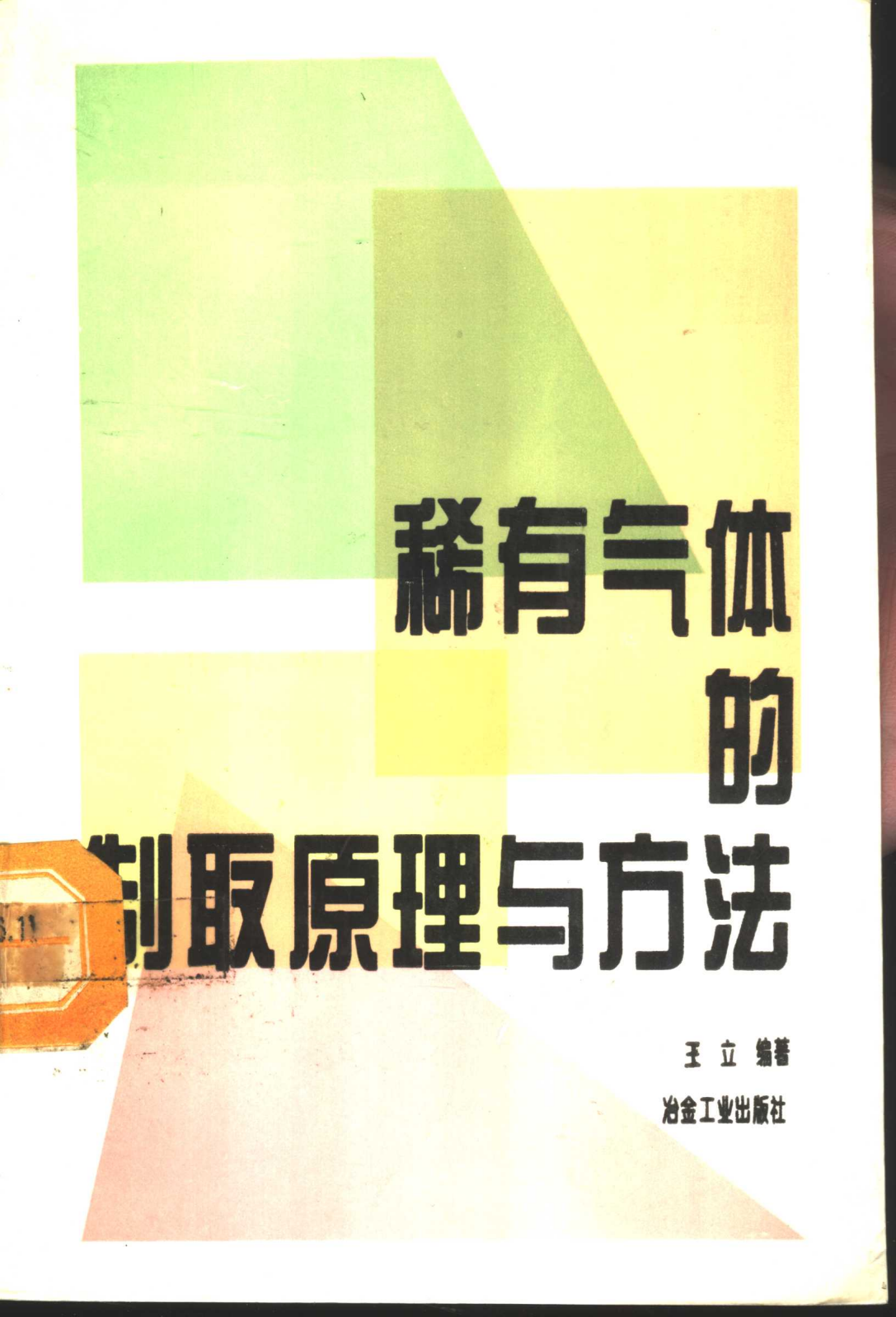




稀有气体的 制取原理与方法

王立 编著

冶金工业出版社

稀有气体的制取 原理与方法

王 立 编著

冶金工业出版社

(京)新登字 036 号

内 容 提 要

本书系统介绍了利用空气分离装置制取稀有气体的基本原理、方法和工艺流程,同时也简要介绍了从其他气源中制取稀有气体的方法。主要包括:稀有气体的制取原理和制取方法;从空气分离装置中提取氮、氦、氩、氪、氙的方法;高纯及超纯稀有气体的制备等。

本书可供从事空气分离工作的工程技术人员、工人及相应专业的大专院校师生学习、参考。

稀有气体的制取原理与方法

王 立 编著

倪学梓 审订

冶金工业出版社出版发行

(北京北河沿大街高碑店北街35号)

新华书店总店科技发行所经销

航空工业出版社印刷厂印刷

850×1168 1/32 印张 4 字数 103千字

1993年12月第一版 1993年12月第一次印刷

印数 1~1750 册

ISBN 7-5024-1297-2

TK·16 定价 4.50元

序

从发现稀有气体氦元素存在到发现氙的存在共经历了 30 年的时间,而氦、氖、氙的发现只相差 2 个月。氙的发现最令人们钦佩,科学家在称量不同来源的氮气的容积重量时,发现在相同条件下,同容积的氮容积重量相差 0.0064g,这引起了科学家的疑问和兴趣,经深入研究,发现了氙的存在。

光谱分析技术对发现五种稀有气体元素起了非常关键的作用,五种稀有气体元素都是通过光谱分析确定其存在的。但光谱分析只是证明其存在。真正得到每种纯质的稀有气体还要依靠冷冻学和冷冻技术的发展,以及除去稀有气体中杂质的方法和工艺的逐步完善。

目前这五种稀有气体已得到广泛的应用。它们在高科技领域和基础理论研究方面的应用对推进科学技术的发展和进步起了重要的作用。社会科技的进步已离不开稀有气体,故而稀有气体的需求量越来越大。空气分离工业的发展、壮大以及空气分离技术和冷冻技术的完善为稀有气体的生产提供了基本条件和可能。

提取和生产稀有气体的原理并不复杂,其主要手段就是将空气液化,利用空气中各组分的沸点和凝固点的不同分离稀有气体,使气体含量由贫到富再到纯,并经过各种浓缩达到目标纯。其次是除去分离出来的纯稀有气体中含有的微量杂质。最后证明其纯度。完成这些过程需要低温及超低温计量和仪表,以及精密的温度、压力、流量的控制技术。

在我国,随着科学技术和工业的迅速发展,需要大力发展空气分离和稀有气体工业。这就需要大量的具有这方面知识的人才。王

7-AD51/16

立博士编写此书是非常及时的,既满足了工业上有关方面的需要,
又满足了教学需要。这本书是一本很有实用价值的参考书和教材。

倪学梓

1992年7月 于无锡

前 言

稀有气体通常是指氦、氖、氩、氪和氙五种气体。它们都是元素周期表中的零族元素,且在常温常压下均为气体状态。因为它们在大气层和地壳中的含量很少,所以被称为稀有气体。又因其化学性质稳定,故又被称为惰性气体。

随着科学技术的进步和工农业生产的发展,稀有气体在基础科学、金属切割与焊接、冶金、电光源、医学、原子能、航空以及低温技术中得到越来越广泛的应用。

稀有气体的生产涉及到空气、天然气、合成氨尾气及核反应堆裂变气等多种气源,涉及面广,制取工艺流程多种多样。本书系统地介绍了用空气分离装置(以下简称空分装置)提取稀有气体的基本原理、方法和工艺流程,也简要介绍了如何从其他气源中制取稀有气体。

全书共分7章。主要包括:稀有气体的制取原理、制取方法;从空分装置中提取氦、氖、氩、氪、氙;高纯及超纯稀有气体的制备等。

本书采用国际单位制。

本书可供大专院校师生、有关工程技术人员以及空气分离操作工人阅读和参考。

本书由王立编著,倪学梓教授审订;李化治副教授对本书提出了许多宝贵的建议,吴平在本书的写作过程中做了大量工作。限于编者水平,书中难免有不妥之处,欢迎批评指正。

编写本书时,引用了国内外许多文献资料。在此,对文献的作者谨致谢意。

目 录

1 概论	1
1.1 稀有气体的发现及形成原因	2
1.1.1 稀有气体的发现	2
1.1.2 稀有气体的形成原因	3
1.2 稀有气体的主要性质及用途	4
1.2.1 稀有气体的性质	4
1.2.2 稀有气体的主要用途	5
2 稀有气体的制取原理	11
2.1 分凝和冻结	11
2.2 精馏	12
2.3 洗涤	13
2.4 吸附	14
2.4.1 静吸附	15
2.4.2 动吸附	16
2.4.3 传质区	16
2.4.4 脱附(再生)	17
2.5 扩散和渗透	18
2.5.1 钯合金膜对氢的扩散	19
2.5.2 有机膜对气体的渗透	20
2.6 化学法	20
2.6.1 催化反应	20
2.6.2 金属吸气	21
2.6.3 化学吸收	22
3 稀有气体的制取方法	23
3.1 从空分装置中提取稀有气体	23

3.1.1	氮和氩的提取	26
3.1.2	氩的提取	26
3.1.3	氮和氙的提取	27
3.2	从天然气中提取稀有气体	27
3.2.1	天然气的预净化处理	28
3.2.2	粗氮的制取	28
3.2.3	氮的精制	29
3.3	从合成氨尾气中提取稀有气体	30
3.3.1	氩的提取	30
3.3.2	氮的提取	32
3.3.3	氮和氙的提取	33
3.4	从其他气源中提取稀有气体	33
4	从空分装置中提取氩	35
4.1	粗氩的提取	35
4.1.1	氩在主塔中的分布及对空气精馏过程的影响	35
4.1.2	粗氩提取工艺流程的组织	42
4.1.3	粗氩的提取率	47
4.1.4	粗氩塔正常工况的调整与主塔工况的关系	48
4.2	粗氩中的氧的脱除	51
4.2.1	用活性铜除氧	51
4.2.2	加氢催化脱氧	52
4.2.3	除氧用催化剂及其制备方法	55
4.2.4	催化器的结构与计算	58
4.2.5	粗氩纯化的工艺流程	60
4.3	用精馏法脱除工艺氩中的氮	63
4.3.1	工艺流程	63
4.3.2	纯氩塔	64
4.4	分子筛低温吸附法制取纯氩	67
4.4.1	分子筛吸附法提取纯氩的基本原理	67

4.4.2	工艺流程与设备	69
4.4.3	分子筛的活化与再生	70
5	从空分装置中提取氧和氮	74
5.1	粗氧、氮混合气的提取	74
5.2	纯氧、氮混合气的制备	76
5.2.1	氧的脱除	76
5.2.2	氮的脱除	78
5.3	纯氧、氮混合气的分离与纯化	80
5.3.1	冻结法	81
5.3.2	冷凝法	81
5.3.3	吸附法	86
6	从空分装置中提取氦和氩	90
6.1	氦、氩的提取特点	90
6.2	氦、氩提取的基本工艺流程	91
6.2.1	以精馏法为主提取氦和氩	91
6.2.2	以吸附法为主提取氦和氩	104
6.2.3	大型色谱法分离氦、氩或直接制取氦、氩混合物	108
7	高纯及超纯稀有气体的制备	110
7.1	稀有气体中杂质的清除方法	110
7.1.1	氮的清除	110
7.1.2	氧的清除	112
7.1.3	氢的清除	113
7.2	高纯及超纯稀有气体的制备	114
7.2.1	杂质少于 1ppm 的高纯氮的制备	114
7.2.2	杂质少于 0.1ppm 的超纯氮或氩的制备	115
7.2.3	杂质少于 1ppb 超纯氮的制备	117
	参考文献	119

1 概 论

稀有气体通常是指氦、氖、氩、氪和氙。它们都属于元素周期表中的零族，在常温和常压下均为气体状态。因为它们在大气层和地壳中的含量很少，所以被称为稀有气体，又因其化学性质稳定，又被称为惰性气体。

由表 1-1 可以看出，氦、氖、氩、氪和氙 5 种气体中，氦气在空气中的体积含量相对最多，可达 0.93%，其余 4 种稀有气体之和在空气中的体积含量也不足 0.003%，尤其是氙气特别稀少，故氙与氪有时被称为黄金气体。

表 1-1 干燥空气的组成

组 分	体积, %	质量, %
氮 N ₂	78.084	75.52
氧 O ₂	20.95	23.15
氩 Ar	0.93	1.282
二氧化碳 CO ₂	0.03	0.046
氖 Ne	18×10^{-4}	12.5×10^{-4}
氦 He	5.24×10^{-4}	0.72×10^{-4}
乙炔及其他烃类	2.03×10^{-4}	1.28×10^{-4}
甲烷 CH ₄	1.5×10^{-4}	0.8×10^{-4}
氪 Kr	1.14×10^{-4}	3.3×10^{-4}
氢 H ₂	0.5×10^{-4}	0.035×10^{-4}
一氧化氮 N ₂ O	0.5×10^{-4}	0.8×10^{-4}
氙 Xe	0.08×10^{-4}	0.36×10^{-4}
臭氧 O ₃	0.04×10^{-4}	0.05×10^{-4}
氡 Rn	6×10^{-18}	7×10^{-17}
总 计	约 100	约 100

1.1 稀有气体的发现及形成原因

1.1.1 稀有气体的发现

稀有气体中发现得最早的是氦,发现至今已有 100 多年。氦是在对太阳光谱的观察中发现的。

1868 年法国天文学家詹森(Janssen)和英国天文学家洛克耶(Lockyer)分别从太阳光谱分析结果中发现了新的黄色谱线 D_3 , 这条黄色谱线与当时已知的各种元素的谱线都不重合,也就是说它属于一种未知的新元素。洛克耶将它命名为 helium, 希腊语是“太阳”的意思。我们译为“氦”。元素符号为 He。

1895 年初,化学家拉姆齐(Ramsay)将加热钷铀矿得到的气体样品送到了洛克耶和克鲁克(Crook)那里进行光谱分析,分析结果表明该气体中含有氦。拉姆齐就成为最先发现地球上有氦的人,太阳元素也就这样从天上来到了人间。同年凯泽(Kayser)认为大气中也有氦存在。

1905 年,卡迪(Cady)和麦克法兰(Mcfarland)在燃烧天然气时,对未燃烧的气体进行了分析,确认在天然气中含有氦。

1892 年,英国物理学家雷利(Rayleigh)在测氮的密度时发现,从空气中提取的 1L 氮气的质量是 1.257g,而从氨气中提取的 1L 氮气的质量却是 1.2508g,二者相差 0.0064 g。虽然这两个密度相差只有千分之五左右,但却超出了实验误差范围,因为他的实验室里拥有灵敏度可达 0.0001g 的精密天平。

1894 年,雷利和拉姆齐合作对上述现象进行了研究,并注意到了 80 年前著名物理学家卡文迪什(Cavendish)曾经通过实验研究认为从空气中取得的氮气中含有杂质这一事实。他们重做了卡文迪什的实验,对得到的气体进行光谱分析,发现光谱中有橙色和绿色的谱线,这是已知元素所没有的谱线,表明这些气体中含有一种新的气体元素。他们的研究表明:用氮的化合物制得的氮气是纯氮气,其密度为 1.2508 kg/m^3 ,而从空气中得到的氮气中混有密度为 1.9086

kg/m^3 的未知气体,因而其密度为 1.2572 kg/m^3 。他们利用这种气体不与任何物质化合的性质,使之与氮分开,并把这种新的气体元素命名为 Argon,希腊文是“懒惰”的意思,我们译为“氩”,元素符号为 Ar。

1898 年 5 月,拉姆齐和他的助手在蒸发液态空气时,将最后蒸发的一点气体收集进来,想从中得到氮。他们使收集起来的气体先通过炽热的铜和镁,以除去其中的氧和氮。然后对剩余的气体进行光谱分析,发现其中除氩所具有的绿色和橙色谱线外,并没有氮所具有的黄色谱线 D_3 ,但却发现了两条新的谱线,一条黄色的,一条绿色的,它们与已知物质的谱线不重合,显然这又是一种未知的新气体。他把它命名为 Krypton,希腊文是“隐藏”的意思,我们译为“氙”,元素符号为 Kr。

1898 年 6 月,拉姆齐将他得到的氙气浸在液态空气中,绝大部分氙气液化了,他将未液化的一小部分气体抽出来,这些气体在放电管中发出美丽的红光。光谱分析发现了几条橙红色的亮线,这又是一种新的气体,命名为 Neon,希腊文为“新”的意思,我们译为“氖”,元素符号为 Ne。

1898 年 7 月,拉姆齐又将液化了的氙气蒸发成气体,并将它们分部收集起来进行分析。首先蒸发的绝大部分是氙气,然后蒸发的是氮,最后剩下的一点点气体,光谱分析结果证明它又是一种新的气体,于是又发现了 Xenon,希腊文为“陌生”的意思,我们译为“氙”,元素符号为 Xe。

就这样,拉姆齐在获得了液态空气以后,花费了不到 2 个月的时间,就在空气中连续发现了 3 种新的气体元素:氮、氖和氩。

1.1.2 稀有气体的形成原因

关于氮的成因有两种说法:一种说法认为在地球形成时,从太阳分离出来的气体中就有氮,这就是所谓的原始起源说;另一种认为是由重元素放射性裂变放出 α 粒子而生成氮。目前较一致的看法是后者,即氮是由铀、钍、钷等重元素放射性裂变生成的。

氦、氡、氩都是由地壳中经常发生的核裂变或核碰撞等产生的。氦和氡的放射性同位素也可以用核反应器或粒子加速器等来制造。

氩是地球内部放射性同位素钾40的衰变生成物之一,并从地球内部缓慢地跑到大气层中。由于钾40分布在全球各地,大气层中氩的浓度在逐渐增加,但其年增加量只等于大气层中已有氩量的 $1.5 \times 10^{-10} \%$ 。这显然是一个很微小的量。

1.2 稀有气体的主要性质及用途

1.2.1 稀有气体的性质

稀有气体是无色、无臭、无味的气体,属于元素周期表中的零族,故其化学性质极其稳定,一般状态下不生成化合物,通常以单原子分子的气体状态存在。

每种稀有气体在地球的大气中均有一定的含量。它们都是2种以上同位素的混合物,有一定的存在比,例如氦就是由氦3和氦4两种同位素组成的。稀有气体在空气中的体积含量见表1-1。稀有气体的主要物理化学常数如表1-2所示。

表1-2 稀有气体的主要物理化学常数

项 目	符号	单位	氩 Ar	氖 Ne	氦 4He	氦 3He	氙 Kr	氡 Xe
分子量	M		39.944	20.183	4.003	3.016	83.80	131.30
气体常数	R	$\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$	0.208146	0.41194	2.076989	2.7800	0.099215	0.063322
沸点	T_b	K	87.29	27.108	4.224	3.191	119.8	165.05
熔点(近似)	T_m	K	83.85	24.6			115.95	161.35
临界温度	T_{cr}	K	150.72	44.45	5.2014	3.324	209.4	289.75
临界压力	p_{cr}	10^3kPa	4.864	2.721	0.2275	0.1165	5.51	5.88
三相点温度	T_{tr}	K	83.81	24.56	—	—	115.76	161.37
三相点压力	p_{tr}	kPa	68.92	43.3075	—	—	73.6	81.6
固体密度(近似)	ρ_s	kg/m^3	1624	1400	190	143	2900	3540
饱和液体密度 ^①	ρ_l	kg/cm^3	1400	1204	125	60	2413	3057
饱和蒸气密度 ^①	ρ_v	kg/m^3	5.7	≈ 4.8	≈ 15.5	≈ 20	8.95(120K)	—

续表 1-2

项 目	符号	单位	氩 Ar	氖 Ne	氦 ^4He	氦 ^3He	氙 Kr	氙 Xe
密度(在 273.15K, 101.32kPa 时)	ρ_0	kg/m ³	1.785	0.9004	0.1785	0.1345	3.745	5.85
气化热 ^①	γ_r	kJ/kg	163.02	85.7	20.8	8.5	107.5	96.2
熔化热(近似)	γ_m	kJ/kg	29.55	16.62	5.7	—	19.55	17.62

①表示压力为 101.325kPa 时的值。

1.2.2 稀有气体的主要用途

稀有气体具有极为宝贵而特殊的化学性质和物理性质,比如稀有气体的化学惰性,氦、氖的低沸点和高热导率,气体氦和液体氦的低密度,氦、氙气体的高密度和低热导率,氦的低蒸发潜热和低溶解度以及氦所具有的超流动现象等都是其他气体所没有的特殊性质。这些性质,使得稀有气体在金属焊接、金属冶炼、半导体工业、电子工业以及医学、生理学等许多部门获得了广泛的应用;在科学研究中被用于电子计算机、遥控、遥测、气泡室、加速器、低温物理、超导技术等领域;在国防工业上成为人造卫星、潜艇、原子反应堆、火箭、导弹及飞船制造和运行中不可缺少的战略物资。稀有气体已成为一种重要的工业气体。随着稀有气体应用范围的不断扩大,对其数量、质量等方面的要求也越来越高,从而大大促进了稀有气体领域的科研和生产的发展。

1.2.2.1 在基础科学方面的应用

在原子物理学方面,稀有气体有很大的用途。氦的原子核被称做 α 粒子。盖革—弥勒计数器、闪烁计算机、比例计数器中均用到氦。液氦、液氖气泡室是高能物理和核物理研究中不可缺少的工具。用于高能粒子检出、研究的气泡室也要使用液体氦、氖和氙。

用氦液化器、氦致冷机可获得接近绝对零度的低温,此时分子运动大大减弱,有利于研究固体的分子和晶格结构,是固体物理研究的一种极重要的实验工具。此外,液氦、液氮的低温也被用于对自由基

的研究。近年来,迅速地把大空间抽成真空的大容量排气装置——低温泵(使用液氮、氦)已得到实际应用。用液氮操作的低温泵,可以达到电子工业中需要的 130nPa 的高真空和空间研究中需要的 $13\sim 0.13\text{nPa}$ 以上的超高真空。

使用氮的检漏器及用氮、氦作色谱载气等不论在实验室,还是在工业上都有很重要的应用。

稀有气体在基础科学领域中的用途,还涉及到等离子体的研究;用氮、氦测定多孔物质的真密度和表面积;氮气体温度计;用氮 86 进行长度的基准标定;将放射性同位素氮 86 用作自发光光源,用于静电空气净化器、厚度规和超感应检漏器,还用来做实现液相中化学反应的照射能源。

1.2.2.2 在金属焊接、切割方面的应用

化学惰性稀有气体的特性,这一性质被广泛应用于电弧焊接及切割,以防止金属被空气氧化或氮化。氩及氦是焊接工艺中常用的保护气。不锈钢、铝、铝镁合金、镍、钛、钼及它们的合金焊接都离不开氩或氦气的保护。进行焊接操作时,与电极同心安装的喷嘴喷出氩或氦气,从各个方向包围钨极与焊件之间的电弧。考虑到氦气价格便宜及在交流电源下用氦时电弧不稳定,通常使用氩气做保护气。但在焊接熔点高的材料或厚材时,需要用较高的电压来提高温度,此时仍要用氦气。

氦气广泛地应用于金属切割。等离子切割就是利用离解能小的氦,或氩—氦混合气体($\text{Ar}+5\%$ 、 10% 或 $30\% \text{H}_2$)来切割,温度可达 $5000\sim 20000\text{K}$ 。不能采用燃烧方法切割的非铁金属如不锈钢、高合金钢、轻金属以及铜、黄铜等,多采用等离子切割。

此外,氙灯凹面聚光后可以产生 2500°C 的高温,用以焊接或切割难熔金属,如钛、钼等。

1.2.2.3 在冶金方面的应用

如果把纯氧转炉顶吹作为炼钢工业上的一次革命,那么稀有气体在冶金方面的推广使用至少可以说是一次很大的革新。

在提取稀有金属如铈、钍、铍、锆、钛等以及冶炼半导体材料锗、硅的过程中,需要用氩气作环境气体。在硅冶炼中,氮在高温下要与硅反应生成氮化物(Si_3N_4),因此通常用氢、氩和氮作环境气体。由于用氢气易爆炸、不安全,而用氮气价格贵不经济,因此人们广泛使用氩气,并要求氩气中含氮越少越好(10ppm 以内)。在一些钢材的轧制成型工艺中,以及在某些特种钢的冶炼中,也要用稀有气体进行保护。

在金属中溶解的气体夹杂物(H_2 、 N_2 等)形成铸件和金属锭的多孔结构,这往往会导致金属机械性能下降。在有氮鼓泡的情况下,在溶化物上面溶解气体分压降低,使溶解气体部分逸出,最后送入纯氩就可以使金属中的气体夹杂物降至最少。

高碳钢(弹簧钢)和高级特殊钢(不锈钢、高强度钢、低温抗张钢、电磁钢)等在 1200°C 时熔化,如果无氩保护气,则大气水分分解, O_2 、 H_2 、 CO 和 N_2 将被熔钢吸收。 O_2 的存在使材料耐腐蚀性变差, N_2 使材料变硬而难以加工,因此应吹氩进行气体置换。据资料报道,吹氩用量一般为 $10\sim 40\text{m}^3/\text{t}$ 钢。轴承钢、工具钢、型钢、飞机用钢等的精炼也缺少不了惰性气体氩和氮。

氩—氧炼钢的研究始于 1954 年,1968 年正式投产,这是冶炼不锈钢(尤其是超低碳钢)的新方法。1968 年美国碳化物公司林德分公司发明了“氩—氧炼钢法”,提高了钢材质量,缩短了冶炼时间,降低了电耗。日本采用了炉顶吹氧炉底吹氩的转炉炼钢法后,每生产 1t 钢成本可降低 250 日元。我国太原钢铁公司在 50t 电炉上做过吹氩试验,吹氩钢的低倍组织全部消除了白点,机械性能、延伸率和断面收缩率都有提高,冶炼时间每炉缩短 1h7min,产量提高 $20\%\sim 25\%$,吨钢电耗降低 $114\text{kW}\cdot\text{h}$,扣除氩的费用后,总成本降低 8.35 元/t 钢。

氩—氧炼钢一般情况下每吨钢约需氩气 $10\sim 23\text{m}^3$ 。

在不锈钢精炼时顶部吹氧底部吹氩还可以减少铬的氧化飞溅,减少铬的损失。

1.2.2.4 在电光源方面的应用

很久以前,稀有气体就被用于照明工业。灯泡工业就是按泡内充填 $N_2 \rightarrow 14\%N_2 + 86\%Ar \rightarrow Kr, Xe$ 的顺序发展起来的。为了使灯丝温度升高,充填气体热导率要小;为了减小灯丝的蒸发,充填气体分子量越大越好。在这方面,氩比氮要好,而氪、氙又比氩好。

现在,标准的白炽灯是把氩封入双线圈式灯泡内,使用寿命约为 1000h。氪灯泡是充入氪、氙混合气($90\%Kr + 10\%Xe$),比封入氩气效率高、寿命长、体积小。用双线圈式封入氪、氙混合气制成的白炽灯,性能算是最好的,但总的热能变成光能的效率仍很低,只有 $10\% \sim 12\%$,远不如荧光灯经济。荧光灯封入氩气或氪、氙混合气与水银蒸气,一般比白炽灯效率高 4~5 倍,寿命可延长 2~3 倍。荧光灯内的惰性气体起着保护电极和增加水银光亮的作用。

其他各种电灯也会用到稀有气体。如高压及超高压水银灯、钠灯、特殊照明用的锆点光源、闪光灯、频闪观测器等都用到了氪、氙。由于氙灯的放电强度超过太阳光的放电强度,所以用氩气充填的长弧氙灯俗称“小太阳”,其穿雾能力特别强,可用作有雾导航灯,被广泛用于机场、车站、码头和广场;由于其光的色彩好,也常用于拍摄优质彩色影片。霓虹灯则是根据不同颜色的要求,使用氖、氦、氙等不同配比的气体,加上各种滤光玻璃,来获得整套的字模灯光。

除照明以外,电压管、计数放电管、定电压放电管、气体继电器、闸流管等各种放电管也使用氪、氙、氙等稀有气体。氙气是气体激光装置中重要的受激物质。

1.2.2.5 在原子能工业方面的应用

原子能工业也要用到氦等。石墨减速材料上吸附的空气在原子反应堆内脱附,会产生不良影响。为防止这一现象发生,石墨减速材料要在氦气氛中制造、贮存。用液体金属冷却的原子反应堆须用氦作 Na-K 合金的保护气。铀的炼制也要用到稀有气体。

考尔德·霍尔(Calderhall)型原子反应堆用二氧化碳作冷却剂。但实际上氦是最好的冷却剂,因为它的化学性质不活泼,对燃料和装