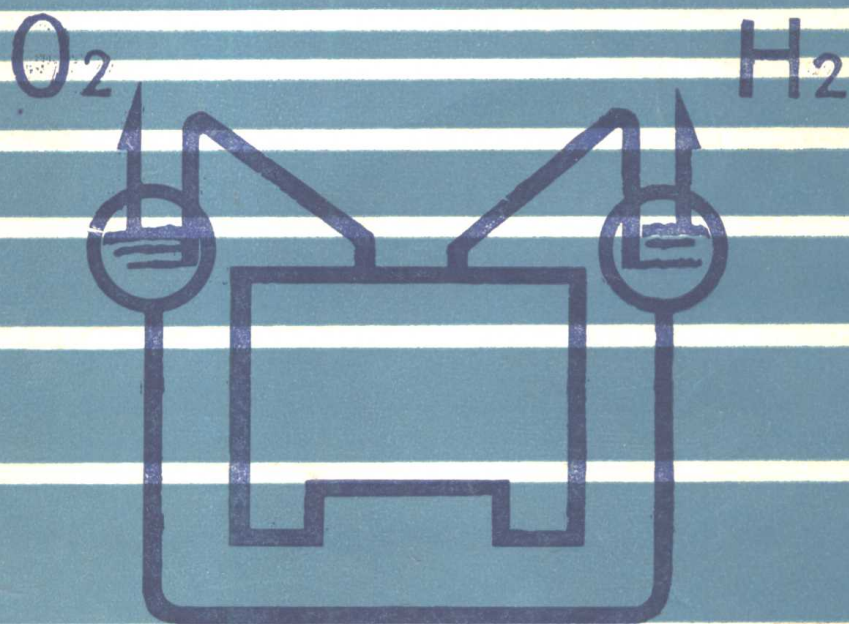


氢气生产与纯化

(水电解制氢)

电子工业部第十设计研究院 编著



黑龙江科学技术出版社

氢气生产与纯化

(水电解制氢)

电子工业部第十设计研究院 编著

黑龙江科学技术出版社

一九八三年·哈尔滨

内 容 提 要

全书共分七章，分别叙述了氢气的性质、用途和生产方法；水电解制氢的原理及电解槽的结构和设计；氢气的纯化及其纯化设备的结构、设计和计算；氢氧站的设计（着重在工艺设计方面）。为满足从事氢气生产（水电解制氢）的科技人员的需要，在书中编入大量的有关试验、科研、设计、运行的数据和图表等。

本书可供从事氢气生产和纯化（水电解制氢）方面的设计、运行管理的科技人员和技术工人参考。

氢 气 生 产 与 纯 化

电子工业部第十设计研究院 编著

黑龙江科学技术出版社出版

(哈尔滨市南岗区分部街28号)

哈尔滨市龙江印刷厂印刷·黑龙江省新华书店发行

开本787×1092毫米1/16·印张26 2/8·插页3·字数596千

1983年12月第一版·1983年12月第一次印刷

印数：1—6,860

书号：15217·047

定价：3.30元

前 言

水电解制氢工艺，是一门开发较早的技术。近年来，随着科学技术的发展和工业生产的需要，又逐渐被人们所注目。国际上从事氢气生产的科技人员，围绕降低制氢能耗，对水电解制氢工艺和设备的改进，开展了许多有益的试验和研究工作，取得了较大的进展。我国的水电解制氢技术，也已有一定的基础。为促进制氢技术的进一步发展，根据一些从事制氢工作的同志的要求，我们在总结工程设计、制氢装置的设计、安装施工、科学试验和运行管理等工作经验的基础上，参考了国内外近年来发表的文献资料，将我院1970年编印的《氢氧站设计》一书重新改编出版，供有关科技人员参考。

全书共七章，按照水电解制氢装置的特点，力求从基本原理、工艺过程、设备设计和计算方面进行较为系统的叙述，以供运行维护人员学习时参考。这是一本适用性较广的参考书。

本书由严德隆、陈霖新二同志主编，参加编写工作的有陈灿棠、谭易和、章光护、张维君、何绍礼等同志。电气、控制部分由王叔连、张志书、王光旭、李甫元同志编写。

本书在编写过程中得到了从事氢气生产的一些技术人员、工人的大力支持，提供了宝贵的经验，在此表示感谢。

我们的经验不足，水平所限，书中一些错误和不妥之处，恳请读者批评指正。

编著者

目 录

第一章 绪论	1
第一节 氢的性质.....	1
第二节 氢的用途.....	3
第三节 氢的生产方法.....	3
第四节 水电解制氢概况.....	10
参考文献.....	12
第二章 水电解制氢的基本原理	13
第一节 水的电解.....	13
一、电解质电离.....	13
二、电解定律.....	14
三、电极上氢氧析出反应过程.....	15
第二节 电解电压.....	19
一、水的理论分解电压.....	19
二、氢和氧超电位.....	22
三、电阻电压降.....	34
四、降低操作电压的因素.....	38
第三节 水电解的能量与物料平衡.....	40
一、电能消耗.....	40
二、水的消耗.....	41
三、水电解的热平衡.....	42
参考文献.....	44
第三章 水电解制氢装置	45
第一节 概述.....	45
一、水电解装置的组成.....	45
二、水电解装置的分类.....	46
三、水电解装置的性能要求.....	48
第二节 水电解槽及辅助设备.....	49
一、碱性水溶液电解槽.....	50
二、固体电解质水电解槽.....	66
三、辅助设备.....	71
第三节 工业水电解装置.....	76
一、箱式制氢装置.....	77

二、DY—24型制氢装置	77
三、DY—30A型制氢装置	78
四、SDJ2500—50型制氢装置	80
五、BBC/Oerlikon制氢装置	81
六、De Nora制氢装置	82
七、EV制氢装置	83
八、Lurgi制氢装置	86
九、Teledyne 制氢装置	87
十、GE 制氢装置	89
十一、高压水电解装置	89
第四节 自动控制与测量	91
一、控制参数要求	91
二、控制仪表选型	92
三、控制系统	92
参考文献	98
第四章 氢气纯化	100
第一节 催化脱氧	101
一、催化反应	101
二、催化剂	104
三、脱氧器的设计	113
第二节 吸附干燥	120
一、吸附平衡	120
二、吸附传质过程	122
三、静态和动态吸附容量	128
四、吸附深度	129
五、吸附热	131
六、吸附剂	132
七、吸附器的设计	140
八、吸附剂的加热再生	148
九、吸附干燥的无热再生	154
第三节 氢气的过滤	160
一、气体过滤和过滤材料	161
二、气体过滤器	169
第四节 催化——吸附法氢气纯化设备	174
一、常压型氢气纯化设备	174
二、压力型氢气纯化设备	178
三、辅助设备	182
第五节 氢气的低温吸附、变压吸附和钯合金扩散法纯化	194

一、低温吸附法纯化氢气	194
二、变压吸附法纯化氢气	200
三、钯合金扩散法纯化氢气	204
参考文献	210
第五章 分析	213
第一节 气体分析	213
一、氢的分析	213
二、氧的分析	231
三、气体中微量水分的分析	236
四、气体中尘埃的测定	244
五、氧气中含碱量的检查	247
第二节 液体分析	247
一、电解液分析	247
二、纯水分析	248
参考文献	252
第六章 氢氧站设计	253
第一节 设计的原始资料	253
第二节 生产工艺流程的确定	254
第三节 主要设备的选择	255
一、水电解装置	255
二、纯化设备	257
三、电解液配制及原料水制取设备	258
四、氢气贮送设备	271
五、灌充设备	281
第四节 氢氧站的布置	287
一、站房布置	287
二、设备布置	289
三、氢氧站设备布置实例	292
第五节 氢氧站有关专业设计要点	302
一、总平面布置	302
二、建筑设计	304
三、采暖通风及供热设计	305
四、给水排水设计	307
第六节 管道及附件	307
一、管道敷设的一般要求	307
二、管径计算	310
三、管道材质	313
四、阀门及附件	314

第七节 氢氧站的电气设计.....	318
一、电解槽的电源装置.....	318
二、配电及照明.....	340
三、热工测量和信号.....	342
四、雷电保护.....	349
参考文献.....	353
第七章 氢气生产装置的操作、维护及故障处置.....	355
第一节 电解槽的操作与维护.....	355
一、电解槽的组装（压滤式电解槽）.....	355
二、电解槽的操作.....	356
三、电解槽的大修.....	357
第二节 氢气生产中常见故障及其处置.....	359

附 录

一、国产水电解制氢装置技术特性.....	372
二、国产水电解制氢装置配用直流电源选择表.....	374
三、国内外第一、第二类工业建筑物和构筑物雷电保护措施的一些规定.....	376
四、各类工业氢的技术指标（部标草案）.....	380
五、隔膜石棉布（部标准JC210—77）.....	380
六、电化学式微量氧分析器主要性能及特点.....	381
七、几种定型国产气相色谱仪主要性能.....	382
八、几种国产微量水测试仪主要性能.....	385
九、常压气体含湿量表.....	386
十、氢、氮、氧、氩气液容积换算表.....	388
十一、常用气体理化数据表.....	389
十二、气体在水中的溶解度.....	400
十三、水的理化数据.....	403
十四、吸附剂.....	404
十五、元素周期表.....	（插表）
十六、国产脱氧催化剂的技术性能.....	409
十七、苯乙烯系离子交换树脂的技术性能.....	410
十八、氢气的燃烧和爆炸性能.....	410
十九、石棉板、聚四氟乙烯.....	413

第一章 绪 论

第一节 氢的性质

氢是宇宙中分布最广的一种元素，它在地球上主要以化合状态存在于化合物中，如水、石油、煤、天然气以及各种生物的组成中。自然界中，水含有11%重量的氢，泥土中含有约1.5%，100公里的高空主要成份也是氢气，但是在大气层中的含量却很低，仅有约1ppm（体积比）。

氢是元素周期表上的第一个元素，它是由一个质子组成的原子核和绕核旋转的一个电子构成。氢是无色、无嗅、无味和无毒的可燃气体，但它同氮气、氩气、甲烷等气体一样，都是窒息气，可使肺缺氧，当空气中的窒息气浓度达到50%时，就有明显的症状，浓度达到75%时，即致死⁽⁴⁾。氢的分子量为2.0158，是最轻的气体。它粘度最小，导热系数最高，化学活性、渗透性和扩散性强（扩散系数为0.63厘米²/秒，约为甲烷的三倍），因而在氢气的生产、贮送和使用过程中都易造成泄漏。它还是一种强的还原剂，可同许多物质进行不同程度的化学反应，生成各种类型的氢化物。

由于氢气具有很强的渗透性，所以当钢暴露于一定温度和压力的氢气中时，溶解于钢的晶格中的原子氢在缓慢的变形中引起脆化作用。它在钢的微观孔隙中与碳反应生成甲烷。随着甲烷生成量的增加，使孔隙扩张成裂纹，加速了碳在微观组织中的迁移，降低了钢的机械性能，甚至引起材质的损坏。通常在高温、高压或液氮温度下，容易引起氢脆或氢腐蚀，因此，在有氢气的环境中工作的设备和管道，其材质应按具体使用条件慎重进行选择。

氢的着火、燃绕、爆炸性能，是它的主要特性。氢的燃烧性能好，氢氧焰可达3400°k的高温，在氢气中没有杂质时，火焰无色，氢气燃烧只生成水，不污染环境，所以被称为“清洁的氢能”。氢的燃烧性能见表1—1。氢气的着火温度在可燃气体中虽不是最低的，但由于它的着火能仅为20微焦，比烷烃要低一个数量级以上，所以很易着火，甚至化学纤维织物摩擦所产生的静电已比氢的着火能大几倍。一些可燃气体的着火能和氢气的最小着火能见附录中图18—4。因此，在氢的生产中应采取措施，尽量减少和防止静电的积聚。

氢气的着火性能随着温度和压力的不同而变化，一般情况下，压力增加，温度升高，可燃气体混合物的着火下限降低，上限提高，着火范围变宽；压力、温度下降则相反，变化情况可见附录中的图18—2和18—3。在可燃气体混合物中，加入一定数量的稀释剂—惰性气体氮气、氩气等，使着火上限下降，可燃区变窄，但着火下限的变化不大，可见附录图18—1。

表 1—1 氢的燃烧、爆炸性能 (5)

在空气中的燃烧范围 (体积%)	4.0~75.0	着火能 (mJ)	0.02
在空气中的爆轰范围 (体积%)	18.0~59.0	燃烧热 (Kcal/g.mol)	68
在氧气中的燃烧范围 (体积%)	4.65~94	火焰温度 (°C)	2045
在氧气中的爆轰范围 (体积%)	18.3~58.9	火焰发射率	0.1
在空气中的着火温度 (°C)	585	灭火距离 (latm) (Cm)	0.06
在氧气中的着火温度 (°C)	560	火焰速度 (Cm/S)	270

氢气的火焰传播速度快 (2.75米/秒), 灭火距离小 (0.06厘米), 仅为甲烷的1/4 (灭火距离是火焰表面到不经冷却而自行灭火表面的距离)。

氢的燃烧过程由于密闭、引燃的状况和气体组份等条件的不同, 可以成为爆燃和爆轰二种燃烧反应中的任何一种。爆燃是一种自然的连锁反应, 它的燃烧速度在亚音速范围, 一般在几十呎/秒以下; 爆轰则是在燃烧反应前存在着冲击波或有某种使爆燃转变为爆轰的条件所引起, 它的速度达到超音速范围, 一般都在数千呎/秒。在恒定体积中的爆燃, 压力大约增加到起始压力的 7 倍; 而在恒定体积中的爆轰, 压力大约增加到 20 倍, 并当遇到障碍物时, 反射压力是入射压力的 2—3 倍。在封闭或局部封闭状态下的氢-空气和氢-氧混合物的爆燃可能引起爆轰; 而在敞开状态时一般则不可能。

氢同位素有氕、氘、氚三种。氕 (通称氢) 和氘 (重氢) 为稳定性同位素; 氚为放射性同位素。氢的同位素在天然氢中的含量与氢的来源有关, 大致范围见表 1--2。氢 (H_2) 和重氢 (D_2) 又因核自旋方向不同, 分别以正态 ($o-H_2$, $o-D_2$) 和仲态 ($p-H_2$, $p-D_2$) 而存在。正-仲态组份与温度有关, 室温时, 氢气的正、仲组成为 75:25; 正、仲氢的平衡随着温度的不同而变化, 在 20.4°K 时 (即液态氢时), 仲氢为 99.79%。但平衡的速度是缓慢的, 正氢向仲氢的转换是放热过程, (放热量为 9.2 千卡/升)。若正-仲氢的转换在液氢的绝热容器中自然地进行, 则将使液氢蒸发损失一部分, 所以

表 1—2 氢同位素在天然氢中的含量 (5)
(%)

氕	氘	氚
99.985	0.0139~0.0156	<10 ⁻¹⁰

正-仲转换过程是液氢生产的重要操作工序。液氢是一种无色、透明的低温液体, 它在一个大气压的沸点为 20.4K° (-252.6°C), 密度为 0.07097 公斤/升, 是水的十四分之一。一立方米液氢全部气化可得到 788 标米³的气态氢, 蒸发潜热仅为 7.7 仟卡/升。其他各种气体在氢中的溶解度极低, 一般是以固态存在于液氢中。

第二节 氢的用途

氢气广泛应用于化学、冶金、电子等工业部门。随着液氢生产的发展，也逐步地应用于宇航、火箭事业上。近年来，在新能源的开发中，一些国家已开始重视氢能的应用。

在石油化学工业的生产中，应用不同组份的含氢气体作为合成氨、甲醇、石油炼制生产的原料气、加氢气体等，其用量大约占氢气总产量的93%左右。⁽⁸⁾在尼龙、塑料、农药和油脂化学工业中，都需加入一定纯度的氢气，生产相应的产品。

在冶金工业中，氢气的使用颇为广泛。有色金属—钨、钼、钛等的生产和加工中，使用高纯氢气作为还原气和保护气；在硅钢片的生产中，需用高纯氢气作保护气；在一些磁性材料、磁性合金的生产中，也需用高纯氢气作保护气，以提高磁性和稳定性；在精密合金的光亮淬火，退火时，使用高纯氢气，可以提高产品质量，简化工序；在硬质合金、粉末冶金材料的生产中，高纯氢气作为合金制作过程中的还原剂和保护气，是不可缺少的；在一些薄板、带钢的轧制中常常使用氮气—氢气混合气作保护气。

在电子工业中，也十分广泛地使用高纯氢气，主要用于电子材料、半导体材料和器件、集成电路以及电真空器件的生产。按用途的不同，它作为还原气、携带气和保护气。如在多晶硅制取、硅、砷化镓外延生长时，都需用纯度很高的氢气作为还原气。氢气纯度的高低，直接影响到多晶硅和外延片的生产 and 产品质量，特别是外延生长工序，一般要求氢的纯度在6个“9”以上。由于制氢技术特别是氢气的纯化工艺的发展，促进了半导体技术的不断发展。在电子管生产中，需用高纯氢气作为另件退火等的保护气。

在建筑材料和轻工业中，也常常应用氢气作保护气、还原气或燃烧气体。如石英玻璃、人造宝石的制造和加工，广泛使用氢—氧焰获得高温，在浮法玻璃生产中，使用氢气—氮气混合气作保护气等。

在电力工业中还采用氢气作为汽轮发电机的冷却剂。

气体制造工业使用氢气进行气体的纯化。

另外，液氢是一种优良的火箭推进剂，是宇航和火箭的重要液体燃料。

七十年代以来，世界能源危机的发生，促使能源研究的科学工作者都在寻找各种新能源的开发和利用，使能源工业呈现了多样化的兴旺景象。氢气作为能源在来源丰富、使用干净、适应性强、储运方便等方面，是很有前途的。

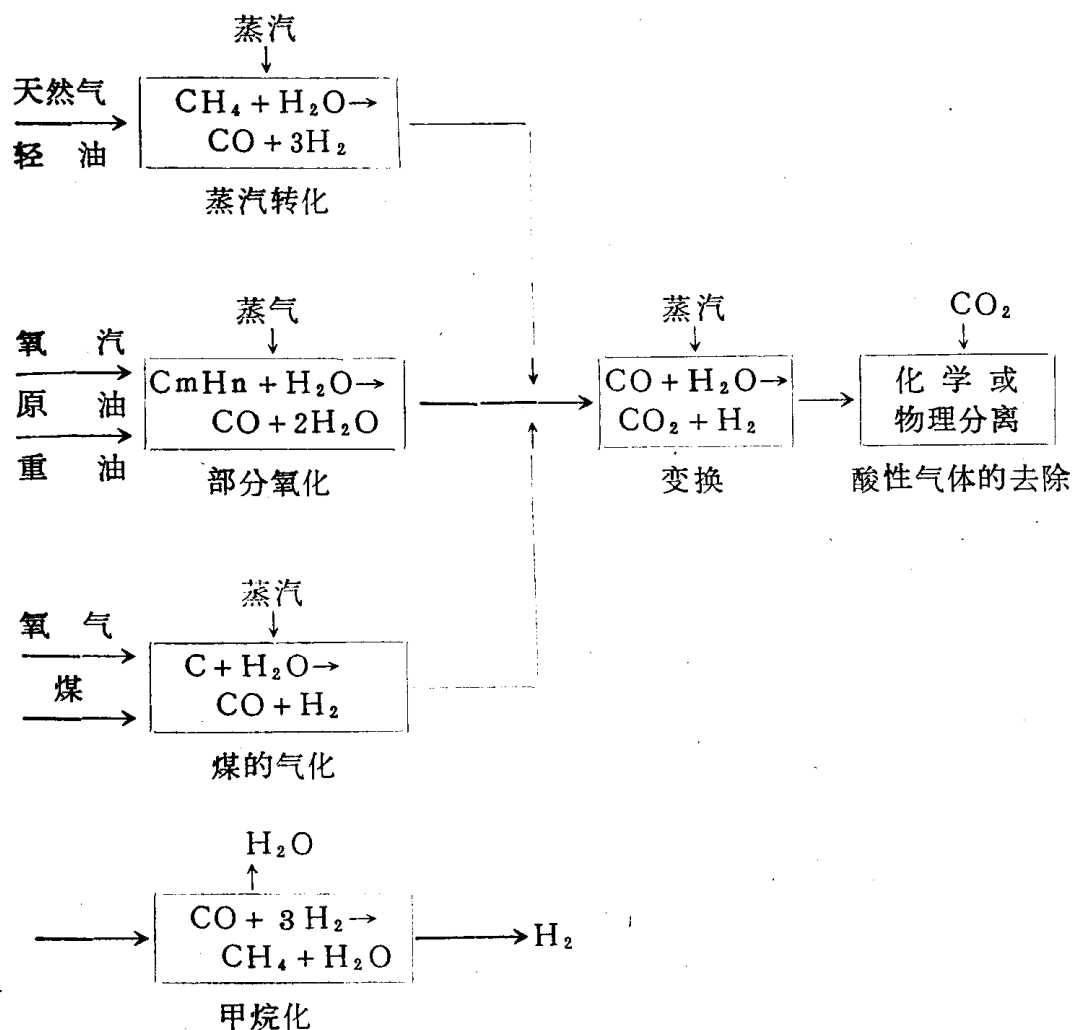
第三节 氢的生产方法

氢的生产技术由来已久。1783年法国的物理学家夏尔理，提出用硫酸和铁作用制取氢气。同年，拉瓦锡设计了成本低廉的由水蒸汽通过灼红的枪筒制取氢气。1800年，实现了电解水制取氢气、氧气，这种方法简单、可靠。19世纪中叶由煤制造水煤气、获得含氢气体。19世纪后半期，开始用铁—汽法制取氢气。第一次世界大战后，由于合成氨

及合成甲醇的发展，促进了水煤气制取氢气和用气体烃、水蒸汽转化制氢的发展。所以氢气生产的发展是跟随着用氢工业部门和石油化学工业的发展而向前发展的。进入七〇年代以来，氢气被人们誉为“清洁能源”又进一步引起了人们的关注。对于新的制氢方法，开展了广泛的研究工作。热化学循环法制氢、热分解直接制氢、光催化法制氢等，都还处于研究阶段。目前，工业上的制氢主要是矿物燃料转化制氢和水电解制氢两种方法。

一、矿物燃料转化制氢

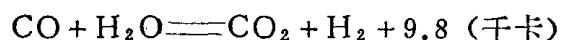
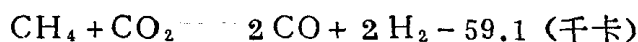
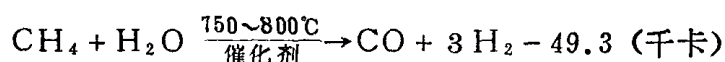
由各种矿物燃料—天然气、石油及其制品、煤制氢，其过程具有很大的相似性。它的基本过程是：烃类的蒸汽转化——包括天然气、轻油等的蒸汽转化；部分氧化法——原油、重油等液体原料的部分氧化；煤的气化。它们的基本过程可用下面方框图表示：



由矿物燃料制取氢气的方法，目前仍是主要的生产氢气的方法，但据一些文献预测，在1985年或更远的时期，情况将会有所变化，各种经济的、不使用矿物燃料的制氢方法，有可能逐步取代它。

(一) 气体烃类转化法制氢 (6) (7)

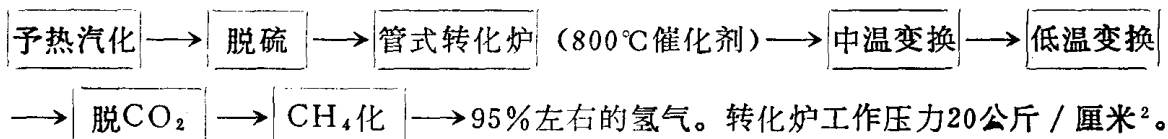
天然气、焦炉气、石油炼厂气等气体烃中都含有大量的甲烷。甲烷转化制取氢气的主要反应如下:



为获得工业氢气可采用水蒸汽和纯氧的混合物作氧化剂。在制取合成气时,可采用水蒸汽和富氧空气的混合物作氧化剂。在转化炉中制得含氢气体后,再经过CO变换,去除CO₂和各种硫化物后,可得到含氢量>95%左右的气体。天然气转化制氢时,由于原料气的组成,工艺流程及设备不同,各种技术经济指标也有所不同。据报导,若将天然气转化后再以变压吸附装置提纯制取的氢气纯度可达到99.5%以上。生产1标米³氢所需的天然气大约为1.0~1.2标米³,同时还要消耗必要的冷却水和电能等。

(二) 液态烃转化制取氢气

原油及其在精炼过程中所得到的轻油和重油都可以用蒸汽转化法和部分氧化法制得含氢气体,其反应原理和生产过程基本与天然气转化法相同。一套氢气产量为500标米³/小时的轻油蒸汽转化装置,采用管式转化炉,其工艺流程大体上是:原料油→



轻油耗量115公斤/小时。

(三) 焦炉气及其它含氢气体的深冷分离法制取氢气 (5)

焦炉气分离装置,是使焦炉氢在一定压力下逐级冷却至低温,在不同的温度范围,依次分离出丙烯、乙烯、甲烷等馏份,最后用99.998%的高纯液氮洗涤,除去残留的甲烷、一氧化碳和氧等杂质,再进一步用低温吸附脱氮,即可制取高纯度的氢气。水煤气分离装置,是使水煤气冷却并以液氮洗涤除去甲烷、一氧化碳和氧等杂质后,再脱氮制取氢气(近年来,焦炉气、水煤气的深冷分离技术已扩展到石脑油、天然气为原料的蒸汽转化法生产合成气和氢气)。

为使分离装置能长期安全运行,原料气在进入低温装置前应进行预净化,脱除CO₂、NO等杂质。这种分离装置一般适用于大型的制氢装置和合成气装置。

(四) 煤气化制取氢气

固体燃料的气化是用蒸汽、氧气(富氧空气)或蒸汽—空气混合气通过灼热的焦炭层、煤层,获得以CO、H₂为主要组份的各种煤气(CO+H₂在80%左右)。实际生产的煤气成份和消耗指标以炉型、固体燃料的种类、性能和操作条件等不同有所不同。

制取的煤气,经过CO变换和气体精制后可得氢气。其工艺流程与气态烃转化制氢类似。

获得1000米³水煤气，约消耗0.67吨焦炭、7.1吨蒸汽、106千瓦小时电能。

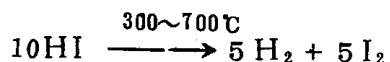
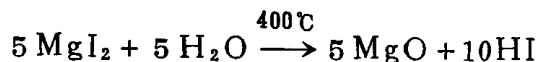
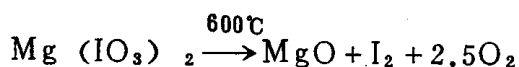
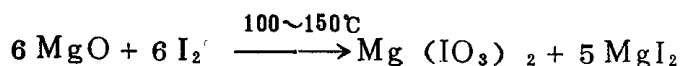
二、热化学分解水制取氢气 (7) (11)

在闭合循环中利用热化学法制取氢气，是使水在某一化学反应过程中，在热的作用下进行分解。当温度为273°k时，用热直接分解水的平衡常数为 10^{-45} ，而1200°k时为 10^{-8} 左右。当温度为2773°k时，在水蒸汽中就含有4.5% H₂和O₂的混合物和5.6%的H₂和OH⁻混合物。但是，用热直接分解水，要在给定的温度下，把复杂的蒸汽—气体混合物分离是困难的，所以便研究开发了热化学法分解水，它是借助于复杂的系统和由许多中间反应来完成的。一般其反应过程至少是两个或两个以上的阶段。在反应过程中热能基本上变为化学能，并且可以直接利用高温核反应堆的热能，即热能—氢能的一次能源转换，而不像电解法，须经历热能—机械能—电能—氢能等多次能源转换，从而使制氢效率大为提高，能耗降低。所以，热化学法制氢技术使科学工作者发生了极大的兴趣，现在已经报导的就有许多种，但多数仍处于实验室试验阶段。要使热化学法分解水制氢技术在工业上应用，必须做到：

1. 这个循环的热源应易于获得，并能保证它在最高温度时，该循环必须有足够高的效率。为此，中间反应阶段要少，每个阶段消耗的能量要少。

2. 循环的各个阶段的反应要在高速下进行，且没有付反应。循环中的反应剂应廉价和不稀缺的。

3. 反应剂应无毒，对结构材料没有腐蚀。循环过程安全，易于操作。为此尚须解决一系列问题，比如，研究和建立安全可靠的工作温度1000°k~1100°k，以及今后的1400~1500°k工作热源；研制高温热交换器；研制反应剂回收率达99.9~99.99%的工艺路线及设备……等。要解决这些问题，还需要时间。现以日本阳光计划中研究发展的“碘系循环”，作一梗概介绍如下，循环的反应式为：



如图1—1所示，由四阶段反应组成，除原料水和氢、氧生成物外，没有其他物质进出，没有公害，这个循环已完成基础化学阶段，正在从化学工程上加以研究，计划先建立1.0标米³/小时的试验装置，希望到2000年建设实用装置。

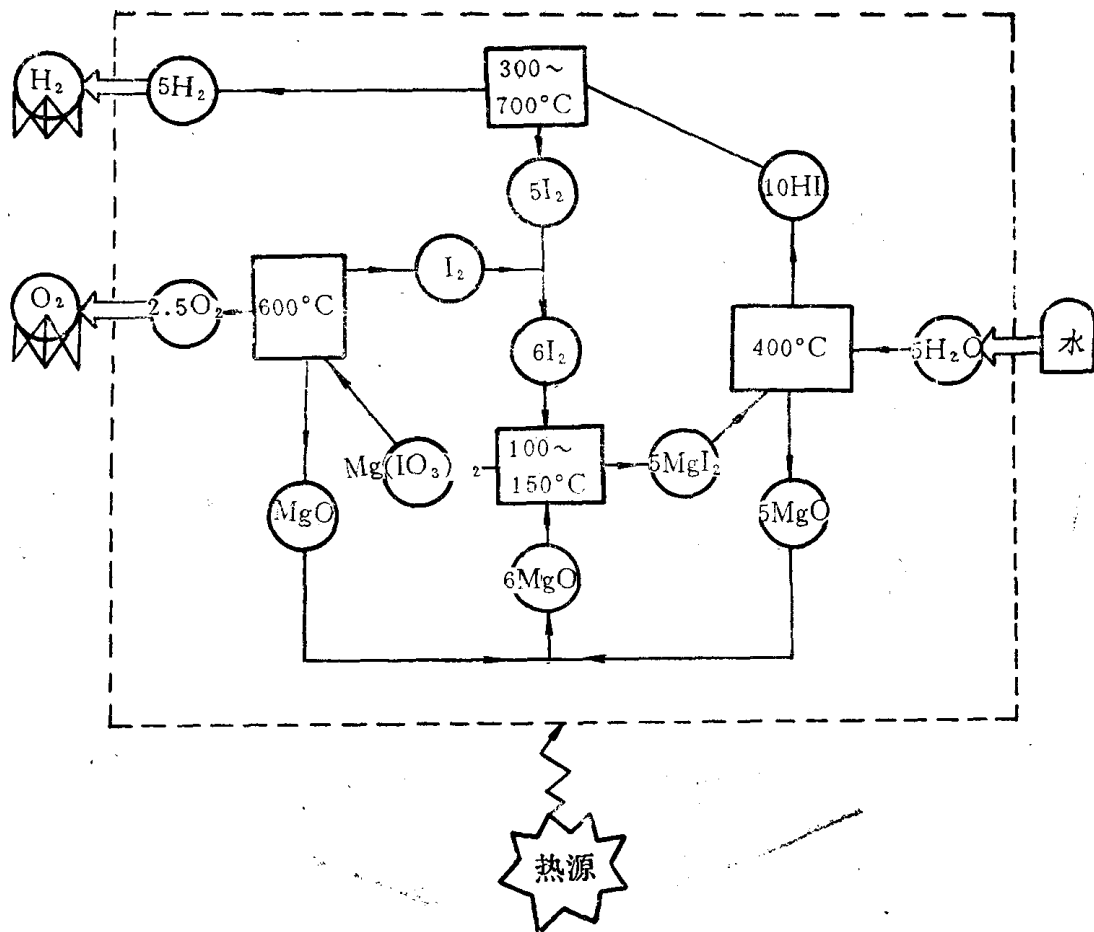


图1-1 碘系热化学法水分解制氢示意图

三、光催化作用制取氢气^{(11) (14)}

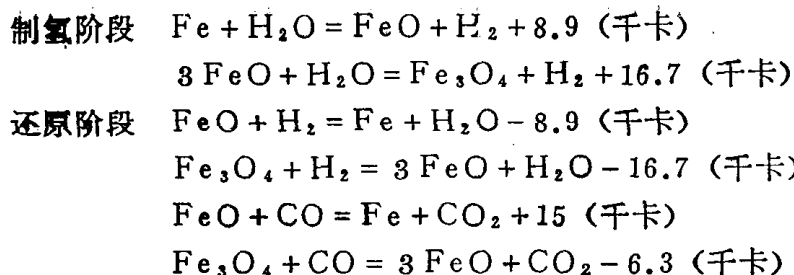
在光的作用下，当有光催化剂存在时，水可以分解为氢气和氧气。所选用的光催化剂，应在相当宽的光谱区域内有吸收光的能力和光合再生的性能。许多从事制氢技术研究的科学家们正积极开展工作，寻求有实用价值的光解水所需的光催化剂，并取得了一些实验室成果，如在光电分解水制氢时采用的 TiO_2 晶体，在光生物化学分解水制氢时采用的氢化酶等。

四、其他方法制取氢气^{(1) (7)}

(一) 铁汽制氢法

这是一种古老的方法，1903年已在工业上应用，但由于设备体积大、产品氢气不纯，热效率低、成本高等缺点，在工业制氢方面没有获得较大的发展。

铁汽制氢法是用水蒸汽和水煤气（或其他具有还原性质的气体）交替通过赤热的铁而进行的。水蒸汽与铁作用，使铁氧化，蒸汽被分解而产生氢气，接着通入水煤气等，使铁还原，然后再通入水蒸汽，如此反复进行。其反应式为：



上述反应都是可逆的。制氢过程是放热的。在实际操作中，除了这些主要反应之外，还产生一些付反应，使产品气不纯。在还原态的铁的催化作用下，部分CO生成CO₂和游离碳。在制氢阶段，部分碳可和水蒸汽反应生成H₂、CO₂和CO，也有可能同氢反应生成CH₄，硫化物与水蒸汽、氢气反应生成硫化氢。制得的氢气纯度可达到97~98%，含有杂质CO₂0.5~0.6%，CO0.4~0.5%，O₂0.1%，CH₄0.3~0.6%，N₂0.4~1.0%。若操作不当，氢气中的CO₂和CO还会增加，使氢气的纯度降至90%或更低。铁汽制氢的工艺流程见图1—2。

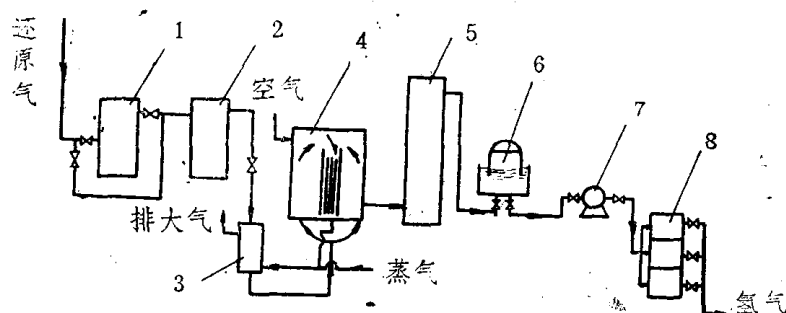


图1—2 铁汽制氢法流程示意

- 1、2—脱硫器；3—换热器；4—氢气发生炉；5—氢气洗涤塔；
 6—缓冲罐；7—氢气加压泵；8—脱硫器。

这种装置是间歇操作的，制氢阶段和还原阶段交替进行，一般制氢时间为8~12分钟，还原时间为15~25分钟，可根据实际反应而定。反应温度平均为600~800℃。

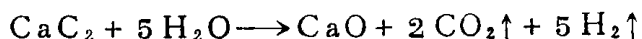
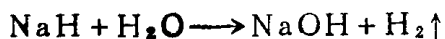
铁汽制氢所用的铁矿石通常采用质地较疏松的菱铁矿。在反应之前，先将铁矿石中的二氧化碳和硫化物烧掉，使之成为疏松多孔的物质，硫含量尽可能的减少。还原气体可用水煤气或发生炉煤气，其中CO + H₂量越高越好。

用铁汽制氢法，生产1000标米³氢气需要1800~2700标米³水煤气和2.5~3.5吨水蒸汽。

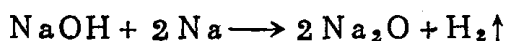
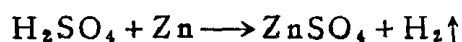
(二) 某些化合物与水起作用制取氢气

它可以称作化学制氢法或实验室制氢法，属于这一类的制氢方法很多，这里仅介绍以下几种方法：

某些化合物与水作用生产氢气：

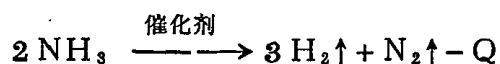


某些酸碱制取氢气:



(三) 氨分解制氢

在一定的温度下, 通过催化剂的氨气被分解为氮氢混合气(75%的氢、25%的氮),



催化剂一般可采用合成氨用的催化剂, 如用国产的A₀催化剂时, 分解温度为650℃~700℃, 分解率可达99%以上。分解后的高温混合气体经过冷却器、分离器、干燥器后, 纯度为: 含氧量<20ppm, 含水量(露点)为<-40℃, 含氮量<0.01%。每公斤液氨可生产2.64标米³混合气。根据原料的来源, 还可采用甲醇分解制氢。

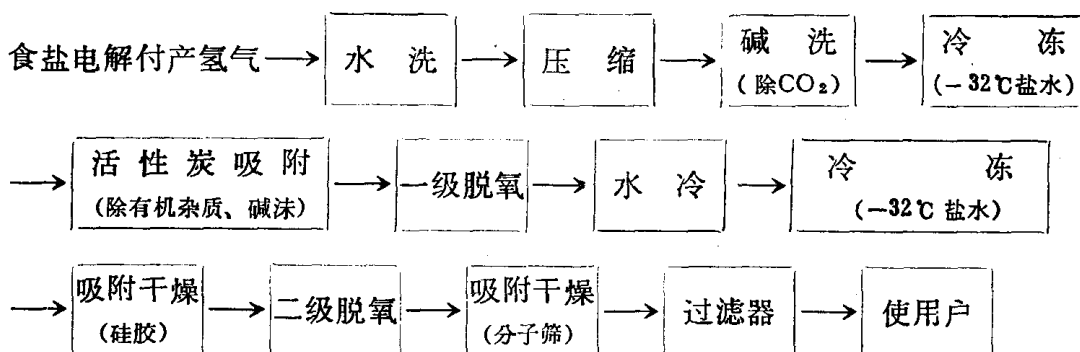
(四) 副产氢气的回收

在一些化工生产过程中, 生产化工产品的同时, 有时可以产生含氢气体, 这些含氢气按组份的不同, 可以应用各种不同的方法获取一定纯度的氢气。由于回收副产氢气, 成本往往较低, 使它在一定范围内具有明显的优越性。副产氢气的回收实例:

1. 氯化钠(食盐)水溶液电解副产氢的回收。这个生产过程中除了得到氢氧化钠和氯气外, 还副产氢气, 其氢气中主要杂质有:

N ₂	CO	CO ₂	O ₂	水汽
1~2%	10~20ppm	0.1~0.2%	0.1~0.5%	饱和

其他的气体杂质含量<10ppm, 还有微量的磷、砷、硼等杂质。如果采用水银法时, 还有汞杂质。回收净化流程是:



净化处理后的氢气中的杂质含量如下:

N ₂	CO	CO ₂	O ₂	水汽
122%	<10ppm	<20ppm	<10ppm	-40~-60℃(露点)

上述回收净化处理流程主要是去除二氧化碳、氧、水汽杂质, 氮和一氧化碳杂质没有去除。由于化工厂中常常可以方便的取得低温盐水, 所以在该流程中才使用了低温盐水进行予干燥。脱氧工序还可以简化为一级脱氧, 生产流程可相应的缩短。