

密封材料与 元件的检测与试验

顾伯勤 陈 晔 李新华 编著

MIFENG CAILIAO YU YUANJIAN
DE JIANCE YU SHIYAN



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



密封材料与元件的检测与试验

顾伯勤 陈 晔 李新华 编著



机械工业出版社

本书系统地介绍了密封材料与元件的检测与试验的基本理论和技术,包括泄漏的基本概念及泄漏率计算、泄漏的检测方法、垫片的检测与试验、机械密封的检测与试验、填料密封的检测与试验、橡胶密封元件的检测与试验、胶密封的检测与试验、密封材料与元件的加速寿命试验。

本书可供从事流体密封材料与元件研究、设计、制造及使用的科技工作者或工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

密封材料与元件的检测与试验/顾伯勤等编著. —北京:
机械工业出版社, 2008.5
ISBN 978-7-111-23978-9

I. 密 ... II. 顾 ... III. 密封材料-检测 IV. TB42

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 054938 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)
策划编辑: 曲彩云 责任编辑: 刘本明 版式设计: 霍永明
责任校对: 王 欣 封面设计: 王伟光 责任印制: 李 妍
北京富生印刷厂印刷
2008 年 7 月第 1 版第 1 次印刷
184mm × 260mm · 12.5 印张 · 303 千字
0001 - 4000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-23978-9
定价: 28.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换
销售服务热线电话: (010) 68326294
购书热线电话: (010) 88379639 88379641 88379643
编辑热线电话: (010) 88379771
封面无防伪标均为盗版

前 言

泄漏是自然界常见的现象。日常生活中如自来水、煤气的泄漏常常给人们带来不便甚至危害；工业中如压力容器、管道、反应器、阀门、液压设备、运输工具一旦发生泄漏，轻则造成能源和原材料的大量浪费、设备不能正常工作，重则导致设备报废、整个工厂或系统陷于瘫痪、人员伤亡和严重的环境污染。密封的目的就是防止和消除泄漏。

流体的密封是一个复杂而较难解决的问题。密封的可靠性除了与连接结构形式、介质特性、工况条件等有关外，主要取决于所采用的密封材料和密封元件的性能。泄漏的检测与诊断、密封材料和密封元件的性能评价与表征是流体密封技术的重要组成部分。正确评价密封材料和密封元件的性能，对于密封装置的正确设计、制造和使用，进而保证系统和设备的长周期安全可靠运行具有十分重要的意义。

本书系统地介绍了泄漏检测与诊断、密封材料与元件的检测与试验的基本理论和技术，以及近年来该领域的发展和最新研究成果，旨在为从事流体密封材料与元件研究、设计、制造和使用的科技工作者和工程技术人员提供一本既有密封检测基本理论和基本方法，又有具体检测实施技术的参考书。

本书共分8章，包括泄漏的基本概念及泄漏率计算、泄漏的检测方法、垫片的检测与试验、机械密封的检测与试验、填料密封的检测与试验、橡胶密封元件的检测与试验、胶密封的检测与试验、密封材料与元件的加速寿命试验。

全书由南京工业大学顾伯勤教授统稿，并编著第1章至第6章；第7章由机械科学研究院李新华教授级高级工程师编著；第8章由南京工业大学陈晔副教授编著。

限于作者水平，书中难免存在缺点和错误，恳请读者批评指正。

本书部分章节得到了江苏省“六大人才高峰”项目“新型密封材料和元件的开发”、江苏省自然科学基金项目“流体密封原理及其连接系统设计方法研究”，以及江苏省教育厅高校自然科学基金“金属垫片密封原理及连接系统设计方法研究”的资助，在此一并表示感谢。

南京工业大学机械与动力工程学院的邵春雷、周剑锋、朱柳娟、李玉艳、孙振国等在文字输入和插图绘制等方面付出了辛勤的劳动，在此表示衷心的感谢。

作 者

目 录

前言

第1章 泄漏的基本概念及泄漏率计算 ... 1

1.1 泄漏及其危害 1

1.1.1 泄漏与密封 1

1.1.2 泄漏的危害 1

1.2 泄漏的形式 2

1.2.1 按泄漏的机理分类 2

1.2.2 按泄漏率的大小分类 3

1.2.3 按泄漏的时间分类 3

1.2.4 按泄漏的部位分类 4

1.2.5 按泄漏的危害性分类 4

1.2.6 按泄漏介质的流向分类 4

1.3 紧密性的分级及泄漏率计算 4

1.3.1 紧密性的定义及分级 4

1.3.2 泄漏率计算 5

参考文献 9

第2章 泄漏的检测方法 10

2.1 检漏方法的特点和分类 10

2.1.1 检漏方法的特点 10

2.1.2 检漏方法的分类 11

2.2 压力检漏法 13

2.2.1 水压法 13

2.2.2 压降法 13

2.2.3 听音法 14

2.2.4 超声波法 15

2.2.5 打气检漏法 15

2.2.6 皂泡法 17

2.2.7 外真空法 17

2.2.8 热槽法 17

2.2.9 集漏空腔增压法 17

2.2.10 蒸汽冷凝称重法 19

2.2.11 氨气检漏法 19

2.2.12 卤素检漏法 21

2.2.13 放射性同位素法 22

2.2.14 氮质谱检漏仪吸嘴法 22

2.3 真空检漏法 24

2.3.1 静态升压法 24

2.3.2 液体涂敷法 25

2.3.3 喷气法 26

2.3.4 放电管法 27

2.3.5 高频火花检漏器法 27

2.3.6 真空计法 28

2.3.7 卤素检漏法 28

2.3.8 氮质谱检漏法 29

2.3.9 氢-钯法 29

2.4 其它检漏方法 29

2.4.1 荧光检漏法 29

2.4.2 半导体检漏法 29

2.4.3 示踪气体封入法 30

2.4.4 气瓶法 31

2.5 检漏实践 31

2.5.1 检漏人员 31

2.5.2 检漏实验室 31

2.5.3 检漏步骤 32

参考文献 32

第3章 垫片的检测与试验 34

3.1 柔性石墨板材的试验方法 34

3.1.1 柔性石墨板材密度测试方法 34

3.1.2 柔性石墨板材拉伸强度测试方法 35

3.1.3 柔性石墨板材压缩强度测试方法 36

3.1.4 柔性石墨板材压缩率、回弹率 测试方法 36

3.1.5 柔性石墨板材灰分测定方法 37

3.1.6 柔性石墨板材固定碳含量测定 方法 38

3.1.7 柔性石墨板材热失重测定方法 39

3.1.8 柔性石墨板材滑动摩擦系数测 试方法 40

3.1.9 柔性石墨板材取样方法 42

3.1.10 柔性石墨板线膨胀系数测定方法 43

3.1.11 柔性石墨板氯含量测定方法 44

3.1.12 柔性石墨板硫含量测定方法 46

3.1.13 柔性石墨板肖氏硬度测试方法 50

3.1.14 柔性石墨板应力松弛试验方法 50

3.2 石棉橡胶板试验方法	51	3.7.4 应力松弛试验方法 B 的试验装置 标定方法及计算示例	74
3.2.1 拉伸强度试验方法	51	3.8 垫片材料的蠕变松弛试验方法	76
3.2.2 老化系数试验方法	53	3.8.1 方法概述	76
3.2.3 压缩率、回弹率试验方法	53	3.8.2 试验设备	77
3.2.4 密度试验方法	54	3.8.3 试样	77
3.2.5 烧失量试验方法	55	3.8.4 试验程序	78
3.3 耐油石棉橡胶板试验方法	55	3.8.5 试验报告	79
3.3.1 浸油拉伸强度试验方法	55	3.8.6 试验方法 B 中应力松弛测定仪的 螺栓标定程序	79
3.3.2 吸油率试验方法	56	3.9 管法兰用垫片密封性能试验方法	80
3.3.3 浸油增厚率试验方法	57	3.9.1 试验方法 A	80
3.3.4 浸油外观变化试验方法	58	3.9.2 试验方法 B	82
3.3.5 浸油后柔软性试验方法	58	3.10 垫片材料密封性能试验方法	86
3.3.6 油密封性试验方法	59	3.10.1 方法概述	86
3.3.7 腐蚀性试验方法	60	3.10.2 试验设备	88
3.4 泄漏率与垫片系数 m 、垫片比压力 γ 关系试验方法	60	3.10.3 注意事项	88
3.4.1 名词术语	61	3.10.4 试样	89
3.4.2 试验设备	62	3.10.5 设备调试	89
3.4.3 试样	63	3.10.6 试验方法 B 设备的标定	90
3.4.4 试验前的准备	63	3.10.7 试样处理和试验条件	90
3.4.5 O 形圈的标定	63	3.10.8 试验程序	90
3.4.6 垫片比压力 γ 的测定程序	64	3.10.9 结果计算	91
3.4.7 垫片系数 m 的测定程序	64	3.10.10 试验报告	92
3.4.8 泄漏率计算公式推导	65	3.11 包覆垫片密封性能试验方法	92
3.5 垫片压缩率和回弹率试验方法	65	3.11.1 试验设备	92
3.5.1 试验方法 A	65	3.11.2 试样	92
3.5.2 试验方法 B	67	3.11.3 试验程序	93
3.6 垫片材料的压缩率和回弹率试验 方法	68	3.11.4 试验报告	93
3.6.1 试验设备	68	3.11.5 精度和误差	93
3.6.2 试样	69	3.12 内燃机气缸盖垫片性能试验方法	93
3.6.3 试样预处理	69	3.12.1 面压分布试验	93
3.6.4 试验温度	70	3.12.2 压紧厚度试验	94
3.6.5 试验程序	70	3.12.3 适应性试验	95
3.6.6 试验次数	70	3.12.4 可靠性试验	96
3.6.7 计算	70	3.12.5 水孔密封试验	96
3.6.8 试验报告	71	3.12.6 油孔密封试验	98
3.6.9 精度和偏差	71	第 4 章 机械密封的检测与试验	99
3.7 垫片应力松弛试验方法	71	4.1 机械密封试验方法	99
3.7.1 试验方法 A	71	4.1.1 试验内容	99
3.7.2 试验方法 B	72	4.1.2 试验条件	99
3.7.3 应力松弛试验方法 A 的应力 螺栓标定方法	73	4.1.3 试验装置	100
		4.1.4 机械密封的安装	100

4.1.5	试验用仪器仪表	100	4.9.2	检验方法	121
4.1.6	试验报告的内容及格式	100	4.9.3	检验规则	121
4.2	轻型机械密封试验方法	101	4.10	硬质合金密封环毛坯的性能与检测	121
4.2.1	试验种类	101	4.10.1	技术要求	122
4.2.2	试验内容和方法	101	4.10.2	试验方法	122
4.2.3	试验条件	102	4.10.3	检验规则	123
4.2.4	试验装置	102	4.11	反应烧结氮化硅密封环的性能与检测	123
4.2.5	安装	104	4.11.1	技术要求	123
4.2.6	试验用仪器仪表	104	4.11.2	试验方法	124
4.2.7	试验报告的内容及格式	104	4.11.3	检验规则	124
4.3	釜用机械密封试验方法	105	4.12	填充聚四氟乙烯和聚四氟乙烯毛坯的性能与检测	124
4.3.1	试验分类	105	4.12.1	技术要求	124
4.3.2	试验内容	106	4.12.2	试验方法	125
4.3.3	试验条件	106	4.12.3	检验规则	125
4.3.4	试验装置	106	4.13	机械密封用圆柱螺旋弹簧的性能与检测	125
4.3.5	试验用仪器仪表	107	4.13.1	端部结构形式	125
4.3.6	试验报告的内容及格式	108	4.13.2	技术要求	126
4.4	机械密封端面平面度检验方法	108	4.13.3	检查与试验方法	127
4.4.1	检验装置	108	第5章 填料密封的检测与试验	129	
4.4.2	检验程序	109	5.1	阀门填料密封试验方法	129
4.4.3	平面度测定值的判读	109	5.1.1	试验装置及要求	129
4.5	机械密封用O形橡胶圈的性能与检测	111	5.1.2	试验条件	129
4.5.1	材料、代号及特性	111	5.1.3	试验程序	130
4.5.2	胶料的物理性能	111	5.1.4	试验结果的计算	130
4.5.3	O形圈外观质量	112	5.1.5	试验报告的主要内容	130
4.6	机械密封用碳石墨密封环的性能与检测	112	5.2	柔性石墨填料环的检测与试验	130
4.6.1	产品分类及代号	112	5.2.1	柔性石墨填料环密度的测试	131
4.6.2	技术要求	113	5.2.2	柔性石墨填料环肖氏硬度的测试	131
4.6.3	试验方法	116	5.2.3	柔性石墨填料环压缩率、回弹率的测试	131
4.6.4	检验规则	117	5.2.4	柔性石墨填料环耐温失量的测定方法	132
4.7	碳化硅密封环的性能与检测	117	5.2.5	柔性石墨填料环摩擦系数的测定方法	133
4.7.1	产品分类及代号	117	5.3	柔性石墨编织填料的检测与试验	135
4.7.2	技术要求	117	5.3.1	仪器设备	135
4.7.3	试验方法	118	5.3.2	规格的测量	135
4.7.4	检验规则	119	5.3.3	密度的测定	135
4.8	碳化硼密封环的性能与检测	119	5.3.4	耐温失量的测定	136
4.8.1	技术要求	119			
4.8.2	试验方法	120			
4.8.3	检验规则	120			
4.9	堆焊密封环的性能与检测	120			
4.9.1	技术要求	121			

5.3.5 灰分的测定	136	7.1 液态密封胶的种类和理化性能	161
5.3.6 拉伸强度的测试	137	7.1.1 液态密封胶的种类	161
5.3.7 压缩率、回弹率的测定	137	7.1.2 液态密封胶的理化性能	161
5.4 碳纤维编织填料的检测与试验	138	7.2 液态密封胶试验方法	162
5.4.1 体积密度的测定	138	7.2.1 试样的选取	162
5.4.2 酸失量的测定	138	7.2.2 粘度的测定	162
5.4.3 碱失量的测定	139	7.2.3 相对密度的测定	163
5.4.4 浸渍润滑油含量的测定	139	7.2.4 不挥发物含量的测定	163
5.4.5 耐温失量的测定	140	7.2.5 耐压性试验	164
5.4.6 压缩率、回弹率的测定	141	7.2.6 冷热交换耐压性试验	165
5.4.7 摩擦系数、磨耗量的测定	141	7.2.7 耐介质性能试验	165
5.4.8 允许差	142	7.2.8 腐蚀性试验	166
5.4.9 试验报告	142	第 8 章 密封材料与元件的加速寿命	
5.5 缓蚀石棉填料腐蚀试验方法	142	试验	168
5.5.1 试验设备、试验装置	142	8.1 寿命试验与加速寿命试验	168
5.5.2 试样	143	8.1.1 寿命试验	168
5.5.3 试验步骤	143	8.1.2 加速寿命试验	169
5.5.4 试验结果分析	143	8.2 加速寿命试验的类型	169
第 6 章 橡胶密封元件的检测与试验 ..	144	8.2.1 恒定应力加速寿命试验	169
6.1 硫化橡胶物理试验方法的一般要求 ..	144	8.2.2 步进应力加速寿命试验	170
6.1.1 试样制备	144	8.2.3 序进应力加速寿命试验	170
6.1.2 试验条件	144	8.2.4 变应力加速寿命试验	170
6.1.3 试验数据的整理	145	8.3 寿命分布及其可靠性特征	171
6.2 O 形橡胶密封圈的检测与试验	147	8.3.1 相关符号及其含义	171
6.2.1 试样要求、试验条件及尺寸		8.3.2 指数分布	172
测量	147	8.3.3 威布尔分布	172
6.2.2 硬度的测定	147	8.3.4 极值分布	174
6.2.3 拉伸性能的测定	147	8.3.5 对数正态分布	174
6.2.4 热空气老化试验	149	8.4 加速模型与加速系数	175
6.2.5 恒定形变压缩永久变形的测定 ..	150	8.4.1 加速模型	175
6.2.6 拉伸永久变形的测定	151	8.4.2 加速系数	177
6.2.7 腐蚀试验	152	8.5 加速寿命试验的组织与实施	178
6.2.8 耐液体试验	152	8.5.1 恒加试验的组织与实施	178
6.2.9 密度的测定	158	8.5.2 步加试验的组织与实施	180
6.3 旋转轴唇形密封圈性能试验	158	8.6 加速寿命试验方法在非金属垫片寿命	
6.3.1 试验原理和试验装置	159	评价中的应用	180
6.3.2 试样和试验条件	159	8.6.1 非金属垫片密封的失效	181
6.3.3 试验程序和试验结果评定	159	8.6.2 非金属垫片的寿命评价	182
6.3.4 试验报告	160	参考文献	188
第 7 章 胶密封的检测与试验	161		

第 1 章 泄漏的基本概念及泄漏率计算

1.1 泄漏及其危害

1.1.1 泄漏与密封

泄漏是自然界常见的现象。日常生活中，自来水、煤气的泄漏常常给人们带来不便甚至危害；工业生产中，压力容器、管道、反应器、阀门、液压设备、运输工具一旦发生泄漏，轻则造成能源和原材料的大量浪费、设备不能正常工作，重则导致设备报废、整个工厂或系统陷于瘫痪、人员伤亡和严重的环境污染。因此，人们在生产实践中千方百计地防止和消除泄漏。

“泄漏”是指介质，如气体、液体、固体或它们的混合物从一个空间进入另一个空间的人们不希望发生的现象。单位时间内泄漏的介质质量称为“泄漏率”。

由于机械加工的原因，机械产品的表面必然存在各种缺陷以及形状和尺寸偏差。因此在机械零件的接触处，不可避免地会产生微小的间隙，当存在压力差或浓度差时，工作介质就会通过间隙而泄漏。

“密封”是指机器、设备没有泄漏的现象。能起密封作用的零部件称密封件。较复杂的密封装置（如带辅助系统）称为密封系统或密封装置。密封件或密封装置是工业设备中最广泛使用的零部件。

1.1.2 泄漏的危害

泄漏是密封装置的主要失效形式。机器设备若不能保证密封，会因工作介质的跑、冒、滴、漏引起物质流失和能量损失，造成环境污染，生产不能正常进行，增加非计划停产和维修，甚至危及人体健康和生命安全。因此密封装置的性能是评价机械产品品质的重要指标，也是决定工厂安全、经济生产的重要因素。

虽然任何工业部门都有密封问题，但化学、石油化学、核能等工业中的密封问题比其它工业更为突出。其主要表现有两大特征：

(1) 广泛性 化学、石油化学、核能等过程工业部门以设备、机器复杂和管道系统庞大而著称。据统计，一个年产 30 万吨乙烯的装置中，仅静密封点就多达 120 多万个。这些密封点构成了主要的泄漏源。化工、石油化工厂发生的各种事故中，泄漏是主要原因。图1-1为按事故发生的行业分类示意图，它是根



图 1-1 按事故发生的行业分类示意图

据日本对收集到的 1965 ~ 1975 年间发生的 624 例事故进行统计分析绘出的。624 例事故中, 化工装置为 210 件, 占 33.7%; 炼油装置为 79 件, 占 12.7%。在这 210 件化工装置事故中, 表现为泄漏形式的事故为 115 件, 占 54.8%; 炼油装置 79 件事故中, 泄漏事故为 54 件, 占 68.4%。

(2) 危害性 化学、石油化学、核能等工业企业处理的很多流体介质是易燃、易爆、有毒, 或具有腐蚀性、放射性的介质, 并且通常有较高的温度和压力, 一旦发生泄漏, 其后果比单纯经济损失严重得多。如上述化工装置的 210 件事故中, 发展为火灾、爆炸、中毒事故的有 48 件, 占 22.9%; 而造成大气、水质污染的有 31 起, 占 14.8%, 如图 1-2 所示。例如: 1984 年 12 月 3 日, 印

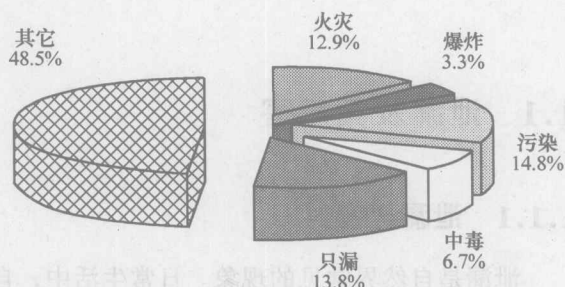


图 1-2 210 起化工装置泄漏引发事故分类

度博帕尔市农药厂异氰酸酯储罐发生泄漏, 造成 2500 人死亡, 12.5 万人中毒, 其中 5 万人失明; 1986 年 1 月 28 日, 美国航天飞机“挑战者”号升空一分钟后, 因左侧火箭助推器密封环失效引发航天飞机爆炸, 机上七名宇航员无一生还; 1986 年 4 月 26 日子夜, 前苏联切尔诺贝利核电站 4 号反应堆发生核泄漏, 死 31 人, 伤 300 人, 周边 20 多个国家, 4 亿多人遭核辐射污染, 污染后患迄今未绝。1986 年全世界炼油工业设备维修费用约为 60 亿美元, 用于更换和维修密封装置的费用约占总费用的 12%, 仅设备中的轴封一项就花去 5 亿美元。可见泄漏的预测与防止对国计民生的作用是无法估量的。

1.2 泄漏的形式

泄漏所发生的部位是相当广泛的, 如密封装置本身(垫片、填料、机械密封等)的泄漏, 设备本体(壳体、管壁、阀体等)的泄漏, 关闭件(阀瓣、闸板、旋塞等)的泄漏等。泄漏的形式也是多种多样的。这里简单介绍泄漏的分类方法。

1.2.1 按泄漏的机理分类

(1) 界面泄漏 垫片与法兰密封面之间、填料与轴或填料箱之间贴合不严会发生泄漏。这种发生在密封件与被密封件接触界面之间的泄漏称为“界面泄漏”, 如图 1-3 所示。

(2) 渗透泄漏 非金属垫片和填料通常由植物纤维、动物纤维、矿物纤维或化学纤维与橡胶粘结压制而成, 或由柔性石墨等多孔材料制作而成。由于其组织疏松, 致密性差, 纤维与纤维之间存在无数微小间隙, 很容易被介质浸透, 特别是在压力作用下, 介质会通过材料内部的孔隙渗透出来。这种发生在密封件材料内部的泄漏称为“渗透泄漏”, 如图 1-3 所示。

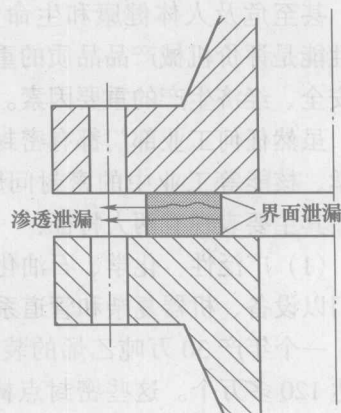


图 1-3 “界面泄漏”与“渗透泄漏”

(3) 破坏性泄漏 密封件由于急剧磨损、变形、材料劣化等因素,使泄漏间隙增大或密封件破坏造成的一种破坏性泄漏,如图1-4所示。

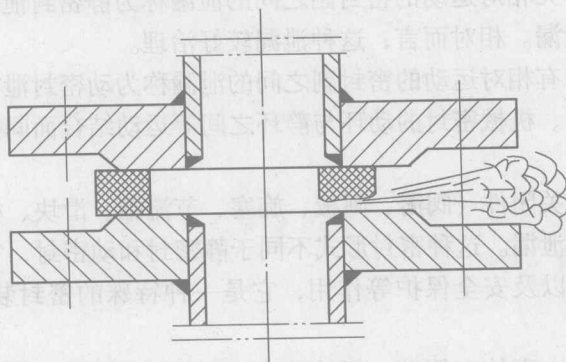


图 1-4 破坏性泄漏示意图

1.2.2 按泄漏率的大小分类

(1) 液体介质的泄漏 液体介质的泄漏可定性地为五级。

1) 无泄漏。目测未发现有明显的介质渗漏痕迹。

2) 渗漏。一种轻微的泄漏,表面有明显的介质渗漏痕迹,擦掉痕迹,几分钟后仍可见渗漏痕迹。

3) 轻微滴漏。泄漏的介质呈水珠状,5min 或更长时间滴漏 1 滴。

4) 滴漏。5min 或更短时间滴漏 1 滴。

5) 严重泄漏。介质喷涌不断,呈线状流淌。

(2) 气体介质的泄漏 此泄漏可定性地为四级。

1) 无泄漏。用小纸条或纤维放在泄漏处检查为静止状态;用肥皂水涂抹检查无气泡产生。

2) 渗漏。用小纸条或纤维检查微微飘动;用肥皂水涂抹检查有气泡产生;用石蕊试纸检验可见变色痕迹。若被密封的是有色气态介质,则可见淡淡烟雾。

3) 泄漏。用小纸条或纤维检查时飞舞;用肥皂水涂抹检查时气泡成串产生;用石蕊试纸检验时马上变色。若被密封的是有色气态介质,则烟雾明显可见。

4) 严重泄漏。可明显听见气体泄漏产生的噪声。

1.2.3 按泄漏的时间分类

(1) 经常性泄漏 从安装运行或使用开始就一直发生的一种泄漏。它主要是由密封装置的制造、安装或维护质量不佳等原因造成的。

(2) 间歇性泄漏 运转或使用一段时间后才发生的泄漏,时漏时停。这种泄漏是由于操作工况不稳定、介质本身的变化、环境条件的变化等因素引起的。

(3) 突发性泄漏 这是一种危害性很大的突然发生的泄漏。它是由于误操作,如超压、超温所致,也与零部件的疲劳破损、腐蚀和介质冲刷等因素有关。

1.2.4 按泄漏的部位分类

(1) 静密封泄漏 无相对运动的密封副之间的泄漏称为静密封泄漏,如法兰、螺纹、箱体等静止结合面间的泄漏。相对而言,这种泄漏较好治理。

(2) 动密封泄漏 有相对运动的密封副之间的泄漏称为动密封泄漏,如旋转轴与轴座之间、往复杆与填料之间、机械密封的动环与静环之间等运动结合面间的泄漏。这种泄漏较难治理。

(3) 关闭件泄漏 关闭件(阀瓣、闸板、旋塞、节流锥、滑块、柱塞等)与关闭座(阀座、旋塞体等)之间的泄漏。这种密封形式不同于静密封和动密封,它具有截止、换向、节流、减压、止回、分离以及安全保护等作用,它是一种特殊的密封装置。这种泄漏很难治理。

(4) 设备本体泄漏 壳体、管壁、阀体等由于材料或制造缺陷所造成的自身的一种泄漏,如砂眼、裂缝、焊接缺陷等造成的泄漏。

1.2.5 按泄漏的危害性分类

(1) 不允许泄漏 装置的泄漏率低于人为规定的指标泄漏率,此时采用具有相应分辨率的检漏方法无法检测出泄漏率。处理易燃、易爆、剧毒、放射性介质的装置,以及一些非常重要的部位是不允许泄漏的。

(2) 允许微漏 允许介质有少量的泄漏,但不产生危害。

(3) 允许泄漏 一定场合下的水和空气等介质的泄漏。

1.2.6 按泄漏介质的流向分类

(1) 向外泄漏 介质从设备内部向外部空间流动的传质现象。工业设备和管道的泄漏大多属于这一泄漏类型。

(2) 向内泄漏 介质从外部空间向设备内部流动的传质现象,如空气和水渗入真空设备和管道中。

(3) 内部泄漏 内部泄漏简称内漏,它是指设备内部发生的泄漏,如阀门的泄漏、换热器管程和壳程之间流体的泄漏。内部泄漏很难治理。

1.3 紧密性的分级及泄漏率计算

1.3.1 紧密性的定义及分级

当出现流体泄漏时,常用“密封性”或“紧密性”这个概念来评价密封连接的有效性。系统和设备的紧密性可以通过泄漏率的大小来评定。从物理意义上讲,并不存在绝对的紧密性。所谓紧密性应该像其它物理量一样,可以定量地加以衡量。文献[1]将连接的紧密性定义为:“在一定的操作条件下,连接的泄漏率低于某一规定的指标泄漏率;或在规定的泄漏率指标下,连接能够承受特定的操作条件。满足上述条件的连接是紧密的,反之则认为是“不紧密的”。实际上连接的泄漏率大小是与检漏条件、检漏方法、检漏人员等密切相关的。

不同的测试人员或采用不同的检漏方法、不同的检漏设备，所得到的测试结果往往不一致。因而，文献 [2] 对系统和设备的紧密性作了较为严格的定义：“在某一特定的操作条件下，采用指定的、具有相应测试分辨率的检漏方法，测得的泄漏率低于某一规定的指标泄漏率。满足上述条件的系统和设备是紧密的，反之是不紧密的”。

不同的工业部门对系统和设备的紧密性有不同的要求。例如，我国国家标准 GB/T 4622.3—1993《缠绕式垫片 技术条件》^[3]中，规定的四级泄漏率指标 ($1.2 \times 10^{-5} \text{cm}^3/\text{s}$, $1.0 \times 10^{-4} \text{cm}^3/\text{s}$, $1.0 \times 10^{-3} \text{cm}^3/\text{s}$, $1.0 \times 10^{-2} \text{cm}^3/\text{s}$) 可基本满足一般工业和某些石油化工企业装置的紧密性要求。对核能和某些重要的化工设备，其泄漏率则应控制在 $1.0 \times 10^{-7} \text{cm}^3/\text{s}$ 以下^[4]。而心脏起搏器所用同位素电池的泄漏率约为 $10^{-12} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ ^[5]。美国压力容器研究委员会 (PVRC) 按质量泄漏率分为五个紧密性等级^[6,7]，每一等级相差两个数量级，如表1-1所示。

表 1-1 紧密性等级划分

紧密性等级	质量泄漏率 $L_{RM}/ [\text{mg}/ (\text{s} \cdot \text{mm})]$
T ₁ (经济级)	2×10^{-1}
T ₂ (标准级)	2×10^{-3}
T ₃ (紧密级)	2×10^{-5}
T ₄ (严密级)	2×10^{-7}
T ₅ (极密级)	2×10^{-9}

在化工和石油化工企业中，还存在大量凭听、看等直觉无法发现的易挥发有机化合物从泄漏点处逸出。因其泄漏率非常小，通常要用高灵敏度的气体检漏仪方能检测出逸出气体的浓度，单位以 cm^3/m^3 或 $\mu\text{g}/\text{g}$ 表示。大量易挥发有机化合物有毒性或易爆炸，有些与空气中的氧化氮发生反应生成臭氧，污染环境，危害公众健康。

随着现代工业装置的大型化以及国家和地区对环境保护的日益重视，一些工业发达国家已把控制易挥发有机化合物的逸出问题提到议事日程上。如美国在 1965 年为了保护公众健康，通过了“净化空气法”的修正法案，制定了大气质量国家标准，对臭氧、一氧化氮、二氧化氮、二氧化硫、烃、铅、汞、铍、氯乙烯、石棉等作出了限制。1977 年“净化空气法”又进行了修改，以保证空气的高质量。1990 年 11 月 15 日“净化空气法”再度修订，提出了四个主要目标：①2000 年前 189 种化学品减少 90% 的逸出；②消除市区烟雾；③减少酸雨；④保护同温层的臭氧。1991 年 3 月 6 日，美国环境保护署 (EPA) 颁布了“净化空气法”新的修正条款通告，要求对工业装置的逸出进行控制。用于气体、蒸气和轻液体的密封连接的逸出量必须小于 $500 \text{cm}^3/\text{m}^3$ ；即使对重液体，其逸出量亦应控制在 $500 \text{cm}^3/\text{m}^3$ 以内。如超过这些限制，则必须在五天内改正。德国也制定了净化空气法规 (TA—Luft)，对挥发物的允许逸出量作出了规定。将最小允许泄漏率控制在 $1 \text{cm}^3/\text{m}^3$ 数量级，作为零逸出的标准。如美国炼油行业将 $10^4 \text{cm}^3/\text{m}^3$ 作为零逸出水平，而化工厂则对法兰和阀门规定为 $500 \text{cm}^3/\text{m}^3$ ，回转设备 (如泵、压缩机) 为 $10^3 \text{cm}^3/\text{m}^3$ 。

1.3.2 泄漏率计算

(1) 泄漏率的单位及其换算 泄漏率通常用体积流率、质量流率以及 pV 流率来表示，

其常用的单位分别为 cm^3/s 、 g/s 和 $\text{Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$ 。表1-2给出了常用泄漏率单位之间的换算关系。

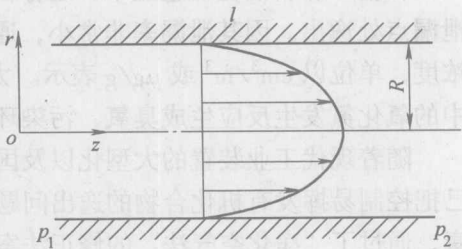
表 1-2 常用泄漏率单位的换算关系

单 位	$1\text{mbar}\cdot\text{L}/\text{s}$ (T_n)	$1\text{Torr}\cdot\text{L}/\text{s}$ (T_n)	$1\text{Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$ (T_n)	$1\text{cm}^3/\text{s}$ (T_n, P_n)	$1\text{kg}/\text{h}$ (20°C 空气)	$1\text{g}/\text{s}$ (20°C 空气)	$1\text{g}/\text{y}$ (氟里昂-12)
$1\text{mbar}\cdot\text{L}/\text{s}$ (T_n)	1	0.75	0.1	0.99	4.3×10^{-3}	1.2×10^{-3}	1.55×10^5
$1\text{Torr}\cdot\text{L}/\text{s}$ (T_n)	1.33	1	0.13	1.32	5.7×10^{-3}	1.6×10^{-3}	2.1×10^5
$1\text{Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$ (T_n)	10	7.5	1	9.9	4.3×10^{-2}	1.2×10^{-2}	1.55×10^6
$1\text{cm}^3/\text{s}$ (T_n, P_n)	1.01	0.76	0.101	1	4.3×10^{-3}	1.2×10^{-3}	1.55×10^5
$1\text{kg}/\text{h}$ (20°C 空气)	230	175	23	230	1	0.28	—
$1\text{g}/\text{s}$ (20°C 空气)	828	630	82.8	828	3.6	1	—
$1\text{g}/\text{y}$ (氟里昂-12)	6.4×10^{-6}	4.9×10^{-6}	6.4×10^{-7}	6.4×10^{-6}	—	—	1

注： P_n 为标准大气压力 ($1.01325\times 10^5\text{Pa}$)； T_n 为标准状态下大气的热力学温度 (273.16K)。

(2) 典型的泄漏模型 泄漏是发生在隔离物体上的传质现象，只要存在泄漏，则必然在隔离物体上存在着泄漏通道。泄漏通道是千差万别的，有孔洞、裂纹、短通道、长通道等，其截面形状大多是不规则的。泄漏率的大小不仅与泄漏通道的长短、截面形状和大小有关，还与工况条件以及被密封介质的物理化学性质有关。因而，要对每一处泄漏点的泄漏率作出精确的定量分析往往是十分困难的。这里仅就一些典型的泄漏模型作一简单介绍，可作为工程上泄漏率预测的依据。

1) 圆管模型。圆管模型认为泄漏可看成粘度为 η 的介质在一直径不变的水平圆管内由一端向另一端的稳定的层流流动。 z 轴为圆管中心线，管道入口处的压力为 p_1 、管道出口处的压力为 p_2 ，管道长度为 l 、半径为 R ，如图1-5所示。



圆管内不可压缩流体稳定层流的速度分布为^[8]

$$w = \frac{1}{4\eta} \frac{p_1 - p_2}{l} (R^2 - r^2) \tag{1-1}$$

图 1-5 圆管中的层流流动

- 式中 w ——流速，单位为 m/s ；
 l ——圆管长度，单位为 m ；
 R ——圆管半径，单位为 m ；
 r ——任意一点至圆管轴线的距离，单位为 m ；
 p_1, p_2 ——分别为管道入口处和出口处的压力，单位为 Pa ；
 η ——流体动力粘度，单位为 $\text{Pa}\cdot\text{s}$ 。

流体通过圆管的体积泄漏率为

$$L_V = \frac{\pi R^4 (p_1 - p_2)}{8l\eta} \tag{1-2}$$

式中 L_V ——体积泄漏率，单位为 m^3/s 。

2) 平行平板模型。流体通过狭长缝隙的泄漏，可以看成介质在两块固定无限长二维平行平板间不可压缩流体的稳定层流流动，如图 1-6 所示。其流速分布为^[8]

$$w = \frac{1}{2\eta} \frac{p_1 - p_2}{l} \left(\frac{h^2}{4} - y^2 \right) \quad (1-3)$$

式中 l ——平行平板长度, 单位为 m;

h ——间隙高度, 单位为 m;

y ——任意一点至间隙对称面的距离, 单位为 m;

p_1, p_2 ——分别为平行平板入口处和出口处的压力, 单位为 Pa。

通过板宽 b 的体积泄漏率为

$$L_V = \frac{b l^3 (p_1 - p_2)}{12 l \eta} \quad (1-4)$$

式中 b ——平行平板宽度, 单位为 m。

3) 平行圆板模型。平行圆板模型将流体介质通过密封点的泄漏简化为介质通过间隙高度 h , 压力差 $(p_1 - p_2)$, 由圆板内径 r_1 处流至外径 r_2 处的定常层流流动, 如图1-7所示。其流速分布为^[8]

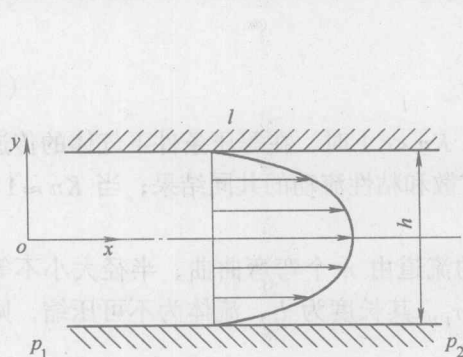


图 1-6 两平行平板内的流动

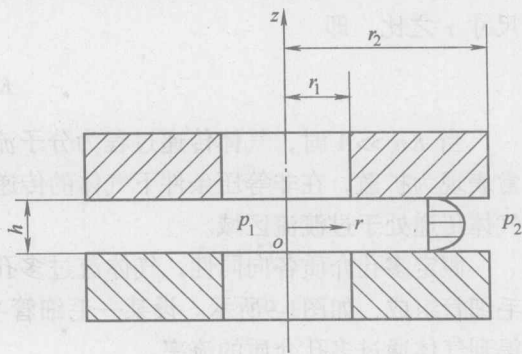


图 1-7 平行圆板泄漏模型

$$w = -\frac{1}{2\eta} \frac{dp}{dr} \left(z^2 - \frac{h^2}{4} \right) \quad (1-5)$$

流体流过环状间隙的泄漏率为

$$L_V = \frac{\pi}{6} \frac{h^3}{\eta \ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right)} (p_1 - p_2) \quad (1-6)$$

式中 r_1 ——圆板内径, 单位为 m;

r_2 ——圆板外径, 单位为 m;

h ——间隙高度, 单位为 m;

p_1, p_2 ——分别为平行圆板入口处和出口处的压力, 单位为 Pa。

4) 同轴圆形环隙模型。图 1-8 所示为同轴圆筒之间的环形间隙, 间隙 h 在轴向和周向均保持不变。圆筒直径 D 和间隙 h 相比很大, 所以圆筒内外径之间的差异可以忽略不计, 间隙在流动方向上的长度为 l 。间隙出口处压力为 p_2 , 进口

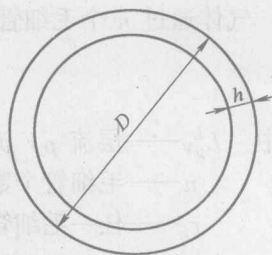


图 1-8 同轴圆筒之间的环形间隙

处压力为 p_1 ，则同轴圆筒环形间隙的体积泄漏率为^[9]

$$L_V = \frac{\pi D \Delta p h^3}{12 \eta l} \quad (1-7)$$

式中 h ——间隙，单位为 m；

D ——圆筒直径，单位为 m；

l ——间隙在流动方向上的长度，单位为 m；

Δp ——压力差，单位为 Pa， $\Delta p = p_1 - p_2$ 。

5) 多孔介质中气体流动的毛细管模型^[8,10]。含有若干以规则的或任意形态分散在其内部的连通或不连通的孔洞或洞穴的固体，称为多孔介质。多孔介质的固体部分称为固体骨架，孔洞或洞穴部分称为孔隙。

多孔介质中的孔隙空间是狭小的。流体流过微小间隙的流动，主要表现为分子流和粘性流；气体通过多孔介质中流道的流动包含分子传递和对流传递过程。对气体介质来说，其流动特征可以用克努森数 Kn 来描述。克努森数为气体分子的平均自由程 λ 与泄漏通道的特征尺寸 r 之比，即

$$Kn = \frac{\lambda}{r} \quad (1-8)$$

当 $Kn \gg 1$ 时，气体传递过程为分子流过程； $Kn \ll 1$ 时，在等压条件下气体的传递通常表现为扩散，在非等压条件下气体的传递则是扩散和粘性流动的共同结果；当 $Kn \approx 1$ 时，气体传递处于过渡流区域。

假定多孔介质各向同性，气体流过多孔介质的流道由 n 个弯弯曲曲、半径大小不等的毛细管组成，如图1-9所示。设某一毛细管半径为 r_i ，其长度为 l_i ，流体为不可压缩，则可以得到气体通过多孔介质的流率。

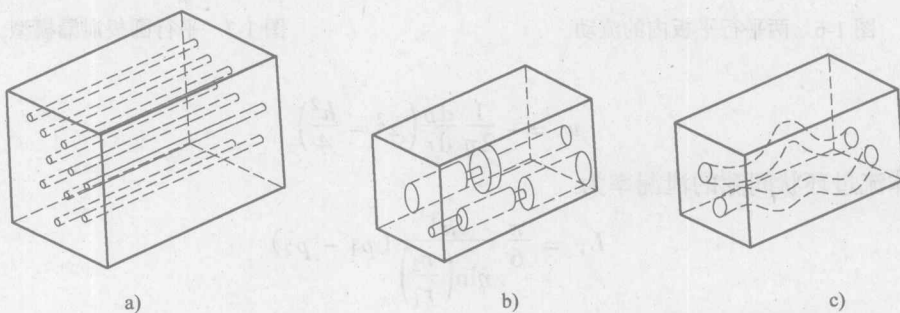


图 1-9 多孔介质中气体流动的毛细管模型

气体通过 n 个毛细管的多孔介质的层流 pV 流率为

$$L_{pV}^L = \sum_{i=1}^n \frac{\pi r_i^4}{16 \eta l_i} (p_1^2 - p_2^2) \quad (1-9)$$

式中 L_{pV}^L ——层流 pV 流率，单位为 $\text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ ；

n ——毛细管个数；

r_i ——任一毛细管半径，单位为 m；

l_i ——任一毛细管长度，单位为 m；

p_1, p_2 ——分别为毛细管两端的压力，单位为 Pa。

因为毛细管并非都是直管,它们可能是弯弯曲曲、半径大小不等的,如图1-9b、c所示。故引入弯曲度系数 c ,则式(1-9)可写成

$$L_{pV}^L = \sum_{i=1}^n \frac{\pi r_i^4}{16 \eta c l} (p_1^2 - p_2^2) \quad (1-10)$$

式中 l ——毛细管平均长度,单位为 m ;

c ——毛细管弯曲度系数。

气体通过多孔介质的分子流流率 (pV 流率) 为

$$L_{pV}^M = \sum_{i=1}^n \frac{4}{3} \frac{r_i^3}{c l} \sqrt{\frac{2 \pi R T}{M}} (p_1 - p_2) \quad (1-11)$$

式中 L_{pV}^M ——分子流 pV 流率,单位为 $Pa \cdot m^3/s$;

R ——通用气体常数,单位为 $J/(kmol \cdot K)$;

T ——气体温度,单位为 K ;

M ——气体摩尔质量,单位为 $kg/kmol$ 。

气体通过多孔介质的总流率 (pV 流率) 为层流流率和分子流流率之和,即

$$L_{pV} = L_{pV}^L + L_{pV}^M = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\pi r_i^4}{8 \eta c l} p_m + \frac{4}{3} \frac{r_i^3}{c l} \sqrt{\frac{2 \pi R T}{M}} \right) (p_1 - p_2) \quad (1-12)$$

式中 p_m ——毛细管两端压力的平均值,单位为 Pa , $p_m = (p_1 + p_2)/2$ 。

参 考 文 献

- [1] 顾伯勤,朱洪生. 螺栓法兰连接的紧密性分析 [J]. 石油化工设备, 1988, 17 (1): 16-20.
- [2] Gu Boqin. Reproduzierbarkeit und Vergleichbarkeit von Lässigkeitsmeßverfahren [D]. Leoben: Montanuniversität Leoben, 1996.
- [3] 国家技术监督局. GB 4622.3—1993 缠绕式垫片 技术条件 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1993.
- [4] Raut H D, Leon G F. Report of Gasket Factor Tests [J]. WRC Bulletin 233, 1977 (12): 1-35.
- [5] Burger H-D. Lecksuche an Chemieanlagen mit Helium-Massenspektrometer-Lecksuchern [M]. DECHEMA: Lecksuche an Chemieanlagen, 1980, 73-93.
- [6] Pavne J R, Schneider R W. Comparison of Proposed ASME Rules for Bolted Flanged Joints [J]. Proc. 8th ICPVT, 1996, 147-167.
- [7] 蔡仁良. 压力容器螺栓法兰连接规范设计新方法 [J]. 压力容器, 1997 (5): 41-48, 62.
- [8] 顾伯勤,李新华,田争. 密封设计技术 [M]. 北京: 中国标准出版社, 2004.
- [9] Müller H K, Nau B S. Fluid Sealing Technology [M]. New York: Marcel Dekker Inc., 1998.
- [10] 顾伯勤. 多孔介质气体流动模型在垫片密封中的应用 [J]. 南京化工大学学报, 1999, 21 (1): 19-22.