

过程装备与控制工程丛书

# 过程装备成套技术设计指南

黄振仁 魏新利 主编



化学工业出版社  
教材出版中心

过程装备与控制工程丛书

# 过程装备成套技术设计指南

黄振仁 魏新利 主编

化学工业出版社

教材出版中心

·北京·

(京) 新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

过程装备成套技术设计指南/黄振仁, 魏新利主编.  
北京: 化学工业出版社, 2002.12

(过程装备与控制工程丛书)  
ISBN 7-5025-4211-6

I. 过… II. ①黄…②魏… III. 化工过程-化工设  
备-设计 IV. TQ051.02

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 083183 号

---

过程装备与控制工程丛书  
**过程装备成套技术设计指南**

黄振仁 魏新利 主编  
责任编辑: 程树珍  
责任校对: 郑捷  
封面设计: 蒋艳君

\*

化学工业出版社 出版发行  
教材出版中心  
(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)  
发行电话: (010) 64982530  
<http://www.cip.com.cn>

\*

新华书店北京发行所经销  
北京市燕山印刷厂印刷  
北京市燕山印刷厂装订  
开本 787 毫米×1092 毫米 1/16 印张 16 $\frac{3}{4}$  字数 405 千字  
2003 年 1 月第 1 版 2003 年 1 月北京第 1 次印刷  
ISBN 7-5025-4211-6/G·1100  
定 价: 28.00 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

## 序

按照国际标准化组织（ISO）的认定，社会经济过程中的全部产品通常分为四类，即硬件产品（hardware）、软件产品（software）和流程性材料产品（processed material）以及服务产品（service）。在 21 世纪初，我国和世界上各主要发达国家都已经把“先进制造技术”列为自己国家优先发展的战略性高技术之一。通常，先进制造技术主要是指硬件产品的先进制造技术和流程性材料产品的先进制造技术。所谓“流程性材料”则是指以流体（气、液、粉粒体等）形态为主的材料。

过程工业是加工制造流程性材料产品的现代国民经济的支柱产业之一。成套过程装置则是组成过程工业的工作母机群，它通常是由一系列的过程机器和过程设备，按一定的流程方式用管道、阀门等连接起来的一个独立的密闭连续系统，再配以必要的控制仪表和设备，即能平稳连续地把以流体为主的各种流程性材料，让其在装置内部经历必要的物理化学过程，制造出人们需要的新的流程性材料产品。单元过程设备（如塔、换热器、反应器与贮罐等）与单元过程机器（如压缩机、泵与分离机等）二者的统称为过程装备。为此，有关涉及流程性材料产品先进制造技术的主要研究发展领域应该包括以下几个方面：①过程原理与技术的创新；②成套装置流程技术的创新；③过程设备与过程机器——过程装备技术的创新；④过程控制技术的创新。持续推进这些技术的创新，就有可能把过程工业需要实现的最佳技术经济指标，即高效、节能、清洁和安全不断推向新的技术水平，以确保该产业在国际上的竞争实力。

过程装备技术的创新，其关键首先应着重于装备内件技术的创新，而其内件技术的创新又与过程原理和技术的创新以及成套装置工艺流程技术的创新密不可分，它们互为依托，相辅相成。这一切也是流程性产品先进制造技术与一般硬件产品的先进制造技术的重大区别所在。另外，这两类不同的先进制造技术的理论基础也有着重大的区别，前者的理论基础主要是化学、固体力学、流体力学、热力学、机械学、化学工程与工艺学、电工电子学和信息技术科学等，而后者则主要侧重于固体力学、材料与加工学、机械机构学、电工电子学和信息技术科学等。

“过程装备与控制工程”本科专业在新世纪的根本任务是为国民经济培养大批优秀的能够掌握流程性材料产品先进制造技术的高级专业人才。

四年多来，教学指导委员会以邓小平同志提出的“教育要面向现代化，面向世界，面向未来”的思想为指针，在广泛调研研讨的基础上，分析了国内外化工类与机械类高等教育的现状、存在问题和未来的发展，向教育部提出了把原“化工设备与机械”本科专业改造建设为“过程装备与控制工程”本科专业的总体设想和专业发展规划建议书，于 1998 年 3 月获得教育部的正式批准，建立了“过程装备与控制工程”本科专业。以此为契机，教学指导委员会制订了“高等教育面向 21 世纪‘过程装备与控制工程’本科专业建设与人才培养的总体思路”，要求各院校从转变传统教育思想出发，拓宽专业范围，以培养学生素质、知识与能力为目标，以发展先进制造技术作为本专业改革发展的出发点，重组课程体系，在加强通用基础理论与实践环节教学的同时，强化专业技术基础理论的教学，削减专业课程的分量，

淡化专业技术教学，从而较大幅度地减少总的授课时数，以加强学生自学、自由探讨和发展的空间，并有利于逐步树立本科学生勇于思考与创新的精神。

高质量的教材是培养高素质人才的重要基础，因此组织编写面向 21 世纪的迫切需要的核心课程教材，是专业建设的重要内容。同时，为了进一步拓宽高年级本科学生和研究生专业知识面，进一步加强理论与实际的联系，进而增强解决工程实际问题能力，我们又组织编写了这套“过程装备与控制工程”的专业丛书，以帮助学生能有机会更深入地了解专业技术领域的理论研究与技术发展的现状和趋势，力求使高校的课堂教学与社会工程实践能够更好地衔接起来。

这套丛书，既可作为选修课教材，也可作为毕业设计环节的教学参考书，还可供广大工程技术人员作为工程设计理论分析与实践的有力助手。

“过程装备与控制工程”本科专业的建设将是一项长期的任务，以上所列工作只是一个开端。尽管我们在这套丛书中，力求在内容和体系上能够体现创新，注重拓宽基础，强调能力培养。但是，由于我们目前对于教学改革的研究深度和认识水平都有限，在这套丛书中必然会有许多不妥之处。为此，恳请广大读者予以批评和指正。

全国高等学校化工类及相关专业教学指导委员会

副主任委员兼化工装备教学指导组组长

大连理工大学 博士生导师

丁信伟 教授

2001 年 10 月于大连

# 前 言

《过程装备成套技术设计指南》是《过程装备成套技术》的姊妹篇，为工程技术人员从事过程工业装置的设计开发和技术改造提供成套设计的方法指导，并提供基本的设计技术资料。也是过程装备与控制工程专业学生进行综合性专业课程设计的指导书和主要设计参考资料。本书在编写过程中，力求完整、简洁、实用、方便，使具备过程装备及控制工程专业基本知识的技术人员，能按本书提供的设计方法、程序和技术资料，主持或独立完成过程工业生产装置的成套设计工作。即使有些资料不能在书中直接查得，亦能按本书提供的参考书目查找到所需资料。本书还与过程装备及控制工程专业的主要专业教材配合，相关基础理论一概不做详细介绍。

《过程装备成套技术设计指南》为了更好地体现其实用性，以甲醇制氢生产装置的设计过程为主线。全面介绍过程工业生产装置设计的全过程。以设计计算和结构设计为主体，配以简要的设计说明，所引用的设计资料均为现行最新版本，引用时除常识性内容外，都附有数据图表并注明出处。由于数据、资料原件内容很多，本书不能转录全文，只摘录与所引用数据相近的部分。一般选摘范围为：设备直径 3m 以下，管道直径 500mm 以下，压力等级不超过 4.0MPa，温度不超过 500℃。《过程装备成套技术》中已列入的图表一律不重复摘编，只说明出处；涉及其他专业教材的内容也均从简和说明出处。

本书的编写模式一般均采用先简要介绍该部分的一般设计方法，后以甲醇制氢装置中的实例（个别章节例外）按实际设计步骤依次进行设计计算和结构设计，并画出施工图。理论计算和结构图均符合工程施工的要求（如设备设计条件图、设备设计装配图、物料流程图、管道仪表流程图、设备布置图、管道布置图、管道空视图、管道应力空视草图、绝热结构图等）。为帮助读者设计绘图，书中列出了各种设计图中管件、阀门的图例，并附有简短的文字说明，重要章节还对易出错的知识点结合图示着重予以分析，为所有对工程设计接触较少的技术人员提供具有实用价值的具体指导。

考虑到甲醇制氢所用到的机器设备毕竟有限，本书也选编了部分其他常见的机器、设备及其附件的设计方法和基本的技术资料。

本书的编写基本沿甲醇制氢生产装置的实际工程设计程序进行，但不能因此而认为本书设计中的参数就是甲醇制氢生产装置的实际生产工艺参数。本书只提供一般设计方法，不提供甲醇制氢的生产技术资料数据。为避免引起知识产权的争议，编写中对工艺技术参数已做了技术处理，各章节之间在具体数据也并不完全一致。本书所用数据不能作为甲醇制氢生产装置的工艺设计和设备设计的直接依据。如果需要甲醇制氢的生产技术，请向有关高校和研究院所接洽。

综合性专业课程设计突破了传统课程设计模式，不是仅以一个独立的机器或设备为设计对象。而是以某一过程工业产品的生产装置为设计对象。这样更贴近工程实际，更有利于将所学知识融会贯通，并进一步拓宽知识面，也就更有利于创新能力的培养。

这样一次课程设计涉及的知识领域较多，应用的技术资料涉及面很广。为保证专业综合课程设计的顺利进行，编写了《过程装备成套设计指南》。我们的初衷是要为综合性专业课

程设计提供一本既能满足设计需要，又能反应当前最新设计资料、技术规范的手册。经验表明这样一本手册篇幅将十分巨大，作为课程设计的基本参考书就不适合了。只能摘引最常用的内容，选编的资料能够反映最新的技术规范、标准。所选内容以满足本课程设计查阅为宗旨，超过部分读者可按指导书提供的参考文献去查找。本书仅起引路的作用。这也就是将本书定名为设计指南的原因。

本书由南京工业大学黄振仁教授和郑州大学魏新利教授担任主编，江苏石油化工学院卓震教授任主审。南京工业大学梅华（第1章）、徐思浩（第2章）、廖传华（第5、9章）、顾海明（第6章）、黄振仁（第5、9、10、12章和附录），郑州大学王定标（第4章）、尹华杰（第11章）、魏新利（第7、13章），江苏石油化工学院刘雪东（第3章）、李瑾（第8章）参加了编写工作。

本书的编写工作得到了南京工业大学教务处、新区办公室和机械学院，郑州大学化工学院的领导和大力支持。许多专家和工程技术界的朋友对本书的编写工作给予了热情的关心和支持，并提供了许多重要的技术资料 and 编写意见。在本书出版之际，特向他们致以衷心的感谢。

由于本书涉及的知识领域很宽，用到的技术资料很多，而篇幅又不能大，如何选择的矛盾非常突出。虽经全体编写人员精心筛选、反复修改，仍难以尽善尽美，加之时间仓促和编写者的水平有限，错误和不妥之处在所难免。衷心希望读者不吝赐教，不胜感谢。

编者

2002.8

## 内 容 提 要

《过程装备成套技术设计指南》是《过程装备成套技术》的姊妹篇，为工程技术人员从事过程工业装置的设计开发和技术改造提供成套设计的方法指导，并提供基本的设计技术资料。具备过程装备及控制工程专业基本知识的技术人员，按这套书提供的设计方法、程序和技术资料，能够主持或独立完成过程工业生产装置的成套设计工作。即使有些资料不能在书中直接查得，亦能按本书提供的参考书目查找到所需资料。

本书具有很强的实用性，以甲醇制氢生产装置的实际设计过程为例（个别章节例外）按实际设计步骤依次进行工艺设计、机器设备的选型和设计、管道设计、自动控制设计、绝热防腐设计，并画出施工图（附典型图例）。结构图均符合工程施工的要求，如设备设计条件图、设备设计装配图、物料流程图、管道仪表流程图、设备图、设备布置图、管道布置图、管道空视图、管道应力空视草图、绝热结构图等。书中列出了各种设计图中设备、管件、阀门等附件的图例。

本书共编有供参考的图近百幅（另有图例 300 余幅）、表格 160 多个。均根据现行最新版本摘编。数据、资料选摘范围一般为：设备直径 3m 以下，管道直径 500mm 以下，压力等级不超过 4.0MPa，温度不超过 500℃。《过程装备成套技术》中已列入的图表一律不重复摘编，只说明出处。本书除摘引与本设计计算有关的资料外，也选编了部分其他常见的机器、设备及其附件的设计方法和基本的技术资料。

本书也是过程装备与控制工程专业本科学生进行综合性专业课程设计和专科学生进行毕业设计的指导书和主要设计参考资料，本书附录对课程设计的有关要求作了详细说明。学生按这套书提供的设计方法、程序和技术资料，可以独立完成过程工业生产装置的成套设计，获得一次全面的工程设计实际训练。



# 目 录

|                             |    |
|-----------------------------|----|
| <b>1 工艺设计</b> .....         | 1  |
| 1.1 甲醇制氢概述 .....            | 1  |
| 1.1.1 氢气的用途 .....           | 1  |
| 1.1.2 制氢工艺路线的评判与选择 .....    | 2  |
| 1.1.3 分离方法的选择 .....         | 3  |
| 1.2 甲醇制氢工艺设计 .....          | 3  |
| 1.2.1 甲醇制氢工艺流程 .....        | 3  |
| 1.2.2 甲醇制氢物料衡算 .....        | 4  |
| 1.2.3 热量衡算 .....            | 6  |
| 1.3 设备设计条件图 .....           | 9  |
| 参考文献 .....                  | 9  |
| <b>2 过程设备常用零部件</b> .....    | 10 |
| 2.1 筒体 .....                | 10 |
| 2.1.1 钢制焊接压力容器的筒体 .....     | 10 |
| 2.1.2 钢管做筒体 .....           | 10 |
| 2.2 封头 .....                | 10 |
| 2.2.1 椭圆形封头 .....           | 10 |
| 2.2.2 60°与90°折边锥形封头 .....   | 12 |
| 2.3 压力容器法兰 .....            | 13 |
| 2.3.1 法兰、垫片、螺柱、螺母材料 .....   | 13 |
| 2.3.2 甲、乙型法兰的最大允许工作压力 ..... | 14 |
| 2.3.3 长颈法兰的最大允许工作压力 .....   | 15 |
| 2.3.4 密封面代号 .....           | 16 |
| 2.3.5 甲型平焊法兰 .....          | 16 |
| 2.3.6 乙型平焊法兰 .....          | 17 |
| 2.3.7 长颈对焊法兰 .....          | 19 |
| 2.3.8 压力容器法兰用的垫片 .....      | 22 |
| 2.4 人孔 .....                | 22 |
| 2.4.1 适用范围 .....            | 22 |
| 2.4.2 常压人孔 .....            | 23 |
| 2.4.3 回转盖带颈平焊法兰人孔 .....     | 24 |
| 2.4.4 回转盖带颈对焊法兰人孔 .....     | 27 |
| 2.5 设备支座 .....              | 30 |
| 2.5.1 鞍式支座 .....            | 30 |
| 2.5.2 腿式支座 .....            | 34 |

|          |                             |           |
|----------|-----------------------------|-----------|
| 2.5.3    | 支承式支座                       | 35        |
| 2.5.4    | 耳式支座                        | 38        |
| <b>3</b> | <b>设备设计计算和选型 (1) ——塔设备</b>  | <b>40</b> |
| 3.1      | 塔设备的选型                      | 40        |
| 3.2      | 填料塔设计举例                     | 41        |
| 3.2.1    | 填料塔工艺计算                     | 41        |
| 3.2.2    | 填料塔结构设计                     | 43        |
| 3.3      | 塔设备设计常见错误                   | 47        |
| 3.3.1    | 化工设计与计算方面主要错误               | 47        |
| 3.3.2    | 结构与计算方面主要错误                 | 47        |
| 3.3.3    | 强度设计与稳定性校核主要错误              | 47        |
| 3.3.4    | 有关附件设计主要错误                  | 48        |
|          | 参考文献                        | 48        |
| <b>4</b> | <b>设备设计计算和选型 (2) ——换热设备</b> | <b>50</b> |
| 4.1      | 管壳式换热器设计程序                  | 50        |
| 4.2      | 管壳式换热器设计举例                  | 60        |
| 4.3      | 换热设备设计中应注意的问题               | 67        |
|          | 参考文献                        | 68        |
| <b>5</b> | <b>设备设计计算和选型 (3) ——反应设备</b> | <b>69</b> |
| 5.1      | 反应器计算基本方程式                  | 69        |
| 5.1.1    | 反应动力学方程式                    | 69        |
| 5.1.2    | 物料衡算式                       | 70        |
| 5.1.3    | 热量衡算式                       | 71        |
| 5.2      | 管式反应器的设计与选型                 | 72        |
| 5.2.1    | 管式反应器计算基础方程式                | 72        |
| 5.2.2    | 液相管式反应器设计计算                 | 73        |
| 5.2.3    | 气相管式反应器设计计算                 | 74        |
| 5.2.4    | 管式反应器的计算机模拟                 | 75        |
| 5.2.5    | 反应器型式和操作方式评选                | 75        |
| 5.3      | 管式反应器设计举例                   | 75        |
| 5.3.1    | 液相管式反应器的设计举例                | 75        |
| 5.3.2    | 气相管式反应器的设计举例                | 76        |
| 5.4      | 立式搅拌反应釜的选用                  | 80        |
| 5.4.1    | 立式搅拌反应釜结构型式                 | 80        |
| 5.4.2    | 立式搅拌反应釜选型步骤                 | 85        |
|          | 参考文献                        | 87        |
| <b>6</b> | <b>机器选型</b>                 | <b>88</b> |
| 6.1      | 活塞式压缩机                      | 88        |
| 6.1.1    | 活塞式压缩机的结构型式                 | 88        |
| 6.1.2    | 活塞式压缩机常用型号                  | 89        |

|          |                    |            |
|----------|--------------------|------------|
| 6.1.3    | 其他类型容积式压缩机         | 90         |
| 6.1.4    | 选择压缩机的注意事项         | 92         |
| 6.2      | 透平式压缩机和风机          | 92         |
| 6.2.1    | 透平式压缩机和鼓风机         | 92         |
| 6.2.2    | 透平式通风机             | 94         |
| 6.3      | 离心泵选型              | 96         |
| 6.3.1    | 离心泵的分类及型号          | 97         |
| 6.3.2    | 离心泵选型原则及举例         | 100        |
| 6.4      | 其他类型的泵             | 100        |
| 6.4.1    | 旋涡泵                | 101        |
| 6.4.2    | 往复泵及计量泵选型          | 101        |
| 6.4.3    | 螺杆泵                | 103        |
| 6.4.4    | 齿轮泵                | 104        |
| 6.4.5    | 液环泵                | 105        |
| 6.5      | 电动机选型              | 106        |
| 6.5.1    | 异步交流电动机            | 106        |
| 6.5.2    | 同步交流电动机和直流电动机      | 108        |
|          | 参考文献               | 109        |
| <b>7</b> | <b>过程装置的系统设计</b>   | <b>110</b> |
| 7.1      | 厂址的选择与总图设计         | 110        |
| 7.1.1    | 厂址选择               | 110        |
| 7.1.2    | 总图设计               | 111        |
| 7.2      | 管道及仪表流程图设计         | 114        |
| 7.2.1    | 管道及仪表流程图的图面布置和表示方法 | 114        |
| 7.2.2    | 管道及仪表流程图的安全性分析     | 123        |
| 7.3      | 设备布置设计方法及设备布置图     | 126        |
| 7.3.1    | 设备布置设计方法           | 126        |
| 7.3.2    | 设备布置图的绘制           | 128        |
|          | 参考文献               | 135        |
| <b>8</b> | <b>自控设计</b>        | <b>136</b> |
| 8.1      | 控制部分施工图设计主要流程      | 136        |
| 8.2      | 设计依据               | 137        |
| 8.2.1    | 温度仪表               | 137        |
| 8.2.2    | 压力仪表               | 138        |
| 8.2.3    | 液位仪表               | 139        |
| 8.2.4    | 流量仪表               | 139        |
| 8.2.5    | 调节阀的选择             | 139        |
| 8.2.6    | 控制室仪表              | 140        |
| 8.3      | 设计示例               | 140        |
| 8.3.1    | 例题简介               | 140        |

|                               |            |
|-------------------------------|------------|
| 8.3.2 施工图文件的组成和用途 .....       | 140        |
| 参考文献 .....                    | 152        |
| <b>9 管道设计</b> .....           | <b>153</b> |
| 9.1 管道设计概述 .....              | 153        |
| 9.1.1 压力管道及压力管道设计资格 .....     | 153        |
| 9.1.2 管道设计一般程序和主要内容 .....     | 154        |
| 9.2 管子选型 .....                | 154        |
| 9.2.1 选择材料 .....              | 155        |
| 9.2.2 管子的规格尺寸 .....           | 156        |
| 9.3 管件选型 .....                | 161        |
| 9.4 阀门选型 .....                | 163        |
| 9.4.1 阀门型号编制方法 .....          | 163        |
| 9.4.2 本系统阀门选用 .....           | 165        |
| 9.4.3 常用阀门型号和主要结构尺寸 .....     | 166        |
| 9.5 法兰选型 .....                | 175        |
| 9.5.1 管道法兰类型及其代号和标准号 .....    | 176        |
| 9.5.2 管道法兰的密封面型式 .....        | 177        |
| 9.5.3 管道法兰的连接尺寸 .....         | 180        |
| 9.5.4 法兰、垫片、紧固件的配合使用 .....    | 188        |
| 9.6 管道布置图 .....               | 190        |
| 9.6.1 分区索引图 .....             | 190        |
| 9.6.2 管道布置设计 .....            | 190        |
| 9.6.3 管道布置图绘制方法及须注意的问题 .....  | 195        |
| 9.7 管道空视图绘制及应注意的问题 .....      | 197        |
| 9.7.1 管道空视图示例 .....           | 197        |
| 9.7.2 绘制管道空视图应注意的问题 .....     | 197        |
| 9.7.3 管道图上管件阀门的画法 .....       | 198        |
| 9.8 管道设计技术文件 .....            | 202        |
| 9.8.1 管道设计说明 .....            | 202        |
| 9.8.2 图纸目录 .....              | 204        |
| 9.8.3 管道安装材料汇总表 .....         | 204        |
| 参考文献 .....                    | 204        |
| <b>10 管道支座设计和管道应力分析</b> ..... | <b>205</b> |
| 10.1 管道支座设计 .....             | 205        |
| 10.1.1 管道支吊架的设置 .....         | 205        |
| 10.1.2 水平直管道最大支架间距 .....      | 205        |
| 10.1.3 垂直管道最大支架间距 .....       | 208        |
| 10.1.4 空间管道支架间距 .....         | 209        |
| 10.1.5 导向支架的间距 .....          | 209        |
| 10.2 管道应力分析 .....             | 210        |

|           |                         |            |
|-----------|-------------------------|------------|
| 10.2.1    | 管道应力空视图及其绘制             | 210        |
| 10.2.2    | 管道柔性分析                  | 210        |
| 10.2.3    | 管道支座对管道柔性影响的实例          | 213        |
|           | 参考文献                    | 214        |
| <b>11</b> | <b>过程设备绝热设计</b>         | <b>215</b> |
| 11.1      | 过程设备绝热设计                | 215        |
| 11.1.1    | 过程设备绝热设计概述              | 215        |
| 11.1.2    | 过程设备的绝热设计步骤             | 219        |
| 11.2      | 管道绝热设计                  | 220        |
| 11.2.1    | 管道绝热设计计算示例              | 220        |
| 11.2.2    | 管道绝热设计文件                | 223        |
| 11.3      | 保冷绝热设计                  | 226        |
| 11.3.1    | 保冷绝热设计                  | 226        |
| 11.3.2    | 保冷结构设计的特殊要求             | 228        |
| 11.4      | 绝热设计中应特别注意的问题           | 228        |
|           | 参考文献                    | 229        |
| <b>12</b> | <b>基础设计</b>             | <b>230</b> |
| 12.1      | 静止设备基础设计                | 230        |
| 12.1.1    | 静止设备基础的形式               | 230        |
| 12.1.2    | 静止设备基础的地基变形计算           | 231        |
| 12.1.3    | 塔设备基础构造                 | 232        |
| 12.2      | 机器基础设计                  | 235        |
| 12.2.1    | 机器基础的设计所需要的资料           | 235        |
| 12.2.2    | 机器基础设计的一般要求             | 235        |
| 12.2.3    | 往复运动机器的基础               | 237        |
| <b>13</b> | <b>工程项目的经济评价</b>        | <b>239</b> |
| 13.1      | 工程项目投资估算                | 239        |
| 13.1.1    | 单元设备价格估算                | 239        |
| 13.1.2    | 甲醇制氢装置的投资估算             | 242        |
| 13.2      | 总成本费用的估算与分析             | 243        |
| 13.2.1    | 总成本费用的构成                | 243        |
| 13.2.2    | 总成本费用的估算与分析             | 244        |
| 13.3      | 甲醇制氢项目的财务评价             | 248        |
| 13.3.1    | 盈利能力分析                  | 248        |
| 13.3.2    | 清偿能力分析                  | 249        |
| 13.3.3    | 盈亏平衡分析                  | 249        |
|           | 参考文献                    | 249        |
|           | 附录 过程装备与控制工程专业综合课程设计指导书 | 250        |

# 1 工艺设计

关于过程工业工艺开发与工艺设计的一般程序和基本内容可参考《过程装备成套技术》<sup>[1]</sup>第2章和其他相关资料。由于产品不同、原料不同、生产工艺也就各不相同，而且工艺设计不是本书的主要部分。作者仅希望通过本章甲醇制氢工艺设计的实例，使读者能在工艺设计的一般原理和方法、步骤方面有一个基本的了解。本工艺流程设计及有关参数均是为了介绍工艺设计的详细过程的需要而给出的，参阅本书只能是学习设计方法。举例中的工艺参数和各种计算结果不能作为制造、加工设备及装备的依据。若需要甲醇制氢整套装置或技术，请向国内有关高校、研究院所及一些专门机构咨询，以便得到完善可靠的技术保证。

## 1.1 甲醇制氢概述

### 1.1.1 氢气的用途<sup>[2]</sup>

氢气是一种重要的工业用品，它广泛用于石油、化工、建材、冶金、电子、医药、电力、轻工、气象、交通等工业部门和服务部门，由于使用要求的不同，这些部门对氢气的纯度、对所含杂质的种类和含量也有着不同的要求。近年来随着中国改革开放的进程，随着大量高精产品的投产，对高纯氢气的需求量正在逐渐加大。以电子工业及石化工业为例，具体表现如下。

**半导体工业** 在大规模、超大规模和兆位级集成电路制造过程中，须用高纯氢、特高纯氢作为配制  $\text{SiH}_4/\text{H}_2$ 、 $\text{PH}_3/\text{H}_2$ 、 $\text{B}_2\text{H}_6/\text{H}_2$  等混合外延、掺杂气的底气。

半导体工业对底气纯度要求极高，微量杂质“掺入”就会改变半导体表面特性。在电真空材料和器件，例如钨和钼的生产过程中，用氢气还原氧化物得到粉末，再加工制成线材和带材。氢气纯度越高，特别是水含量越低，还原温度就越低，所得钨、钼粉末粒度就越细。

**非晶硅与太阳电池** 目前，高效  $\alpha$ -Si 太阳电池均采用射频辉光放电法制造，沉积大面积、高质量、均匀的  $\alpha$ -Si 膜是  $\alpha$ -Si 太阳电池的关键工序。Pin 结太阳电池在沉积  $i$  层时采用氢与硅烷的混合气。对氢气纯度要求高，一般为 5N 以上。

**光导纤维石英光纤的制造** 主要包括玻璃体预制棒制备及拉丝两道工序，在制棒工艺中采用氢氧焰加热（1200~1500℃），经沉积，可获得所需沉积层厚度，再经烧灼，制成光纤预制棒。对氢氧焰气体要求无固体粒子，否则棒上会有黑斑产生。对氢气纯度及洁净度均有一定要求。

**氢气在石化工业中的应用** 在炼制工业中，氢气主要用于石脑油加氢脱硫，精柴油加氢脱硫，改善飞机燃料油的无烟火焰高度，燃料油加氢脱硫，加氢裂化；在石油化工领域，氢气主要用于 C3 馏分加氢，汽油加氢，C6~C8 馏分加氢脱烷基，生产环己烷。加氢精制的目的是除掉有害化合物，例如硫化氢、硫醇、总硫、水、含氮化合物、芳香烃、酚类、环烷酸、炔烃、烯烃、金属和准金属等。催化重整原料的加氢精制目的，是除去石脑油中的硫化物、氮化物、铅和砷等杂质。

加氢裂化是在氢气存在条件下进行的催化过程，反应主要特征是 C—C 键的断裂。所用

氢量大，压力高，空速低。

另外，许多精细化工领域，依据其不同的生产规模，也需要数量大小不等的氢气。

一旦生产过程需要氢气时，设计技术人员就有必要对制氢工艺路线，包括制氢原料（如价格及来源）、生产技术（是否先进）以及工艺过程（是否成熟）等进行比较和选择。

### 1.1.2 制氢工艺路线的评判与选择

依据原料及工艺路线不同，目前氢气主要由以下几种方法获得：①水电解法；②氯碱工业中电解食盐水副产氢气；③烃类水蒸气转化法；④烃类部分氧化法；⑤煤气化和煤水蒸气转化法；⑥氨或甲醇催化裂解法；⑦石油炼制与石油化工过程中的各种副产氢；⑧合成氨厂和焦化厂的各种富含氢的废气。

烃类水蒸气转化制氢法是目前世界上应用最普遍的制氢方法<sup>[3]</sup>，是由巴登苯胺公司发明并加以利用，英国 ICI 公司首先实现工业化。这种制氢方法工作压力为 2.0~4.0MPa，原料适用范围为天然气至干点小于 215.6℃ 的石脑油。近年来由于转化制氢炉型的不断改进，转化气提纯工艺的不断更新，烃类水蒸气转化制氢工艺成为目前生产氢气最经济可靠的途径。烃类水蒸气转化制氢工艺主要由以下几个步骤完成：原料在催化剂作用下脱硫；脱硫后的原料油汽在 800℃ 反应炉中，在催化剂作用下与水蒸气反应生成氢气、二氧化碳、一氧化碳和残余甲烷；反应后的气体中 H<sub>2</sub> 含量可达 74% 左右；一氧化碳变换，在催化剂作用下，加入更多的水蒸气对第一步反应生成的 CO 进行高低温变换，转化出当量的氢；二氧化碳脱除（二氧化碳经过苯菲尔溶液吸收，CO<sub>2</sub> 被脱除，气体中氢纯度达 96% 以上，CO<sub>2</sub> 量 < 0.3%）。

烃类部分氧化法如重油氧化法制氢的工艺路线为：空分氧气→重油部分氧化→耐硫中串低变→脱硫→脱碳→精脱硫→甲烷化→H<sub>2</sub>（纯度达 98% 以上）。

以上方法适用于化肥及石油化工工业上大规模用氢的场合，工艺路线复杂，流程长，投资大；在精细化工、医药、电子、冶金科学研究等行业，传统的方法是电解水制氢，但其规模一般在 200m<sup>3</sup>（V<sub>n</sub>）/h 以下，此法每 m<sup>3</sup> 氢气耗电量达 6~7kW·h，国内已趋于淘汰。随着精细化工行业的发展，当其氢气用量在 200~3000m<sup>3</sup>（V<sub>n</sub>）/h 时，甲醇蒸气转化制氢技术表现出很好的技术经济指标，受到许多国家的重视。甲醇蒸气转化制氢具有以下特点。

(1) 与大规模的天然气、轻油蒸气转化制氢或水煤气制氢相比，投资省，能耗低。烃类水蒸气转化制氢，须在 800℃ 以上的高温下进行，转化炉等设备需要特殊材质。同时须综合考虑能量的平衡及利用，故不适用于小规模制氢。而甲醇蒸气转化制氢由于反应温度低（260~280℃），工艺条件缓和，燃料消耗也低。有人认为，与同等规模的天然气或轻油转化制氢装置相比，甲醇蒸气转化制氢的能耗仅是前者的 50%。

(2) 与电解水制氢相比，单位氢气成本较低。电解水制氢 [每小时制氢量一般小于 200m<sup>3</sup>（V<sub>n</sub>）] 是比较成熟的制氢方法，但由于它的电耗高，单位氢气成本较高。据测算，一套规模为 1000m<sup>3</sup>（V<sub>n</sub>）/h 的甲醇蒸气转化制氢装置的单位氢气成本不高于 1.2 元/m<sup>3</sup>（V<sub>n</sub>），而电解水制氢约 3~5 元/m<sup>3</sup>（V<sub>n</sub>）。

(3) 所用的原料甲醇易得，运输、贮存方便。而且，由于所用的原料甲醇纯度高，不需要再进行净化处理，反应条件温和，流程简单，故易于操作。

(4) 可以做成组装式或可移动式的装置，操作方便，搬运灵活。

图 1-1 是该技术常见的工艺流程简图。脱盐水及甲醇按一定比例在进料罐中混合，然后

经进料泵加压至 1~2MPa 后进入换热器，经与反应产物换热后进入汽化器，接着进入反应器。在反应器中发生下列反应：

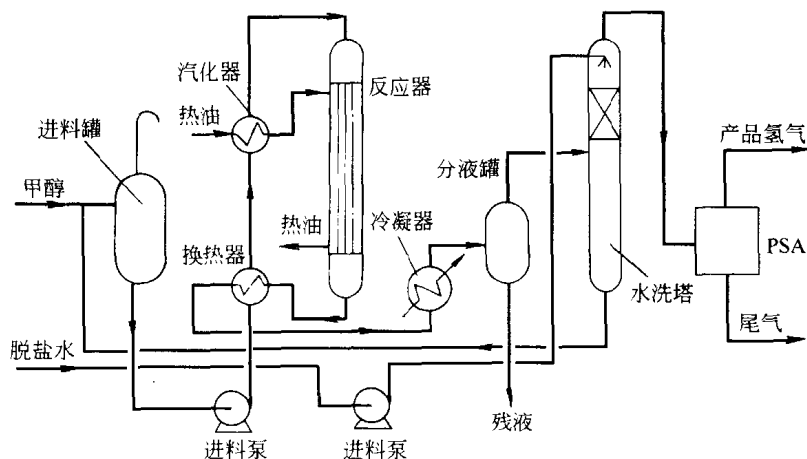
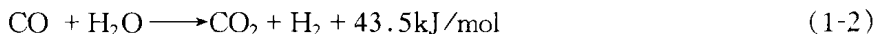
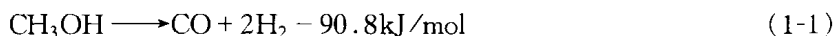


图 1-1 工艺流程简图

整个反应过程是吸热的，反应器及汽化器所需要的热量由循环的导热油提供。从反应器出来的反应产物在换热器中与反应进料换热后，再经冷却器冷却后进入水洗塔。水洗后的物料进入分离装置，经分离后得到产品氢气，尾气放空或回收处理。产品氢气的规格为： $\text{H}_2$  纯度  $\geq 99.99\%$ ； $\text{CO} + \text{CO}_2 \leq 20\text{mg/kg}$ 。

### 1.1.3 分离方法的选择

一般方法所得到的气体均为含氢的混合气，需要进一步分离纯化才能制得满足多种用途的工业氢气或高纯氢气，通常产品氢气的规格要求为： $\text{H}_2$  纯度  $\geq 99.99\%$ ； $\text{CO} + \text{CO}_2 \leq 20 \times 10^{-6}$ 。氢气的分离和纯化技术近几年来获得了迅速的发展，尤其是变压吸附（PSA）法和膜分离（Prism）法显示了独特的分离功能，并在与传统分离工艺（低温法与吸收法等）的竞争中得到进一步发展和完善。

变压吸附法提纯氢气的特点是：

- 具有适用气源广，产品氢纯度高（99.999%）；
- 变压吸附是干式操作，吸附剂性质稳定，无腐蚀，可同时除去各种杂质和其他不需要的组分，与化学吸收法比较，没有液体泄漏和设备腐蚀问题，有利于设备的维护；
- 变压吸附装置工艺简单，操作容易，稳定可靠，对原料组成的波动适应性强，多塔式变压吸附系统一般是自动化的连续操作，处理量大，吸附剂使用寿命长，无环境污染等。

## 1.2 甲醇制氢工艺设计

### 1.2.1 甲醇制氢工艺流程

从上述对不同制氢工艺的原料来源、制氢方法及分离方法进行的比较可知，对于中小规模的用氢场合，在没有工业含氢尾气的情况下，甲醇蒸气转化及变压吸附的制氢路线是一较



好的选择。本设计采用甲醇裂解+吸收法脱二氧化碳+变压吸附工艺，增加吸收法的目的是为了提提高氢气回收率，同时需要在需要二氧化碳时，也可以方便的得到高纯度二氧化碳。

图 1-2 为物料流程图，本物料流程图和参考文献[1]中介绍的物料流程图形式上不完全相同，但包含的内容基本相同。不同系统、不同单位在具体表达形式上尚有一定差异，读者应用时可根据工作单位的规定和服务对象的要求，选择适当的表达形式。本工艺流程大致经过以下一些步骤：甲醇与水按配比进入原料液储罐，通过计量泵进入换热器（E0101）预热，然后在汽化塔（T0101）汽化，再经换热器（E0103）过热到反应温度进入转化器（R0101），转化反应生成的 H<sub>2</sub>、CO<sub>2</sub> 以及未反应的甲醇和水蒸气等首先与原料液换热冷却（E0101），然后经水冷器（E0103）冷凝分离水和甲醇，这部分水和甲醇可以进入原料液储罐，水冷分离后的气体进入吸收塔，经碳酸丙烯酯吸收分离 CO<sub>2</sub>，吸收饱和的吸收液进入解析塔降压解吸后循环使用，最后进入 PSA 装置进一步脱除分离残余的 CO<sub>2</sub>、CO 及其他杂质，得到一定纯度要求的氢气。

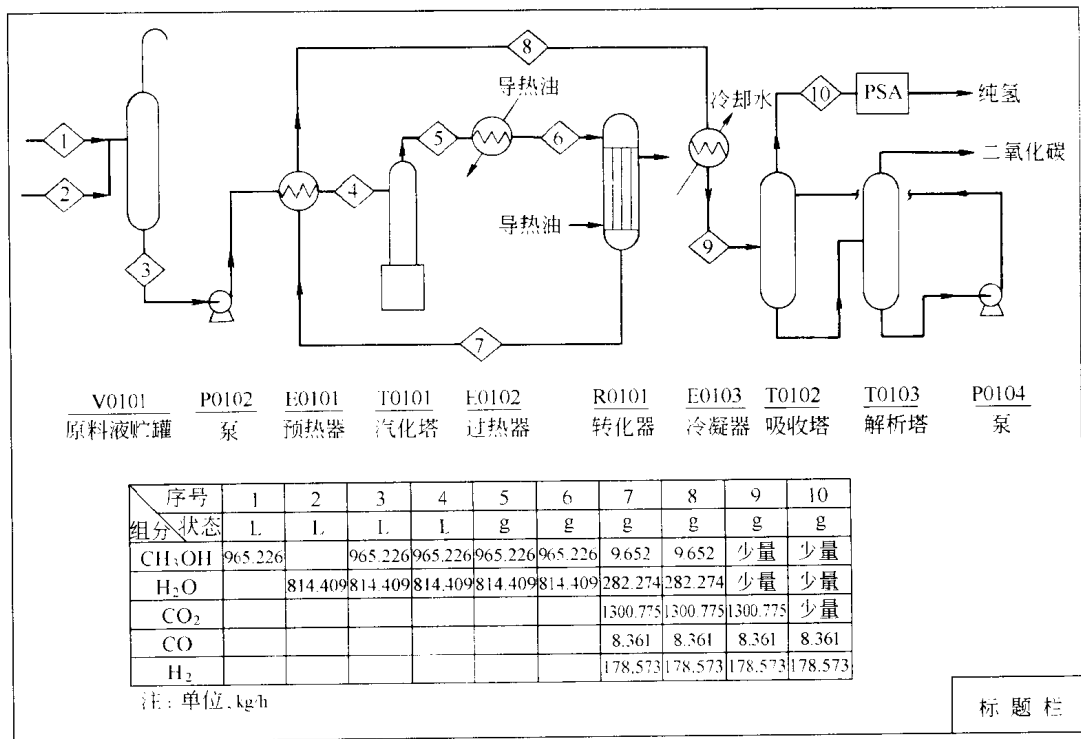


图 1-2 甲醇制氢物料流程图

### 1.2.2 甲醇制氢物料衡算

(1) 依据

甲醇蒸气转化反应方程式：



CH<sub>3</sub>OH 分解为 CO 转化率 99%，CO 变换转化率 99%，反应温度 280℃，反应压力 1.5MPa，醇水投料比 1:1.5 (mol)。

(2) 投料量计算