

安全工程高级人才培养教材

化工安全设计

崔克清 张礼敬 陶刚 编



化学工业出版社
教材出版中心

安全工程高级人才培养教材

化工安全设计

崔克清 张礼敬 陶刚 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

化工安全设计/崔克清, 张礼敬, 陶 刚编. —北京:
化学工业出版社, 2004. 4
安全工程高级人才培养教材
ISBN 7-5025-5441-6

I. 化… II. ①崔…②张…③陶… III. 化学工业-
安全技术-教材 IV. TQ086

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 033717 号

安全工程高级人才培养教材

化工安全设计

崔克清 张礼敬 陶 刚 编

责任编辑: 何曙霓

文字编辑: 徐卿华 李玉峰

责任校对: 李 林

封面设计: 关 飞

*

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

北京云浩印刷有限责任公司印刷

三河市东柳装订厂装订

开本 720 毫米×1000 毫米 1/16 印张 29 字数 552 千字

2004 年 5 月第 1 版 2004 年 5 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-5441-6/G · 1420

定 价: 38.00 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

安全工程高级人才培养教材〈套书〉就要正式出版了。〈套书〉全面收集和总结了几十年来的工业生产过程，特别是以化工、石油化工、冶金化工、制药工业、生物工程、建材工业等为代表的流体工业生产体系安全生产领域的经验和知识，吸取了国外的经验和教训。国内二十余位有较高学术理论水平和丰富经验的专家、教授、学者做出了极大的努力，他们以广博的知识了解历史，了解世界，分析过去，总结现在，为〈套书〉的编写克服种种困难，汇集几十年来积累的知识和经验，调用现代信息工具，查阅大量资料，结合教学、科研和社会实践，伏案整理写作，反复修改，最终使〈套书〉的编写工作基本完成，得以陆续出版。

〈套书〉的内容涵盖了安全工程与科学基础理论及概念、燃烧爆炸理论与技术、物质危险性原理及测控技术、化工工艺及安全、化工安全设计、工业系统安全评价及风险分析、安全工程鉴定技术与实验技术、灾害事故理论与分析技术、管道及压力容器安全技术、电气与静电安全技术、工业危害与控制技术等，在安全工程与科学领域，尤其是在化工安全生产领域，其内容之广泛，结构之系统都是我国建国以来仅有的。〈套书〉是这些专家、教授、学者辛勤劳动的结晶，是他们共同合作的丰硕成果，是他们学识和智慧的总结。在〈套书〉出版之际向为〈套书〉做出贡献的作者以及为〈套书〉提供资料和方便的单位和同志表示衷心感谢。

〈套书〉的正式出版发行，一定会为我国经济建设中培养安全技术工程高级人才，特别是为化工、石油化工等工业体系培养安全技术工程高级人才做出贡献。

安全工程高级人才培养教材〈套书〉

编辑委员会

2004年3月

内 容 提 要

本书主要介绍了化工过程安全可行性研究，安全设计准备，装置与设备的平面布置，化工工艺基础安全设计，安全控制系统设计，装置及设备安全设计，配套设施与设备、燃料系统、制冷系统、压缩气体和惰性气体、贮存设备安全设计，建筑物、构筑物安全设计，安全装置设计，消防、报警设备安全设计及装置试运转完全设计等方面内容。

本书内容丰富，系统性强，理论与工程实践相结合，具有较强的实用性。

本书适合化工、石化高校学生及研究、设计单位技术人员和管理人员使用。

目 录

1 化工安全设计概论	1
1.1 设计和安全	1
1.2 工艺的本质安全设计	2
1.3 信息控制和安全控制	4
1.4 安全设计过程	5
1.5 设计的安全经济分析	18
2 从实验室到工业化的现代工艺过程	21
3 建设项目可行性报告研究	24
3.1 可行性研究主要内容	24
3.2 原料路线	27
3.3 生产设备	28
4 安全设计数据资料	30
4.1 自然条件分析	30
4.2 厂址选择	34
4.3 装置能力	38
5 规范、标准、规程	39
6 建设项目(工程)基础设计资料	41
6.1 建设项目(工程)基础设计资料分析	41
6.2 工程项目基础设计资料样式	42
7 装置与设备的平面布置	55
7.1 总平面布置基础资料	55
7.2 厂区总平面布置	55
7.3 装置区内设备布置	58
7.4 利用比例模型进行平面布置分析	64

7.5	工艺设备的基础设计	65
8	化工工艺基础安全设计	66
8.1	概述	66
8.2	工艺管道及仪表流程 (PID 图) 识别	67
8.3	装置工艺设计安全分析	98
8.4	管廊的布置	110
8.5	加热炉的布置	112
8.6	压缩机的布置	112
8.7	塔的布置	114
8.8	反应器的布置	116
8.9	换热器的布置	116
8.10	容器的布置	118
8.11	泵的布置	119
9	安全控制系统设计分析	120
9.1	安全控制系统的设计思想	120
9.2	基础安全设计分析	122
9.3	分析过程模型	126
9.4	安全控制系统的基础设计	127
9.5	控制室和人机接口	129
9.6	动力源	131
9.7	检测、变送系统	133
9.8	接收仪表	136
9.9	调节阀	138
9.10	化工生产过程运行安全控制	141
9.11	化工安全控制系统组成	145
9.12	化工过程重要装置安全控制系统	155
9.13	化学反应器安全设计	183
9.14	锅炉安全控制系统	204
9.15	现代控制技术与安全控制	208
10	装置及设备安全设计	223
10.1	装置材料安全设计	223
10.2	设备安全设计分析	225
10.3	装置与设备安全设计	230

10.4	管道及管系安全设计	235
10.5	设计温度的确定	236
10.6	配管系统安全设计条件	237
11	配套设施与设备安全设计	242
11.1	配套设施与设备	242
11.2	公用工程系统安全设计	246
12	燃料系统安全设计	259
13	制冷系统安全设计	262
13.1	冷冻设备	262
13.2	制冷过程安全设计分析	263
14	压缩气体和惰性气体安全设计	265
14.1	装置及设备安全分析	265
14.2	空气系统安全分析	265
14.3	仪表风系统分析	266
14.4	惰性气体系统	267
14.5	空气压缩机及附属设备	267
15	贮存设备安全设计	269
15.1	安全设计分析	269
15.2	贮存设备安全布置	270
15.3	原料的装卸、接收设备	271
15.4	辅助设备安全监控	279
16	建筑物、构筑物的安全设计	281
16.1	基础安全设计	281
16.2	安全设计内容分析	287
16.3	结构安全分析	290
16.4	荷载及外力分析	292
16.5	结构设计安全检查	294
16.6	建筑设备(构筑物)安全设计	296
16.7	装置区外建筑物安全设计	299
17	安全装置设计	312

17.1	安全阀的选择与应用	312
17.2	爆破片安全设计	341
17.3	阻火器安全设计	350
17.4	呼吸阀安全设计	354
17.5	火炬系统安全设计	358
18	液体贮罐安全	377
19	消防和报警设备安全设计	381
19.1	消防和报警设备	381
19.2	火灾报警控制系统设计	385
19.3	火灾自动报警控制系统设计	390
19.4	消防防、排烟系统	393
19.5	消防给水系统	395
19.6	自动喷水灭火系统	399
19.7	火灾探测自动控制传动系统	403
19.8	水喷雾灭火系统及蒸汽灭火系统简介	404
19.9	化学灭火系统	405
19.10	CO ₂ 灭火系统	405
20	装置试运转安全设计	412
20.1	试运转方案及程序安全	412
20.2	公用工程设备、辅助设备的启动	420
20.3	装填催化剂	421
20.4	模拟运转安全	422
20.5	运转安全设计	423
20.6	停车安全	425
20.7	试运转操作安全	426
20.8	试运转事故预防	436
20.9	装置性能试验	437
21	建设项目质量控制	438
	参考文献	450

1

化工安全设计概论

1.1 设计和安全

化学工业与炼钢、造船、机械、电气设备制造等工业相比，由于大量使用可燃性或有毒性的物质，所以由这些物质引起的火灾、爆炸或中毒的危险性很大。另外，随着设备本身的大型化，处理量明显增大，其操作也是在危险的反应和高温、高压等苛刻条件下进行的。

就操作条件来说，在石油炼制工业中，以前即使是高压，重整装置最高也就是 3.0~4.0MPa 左右，可是目前已可建设的直接脱硫装置，已采用 15MPa 的高压。石油化学工业中的操作条件更苛刻，使用的温度范围也广，从裂解炉的 800~900℃ 一直到乙烯低温贮罐的 -80℃，LNG 贮罐的 -160℃，温差范围为 1000℃；说到压力，高压聚乙烯装置已采用 100~200MPa 超高压。另外，由于该行业往往在汽液平衡状态下采用汽液两相，所以也有可能因其操作中的体积膨胀、收缩而使装置产生异常。这样苛刻的操作条件也增加了装置本身破坏的危险性。

装置规模大，操作条件苛刻，一旦发生火灾、爆炸等事故，其灾害的波及范围也就大得多，而且增加了消防灭火的困难，造成企业和社会灾难。所以对化工装置来说，安全设计比什么都重要。如果因安全设计不充分而引起事故，其事故即使不直接给居民区的生命财产带来危险，也会使人们受到某种程度的心理恐惧感，不能继续进行顺利的生产。现代的安全问题已不能简单地同生产相提并论。

有较多潜在危险性的化学工业在安全生产上的法令规则比其他工业多，其内容也逐渐涉及专业技术领域，而且每发生一次大事故，有关的安全措施也就随之强化。执行严格的安全生产法令、法规、规范、标准、规程是强制性的，在化工装置的安全设计中是不可避免的，不符合所规定技术标准的化工装置不允许使用。

1.2 工艺的本质安全设计

化工装置的安全设计，以系统科学的分析为基础，定性、定量地考虑装置的危险性，同时以过去的事故等所提供的教训和资料来考虑安全措施，以防再次发生类似的事故。以法令规则为第一阶段，以有关标准或规范为第二阶段，再以总结或企业经验的标准为第三阶段来制定安全措施。但是，用这种“事故的后补式”方法，很难期望根绝新的事故发生，特别是在条件差，厂区周围居民对事故非常关心的地方，用以前的方法就不完善了。应极力提倡事前彻底研究化工装置发生事故的潜在原因，有系统地采取安全措施，采用所谓“问题发现式”的预测方法，将化工装置的安全运行基于化工装置的设计阶段，实现设计安全。

由于各种原因（例如经济上或技术上的原因），把化工装置的安全全部寄希望于设备和工艺的安全设计有时是不切实际的，还需要像以前强调的那样，同时依靠工艺和设备的正确运转和适当的维护管理。如果分析一下实际发生的事故，由工艺和设备运转和维护管理不当引起的事故要比安全设计不当引起的事故多。因此，在搞好工艺和设备安全设计的同时，今后还要开发运转或维护管理上的安全科学。安全设计基本的原则可以归纳如下。

1.2.1 工艺的安全性

工艺必须实现以下三项研究，即：①设计条件和设计内容的确定是在系统危险分析，事故模式与机理研究基础进行的，在设计条件下能够安全运转；②采用现代安全措施和控制技术，实现过程的自适应性和调控作用，即使多少有些偏离设计条件也能将其安全处理并恢复到原来的条件；③确立安全的启动或停车系统。

因此，必须评价化工工艺所具有的各种潜在危险性，如原料、化学反应、操作条件不同，偏离正常运转的变化，工艺设备本身等的危险性，研究排除这些危险性，或者用其他适当办法对这些条件性加以限制。化工装置一般是由很多工艺高度集中构成的，所以有时各工艺的每个阶段也影响其他阶段的操作。一开始就考虑全部工艺过程的安全问题是比较复杂的，所以有必要将工艺过程进行分类，考虑每类工艺过程对其他工艺过程的影响，以求达到整个工艺过程的安全化。

1.2.2 防止运转中的事故

应尽力防止由运转中所发生的事故而引起的次生灾害。事故的对象有废物的处理、停止供给动力、混入杂质、误操作、发生异常状态、外因等。

1.2.3 防止扩大受灾范围

万一发生爆炸毒物泄漏灾害，应防止灾害扩大，把灾害局限在某一范围内。

考虑到工厂厂址、化工装置的特殊性、企业内组织的不同及其他情况，必须具体问题具体分析，补充必要的事项。表 1-1 所示为安全设计推荐的安全措施。

表 1-1 安全设计推荐的安全措施

项目	目的	安全措施内容	承担专业
工艺过程的安全	评价物料、反应、操作条件的危险性,研究安全措施	1)评价由物料特性引起的危险性:①燃烧危险;②有害危险 2)反应危险 3)抑制反应的失控 4)设定数据测定点 5)判断引起火灾、爆炸的条件 6)评价操作条件产生的危险性 7)材质:①耐应力性;②高低温耐应力性;③耐腐蚀性;④耐疲劳性;⑤耐电化学腐蚀性;⑥隔音;⑦耐火;⑧耐热性 8)填充材料	化工
	选择机器、设备的结构、研究承受负荷的措施	1)材质 2)结构 3)强度 4)标准等级	机械设备(包括配管、贮罐、加热炉、电器、仪表、土木、建筑)
	研究设备机器偏离正常的操作条件及泄漏时的安全措施	1)选择泄压装置的性能、结构、位置 ①安全阀;②防爆板;③密封垫;④过流量防止器;⑤阻火器 2)惰性气体注入设备 3)爆炸抑制装置 4)其他控制装置(包括程序控制等) 5)测量仪表 6)气体检测报警装置 7)通风装置(厂房) 8)确定危险区和决定电气设备的防爆结构 9)防静电措施(包括防杂散电流的措施) 10)避雷设备 11)装置内的动火管理	化工 化工 化工、仪表 仪表 仪表 建筑 化工、电器、仪表 电气、建筑、机械 建筑 工程项目
防止发生运转中的事故	研究防止由运转中所发生事故引起的灾害的措施	1)紧急输送设备 2)放空系统 3)排水、排油设备(包括室外装置的地面) 4)动力的紧急停供措施 ①保安用电力;②保安用蒸汽;③保安用冷却水 5)防止误操作措施 ①阀等的联锁;②其他 6)安全仪表 7)防止混入杂质等的措施 8)防止因外因产生断裂的措施	化工 化工 土木 电气、机械 机械、仪表 仪表 机械 机械

项目	目的	安全措施内容	承担专业
防止扩大受害范围的措施	防止发生灾害时扩大受害范围,研究将受害范围限制在最小限度内的措施	1) 布置 2) 耐火结构 3) 防油、防液堤 4) 紧急断流装置 5) 防火、防爆墙 6) 防火、灭火设备 7) 紧急通话设备 8) 安全避难设备 9) 防爆结构 10) 其他	工程项目 建筑、机械 土木 机械、仪表 土木、建筑 机械 工程项目、仪表 工程项目、建筑 建筑 工程项目

1.3 信息控制和安全控制

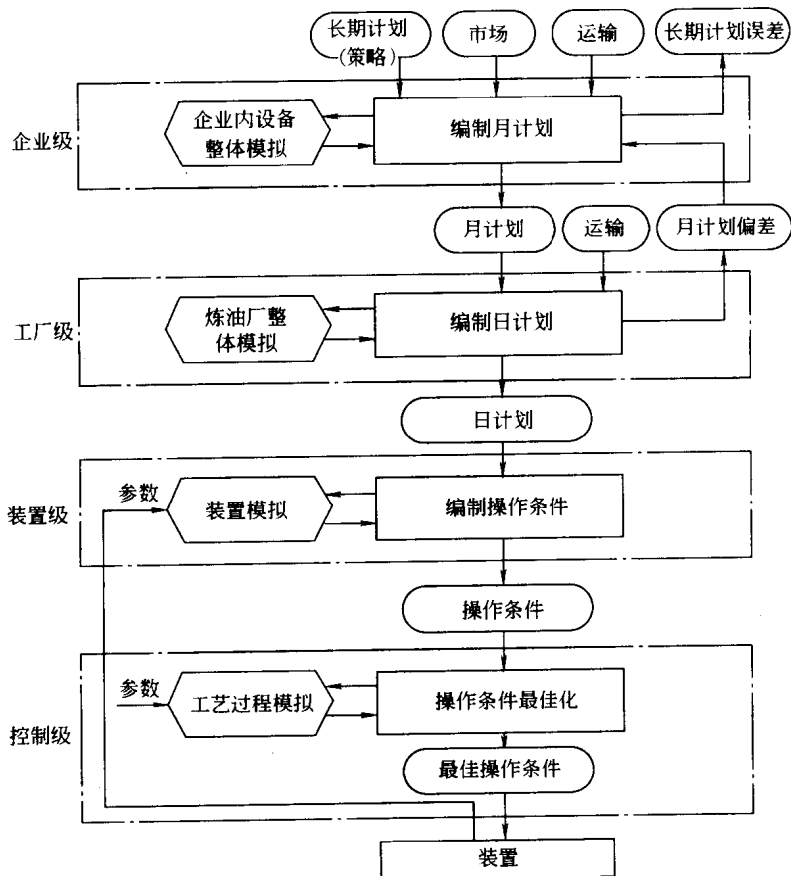


图 1-1 炼油厂的运用信息系统示例

运用信息系统，一般是以生产设备、公用工程设备、贮存设备、入出厂设备等工厂的整体为对象，收集生产信息、入出厂信息、库存信息等，并将这些信息反馈回去，从而使长、中短、短期的生产计划、运转达到最佳状态。可以考虑分为企业级、工厂级、装置级、控制和信息收集级等层次。

运用信息系统的目的在于精细地针对原料、产品的市场状况和运输状态，实行效率最佳的生产和操作。为了达到生产计划和操作的最佳化，需要具有与各层次对应的模拟模型，探索最佳点，并应注意模拟参数的更新，以使模型经常适应实际系统的变化。

炼油厂的运用信息系统示例如图 1-1 所示。

1.4 安全设计过程

关于安全设计，需在这些设计的各阶段，事前充分审查与各个设计有关的安全性制定必要的安全措施。另外，通常在设计阶段中，各技术专业也要同时进行研究，对安全设计一定要进行特别慎重的审查，完全消除考虑不到和缺陷之处。例如，对于设备，在进入制造阶段以后就难以发现问题，即使万一发现问题，也很难采取完备的改善措施。在安全设计方面一般要求附加下列内容。

① 各技术专业都要进行安全审查。制定检查表就是其方法之一。

② 审查部门或设计部门在设计结束阶段进行综合审查。在综合审查中要征求技术管理、安全、运转、设备、电控、保全等尽量多的有关专业的意见，提高安全性、可靠性的设计条件。

③ 将设计委托给外部的专业公司完成时，要确立对安全设计充分检验和管理体制。

1.4.1 装置结构与材料的安全设计

装置、设备的结构本身当然应具有能充分承受操作条件的材料、结构强度，其要点如下：使用的材料应考虑工艺流体、流速、温度、压力以及流体反应特性和腐蚀特性等各种因素，选择满足耐腐蚀性、满足强度要求以及可加工性（特别是可焊性、机械加工性）的材料。

1.4.2 过程安全装置设计

在化学装置中，经常处理不同的原料或尽管处理同种原料，其组分却不相同。由于催化剂的活性降低等原因，有时必须改变操作条件，操作条件未必固定不变。因此，从安全上考虑，装置、设备的结构需按苛刻的条件设计。同样，受气温影响的水冷器、空冷器的制冷设备也是如此。选择结构最重要的因素是设计

压力。

由于装置、设备的耐压试验规定的设计压力为基础，所以，设计压力因工艺的种类不同而有较大的差异。对于设计温度，只要没有法令规则上以及其他方面的问题，在石油炼制装置中一般按使用温度加上 10~20℃ 的温度。化工装置在进行蒸馏、抽提、反应等化学工程学上的处理操作时，有时会偏离正常的运转状态而超温、超压。

因此，在安全上需设置：①使异常状态恢复成正常状态而保持在最佳条件的压力控制装置；②其变化明显偏离正常状态有可能导致危险时为避免发生危险的稳定装置；③异常状态进一步发展时的紧急控制装置。

压力控制装置有以下两种：①迅速将过压排出系统外的泄压装置（见表 1-2）；②在超过一定压力时自动减少设备内的气体流入量的控制压力的装置。

表 1-2 泄压装置的种类及特性

种类	特性
安全阀	可以将过压排放于系统外部，恢复到正常压力继续运转的有以下几种： ① 安全阀，用于气体或蒸汽（包括空气、水蒸气）； ② 排泄阀，主要用于液体、气体及液体兼用； ③ 安全排泄阀，气体及液体兼用
放泄阀 排泄管	可以将液体排放到系统外部，恢复到正常液面而继续运转
防爆板	虽然只排出过压，但用于即使用安全阀也不会有良好效果，有可能引起压力上升现象的设备，放出内压而保护容器等与安全阀并用，可隔开腐蚀性物料，保护安全
通风管	排出内部液体的蒸汽或空气，对气温的变化有呼吸作用，防止内部过压或负压

稳定装置是指化学反应引起的升温、升压明显偏离正常状态而有可能导致危险时，只有采用下述的紧急控制装置才能使反应恢复正常状态的装置。这里把能将某种程度的变化恢复到正常状态，使工艺过程保持最佳条件的装置称为稳定装置。稳定装置有下列几种。

① 反应控制剂注入装置，应使用各个反应有抑制效果的反应控制剂。

② 冷却装置，选择不产生局部高温的冷却方式，在有搅拌机的反应器的冷却装置中是非常重要的。

紧急控制装置是指异常状态发展到用上述的压力控制装置和稳定装置等不能进行控制时作为紧急控制使用的，往往由显示异常的报警装置和与此连锁并用自动或手动进行动作的控制装置组成。

① 报警装置 报警装置是迅速显示发生异常现象及状态的装置，安装在需要对工艺参数的异常变化进行报警的装置上，特别是需要对安全有关的工艺参数

进行检测报警的装置上。例如，为了防止因工艺过程的异常而引起的危险，需要在减压装置上安装能够检测出在正常状态下原料中不应存在的氧气的浓度并能发出报警的装置等。报警装置一般设置在安全上产生故障的系统上，例如仪表风、冷却水、燃料气的压力下降；燃料气或压缩机入口的分离罐液位上升，加热炉进料管线的流量降低；其他危险等异常状态。

② 紧急控制装置 是在工厂设备发生危险异常情况下，与上述报警装置联锁进行紧急操作而防患于未然的装置，紧急控制装置有下列几种：紧急切断动力的装置；紧急停止流入流体的装置（紧急断流阀等）；使流体旁通的紧急处理装置（三通阀等）；将流体紧急排放到系统外的装置（放空管线、燃烧油或排泄池等）；紧急冷却装置；紧急送入惰性气体装置；紧急送入反应控制剂装置等。结合工艺过程的危险性组合这些装置，做成自动或手动式来使用。

1.4.3 引燃、引爆能量的安全设计

化工厂的装置区或罐区等处，有存留易燃性气体、蒸汽和发生泄漏的危险，附近如果有火源，存在能够引燃、引爆的能量，则很容易发生着火、爆炸的危险，所以特别需要安全设计化工装置运行中所有可能产生的引燃、引爆能量，以防发生灾害。

常见的引燃、引爆能量有下列几种：装置内的火源（加热炉、锅炉、烟囱、高温的裸露配管等高温物体、机械的撞击、摩擦、绝热压缩能等）；电气设备；操作中发生的静电；雷电；杂散电流；施工用火（焊接及切割、砂轮机的火花、内燃机、焊枪等）；吸烟等。

(1) 装置内的火源 最重要的是使其配置适当。应根据需要将设备本身制成易燃性气体和蒸汽难以进入设备内部的结构，而且，作为辅助手段应设置紧急送入惰性气体的装置。加热炉进气口设置灭火蒸汽装置（紧急时吹入灭火蒸汽，提高炉内压力，防止易燃性气体进入炉内）就是其中一例。

(2) 电气设备 电气设备一般按照技术标准，根据易燃性气体、蒸汽或粉尘存留的危险性将危险场所分类。根据危险场所的种类来选择适合气体、蒸汽或粉尘种类的防爆电气设备。

一般要根据装置的种类、环境等不同情况具体规定危险场所的种类，选择防爆结构（见图 1-2）。

① 耐压防爆结构 耐压防爆结构是全封闭结构，即使容器内部发生爆炸，也能承受爆炸压力，由于结构中隔爆间隙作用，不会将外部的爆炸性气体引爆。

② 油浸防爆结构 这是一种将有可能产生火花或电弧的部分浸在油中不会将油面上的爆炸性气体引爆的结构。

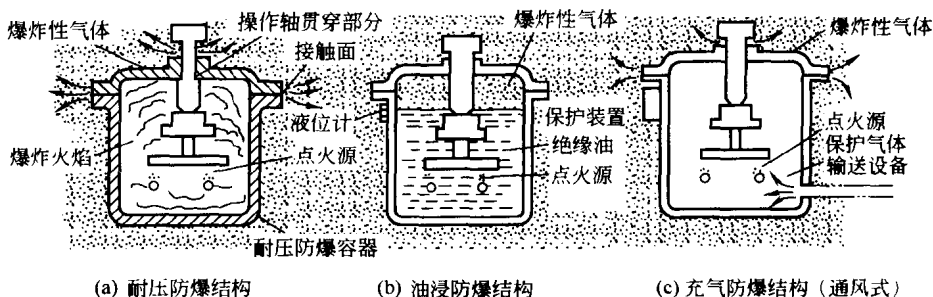


图 1-2 主要的防爆结构

③ 充气防爆结构 这是一种通过在容器内部充入保护气体（新鲜的空气或不燃性气体）而保持内压，以此防止爆炸性气体侵入的结构。根据内压的保持方式分为通风式、充压式、封闭式三种。

④ 增安防爆结构 这是一种对在运转中不得产生火花、电弧或过热的部分在温升或结构上特殊增加安全系数的结构。

⑤ 本安防爆结构 该结构经指定检测机构的点火试验及其检验确认运转中以及因短路、接地、断路等产生的火花、电弧或热量不会引燃爆炸性气体的结构。

表 1-3 所示为爆炸性危险场所气体、蒸气分类分析。

表 1-3 爆炸性危险场所气体、蒸气分类分析

1) 第一类场所

- ① 在通常的使用状态下,有可能存留易燃性气体而造成危险的场所;
- ② 因维修、保养或泄漏等原因,有可能经常存留易燃性气体而造成危险的场所

2) 第二类场所

- ① 封在密闭容器或者设备内的易燃性气体,只在容器或设备发生事故而破损以及误操作时才会产生泄漏造成危险的场所;
- ② 采用可靠的机械通风装置,不会存留易燃性气体,但在通风装置发生异常或事故时,有可能存留易燃性气体而造成危险的场所;
- ③ 在第一类场所的周围或相通的室内有可能经常侵入达到临界浓度的易燃性气体的场所

3) 0 类场所

在通常状态下,易燃性气体的浓度持续达到爆炸下限以外的场所(包括超过爆炸上限,但有可能达到爆炸界限以内的场所)

(3) 防静电措施 化工装置的静电是在进行下列运转、操作时产生的。液体在配管中流动时,由于摩擦而产生静电,由液体本身输送电荷而产生流动电流。液体的固有电阻越大产生的静电越多,各种化学物质的固有电阻如表 1-4 所示。一般认为在 $10^{10} \sim 10^{15} \Omega \cdot \text{cm}$ 的液体中会产生危险的静电,在 $10^{13} \Omega \cdot \text{cm}$ 时最危