



普通高等教育“十一五”国家级规划教材



面向21世纪课程教材

# 化工安全工程概论

第二版

许文 张毅民 主编



化学工业出版社

普通高等教育“十一五”国家级规划教材  
面向 21 世纪课程教材

# 化工安全工程概论

第二版

许文 张毅民 主编



中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 238908 号



YZLI 0890092178



化学工业出版社

· 北京 ·

本书针对化学工业物质种类繁多,加工过程复杂、多样、高温、高压等不安全因素,在化工产品开发和生产中,从原料、中间体到成品大多具有易燃、易爆、有毒、有害等危险性,损害和伤亡事故多发等特点,从工厂设计到操作、压力容器、机电设备运行和维护,以及化工系统分析与评价,全面介绍了防火、防爆、防毒、防腐蚀、防职业损害等安全理论和技术。

全书共分九章,分别是:绪论;物质性质、物化原理与安全;化工厂设计和操作安全;燃烧和爆炸与防火防爆安全技术;职业毒害与防毒措施;压力容器和机电设备安全;工业腐蚀与预防措施;普通工业安全卫生;系统安全分析与评价。

本书既可作为化工类专业本科生化工安全课程教材,也可作为化工生产技术人员、管理人员安全培训教材,以及消防、工厂安全评价人员的参考书。

化学工业出版社

第二版

主编 另建光 文 书

### 图书在版编目(CIP)数据

化工安全工程概论/许文,张毅民主编. —2版.

北京:化学工业出版社,2011.1

普通高等教育“十一五”国家级规划教材. 面向  
21世纪课程教材

ISBN 978-7-122-10054-2

I. 化… II. ①许…②张… III. 化学工业-安全  
工程-高等学校-教材 IV. TQ086

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第236098号

责任编辑:徐雅妮

装帧设计:史利平

责任校对:边涛

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印刷:北京云浩印刷有限责任公司

装订:三河市宇新装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张16¼ 字数395千字 2011年2月北京第2版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价: 30.00 元

版权所有 违者必究

## 第二版前言

本书第一版依据“高等教育面向 21 世纪‘化学工程与工艺’专业人才培养方案”而编写，广泛参阅了国内外有关资料，并立足于现代化工实际和发展趋势。本书自 2002 年出版以来，作为广大化工类学生学习化工安全工程基础知识的主要教材以及相关专业的教学参考书，深得同行喜爱，同时，大家也对本书提出了一些好的建议。为了适应化工生产的新特点以及人们对化工发展，特别是化工安全生产的新要求，在普通高等教育“十一五”国家级规划教材立项以及天津大学“985”项目资助下，我们对教材进行了必要的修订。本次修订主要做了以下几项工作。

1. 本书沿用了原教材的章节，对内容进行了全面补充与更新。对教材所涉及的基本概念、基本化学反应、单元操作以及工艺过程等相关安全原理进行了必要补充，力求使教材更加系统和完整。对于化工生产中常见设备及其附件、材质等所涉及的相关规定、标准等内容，尽可能按照最新颁布的相关规定和标准进行修订。补充了相关化工安全生产事故预防评价的方法以及毒性物质的特性，更新了一些物质系数，力求使读者所用到的数据更加可靠。

2. 为了方便读者学习和理解章节内容，教材在每章末增加了一些思考题及练习题，供参考使用，以便于读者把握内容重点。同时，这些练习也可以作为师生课堂讨论、交流的引子，使学生在过程中针对化工生产中安全事故的实际案例进行讨论，强化学生在学习化工基础知识过程中树立化工安全的理念和意识。

3. 在修订过程中仍然注重宽基础、重实践的理念，既重视概念和理论的阐述，力求表达准确、清楚，又尽可能通过一些具体数据、实例加以说明，特别是增加了一些实际生产中的数据、图、表，方便读者学习和理解。

天津大学自 1999 年开始在化工类本科各专业开设“化工安全与环保”课程以来，一直使用本教材，先后有多位教师参加该课程的教学工作，他们是王保国、陈明鸣、李振花、王虹、王保伟、王胜平等，大家在教学中对本书提出了许多宝贵建议。本书的修订凝结着他们的辛勤劳动，在此表示感谢。在本书修订过程中，还特邀了天津渤海化工集团有机公司王大工、中石油兰州石化冯文萍高工、天津大学王晓静教授、天津市传染病医院施艳丽主任大夫、天津大学王华老师进行了座谈并参加部分章节修订工作，在此深表感激。

限于编者水平，书中不妥之处在所难免，敬请读者批评指正。

编 者

2010 年 12 月于天津大学

## 第一版前言

20 世纪 60 年代以来,随着石油化工的发展和化工装置大型化的进程,化工安全逐渐成为全球性的课题而引起广泛注意,安全与生产之间的密切关系越来越被人们所认识。世界许多大学都设置了安全课程,如美国就有一百多所大学开设了安全课程。而我国仅几所院校开设安全课,我国化工高等教育在这方面大大滞后于发达国家。因而有必要加紧教材建设,迎头赶上世界水平。同时,我国化学工业事故频繁发生,提高学生的安全意识,增长学生的安全知识,为其在校实习及今后的工作中能重视安全生产,改变我国安全生产的被动局面打下良好的基础。

化工安全属工业安全卫生学范畴,其地位和作用是由化工本身的特点决定的。在化工产品的开发和生产中,从原料、中间体到成品,大都具有易燃、易爆、有毒、有害等危险性;化工工艺过程复杂多样化,高温、高压、深冷等不安全因素很多。近年来,随着世界高新技术的发展,开发专用产品、高增值产品和具有先进功能的产品,用高新技术改造传统化工,不断提出化工安全的一些新问题。化工事故案例史表明,对加工的化学物质性质及有关的物理化学原理不甚了解,忽视过程和操作的安全,违章操作,是酿成化工事故的主要原因。据有关资料介绍,在各类工业爆炸事故中,化工爆炸占 32.4%,所占比例最大;事故造成的损失也是以化学工业为最,约为其他工业部门的五倍。因此,对化学工程与工艺类专业本科生开设化工安全课程,进行安全技术基础训练,是很有必要的。

参照面向 21 世纪化工类专业人才培养方案,化工安全和环保是化工类各专业的应用技术公共课程。教材编写应注意教材的通用性,教材内容则应侧重于知识介绍。本教材就是根据以上宗旨编写的。本教材着眼于面向 21 世纪化工类专业人才培养,广泛参阅中外有关资料,编入近期发展起来的化工安全新理论、新方法和新技术,使本教材立足于现代化工的实际和发展趋势。

本教材结合化学工业物质种类繁多、加工过程多样化、损害和伤亡事故多发性的特点,从化工厂设计和操作、压力容器和机电设备运行和维护到化工系统分析和评价,全面地介绍了防火、防爆、防毒、防腐蚀、防职业损害的安全理论和安全技术。本教材可以作为化工类专业本科生化工安全课程的必修或选修课教材,也可以作为化工企业干部安全培训的参考教材。化工安全教材涉及的知识面和学科范围较广,限于编者水平,书中错误或不妥之处在所难免,敬请读者不吝指正。

本教材初审时,中国化工安全卫生技术协会会长石流教授、原上海天原化工集团的蒋永明教授、吴高兴教授提出了许多有益的建议或意见,并提供了珍贵的技术资料,在初稿修改时充分考虑了这些建议或意见,希望能够弥补初稿的一些缺憾。在此,对这些前辈学者表示诚挚的谢意。在本教材的整个写作和出版过程中,得到化学工业出版社的有力支持,在此一并致谢。

编者

2001 年 11 月于天津大学

# 目 录

<b>第一章 绪论</b> .....	<b>1</b>
第一节 化学工业发展与对安全的新要求 .....	1
一、化学工业发展概况 .....	1
二、化学工业发展伴生的新危险 .....	2
三、化学工业发展对安全的新要求 .....	3
第二节 化学工业的危险与安全 .....	4
一、化学工业危险因素 .....	4
二、化工装置紧急状态 .....	6
三、化学工业安全措施 .....	6
<b>第二章 物质性质、物化原理与安全</b> .....	<b>12</b>
第一节 化学物质及其危险概述 .....	12
一、危险化学品分类 .....	12
二、化学物质的危险性 .....	14
第二节 易燃物质的性质和特征 .....	16
一、易燃物质的性质 .....	16
二、易燃物质的类别和火险等级 .....	17
三、物质易燃性评估 .....	18
第三节 毒性物质的性质和特征 .....	18
一、毒性物质的类别 .....	18
二、毒性物质的临界限度和致死剂量 .....	18
三、毒性物质的毒性等级和危险等级 .....	19
第四节 反应物质的性质和特征 .....	21
一、化学物质的反应性能 .....	21
二、反应物质不稳定性结构因素和热力学表征 .....	22
<b>第三章 化工厂设计和操作安全</b> .....	<b>38</b>
第一节 工厂的定位、选址和布局 .....	38
一、危险和防护的一般考虑 .....	38
二、工厂的定位问题 .....	39
三、工厂选址的安全问题 .....	39
四、工厂布局的安全问题 .....	40
第二节 化工工艺设计 .....	42
一、工艺流程图 .....	42
二、管线配置图 .....	42
三、过程物料的安全评价 .....	43
四、工艺路线的选择 .....	43
五、工艺设计安全校核 .....	45
第三节 化工单元区域规划 .....	46
一、加工单元区域的规划 .....	46
二、单元区域的管线配置 .....	48
第四节 化工安全理论和技术的发展动向 .....	8
一、化工危险性评价和安全工程概述 .....	8
二、安全系统工程的开发和应用 .....	9
三、人机工程学、劳动心理学和人体测量学的应用 .....	10
四、化工安全技术的新进展 .....	11
思考题及练习题 .....	11
第五节 压力系统热力学行为与危险性 .....	23
一、温度对蒸气压的影响 .....	23
二、相变引起的体积变化 .....	25
三、不同物质蒸气和液体的密度 .....	26
第六节 化学反应系统物化原理与安全 .....	27
一、化学反应动力学 .....	27
二、反应物质的非互容性质 .....	28
三、化学反应类型及其危险性 .....	30
第七节 化工操作原理与安全 .....	32
一、化学反应与热量传递 .....	32
二、相平衡与组元分离 .....	32
三、相混合和相分离 .....	34
四、物料的输送和机械加工 .....	35
思考题及练习题 .....	37

三、单元装置和设施的安全设计·····	50	二、预防维护·····	60
第四节  压力容器的设计、制造		三、非常规运行和有关作业的	
和检验·····	50	维护·····	61
一、压力容器概述·····	50	四、设备的维护·····	63
二、压力容器设计·····	53	第六节  公用工程设施安全·····	64
三、压力容器的制造和安装·····	56	一、电气设施·····	65
四、压力容器定期检验·····	57	二、水和蒸汽设施·····	65
五、压力容器安全附件·····	58	三、供氧空气和辅助气体设施·····	66
第五节  化工装置维护·····	60	四、废料处理设施·····	67
一、化工维护的必要性·····	60	思考题及练习题·····	67
<b>第四章  燃烧和爆炸与防火防爆安全技术</b>	<b>68</b>	三、爆炸性物质的销毁·····	95
第一节  燃烧要素和燃烧类别·····	68	第八节  燃烧和爆炸事故的调查	
一、燃烧概述·····	68	和分析·····	96
二、燃烧要素·····	69	一、概述·····	96
三、燃烧形式·····	71	二、事故的调查程序和步骤·····	96
四、燃烧类别、类型及其特征		三、燃烧和爆炸分析·····	98
参数·····	71	第九节  火灾爆炸危险与防火防爆	
第二节  燃烧过程和燃烧原理·····	74	措施·····	100
一、燃烧过程·····	74	一、物料的火灾爆炸危险·····	100
二、燃烧的活化能理论·····	75	二、化学反应的火灾爆炸危险·····	101
三、燃烧的过氧化物理论·····	75	三、工艺装置的火灾爆炸危险·····	101
四、燃烧的连锁反应理论·····	76	四、防火防爆措施·····	102
第三节  燃烧的特征参数·····	76	第十节  有火灾爆炸危险物质的	
一、燃烧温度·····	76	加工处理·····	104
二、燃烧速率·····	77	一、用难燃溶剂代替可燃溶剂·····	104
三、燃烧热·····	78	二、根据燃烧性物质的特性分别	
第四节  爆炸及其类型·····	78	处理·····	104
一、爆炸概述·····	78	三、密闭和通风措施·····	105
二、爆炸分类·····	79	四、惰性介质的惰化和稀释	
三、常见爆炸类型·····	80	作用·····	105
第五节  爆炸极限理论与计算·····	82	五、减压操作·····	106
一、爆炸极限理论·····	82	六、燃烧爆炸性物料的处理·····	106
二、影响爆炸极限的因素·····	85	第十一节  燃烧爆炸敏感性工艺参数	
三、爆炸极限的计算·····	86	的控制·····	107
第六节  燃烧性物质的贮存和运输·····	88	一、反应温度的控制·····	107
一、燃烧性物质概述·····	88	二、物料配比和投料速率控制·····	108
二、燃烧性物质的危险性·····	89	三、物料成分和过反应的控制·····	109
三、燃烧性物质的贮存安全·····	90	四、自动控制系统和安全保险	
四、燃烧性物质的装卸和运输·····	92	装置·····	109
第七节  爆炸性物质的贮存和销毁·····	93	第十二节  火灾和爆炸的局限化	
一、爆炸性物质概述·····	93	措施·····	110
二、爆炸性物质的贮存·····	93		

一、火灾爆炸局限化概述 .....	110	一、灭火的原理及措施 .....	112
二、安全装置和局限化设施 .....	111	二、灭火剂及其应用 .....	113
三、火灾爆炸局限化布局 and 措施 .....	111	三、灭火器及其应用 .....	114
四、可燃物泄漏的预防措施 .....	112	四、灭火设施 .....	114
第十三节 灭火剂与灭火设施 .....	112	思考题及练习题 .....	116
<b>第五章 职业毒害与防毒措施 .....</b>	<b>117</b>	一、职业中毒定义 .....	131
第一节 毒性物质类别与有效剂量 .....	117	二、职业中毒特点 .....	132
一、毒性物质概述 .....	117	三、职业中毒诊断依据 .....	132
二、毒性物质分类 .....	117	四、职业中毒诊断过程 .....	133
三、毒性物质有效剂量 .....	118	第八节 职业中毒的临床表现 .....	133
第二节 毒性物质在化工行业中的		一、呼吸系统 .....	133
分布 .....	119	二、神经系统 .....	134
一、无机化工 .....	119	三、血液系统 .....	134
二、有机化工 .....	119	四、消化系统和泌尿系统 .....	134
三、化肥和农药 .....	119	第九节 急性职业中毒的现场抢救 .....	135
四、材料工业 .....	120	一、现场急救设施 .....	135
五、涂料、染料和其他专用产品 .....	120	二、急性中毒的现场处理 .....	135
六、化学试剂、催化剂和助剂 .....	120	三、现场抢救 .....	136
第三节 化工常见物质的毒性作用 .....	120	第十节 防止职业毒害的技术	
一、刺激性气体 .....	120	措施 .....	137
二、窒息性气体 .....	121	一、替代或排除有毒或高毒	
三、金属及其化合物 .....	122	物料 .....	137
四、有机化合物 .....	122	二、采用危害性小的工艺 .....	137
五、化学致癌物 .....	123	三、密闭化、机械化、连续化	
第四节 化学物质毒性的影响因素 .....	125	措施 .....	138
一、化学结构对毒性的影响 .....	125	四、隔离操作和自动控制 .....	138
二、物理性质对毒性的影响 .....	125	第十一节 工业毒物的通风排毒与净化	
三、环境条件对毒性的影响 .....	126	吸收 .....	139
四、个体因素对毒性的影响 .....	127	一、通风排毒措施 .....	139
第五节 毒性物质侵入人体途径与		二、燃烧净化方法 .....	140
毒理作用 .....	127	三、冷凝净化方法 .....	141
一、毒性物质侵入人体途径 .....	127	四、吸收和吸附净化方法 .....	141
二、毒性物质毒理作用 .....	128	第十二节 车间空气中中毒物的测定	
第六节 物质毒性资料的应用 .....	130	与评价 .....	142
一、毒性物质化学结构与相对分子		一、尘、毒空气样品的采集 .....	142
质量 .....	130	二、空气样品测定方法 .....	143
二、毒性物质的物性 .....	130	三、劳动环境评价 .....	144
三、动物试验和毒性等级 .....	131	思考题及练习题 .....	145
第七节 职业中毒及其诊断过程 .....	131	一、锅炉分类及其参数系列 .....	146
<b>第六章 压力容器和机电设备安全 .....</b>	<b>146</b>	二、锅炉运行安全 .....	147
第一节 蒸汽锅炉的安全运行和			
管理 .....	146		



三、锅炉常见事故及处理	149	第四节 动机械安全技术	163
四、锅炉给水安全	151	一、人的不安全行为	163
第二节 压力容器的操作、维护和安全		二、动机械的不安全状态	164
状况评定	152	三、动机械安全防护	165
一、压力容器安全概述	152	第五节 电气设备危险与防护	166
二、压力容器的操作与维护	155	一、电气危险概述	166
三、压力容器破坏形式和缺陷		二、电流对人体的作用	167
修复	156	三、触电防护技术和措施	167
四、压力容器安全状况等级		四、触电急救	169
评定	158	第六节 压缩机操作与维护	170
第三节 高压工艺管道的安全技术		一、压缩机操作中的危险因素	170
管理	159	二、压缩机操作安全	171
一、概述	159	三、压缩机故障处理	171
二、高压管道的设计、制造和		第七节 泵操作安全	173
安装	160	一、往复泵操作安全	173
三、高压管道操作与维护	161	二、离心泵操作安全	174
四、高压管道技术检验	161	思考题及练习题	175
<b>第七章 工业腐蚀与预防措施</b>	<b>176</b>	第四节 腐蚀监测技术	182
第一节 工业腐蚀及其危害	176	一、电参数监测法	182
一、工业腐蚀概述	176	二、物理监测技术	183
二、腐蚀机理	177	三、腐蚀环境监测法	183
三、腐蚀的危害与损失	177	第五节 设计和选材的防腐考虑	183
第二节 工业腐蚀的典型类型	178	一、防腐设计	183
一、全面腐蚀	178	二、选材防腐考虑	183
二、缝隙腐蚀	178	第六节 材料的防腐措施	186
三、孔腐蚀	179	一、电化学保护	186
四、氢损伤	179	二、缓蚀剂的应用	186
第三节 应力腐蚀裂纹	179	三、金属表面保护层	187
一、应力腐蚀概述	179	四、非金属保护层	188
二、应力腐蚀的机理与特征	180	思考题及练习题	188
三、应力腐蚀的影响因素	181	第三节 静电的危害与消除	197
<b>第八章 普通工业安全卫生</b>	<b>189</b>	一、静电产生的物质特性和条件	197
第一节 普通职业危险与安全	189	二、物质和人体静电的带电过程	199
一、跌落、碰砸伤害危险与防护	189	三、静电的危险与危害	200
二、人力、机械搬运安全	190	四、静电的预防与消除	203
三、机械危险与防护	191	第四节 辐射的危害与防护	206
第二节 噪声的污染与治理	191	一、辐射线的种类与特性	206
一、声音的物理量度	191	二、非电离辐射的危害与防护	208
二、噪声的分类与频谱分析	193	三、电离辐射的危害与防护	209
三、噪声的危害与评价	194		
四、噪声的预防与治理	195		

第五节 工业卫生管理 .....	211	第六节 工业卫生设施和防护器具 ...	215
一、生产中的有害因素 .....	211	一、通风与采暖 .....	215
二、有害因素对人体的作用 .....	212	二、采光与照明 .....	216
三、职业病的诊断标准和预防 措施 .....	212	三、辅助设施 .....	216
四、职业健康监护 .....	214	四、个人防护器具 .....	217
<b>第九章 系统安全分析与评价</b> .....	<b>219</b>	思考题及练习题 .....	218
第一节 安全系统工程简述 .....	219	第四节 道化学公司火灾爆炸危险指数 评价方法 .....	227
一、系统与安全 .....	219	一、物质系数 .....	227
二、基本程序和方法 .....	220	二、单元工艺危险系数 .....	230
三、应用特点 .....	220	三、安全设施补偿系数 .....	231
第二节 系统危险性分析 .....	221	四、单元危险与损失评价 .....	235
一、危险性及其表示方法 .....	221	第五节 事故树分析及其应用 .....	238
二、危险性分析的基本要素 .....	222	一、事故树分析概述 .....	238
三、危险性分析的步骤和方法 .....	222	二、事故树编制 .....	238
第三节 故障类型、影响及致命度 分析 .....	223	三、事故树实例 .....	242
一、故障类型及影响分析 .....	223	四、事故树分析与计算 .....	244
二、致命度分析 .....	225	思考题及练习题 .....	246
三、应用实例 .....	225		
<b>参考文献</b> .....	<b>247</b>		

# 第一章 绪 论

## 第一节 化学工业发展与对安全的新要求

### 一、化学工业发展概况

现代化学工业始于 18 世纪的法国，随后传入英国。19 世纪，以煤为基础原料的有机化学工业在德国迅速发展起来。但那时的煤化学工业按其规模并不十分巨大，主要着眼于各种化学产品的开发。所以当时化工过程开发主要是由工业化学家率领，机械工程师参加进行的。技术人员的专业也是按其从事的产品生产分类的，如染料、化肥、炸药等。直到 19 世纪末，化学工业萌芽阶段的工程问题，都是采用化学（家）加机械（工程师）的方式解决的。

现代化学工业的发展时期是在美国开始的。19 世纪末 20 世纪初，石油的开采和大规模石油炼厂的兴建为石油化学工业的发展和化学工程技术的产生奠定了基础。与以煤为基础原料的煤化学工业相比，炼油业的化学背景不那么复杂多样化，因此有可能也有必要进行工业过程本身的研究，以适应大规模生产的需要。这就是在美国产生以“单元操作”为主要标志的现代化学工业的背景。

1888 年，美国麻省理工学院开设了世界上最早的化学工程专业，接着，宾夕法尼亚大学、土伦大学和密执安大学也先后设置了化学工程专业。这个时期化学工程教育的基本内容是工业化学和机械工程。1915 年 12 月麻省理工学院一个委员会的委员 A. D. Little 首次正式提出了单元操作的概念。20 世纪 20 年代石油化学工业的崛起推动了各种单元操作的研究。

由于单元操作的发展，20 世纪 30 年代以后，化学机械从纯机械时代进入以单元操作为基础的化工机械时期。40 年代，因战争需要，三项重大开发同时在美国出现。这三项重大开发是，流化床催化裂化制取高级航空燃料油、丁苯橡胶的乳液聚合以及制造首批原子弹的曼哈顿工程。前两者是用 30 年代逐级放大的方法完成的，放大比例一般不超过 50 : 1。但是曼哈顿工程由于时间紧迫和放射性的危害，必须采用较高的放大比例，达 1000 : 1 或更高一些。这就要求依靠更加坚实的理论基础，以更加严谨的数学形式表达单元操作的理论。

曼哈顿工程的成功大大促进了单元操作在化学工业中的应用。20 世纪 50 年代中期提出了传递过程原理，把化学工业中的单元操作进一步解析为三种基本操作过程，即动量传递、热量传递和质量传递以及三者之间的联系。同时在反应过程中把化学反应与上述三种传递过程一并研究，用数学模型描述过程。连同电子计算机的应用以及化工系统工程学的兴起，使得化学工业发展进入更加理性、更加科学化的时期。

20 世纪 60 年代初，新型高效催化剂的发明，新型高级装置材料的出现，以及大型离心压缩机的研究成功，开始了化工装置大型化的进程，把化学工业推向一个新的高度。此后，化学工业过程开发周期已能缩短至 4~5 年，放大倍数达 500~20000 倍。

化学工业过程开发是指把化学实验室的研究结果转变为工业化生产的全过程。它包括实验室研究、模试、中试、设计、技术经济评价和试生产等许多内容。过程开发的核心内容是放大。由于化学工程基础研究的进展和放大经验的积累，特别是化学反应工程理论的迅速发展，使得过程开发能够按照科学的方法进行。中间试验不再是盲目地、逐级地，而是有目的地进行。化学工业过程开发的一个重要进展是，可以用电子计算机进行数学模拟放大。中间

试验不再像过去那样只是收集或产生关联数据的场所，而是检验数学模型和设计计算结果的场所。现代化学工业过程开发可以概括为：

- ① 利用现有的情报资料、技术数据、同类过程的成熟经验、小试或模试的实验结果和化学化工知识，把化学工业过程抽象为理论模型；
- ② 进行工业装置的概念设计，并根据概念设计相似缩小为中试装置；
- ③ 比较电子计算机的数学模拟和中试结果，反复比较，不断修正数学模型，使其达到一定精度，用于放大设计。

目前化学工业开发的趋势是，不一定进行全流程的中间试验，对一些非关键设备和很有把握的过程不必试验，有些则可以用计算机在线模拟和控制来代替。

现代的技术进步一日千里。20世纪最后几十年的发明和发现，比过去两千年的总和还要多。化学工业也是如此。在这几十年中，化学工业在世界范围取得了长足进展。化学工业在很大程度上满足了农业对化肥和农药的需要。随着化学工业的发展，天然纤维已丧失了传统的主宰地位，人类对纤维的需要有近三分之二是由合成纤维提供的。塑料和合成橡胶渗透到国民经济的所有部门，在材料工业中已占据主导地位。医药合成不仅在数量上而且在品种和质量上都有了较大发展。化学工业的发展速度已显著超过国民经济的平均发展速度，化工产值在国民生产总值中所占的比例不断增加，其他工业部门对化学工业的依赖程度越来越大，化学工业已发展成为国民经济的支柱产业和发展高新技术的基石。

20世纪70年代后，随着化学工业的大发展，现代化学工程技术渗入到了各个加工领域，生产技术面貌发生了显著变化。同时，化学工业也面临来自能源、原料和环保三大方面的挑战，进入一个既有挑战又有重大机遇的发展阶段。

在原料、能源供应日趋紧张和环境保护压力的条件下，化学工业正在通过技术进步尽量提高其对原料的利用和减少其对能源的消耗；为了满足整个社会日益增长的能源需求，化学工业正在努力提供新的技术手段，用化学的方法为人类提供多种途径的新能源；为了自身的发展，化学工业正在开辟新的原料来源，为以后的发展奠定丰富的原料基础；随着电子计算机的发展和应用，化学工业正在进入高度自动化的阶段；一些高新技术，如激光、模拟酶的应用，正在使化学工业生产的效率显著提高，技术面貌发生根本性的变化；由于有了更新的技术手段，化学工业对环境的污染进一步得到控制，而且也为其他行业的环境保护发挥作用，并将为改善人类的生存条件做出新的贡献。

### 二、化学工业发展伴生的新危险

进入20世纪后，化学工业迅速发展，环境污染和重大工业事故相继发生。1930年12月比利时发生了“马斯河谷事件”。在马斯河谷地区由于铁工厂、金属工厂、玻璃厂和锌冶炼厂排出的污染物被封闭在逆温层下，浓度急剧增加，使人感到胸痛、呼吸困难，一周之内造成60人死亡，许多家畜也相继死去。1948年10月美国宾夕法尼亚州的多诺拉，1952年11月英国的伦敦发生了类似的事件。“伦敦烟雾事件”使伦敦在11月1日至12月12日期间比历史同期多死亡了3500~4000人。1961年9月14日日本富山市一家化工厂因管道破裂，氯气外泄，使九千余人受害，532人中毒，大片农田被毁。1974年英国Flixborough地区化工厂已内酰胺原料环己烷泄漏发生的蒸气云爆炸和1984年印度博帕尔发生的异氰酸甲酯泄漏所造成的中毒事故，都是震惊世界的灾难。1960年到1977年的18年中，美国和西欧发生重大火灾和爆炸事故360余起，死伤1979人，损失数十亿美元。我国化学工业事故也是频繁发生，从1950年到1999年的50年中，发生各类伤亡事故23425起，死伤25714人，其中因火灾和爆炸事故死伤4043人。

随着化学工业的发展,涉及的化学物质的种类和数量显著增加。很多化工物料的易燃性、易爆性、反应性和毒性本身决定了化学工业生产事故的多发性和严重性。反应器、压力容器的爆炸以及燃烧传播速度超过声速的爆轰,都会产生破坏力极强的冲击波,冲击波将导致周围厂房建筑物的倒塌,生产装置、贮运设施的破坏以及人员的伤亡。如果是室内爆炸,极易引发二次或二次以上的爆炸,爆炸压力叠加,可能造成更为严重的后果。多数化工物料对人体有害,设备密封不严,特别是在间歇操作中泄漏的情况很多,容易造成操作人员的急性或慢性中毒。据我国化工部门统计,因一氧化碳、硫化氢、氮氧化物、氨、苯、二氧化碳、二氧化硫、光气、氯化钡、氯气、甲烷、氯乙烯、磷、苯酚、砷化物等化学物质造成中毒、窒息的死亡人数占中毒死亡总人数的87.6%。而这些物质在一般化工厂中是常见的。

随着化学工业的发展,化工生产呈现设备多样化、复杂化以及过程连接管道化的特点。如果管线破裂或设备损坏,会有大量易燃气体或液体瞬间泄漏,迅速蒸发形成蒸气云团,与空气混合达到爆炸下限。云团随风漂移,飞至居民区遇明火爆炸,会造成难以想像的灾难。据估计50t的易燃液体泄漏、蒸发将会形成直径为700m的云团,在其覆盖下的居民,将会被爆炸火球或扩散的火焰灼伤,火球或火焰的辐射强度将远远超过人所能承受的程度,同时还因缺乏氧气而使人窒息致死。

化工装置的大型化使大量化学物质都处于工艺过程或贮存状态,一些密度比空气大的液化气体如氨、氯等,在设备或管道破裂处会以 $15^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 角呈锥形扩散,在扩散宽度100m左右时,人还容易察觉迅速逃离,但在距离较远而毒气尚未稀释到安全值时,人则很难逃离并导致中毒,毒气影响宽度可达1000m或更大。前述的印度博帕尔事件造成两千多人死亡就属这种情况。

### 三、化学工业发展对安全的新要求

化工装置大型化,在基建投资和经济效益方面的优势是无可争辩的。但是,大型化是把各种生产过程有机地联合在一起,输入输出都是在管道中进行。许多装置互相连接,形成一条很长的生产线。规模巨大、结构复杂,不再有独立运转的装置,装置间互相作用、互相制约。这样就存在许多薄弱环节,使系统变得比较脆弱。为了确保生产装置的正常运转并达到规定目标的产品,装置的可靠性研究变得越来越重要。所谓可靠性是指系统设备、元件在规定的条件下和预定的时间内完成规定功能的概率。可靠性研究用的较多的是概率统计方法。化工装置可靠性研究需要完善数学工具,建立化工装置和生产的模拟系统。概率与数理统计方法以及系统工程学方法将更多地渗入化工安全研究领域。

化工装置大型化使得加工能力显著增大,大量化学物质都处在工艺过程中,增加了物料外泄的危险性。化工生产中的物料多半本身就是能源和毒性源,一旦外泄就会造成重大事故,给生命和财产带来巨大灾难。这就需要通过对过程物料和装置结构材料进行更为详尽地考察,对可能的危险做出准确的评估并采取恰当的对策,对化工装置的制造加工工艺也提出了更高的要求。化工安全设计在化工设计中变得更加重要。

化工装置大型化必然带来生产的连续化和操作的集中化,以及全流程的自动控制。省掉了中间贮存环节,生产的弹性大大减弱。生产线上每一环节的故障都会对全局产生严重影响。对工艺设备的处理能力和工艺过程的参数,要求更加严格,对控制系统和人员配置的可靠性也提出了更高的要求。

新材料的合成、新工艺和新技术的采用,可能会带来新的危险性。面临从未经历过的新的工艺过程和新的操作,更加需要辨识危险,对危险进行定性和定量评价,并根据评价结果采取优化的安全措施。因此,对危险进行辨识和评价的安全评价技术的重要性越来越突出。

化学工业的技术进步为满足人类的食、衣、住、行等诸方面的需求做出了重要贡献。但作为负面结果，在化学工业生产过程中也出现了新的危险性。化工安全必须采用新的理论方法和新的技术手段应对化学工业生产中出现的新的隐患，与化学工业同步发展。

### 第二节 化学工业的危险与安全

化学工业初期只是伴有化学反应的工艺制造过程，进而包括以过程产品为原料的工业。化学工业随着技术的进步和市场的扩大迅速发展起来，目前已占整个制造业的40%以上。在化工生产中，从原料、中间体到成品，大都具有易燃、易爆、毒性等化学危险性；化工工艺过程复杂多样化，高温、高压、深冷等不安全的因素很多。事故的多发性和严重性是化学工业独有的特点。

大多数化工危险都具有潜在的性质，即存在着“危险源”，危险源在一定的条件下可以发展成为“事故隐患”，而事故隐患继续失去控制，则转化为“事故”的可能性会大大增加。因此，可以得出以下结论，即：危险失控，可导致事故；危险受控，能获得安全。所以辨识危险源成为重要问题。目前国内外流行的安全评价技术，就是在危险源辨识的基础上，对存在的事故危险源进行定性和定量评价，并根据评价结果采取优化的安全措施。提高化工生产的安全性，需要增加设备的可靠性，同样也需要强化现代化的安全管理。

#### 一、化学工业危险因素

美国保险协会(AIA)对化学工业的317起火灾、爆炸事故进行调查，分析了主要和次要原因，把化学工业危险因素归纳为以下九个类型。

##### 1. 工厂选址

- ① 易遭受地震、洪水、暴风雨等自然灾害；
- ② 水源不充足；
- ③ 缺少公共消防设施的支援；
- ④ 有高湿度、温度变化显著等气候问题；
- ⑤ 受邻近危险性大的工业装置影响；
- ⑥ 邻近公路、铁路、机场等运输设施；
- ⑦ 在紧急状态下难以把人和车辆疏散至安全地。

##### 2. 工厂布局

- ① 工艺设备和贮存设备过于密集；
- ② 有显著危险性和无危险性的工艺装置间的安全距离不够；
- ③ 昂贵设备过于集中；
- ④ 对不能替换的装置没有有效的防护；
- ⑤ 锅炉、加热器等火源与可燃物工艺装置之间距离太小；
- ⑥ 有地形障碍。

##### 3. 结构

- ① 支撑物、门、墙等不是防火结构；
- ② 电气设备无防护措施；
- ③ 防爆通风换气能力不足；
- ④ 控制和管理的指示装置无防护措施；
- ⑤ 装置基础薄弱。

4. 对加工物质的危险性认识不足

- ① 在装置中原料混合，在催化剂作用下自然分解；
- ② 对处理的气体、粉尘等在其工艺条件下的爆炸范围不明确；
- ③ 没有充分掌握因误操作、控制不良而使工艺过程处于不正常状态时的物料和产品的详细情况。

5. 化工工艺

- ① 没有足够的有关化学反应的动力学数据；
- ② 对有危险的副反应认识不足；
- ③ 没有根据热力学研究确定爆炸能量；
- ④ 对工艺异常情况检测不够。

6. 物料输送

- ① 各种单元操作时对物料流动不能进行良好控制；
- ② 产品的标示不完全；
- ③ 风送装置内的粉尘爆炸；
- ④ 废气、废水和废渣的处理；
- ⑤ 装置内的装卸设施。

7. 误操作

- ① 忽略关于运转和维修的操作教育；
- ② 没有充分发挥管理人员的监督作用；
- ③ 开车、停车计划不当；
- ④ 缺乏紧急停车的操作训练；
- ⑤ 没有建立操作人员和安全人员之间的协作体制。

8. 设备缺陷

- ① 因选材不当而引起装置腐蚀、损坏；
- ② 设备不完善，如缺少可靠的控制仪表等；
- ③ 材料的疲劳；
- ④ 对金属材料没有进行充分的无损探伤检查或没有经过专家验收；
- ⑤ 结构上有缺陷，如不能停车而无法定期检查或进行预防维修；
- ⑥ 设备在超过设计极限的工艺条件下运行；
- ⑦ 对运转中存在的问题或不完善的防灾措施没有及时改进；
- ⑧ 没有连续记录温度、压力、开停车情况及中间罐和受压罐内的压力变动。

9. 防灾计划不充分

- ① 没有得到管理部门的大力支持；
- ② 责任分工不明确；
- ③ 装置运行异常或故障仅由安全部门负责，只是单线起作用；
- ④ 没有预防事故的计划，或即使有也很差；
- ⑤ 遇有紧急情况未采取得力措施；
- ⑥ 没有实行由管理部门和生产部门共同进行的定期安全检查；
- ⑦ 没有对生产负责人和技术人员进行安全生产的继续教育和必要的防灾培训。

瑞士再保险公司统计了化学工业和石油工业的 102 起事故案例，分析了上述九类危险因素所起的作用，表 1-1 为统计结果。

表 1-1 化学工业和石油工业的危险因素

类别	危险因素	危险因素的比列/%	
		化学工业	石油工业
1	工厂选址问题	3.5	7.0
2	工厂布局问题	2.0	12.0
3	结构问题	3.0	14.0
4	对加工物质的危险性认识不足	20.2	2.0
5	化工工艺问题	10.6	3.0
6	物料输送问题	4.4	4.0
7	误操作问题	17.2	10.0
8	设备缺陷问题	31.1	46.0
9	防灾计划不充分	8.0	2.0

由表 1-1 可以看出,设备缺陷问题是第一位的危险,若能消除此项危险因素,则化学工业和石油工业的安全就会获得有效改善。在化学工业中,“4”和“5”两类危险因素占较大比例。这是由以化学反应为主的化学工业的特征所决定的。在石油工业中,“2”和“3”两类危险因素占较大比例。石油工业的特点是需要处理大量可燃物质,由于火灾、爆炸的能量很大,所以装置的安全间距和建筑物的防火层不适当时就会形成较大的危险。另外,误操作问题在两种工业危险中都占较大比例。操作人员的疏忽常常是两种工业事故的共同原因,而在化学工业中所占比重更大一些。在以化学反应为主体的装置中,误操作常常是事故的重要原因。

## 二、化工装置紧急状态

对于化工装置的紧急状态可以划分为以下五个等级:

- ① 运转失灵,是指运转发生紊乱,只要更换备用设施,就可在尚未发生故障或事故之前恢复正常运转;
- ② 故障,是指设备需要停车检修,但又未发生其他损坏的状态;
- ③ 异常,是指对工艺过程需要采取一定措施,否则就有可能发生事故;
- ④ 事故,是指设备损坏、生产中止或火灾、爆炸、毒物泄漏、人员伤亡。对此必须采取紧急措施。事故状态没有扩展;
- ⑤ 灾害,指不但发生了事故,而且事故状态扩展,对外界造成威胁。需要采取紧急措施,并求得外部支援。

在化学工业生产中,故障状态总是不可避免的。为了不使故障恶化到异常的程度,应该对故障、异常状态进行调查分析,采取相应措施,力求不要达到事故状态。

应该从过去的事故或灾害中吸取必要的经验教训,使安全技术不断充实和完善。近年来发展起来的安全评价技术,在化工界得到了广泛的推广和应用。如在处理危险品或进行危险反应的工艺时,除去对物料本身的危险性进行评价外,还要对杂质的影响、副反应的影响以及其他反应方面的问题进行评价。

## 三、化学工业安全措施

前面已经给出了化学工业和石油工业的危险因素,下面将针对占较大比例的危险因素提出相应的安全措施。

### 1. 设备安全

确定设备的安全性,需要考虑以下因素:

- ① 是否按照相应的安全标准、规范进行设计;
- ② 是否按照设计说明书正确进行制造;



③ 是否有适当的安全防护装置；

④ 维护、检查的程序是否完善。

对于所有化工装置的设计，目前还没有完全达到标准化，但在机械设备方面的设计则已经实现了标准化。对于化工装置设计标准，可按以下目次查阅审定：基础工程；支持结构；容器和罐；泵和压缩机；加热器和加热炉；换热器；透平机；电气设备；仪表；配管；蒸馏塔和吸收塔；安全消防设备。

关于压力容器，许多规格标准或法规都规定了设计标准。在设计时，除这些标准外，还需要考虑结构材料、施工方法、设计强度、金属厚度等因素。设计温度和设计压力应该根据操作中的最大值确定。为了便于维修检查，压力容器上必须开有一定数量的适当尺寸的检查孔。处理腐蚀性物料时，除要充分注意耐腐蚀处理外，还必须有完善的排液系统。还要注意防止压力容器放空口和安全阀排出的危险物滞留而形成的二次危险。

处理可燃液体和气体的泵和压缩机，应该尽可能设在室外，而且必须采用防振的配管和支撑方法进行安装。特别是输送可燃流体的泵，为了防止起火时人无法接近以及可燃流体仍继续流入泵内，应该安装远程控制开关和配管截断阀。

加热器和加热炉务必不得设置在散发可燃气体的危险区域。需要特别注意点火装置、控制装置、压力安全装置以及燃烧室内的通风。就配管系统而言，要考虑到装置发生火灾的情况，在适当的地点安装紧急切断阀。另外，必须防止倒流，安装止逆阀。

自动化、仪表化是化工装置安全运行的重要因素。所有的仪表都应该是可靠的，且具有良好的耐腐蚀性和耐候性。仪表安装时应考虑到易于检查和维修。

## 2. 物料加工和操作安全

应该建立原料、中间体、产物和副产物的完整的物性数据档案。根据《第170号国际公约》及1997年我国施行的《工作场所安全使用化学品规定》，属于危险化学品的物料，可向供应商或制造商索取该物料的《化学品安全技术说明书》。对各种物质的状态，如闪点、沸点、熔点、爆炸极限、燃点等性质数据，以及操作、贮运、应急处置等，都应该有清晰地了解。对物质性质所伴生的危险和可能造成的损失或损害，以及相应的对策应进行分析和说明，达到防患于未然的目的。

对于操作程序，可分为有化学反应的和无化学反应的两种类型。所谓“有化学反应的”是指在设备中进行聚合、缩合、热裂解、催化裂化、氧化、脱氢、加氢、烷基化等化学反应。而“无化学反应的”则是指混合、溶解、清洗、蒸馏、萃取、吸收、精制、分离、机械加工等不进行化学反应的单元操作。当然，对可能发生的误操作，以及一旦发生所造成的后果，应分门别类地进行分析和评价。特别是对可能造成重大损失或损害的操作要格外注意。

## 3. 装置布局安全

化工装置的布局和排列，对于绝大多数操作都应该是最有效的，而且安全问题也必须放在同等重要的地位。对于大量处理可燃液体的石油和化工企业，装置布局和设备间距应该注意以下几点：

- ① 需要留有足够的空地以把工艺单元可能的火灾控制在最小范围；
- ② 对于极为重要的单系列装置，要保留足够的空间，或用其他方法进行防护；
- ③ 危险性极大的区域应该与其他部分保持足够的安全距离；
- ④ 装置事故不能直接影响水、电、气（汽）等公用工程设施；
- ⑤ 因各种原因有可能使装置界区内浸水时，应该设置防水设备；
- ⑥ 应该特别注意公路、铁路在装置附近的情况；
- ⑦ 对于道路的设置，应该注意在发生事故时能较方便地接近装置；