



# 建筑玻璃

JIANZHU BOLI  
JIAGONG JISHU

# 加工技术

## 玻璃镀膜真空技术

Boli Dumo Zhenkong Jishu

■ 中国南玻集团工程玻璃事业部 编著

华南理工大学出版社

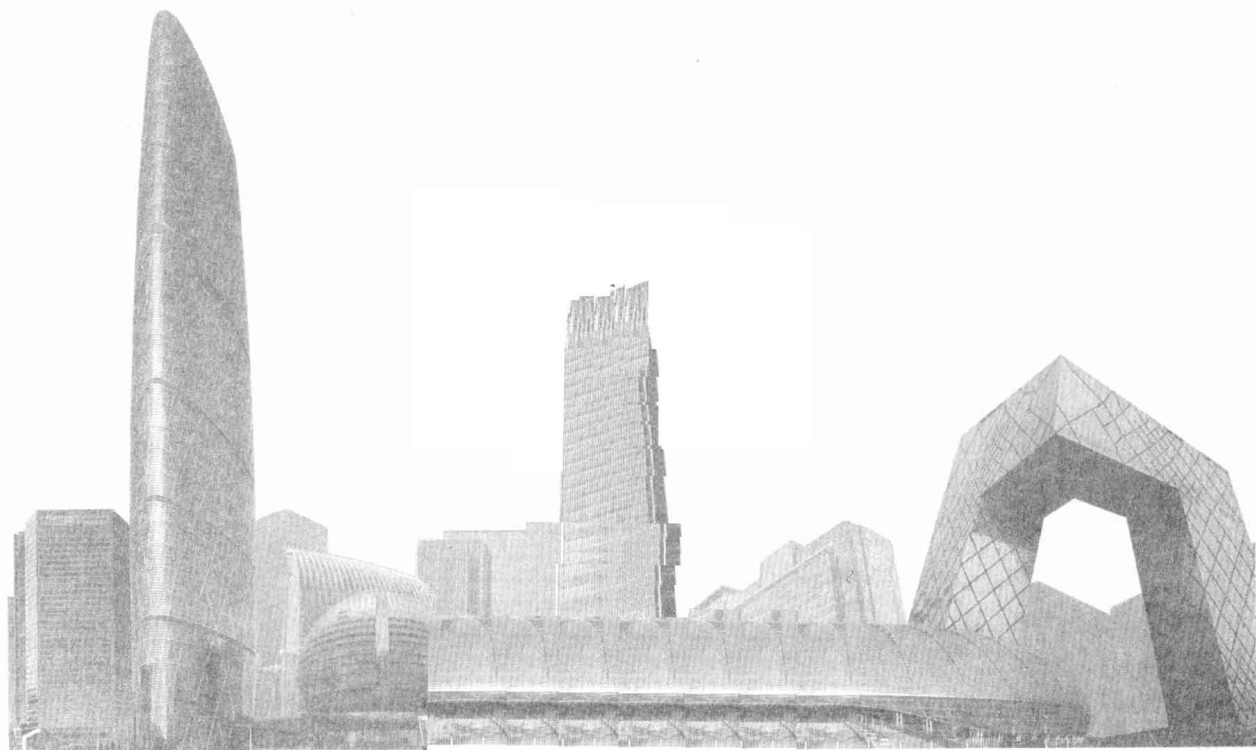
# 建筑玻璃 加工技术

JIANZHU BOLI  
JIAGONG JISHU

## 玻璃镀膜真空技术

Boli Dumo Zhenkong Jishu

■ 中国南玻集团工程玻璃事业部 编著



华南理工大学出版社

· 广州 ·

## 图书在版编目(CIP)数据

玻璃镀膜真空技术/中国南玻集团工程玻璃事业部编著. —广州: 华南理工大学出版社, 2010. 3

(建筑玻璃加工技术)

ISBN 978 - 7 - 5623 - 2966 - 4

I. 玻… II. 中… III. 建筑玻璃-镀膜-真空技术 IV. TQ 171.72

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 232466 号

总发行: 华南理工大学出版社 (广州五山华南理工大学 17 号楼 邮编 510640)

营销部电话: 020-87113487 87110964 87111048 (传真)

E-mail: scutc13@scut.edu.cn http: //www. scutpress. com. cn

策划编辑: 乔丽 吴翠微

责任编辑: 王建洲

印刷者: 惠州市海天印刷有限公司

开本: 787 mm × 1092 mm 1/16 印张: 67 字数: 1673 千

版次: 2010 年 3 月第 1 版 2010 年 3 月第 1 次印刷

定价: 128.00 元 (全 4 册)

版权所有 盗版必究

# 序

中国南玻集团股份有限公司经过 25 年的不懈努力，从 50 万美元创业开始，发展成长为迄今资产过百亿、产品涵盖绿色可再生能源和节能环保产品的大型企业集团。其核心产业——玻璃深加工产业由一条钢化炉和一条镀膜线，发展到今天拥有 10 多条大型磁控溅射连续镀膜生产线及与之相配套的钢化、中空等深加工生产线。产品方面，由刚起步时提供简单钢化片和热反射镀膜单片，到现在提供单银、双银和三银低辐射中空系列产品。产品不断升级，产能不断扩大，广泛应用到国内外大型建设项目和民用建筑。

这些都是与南玻集团广大工程技术人员的艰苦努力和技术创新分不开的，为此，我们组织南玻集团工程玻璃事业部的专业技术人员编写了“建筑玻璃加工技术系列书”。本系列书总结了南玻集团工程玻璃事业部 20 多年来积累的玻璃深加工技术和经验，按照玻璃深加工工艺及专业分为《玻璃镀膜工艺技术》、《玻璃镀膜真空技术》、《安全玻璃加工技术》、《中空玻璃加工设备与技术》、《玻璃设备电气控制》等。内容涵盖有关建筑玻璃深加工方面的生产设备原理和生产工序工艺技术知识，其宗旨是希望能对建筑玻璃深加工从业人员专业技术水平的提高有所帮助，为国家的建筑节能事业作出更大的贡献。

本系列书的出版，也将给南玻集团的玻璃深加工从业人员提供很好的学习培训教材。借此系列书出版之际，谨向南玻集团参加编写此系列书的同事们表示深切的谢意。

吴国斌

2009 年 7 月

# 前 言

近年来，随着全球能源的日益紧缺，各国都在开辟新的能源和大力推广节能技术，Low-E 节能玻璃在建筑业得到了广泛的应用，作为新能源的光伏产业也取得了飞速的发展。Low-E 玻璃和光伏产业的许多工艺都要运用到真空技术，本书主要就是为了满足工作在玻璃镀膜和光伏产业第一线的工作人员的需要而编写的。

在本书编写过程中，立足“实用”和“可操作性”，着重介绍真空镀膜方面有关的真空知识，以“必需、够用”为度，尽量避免理论上的长篇大论和复杂的公式推导，力争使读者一看就懂，懂了就能用，用了就能出效果。

本书介绍了真空的基本知识、真空测量、镀膜设备中常用的各类真空泵、各种真空系统的组成，以及如何对真空设备进行检漏等。最后一章介绍了 Low-E 玻璃生产线，并简略介绍了该类生产线的设计计算过程。本书配有大量的图片，许多图片都来源于近一两年的工作现场，这有助于读者理解和快速入门。

本书由中国南玻集团股份公司工程玻璃事业部组织编写，第一至第四章和第六章由中国南玻集团股份公司工程玻璃事业部研发中心机械设计室主任、副总设计师陈海峰先生编写，第五章由中国南玻集团股份公司下属全资子公司——东莞南玻工程玻璃有限公司工程师余洪书先生编写。

由于编者水平所限，难免挂一漏万，敬请广大读者批评指正。

编 者  
2009 年 8 月

# 《建筑玻璃加工技术》

## 编 委 会

顾 问 吴国斌

主 任 江少华

编 委 陈可明 白振中 陈海峰 左养利 梁 忠

执行编委 李文胜 叶光岱

## 《玻璃镀膜工艺技术》

主 编 陈可明

参 编 (按姓氏笔画排序)

许武毅 黄达权 黄成德 崔平生 曾小绵

## 《玻璃镀膜真空技术》

主 编 陈海峰

参 编 余洪书

## 《安全玻璃加工技术》

主 编 白振中

参 编 (按姓氏笔画排序)

李文胜 张会文

## 《中空玻璃加工设备与技术》

主 编 左养利

参 编 (按姓氏笔画排序)

王 健 莫际朗 魏华金

## 《玻璃设备电气控制》

主 编 梁 忠

参 编 (按姓氏笔画排序)

李元生 张学强 张文东 韩全寿

## 集团简介

中国南玻集团股份有限公司成立于1984年，为中外合资企业。1992年2月，公司A、B股同时在深交所上市，成为中国最早的上市公司之一。经过25年的发展，集团目前拥有下属企业33家，总资产100余亿元，员工近万人，是中国玻璃行业最具竞争力和影响力的大型企业。

南玻集团主营业务为：玻璃原材料（石英砂）开采、高档浮法玻璃原片、工程及建筑玻璃、精细玻璃、光伏科技绿色能源产品（高纯硅材料、太阳能超白玻璃、晶体硅太阳能电池、薄膜太阳能电池及其组件）等产品的研制、开发、生产经营及设备技术的咨询和服务，以及投资控股、兴办实业等。

从优质砂矿基地和现代化的浮法玻璃生产基地，到先进的工程玻璃制造基地，南玻集团拥有从硅砂—玻璃原片—玻璃深加工完整的传统玻璃产业链；集团同时在东莞麻涌建立了以太阳能超白玻璃、太阳能电池为主要产品的绿色能源产业园；在湖北宜昌建立了高纯多晶硅生产基地，形成了从多晶硅—硅片—电池片—太阳能电池的太阳能产业链。

南玻集团在国内建有完整的产销网络体系，并在中国香港、澳大利亚、中东等地设有子公司，产品远销美国、日本等多个国家，是国内玻璃行业中产品门类最全、技术含量最高、品牌最响并完成了全国性产业布局的龙头企业，也是中国最大的工程及建筑玻璃供应商。

### 工程玻璃事业部

工程玻璃是南玻集团最重要的品牌支柱产业之一。工程玻璃事业部总部位于深圳蛇口，在深圳、东莞、天津、成都、吴江等地设有大型生产基地，在国内近50个大中型城市布有销售网点，在中国香港、澳大利亚、中东等地设有子公司，在日本、美国、俄罗斯设有销售办事机构，产品远销世界各地。

南玻集团工程玻璃产品涵盖全部种类的建筑玻璃，产品包括：低辐射镀膜玻璃（Low-E玻璃）、热反射镀膜玻璃、中空玻璃、夹层玻璃、图案夹层玻璃、彩釉玻璃、热弯玻璃、钢化玻璃、弯钢化玻璃、防火玻璃及由上述玻璃构成的各种复合玻璃产品。



# 目 录

<b>第一章 真空技术的基本知识</b> .....	1
第一节 真空的基本概念和发展历史.....	1
第二节 气体分子运动论.....	5
第三节 平均自由程.....	6
第四节 流态.....	6
第五节 气体的热导率.....	7
第六节 真空测量单位.....	8
第七节 气体的宏观性质 .....	9
第八节 气体定律.....	9
第九节 抽气 .....	11
<b>第二章 真空测量</b> .....	15
第一节 概述 .....	15
第二节 真空计 .....	18
<b>第三章 真空泵</b> .....	29
第一节 概述 .....	29
第二节 常用真空泵 .....	34
第三节 真空泵的抽气参数 .....	61
<b>第四章 真空系统</b> .....	64
第一节 真空系统的组成 .....	64
第二节 真空机组 .....	65
第三节 真空阀门 .....	70
第四节 捕集器 .....	82
第五节 真空密封 .....	88
第六节 真空系统设计的注意点.....	103
第七节 真空系统的安全防护.....	105
<b>第五章 真空检漏</b> .....	109
第一节 检漏的基本概念.....	109
第二节 漏气的形式及漏孔和漏率.....	110
第三节 检漏仪器.....	113
第四节 示踪气体.....	118

---

第五节	检漏方法	120
第六节	检漏方法的选择及对检漏人员的要求	125
<b>第六章</b>	<b>建筑玻璃镀膜生产线</b>	<b>127</b>
第一节	概述	127
第二节	玻璃镀膜生产线的结构类型	128
第三节	磁控溅射镀膜的原理	129
第四节	玻璃镀膜生产线	130
第五节	玻璃镀膜生产线 C1 室的设计及参数计算方法	140
<b>参考文献</b>		<b>147</b>

# 第一章 真空技术的基本知识

## 第一节 真空的基本概念和发展历史

真空通常是指在给定空间内气体分子所产生的压力低于一个标准大气压\*的气体状态，也就是该空间内气体分子密度低于标准大气压的气体分子密度。气体标准大气压是指在海平面上，标准状态（273.2 K，760 mmHg\*\*）下大气的压力。

真空的发现始于1643年意大利物理学家托里拆利（E. Torricelli，1608—1647）进行的“托里拆利实验”：将一端密封的长玻璃管注满汞并倒置于盛有汞的槽里，这时汞柱顶端的空间即是真空。这也同时首次使人们知道我们人类竟居住在一个充满大气压力的环境空间之中！而大气的压力等于高度为760 mm汞柱的重量（图1-1）。因此，人们最初就选用mmHg（毫米汞柱）这一奇特的“长度”单位来表示真空的程度，并一直沿袭使用下来，至今我们仍可在许多老式的真空仪表上看到它的存在。为了纪念托里拆利在科学上的重大发现和贡献，真空压力单位Torr（托）\*\*就是用他的名字来命名的。



图1-1 托里拆利实验图

\* atm（标准大气压）、Torr（托）、mmHg（毫米汞柱）为非法定单位。

\*\* 1 atm = 760 mmHg =  $1.01325 \times 10^5$  Pa, 1 mmHg = 1 Torr =  $1.3332 \times 10^2$  Pa。

1647年，笛卡儿（Descartes）证明了托里拆利的水银柱可以用作气压计，皮埃尔（Perier）使用水银气压计测量了不同海拔高度的大气压力。

1654年，德国科学家、马德堡市市长葛利克（Ven Guericke）利用自己发明的真空活塞泵做了一个非常引人注目且有趣的实验。他把用金属制成的直径为40 cm的金属半球对合在一起，然后用真空活塞泵将球内空气抽出，使之成为真空。然后，两边各用8匹马拼命地拉拽，才将两个半球分开，两个半球在一起的力量之大，使当时在场观看的人都惊呆了。该实验在葛利克所在的城市马德堡公开进行，故称为“马德堡半球实验”。1657年，葛利克出版了世界上第一本用拉丁文写成的有关真空方面的书，书名为《EXPERIMENTA NOVA (UTVACANTUR) MAGDERURGICA DEVACUO SPAETIO》（关于空虚空间新的马德堡试验）。自那以后，人们开始了对真空的正式研究。图1-2所示为马德堡半球实验图。



图1-2 马德堡半球实验图

1660年，罗伯特·波义耳（Robert Boyle）发现水银气压计可以用作真空计。在此之后，在真空技术领域中没有取得太大的进步，直到1847年麦可洛德（McLeod）设计了一种改良的真空计，该种真空计作为实验室标准一直沿用至今。1896—1916年，真空技术领域又提出并设计了几种其他类型的真空计：黏度计、热传导真空计（由皮拉尼（Pirani）设计）、辐射式真空计、三极管电离真空计以及热阴极电离真空计。在同一时期，也设计并开发出各种改良的真空泵。从16世纪就已经开始使用的回旋叶片式泵得到改良。

1865年，真空技术领域开发了一种使用水银作为泵的抽气剂的真空泵。

1905年，革得（Gaede）发明了一种旋转水银泵（他也发明了世界上第一台扩散泵）。这种扩散泵在1916年被物理学家朗格缪尔（Langmuir）进行改良。最初使用的泵液是水银，后来改用油来代替水银。

1912年，革得（Gaede）发明了世界上第一台涡轮分子泵。由于那个时代的技术限制，该种分子泵并没有获得成功。后来在20世纪60年代，涡轮分子泵在结构上有了重大突破，获得了较大的成功。

在真空计领域方面，科学家们继续对各种真空计进行改良。1937年，潘宁（Penning）发明了冷阴极电离真空计；1950年，贝阿德（Bayard）和阿尔伯特（Alpert）对热阴极电离真空计进行改良，使其灵敏度更高。

20世纪30年代，各种金属的真空精炼、粒子物理学和原子能的研究促进了高真空技术的发展。质谱检漏仪就是高真空技术发展成果之一。基于旧有的真空技术理念开发的低温泵和吸气离子泵在真空系统中使用至今，真空计和控制器相关的各种技术仍然在不断

发展。

真空技术对基础研究来说,提供了最清洁和最少受外界干扰的实验环境;对工业生产来说,则可以制造出性能优越,甚至自然界前所未有的材料。因此,真空技术是现代科学技术的重要组成部分,它广泛应用于国民经济的各个领域,推动并促进了科学研究和生产技术的发展。超高真空技术、极高真空技术和超清洁表面技术更是真空技术的尖端技术。现代尖端科学,如表面物理及表面化学、粒子加速器和储存环、等离子体物理和热核聚变、半导体集成电路、纳米材料、超纯度材料冶炼、宇宙空间模拟研究等,都需要超高真空技术和极高真空技术的支持。目前,“真空科学与技术”包括诸多的学科分支,如:

- ①真空在镀膜工业中的应用;
- ②真空在电真空器件中的应用;
- ③真空在冶金工业中的应用;
- ④真空在运输、吸引、起吊及真空成形设备中的应用;
- ⑤真空在食品包装及冷冻干燥工业中的应用;
- ⑥真空在航天工业中的应用;
- ⑦真空在加速器及受控核聚变中的应用;
- ⑧真空在表面物理及表面化学研究中的应用。

图1-3~图1-9所示的图片是真空技术在一些领域的应用实例。

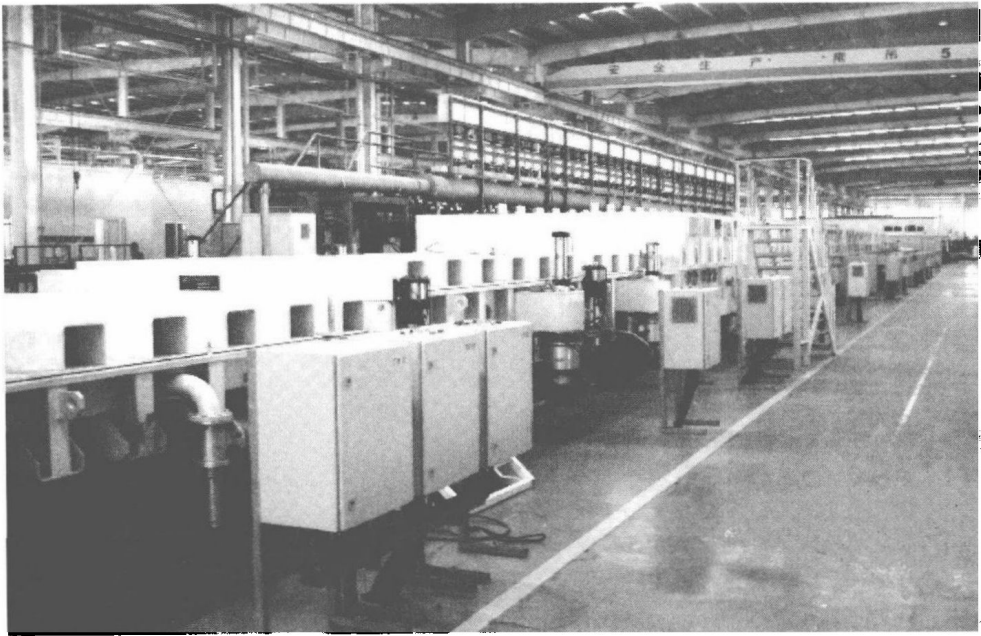


图1-3 南玻集团运行中的大型玻璃镀膜生产线

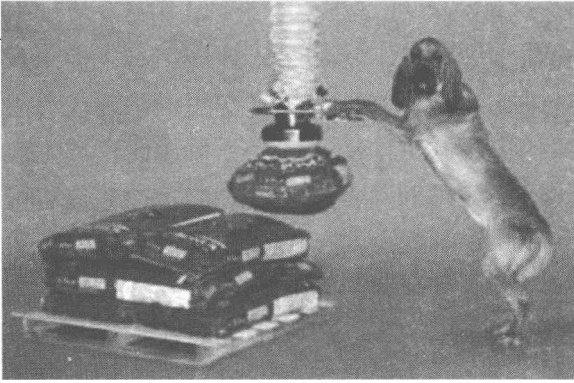


图 1-4 真空搬运

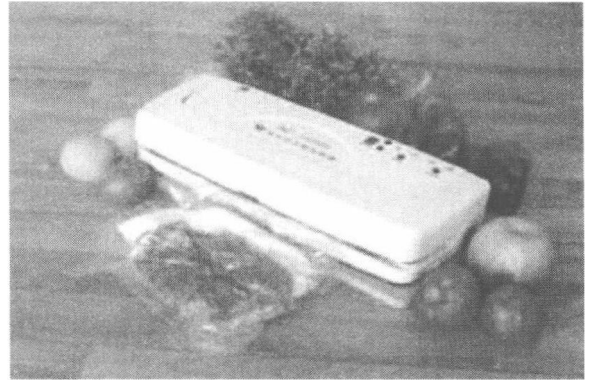


图 1-5 真空包装

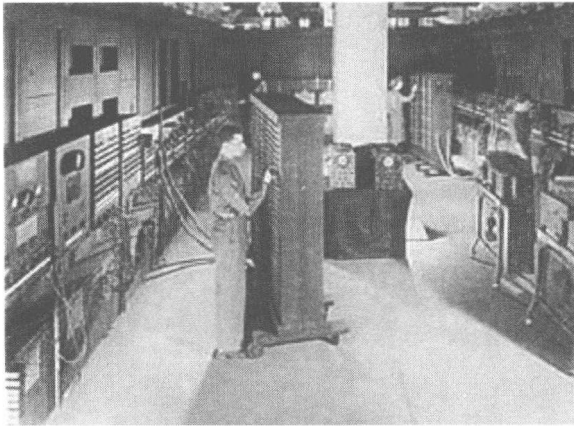


图 1-6 世界上第一台真空电子管计算机

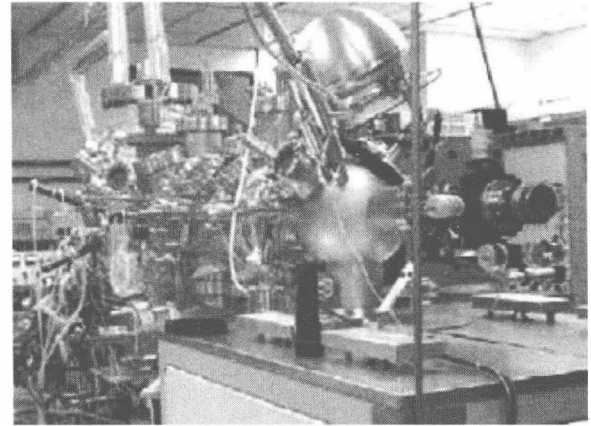


图 1-7 分子束外延设备



图 1-8 电子束蒸发真空镀膜机

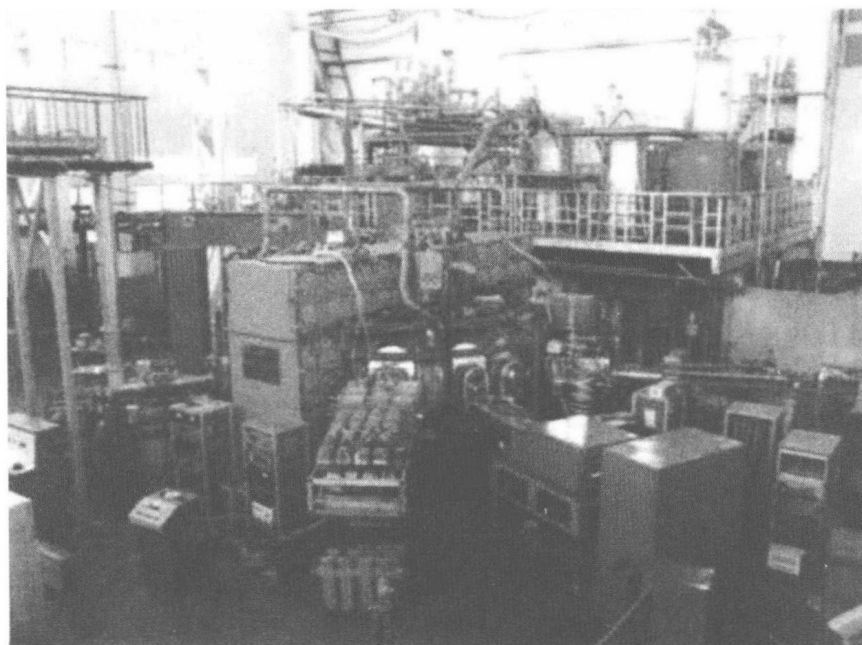


图 1-9 受控热核聚变（托卡马克）

目前世界上人工获得的最高真空是  $10^{-12}$  Pa 的数量级，这一纪录是由沃森研究中心的 J·汤姆逊于 1976 年 10 月在国际商用机械公司创造的，所使用的低温系统的温度可降到  $-269^{\circ}\text{C}$ 。即使在  $10^{-12}$  Pa 的极高真空中，每  $1\text{ cm}^3$  仍然还有数十个到数百个气体分子。完全没有气体的空间状态称为绝对真空。绝对真空实际上是不存在的。

## 第二节 气体分子运动论

气体分子运动论是在 19 世纪建立起来的一种联系气体微观粒子行为和宏观现象的初步理论，它解释了为什么气体会产生这样或那样的反应。

气体分子运动论的基本原则如下：

- ① 气体是由非常小的粒子（即分子）所组成；
- ② 分子不停地做快速、随机的直线运动（直到与其他粒子发生碰撞）；
- ③ 分子的体积与气体所占的体积相比几乎可以忽略；
- ④ 除了在与其它分子或器壁碰撞时有相互作用力外，气体分子相互之间几乎没有作用力。

气体分子相互之间的距离取决于压力。在标准大气压下，气体分子之间的距离大约是气体分子体积的 6 ~ 15 倍；在百万分之一大气压（约为  $10^{-3}$  Torr）下，气体分子之间的距离约为其体积的 1000 万倍。因为气体的分子处在不停的高速运动中，所以除了在与其它分子或器壁碰撞时有相互作用力外，气体分子之间几乎不存在相互作用。在与其它分子或器壁碰撞时，分子的能量得到转换。分子的质量越大，或者移动的速度越快，那么当与另外一个分子碰撞时该分子转换给另外一个分子的动能就越大。

在压力较高时，如在 1 个大气压力或以上时，碰撞发生的频率较大；在压力较低时

(小于  $1 \times 10^{-3}$  mbar\*)，每单位体积只有相对较少的分子和容器壁发生碰撞，气体分子很少与另外一个分子发生碰撞。

### 第三节 平均自由程

只要分子运动，它们之间就会发生碰撞。任何一个分子在相继两次碰撞之间都将自由通过一段距离，该距离长短不等，可以相差很大。气体分子在相继两次碰撞间所通过的平均路程就叫做平均自由程 (Mean Free Path, MFP)。平均自由程决定了各种类型的真空泵的设计，并且在真空技术的各个领域里都是常用的重要物理量。

随着气体压力降低，能互相进行碰撞的气体分子就越来越少，因此，平均自由程会随着压力降低而增加。

在同一压力水平下，一种气体的平均自由程不会和另外一种气体的平均自由程相同。这是因为平均自由程取决于分子的体积，而不同种类气体分子的体积不同。分子体积越小，平均自由程就会越长。

压力对平均自由程的影响如表 1-1 所示。压力越低，在指定空间内分子的数量就越少，因此，在和另外一个分子碰撞前，分子通过的路程就会越长。平均自由程在溅射工艺中是一个重要的参数。

表 1-1 压力对平均自由程的影响

压力/Torr	760	$1 \times 10^{-2}$	$1 \times 10^{-5}$	$1 \times 10^{-9}$	$1 \times 10^{-12}$
分子体积/cm <sup>3</sup>	$2.5 \times 10^{19}$	$3.2 \times 10^{14}$	$3.2 \times 10^{11}$	$3.2 \times 10^7$	32000
分子之间的距离	3.5 nm	150 nm	1.5 μm	31 μm	0.31 mm
每秒钟碰撞次数	$7 \times 10^9$	90000	90	$9 \times 10^{-3}$	$9 \times 10^{-6}$
平均自由程	67 nm	51 cm	5.1 m	51 km	51000 km
次数/次	$2.9 \times 10^{23}$	$3.8 \times 10^{18}$	$3.8 \times 10^{15}$	$3.8 \times 10^{11}$	$3.8 \times 10^8$

### 第四节 流 态

平均自由程也用于定义气体的流动状态 (通常叫做气体流态)。气体流态与压力的关系如表 1-2。

表 1-2 气体流态与压力的关系

流 态	典型压力/Torr
黏滞流 (湍流)	$> 1 \times 10^2$
黏滞流 (层流)	$> 1 \times 10^{-3}$
分子流	$< 1 \times 10^{-3}$

\* bar (巴) 为非法定单位,  $1 \text{ bar} = 1 \times 10^5 \text{ Pa}$ 。



当气体中两点存在压力差时，气体会自动从高压点向低压点扩散，这便形成了气体流动。

当从一个真空系统中抽出气体时，会经历两个明显的区域，即低真空区域和高真空区域。

### 1. 黏滞流

黏滞流在近大气压力区域内发生。此时，气体分子的平均自由程非常短，碰撞以气体分子之间持续、反复的碰撞为主。

黏滞流既可能是湍流，也可能是层流。

当流动气体层不平行，并且气体流动的方向受到障碍物或管道弯曲的影响，就会出现漩涡，这种流动状态叫做湍流（图 1-10）。湍流会在压力大于  $1 \times 10^2$  Torr 时发生。

层流会在相对较低分子运动速度和较低的压力下发生。此时，各部分具有不同速度的流动层，流线平行于管轴，而且在分子的运动路径上可以绕过障碍物而不用大幅度地改变分子的行进方向（图 1-11）。层流会在压力降至  $1 \times 10^{-3}$  Torr 时发生。

### 2. 分子流

当气体的平均自由程等于或大于容器的特性尺寸时，气体分子与管壁之间的碰撞占主要地位，这时流态叫做分子流。每个粒子在到达管壁之后会暂时附着在一起，之后该粒子被释放，释放的方向与到达方向无关。实际上分子流并不是真正意义上的气体流动，而是气体分子在腔壁上随机撞击（图 1-12）。

如果某些气体分子可以捕获或者沿着某个具体方向行进，那么就可以获得更低的压力。

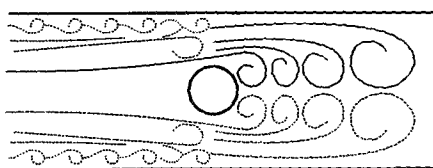


图 1-10 湍流

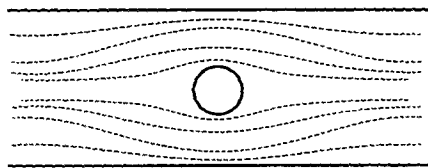


图 1-11 层流

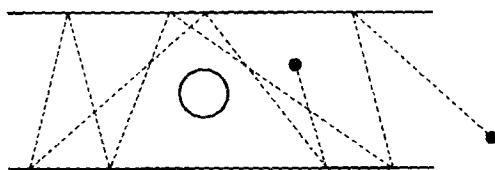


图 1-12 分子流

## 第五节 气体的热导率

气体中的能量可以通过以下三种方式进行传递：辐射、传导、对流。

任何物体，只要温度高于 0 K（绝对零温度），就会不停地以电磁辐射（EMR）的形式向周围空间发出热辐射。