到损坏。为了尽量减轻这些条件对控制系统产生的影响，宜考虑采用适当的电源调节设备和设计（例如电压调节器、系统接地和不间断电源）。系统硬件、软件和现场仪表在设计上应考虑到电源中断并且确保空分装置的安全停机和隔离。

如果采用计算机控制系统，宜对设定点变动、警报确认、设备停机和开机进行自动记录。

计算机控制系统易出现常见失效导致的问题。为了尽量减轻这些影响，宜对以下因素加以考虑：

- 输入和输出信号分组
- 冗余操作界面装置
- 部件之间的通讯中断

计算机控制系统宜对那些对系统运行产生重大影响的输入进行核实，例如：

- 删除文档
- 机器开机
- 范围以外的数字输入
- 对设定点改动率进行极限

这通常要求第二个信号以确认请求采取的措施。良好实践是在现场保存一份控制系统方案的最新版本。

13.8 失效保险系统的额外考虑因素

在失效保险系统中，关键部件失效将导致采用预定的安全方式将系统停机和隔离。可通过系统设计或一系列改进/措施来提供失效保险，其中包括：

- 监视装置/环路
- 选择致动器失效模式（失效打开/失效关闭）
- 内部/外部诊断
- 采用通电运行/断电跳脱信号转换

14 产品处理设备

产品处理设备涉及的危险取决于产品的性质以及必须在什么条件下对产品进行处理。每一个系统都应与相关温度、压力和流体相适合。

14.1 液体储存容器

由于低温储槽涉及极端低温，因此这些储槽要求采用特殊设计和保温方法。只应由掌握这项技术、熟悉适用规范并且具备行业经验的制造商进行这些系统的设计和制造以确保安全和完整性。参见 CGA P-25《平底液氧/液氮/液氩储槽系统指南》和 API 620《大型焊接低压储槽的设计与施工》[68、69]。

低温储槽通常由采用适当的低温材料制成的内槽和碳钢外槽组成。在内槽和外槽之间的环形空间中填充保温材料，从而尽量减少低温液体热泄漏和蒸发。

最常用的两种低温储槽是：

- 在环形空间中填充保温材料并且采用干氮气进行吹扫的低压平底储槽或球形储槽（这种储槽设计通常用于现场安装的大型固定式储槽）
- 在环形空间中采用干粉/真空或超保温材料/真空的真空保温储槽（这种储槽设计通常是工厂预制的并且在中压或高压条件下运行）

低温液体储存容器的运行涉及以下危险：

- 环形空间中的低温液体泄漏
- 环形空间中的真空损耗（仅真空保温储槽）
- 环形空间中的吹扫气体损耗（仅平底储槽）
- 内槽过量充装
- 内槽超压
- 环形空间超压
- 在内槽中形成真空
- 在环形空间中形成真空（仅平底储槽）
- 液体溢漏和形成蒸气云
- 快速冷却导致的机械应力

关于平底储槽涉及的这些危险以及如何减轻这些危险，参见 CGA P-25 [68]。虽然 CGA P-25 的适用范围是平底储槽，但是 CGA P-25 通常也适用于真空保温储槽[68]。关于真空保温储槽的其它信息，参见 CGA P-12、CGA P-40《关于分析和防止低温储槽再充装过程中的超压的计算方法》和 CGA PS-8《CGA 关于低温储槽在操作人员值守的再充装过程中的超压防护的立场声明》[7、70、71]。

大部分空分装置都提供了用于输送液体的公路槽车或铁路槽车的装车 and/或卸车设施。参见 CGA P-31、AIGA 040/06《低温液体槽车装卸良好规范指南》和 CGA P-35《低温氧、低温氮和低温氩槽车卸车指南》[57、67、72]。

宜采取特殊预防措施以防止低温运输容器超压。关于超压防护，参见 CGA PS-14《CGA 关于低温运输容器在操作人员值守的再充装过程中的超压防护的立场声明》[73]。

14.2 高压气体储存容器

由于高压气体储存容器的用途，因此这些容器易受循环应力的影响。宜按照适用规范进行高压气体储存容器的设计、施工和检验。这些容器经常位于腐蚀性环境中，宜定期进行外部腐蚀检查。

高压气体储存容器有时从一个现场被迁移到另一个现场。在这种情况下，宜对设计和运行历史进行调查，以确保容器适于预定用途。在将迁移后的容器重新投运之前，宜针对预定用途对容器进行仔细的检查 and 清洗。

宜采用泄压装置对容器进行防护，从而对外部热源导致的超压进行极限。参见 CGA S-1.3《泄压装置标准 — 第 3 部分 — 压缩气体固定式储存容器》[74]。

由于焦耳-汤姆逊冷却，从高压储存容器流向低压管路的气体可能导致大幅温降。应注意避免下游管道达到脆化温度。

14.3 液体蒸发器

液体蒸发器涉及以下危险：

- 如果含有液体的蒸发器被堵塞而且热输入被保持，压力可能大幅和快速升高。应安装适当尺寸的泄压阀。

警告：被截留的低温液体导致的超压可能导致管道破裂，从而导致工作人员受伤或设备损坏。宜特别注意确保在两个阀门（其中包括止回阀）之间安装泄压装置（其中包括止回阀），以泄放被截留的低温液体导致的压力。

- 在对氧进行沸腾时，碳氢化合物可能积聚。可通过适当的管道设计或者定期加温到环境温度以避免碳氢化合物积聚。
- 如果蒸发器的热源损耗或者如果超过蒸发器的流量，蒸发器的排出温度可能非常低，从而可能导致下游设备和管道受到损坏。关于如何减轻危险，参见 15.7。

警告：碳钢低温脆化可能导致管道破裂，从而导致工作人员受伤或设备损坏。宜特别注意避免发生脆化。

15 空分装置管道

15.1 空分装置管道的一般设计考虑因素

空分装置管道系统应与温度、压力和流体清洁度相适合。在设计中应考虑到 ASME B31.3《化工装置和炼油装置管道规范》以及其它全国规范和规定[75]。

结构材料应与预定用途兼容（参见 6.3）。

15.2 止回阀的一般设计考虑因素

在空分装置的设计过程中，宜确定止回阀失效导致的回流后果。潜在危险后果包括但不限于超压、纯度偏差或温度偏差。如果失效后果涉及重大危险而且危险分析采用止回阀来提供防护层，宜实施一项机械完整性方案。这个方案可确保止回阀能够继续正确运行。可将定期检查和/或试验包括在这个方案中。检查和/或试验间隔时间取决于止回阀的用途以及失效后果。

15.3 氧管道危险

氧管道系统涉及某些危险。关于氧管道系统的独特设计和运行要求，参见 6.3、15.9.2、ASTM G-88 和 AIGA 021/05 [28、50]。

15.4 泄压装置

15.4.1 泄压装置的一般考虑因素

化学加工装置要求安装泄压装置。关于泄压装置的要求，参见 ASME PTC 25-2001-2002《泄压装置》、API RP 520《精炼装置中的泄压装置的设计、选型和安装，第 I 部分 — 设计和选型》、API RP 520《精炼装置中的泄压装置的设计、选型和安装，第 II 部分 — 安装》和 API RP 521《泄压和减压系统指南》(ANSI/API 521-1997) [76、77、78、79]。

良好实践包括但不限于：

- 使泄压装置排放口远离工作区域或其它设备

- 当泄压装置运行时，提供抗反作用力的支架
- 对进口管和出口管进行尺寸设计以避免压降超过规范极限
- 对泄压装置排出口采取防风化措施
- 确保机罩排气口不受限制
- 采用不含油的干空气或氮气定期进行试验

15.4.2 空分装置泄压装置的设计考虑因素

要求提供适当尺寸的泄压装置以防止由于被蒸发的低温流体的体积膨胀而导致超压。有时可能要求提供大尺寸泄压装置（取决于可能被截留在系统中的液量以及热量被传递到低温液体中的速率）。导致超压的原因包括：

- 真空保温损耗
- 工艺扰动条件
- 环境热泄漏
- 被堵塞的工艺设备和蒸发器的高热输入
- 暖温气体被引入低温工艺设备
- 低温流体在被引入暖温设备时快速蒸发
- 低温流体在两个阀门之间被截留

警告：被截留的低温液体导致的超压可能导致管道破裂，从而导致工作人员受伤或设备损坏。宜特别注意确保在两个阀门（其中包括止回阀）之间安装泄压装置（其中包括止回阀），以泄放被截留的低温液体导致的压力。

含氧系统应采用相容的材料。

应将氧和易燃流体的泄压装置排出口管接到室外的安全地点。对于封闭空间中的系统，如果惰性流体排放量将导致封闭空间中的氧含量降至危险水平，应将惰性流体排放口管接到安全地点。

泄压阀的位置宜避免排放的流体对工作人员或其它设备造成冲击。泄压阀不宜排入空分装置工作人员经常出入的工作区域或运行区域。

排放口在设计上应确保被排放的流体消散以防止形成可能导致工作人员受伤或设备损坏的富氧、缺氧、易燃或低温气氛。

泄压装置和管道设计宜考虑到泄压装置运行导致低温的可能性。排放口的方位应防止低温液体或气体对碳钢管道或设备造成冲击并且导致这些管道或设备破裂。

宜定期所有的低温泄压装置进行积冰检查。宜立即消除积冰，否则可能妨碍泄压装置的正常运行。

15.5 低温管道

低温液体管路与通常不流动的暖温管件之间的所有管道连接都应设置弯头以产生气封，从而防止死端沸腾和冷量迁移。典型示例包括：

- 解冻阀
- 排液口
- 泄压装置
- 仪表和传感管路

- 蒸发器和泵进口
- 批次取样管路

气封将低温液体与暖温管件分开。接入低温管路的管道宜有充分的垂直上升高度以产生气封。对于冷箱内部的管道连接，特殊设计的管道回路可确保产生气封并且防止液体在下游管道中积聚。垂直上升段可位于管路中的任何部位以产生气封。

在冷箱中设有低点的所有大口径管道都宜安装一个排液管路。

空分装置过程的许多部分在正常运行过程中不会暴露于富氧流体。但是，这些部分在工艺扰动、开机和停机过程中可能暴露于氧。通常实践是对所有的氧用低温管道和设备进行清洗。

15.6 死角

容器、工艺蒸发器、低温泵、排放口或含有富氧液体管道在设计上宜消除死角。死角可能导致干沸腾以及碳氢化合物积聚在残留富氧液体中。如果无法在设计上消除死角，宜进行连续吹扫或定期排放。

15.7 碳钢管道

暴露于空分装置扰动或液体蒸发系统失效导致的低温（ -20°F [-29°C]) 可能导致碳钢管道受到损坏。应提供温度仪表系统来消除低温源（例如通过关闭隔离阀或将泵停机）（参见 12.16.3）。接入隔离阀的工艺管道应适合低温运行。宜对响应时间加以考虑以防止低温条件进入下游碳钢管道。

警告：碳钢低温脆化可能导致管道破裂，从而导致工作人员受伤或设备损坏。宜特别注意避免发生脆化。

15.8 排气

在空分装置的布局上，宜确保在工作人员在从事运行和维修活动时经常出入的所有区域中存在正常大气氧含量。将排气管路接到室外来实现以上目标。宜对氮排气系统相对于冷箱平台和爬梯的位置加以考虑。此外，由于运行设备中可能包括油润滑部件，因此运行设备不宜暴露于富氧气氛。

警告：富氧或缺氧羽烟可能从排气源移动很长的距离。对于大型空分装置，这个移动距离可能更长。对于大型设施和/或设有多个空分装置的设施，需要加以特别注意。

由于泄漏、气体迁移或排气不当，在操作人员使用的控制室和其它封闭空间中，存在危险气氛的潜在危险。可采用以下一种或多种方式来减轻这项危险：

- 将仪表或分析样气吹扫排放到控制室以外
- 安装大气纯度分析仪
- 提供充分的通风条件（其中包括高流量强制通风）

如果通风系统失效或者为了发出危险大气成分警报，有必要安装警报器。

15.9 产品输送

15.9.1 减压站

如果供气压力高于用气压力，将使用减压站。某些减压阀通过被调节的产品获得控制气体。如果是氧气，与氧接触的所有材料（其中包括控制机构中的材料）都应与氧相容。否则应将氮气或空气用作应控制气体。

15.9.2 过高氧流量隔离

氧输送系统通常采用过高氧流量隔离阀。如果使用点并不处于空气装置操作人员的直接控制下或者输送系统较长或覆盖范围较大，外部源（例如道路修理、挖掘和重型设备）可能导致破裂或损坏，宜在紧接在最

后一个供应源的下游安装自动切断阀。在设计上宜确保在输送系统重大失效导致的过高流量或低压条件下将这个切断阀关闭。

16 停机规程

在空分装置停机时（计划内或计划外停机），通常执行相关规程从而将空分装置保持在安全条件下。宜制订一份措施清单以确保空分装置安全，例如：

- 切断接入储槽的产品管路
- 确保所有的压缩机和其它旋转设备安全
- 确保管路后备系统正常运行
- 按要求排放液体并且确保产品处置系统正常运行
- 确保低温吸附器和预纯化吸附器安全

16.1 冷箱停机

制造商提供的说明书可能要求执行补充安全规程（取决于空分装置的种类、停机原因和预期停机时间长度）。关于进一步的建议，参见 12.16 和 AIGA 035/06 [38]。

对于低温吸附器，流体大幅温升可能导致污染物突然解吸附，从而将污染物释放到下游设备中。这是一项重大危险。因此，应在停机过程中将低温吸附器保持运行温度下或者对低温吸附器进行再生。

在停机条件允许的情况下，应对预纯化装置的离线容器进行完全再生以确保预纯化装置安全，从而确保在空分装置后续开机时将经过适当再生的吸附床投运。

16.2 液体和气体处置

空分装置排出的液体不应排放到空分装置现场地面，而是应管接到适当的处置系统。典型的处置系统包括：

- 冷却塔风机排气口的喷液集管
- 配有适当的蒸发系统的排放槽
- 换热器
- 风机蒸发器

不宜将富氧液体管接到冷却塔风机系统。

按照液体处置和解冻排气管道配置的要求，应注意避免在可能含有大量碳氢化合物（特别是乙炔）的富氧液体和解冻气体的处置过程中发生任何接触。可能含油的所有解冻出口（例如在使用润滑压缩机时，从换热器排出的空气）应设有独立的排气系统。

处置管道系统可将惰性和富氧液体分开，以防止空分装置产品交叉污染。液体处置系统宜设有一个低点排液口，以避免碳氢化合物积聚。

应对打开的手动排液阀和排气阀进行就地监控，以确保可按要求采取纠正措施。

所有的大型气态氧或气态氮排放口宜位于室外，建议将排气口的方位朝上。如果排气口位于室外，应避免在封闭区域和工作区域中或进口管道附近存在高浓度氧或氮。

低温液体排放或蒸发可能形成浓雾（即使是在低湿度条件下）。这将导致能见度大大降低从而导致危险情况。宜特别注意避免这些浓雾对道路和交通产生影响。

16.3 空分装置解冻

通常有必要进行解冻以脱除在冷箱各个部位中积聚的污染物。制造商对解冻规程作出了详细规定。关于解冻规程概述，参见 AIGA 035/06 [38]。

通常在定期解冻停机过程中进行维修检查、修理或改动。良好实践是进行部分解冻从而对空分装置进行适当加温、实施维修、然后在对空分装置进行冷却之前完成解冻。最终解冻宜脱除在停机过程中进入开口的含水空气而导致在系统中存在的所有积水。

宜注意避免过高的温度和热应力。解冻温度宜与空分装置的结构材料相适合并且符合空分装置管道设计，通常不宜超过 180°F (82°C)。对于采用铜管和软焊接头的老式空分装置，由于老化可能导致接头强度降低，因此解冻温度不宜超过 150°F (65.6°C)。

在可供干解冻气体的空分装置中，宜对排气的露点进行检查，建议最低值是 -40~-90°F (-40~-68°C)。

在仅有湿解冻气体的空分装置中，应尽可能降低解冻气体的相对湿度。通过后冷却器将空气压缩机保持在尽可能高的压力水平上，然后降低压力并且在专用加热器中对被解冻的气体进行加热，采用这种方式来降低相对湿度。最后，将解冻气体导入冷箱。解冻过程将持续，直至所有的排气口、排液口和仪表管路达到高温。

17 修理和检查

17.1 一般维修考虑因素

将空分装置设备保持在良好的机械和电气工作条件下是很重要的。宜对每一个设备制订一项预防性维修计划。最初宜根据供应商的建议来确定维修频率，并且最终根据历史数据来确定维修频率。

宜仅允许合格人员对空分装置设备进行维修。将所有的间隙保持在制造商建议的范围内是非常重要的。

未经制造商或其他合格工程人员的批准，不宜使用替换部件或同等级部件。

17.2 监督控制

对于全体工作人员，通常宜采用有助于对作业的安全因素和潜在危险进行临界分析的安全作业许可证和上锁/挂牌规程，对冷箱或空分装置中的所有作业进行控制。

17.3 施工和修理的特殊考虑因素

在空分装置现场进行施工或修理过程中，当空分装置全部或部分运行时，应特别加以注意。这两种情况都可能导致危险。在空分装置现场进行施工或修理过程中，空分装置操作人员必须对空气装置安全运行的所有通常方面进行处理，并且对在施工或修理过程中运行空分装置而导致的特殊危险进行处理。

施工人员宜熟悉空分装置安全规定并且了解所有的潜在危险（特别是这个行业涉及的特殊危险）。

17.4 冷箱危险

如果有必要进入冷箱进行修理或改动，应考虑到以下危险：

- 应执行封闭空间进入规程，对将进行作业的冷箱内部或管道或容器内部存在的富氧或缺氧气氛进行处理
- 如果将在距离地面很高的高度上进行作业，应对高空作业进行处理
- 高压或被截留的低温液体，并且应对冷箱保温加以考虑和处理

在进入冷箱内部进行作业之前，宜采取以下措施：

- 排放所有的液体

- 解冻
- 采用双隔断阀泄放阀或法兰盲板对产品液体和气体管路进行有效隔离
- 采用双隔断阀泄放阀或法兰盲板对外壳吹扫气体进行有效隔离
- 减压
- 采用空气进行吹扫，然后进行气氛监测

在特殊情况下，在不完全加温的条件下进入冷箱是不可避免的。这是一项极端危险的活动。应仔细和充分考虑到冷箱环境（例如有限的可见度、低温、富氧或缺氧气氛）的额外危险。

在冷箱外壳中开始进行任何作业之前，应拆除部分或全部冷箱保温材料。保温材料的拆除程度取决于冷箱采用的保温材料类型以及将进行作业的设备位置。宜将采用干粉保温材料（例如珍珠岩、蛭石和硅酸盐）的冷箱完全清空。关于干粉保温冷箱的安全处理指南，参见 AIGA 032/08 [59]。

对于采用棉类保温材料的冷箱，可首先采用空气对保温空间进行彻底吹扫，然后在保温材料中开挖通道，从而进入冷箱进行局部修理。应对这些通道提供充分支撑以防止保温材料塌陷，并且采用新鲜空气对这些通道进行有效通风。对矿棉进行处理的工作人员宜始终配备适当的防护服、手套和护目镜以避免皮肤和眼睛刺激。还宜定期对这种保温材料进行水分检查。宜将受潮的矿棉报废，采用新鲜矿棉进行更换。在矿棉保温冷箱内部进行这些作业属于封闭空间作业，宜按照 17.5 中所述的要求进行这些作业。

17.5 在富氧或缺氧气氛中作业的危险

在进入可能存在富氧或缺氧气氛的任何封闭空间（例如冷箱外壳、容器、储槽和管道）或其它封闭区域或通风不良区域之前，应采取严格预防措施以防止重伤甚至死亡。应对所有这些封闭空间中的气氛进行检查，禁止没有配备个人防护装备的人员进入氧浓度不在 19.5～23.5% 这个范围内的气氛。关于进一步的指南，参见 AIGA 008/04、AIGA 005/04、CGA P-12、29 CFR 1910.146、CGA SB-2、CGA SB-15 和 CGA P-39 [7、8、9、10、15]。

危险：在不执行相关规程的情况下进入存在富氧或缺氧气氛的区域将导致重伤甚至死亡。

17.6 清洗

氧清洗具有特殊要求。在将经过更换或修理的设备、管道和容器重新投运之前，应对所有这些设备、管道和容器进行适当的清洗。所有的更换部件都应与氧相容，并且应对这些部件进行氧用清洗。应对用于拆除和更换部件的所有工具进行氧用清洗（参见 AIGA 012/04、CGA G-4.1 和 ASTM G93）[29、30、31]。

空分装置过程的许多部分在正常运行过程中不会暴露于富氧流体。但是，这些部分在工艺扰动、开机和停机过程中可能暴露于氧。通常实践是对所有的氧用低温管道和设备进行清洗。

18 操作与培训

18.1 操作规程

宜按照制造商提供的说明书进行空分装置（其中包括所有的机械部件）的操作和维修。应将这些说明书纳入空分装置操作和维修规程。

应对空分装置工作人员进行操作和维修规程培训。

18.2 应急规程

宜制订关于空分装置操作人员如何对预期紧急条件作出正确响应的规程。潜在紧急条件宜包括空分装置扰动条件、机械故障、电力中断以及对空分装置安全产生影响的环境扰乱和内乱。宜考虑到的紧急条件包括：

- 能量释放
- 低温液体溢漏

- 低温泄漏产生的雾云
- 现场安全威胁（参见 AIGA 003/07《现场安全》）[80]
- 恶劣天气条件（例如台风、飓风或洪水）
- 相邻现场发生的工业事故（例如爆炸、有毒化学品泄漏或有毒气体泄漏）

18.3 变更管理

变更管理规程被用于确保正确和安全地实施变更并且在相关文件中对变更进行记录。应在空分装置现场保存这些文件。设备、控制、软件、规程和设施的所有变更提议都应由技术适任人员进行评审并且获得相关人员的批准，然后才可实施这些变更。这项评审和批准应适用于所有的改动或变更提议（无论是永久、临时或紧急变更）。应对空分装置的所有相关文件（例如过程和仪表图、设备规格说明书和图纸以及操作和维修规程）进行更新。

变更管理涵盖的变更包括：

- 变更控制系统
- 安全系统旁通
- 变更规程和操作说明书
- 在批准的极限以外运行
- 变更工艺技术（例如速率或原材料）
- 变更设备或结构材料
- 变更设备规格
- 修改计算机程序

同型替换是指完全符合被替换的部件的所有设计规格的替换或设计方案。同型替换无需变更管理审批（参见 AIGA 010/04《变更管理》）[81]。

19 参考文献

应适用最新版本，除非另有规定。

[1] Schmidt, William, K. Winegardner, M. Dennehy, and H. Castle-Smith, "Safe Design and Operation of a Cryogenic Air Separation Unit," *Process Safety Progress*, Dec 2001, Vol. 20, No.4, pp. 269-279.

[2] AIGA 057/08 *Safe Use of Brazed Aluminium Heat Exchangers for Producing Pressurized Oxygen*, Asia Industrial Gases Association. www.asiaiga.org

[3] IEC 61511, *Functional Safety—Safety Instrumented Systems for the Process Industry Sector—Part 1: Framework, Definitions, System, Hardware and Software Requirements*, International Electrotechnical Commission, 3, rue de Varembe, P.O. Box 131, CH-1211 Geneva 20, Switzerland. www.iec.ch

[4] *United States Pharmacopoeia and National Formulary*, U.S. Pharmacopoeia, 12601 Twinbrook Pkwy., Rockville, MD 20850. www.usp.org

[5] CGA G-10.1, *Commodity Specification for Nitrogen*, Compressed Gas Association, Inc., 4221 Walney Rd., 5th Floor, Chantilly, VA 20151. www.cganet.com

[6] CGA G-4.3, *Commodity Specification for Oxygen*, Compressed Gas Association, Inc., 4221 Walney Rd., 5th Floor, Chantilly, VA 20151. www.cganet.com

[7] CGA P-12, *Safe Handling of Cryogenic Liquids*, Compressed Gas Association, Inc., 4221 Walney Rd., 5th Floor, Chantilly, VA 20151. www.cganet.com

- [8] Code of Federal Regulations, Title 29 CFR (Labor), Superintendent of Documents, U.S. Government Printing Office, Washington, DC 20402. www.gpoaccess.gov
- [9] CGA SB-2, *Oxygen-Deficient Atmospheres*, Compressed Gas Association, Inc., 4221 Walney Rd., 5th Floor, Chantilly, VA 20151. www.cganet.com
- [10] AIGA 008/04 Hazards of Inert Gases, Asia Industrial Gases Association, www.asiaiga.org
- [11] CSB Safety Bulletin, *Hazards of Nitrogen Asphyxiation*, U.S. Chemical Safety and Hazard Investigation Board, 2175 K Street NW, Suite 400, Washington, DC 20037. www.csb.gov
- [12] CSB Brochure, *Nitrogen-Enriched Atmospheres Can Kill*, U.S. Chemical Safety and Hazard Investigation Board, 2175 K Street NW, Suite 400, Washington, DC 20037. www.csb.gov
- [13] CSB PowerPoint Presentation, *The Hazards of Nitrogen Asphyxiation*, U.S. Chemical Safety and Hazard Investigation Board, 2175 K Street NW, Suite 400, Washington, DC 20037. www.csb.gov
- [14] ANSI Z88.2, *Respiratory Protection*, American National Standards Institute, 25 W. 43rd St., 4th Floor, New York, NY 10036. www.ansi.org
- [15] AIGA 005/04 Fire Hazards of Oxygen & Oxygen Enriched Atmospheres, Asia Industrial Gases Association www.asiaiga.org
- [16] ASTM G63, *Standard Guide for Evaluating Nonmetallic Materials for Oxygen Service*, ASTM International, 100 Bar Harbor Dr., West Conshohocken, PA 19428. www.astm.org
- [17] ASTM G94, *Standard Guide for Evaluating Metals for Oxygen Service*, ASTM International, 100 Bar Harbor Dr., West Conshohocken, PA 19428. www.astm.org
- [18] ASTM A312, *Standard Specification for Seamless, Welded, and Heavily Cold Worked Austenitic Stainless Steel Pipe*, ASTM International, 100 Bar Harbor Dr., West Conshohocken, PA 19428. www.astm.org
- [19] ASTM B241, *Standard Specification for Aluminium and Aluminium-Alloy Seamless Pipe and Seamless Extruded Tube*, ASTM International, 100 Bar Harbor Dr., West Conshohocken, PA 19428. www.astm.org
- [20] ASTM B209, *Standard Specification for Aluminium and Aluminium-Alloy Sheet and Plate*, ASTM International, 100 Bar Harbor Dr., West Conshohocken, PA 19428. www.astm.org
- [21] ASTM B75, *Standard Specification for Seamless Copper Tube*, ASTM International, 100 Bar Harbor Dr., West Conshohocken, PA 19428. www.astm.org
- [22] ASTM B88, *Standard Specifications for Seamless Copper Water Tube*, ASTM International, 100 Bar Harbor Dr., West Conshohocken, PA 19428. www.astm.org
- [23] ASTM B165 VNS 4400, *Standard Specification for Nickel-Copper Alloy (UNSN0400)* Seamless Pipe and Tube*, ASTM International, 100 Bar Harbor Dr., West Conshohocken, PA 19428. www.astm.org
- [24] ASTM B127, *Standard Specifications for Nickel-Copper Alloy (UNS 04400) Plate, Sheet, and Strip*, ASTM International, 100 Bar Harbor Dr., West Conshohocken, PA 19428. www.astm.org
- [25] ASTM B43, *Standard Specification for Seamless Red Brass Pipe, Standard Sizes*, ASTM International, 100 Bar Harbor Dr., West Conshohocken, PA 19428. www.astm.org
- [26] ASTM A53, *Standard Specification for Pipe, Steel, Black and Hot-Dipped, Zinc-Coated Welded and Seamless*, ASTM International, 100 Bar Harbor Dr., West Conshohocken, PA 19428. www.astm.org
- [27] ASTM A106 Grade B, *Standard Specification for Seamless Carbon Steel Pipe for High Temperature Service*, ASTM International, 100 Bar Harbor Dr., West Conshohocken, PA 19428. www.astm.org

[28] ASTM G88, *Standard Guide for Designing Systems for Oxygen Service*, ASTM International, 100 Bar Harbor Dr., West Conshohocken, PA 19428. www.astm.org

[29] CGA G-4.1, *Cleaning Equipment for Oxygen Service*, Compressed Gas Association, Inc., 4221 Walney Rd., 5th Floor, Chantilly, VA 20151. www.cganet.com

[30] ASTM G93, *Standard Practice for Cleaning Methods and Cleanliness Levels for Material and Equipment Used in Oxygen-Enriched Environments*, ASTM International, 100 Bar Harbor Dr., West Conshohocken, PA 19428. www.astm.org

[31] AIGA 012/04 *Cleaning of Equipment for Oxygen Service*, Asia Industrial Gases Association, www.asiaiga.org

[32] NFPA 70, *National Electrical Code*[®], National Fire Protection Association, 1 Batterymarch Park, Quincy, MA 02269. www.nfpa.org

[33] ANSI S12.3, *Statistical Methods for Determining and Verifying Stated Noise Emission Values of Machinery and Equipment*, American National Standards Institute, 25 West 43rd St., New York, NY 10036. www.ansi.org

[34] ANSI S12.5, *Requirements for Performance and Calibration of Reference Sound Sources*, American National Standards Institute, 25 West 43rd St., New York, NY 10036. www.ansi.org

[35] ANSI S12.7, *Methods for Measurement of Impulse Noise*, American National Standards Institute, 25 West 43rd St., New York, NY 10036. www.ansi.org

[36] ANSI S12.9-1988 (R 2003), *Quantities and Procedures for Description and Measurement of Environmental Sound, Part 1*, American National Standards Institute, 25 West 43rd St., New York, NY 10036. www.ansi.org

[37] ASME PTC 36, *Measurement of Industrial Sound*, ASME International, Three Park Ave., New York, NY 10016. www.asme.org

[38] AIGA 035/06 *Safe Operation of Reboilers/Condensers in Air Separation Units (CGA P-8.4)*, Asia Industrial Gases Association, www.asiaiga.org

[39] McKinley, C. and F. Himmelberger, "The Role of Contaminants in Formulating Oxygen Plant Safety Principles," *Chemical Engineering Progress*, March 1957, Vol. 53, No. 3, pp. 112-121. www.aiche.org

[40] Bohlken, S.F., "Heat Exchanger Explosion in a Nitrogen-Wash Unit," *Chemical Engineering Progress*, Vol. 57, No. 4 (April 1961), pp. 49-52. www.aiche.org

[41] Sakai, Y., "This Ammonia Unit Exploded," *Petroleum Refiner*, Vol. 40, No. 1 (January 1961), pp. 178-181. www.gulfpub.com

[42] Haseba, S., T. Shimose, N. Kubo, T. Kitagawa, "Nitric Oxide Explosion," *Chemical Engineering Progress*, Vol. 62, No. 4 (April 1966), pp. 92-96. www.aiche.org

[43] Wenning, U., "Nitrous Oxide in Air Separation Plants," *Reports on Science and Technology*, No. 60 (1998), Linde AG, Abraham-Lincoln-Strasse 21, 65189 Wiesbaden, Germany. www.linde.com

[44] Hardeveld, R.M., M.J. Groeneveld, J.-Y. Lehman, and D.C. Bull, "Investigation of an Air Separation Unit Explosion," *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 14 (2001), pp. 167-180, Elsevier, 6277 Sea Harbor Dr., Orlando, FL 32887. www.elsevier.com

[45] Meilinger, M., "Promoted Ignition-Combustion Tests with Structured Aluminium Packings in Gaseous Oxygen with Argon or Nitrogen Dilution at 0.1 and 0.6 mPa," *Flammability and Sensitivity of Materials in Oxygen-Enriched Atmospheres: Tenth Volume*, ASTM STP 1454, pp. 137-150, ASTM International, 100 Bar Harbor Dr., West Conshohocken, PA 19428. www.astm.org

[46] ASME B19.1, *Safety Standard for Air Compressor Systems*, American Society of Mechanical Engineers, Three Park Ave., New York, NY 10016. www.asme.org

[47] ASME B19.3, *Safety Standard for Compressors for Process Industries*, American Society of Mechanical Engineers, Three Park Ave., New York, NY 10016. www.asme.org

[48] *Standards of the Tubular Exchanger Manufacturers' Association*, Tubular Exchanger Manufacturers' Association, 25 N. Broadway, Tarrytown, NY 10591. www.tema.org

[49] ASME *Boiler and Pressure Vessel Code*, Section VIII, Div 1, American Society of Mechanical Engineers, Three Park Ave., New York, NY 10016. www.asme.org

[50] AIGA 021/05 *Oxygen Pipeline Systems (CGA G4.4)*, Asia Industrial Gases Association, www.asiaiga.org

[51] CGA G-4.6, *Oxygen Compressor Installation and Operation Guide*, Compressed Gas Association, Inc., 4221 Walney Rd., 5th Floor, Chantilly, VA 20151. www.cganet.com

[52] EIGA Doc. 27/ 01, *Centrifugal compressors for oxygen service*, Industrial Gas Committee, Avenue des Arts 3-5, B 1210 Brussels, Belgium. www.eiga.eu

[53] AIGA 048/08, *Reciprocating compressors for oxygen service*, Asia Industrial Gases Association, www.asiaiga.org

[54] W. Schmidt, K. Kovak, W. Licht, and S. Feldman, "Managing Trace Contaminants in Cryogenic Air Separation," AIChE Spring Meeting, Atlanta, GA, March 5-9, 2000. www.aiche.org

[55] *Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer*, United Nations Environment Programme, Ozone Secretariat, P.O. Box 30552, Nairobi, Kenya. www.unep.org/ozone

[56] AIGA 055/08 *Installation Guide for Stationary, Electric-Motor-Driven, Centrifugal Liquid Oxygen Pumps*, Asia Industrial Gases Association, www.asiaiga.org

[57] CGA P-31, *Liquid Oxygen, Nitrogen, and Argon Cryogenic Tanker Loading System Guide*, Compressed Gas Association, Inc., 4221 Walney Rd., 5th Floor, Chantilly, VA 20151. www.cganet.com

[58] CGA G-4.8, *Safe Use of Aluminium-Structured Packing for Oxygen Distillation (EIGA Doc. 701/04)*, Compressed Gas Association, Inc., 4221 Walney Rd., 5th Floor, Chantilly, VA 20151. www.cganet.com

[59] AIGA 032/08, *Perlite Management*, Asia Industrial Gases Association, www.asiaiga.org

[60] AIGA 035/06, *Safe operation of reboilers/condensers in air separation units*, Asia Industrial Gases Association, www.asiaiga.org

[61] Miller, E., S. Auvil, N. Giles, and G. Wilson, "The Solubility of Nitrous Oxide as a Pure Solute and in Mixtures with Carbon Dioxide in Air Separation," AIChE Spring Meeting, Atlanta, GA, March 5-9, 2000, American Institute of Chemical Engineers, 3 Park Ave., New York, NY 10016. www.aiche.org

[62] Meneses, D., J. Thonneller, C. Szulman, and E. Werlen, "Trace Contaminant Behaviour in Air Separation Units," Cryogenics 2000 Conference, Prague, October 2000, International Institute of Refrigeration, 177, boulevard Malesherbes, 75017 Paris, France. www.iifir.org

[63] CGA G-5, *Hydrogen*, Compressed Gas Association, Inc., 4221 Walney Rd., 5th Floor, Chantilly, VA 20151. www.cganet.com

[64] CGA G-5.4, *Standard for Hydrogen Piping Systems at Consumer Locations*, Compressed Gas Association, Inc., 4221 Walney Rd., 5th Floor, Chantilly, VA 20151. www.cganet.com

[65] CGA G-5.5, *Hydrogen Vent Systems*, Compressed Gas Association, Inc., 4221 Walney Rd., 5th Floor, Chantilly, VA 20151. www.cganet.com

[66] CGA P-28, *Risk Management Plan Guidance Document for Bulk Liquid Hydrogen Systems*, Compressed Gas Association, Inc., 4221 Walney Rd., 5th Floor, Chantilly, VA 20151. www.cganet.com

[67] AIGA 040/06 *Good practices guide for loading and unloading of cryogenic liquid tankers*, Asia Industrial Gases Association, www.asiaiga.org

[68] CGA P-25, *Guide for Flat-Bottomed LOX/LIN/LAR Storage Tank Systems*, Compressed Gas Association, Inc., 4221 Walney Rd., 5th Floor, Chantilly, VA 20151. www.cganet.com

[69] API 620, *Design and Construction of Large, Welded, Low-Pressure Storage Tanks*, American Petroleum Institute, 1220 L Street, NW, Washington, DC 20005. www.api.org

[70] CGA P-40, *Calculation Method for the Analysis and Prevention of Overpressure During Refilling of Cryogenic Storage Tanks*, Compressed Gas Association, Inc., 4221 Walney Rd., 5th Floor, Chantilly, VA 20151. www.cganet.com

[71] CGA PS-8, *CGA Position Statement on the Protection of Cryogenic Storage Tanks from Overpressure During Operator-Attended Refill*, Compressed Gas Association, Inc., 4221 Walney Rd., 5th Floor, Chantilly, VA 20151. www.cganet.com

[72] CGA P-35, *Guidelines for Unloading Tankers of Cryogenic Oxygen, Nitrogen, and Argon*, Compressed Gas Association, Inc., 4221 Walney Rd., 5th Floor, Chantilly, VA 20151. www.cganet.com

[73] CGA PS-14, *CGA Position Statement on the Protection of Cryogenic Transport Vessels from Overpressurization During Operator-Attended Refill*, Compressed Gas Association, Inc., 4221 Walney Rd., 5th Floor, Chantilly, VA 20151. www.cganet.com

[74] CGA S-1.3, *Pressure Relief Device Standards—Part 3—Stationary Storage Containers for Compressed Gases*, Compressed Gas Association, Inc., 4221 Walney Rd., 5th Floor, Chantilly, VA 20151. www.cganet.com

[75] ASME B31.3, *Process Piping*, American Society of Mechanical Engineers, Three Park Ave., New York, NY 10016. www.asme.org

[76] ASME PTC 25-2001, *Pressure Relief Devices*, American Society of Mechanical Engineers, Three Park Avenue, New York, NY 10016. www.asme.org

[77] API RP 520, *Sizing, Selection and Installation of Pressure-relieving Devices in Refineries, Part I—Sizing and Selection*, American Petroleum Institute, 1220 L Street NW, Washington, DC 20005. www.api.org

[78] API RP 520, *Sizing, Selection, and Installation of Pressure-relieving Devices in Refineries, Part II—Installation*, American Petroleum Institute, 1220 L Street NW, Washington, DC 20005. www.api.org

[79] API RP 521, *Guide for Pressure-relieving and Depressurizing Systems*, American Petroleum Institute, 1220 L Street NW, Washington, DC 20005. www.api.org

[80] AIGA 003/07 *Site Security*, Asia Industrial Gases Association, www.asiaiga.org

[81] AIGA 010/04 *Management of change*, Asia Industrial Gases Association, www.asiaiga.org

[82] IGC 44/00, *Campaign against Asphyxiation*, European Industrial Gases Association, Avenue des Arts 3-5, B 1210 Brussels, Belgium. www.eiga.eu

[83] EIGA NL 77/03, *Asphyxiation fatalities on a construction site*, Asphyxiation near miss accident in open air, etc., European Industrial Gases Association, Avenue des Arts 3-5, B 1210 Brussels, Belgium. www.eiga.eu