

• 真空工程技术丛书 •

真空系统设计

ZHENKONG XITONG SHEJI

张以忱 等著



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

真空工程技术丛书

真空系统设计

张以忱 等著

北 京
冶金工业出版社
2013

内 容 提 要

本书从真空系统所用材料、系统组成、系统设计计算、真空系统的安装调试和操作维护等方面较详细地介绍了真空系统设计的全部内容,论述了真空系统设计与计算所用的相关基础理论,并根据国际最新设计理论和作者多年的真空系统设计实践经验提出了一些较新的设计理念和设计方法。书中既有基础理论知识,又有实际应用介绍,提供了大量相关的图表数据及设计计算例题,具有很强的实用性。

本书适合于真空技术及工程、真空应用设备的设计制造以及与真空技术有关的行业从事真空系统设计、系统操作与维护的技术人员阅读,也可作为大专院校相关专业师生的教材及参考书。

图书在版编目(CIP)数据

真空系统设计/张以忱等著. —北京:冶金工业出版社, 2013. 1

(真空工程技术丛书)

ISBN 978-7-5024-6145-4

I. ①真… II. ①张… III. ①真空系统—系统设计
IV. ①TB753

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 302603 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 yjcb@cnmip.com.cn

责任编辑 宋 良 王雪涛 美术编辑 彭子赫 版式设计 孙跃红

责任校对 石 静 责任印制 张祺鑫

ISBN 978-7-5024-6145-4

冶金工业出版社出版发行; 各地新华书店经销; 北京百善印刷厂印刷

2013 年 1 月第 1 版, 2013 年 1 月第 1 次印刷

148mm×210mm; 16 印张; 472 千字; 495 页

48.00 元

冶金工业出版社投稿电话: (010)64027932 投稿信箱: 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)

前 言

本书是作者在多年教学与科研实践的基础上编写的，从真空系统所用材料、系统设计计算、真空系统的安装调试和操作维护等方面，较详细地介绍了真空系统设计的全部内容，论述了真空系统设计与计算所采用的相关基础理论，并根据国际最新设计理论和作者多年的真空系统设计实践经验提出了一些较新的设计理念和设计方法。书中提供了大量相关的图表数据及设计计算例题。

本书具有很强的实用性，适合于真空技术以及与真空技术应用有关的行业从事设计、设备操作与维护的技术人员参考，还可作为大专院校相关专业师生的教材及参考书。

参加本书编写工作的有张以忱（第1、3~7、9~11章）、陈荣发（第2章）、李灿论（第8章）。全书由张以忱任主编，陈荣发任副主编并协助统稿。

本书的编写工作，得到东北大学真空与流体工程研究所各位老师及其他有关单位和专家的大力帮助和支持，在此深表谢意。

由于理论水平和实践经验有限，书中如有不妥之处，恳请读者指正。

作 者
2012年10月

目 录

1 真空系统的组成与设计概述	1
1.1 真空系统的形式与组成	1
1.1.1 真空系统的形式	1
1.1.2 真空系统的组成	1
1.2 真空机组	5
1.2.1 低真空抽气机组	5
1.2.2 中真空抽气机组	7
1.2.3 高真空抽气机组	9
1.2.4 超高真空抽气机组	9
1.3 典型真空系统	10
1.3.1 粗真空系统	10
1.3.2 低真空系统	11
1.3.3 中真空系统	11
1.3.4 高真空系统	12
1.3.5 超高真空系统	13
1.4 真空系统设计概述	21
1.4.1 真空系统设计的已知条件	21
1.4.2 真空系统设计计算的一般程序	22
1.4.3 真空系统设计的基本原则及注意事项	22
2 真空系统组成元件	25
2.1 真空阀门	25

2.1.1	真空阀门的分类与型号	25
2.1.2	真空阀门的作用	26
2.1.3	真空阀门的工作形式	27
2.1.4	真空阀门密封结构与密封力计算	46
2.2	气体流量(质量流量)控制元件	56
2.2.1	D07-7 型质量流量控制器	56
2.2.2	数字式热质量流量控制计	58
2.3	捕集器(阱)	59
2.3.1	机械捕集器	59
2.3.2	冷凝捕集器	72
2.3.3	吸附捕集器	82
2.3.4	其他捕集器	85
2.4	除尘器	87
2.4.1	旋风除尘器	87
2.4.2	湿式除尘器	93
2.4.3	电除尘器	94
2.4.4	粗除尘器	97
2.5	真空继电器	98
2.5.1	无触点真空继电器	98
2.5.2	触点式真空继电器	100
2.6	真空规	108
2.6.1	液压式真空规	108
2.6.2	弹性变形真空规	112
2.6.3	辐射计型真空规	115
2.6.4	电离真空规	117
2.6.5	真空测量技术	119

3 真空密封连接 125

3.1	概述	125
3.2	不可拆密封连接	126

3.2.1	真空焊接	127
3.2.2	真空封接	142
3.2.3	真空粘接	157
3.2.4	真空系统密封构件的焊接与组装	157
3.3	可拆静密封连接	167
3.3.1	密封材料与密封结构形式	168
3.3.2	真空橡胶密封结构设计	177
3.3.3	真空法兰连接	190
3.3.4	真空螺纹密封连接	216
3.4	电输入密封连接	219
3.4.1	概述	219
3.4.2	电极引入密封结构	220
3.5	真空动密封连接	233
3.5.1	概述	233
3.5.2	接触式动密封连接	234
3.5.3	非接触式动密封连接	251
3.5.4	柔性连接密封	259
3.6	观察窗密封结构	263
4	真空中气体的流动状态及判别	266
4.1	气体流动的基本状态	266
4.1.1	湍流	266
4.1.2	黏滞流	266
4.1.3	分子流	267
4.1.4	黏滞-分子流(过渡流)	268
4.2	流动状态的判别	270
4.2.1	湍流与黏滞流的判别	270
4.2.2	黏滞流与分子流的判别	271
4.3	气体流态判别例题	272

5 真空管路的流导计算	273
5.1 概述	273
5.1.1 气体的流量	273
5.1.2 管路的流导	273
5.2 管路元件串联、并联时管路的流导计算	273
5.2.1 串联管路的流导计算	273
5.2.2 并联管路的流导计算	274
5.3 简单管道的流导计算	275
5.3.1 黏滞流态简单管道的流导计算	275
5.3.2 分子流态管道的流导计算	288
5.3.3 黏滞-分子流态管道的流导计算	310
5.4 管道流导计算中的平均压力取值的误差分析 与计算方法	311
5.5 真空管道流导计算例题	316
6 真空系统抽气时间与压力计算	318
6.1 气体负荷的计算	318
6.1.1 真空系统内的总气体负荷	318
6.1.2 漏气流量 Q_l 的计算	318
6.1.3 放气流量 Q_f 的计算	319
6.1.4 渗透气体流量 Q_s 的计算	321
6.1.5 工艺过程中真空室内产生的气体流量 Q_g 的计算	322
6.1.6 大气压下的气体量 Q_a	323
6.2 真空系统抽气方程与有效抽速	324
6.2.1 真空系统的抽气方程	324
6.2.2 真空室出口的有效抽速	324
6.3 抽气时间的计算	326

6.3.1	低真空抽气时间的计算	326
6.3.2	高真空抽气时间的计算	331
6.4	真空室压力计算	333
6.4.1	真空室的极限压力	333
6.4.2	真空室的工作压力	334
6.4.3	抽气过程中真空室内压力的计算	334
6.5	设计计算例题	338
7	真空泵的选择与匹配计算	346
7.1	主泵的选择与计算	346
7.1.1	主泵类型的确定	346
7.1.2	主泵抽速的计算	347
7.2	前级真空泵(或预抽泵)的选择与计算	349
7.2.1	前级泵的选配原则	349
7.2.2	前级泵抽速粗算	349
7.2.3	前级泵抽速验算	351
7.2.4	选取前级泵的经验公式	351
7.3	粗抽泵的选配	352
7.4	维持泵和储气罐的设计计算	352
7.4.1	维持泵和储气罐的作用	352
7.4.2	维持泵的设计计算	353
7.4.3	储气罐的设计计算	354
7.4.4	带有储气罐的真空机组配前级泵计算	356
8	真空系统的计算机辅助设计	358
8.1	概述	358
8.2	计算机在真空系统设计中的应用	358
8.3	蒙特卡洛模拟方法在真空系统设计中的应用	361
8.3.1	蒙特卡洛模拟方法的特点及应用	361

8.3.2	传输几率模拟计算	362
8.3.3	蒙特卡洛模拟计算方法的基本步骤	375

9 真空系统常用材料 382

9.1	真空系统常用材料的分类	382
9.2	材料的真空性能	383
9.2.1	真空系统的动态平衡方程	383
9.2.2	材料的渗透率	384
9.2.3	材料的放气性能	385
9.2.4	真空材料的其他性能	388
9.3	真空材料的选材原则	388
9.3.1	真空容器壳体及内部零件材料的选材要求	388
9.3.2	密封材料的选材要求	389
9.4	金属材料	389
9.4.1	铸件	390
9.4.2	纯铁	390
9.4.3	碳素钢	391
9.4.4	不锈钢	391
9.4.5	不锈钢复合钢板	393
9.4.6	有色金属材料	393
9.4.7	贵金属材料	398
9.4.8	难熔金属材料	399
9.4.9	铁镍合金与可伐合金	401
9.4.10	钨铁硼永磁材料	404
9.5	玻璃与金属封接	406
9.5.1	玻璃	406
9.5.2	金属封接	410
9.6	塑料	414
9.6.1	聚四氟乙烯	414
9.6.2	聚乙烯和聚丙烯	415

9.6.3 有机玻璃	416
9.7 石墨及石墨(碳)纤维	416
9.7.1 石墨	416
9.7.2 碳纤维与石墨纤维	420
9.7.3 石墨纤维-树脂复合材料(碳纤维 增强塑料)	421
9.7.4 石墨纤维增强金属基复合材料	422
9.8 橡胶材料	422
9.8.1 真空合成橡胶	423
9.8.2 真空密封橡胶的选择	424
9.9 环氧树脂	425
9.10 辅助密封材料	426
9.10.1 真空封蜡	426
9.10.2 真空封脂	426
9.10.3 真空封泥	426
9.10.4 真空漆	427
9.10.5 真空黏结剂	427
9.11 吸气剂与吸附剂	428
9.11.1 吸气剂	428
9.11.2 吸附剂	431
9.12 真空泵油	433
9.12.1 机械真空泵油	433
9.12.2 扩散泵油	436
9.13 真空润滑油与真空润滑脂	438
9.13.1 真空润滑的特点	438
9.13.2 真空润滑油	439
9.13.3 真空润滑脂	440
9.13.4 真空轴承的润滑技术	440
9.14 真空工程中的常用气体	441
9.14.1 惰性气体	441
9.14.2 活性气体	442

10 真空系统结构与清洁卫生	444
10.1 真空系统的结构设计	444
10.2 真空规管的安装连接	448
10.2.1 真空规管安装位置的设计	448
10.2.2 规管与被测系统的连接形式	450
10.3 真空系统的清洁与卫生	452
10.3.1 真空系统材料表面常见的污染形式	452
10.3.2 材料表面净化概述	453
10.3.3 金属材料表面净化处理的基本方法	453
10.3.4 非金属材料的清洗	464
10.3.5 清洗的基本程序	465
10.3.6 清洁零件的存放	466
11 真空系统的安装调试与操作维修	469
11.1 真空系统的安装调试	469
11.1.1 常用真空系统的安装	469
11.1.2 真空系统的调试	469
11.2 真空系统操作及注意事项	470
11.2.1 常用真空系统的基本操作规则	470
11.2.2 机械泵抽气系统的操作	472
11.2.3 扩散泵抽气系统的操作	472
11.2.4 涡轮分子泵抽气系统	474
11.2.5 溅射离子泵-钛升华泵无油抽气系统	476
11.2.6 低温泵抽气系统	478
11.3 系统常见故障及其排除	481
11.3.1 油封机械真空泵机组常见故障及其排除	481
11.3.2 扩散泵系统常见故障及其排除	483
11.3.3 真空系统油蒸气返流的排除方法	486

11.3.4 其他抽气系统常见故障及其排除	486
11.4 真空系统的维修方法	488
11.4.1 真空系统的故障诊断	488
11.4.2 真空系统故障的平分检测法	491
11.4.3 真空系统故障的替换检测法	492
参考文献	494

1 真空系统的组成与设计概述

1.1 真空系统的形式与组成

1.1.1 真空系统的形式

用于满足某种真空工艺要求，具有获得并测量、控制有特定要求真空度的系统称为真空系统。

真空系统是由真空容器和获得真空、测量真空、控制真空等元件组成。一个比较完善的真空系统由真空室、能满足系统真空度要求所需的真空泵或真空机组、真空测量装置、连接导管、真空阀门、捕集器及其他真空元件、电气控制系统构成。

典型的真空系统如图 1-1 ~ 图 1-4 所示。图 1-1 所示为大型扩散泵抽气系统，其被抽容器的容积较大，为了提高中真空压力区域内的抽气效率和提高系统的极限真空度，在前级机械泵与主泵之间增加了一台机械增压泵（罗茨泵）。如果被抽容器的体积很大，工艺又要求在尽量短的时间内达到工作真空度（或本底真空度），则可以采取加大系统的粗（预）抽能力的方法，如图 1-2 所示，增加一台粗抽泵（机械泵），与原有机机械泵并联，这样可以大大缩短系统的粗抽时间，使系统尽快达到主抽真空泵的启动压力。当系统内主泵开始正常工作后，则可以关闭其中一台粗抽机械泵，以节省能源。为了减少系统内的油蒸气返流污染，一般中小型容器及真空镀膜设备等多采用以分子泵为主泵的抽气系统。小型分子泵高真空抽气系统如图 1-4 所示。

1.1.2 真空系统的组成

1.1.2.1 粗（预）抽泵

预抽泵（粗抽泵）主要用来抽除真空室中的大量气体，使真空

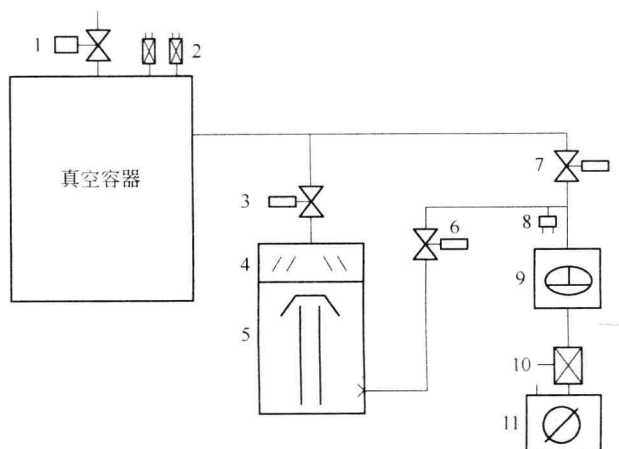


图 1-1 大型扩散泵真空系统原理图

1—真空室放气阀；2—真空测量规；3—高真空阀；4—冷阱；5—油扩散泵；6—前级阀；
7—预抽阀；8—真空膜盒继电器；9—罗茨泵；10—电磁压差阀；11—机械泵

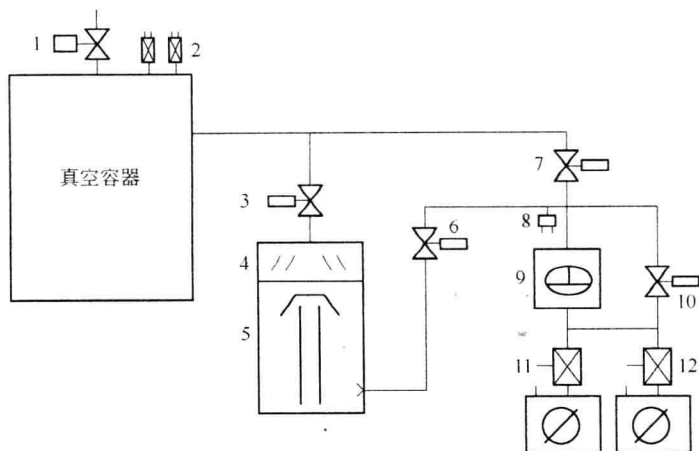


图 1-2 加大粗抽能力的大型扩散泵真空系统原理图

1—真空室放气阀；2—真空测量规；3—高真空阀；4—冷阱；5—油扩散泵；
6—前级阀；7—粗（预）抽阀；8—真空膜盒继电器；9—罗茨泵；10—旁通阀；
11、12—机械泵（入口带有电磁压差阀）

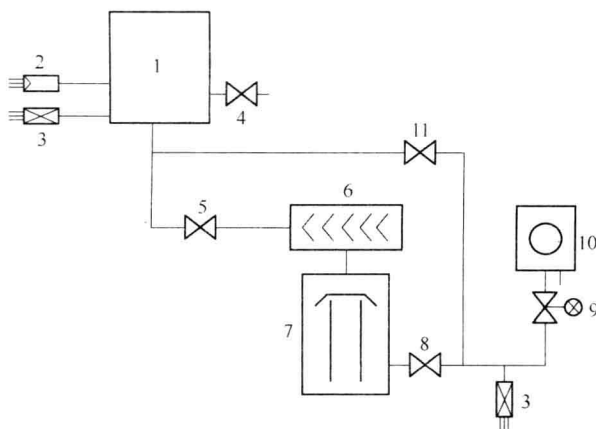


图 1-3 扩散泵高真空系统原理图

1—真空室；2—电离真空规；3—热偶真空规；4—放气阀；5—高真空阀；6—冷阱；
7—扩散泵；8—前级真空阀；9—电磁压差阀；10—机械泵；11—预（粗）抽阀

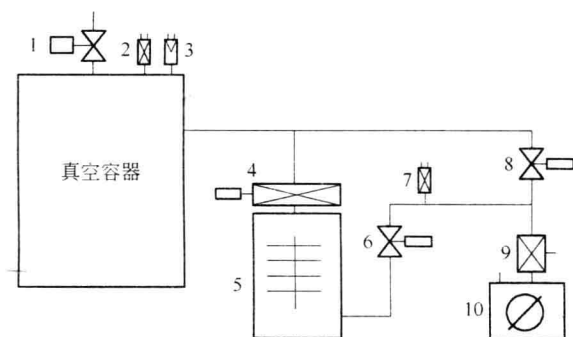


图 1-4 分子泵高真空系统原理图

1—放气阀；2—热偶真空规；3—电离真空规；4—高真空阀；5—分子泵；6—前级真空阀；
7—热偶真空规（测分子泵前级压力）；8—预抽阀；9—电磁真空压差阀；10—机械真空泵

室内的气体压力由大气压力降到主泵能够启动工作时的真空度，因此，要求预抽泵所达到的压力应小于主泵的启动工作压力。机组所选用的预抽泵的抽速大小由粗抽时间决定。为了提高真空机组的利用率，预抽泵一般兼作前级泵用。用真空阀门分隔和切换两种不同的抽气功能。

1.1.2.2 维持系

由于扩散泵和油增压泵启动时间长，在周期性操作的真空设备中，真空室装料和卸料时，往往为了缩短工作周期而不停止主泵，将高真空阀门和前级管道阀门关闭，使主泵仍处于工作状态。由于阀门等总是有极少量的漏气和表面放气，经过一定时间主泵泵腔内的压力增加，超过泵工作液的最大允许压力而使泵油蒸气氧化。为了解决这个问题，一个办法是用前级泵继续抽出主泵中的气体，但此时主泵内排出的气体量很小，出现前级泵“大马拉小车”的现象，浪费能源。为此可采用另一个办法，停止前级泵工作，关闭前级管道阀门，如图1-5所示，在主泵出口处设置维持泵或储气罐（注：两者不同时设置），这样就可以保证既能排出主泵内的气体，又可以节省能源消耗。储气罐不能做得很大，它只能用在以扩散泵为主泵的小型真空机组上，而维持泵可用在配置大型主泵的真空机组中。

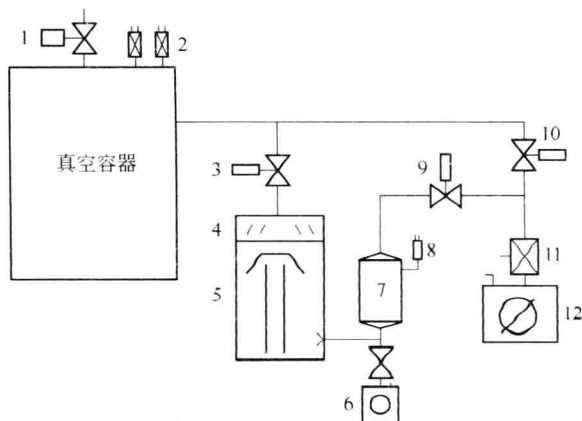


图 1-5 带有维持泵（或储气罐）的真空系统

- 1—真空室充气阀；2—真空测量规；3—高真空阀；4—冷阱；5—油扩散泵；
6—维持泵；7—储气罐；8—真空规（测扩散泵前级压力）；9—前级阀；
10—预抽阀；11—电磁压差阀；12—机械泵

1.1.2.3 储气罐

小型扩散泵高真空抽气机组通常配置有储气罐，设置在扩散泵和前级泵之间，贮存扩散泵排出的气体。设置储气罐的原因有：