



人力资源和社会保障部职业能力建设司推荐
冶金行业职业教育培训规划教材

苯加氢操作技术

BENJIAQING CAOZUO JISHU

盛军波 主编



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

人力资源和社会保障部职业能力建设司推荐
冶金行业职业教育培训规划教材

苯加氢操作技术

盛军波 主编

北京
冶金工业出版社
2014

内 容 提 要

本书为人力资源和社会保障部职业能力建设司推荐、冶金行业职业教育培训规划教材。全书共分8章,分别从变压吸附制氢、催化加氢、苯加氢蒸馏、苯加氢油库、能源介质、苯加氢设备、苯加氢安全及环保、苯加氢专业化管理等方面对焦化粗苯加氢精制相关知识进行了系统地梳理,重点介绍苯加氢现场安全生产操作。

本书可用作苯加氢岗位人员进行岗位技术和操作技能的培训教材,也可供相关专业技术人员、大专院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

苯加氢操作技术/盛军波主编. —北京:冶金工业出版社,2014.1
人力资源和社会保障部职业能力建设司推荐 冶金行业职业教育
培训规划教材

ISBN 978-7-5024-6461-5

I. ①苯… II. ①盛… III. ①苯—加氢—操作—技术—职业
教育—教材 IV. ①TQ511

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第013044号

出版人 谭学余

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷39号,邮编100009

电 话 (010)64027926 电子信箱 yjchs@cnmip.com.cn

责任编辑 刘小峰 曾 媛 美术编辑 杨 帆 版式设计 孙跃红

责任校对 王永欣 责任印制 李玉山

ISBN 978-7-5024-6461-5

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;三河市双峰印刷装订有限公司印刷
2014年1月第1版,2014年1月第1次印刷

787mm×1092mm 1/16;17.75印张;469千字;266页

49.00元

冶金工业出版社投稿电话:(010)64027932 投稿邮箱:tougao@cnmip.com.cn

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893

冶金书店 地址:北京东四西大街46号(100010) 电话:(010)65289081(兼传真)

(本书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

冶金行业职业教育培训规划教材

编辑委员会

主任 张 海 中国钢协人力资源与劳动保障工作委员会教育培训研究会
主任，河北钢铁集团宣化钢铁公司董事长

谭学余 冶金工业出版社 社长

副主任 王 资 昆明冶金高等专科学校 校长

鲁启峰 中国职工教育和职业培训协会冶金分会秘书长

中国钢协职业培训中心 副主任

顾问

北京科技大学 曲 英 王筱留 蔡嗣经 宋存义 唐 荻 包燕平

东 北 大 学 翟玉春 陈宝智 王 青 魏德洲 沈峰满 张延安

委员

首钢集团总公司	王传雪	舒友珍	宝钢集团有限公司	杨敏宏
武汉钢铁集团公司	曹裕曾	王展宏	鞍山钢铁集团公司	尹旭光
唐山钢铁集团公司	罗家宝	武朝锁	本溪钢铁集团公司	刘恩泉
邯郸钢铁集团公司	尤善晓	石宝伟	江苏沙钢集团公司	巫振佳
太原钢铁集团公司	毋建贞	孟永刚	莱芜钢铁集团公司	刘祖法
包头钢铁集团公司	李金贵	付国平	江西省冶金集团公司	张朝凌
攀枝花钢铁集团公司	张海威	许志军	韶关钢铁集团公司	李武强
马钢集团公司	唐叶来	王茂龙	宣化钢铁集团公司	尹振奎
济南钢铁集团总公司	李长青	曹 凯	柳州钢铁集团公司	刘红新
安阳钢铁集团公司	魏晓鹏	马学方	杭州钢铁集团公司	汪建辉
华菱湘潭钢铁集团公司	文吉平	李中柱	通化钢铁集团公司	荆鸿麟
涟源钢铁集团公司	毛宝粮	袁超纲	邢台钢铁公司	李同友
南京钢铁联合公司	包维义	陈龙宝	天津钢铁集团公司	张 莹
昆明钢铁集团公司	孔繁工	马淑萍	攀钢集团长城特钢公司	朱云剑
重庆钢铁集团公司	田永明	岳 庆	西林钢铁集团公司	夏宏钢
福建三钢集团公司	卫才清	颜觉民	南昌长力钢铁公司	胡建忠

委 员

宝钢集团上海梅山公司	朱胜才	吴文章	天津钢管集团公司	雷希梅
萍乡钢铁公司	邓 玲	董智萍	江西新余钢铁公司	张 钧
武钢集团鄂城钢铁公司	袁立庆	汪中汝	江苏苏钢集团公司	李海宽
太钢集团临汾钢铁公司	雷振西	张继忠	邯鄹纵横钢铁集团公司	阚永梅
广州钢铁企业集团公司	张乔木	尹 伊	石家庄钢铁公司	金艳娟
承德钢铁集团公司	魏洪如	高 影	济源钢铁集团公司	李全国
首钢迁安钢铁公司	习 今	王 蕾	华菱衡阳钢管集团公司	王美明
淮阴钢铁集团公司	刘 瑾	王灿秀	港陆钢铁公司	曹立国
中国黄金集团夹皮沟矿业公司	贾元新	衡水薄板公司	魏虎平	
河北工业职业技术学院	袁建路	李文兴	吉林昊融有色金属公司	张晓满
昆明冶金高等专科学校	卢宇飞	周晓四	津西钢铁公司	王继宗
山西工程职业技术学院	王明海	史学红	鹿泉钢铁公司	杜会武
吉林电子信息职业技术学院	张喜春	李长权	河北省冶金研究院	彭万树
安徽工业职业技术学院	李庆峰	秦新桥	中国钢协职业培训中心	包 蕾
山东工业职业学院	王庆义	王庆春	有色金属工业人才中心	宋 凯
安徽冶金科技职业技术学院	张永涛	陈筱莲	河北科技大学	冯 捷
昆明冶金高等专科学校	谭红翔	余宇楠	内蒙古机电职业技术学院	石 富
中国中钢集团	刘增田	秦光华	富伦钢铁有限公司	李殿明

秘 书

冶金工业出版社 宋 良 (010-64027900, 3bs@cnmip.com.cn)

本书编委会

主 编 盛军波

委 员 (按姓氏笔画为序)

王兰英 王凯军 王建平 刘向勇 刘忠然 刘振中

吴恒喜 余刚强 张 涛 张德文 陈胜春 易建刚

钱红辉 常红兵 雷兴红 黎汉琪

序

吴溪淳

改革开放以来，我国经济和社会发展取得了辉煌成就，冶金工业实现了持续、快速、健康发展，钢产量已连续数年位居世界首位。这期间凝结着冶金行业广大职工的智慧 and 心血，包含着千千万万产业工人的汗水和辛劳。实践证明，人才是兴国之本、富民之基和发展之源，是科技创新、经济发展和社会进步的探索者、实践者和推动者。冶金行业中的高技能人才是推动技术创新、实现科技成果转化不可缺少的重要力量，其数量能否迅速增长、素质能否不断提高，关系到冶金行业核心竞争力的强弱。同时，冶金行业作为国家基础产业，拥有数百万从业人员，其综合素质关系到我国产业工人队伍整体素质，关系到工人阶级自身先进性在新的历史条件下的巩固和发展，直接关系到我国综合国力能否不断增强。

强化职业技能培训工作，提高企业核心竞争力，是国民经济可持续发展的重要保障，党中央和国务院给予了高度重视，明确提出人才立国的发展战略。结合《职业教育法》的颁布实施，职业教育工作已出现长期稳定发展的新局面。作为行业职业教育的基础，教材建设工作也应认真贯彻落实科学发展观，坚持职业教育面向人人、面向社会的发展方向和以服务为宗旨、以就业为导向的发展方针，适时扩大编者队伍，优化配置教材选题，不断提高编写质量，为冶金行业的现代化建设打下坚实的基础。

为了搞好冶金行业的职业技能培训工作，冶金工业出版社在人力资源和社会保障部职业能力建设司和中国钢铁工业协会组织人事部的指导下，同河北工业职业技术学院、昆明冶金高等专科学校、吉林电子信息职业技术学院、山西工程职业技术学院、山东工业职业学院、安徽工业职业技术学院、武汉钢铁集团公司、山钢集团济钢公司、中国职工教育和职业培训协会冶金分会、中国钢协职业培训中心、中国钢协人力资源与劳动保障工作委员会教育培训研究会等单位密切协作，联合有关冶金企业、高职和本科院校，编写了这套冶金行业职业教育培训规划教材，并经人力资源和社会保障部职业培训教材工作委员会组织专家评审通过，由人力资源和社会保障部职业能力建设司给予推荐，有关学

校、企业的编写人员在时间紧、任务重的情况下，克服困难，辛勤工作，在相关科研院所的工程技术人员积极参与和大力支持下，出色地完成了前期工作，为冶金行业的职业技能培训工作的顺利进行，打下了坚实的基础。相信这套教材的出版，将为冶金企业生产一线人员理论水平、操作水平和管理水平的进一步提高，企业核心竞争力的不断增强，起到积极的推进作用。

随着近年来冶金行业的高速发展，职业技能培训工作也取得了令人瞩目的成绩，绝大多数企业建立了完善的职工教育培训体系，职工素质不断提高，为我国冶金行业的发展提供了强大的人力资源支持。今后培训工作的重点，应继续注重职业技能培训工作者队伍的建设，丰富教材品种，加强对高技能人才的培养，进一步强化岗前培训，深化企业间、国际间的合作，开辟冶金行业职业技能培训工作的新局面。

展望未来，任重而道远。希望各冶金企业与相关院校、出版部门进一步开拓思路，加强合作，全面提升从业人员的素质，要在冶金企业的职工队伍中培养一批刻苦学习、岗位成才的带头人，培养一批推动技术创新、实现科技成果转化的带头人，培养一批提高生产效率、提升产品质量的带头人；不断创新，不断发展，力争使我国冶金行业职业技能培训工作跨上一个新台阶，为冶金行业持续、稳定、健康发展，做出新的贡献！

前 言

近年来，焦化粗苯加氢精制技术由于具有节能环保、产品纯度高、自动化程度高、安全性能好等优点，在全国得到了广泛应用。目前有关苯加氢技术的专业技术教材较少，因此，在相关单位和同仁的大力支持下，我们编写了《苯加氢操作技术》一书。

本书对焦化粗苯加氢精制相关知识进行了系统地梳理，是一本实用性很强的，专门介绍苯加氢工艺原理、生产操作、设备管理、安全管理的通俗读物。本书将重点放在如何指导现场安全生产实际操作上，对苯加氢生产过程中的诸多问题做了深入的探讨。

本书可用作苯加氢岗位人员进行岗位技术和操作技能的培训教材，也可供相关专业技术人员、大专院校师生参考。

本书在出版的过程中参考了一些资料，并得到了武汉平煤武钢焦化有限责任公司、武汉钢铁（集团）公司人力资源部的大力支持和帮助，在此向他们表示诚挚的感谢。

由于编者水平所限，本书虽几经推敲修改，难免有瑕疵之处，望广大读者见谅。

编 者
2013年9月

目 录

1 变压吸附制氢	1
1.1 变压吸附制氢原料及产品	1
1.1.1 焦炉煤气	1
1.1.2 氢气	2
1.1.3 解吸气	2
1.1.4 气体组分	3
1.2 变压吸附制氢吸附剂及催化剂	3
1.2.1 焦炭	4
1.2.2 活性炭	5
1.2.3 硅胶	6
1.2.4 氧化铝	8
1.2.5 分子筛	9
1.2.6 吸附剂装填	11
1.3 变压吸附制氢原理及工艺流程	14
1.3.1 吸附基本理论	14
1.3.2 吸附分离方法	22
1.3.3 变压吸附制氢工艺流程	26
1.4 变压吸附制氢一般操作	33
1.4.1 变压吸附制氢开工	33
1.4.2 变压吸附制氢停工	35
1.4.3 生产调节	35
1.4.4 煤气压缩机操作	40
1.4.5 吸附塔切换	40
1.5 变压吸附制氢特殊操作	41
1.5.1 应急操作	41
1.5.2 程控阀故障判断及处置	43
思考题	44
2 催化加氢	45
2.1 加氢反应物料及催化剂	45
2.1.1 二甲基二硫	45
2.1.2 粗苯（轻苯）	47
2.1.3 阻聚剂	49
2.1.4 硫化氢	50
2.1.5 铵盐	51
2.1.6 催化剂	52

2.2	KK 法加氢反应原理及工艺流程	53
2.2.1	KK 法加氢工艺原理	54
2.2.2	KK 法加氢工艺流程	56
2.2.3	影响 KK 法加氢工艺的主要因素	56
2.2.4	KK 法加氢工艺中主要设备	57
2.3	催化加氢一般操作	59
2.3.1	加氢反应系统开工	59
2.3.2	加氢反应系统停工	61
2.3.3	稳定塔开工	62
2.3.4	稳定塔停工	63
2.3.5	高速泵开机	64
2.3.6	循环氢气压缩机开机	65
2.3.7	补充氢气压缩机开机	66
2.3.8	主反应器加热炉点火	66
2.4	催化加氢特殊操作	67
2.4.1	催化剂的填装	67
2.4.2	催化剂的硫化	72
2.4.3	催化剂的再生	75
2.4.4	预蒸发器注水	78
2.4.5	阻聚剂添加	79
2.4.6	管式炉烘炉	80
2.4.7	紧急停工	82
	思考题	85
3	苯加氢蒸馏	86
3.1	蒸馏产品	86
3.1.1	中间产品	86
3.1.2	苯	87
3.1.3	甲苯	87
3.1.4	二甲苯	88
3.1.5	非芳烃	88
3.1.6	重芳烃	89
3.2	萃取剂	89
3.2.1	N-甲酰吗啉	89
3.2.2	环丁砜	89
3.2.3	环己烷	91
3.3	蒸馏系统原理及工艺流程	92
3.3.1	蒸馏原理	92
3.3.2	萃取蒸馏	96
3.3.3	蒸馏工艺流程	96
3.3.4	蒸馏塔工艺参数	98
3.4	苯加氢蒸馏一般操作	99

3.4.1 屏蔽泵	100
3.4.2 预蒸馏塔	101
3.4.3 萃取蒸馏系统	102
3.4.4 BT 蒸馏塔	106
3.4.5 甲苯塔的开工	109
3.4.6 二甲苯蒸馏系统	110
3.5 苯加氢蒸馏特殊操作	111
3.5.1 预蒸馏塔紧急停工	111
3.5.2 萃取蒸馏部分的紧急停工	113
3.5.3 白土塔的紧急停工	115
3.5.4 BT 塔紧急停工操作	116
3.5.5 甲苯塔的停工及紧急停工	117
3.5.6 二甲苯蒸馏单元的紧急停工	118
3.5.7 汽提塔回流槽水靴负压放水	119
3.5.8 溶剂再生	120
3.5.9 萃取蒸馏塔的挂料和淹塔	121
思考题	122
4 苯加氢油库	123
4.1 油库的一般操作	123
4.1.1 汽(火)车装卸车技术规定	123
4.1.2 汽(火)车装卸车	123
4.1.3 汽(火)车装卸运输安全管理规定	125
4.1.4 浮顶油罐操作	126
4.1.5 尾气洗净装置	127
4.1.6 卸车放空槽	127
4.1.7 倒油作业	127
4.1.8 清罐作业	127
4.2 油库的特殊操作	128
4.2.1 油槽漏油处置	128
4.2.2 油罐着火处置	128
4.2.3 事故水池操作	128
4.2.4 消防泵	128
4.2.5 油库维修作业	129
思考题	129
5 能源介质	130
5.1 能源介质	130
5.1.1 蒸汽	130
5.1.2 压缩空气	132
5.1.3 氮气	133
5.1.4 循环水	134

5.1.5	除盐水	136
5.1.6	焦炉煤气	137
5.2	能源介质管理	137
5.2.1	能源介质管理区域划分	137
5.2.2	能源介质管理职责划分	137
5.3	能源介质操作	137
5.3.1	能源介质输送	137
5.3.2	能源介质异常处置	138
	思考题	140
6	苯加氢设备	141
6.1	静设备	141
6.1.1	换热器	141
6.1.2	塔器	146
6.1.3	反应器	159
6.1.4	管式炉	160
6.1.5	储罐	162
6.2	动设备	165
6.2.1	泵	165
6.2.2	压缩机	181
6.3	阀门	185
6.3.1	阀门分类	185
6.3.2	阀门型号识别	187
6.3.3	阀门的选用、安装、日常维护及故障检修	190
6.4	仪表	193
6.4.1	仪表的分类及常用仪表简介	194
6.4.2	仪表的误差及常见故障分析	200
	思考题	202
7	苯加氢安全及环保	203
7.1	苯加氢安全设施	203
7.1.1	灭火系统	203
7.1.2	防雷接地装置	207
7.1.3	静电导除装置	207
7.1.4	有毒有害气体报警装置	208
7.1.5	便携式报警器	208
7.1.6	空气呼吸器	210
7.1.7	ESD 及 DCS 系统	211
7.2	苯加氢危险作业控制	212
7.2.1	苯加氢主要危险介质及性能	212
7.2.2	危险作业控制	219
7.3	苯加氢典型事故	220

7.3.1 苯中毒	220
7.3.2 硫化氢中毒	222
7.3.3 着火	222
7.3.4 爆炸	223
7.4 应急处置	223
7.4.1 苯槽车泄漏着火	223
7.4.2 苯加氢事故应急	226
7.5 苯加氢安全管理要点	228
7.5.1 设计管理	228
7.5.2 设备管理	228
7.5.3 日常操作	229
7.5.4 检修管理	229
7.5.5 气密性管理	229
7.6 安全管理规章制度	231
7.6.1 氢气作业规程	231
7.6.2 蒸馏系统作业规程	232
7.6.3 压力容器作业规程	233
7.6.4 槽罐作业安全规程	234
7.6.5 动火作业规程	235
7.7 苯加氢环保	238
7.7.1 废气	238
7.7.2 废水	239
7.7.3 固体废弃物	239
7.7.4 噪声	239
思考题	240
8 苯加氢专业化管理	241
8.1 苯加氢前后工序衔接	241
8.1.1 粗苯蒸馏	241
8.1.2 苯类产品的主要应用	245
8.2 苯加氢生产组织管理	247
8.2.1 日常生产控制	247
8.2.2 主要生产指标	251
8.2.3 管理制度	251
8.3 苯类产品质量管理	252
8.3.1 产品质量标准及化检验	252
8.3.2 影响产品质量的主要因素	254
8.4 苯加氢技术的发展	255
8.4.1 制氢技术的发展	255
8.4.2 加氢技术的发展历程	257
思考题	265
参考文献	266

1 变压吸附制氢

学习目的:

初级工需掌握各吸附塔内所装吸附剂的种类, 焦炉煤气的性质、组成, 各种气体流向。了解吸附的基本概念及变压吸附的基本原理, 能正常地开停煤气压缩机。

中级工需掌握各吸附塔的工作原理、各塔内吸附剂的装填次序以及各吸附剂的作用, 掌握变压吸附的基本原理及吸附剂更换注意事项, 掌握影响氢气质量的主要因素, 能正常倒换煤气压缩机, 能判断变压吸附塔的基本故障, 能根据工艺状况对工艺参数进行调整, 能进行制氢单元的正常开停工操作。

高级工需掌握脱氧干燥的工艺流程以及四通阀的特性, 掌握制氢单元紧急停工操作, 掌握干燥剂、催化剂的更换步骤。能够指导各吸附塔填料装填及煤气压缩机的正常倒换, 能判断吸附塔的吸附效果, 能分析程控阀的基本故障, 能在中控室独立进行制氢装置的操作, 能正常地进行变压吸附塔的切换操作, 能根据氢气质量变化找出影响因素。

技师能够制定岗位技术操作规程及安全技术规程, 能够识别区域内潜在的危险因素, 并制定防范措施。

高级技师能够对变压吸附设备的运行状况进行全面分析, 并能提出改进方案, 能够通过调整工艺状况提高氢气产率。

氢气是苯加氢的重要原料之一, 焦炉煤气的主要成分是氢气, 而焦化厂焦炉煤气资源丰富, 同时, 因能耗低、流程简单、装置自动化程度高、产品纯度高, 利用变压吸附技术从焦炉煤气提取氢气成为制氢的一种主导方法。本章对变压吸附制氢过程中的原料及产品、吸附剂及催化剂性能进行具体的介绍, 同时结合变压吸附工艺原理、工艺流程, 对生产操作过程进行规范, 并结合生产实际进行故障分析及处置。

1.1 变压吸附制氢原料及产品

变压吸附制氢装置的主要原料是焦炉煤气, 主要产品为纯度达到 99.9% 以上的氢气。焦炉煤气经变压吸附提取氢气后的剩余组分即为解吸气, 再生气体来源于变压吸附单元产生的解吸气。

1.1.1 焦炉煤气

焦炉煤气是变压吸附制氢装置的原料气, 焦炉煤气中氢气含量达到 55% ~ 60%, 目前国内大部分焦化企业苯加氢制氢装置均采用焦炉煤气作为原料气。

1.1.1.1 焦炉煤气的组成及性质

焦炉煤气 (coke oven gas) 是煤在焦炉中隔绝空气高温干馏所产生的煤气, 主要成分是氢气、甲烷和一氧化碳, 也含有少量的乙烷、乙烯、氮气和二氧化碳等。它的热值约为 17.2 ~ 20.9 MJ/m³ (4100 ~ 5000 kcal/m³, 标准状态下)。它是一种高热值燃料, 可用于炼焦炉、炼钢

炉等的加热，可用作城市煤气，也可再经加工而成为合成氨和有机合成等工业的原料。

1.1.1.2 变压吸附制氢对焦炉煤气的要求

原料气的组分会影响氢气产量，萘、硫化氢、焦油等杂质的含量会影响系统的运行效果及吸附剂的寿命，因此制氢装置对原料气焦炉煤气的组分及杂质含量均有明确的要求。表 1-1 列出了供变压吸附制氢用焦炉煤气常见组分及杂质含量。制氢装置在运转过程中必须保证煤气压缩机一级入口为正压，否则系统将非常危险，因此在变压吸附制氢装置中通常要求焦炉煤气压力大于等于 5kPa（表压）。

表 1-1 供变压吸附制氢用焦炉煤气常见组分及杂质含量（标态）

组分/%	H ₂	O ₂	N ₂	CH ₄	CO	CO ₂	C _m H _n
	55~66	0.2~1.0	3~7	23~27	5~8	1.5~2	2~4
杂质组成	H ₂ S	萘	焦油	NH ₃	有机硫	苯	灰尘
/mg·m ⁻³	≤500	≤400	≤50	≤100	≤150	≤3000	≤10

低温有助于吸附，温度过高则容易损坏吸附剂，通常情况下变压吸附制氢装置要求在低于 40℃ 的条件下运行，这样更有助于提高氢气产率，因此作为制氢装置的原料气焦炉煤气温度必须小于 40℃。

1.1.2 氢气

氢气是变压吸附制氢装置的主要产品，也是催化加氢单元的原料之一。

1.1.2.1 氢气的性质

氢气，相对分子质量为 2.0159，化合价 ±1，无色、无臭、无味，是世界上已知的最轻气体。它的密度非常小，只有空气的 1/14，即在标准大气压和 0℃ 下，氢气的密度为 0.08987g/L。氢很难液化（临界温度 -240℃，临界压力 1.3MPa（13.0 个大气压））。液态氢无色透明，相对密度为 0.70（-252℃）。在液体中，氢气的溶解甚微，但一些金属却可吸收氢气（钚可吸收千倍自身体积的氢）。氢在钢中被吸附会引起“氢脆”，导致工艺设备的损坏。在常温下，氢气较不活泼，除非有合适的催化剂。在高温下，氢气则变得高度活泼，能燃烧，并能与许多金属和非金属直接化合。

1.1.2.2 氢气质量指标

由于粗苯加氢系统对安全性及原料的要求较高，因此变压吸附单元的氢气必须达到较高的质量指标。氢气温度要求小于 40℃、纯度必须大于 99.9%（体积含量）、CO + CO₂ 小于 10ppm^①、含氧小于 10ppm、含水小于 30ppm、总硫小于 2ppm、甲烷小于 0.1%。

1.1.3 解吸气

解吸气是变压吸附制氢装置的一个副产品，它是将焦炉煤气中的氢气提出后，煤气中的剩余组分，同时它也是正常生产过程中预处理器、预净化器的再生气体。解吸气压力一般控制在 0.03MPa（G），温度一般小于 40℃。

^① 1ppm 相当于 10⁻⁶，本书余同。

1.1.4 气体组分

变压吸附制氢装置中原料气为焦炉煤气，半产品气为纯度达 99.5% 以上未脱氧干燥的氢气，产品气为纯度大于等于 99.9% 的氢气，副产品为解吸气。以某 10 万吨/年苯加氢装置为例，配套的焦炉煤气变压吸附制氢装置原料气及中间产品组分的典型值见表 1-2。

表 1-2 某 10 万吨/年苯加氢装置配套焦炉煤气变压吸附制氢装置原料气及中间产品组分的典型值 (标志)

物 料	单 位	成 分							合 计
		H ₂	O ₂	N ₂	CH ₄	CO	CO ₂	C _m H _n	
原料气	%	55	1	4.5	25.5	8	2	4	100
	m ³ /h	686.84	12.49	56.2	318.44	99.9	24.98	49.95	1248.8
中间产品 氢气	%	99.5093	0.3996	0.039	0.051	0.0006	0.0004	0.0001	100
	m ³ /h	553.9091	2.2243	0.2171	0.2839	0.0033	0.0022	0.00055	556.64
解吸气	%	19.21	1.48	8.09	45.97	14.43	3.61	7.22	100
	m ³ /h	132.93	10.26	55.98	318.16	99.9	24.97	49.95	692.16
产品氢气	%	99.9039	0.001	0.0424	0.0516	0.0006	0.0004	0.0001	100
	m ³ /h	549.47	0.0055	0.2332	0.2838	0.0033	0.0022	0.00055	550

1.2 变压吸附制氢吸附剂及催化剂

吸附剂是吸附分离过程得以实现的基础，一般固体的表面都会有一定的吸附作用，但没有实际应用意义。能够在工业上使用的吸附剂最主要的特征为固体内部具有多孔的结构，类似于海绵体状态，具有极大的内表面积，而一般固体的外表面积是微不足道的。吸附剂都是多孔性物质，具有较大的比表面积，从而具有较大的比表面自由能。自由能的产生是由于固体表面原子所受的力处于不平衡状态，总是产生一个向着固体内部方向的合力，这个力会延伸到固体以外的空间，有从外界捕获其他原子以降低这种额外力的趋向，因此表面具有吸附各种分子的能力。当气体或液体分子被吸附在固体表面时，就会使力场达到平衡，固体表面自由能降低，自由能转变为热能，也就是吸附过程中放热的原因。

吸附剂最重要的物理特征包括孔容积、孔径分布、表面积和表面性质等。不同的吸附剂由于有不同的孔隙大小分布、不同的比表面积和不同的表面性质，因而对混合气体中的各组分具有不同的吸附能力和吸附容量。同时，要在工业上实现有效的分离，还必须考虑吸附剂对各组分的分离系数应尽可能大。分离系数是指在达到吸附平衡时，弱吸附组分在吸附床死空间中残余量/弱吸附组分在吸附床中的总量与强吸附组分在吸附床死空间中残余量/强吸附组分在吸附床中的总量之比。分离系数越大，分离越容易。一般而言，变压吸附气体分离装置中的吸附剂分离系数不宜小于 3。

焦炉煤气变压吸附制氢常采用的吸附剂有焦炭、活性炭、氧化铝、硅胶、分子筛，每种吸附剂吸附的杂质不同，所起的作用也不一样，每个吸附塔的装填种类及数量也有差别。焦炭和活性炭主要起净化煤气的作用，氧化铝和硅胶则可起干燥作用。分子筛是最重要的吸附剂，它