



21世纪学科发展丛书·真空

丛书主编 周光召

从纯净的 空间到 纳米



山东教育出版社

前 言

“真空科学与技术”作为独立的科学体系,诞生于 19 世纪末 20 世纪初。20 世纪上中叶,随着电子器件、原子能、航天技术对真空条件的需求,推动了真空技术的长足进步。

我国 60 年代初,真空技术作为极端技术(高压、真空、高温、低温)之一,受到国家的高度重视。1979 年成立中国真空学会。1983 年中国真空学会作为中国惟一的会员单位加入了 IUVSTA(国际真空科学技术与应用协会)。

传统的真空技术主要囿于真空的获得、检测以及真空系统的自身发展,成为配合许多学科创新的条件和手段。然而,现代科学技术的相互交叉渗透,极大地丰富了真空科学技术的内涵。尤其是超高真空、超清洁表面的出现,揭示了自然界中许多新颖的现象和规律,纳米科技即是一例。根据 IUVSTA 的划分,现代真空的分支学科包括:经典真空技术(真空获得、检测、系统及其常规应用),真空冶金,等离子体科学与技术,薄膜,电子材料和加工工艺,表面科学,应用表面科学,纳米科学与技

术。

众所周知,自然界的物质有四种形态:固、液、气、等离子体。其中等离子体是在真空中引发的第四态。在极高真空下超纯净的空间和表面又会引发什么?有人认为存在着“真空激发态”,这可能是宇宙中重元素聚变——宇宙大爆炸起源的先决条件。

本书由以下作者共同撰写:成致祥(第一、二章),何炜、薛增泉(第一章第六节),杨乃恒(第三章),朱毓坤(第四章),范玉殿(第五章),吴冲若、董元昌(第六章),刘鸿飞(第七章),庞世瑾(第八章),高本辉(统一文稿)。方莉莉、张秀芳协助进行了组织工作。

《21 世纪学科发展丛书》编辑委员会、 出版委员会名单

一、丛书主编、副主编

主 编:周光召

常务副主编:张玉台

副 主 编:徐善衍 常志海 张 泽 宋南平
宫本欣 马 阳

二、丛书编辑委员会

主 任:庄逢甘

副主任:闵桂荣 杨 乐 张 泽 宫本欣 马 阳

委 员:(按姓氏笔画排序)

王 铸 孙永大 刘 珩 朱道本 仲增墉
陈学振 张 鲁 汪稼明 李慧政 金明善
周 济 胡序威 赵 逊 相重扬 徐世典
谢荣岱 薛全福

各分册编审委员会主任(名单略)

三、丛书出版委员会

主 任:宫本欣

副主任:陈学振 张 鲁 李慧政

委 员:(按姓氏笔画排序)

王 铸 王昭顺 尹 铭 史 彬 刘传喜
张力军 宋德万 隋千存 董 正 韩 春
鲁颖淮

序

周光召

人类已跨进了新的千年，21 世纪的曙光将给全球带来灿烂辉煌的新篇章。回顾过去的 20 世纪，科学技术的创新与进步引发了人类经济、社会的巨大变革，由此又带来了全球翻天覆地的变化。马克思曾在《资本论》中指出：“生产力的发展，归根结底总是来源于发挥着作用的劳动的社会性质，来源于社会内部的分工，来源于智力劳动特别是自然科学的发展”，人类社会实践有力地证实了这一精辟论断。

随着科学技术在近现代的蓬勃发展，新思维、新理念、新发现推动着新兴学科、交叉学科不断涌现。许多传统学科一方面派生出新的分支学科，另一方面又在与其他学科的融合中形成新的综合性学科。展望 21 世纪，信息科学技术、生物科学技术、纳米科学技术将成为发展迅速，带动社会经济科技快速进步的前沿学科。环境、能源、材料、航天、海洋等科学技术将继续发展，解决人类面临的持续发展课题。社会进步和经济发展的需求为人类今后如何驾驭科学技术的骏骑，如何继续攀登科技巅峰提出了新的课题。

一个国家的科技水平不仅体现在少数科学家的科技成就中，更要体现在广大群众对科学技术的理解、掌握和应用之中。“科技先行，以人为本”有赖于公众科技文化素质整体水平的提高。因此，弘扬科学精神、传播科学知识和科学方法

就成为科技工作者又一不可推卸的、任重而道远的职责。中国科学技术协会作为党领导下的科技群团组织，肩负着促进学科发展、推动科技进步和普及科学知识、提高全民科技文化素质的重要责任。编写《21世纪学科发展丛书》是使这种重要责任有机融合的一次新尝试。科学普及的对象可分为若干社会群体，其中青少年群体的科普教育尤为重要，因为他们是21世纪的后备人才，是攀登科技高峰的生力军。让广大青少年了解自然科学和技术科学的发展历程、卓越成就，对人类文化、社会、经济发展的巨大贡献，培养他们对科学技术的兴趣、爱好，以及为科技事业献身的精神，是老一辈科技工作者义不容辞的责任，也是我们编撰此套丛书的初衷所在。因此，专家学者们对编著此套丛书表现了极大的热情与关注。68个全国性学会参与了丛书的组织编写，很多院士、知名科学家在百忙中亲自挥笔，运用通俗的语言、生动的描绘、深入浅出的方式，将科学的奥秘揭示给读者。全套丛书介绍了60多个不同学科的起源、发展历程、著名科学家、重大科技成就，以及未来学科发展的态势，为广大读者特别是高中以上文化程度的各阶层读者提供了一套科学性、知识性、前瞻性、趣味性和可读性相统一的科普读物。希望通过浏览这套丛书，不仅能够帮助广大青少年读者拓宽知识领域，而且对于他们选择未来发展方向起到引导和参考作用。同时，此套丛书通俗易懂，也适合其他不同社会群体的干部与公众阅读。丛书将由山东省出版总社于2001年分两批出版发行。

跨入21世纪的中华民族将面临重新崛起的机遇和挑战，衷心地祝愿充满希望的一代丰获知识的硕果，为我国的繁荣富强贡献出才智和力量，作出无愧于伟大中华的重大业绩！

2001年1月16日

目 录

第一章 经典真空技术和近代真空科技	1
第一节 何谓真空	2
第二节 真空技术的历史发展	3
第三节 真空计量	7
第四节 真空技术的物理基础	7
第五节 真空实用技术及其应用	9
第六节 真空科学与技术的近代发展	12
第二章 航天技术中的真空应用	21
第一节 以真空为主的航天环境	22
第二节 空间环境模拟	24
第三节 热真空环境模拟设备	24
第四节 超高、极高真空环境模拟设备	28
第五节 火箭发动机启动和羽流试验设备	29
第三章 真空冶金	31
第一节 从常压冶金到真空冶金	32
第二节 真空冶金的主要领域	34

目
录

第三节	真空炉外精炼	36
第四节	真空熔炼如何加热	39
第五节	琳琅满目的真空熔炼	40
第四章	等离子体科学与技术	47
第一节	浩瀚宇宙中的等离子体	48
第二节	物质的第四态	49
第三节	等离子体的研究方法	51
第四节	低温等离子体	52
第五节	核聚变高温等离子体	55
第五章	真空镀膜	67
第一节	林林总总话薄膜	68
第二节	化学气相沉积	70
第三节	物理气相沉积	72
第四节	无所不在的薄膜	78
第六章	电子材料和加工工艺	81
第一节	信息技术的排头兵	82
第二节	形形色色的电子材料	83
第三节	低维化和智能化	89
第四节	电子工艺与真空设备	91
第五节	向生物材料和纳米材料进军	95
第七章	表面科学	97
第一节	真空使表面露出了“庐山真面目”	98
第二节	有别于固体内部的表面特性	99
第三节	表面科学与高技术	102
第四节	表面分析技术	104
第八章	纳米科学与技术	117

第一节	什么是纳米技术	118
第二节	纳米材料	120
第三节	纳米生物学	122
第四节	纳米机械和纳米动力学	124
第五节	纳米电子学	125
第六节	21 世纪的新领域	129
第七节	纳米技术的国际竞争	132

第1章

21 世纪学科发展丛书

经典真空技术和近代真空科技

第一节 何谓真空

有两种意义的“真空”，一种是纯物理学上的“真空”：没有或者不计及气体分子和原子存在的物理空间，仅存在各种能量粒子的场空间，另一种是应用物理与技术所讨论的“真空”（即本书所说的“真空”），指低于一个大气压力的稀疏气体的空间状态。“真空”一词来自拉丁词“Vacuum”，原意是“空虚”。

地球上存在着自然状态的真空。例如登山运动员攀登珠穆朗玛峰时会感到空气不够用，需要随身携带氧气。这是由于包围地球的大气层，受地球引力（空气分子重力）的作用，离地面越高，空气越稀薄。通常，衡量气体稀密程度的物理量是压力（压强），因为气体分子处于无规则的热运动之中，与物体碰撞时会产生压力。气体分子密度越大，气体压力也越大。在海洋平面上每立方米中有 2.7×10^{19} 个气体分子，产生的压力值是 101 325 帕，约 10^5 帕或 1 千克力每平方厘米，称此值为标准大气压。珠穆朗玛峰顶大气压力只有 32 000 帕，因此，相对于

海平面而言,珠峰顶上的气压只有海平面的三分之一左右。

大气压力随着离地高度的递增而降低,基本按指数规律下降。18公里高空,大气压力降到标准大气压的十分之一,96公里高空(大气层顶在90~100公里)只有百万分之一。地球大气层以外的宇宙真空,称为“空间真空”,它是典型的“自然真空”。

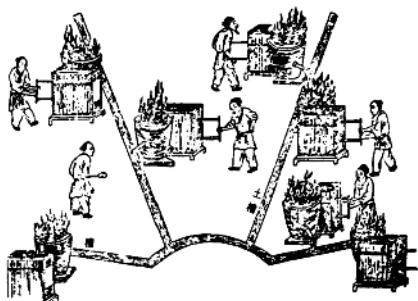
人通过胸腹部肌肉的收缩和放松迫使肺呼吸,吸气时胸腔压力接近大气压力,呼气时可降到半个大气压力以下,即人为的真空状态。进一步,人们运用科技手段,发明了各种真空泵去抽掉密闭容器中的气体,获得“人为真空”,逐渐形成了“真空科学与技术”这个学科。但是,即使在用现代排气方法获得的最低压力下,每立方厘米空间里仍然有上百个气体分子,还远未达到绝对空虚。

第二节 真空技术的历史发展

最早的真空获得和应用,可以追溯到遥远古代。我们的祖先在这方面有着杰出的贡献。公元前6世纪,我国的炼铁技术就已相当进步,为了能达到熔化铁的高温,炼铁炉上配有鼓风设备。最初使用的是叫做“鞴”的皮囊鼓风,其作用原理好似人的肺呼气,后经改进为“水排”鼓风、“风箱”鼓风。风箱的作用过程包括:负压引气和增压排风,这与现代往复式活塞真空泵的作用原理相同。从宋应星所著《天工开物》的详细记载可知(如图1-1所示),风箱在公元1367年时已成为炼铁的重要工具。

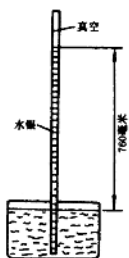
另一更为典型而生动的例子是中医用的拔火罐。两千年前,拔火罐已在我国民间用做治病的工具。唐朝之后,历代都有用它治病的记载。它很好地利用了空气热胀

—图 1-1 风箱鼓风炼铁(宋应星《天工开物》)



冷缩、蒸汽冷凝等物理现象来形成罐内真空,并在罐口所及的人体皮肤上造成一定程度的负压,使皮下局部毛细血管充血治病。

—图 1-2 托里拆利实验



历史上有确切记载获得了“真空”的却是欧洲人。1643年,意大利物理学家托里拆利做了著名的大气压实验。他用一根一端封闭的细长玻璃管和一个盛水银的小槽,先将水银从玻璃管开口端缓慢灌入,直到灌满全管。然后压住开口,将玻璃管倒立在水银槽内,再打开压着的开口。此时玻璃管中的水银柱高度逐渐下降,直到距离小槽液面以上 760 毫米时,就不再下降了(如图 1-2 所示)。他认为在玻璃管上端的空隙容积内就是“真空”。随后,他的学生帕斯卡等人将此实验搬到山上去做,结果水银柱高度低于 760 毫米,证明大气压力与高度有关。

能够获得真空的设备称为真空泵,能够测量真空(程)度的仪器称为真空计(或规)。1654年德国物理学家葛利克发明了活塞真空泵。他为了证明大气压的巨大力量,曾做了一次公开实验。他用两个直径 119 厘米的半球合起来,用真空泵将球中空气抽走,因为 119 厘米直径的球共有约 4.45 平方米的表面积,它承受约

22 吨力(218 牛) 大气压力的横向分力。每个半球套上八匹骏马, 才能向相反方向奋力拉开半球。这一令人惊奇的表演, 直观地显示了大气压力的存在, 使在场观众包括罗马教皇弗狄南三世惊奇万分。消息也震惊了全世界的科学家。因为实验地点在德国马德堡, 因此称为“马德堡半球实验”(如图 1-3 所示), 至今闻名于世。



图 1-3 马德堡半球实验

1662 年, 英国物理学家、化学家玻义耳发现“玻义耳定律”; 1738 年, 瑞士物理学家伯努利提出气体分子运动论。他们奠定了真空科学最初的理论基础。

从 1643 年托里拆利获得真空, 到 1879 年爱迪生发明碳丝电灯泡的 200 多年间, 真空技术经历了一个漫长的发展过程。这个过程孕育着电子学的诞生和发展。所谓“电真空器件”就是内部空间为“真空”的电子器件, 不言而喻, 真空技术为电子技术开辟了道路。反过来, 电子技术的发展又推动了真空科学与技术的进步。尤其是 20 世纪初, 电子技术的发展促使真空技术得到飞速发展。

盖德 1905 年发明机械泵, 皮拉尼 1906 年发明热阻真空计; 之后, 盖德又于 1913 年和 1915 年先后发明了分子泵、扩散泵; 1916 年, 贝克利发明了热阴极电离真空

计。真空技术迅速从低真空发展到高真空，高真空技术的发展势头一直延续到第二次世界大战。尤其是黑克曼 1936 年发明了油扩散泵，潘宁 1937 年发明了冷阴极电离计，使得高真空技术在获得和测量两方面基本上已完善。直到今天，这些发明仍然应用在大多数真空系统上。这一期间，盖德、朗谬尔以及我国物理学家何增禄等，对真空经典技术的进一步发展起了重要的推动作用。

1940 年以后，真空技术在原子能方面得到广泛应用，并在真空冶炼、真空镀膜、真空冷冻干燥等方面拓展。到 1950 年，真空范围一般已提高到 $10^{-4} \sim 10^{-5}$ 帕，或许在某个实验室里也曾达到更高真空，但还不能测量出来。贝阿德 - 阿尔珀特 1950 年发明了 B - A 规（以两人姓首字母命名的新型热阴极电离规），才为测量超高真空创造了条件。1953 年吸气剂 - 离子泵的出现，使人们可以获得清洁超高真空。

从 20 世纪 50 年代到 70 年代的 20 多年里，真空技术融入许多尖端科学技术并一起得到迅速发展。高能加速器、等离子体核聚变装置、微电子学中超大规模集成电路，特别是航天技术，促使真空科学与技术发生新的飞跃。真空进入了“超清洁”时代；真空范围从 $10^{-4} \sim 10^{-5}$ 帕提高到 $10^{-12} \sim 10^{-13}$ 帕，一下子提高了七八个数量级；真空系统容积大到数万立方米；低温泵的抽速可高达 1 000 万升每秒；真空物理方面的“气 - 固界面理论”，丰富了真空科学的内容。甚至有专家认为，今天的真空技术，已获得和测量从大气压（ 10^5 帕）到 10^{-13} 帕，压力范围达 18 个数量级，并随着某些新应用的开拓而要求一步步地接近“理想真空”。

第三节 真空计量

真空范围宽广,以致不能用一种真空泵和一种真空计,从大气抽气和测量到很高真空。在只需粗略地指出真空度的大致情况时,通常人们把它划分为几个真空区域。最常见的划分为:

$10^{-5} \sim 10^{-3}$ 帕	粗真空
$10^{-3} \sim 10^{-1}$ 帕	低真空
$10^{-1} \sim 10^{-5}$ 帕	高真空
$10^{-5} \sim 10^{-10}$ 帕	超高真空
低于 10^{-10} 帕	极高真空

“真空度”是对气体稀薄程度的客观度量,如前所述,人们习惯用压力(压强)来衡量真空度的高低,压力越高,称真空度越低;压力越低,称真空度越高。为纪念托里拆利的实验,早先人们使用毫米汞柱或托作为真空度的单位,1毫米汞柱=1托。后经国际计量大会规定,改用“帕斯卡”,简称帕。

$$1 \text{ 托} \approx 133.3 \text{ 帕}$$

第四节 真空技术的物理基础

真空技术的物理基础是气体分子运动论和气-固界面理论。

任何物质都具有三种形态,即固态、液态和气态(现代科学认为等离子体是物质的第四态)。而气态是物质存在的各种状态中最简单的状态。气态的主要特征是:一定质量的气体(即气态物质)既无一定形状,亦无一定体积,气体能无限制地膨胀而完全充满于任何形状与大

小的容积中;气体能均匀地混合在一起,数种不同种类的气体,不管其比例如何,都能混合成均匀状态。

正是由于气体状态简单,使得对于气态的实验研究很早就取得了可靠的结果,并建立起相应的定律。如玻义耳定律:一定质量的气体,在恒定温度下,其体积与压强成正比;盖·吕萨克定律:一定质量的气体,在恒定压强下,其体积与热力学温度成正比;查理定律:一定质量的气体,在体积恒定下,气体的压强和热力学温度成正比;阿伏加德罗定律:不同种类的气体,只要体积、压强、温度相同,就具有相同的分子数目。这些实验定律当时被认为是符合于实际气体的,但后来在较低温度与较高压强范围中进行精确实验后发现,它们与实际气体不尽相符,只有在较高温度及较低压强时才符合。因此,为了建立气体分子运动理论,需对实际气体进行一些假设限定:气体分子的体积与其活动空间相比是微不足道的,在考虑分子运动时,可将分子看成几何质点;分子之间没有相互作用力,每个分子的运动是完全独立的,不受其他分子影响;碰撞是弹性的。只有理想气体才完全符合上面列举的定律。稀薄气体与理想气体很接近,因此在真空技术中,多数情况下均可以应用理想气体的定律而不必加以修正。

现在我们知道,任何气体都是由许许多多的微小的分子所组成。气体分子非常小,如果把它看做一个小球,大多数气体分子直径只有 3×10^{-8} 厘米,也就是一亿分之三个厘米。气体分子虽小,但数量却很多,在标准状态(一个标准大气压和温度为零摄氏度)下,每立方厘米气体中有 2.7×10^{19} 个分子。如果可以将这些分子一个挨一个排列起来,那么 1 立方厘米的气体分子可排成约 800 万公里长。相邻分子间的距离要比单个分子直径大得多,即使在一个大气压下,分子间的空隙也比分子直径大