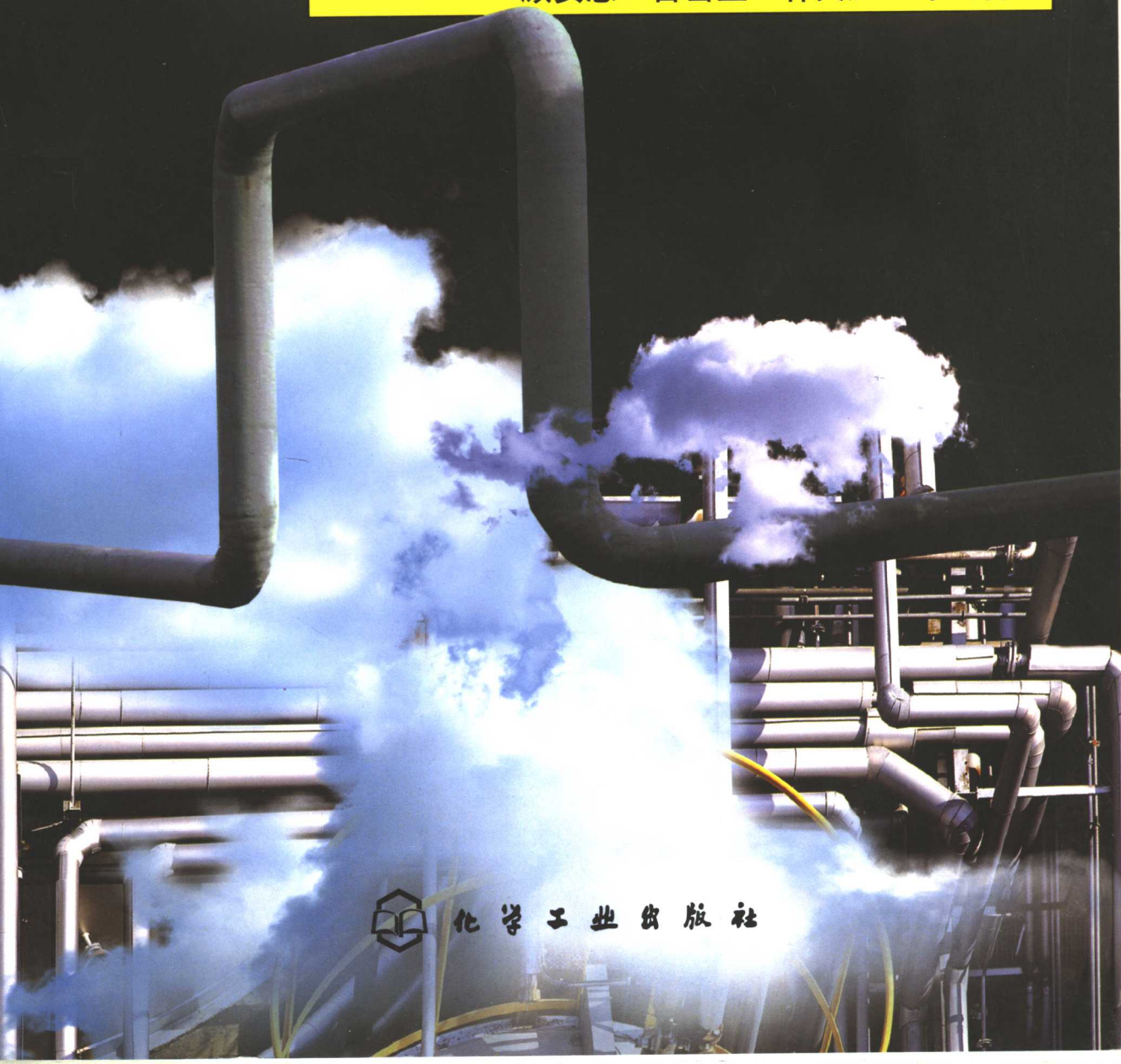


工业气体 集输 新技术

顾安忠 鲁雪生 林文胜 等编著



化学工业出版社

工业气体 集输 新技术

顾安忠 鲁雪生 林文胜 等编著



化学工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

工业气体集输新技术/顾安忠等编著. —北京: 化学工业出版社, 2006. 8

ISBN 978-7-5025-9238-7

I. 工… II. 顾… III. 工业气体-储运 IV. TQ116

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 102592 号

工业气体集输新技术

顾安忠 鲁雪生 林文胜 等编著

责任编辑: 廖叶华

文字编辑: 陈 雨

责任校对: 洪雅姝

封面设计: 尹琳琳

*

化学工业出版社出版发行

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

购书咨询: (010)64982530

(010)64918013

购书传真: (010)64982630

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

北京市振南印刷有限责任公司印刷

三河市万龙印装有限公司装订

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 27 $\frac{3}{4}$ 字数 691 千字

2007 年 1 月第 1 版 2007 年 1 月北京第 1 次印刷

ISBN 978-7-5025-9238-7

定 价: 54.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

前言

工业气体和燃气被称为工业的血液，它既紧扣各工业生产部门的应用实践，又与当今科学研究的热点前沿，如燃料电池技术、清洁排放技术、能源替代技术、航空航天技术以及尖端物理实验技术密切相连，具有广阔的发展前景。

在能源与交通领域，随着能源技术需求的日益增加，要求保护现有资源，探索代用燃料和新能源，改善能源结构，以减小将来的能源危机和改善环境条件。天然气正部分替代煤和石油的使用，并将成为最主要的能源形式。天然气用作城市煤气和汽车燃料，将大大减轻对环境的污染；用作联合循环发电，可大大提高发电效率；用作化工原料，可生产甲醇等化工产品；用作建筑物空调系统的能源，可缓解用电高峰压力，减小电力供应峰谷差，提高能量整体利用效率。氢是最可能继天然气之后的主要能源形式。将来的发动机、发电机、汽车、飞机等的主要代用燃料都会采用氢。其最大优点是可实现清洁排放，对环境无污染。

在航空航天与科学实验领域，火箭等航天器等普遍采用液氧和液氢作为推进剂；液氧和液氢还用于航天器正常运行时燃料电池系统的能源；液氧也用于载人航天器的生命维持系统；液氮、超流氦、固体制冷剂（氢氦甲烷）常用于保障探测宽频道的红外辐射；使用冷氮气的低温风洞使临界超声速区的研究成为可能；在空间反物质与暗物质探索、高能加速器、热氦聚变反应器等尖端科学实验中都需要用到超导磁体，通常要采用液氮或超流氦来冷却。

在工业应用领域，各工业部门是工业气体的最大用户。用空气作原料生产氧、氮、氩等工业气体产品大量用于冶金、电子和化工部门。如高纯度的氧、氮、氩是电子半导体生产中所必需的；液氮在食品、低温粉碎等领域发挥着重要的作用。

在生物医疗领域，现代医院普遍采用医用氧；采用液氮进行低温手术，对器官、组织进行低温保存，均已广泛应用；一氧化二氮（笑气）可用于手术麻醉。

在军事国防领域，液氧用于潜艇 AIP 动力推进系统，大大提高战术性能。

在现代气体应用中，气体集输，即气体的储运和输配已成为关键技术；在有些应用领域，它甚至成为瓶颈问题。气体集输愈来愈被人们重视和关注，并加大投入开展研究攻关，逐渐形成新技术。如在工业气体和燃气的储存方面，有气体超高压储存技术、气体低温液化储存技术、气体吸附储存技术等；在工业气体和燃气运输方面，有储存容器的抗冲击技术、低温容器绝热技术、液化气船技术、LNG 船技术等；在工业气体和燃气输送方面，有气体的高压长距离输送技术、气体管网输送技术、高纯和超高纯气体输送技术等。

本书主编邀请了国内在工业气体和燃气领域卓有成绩的专家学者合力编写，使本书汇集了工业气体集输方面多年来在工程实践和教学中积累的知识和经验，也包含了新取得的科研进展和成果；本书还取材于国内诸多领域研究论文和著作，体现了工业气体集输技术的最新学科水平。

本书涉及的领域较多，学科交叉，覆盖面较宽，在各章节内容性质上有所差异。

参加本书编写的作者有顾安忠（上海交通大学教授，博士生导师），严铭卿（中国市政工程华北设计院教授级高级工程师），郭揆常（上海石油天然气总公司总工程师，教授级高级工程

师), 陈勤俭 (上海液化空气公司高级工程师), 陈江平 (上海交通大学博士, 教授, 博士生导师), 鲁雪生 (上海交通大学研究员), 狄春干 (中国工业气体工业协会副秘书长, 博士, 高级工程师), 林文胜 (上海交通大学博士, 副教授), 郑青榕 (集美大学博士, 副教授) 和巨永林 (上海交通大学博士, 教授)。在本书的编写中还有几位高年级博士生, 如黄志光、王坤等参加工作。

本书由顾安忠主编, 第3章、第5章由鲁雪生撰写, 第1章由林文胜撰写, 第2章2.1由王坤撰写, 2.2、2.5、2.6由黄志光撰写, 2.3由郑青榕撰写, 2.4由陈江平撰写, 第4章4.1由郭揆常撰写, 4.2、4.4由严铭卿撰写, 4.3由狄春干撰写, 4.5由陈勤俭撰写, 郑青榕对第4章进行了编写。另外, 巨永林参与撰写第1章1.1和第2章2.2。

在本书的编著过程中, 作者们分别查阅了大量有关论文, 著作, 工程设计文件, 相关的标准、规范和产品样本等资料。参考文献被列在各章末尾和书中适当位置。在此对所有资料的原作者表示深切的感谢。

另外, 上海交通大学石玉美博士等对本书给予了关心, 也表示感谢。

本书由多人联合执笔, 在内容深度和全书整体性等方面会存在不协调和不一致的地方, 疏漏之处也在所难免, 对此恳请读者不吝指正, 以容日后改进。

2006年8月 作者

目 录

第1章 绪论	1
1.1 氧、氮、氢与氦族气体	1
1.1.1 氧	1
1.1.2 氮	5
1.1.3 氢	7
1.1.4 氦族气体	13
1.2 烃类气体与燃气	18
1.2.1 烷烃	19
1.2.2 烯烃和二烯烃	23
1.2.3 炔烃	27
1.2.4 天然气、石油气及其他混合燃气	28
1.3 其他工业气体	30
1.3.1 碳氧化物	30
1.3.2 氮化物	33
1.3.3 硫化物	37
1.3.4 卤素及其化合物	40
1.3.5 电子气体	49
参考文献	54
第2章 工业气体储存技术	55
2.1 气态储存	55
2.1.1 概述	55
2.1.2 气体压缩工艺和设备	55
2.1.3 气体储存设备	58
2.2 低温液化储存技术	66
2.2.1 气体的低温液化	66
2.2.2 低温液化原理	70
2.2.3 低温液化装置	86
2.2.4 液化气体储存设备	104
2.3 气体吸附储存技术	113
2.3.1 概述	113
2.3.2 气体吸附储存工艺	114
2.3.3 天然气吸附储存	122
2.3.4 氢气吸附储存	124
2.3.5 应用前景及面临的问题	127

2.4 金属氢化物储氢	128
2.4.1 金属氢化物在储氢技术中的应用	128
2.4.2 金属氢化物储氢原理	132
2.4.3 氢化物的分类及性质	134
2.4.4 储氢性能	139
2.5 固态储存技术(固态二氧化碳干冰)	148
2.5.1 二氧化碳与干冰	148
2.5.2 干冰生产工艺	150
2.5.3 生产储存和运输干冰的设备	154
2.6 天然气水合物(NGH)储气	157
2.6.1 NGH 储存	158
2.6.2 NGH 分解	164
2.6.3 NGH、CNG、LNG 储气方式比较	164
2.6.4 小结	166
参考文献	166
第3章 工业气体运输新技术	174
3.1 低温液化气体罐车	174
3.1.1 低温液化气体罐车型式	175
3.1.2 流程与工作原理	177
3.1.3 低温液化气体罐车的保冷措施	177
3.1.4 低温液化气体罐车的出厂要求	178
3.1.5 低温液化气体罐车的营运管理规定	179
3.2 低温液化气体运输容器	180
3.2.1 概述	180
3.2.2 氧、氮、氩类低温液化气体容器	181
3.2.3 液氦容器	181
3.3 液化气体运输船	184
3.3.1 概述	184
3.3.2 液化天然气运输船	185
3.3.3 CNG 船	194
3.3.4 液化石油气运输船	194
3.4 长管拖车	197
3.4.1 无缝高压气瓶简介	198
3.4.2 气瓶的检验	199
3.4.3 气瓶的充装	200
3.4.4 在天然气汽车加气站(CNG站)的应用	200
3.5 罐式集装箱	202
3.5.1 概述	202
3.5.2 集装箱的标准	202
3.5.3 罐式集装箱的分类	203
3.5.4 集装箱的一般要求	203

3.5.5	运输液化气体的罐式集装箱	205
3.5.6	液化气体罐式集装箱的有关规定	208
3.5.7	罐式集装箱运输气体	210
3.6	工业气体的转移和运输	212
3.6.1	低温液化气体的转移	212
3.6.2	低温液化气体的运输	214
3.6.3	工业气体集输管理	217
参考文献		217
第 4 章	工业气体输配技术	218
4.1	天然气长距离管输技术	218
4.1.1	输气工艺	219
4.1.2	管材	228
4.1.3	输气管道的腐蚀与防护	230
4.1.4	管道运行与监控	238
4.1.5	多相流技术在天然气管输中的应用	241
4.2	城市燃气管网输送	246
4.2.1	城市燃气输配系统	246
4.2.2	燃气负荷与预测	251
4.2.3	燃气分配管网的工程分析	254
4.2.4	城市燃气管网调度宏观模型	270
4.3	医院液氧集中供应技术	278
4.3.1	液氧集中供气的特点	278
4.3.2	供氧系统的流程与主要设备	280
4.3.3	供氧系统的运行管理	289
4.4	液化石油气的供应	292
4.4.1	液化石油气的运输	292
4.4.2	液化石油气的分配与供应	301
4.5	高纯气体(氮、氢、氧)输送技术	331
4.5.1	概述	331
4.5.2	大宗气体输配	332
4.5.3	高纯气体的现场生产	335
4.5.4	气体纯化	339
4.5.5	气体过滤	344
4.5.6	连续的质量控制系统	346
4.5.7	特种气体配送	351
4.5.8	可燃气体、有毒气体泄漏检测	352
4.5.9	废气处置	354
4.5.10	超净管路系统	356
4.5.11	本节小结	360
参考文献		360
第 5 章	工业气体集输的安全技术	362

5.1	引言	362
5.2	主要工业气体的特性	363
5.3	气体储运有关的安全法规和规范	364
5.3.1	相关法规与技术标准	364
5.3.2	关于《危险化学品安全管理条例》	367
5.3.3	工业气体集输从业人员有关规定	368
5.3.4	危险气体的登记管理及危险气体的经营许可证	369
5.3.5	危险气体的包装标志	370
5.4	关于低温液化气体的安全问题	374
5.4.1	潜在的危险因素	374
5.4.2	操作防护措施	374
5.4.3	低温液化气体安全预防措施	377
5.4.4	储存设备的安全预防措施	378
5.4.5	消防安全预防措施	378
5.5	不同气体的操作与防护	379
5.5.1	氮的操作与防护	379
5.5.2	氢的操作与防护	380
5.5.3	氧的操作与防护	381
5.5.4	天然气的安全与防护	381
5.5.5	溶解乙炔安全问题	390
5.5.6	一氧化碳的操作与防护	392
5.5.7	氨的安全问题	393
5.6	低温液化气体容器(储罐)的安全装置	394
5.6.1	安全阀	394
5.6.2	安全防爆片	396
5.6.3	紧急切断阀	397
5.6.4	紧急脱离装置	397
5.6.5	安全排放装置流通面积计算	397
5.6.6	安全装置的应用	398
5.7	气瓶安全	399
5.7.1	气瓶的有关规定	399
5.7.2	气瓶的充装	400
5.7.3	气瓶的使用与保养	402
	参考文献	402
附表 1	R50 (甲烷) 饱和液体、蒸气热物性数据	403
附表 2	R50 (甲烷) 饱和液体、蒸气热物性数据	405
附表 3	R170 (乙烷) 饱和液体、蒸气热物性数据	407
附表 4	R290 (丙烷) 饱和液体、蒸气热物性数据	409
附表 5	R290 (丙烷) 饱和液体、蒸气热物性数据	411
附表 6	R600 (正丁烷) 饱和液体、蒸气热物性数据	413

附表 7	R600a (异丁烷) 饱和液体、蒸气热物性数据	415
附表 8	R1150 (乙烯) 饱和液体、蒸气热物性数据	417
附表 9	R728 (氟气) 饱和液体、蒸气热物性数据	419
附表 10	R728 (氟气) 饱和液体、蒸气热物性数据	421
附表 11	R732 (氧) 饱和液体、蒸气热物性数据	423
附表 12	R740 (氩) 饱和液体、蒸气热物性数据	424
附表 13	R702 (正氢) 饱和液体、蒸气热物性数据	425
附表 14	R703 (氦) 饱和液体、蒸气热物性数据	426
附表 15	R732 (氧) 饱和液体、蒸气热物性数据	427
附表 16	R740 (氩) 饱和液体、蒸气热物性数据	428
附表 17	R702 (正氢) 饱和液体、蒸气热物性数据	429
附表 18	R703 (氦) 饱和液体、蒸气热物性数据	430
附图 1	R732 (氧) 压焓图	431
附图 2	R740 (氩) 压焓图	431
附图 3	R702 (正氢) 压焓图	432
附图 4	R703 (氦) 压焓图	432

第1章 绪论

本书介绍的工业气体定义为在常温常压 (25℃, 101325Pa) 下为气态的物质。

本章概略介绍各种常见工业气体的基本性质、用途及集输方式。

1.1 氧、氮、氢与氦族气体

1.1.1 氧

1.1.1.1 基本性质

氧是一种常见而重要的元素, 氧气更是一种十分重要的气体。氧是地球上丰富的、分布很广的元素之一。大气中氧气的体积比为 20.946%。

纯净的氧气是一种没有颜色、没有气味、没有味道的气体, 它的密度稍大于空气。氧气微溶于水。液态氧呈淡蓝色。使液态氧进一步冷却则凝结成蓝色晶体。氧是一种顺磁性气体, 其容积磁化率在常见气体中为最大。

氧的一般物理性质示于表 1-1。

氧是最活泼的元素之一, 除氮、氦等稀有气体和一些不活泼金属外, 氧能同其他所有的元素形成化合物。在化合物中氧的化合价通常是一 2 价, 只有和氟化合时才呈 +2 价 (OF_2), 氧在碱金属过氧化物中呈 -1 价。当氧与其他元素直接化合生成氧化物时, 反应是放热的, 生成的氧化物一般很稳定。

除 O_2 外, 自然界还存在氧的两种同素异形体, 即 O_3 和 O_4 。高空大气中存在臭氧 (O_3)。臭氧是比氧 (O_2) 更强的氧化剂, 能在温和的条件下进行反应。已测出在液态氧中有 O_4 存在, 光谱分析测出在气相中亦存在着 O_4 。 O_4 由正常的氧分子正聚合组成。

从 ^{13}O 到 ^{21}O , 氧共有 9 种同位素。在自然界中有三种稳定的同位素, 即 ^{16}O 、 ^{17}O 和 ^{18}O , 其中 ^{18}O 已用于有机反应的示踪过程。

氧气一般从空气中分离得到。从空气中分离制氧可以采取低温精馏法、常温变压吸附法、膜分离法和吸收法等方法。此外, 氧也可以通过水电解、氯酸盐和过氯酸盐分解、过氧化物和超氧化物分解等方法制取。

表 1-1 氧的一般物理性质

摩尔质量/(g/mol)	31.9988	熔点 温度/K	54.75
摩尔体积(标准状态)/(L/mol)	22.39	熔解热/(J/mol)	444.8
密度(标准状态)/(kg/m ³)	1.4291	摩尔比热容(288.8K, 0.101MPa)/[J/(mol·K)]	
气体常数/[J/(mol·K)]	8.31434	C_p	29.33
临界状态 温度/K	154.581	C_v	20.96
压力/MPa	5.043	$k = C_p/C_v$	1.399
密度/(kg/m ³)	436.14	热导率/[W/(m·K)]	
三相点 温度/K	54.36	气体(0.101MPa, 273.15K)	24.31×10^{-3}
压力/MPa	146.33	液体(0.101MPa, 90.18K)	0.1528
气体密度/(kg/m ³)	1.0358×10^{-2}	气体黏度(300K, 0.101MPa)/Pa·s	20.75×10^{-6}
液体密度/(kg/m ³)	13.061×10^2	液体黏度(90.18K, 0.101MPa)/Pa·s	186×10^{-6}
固体密度/(kg/m ³)	13.587×10^2	液体表面张力(90.18K)/(N/m)	13.2×10^{-3}
沸点 温度(0.101MPa)/K	90.188	折射率(273.15K, 0.101MPa)	1.00027
气体密度/(kg/m ³)	4.4766	声速(273.15K, 0.101MPa)/(m/s)	315
液体密度/(kg/m ³)	11.41×10^{-2}	气/液(体积比) ^①	798.4
气化热/(kJ/mol)	6.8123		

① 与正常沸点下的单位液体体积相等的在 101.32kPa 和 0℃ 下的气体体积。以后各表除特别注明之外与此相同。

1.1.1.2 用途

氧气在许多方面具有广泛的用途。

(1) 冶金工业

氧气顶吹转炉炼钢是氧气的最大用途之一，吨钢耗氧量 50~60m³。该技术有效提高了钢的生产量，反过来也促进了气体工业的发展。

氧气转炉炼钢不仅有顶吹，还有底吹、顶底吹、侧吹等。平炉炼钢也可通过吹氧降低一半能耗，提高一倍产量。

电炉炼钢吹氧能缩短熔化时间，从而减少热损失，降低单位耗电量。通常每吨钢液吹氧(标准状态)1m³，可节电 5~10kW·h。

在高炉炼铁、冲天炉化铁过程中采用富氧鼓风，可提高炉温，降低焦化，增加产量。在高炉生产中含氧量增加 1%，产量提高 4%~6%，焦化降低 5%~6%。

采用熔炼还原技术 COREX 炼铁新工艺可取代烧结、焦炉、高炉三段生产，以该法生产每吨铁耗氧 550~650m³。

除炼钢、炼铁外，在钢材加工、废铁预热、清理和切割等方面也需用氧，处理每吨钢约需氧 11.4~14.2m³。

在有色金属如铜、铅、锑、锌、镍、铝等的冶炼过程中，吹氧可强化生产过程。一般熔炼 1t 有色金属需氧量为 300~2000m³。

在一种被称为湿式冶金法的金属矿现场开采和冶炼过程中，将氧溶解于某种复合浸渍液，在矿床上钻孔形成注入井，把溶解有氧的浸渍液注入井内，然后，在地面收集通过矿层的浸渍液，从溶液中提取有用金属。用此方法可以提取深层矿床中的低品位金属矿。

(2) 化学工业

许多化学工艺过程利用空气中的氧作氧化剂与燃料或其他物质进行化学反应，但也可采用纯氧，其优点是反应快，反应气体的处理量大，尾气排放量小，回收率提高，环境污染减少。

化肥工业中，氨合成气可以采用燃料(煤、重油、天然气等)与氧和水蒸气在转化炉中生产。合成气为氢和一氧化碳的混合气，其中的一氧化碳经变换后可生成更多的氢和二氧化

碳。除去二氧化碳后的氢可用于制造氨、脂肪加氢和石油氢化裂解等化学反应。以氢和一氧化碳为主的合成气经净化后也可直接用于合成甲醇。

氧和天然气经部分氧化可转化为乙炔、乙烯或丙烯。乙烯也能被部分氧化为环氧乙烷。在硫酸和硝酸生产过程中用氧可以强化生产、降低总能耗和减少投资。

将四氯化钛在高温氧中燃烧可以制取二氧化钛（钛白粉），后者是颜料工业的主要原料。仔细控制燃烧过程的加氧量，可提高二氧化钛的产量和质量。

氧气漂白是造纸工业上一种无公害的纸浆制造工艺，它消除了用氯气漂白产生的大量污水，使有关化学品的耗量下降，提高了纸的白度稳定性。

以石油烃为原料，经分子筛脱蜡，在亲石油的微生物作用下，加氧发酵石油烃可以合成人造蛋白。

（3）污水处理

氧气曝气活性污泥法与空气曝气法相比，污泥生成率低，占地面积可节省一半以上，因此污泥处理费用也低。处理 1kg 污泥的生化需氧量（BOD）为 1.1~1.3kg 氧。

（4）医疗应用

在医疗和生命维持中，氧的作用机理是维持动脉血液中氧的分压接近于正常水平，即 13.3kPa（100mmHg）。吸入高浓度氧对严重贫血和其他相似失调病症是有效的。

现代医院配备有集中供氧系统，氧气通过管道输送到病床旁或手术室。一般供氧站设在室外，液氧从低温液体储槽自动输出，经气化后送至需要场所。

随着小型制（供）氧器械的不断开发和改进，家庭氧气疗法在临床医学方面得到认可。

氧气呼吸器常用作急救措施之一，为抢救队和救护车所必备。

（5）生命支持应用

民航客机飞行高度较高，作为应急措施，为旅客提供氧面罩，补充吸入纯氧，以恢复正常生理变化。

在水下作业需十分小心控制支持生命气体的供给。氮和惰性气体的分压过高，亦即氧分压过低是危险的，但含氧量过高，即氧分压过高，长期吸入会发生氧中毒。

（6）军事与航天

第二次世界大战时，德国首先使用以液氧为氧化剂、酒精为燃料的 V-2 火箭，液氧用量达 4970kg。英国也紧接着研制了用液氧和煤油的“蓝光”火箭，用液氧达 57t。为探索月球发射的阿波罗宇宙飞船，采用液氧和液氢为燃料的运载火箭。如发射阿波罗 12 号宇宙飞船，消耗 2500t 液氧。运载航天飞机的火箭中装有液氢 200t，液氧 1200t。中国长征 3 号第三级火箭装有 YF73 型液氢、液氧发动机，其推力在真空状态下为 4.5t（约 44100N）。

在高空飞行的军用飞机中飞行员呼吸要用氧，在战斗中飞机要突然加速，也需要向燃烧室加氧。

长期在海底航行的核潜艇，除人员呼吸要用氧外，燃料电池也需要氧。为了提高常规动力潜艇的作战范围、潜航时间与隐蔽性，各国纷纷开始研究不依赖外界空气的动力装置（AIP）。1996 年，瑞典制造的世界第一艘闭式斯特林循环 SE/AIP 潜艇“哥特兰”号开始服役，标志着 AIP 技术的实用化。目前，德国和日本已经有采用燃料电池技术的 FC/AIP 潜艇下水。闭式斯特林发动机循环 SE 和闭式柴油机循环 CCDE 是较为成熟的两种 AIP 实现方式，此外还有闭式蒸汽轮机循环 MESMA 和进入 21 世纪后成为热点的燃料电池 FC 两种 AIP 实现方式，不论哪种实现方式，都需要潜艇携带的液氧系统提供燃料所需的氧气。该液

氧系统处于潜艇上狭窄空间，对外形尺寸的控制苛刻，对绝热要求高，且必须承受 10 倍重力加速度的冲击载荷，生产制造的难度很大。

此外，以液氧饱和可燃性多孔物质可制成液氧炸药。

(7) 其他

氧气还可用于焊接切割，火焰硬化，火焰去锈，玻璃工艺，红宝石制造，石料和混凝土切割等。在玻璃熔炉、水泥窖和耐火材料窖中用氧可提高燃烧温度，加速熔融或反应，从而提高生产能力。增加养鱼池水中的含氧量，可使鱼类进食量提高，从而快速成长。

1.1.1.3 集输技术

氧的输送方式有三种，根据用户集散度、用气量大小、交通地理位置等不同情况，可以分别选用管道输送、液体槽车输送、钢瓶或管式瓶束输送。

大量气态氧的输送以管输最为经济。一座制氧中心站通过管道就近供氧，可以满足若干用户的需要。若将跨地区甚至跨国的数座制氧中心站连接组成供氧管网，还能达到远距离输送氧的目的。中心站不必设置多台制氧机组，只要一台大型机组就可保证用户用氧的需要。如一台机组发生故障停车，管网上的其他制氧站可继续供氧。这种氧气管网特别适用于工厂高度集中的地区，如跨接法国、比利时、荷兰、卢森堡和德国的氧气管网，东线管网长 320km，管径 36cm，工作压力 4.14MPa，总输氧容量为 11820t/d，用户 30 多个；西线管网长约 645km，总输氧容量为 11365t/d，用户 40 多个。在美国沿墨西哥湾地区有 10 条连贯 11 台产氧量 10000m³/h 以上的大型制氧机组和 25 个以上用户的输氧管道，长度为 560km，管径 15~40cm，工作压力约 4MPa。

距制氧中心站较远的中小用户可采用液氧输送，液氧储槽可以固定于卡车、拖车或铁路平板车上。钢瓶或管式瓶束充装、储存和输送的高压气态氧只适用于用氧量少而分散的用户。

低压储存容器通常采用水封钟罩式气柜，其容积一般为数百到数千立方米。低压大容积储存的氧气不便于运输，且氧气易受容器污染，纯度得不到保证。

中压金属容器储存氧气，储存压力为 1.5~3.0MPa，容积一般为几十到数千立方米。通常用作管道输送氧气的缓冲储存。

高压储存最常用的容器即普通碳钢钢瓶。钢瓶容积为 40~50L，工作压力为 15.0~20.0MPa。由于是高压储存和运输，安全是第一要考虑的因素。把气体氧充入钢瓶，可以用各种交通工具方便地运到使用地。但是，由于气/瓶质量比太小 (1/10~1/8)，运输效率低，只适用于用量很小的用户，且运输距离不宜太远。与高压钢瓶储运相似的是采用固定于运输工具上的高压管束运输。这种运输方式也只适用于氧气用量不大的用户。

对于用气量大，又不方便管道输送的用气点，采用液体方式储运应是最经济的。由于液态氧的沸点低，必须在绝热性良好的容器中储存和运输。最常用的液氧容器是以粉末真空绝热的双层容器，内筒用不锈钢制成，外筒为碳钢。槽车储运式液氮容器的容积通常为 3~15m³，地面固定式液氧容器的容积可以很大，根据需要，可以从几立方米到数百立方米。

与氮气和其他惰性气体不同的是，由于氧气是强氧化剂，虽不能燃烧却能助燃，其化学性质极其活泼，能同许多元素发生化学反应同时放出热量，故在充装、储存和输送氧时，安全是必须首先考虑的问题。

在氧浓度有可能增加的地方，应设置通风装置，并对氧气浓度进行监测，远离热源和火源。检修和工艺处理盛氧容器之前，必须先用惰性气体置换处理，当氧含量（体积分数）降

到 23% 以下，方可开始工作。充氧站应严格按安全操作规程，不容许把充装其他气体（特别是可燃气体的）钢瓶用于充装氧气，亦不容许将充装氧气的钢瓶用于充装其他气体。储存和输送氧气或液氧的设备、管道、阀门及其他管件，其内壁应光滑无毛刺，使用前必须进行脱脂处理，去除易燃易爆物。应严格控制管道输送氧的流速，氧的安全允许流速为 8m/s ($p < 0.6\text{MPa}$)。液态氧的操作者应有足够的人身保护措施以防低温冻伤，此外，大量液氧蒸发成气氧时，易被衣物和其他多孔可燃物质吸附，遇火源易燃烧或爆炸，而多孔可燃物若吸收液氧至饱和，即成为液氧炸药，故储运液氧时，应特别留意不能让液氧外溢。

1.1.2 氮

1.1.2.1 基本性质

氮是一种常见的元素，氮气是空气中最主要的成分，大气中氮气的体积比为 78.484%。氮气主要分布在地球表面的大气层中，在地层中也蕴藏有氮气。氮气在常温常压下是无色、无味、无臭气体，低温下冷凝为无色的液体，继续降温可凝固成固体。

自然界中稳定存在的氮同位素有两种，即¹⁴N 和¹⁵N，相对比率分别为 99.635% 和 0.365%。重同位素可以用来作为示踪剂。

氮的一般物理性质见表 1-2。

表 1-2 氮的一般物理性质

摩尔质量/(g/mol)	28.0164	熔点 温度/K	63.29
摩尔体积(标准状态)/(L/mol)	22.40	熔解热/(kJ/mol)	719.6
密度(标准状态)/(kg/m ³)	1.2507	比热容(288.8K, 0.101MPa)/[kJ/(kg·K)]	
气体常数/[J/(mol·K)]	8.3093	C_p	1.04
临界状态 温度/K	126.21	C_v	0.741
压力/MPa	3.3978	$k = C_v/C_p$	1.40
密度/(kg/m ³)	313.22	热导率/[W/(m·K)]	
三相点 温度/K	63.148	气体	0.2579
压力/MPa	0.01253	液体	1.4963
液体密度/(kg/m ³)	873	气体黏度(63K, 0.101MPa)/μPa·s	879.2×10^{-2}
固体密度/(kg/m ³)	947	液体黏度(64K, 0.101MPa)/Pa·s	2.10×10^{-5}
熔解热/(kJ/kg)	25.73	液体表面张力(70K)/(N/m)	4.624×10^{-3}
沸点 温度(0.101MPa)/K	77.35	折射率(293.16K, 0.101MPa)	1.00052
气体密度/(kg/m ³)	4.69	声速(300K, 0.101MPa)/(m/s)	353.1
液体密度/(kg/m ³)	810	气/液(体积比)	643
气化热/(kJ/mol)	196.895		

在通常条件下，氮是化学惰性的。在常温、常压下，除金属锂等极少数元素外，氮几乎不与任何物质发生反应。只有在极高的温度下，双原子分子氮才会分解为单原子。在高温、高压或有催化剂存在的特定条件下，氮可以与许多物质发生反应。反应生成物中，氮主要表现为正五价或负三价。

氮气一般从空气中分离得到。从空气中分离制氮可以采取低温精馏法、变压吸附法、膜分离法等方法。此外，氮也可以通过燃烧法、氨热分解法、叠氮化钠 (NaN₃) 热分解法等方法制取。

1.1.2.2 用途

氮在化学工业、石油工业、电子工业、食品工业、金属冶炼及加工业等领域有着广泛的用途。

(1) 化学工业中的应用

氮是合成氨的主要原料。氨合成所需的氮无需分离和提纯，直接来源于空气。由于在氨合成中，氧、一氧化碳、二氧化碳易使合成催化剂中毒，甲烷和氩系合成惰性物质的大量积累会降低合成效率，采用液氮洗涤工艺净化合成气，可以延长催化剂使用寿命，提高氨合成效率。

氮还是生成合成氰氨化钙、氰化钠及氮化硅的主要原料。高纯度的氮气可作为生产聚乙烯的辅助气。利用氮的化学不活泼性，在许多易燃液体物质的反应器、储罐中充入氮气，不但保护物料不受氧化，保持产品质量，还能确保安全，防止燃烧和爆炸事故发生。

(2) 石油天然气及采煤工业中的应用

油井内充入氮气不但可以提高井内压力，增大采油量，充入的氮气还可作为钻杆测试中的缓冲垫，完全避免了井内泥浆压力挤扁下部测试管柱的可能性。此外，在进行酸化、压裂、水力喷孔、水力封隔器坐封等井下作业中，也要用到氮气。在天然气中充填氮气可以降低热值。在原油更换管道时，可用液氮浇注两端物料，使之固化封堵。

将氮气用于粉煤的压力输送，既安全方便又经济实惠。

(3) 电子工业中的应用

在电子工业中用干燥的氮气吹洗硅片，可保持硅片的干燥与清洁。在大规模集成电路生产工序中，可以用高纯氮作为化学反应气的携带气、惰性保护气和封装气等。

(4) 机械加工工业中的应用

液氮用于金属的过度配合或静配合的装配，避免了高温氧化，可以保持零件表面的光洁。用液氮泡过的零件加工后可延长磨损寿命。金属切削时用液氮冷却具有刀具寿命长、表面光洁度高等优点。

(5) 食品工业中的应用

氮气在食品工业中主要是用作保护气。例如在水果、蔬菜库内，充入氮气，驱逐氧气抑制霉菌的生长和乙烯的生成与释放，延缓水果蔬菜的代谢，使保鲜期加长。在粮食的储存中，充入氮气，可以延缓老化，在相当长的时间内，保持新米的香味。随着生活节奏的加快，快餐食品越来越受到人们的重视，在包装容器中充入氮气可以延长这些食品的保质期。鱼、肉一类的食品，用液氮冷冻，可以达到快速冷冻的效果，防止组织内的水分形成玻璃体，使组织不被破坏，复热后可以保持原来的鲜美味道。

(6) 科学技术方面的应用

纯度高的氮气在气相色谱分析中，是常用的载气。在科学仪器或科学实验中液氮是重要的冷源，比如 EDAX 能谱仪的单晶锂检测器，需要在液氮的温度下保存和使用。许多试验都要在低温下进行，其冷量多数场合由液氮提供。液氮可用作各种冷阱、冷泵及低温超导的冷源。

^{15}N 主要用于示踪研究，特别是用于化学、生物学和固氮过程的机理研究方面。 ^{15}N 具有比一般氮低的热中子吸收截面，已应用于核反应堆中。

(7) 生物和医疗方面的应用

氮在生物和医疗领域中，主要还是利用液氮的低温性质、不活泼性和无毒性，是理想的冷源。液氮在保存动物的精液、人体组织和外科手术等方面已得到普遍的应用。

(8) 其他

液氮在建筑领域中也有某些应用，比如大体积的混凝土在固化时放热，内部常会出现裂

缝而降低强度，用液氮作为冷却剂，可以大幅度地提高混凝土的强度。液氮在打捞沉船的作业中有独特作用。液氮在气化后能产生压力，可以作为动力源使用。在大气冷凝成云、空间环境模拟、形成低温风动通道、回收放射性废物、清除金属表面的垢层、制作陶瓷超导电缆、粉碎回收废橡胶、塑料制品等方面也使用液氮。

氮气还可以作为灭火气。单独使用氮气或氮氩混合气充填灯泡，可以延长灯泡的寿命。

1.1.2.3 集输技术

氮和氧沸点比较接近，因而氮的储存和运输与氧基本一致：既可采用低压储存，也可采用中高压储存或液体储存。有关低温液体储槽及高压气体钢瓶的通用规格、品种及其使用的通用安全规程，参见氧的储存和输送的相关内容。

1.1.3 氢

1.1.3.1 基本性质

氢气是已知气体中最轻的气体。常温下，氢无色、无嗅、无毒、易燃易爆，燃烧时呈微弱的白色火焰。氢气和氟、氯、氧、一氧化碳以及空气混合均有爆炸的危险，其中，氢与氟的混合物在低温和黑暗环境就能发生自发性爆炸，与氯的混合比为 1:1 时，在光照下也可爆炸。

氢虽无毒，但在生理上对人体是惰性的，若空气中氢含量增高，将引起缺氧性窒息。与所有低温液体一样，直接接触液氢将引起冻伤。液氢外溢并突然大面积蒸发还会造成环境缺氧，并有可能和空气一起形成爆炸混合物，引发燃烧爆炸事故。

氢有三种同位素：氕（H）、氘（D）和氚（T）。氕和氘是稳定同位素，氕又称轻氢，是天然氢的主要成分，约占 99.984%，氘约为 0.0156%。氚具有放射性，衰变时放出弱的 β 射线，半衰期为 12.262 年。氢同位素可形成六种分子， H_2 、HD、 D_2 、DT、HT、 T_2 ，后三种是不稳定分子。表 1-3 列出了氢气及其同位素的一般物理性质。

由于氢分子中两个原子核的自旋取向不同，轻氢（氕）有正氢（ $o-H_2$ ）和仲氢（ $p-H_2$ ）之分。仲氢分子中，核自旋方向相反，且转动量子数为偶数，正氢的核为同向自旋，且量子数为奇数。核自旋异构体的区分来源于两种不同变体的磁性、光谱性质和热性质。氢的正、仲变体具有不同的自旋能量，因此具有不同的比热容、热导率、饱和蒸气压和熔点。化学行为方面，正氢和仲氢是相同的。常温下，正、仲氢的平衡组成约为 3:1，此时的氢称为常态氢（normal hydrogen, $n-H_2$ ）。随着温度的降低，仲氢的平衡组成逐渐增大，接近绝对零度时，正氢全部转化为仲氢。在低温下，正、仲氢自然转化非常慢，由于仲氢为低能态氢，转化过程是放热过程，转化 90% 常态液体氢为仲氢所释放的能量足以使 64% 的液体气化。因此，为储存液态氢，必须预先用催化剂快速将常态氢转化为仲氢。常用的正-仲转化催化剂有水合三氧化二铁、稀土金属化合物、铀化合物、碳等。强磁场亦能加快转化速率。

氘又称重氢，是由一个质子、一个中子、一个围绕核旋转的电子组成，生成氘核需要几百万度的高温。氘核能微弱吸收中子，并很快减慢中子的速度，因此重水是原子反应堆中中子的阻抑剂。与轻氢一样，氘也有两种变体：正氘和仲氘。在室温下，氘正-仲平衡比约为 2。氘的正-仲平衡组成随温度变化的关系与轻氢的情况正好相反，即随着温度的降低，正-仲比增大。气态氘可用钠或赤热的铁分解氘的氧化物（重水），或者在有碳酸钠存在时电解重水获得。