



PUTONG GAODENG YUANXIAO
SHIERWU TUMU GONGCHENG LEI GUTHUA XILIE JIAOCAI
普通高等院校“十二五”土木工程类规划系列教材

潜孔锤钻进技术

QIANKONGCHUI ZUANJIN JISHU

主 编 石永泉

QIANKONGCHUI ZUANJIN JISHU



西南交通大学出版社
[Http://press.swjtu.edu.cn](http://press.swjtu.edu.cn)



PUTONG GAODENG YUANXIAO
SHIERWU TUMU GONGCHENG LEI GUIHUA XILIE JIAOCAI
普通高等院校“十二五”土木工程类规划系列教材

潜孔锤钻进技术

QIANKONGCHUI ZUANJI JISHU

主 编 石永泉

西南交通大学出版社
· 成 都 ·

内容简介

本书内容主要由四部分组成：潜孔锤钻进技术相关的基础理论，包括工程热力学与流体力学的基础理论、冲击碎岩过程和理论分析；液动潜孔锤钻进技术，包括液动潜孔锤结构、工作原理、特点、钻头、钻进工艺和配套设备；气动潜孔锤钻进技术，包括气动潜孔锤结构、工作原理、特点、钻头、钻进工艺和配套设备；包含潜孔锤钻进技术的一些组合钻进技术，包括气动潜孔锤跟管钻进技术、湿式气动潜孔锤钻进施工法、气动矛和夯管锤施工法、中心取样钻探和气动潜孔锤取芯钻进工艺等。

本书系高等学校勘查技术与工程专业学生的教材，也可供从事岩土钻掘工作的技术人员参考使用。

图书在版编目（CIP）数据

潜孔锤钻进技术 / 石永泉主编. —成都：西南交通大学出版社，2013.1
普通高等院校“十二五”土木工程类规划系列教材
ISBN 978-7-5643-2138-3

I. ①潜… II. ①石… III. ①潜孔钻机—高等学校—教材 IV. ①P634.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2012）第 320444 号

普通高等院校“十二五”土木工程类规划系列教材

潜孔锤钻进技术

石永泉 主编

*

责任编辑 杨 勇

特邀编辑 曾荣兵

封面设计 何东琳设计工作室

西南交通大学出版社出版发行

（成都二环路北一段 111 号 邮政编码：610031 发行部电话：028-87600564）

<http://press.swjtu.edu.cn>

四川五洲彩印有限责任公司印刷

*

成品尺寸：185 mm × 260 mm 印张：12.5

字数：311 千字

2013 年 1 月第 1 版 2013 年 1 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5643-2138-3

定价：26.00 元

图书如有印装质量问题 本社负责退换
版权所有 盗版必究 举报电话：028-87600562

普通高等院校“十二五”土木工程类规划系列教材

编 委 会

主 任 易思蓉

委 员 (按姓氏笔画排序)

毛 亮	王月明	王玉锁	田文高	田北平
刘蒙蒙	孙吉祥	江 毅	李文渊	李章树
杨 虹	陈一君	陈广斌	周俐俐	范 涛
胡利超	贺丽霞	项 勇	袁 翱	贾 彬
贾媛媛	郭仕群	康 锐	曹 伦	

前 言

潜孔锤钻进技术也称为冲击回转钻进技术、冲击器钻进技术；在石油钻井中，又称之为旋冲钻井技术。潜孔锤钻进技术是一项先进的钻进技术，其内容包括潜孔锤钻进工艺及其配套设备仪器。潜孔锤钻进方法具有效率高、质量好、成本低、机械化程度高等一系列优点，是一种很有发展前景的钻进方法。潜孔锤钻进技术，吸引了国内外众多的研究人员和应用者，为了进一步提高潜孔锤钻进效率、克服应用过程中的缺点、进一步扩大应用领域范围，近年来潜孔锤钻进技术得到了长足的发展。取得了许多研究成果，开发了许多新产品。

我校考虑到培养学生一专多能、拓展学生知识面，开设了许多专业选修课程，1997年在勘查技术与工程专业开设了“潜孔锤钻进技术”专业选修课程，并编写了《潜孔锤钻进技术》校内教材。该教材至今已应用16年，现在加以修编正式出版。

本书内容主要由四部分组成：潜孔锤钻进技术相关的基础理论，包括工程热力学与流体力学的基础理论、冲击碎岩过程和理论分析；液动潜孔锤钻进技术，包括液动潜孔锤结构、工作原理、特点、钻头、钻进工艺和配套设备；气动潜孔锤钻进技术，包括气动潜孔锤结构、工作原理、特点、钻头、钻进工艺和配套设备；包含潜孔锤钻进技术的一些组合钻进技术，包括气动潜孔锤跟管钻进技术、湿式气动潜孔锤钻进施工法、气动矛和夯管锤施工法、中心取样钻探和气动潜孔锤取芯钻进工艺等。本书属于应用技术课程教材，内容既注重基础理论、基本原理，也注重实用技术。虽然编者在本书中努力反映潜孔锤钻进技术研究工作的最新进展，但可能与实际还是有差距的。

本书可作为高等学校勘查技术与工程等土建类专业的教材，使用时，可根据专业要求和学时多少作必要的取舍。

编者的助手石思参加编写了本书的部分内容。成都理工大学罗启忠副教授审阅本书。

由于编者水平有限，书中难免存在不足之处，恳请读者批评指正。

成都理工大学

石永泉

2012年8月

目 录

绪 论	1
第 1 章 工程热力学与流体力学的基础理论	3
1.1 空气的物理性质	3
1.2 理想气体的状态方程	10
1.3 气体状态变化过程	12
1.4 气体的流动	15
1.5 压缩空气通过管路系统时的能量损失	17
1.6 水 击	25
1.7 冲洗液钻进的洗孔参数	26
1.8 空气钻进的洗孔参数	31
第 2 章 冲击碎岩过程	37
2.1 动载作用下岩石力学性质	37
2.2 冲击碎岩特点	40
2.3 表面动载作用下脆性半空间的破坏	41
第 3 章 冲击破碎岩石的理论分析	44
3.1 应力波沿圆柱杆传播问题	44
3.2 冲击动载破碎岩石的理论分析	46
第 4 章 液动冲击器 (潜孔锤)	51
4.1 阀式液动冲击器	51
4.2 射流式液动冲击器	60
4.3 SX-54Ⅲ型射吸式液动冲击器	62
4.4 绳索取芯式液动冲击器	65
第 5 章 液动冲击器的设计	70
5.1 液动冲击器的设计原则和步骤	70
5.2 液动冲击器参数的设计	71
5.3 液动冲击器结构设计及其性能分析	76
第 6 章 液动冲击器钻进的钻头和规程	81
6.1 液动冲击器钻进用的钻头	81
6.2 液动冲击器钻进的规程	93

6.3	提高岩芯采取率和保证减少孔斜程度的措施	95
6.4	液动冲击回转钻进孔内事故的预防和处理	96
第 7 章	配套设备及有关工具	98
7.1	钻机和泥浆泵	98
7.2	附属装置及有关工具	100
第 8 章	气动潜孔锤	114
8.1	气动潜孔锤的分类及其基本要求	114
8.2	几种常用的气动潜孔锤	115
8.3	潜孔冲击器主要零件结构分析	126
第 9 章	气动冲击器的设计	134
9.1	气动冲击器设计的步骤	134
9.2	气动冲击器性能参数的选定	134
9.3	气动冲击器的设计	137
第 10 章	气动冲击器钻进用的钻头和规程	142
10.1	气动冲击器钻进用的钻头	142
10.2	气动冲击器钻进用的规程	145
第 11 章	空气压缩机及钻杆	150
11.1	空气压缩机的分类	150
11.2	常用的空压机	152
11.3	潜孔锤钻进用钻杆	154
第 12 章	其他气动潜孔锤钻进方法	158
12.1	气动潜孔锤跟管钻进法	158
12.2	湿式气动潜孔锤钻进施工法	168
12.3	气动矛和夯管锤施工法	171
12.4	中心取样钻探技术	182
12.5	气动潜孔锤取芯钻进法	190
参考文献		192

绪 论

潜孔锤钻进技术也称为冲击回转钻进技术、冲击器钻进技术；在石油钻井中，又称之为旋冲钻井技术。潜孔锤（也称其为冲击器）钻进是冲击式钻进和回转式钻进相结合的一种钻进方法。回转和冲击联合作用，共同破碎岩石，它们互相补充，发挥出其主要优点，因此潜孔锤钻进方法能够提高钻进效率，质量好、成本低、机械化程度高。依据驱动潜孔锤工作的介质不同分为两种，以气体驱动潜孔锤工作的，称为气动潜孔锤钻进技术；以液体驱动潜孔锤工作的，称为液动潜孔锤钻进技术。两者在工艺和设备上均有些不同。

潜孔锤钻进技术应用范围广泛，适于各种钻地工程，即适于钻进各种地层，达到各种工程目的，如地矿勘探、工程勘察、地基处理注浆成孔、锚杆（索）成孔、水井成孔、非开挖成孔、桩基成孔、油气钻井、地下工程事故救援成孔等。在各种钻地工程中，采用潜孔锤钻进方法相比其他钻进方法均会不同程度地提高钻进效率、降低成本，且有些钻地工程其他钻进方法是无法完成的。

（1）本书主要内容。

本书内容上主要由四部分组成：潜孔锤钻进技术相关的基础理论，包括工程热力学与流体力学的基础理论、冲击碎岩过程和理论分析；液动潜孔锤钻进技术，包括液动潜孔锤结构、工作原理、特点、设计基本知识、钻头、钻进工艺和配套设备；气动潜孔锤钻进技术，包括气动潜孔锤结构、工作原理、特点、设计基本知识、钻头、钻进工艺和配套设备；包含潜孔锤钻进技术的一些组合钻进技术，包括气动潜孔锤跟管钻进技术、湿式气动潜孔锤钻进施工法、气动矛和夯管锤施工法、中心取样钻探和气动潜孔锤取心钻进工艺等。学生在学习中应注意理论联系实际，并重视实验课的学习。

（2）本书特点。

由于是应用技术课程教材，本书详细介绍了潜孔锤钻进技术应用方面相关的基础理论。而潜孔锤钻具设计方面知识，本书只介绍了基本知识，这样既有利于学生较好地应用该技术，也有利于从事钻具设计的学生入门。本书详细介绍了常用的、新的潜孔锤钻具以及设备产品结构、工作原理、特点等，尽量选用新的理论、研究成果内容。同时，书中相关的产品信息量较大，有一定的手册功能。

（3）本课程的目的。

通过本课程的学习，学生能够掌握潜孔锤钻进技术知识；能够依据工程要求、地层条件，合理地选用潜孔锤钻具、设备，确定合理的钻进工艺规程和操作注意事项，并组织施工；能够积极开展潜孔锤钻进技术研究工作，发展潜孔锤钻进技术。

（4）潜孔锤钻进技术发展史。

潜孔锤钻进方法的应用已有一百多年的历史，早在 19 世纪 60 年代就有人进行了潜孔式冲击器的试制工作，早期在法国研制过低频液动冲击器，后来在苏联和美国进行过“涡轮锤”和“涡轮振动钻”的研究工作。

潜孔锤钻进技术 QIANKONGCHUI ZUANJIN JISHU

20 世纪 60 年代以来,苏联将液动冲击器定型统一生产,把液动冲击器钻进法作为常规的钻进工艺之一,不仅用于硬合金钻进、钢粒钻进,还用于金刚石钻进。因此苏联的液动冲击器钻进技术是比较成熟的,他们做了很多工作,进行了冲击回转钻进岩石可钻性分级,依此确定了一些最优化钻进参数;此外,还研制了绳索取芯用的冲击器。日本利根公司从事液动冲击器的研究工作约有四十余年的历史,研制出了高频液动冲击器。

首次利用空气作为冲洗循环介质进行空气钻进的尝试,是 1932 年在美国德克萨斯州东部的油井中进行的,但这种尝试没有成功,1938 年,在德克萨斯州和加利福尼亚又重新进行了试验获得了成功。1951 年开始推广这种钻进方法,到了 20 世纪 60 年代,普遍利用了风动潜孔锤钻进方法。美国曾在 3 500 m 的深井中,成功地进行了气动潜孔锤钻进,气动潜孔锤一般都用于无岩芯钻井,但德国、苏联等国也在研制取芯式气动潜孔锤。目前,美、俄、日、奥、德等国都在扩大气动潜孔锤的使用范围,其中澳大利亚在 150 m 孔深内的钻孔中采用气动潜孔锤代替金刚石钻进,使成本下降 9/10;美国使用气动潜孔锤钻进水井已达 75%,而且已扩大到金属矿床勘探孔中。国外还把气动潜孔锤钻进与气举反循环钻进结合起来,美国贝克公司称为“最新式钻具”。德国的气动潜孔锤钻探都已成为成熟的钻进技术。进入 20 世纪 80 年代以来,国外还研制了许多把气动潜孔锤钻进技术与其他钻探技术相结合的新颖而有成效的钻进法,如以空气作反循环介质的中心连续取样钻进法(CSR 法);瑞典在潜孔锤钻进基础上推出的 ODEX 跟管钻进系统;比利时的“土星”及“海王星”跟管钻进法;日本利根公司推出的能在漂石和基岩中钻进口径 380~1 500 mm 钻孔的 MACH 钻进法等。

总之,国外的潜孔锤钻进技术比较成熟,许多国家正在积极推广应用。实践也表明,这种钻进方法是很有发展前途的。

我国自 1958 年开始研制液动冲击器钻具,许多单位在这方面做了很多工作,液动冲击回转钻进技术日趋成熟,射流式液动冲击器形成系列;原国家地矿部还进行了各种液动冲击器选型工作;冶金、一些解放军部队也进行了研制液动冲击器工作。1971 年至今,全国用液动冲击回转钻进累计进尺 20 余万米,近些年也研制并应用了绳索取芯液动冲击器,大大提高了钻进效率。

我国空气钻进研究与试验,已有五十余年历史。20 世纪 60 年代在矿山部门开始应用了气动潜孔锤钻进方法,并开始研制专用钻机。1978 年以来,地矿部勘探技术研究所与吉林省水利局进行了空气反循环潜孔锤打基岩水井试验,取得了一定的效果,后来保定水文方法队开始试验中压空压机潜孔锤钻进法,取得了较为满意的效果,钻孔深达 250 m,静水位以下水井深达 186 m,接着又进行了低压空压机潜孔锤钻进试验及利用增压机等试验研究工作,取得了一些有益的经验。目前,气动潜孔锤钻进方法在水井施工中应用较多,在油气钻井方面也开始推广应用。

我国的液动潜孔锤钻进技术已具有较高水平,且国家已将其作为地勘工作中的重点推广项目。对气动冲击器的研究我国起步较晚,但现在发展较快,在工程成孔施工中应用较多。我国的潜孔锤钻进技术得到了长足的发展,应用范围在不断扩大。

第1章 工程热力学与流体力学的基础理论

冲击器是由液体或气体驱动工作的,液体或气体的性质和规律对于冲击器的工作性能有重要影响,因此有必要了解流体力学的基础理论。由于在前面的学习课程中,已讲授过液体静力学、液体动力学、液体流动时的压力损失等内容,故本章重点介绍气体性质和运动规律。

1.1 空气的物理性质

空气钻进技术就是把空气作为洗井介质或动力能量来源破碎岩石的一种钻进方法,目前主要是利用压缩空气。它是由大气通过空气压缩机把机械能转变为压缩空气能,在使用中又将压缩空气变为机械能(携带岩粉、冷却钻头或者是使冲击器产生冲击动作破碎岩石),在能量交换的过程中,空气是遵循着著名的热力学中已经被证明的气体定律变化的。为了说明这些基本定律,首先应当对空气的基本性质有所认识。

空气是无色、无嗅、无味的多种气体的混合物,其主要成分为氧(21%)和氮(78%),并包含着少量的 CO_2 (0.03%)、氩(0.94%)以及其他气体等。此外,在空气中经常含有水蒸气,它的含量变化很大。为了区别于不含水蒸气的干燥空气,把含有水蒸气的空气称为湿空气。

如同其他物质一样,空气也是由分子组成的。分子不停地运动,并由分子力将它们聚集在一起。但气体与固体、液体不同,气体的分子不仅相互间离得较远,而且不像固体、液体分子那么大,故能够十分自由地运动。因此,气体能在空间扩散,并同其他气体相混合。

气体分子本身的体积同气体占有的空间容积相比是很小的,即气体的容积大部分是空间。因此气体能压缩成原容积的很小一部分,气体分子在其中作直线运动,直至它与另一个分子或容器碰撞,碰撞后改变其运动速度和方向。气体分子对容器壁的碰撞,在 0°C 和标准大气压下,每平方厘米的壁上碰撞达 3×10^{23} 次/s。作用于壁上的空气压力就是这些分子撞击的结果。这时每立方厘米的空气含有约 27×10^{18} 个分子,它们的平均速度为500 m/s。

如果缓慢地压缩气体的容积(并通过散热使温度保持不变),那么每单位容积内的分子数便要增加。随之而来的是每秒钟分子撞击容器壁的次数要增多,气体对容器壁的压力就要升高。假如当气体容积被压缩到原来容积的一半或四分之一时,每单位面积的分子撞击数就要增加到两倍或四倍,也就是说气体的压力增大两倍或四倍。

如果我们限定气体的容积而使其温度升高,气体分子的运动速度就会加快,单位时间内,分子撞击器壁的次数就会增加,器壁所受到的分子压力也要相应增大。这就说明为什么稀薄气体每单位容积的分子数少,但在温度升高时对容器壁的压力同稠密气体在低温时对容器壁的压力是相同的。显然,如果气体温度升高又要保持气体压力不变,就必须增大气体的容积。

潜孔锤钻进技术 QIANKONGCHUI ZUANJIIN JISHU

空气是多种气体的机械混合物。作为混合气体来说，它的性质和各组成气体的性质及其混合比例有关。一般认为各组成气体符合气体状态变化规律，则混合气体也符合气体状态变化规律。一般将混合气体的压力称为全压，它是各组成气体分压 P_i 的总和，即

$$P = P_1 + P_2 + P_3 + \cdots$$

某种气体的分压 P_i 表示这种气体在与混合气体同样温度下，单独占据混合气体的总容积时所具有的压力。

从上面的叙述可知，压力、容积（比容）、温度是表征气体物理性质最主要的基本参数。除此之外，还有重度、比热、湿度、黏度、空气中的音速等参数。

1.1.1 压力（压强） P

压力是单位面积上所承受的垂直作用力。确切地说，气体的压力是大量分子在紊乱的热运动中对容器壁频繁冲击的总效果。故气体的压力既取决于分子的平均运动强度，同时又取决于分子的浓度。这可从分子运动论所得的方程式看出：

$$P = \frac{2}{3} n \bar{E} = \frac{2}{3} n \frac{m \bar{V}^2}{2} \quad (\text{N/cm}^2)$$

式中 n ——单位容积内分子数；
 $\bar{E}$ ——气体分子直线运动平均动能；
 m ——一个气体分子的质量；
 $\bar{V}$ ——分子的平方根速度。

按照压力的定义，还可写成：

$$P = \frac{F}{A} \quad (\text{N/cm}^2)$$

式中 F ——作用力，N；
 A ——承受作用力的面积， cm^2 。

1. 绝对压力、表压力、真空压力

气体压力有表压力（或计示压力或相对压力）、绝对压力、真空压力之分。用普通压力表测量出来的压力为表压力，它不包括自然界的大气压力在内，或产品说明中标注的压力即指表压力。表压力加上大气压力即绝对压力：

$$\begin{aligned} P_{\text{绝}} &= P_{\text{a}} + \gamma h \\ P_{\text{表}} &= P_{\text{绝}} - P_{\text{a}} = \gamma h \quad (\text{N/m}^2) \end{aligned}$$

式中 $P_{\text{绝}}$ ——流体的绝对压力， N/m^2 ；
 P_{a} ——当地大气压力， N/m^2 ；
 $P_{\text{表}}$ ——流体的相对压力（即流体的绝对压力与大气压力的差值），通常压力表测量的就是此值；

第1章 工程热力学与流体力学的基础理论

γ ——流体重度, N/m^3 ;

h ——压头, m 。

大气压力因纬度、高度、气候条件不同而不同。在海平面上, 当温度为 0°C 时, 大气压力 P_a 的平均数值为 $101\,325\text{ Pa}$ ($1.033\,2\text{ kg/cm}^2$), 所以公认把这个数值定为 1 个标准大气压 (atm)。这在海拔高度不太高时 ($1\,100\text{ m}$ 以内) 计算误差很小, 对工程设计带来的影响在允许范围之内。

有了上列关系式, 压力 P 的大小就可以从不同的基准计算, 因而产生了绝对压力、相对压力、真空压力的概念。

(1) 绝对压力 ($P_{\text{绝}}$): 以绝对真空为零点而计量的压力。在气体状态方程式中, 其压力都是绝对压力。

(2) 相对压力 (也称表压): 以一个标准大气压状态为零点而计量的压力。表压实质是指某点绝对压力超过大气压的数值, 即绝对压力与大气压力之差。

(3) 真空压力 (也称真空度): 工程既会遇到绝对压力大于大气压的情况, 也会遇到绝对压力小于大气压的情况。例如, 水泵吸水管、风机吸风管内流体的绝对压力是低于大气压的。这些部位的相对压力 $P_{\text{绝}} - P_a$ 是负值, 此时绝对压力不足于大气压的差数称为真空压力 (也称真空度), 用符号 P_v 表示。

真空压力, 是指流体的绝对压力小于大气压力产生真空的程度, 用数学式表示为

$$P_v = P_a - P_{\text{绝}} = -\gamma h_v = -P_{\text{表}}$$

如以液柱高形式来表示就称为真空高度, 即

$$h_v = \frac{P_v}{\gamma}$$

式中 h_v ——真空高度, m ;

P_v ——真空压力, N/m^2 。

例如, 某设备内流体的绝对压力为 0.3 个工程大气压, 求它相应的真空压力为若干?

$$\text{真空压力 } P_v = P_a - P_{\text{绝}} = 1 - 0.3 = 0.7 \text{ (大气压)}$$

$$\text{真空高度 } h_v = \frac{P_v}{\gamma} = \frac{0.7 \times 9.81 \times 10\,000}{1\,000 \times 9.81} = 7 \text{ (米水柱)}$$

由此可见, 理论上最大真空高度是当绝对压力为零时, 即

$$h_v = (P_a - P_{\text{绝}})/\gamma = P_a/\gamma = \frac{10\,000 \times 9.81}{1\,000 \times 9.81} = 10 \text{ (米水柱)}$$

2. 压力的度量

压力的度量有三种单位:

(1) 应力单位: 用单位面积承受的力表示, 其单位为帕斯卡 (Pa) 或者为牛/米² (N/m^2) (工程单位为公斤·力/米²、公斤·力/厘米²)。

(2) 大气压单位: 工程上常用大气压表示。由物理学知, 温度为 0°C 、重力加速度为

潜孔锤钻进技术 QIANKONGCHUI ZUANJIIN JISHU

980.665 cm/s²、水银重度为 133 416 N/m³ (即 13 600 公斤·力/米³) 时, 760 mm 水银柱作用在底面的压力为一标准大气压, 即 $P_{\text{标准}} = 101\,396\text{ N/m}^2$ (10 336 公斤·力/米²)。在工程上为便于计算, 常取一工程大气压为 $P = 98\,100\text{ N/m}^2$ (10⁴ 公斤·力/米²)。

(3) 液柱高单位: 即以水柱或水银柱的高度表示压力的大小。由 $P_{\text{表}} = \gamma h$ 可知, $h = P_{\text{表}}/\gamma$ 。说明一定的压力 $P_{\text{表}}$ 相当于一定的液柱高。如果 γ 取不同液体, 则 h 值不同, 即一定的压力可用不同的液柱高度来表示。

例: 将一工程大气压的数值换算成相应的水柱高及水银柱高 (水重度 $\gamma_{\text{水}} = 9\,810\text{ N/m}^3$, 水银重度 $\gamma_{\text{水银}} = 133\,416\text{ N/m}^3$)。

一工程大气压为 $P_a = 98\,100\text{ N/m}^2$, 则相应的水柱高与水银柱高为

$$h_{\text{水柱}} = P_a / \gamma_{\text{水}} = 98\,100 / 9\,810 = 10 \text{ (米水柱)}$$

$$h_{\text{水银柱}} = P_a / \gamma_{\text{水银}} = 98\,100 / 133\,416 = 735.3 \text{ (毫米水银柱)}$$

各种压力单位的换算见表 1.1。

表 1.1 压力单位的换算

N/m ² (牛顿/米 ² , 帕)	kgf/cm ² (工程大气压)	kgf/cm ² (标准大气压)	mHg (米汞柱)	mH ₂ O (米水柱)	kgf/m ² (公斤·力/米 ²)	lb/in ² (磅/英寸 ²)	Bar (巴)
100 000	1.019 7	0.986 15	0.750 1	10.197		14.50	1
98 066.5	1	0.967 8	0.735 6	10.000	10 000	14.22	0.980 7
	0.070 31	0.068 05	0.051 7	0.703 1		1	0.068 95
133 300	1.359 5	1.315 8	1	13.6		19.34	1.333 2
9 806	0.100 0	0.09 678	0.073 55	1	1 000	1.422	0.098 06
101 325	1.033 2	1	0.760	10.33	10 332	14.70	1.013 3

1.1.2 气体的比容 ν

比容就是单位质量物质所占有的容积:

$$\nu = \frac{V}{M} \text{ (m}^3/\text{kg)}$$

式中 V ——气体容积, m³;

M ——气体的质量, kg。

显然, 比容也是气体压力的函数。在温度为 0 °C 和压力为 1 标准大气压 (760 mm 汞柱) 的情况下, 干燥空气的比容为 0.773 m³/kg。

1.1.3 气体的重度 γ 与气体的密度 ρ

重度是单位容积的物质具有的重量:

第1章 工程热力学与流体力学的基础理论

$$\gamma = \frac{G}{V} \quad [\text{N/m}^3 (\text{国际单位制}); \text{公斤} \cdot \text{力}/\text{米}^3 (\text{工程单位制})]$$

重度与比重是两种不同的概念,量纲也不一样,但在一些书籍及文献中把二者混为一谈。应该指出,在克(g)、厘米(cm)、秒(s)等物理单位制中,重度和比重的绝对值是相同的。例如设泥浆的比重为1.1,它在g、cm、s制中重度也为1.1克·力/厘米³,但在工程单位制(公斤·力·米·秒)中,比重为1.1的泥浆其重度 $\gamma = 1\,100$ 公斤·力/米³,而在国际单位制中(N·m·s)则为10 791 N/m³。我国已发布命令,采用国际单位制。在有关流体力学的计算中,经常要涉及重度这一概念,因此必须注意二者的区别。

密度 ρ 是单位体积内的质量,即

$$\rho = \frac{M}{V} \quad (\text{kg/m}^3)$$

密度 ρ 、重度 γ 、比容 ν 之间关系为

$$\gamma = \rho g = \frac{g}{\nu}$$

式中 ρ —— 气体的密度, kg/m³;
 g —— 重力加速度, m/s²;
 ν —— 比容 (m³/kg), 为密度物理量的倒数;
 M —— 气体质量, kg;
 γ —— 气体重度, N/m³;
 V —— 气体体积, m³。

1.1.4 压缩空气流量与自由空气流量换算

气体系统的耗气量通常是指有压状态下的空气流量(即压缩空气流量),而空气压缩机铭牌上的流量是指压缩机吸入的自由空气流量,它们之间的换算关系为

$$Q_{\text{自}} = Q_{\text{压}} (T_{\text{自}}/T_{\text{压}}) \frac{P+1.013}{1.013}$$

式中 P —— 压缩空气表压力, bar;
 $Q_{\text{压}}$ —— 压缩空气体积流量, m³/min;
 $Q_{\text{自}}$ —— 自由空气体积流量, m³/min;
 $T_{\text{压}}$ —— 压缩空气温度, K;
 $T_{\text{自}}$ —— 自由空气温度, K。

1.1.5 温度 T

“温度”这个概念是随其测定方法的发展而明确起来的。通常的摄氏温标($t^{\circ}\text{C}$),是把一标准大气压下水的冰点定为 0°C ,水的沸点定为 100°C ,中间等分100份,每一份即为 1°C 。如果把上述两点定为 32° 和 212° ,中间分为180等份,每一等份为一度,这就成为华氏温标。

潜孔锤钻进技术 QIANKONGCHUI ZUANJIIN JISHU

如此等等，可以有很多温标。不仅这样，即使采用同一种温标，如果选择的测温物体不同，在测定某一确定温度时，也会得出不同的数值，对此将上述温标称为经验温标。为了避开被测物质性质的影响，1857年，开尔文根据卡诺定理提出了热力学温标，这种温标与理想气体温度计的温标是一致的，因而把研究的气体视为理想气体时有很大的实用价值与较高的准确性。

热力学温标又称绝对温标，其计算为

$$T = 273.15 + t$$

式中 T ——绝对温度，K；

t ——摄氏温度，C。

按气体动力学理论，气体分子平均移动动能与绝对温度成下列关系：

$$\bar{E} = \frac{mv^2}{2} = \frac{3}{2}KT$$

式中 E ——气体分子平均移动能；

m ——分子的质量；

v ——分子的均方根速度；

K ——波尔茨曼常数；

T ——绝对温度。

1.1.6 比热 c

比热就是单位量的物质产生单位温度变化时所吸收或放出的热量，常以小写字母 c 表示。其量纲为 $\text{kcal/kg} \cdot ^\circ\text{C}$ (千卡/公斤·度)。

$$c = \frac{\delta_q}{d_T} \quad (\text{kcal/kg} \cdot ^\circ\text{C})$$

式中 δ_q ——单位量的物体所吸收或放出的热量；

d_T ——温度的变化量。

由物理学知道，热量和能量的关系用热功当量 A 来表示：

$$A = 1/427 \quad (\text{kcal/kgf} \cdot \text{m} \cdot ^\circ\text{C})$$

$$1 \text{ kgf} \cdot \text{m} = 1/427$$

$$1 \text{ kcal} = 427 \text{ kgf} \cdot \text{m}$$

$$1 \text{ cal} = 4.18 \text{ J (焦耳)}$$

$$\text{J} = 0.24 \text{ cal (卡)}$$

气体的比热数值还随加热过程而变化，因而有定容比热 c_V 和定压比热 c_P 之分。

定容比热 c_V ，相当于在密闭容器内加热气体，此时气体无法膨胀，它的压力将随温度上升而增高。

定压比热 c_P ，相当于加热气体时，气体可以自由膨胀，但它压力保持不变。

定容比热一般小于定压比热，因为在第二种情况下加热时，一部分热量还要消耗在外功上。

不同气体的 c_V 和 c_P 虽然不同，但理想气体的 c_V 与 c_P 之比都是一个常数，即

第1章 工程热力学与流体力学的基础理论

$$\frac{c_p}{c_v} = k$$

式中的 k 值称为绝热指数。空气的绝热指数 $k = 1.41$ 。

1.1.7 空气的黏度

黏度是流体做相对运动时的内摩擦力。黏度系数是表明流体黏度性质的系数。

空气的绝对黏度（或称动力黏度） μ ，单位为公斤力·秒/米²或牛·秒/米²。它的大小与温度有关：

$$\mu = 1.758 \times 10^{-6} \times \frac{380}{380+t} \times \left(\frac{273+t}{273} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2)$$

运动黏度系数为

$$\gamma = \frac{\mu}{\rho} \quad (\text{m}^2/\text{s})$$

式中 t —— 空气的温度，°C；

ρ —— 空气的密度（国际单位：kg/m³；工程单位：公斤·力·秒²/米⁴）。

在标准大气压下，空气的黏度系数见表 1.2。

表 1.2 空气黏度系数

温度/°C	-10	0	10	20	40	60
重度 γ / (N/m ³)	1.34	1.29	1.25	1.20	1.12	1.06
密度 ρ / (kg·f·s ² /m ⁴)	0.137	0.132	0.127	0.123	0.114	0.108
绝对黏度 $10^6 \mu$ / (kg·f·s/m ²)	1.65	1.71	1.77	1.83	1.95	2.07
运动黏度系数 $10^6 \gamma$ / (m ² /s)	12.1	13.0	13.9	14.9	17.0	19.2

由表 1.2 可以看出，空气的流动性随温度升高而下降，这与液体恰恰相反，液体的流动性随温度升高而增大。液体的内摩擦力来源于分子的聚合力，在温度升高时分子活动能力增大，所以内摩擦力减小。气体则由于分子无规则地运动而产生阻力，所以温度升高时内摩擦力增大。

空气的黏度对研究气体流动的特性及计算管路压力损失是很重要的。图 1.1 所示为空气的黏度与空气压力关系。

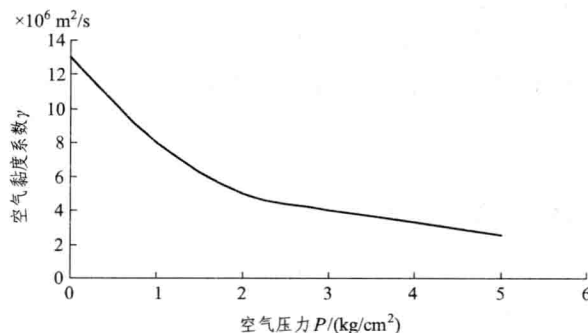


图 1.1 γ - P 关系曲线

1.2 理想气体的状态方程

1.2.1 气体的基本实验定律

(1) 玻义耳-马略特定律 (Boyle-Mariotte)。

实验发现,在密度较小时,一定质量(M)的气体在温度 T 保持不变时,其压力 P 与体积 V 的乘积是一个常数,即

$$pV = \text{常数} (M \text{ 与 } T \text{ 不变})$$

常数的大小由 M 与 T 决定。在 P - V 图上(压容图),上式表示的是一条双曲线。因为这时温度不变,所以也称等温线。图1.2给出了几条对应于不同温度的等温线。

(2) 盖·吕萨克定律 (Gay-Lussac)。

在同样情况下,实验发现一定质量 M 的气体,在压力 P 保持不变时,其体积 V 与绝对温度 T 成正比:

$$\frac{V}{T} = \text{常数} \quad \text{或} \quad V = V_0 a_V T \quad (M \text{ 与 } P \text{ 不变})$$

式中, V_0 是气体在273.15 K时的体积;系数 a_V 称为气体的体积膨胀系数。实验证明,一切气体的 a_V 都近似地等于 $1/273.15 \text{ K}^{-1}$ 。

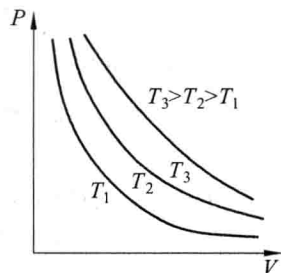


图 1.2 理想气体等温线

(3) 查理定律 (Charles)。

在同样情况下,实验发现,一定质量 M 的气体,在体积 V 保持不变时,其压力 P 和绝对温度 T 成正比:

$$\frac{P}{V} = \text{常数} \quad \text{或} \quad P = P_0 \cdot a_P \cdot T \quad (M \text{ 与 } V \text{ 不变})$$

式中, P_0 是气体在273.15 K时的压力。系数 a_P 称为气体的压力温度系数。根据实验测定,一切气体的 a_P 也近似地为 $1/273.15 \text{ K}^{-1}$ 。

实验表明,这三条定律都有一定的局限性。在常温(室温附近)、常压(1个标准大气压左右)下,大部分气体如氢、氧、氮、氦等基本遵循上述各定律。温度越高,压力越小,即气体越稀薄时,准确程度越高;反之温度越低,压力越大,即气体密度较大时,出现的偏差也较大。一般在100个标准大气压以上时,偏差就非常显著。为了使这三条定律适用范围准确化,人们引进理想气体的概念。把严格遵循玻义耳-马略特、盖·吕萨克和查理定律,并且满足 $a_V = a_P = 1/273.15 \text{ K}^{-1}$ 的气体称为理想气体。显然,这是一个理论模型。在常温常压下,理想气体可以作为实际气体的近似模型。

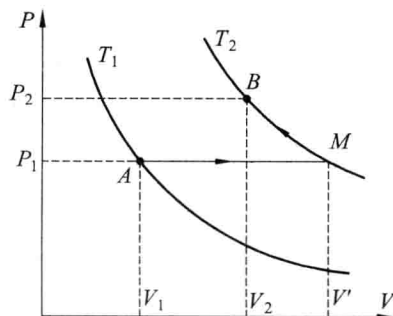


图 1.3 理想气体状态过程

1.2.2 理想气体状态方程

考虑质量为 M 、压力为 P_1 、体积为 V_1 、温度为 T_1 的理想气体,其所处的状态在 P - V 图上对应于一个确定的点 A (见图1.3)。以 P_2 、 V_2 、 T_2 表示这一理想气体的