

高等学校教学用书

特殊凿井

中国矿业学院主编

煤炭工业出版社



高等学校教学用书

特 殊 凿 井

中国矿业学院主编

煤炭工业出版社

内 容 提 要

本书系统地阐述了特殊凿井的主要方法——冻结法、注浆法、帷幕法、钻井法、沉井法的实质、基本理论、施工技术以及设计和实测技术问题；对我国特殊凿井方面的科研成果和一些先进技术及施工经验作了简要的介绍；同时反映了一些国外特殊凿井方面的技术现状和动向。

本书可作为煤矿高等院校矿井建设专业的教材。也可供矿井建设、地下工程等专业科研、设计人员和现场工程技术人员参考。

高等学校教学用书
特 殊 凿 井
中国矿业学院主编

*

煤炭工业出版社 出版
(北京安定门外和平北路16号)
煤炭工业出版社印刷厂 印刷
新华书店北京发行所 发行

*

开本 $787 \times 1092^{1/16}$ 印张 $20^{1/8}$
字数481千字 印数1—4,730
1981年4月第1版 1981年4月第1次印刷
书号15035·2385 定价2.50元

编者的话

《特殊凿井》课程自1959年开设以来，各院校都先后编写过讲义。1978年6月煤矿建井专业教学大纲审定会议确定编写并出版《特殊凿井》教材。制定了教材内容“大纲”，确定以冻结法、钻井法、沉井法、帷幕法为主进行编写，并增加实测技术一章。1979年4月在“大纲”基础上，讨论制定了《特殊凿井》编写细纲，随即开始编写工作。同年12月为审定初稿召集了《特殊凿井》教材审定会议。与会的19个单位36位代表认真进行了讨论，提出许多宝贵意见，在此基础上编者进行修改，现正式出版。根据与会同志的建议和有关领导意见，增加了注浆法一章。

考虑到各院校的不同特点和教学需要，本书部分内容超过了“大纲”要求。讲授时各院校可自行选定。与本书有关的一些内容，如表土压，破岩原理，井壁计算等，根据大纲确定，划归其他有关课程讲授。

本书由中国矿业学院主编。参加编写的还有阜新矿业学院和山东矿业学院。

总编：余力、崔广心、翁家杰

编写：

总论 崔广心

第一章 张维廉、马英明

第二章 翁家杰

第三章 刘铮敏

第四章 崔广心、王德民

第五章 余力、巴肇伦

第六章 马英明

在编写及审稿、定稿过程中得到了阜新矿业学院、山东矿业学院、淮南煤炭学院、西安矿业学院、焦作矿业学院、山西矿业学院、东北工学院、煤炭科学院建井所、两淮特殊凿井公司、邯邢特殊凿井工程处、江苏省煤研所、江苏丰沛煤建指挥部、开滦煤矿基建处、兖州煤建指挥部和广东省煤炭工业局等二十余个单位的大力支持，在此深表谢意！

由于我们的思想和业务水平所限，本书一定存在不少缺点和错误，恳切的希望读者提出批评和指正。

编者 一九八〇年三月

目 录

总论	1
第一章 冻结法	5
第一节 概述	5
第二节 压缩制冷原理	6
第三节 冻结法施工	29
第四节 冻土物理力学性质	45
第五节 冻结温度场	53
第六节 冻结壁厚度的计算	84
第七节 井壁结构和井壁受力	93
第八节 冻结方案	107
第九节 冻结法设计计算	109
第十节 深井冻结有待解决的几个问题	114
第二章 注浆法	115
第一节 概述	115
第二节 注浆设备	118
第三节 地面预注浆	125
第四节 工作面预注浆	135
第五节 注浆材料	140
第六节 注浆参数	150
第七节 注浆法设计计算	154
第八节 注浆技术中有待解决的几个问题	155
第三章 混凝土帷幕法	159
第一节 概述	159
第二节 槽孔的施工	161
第三节 泥浆下灌注混凝土	169
第四节 井筒掘砌	179
第五节 混凝土帷幕设计	180
第六节 混凝土帷幕凿井中有待解决的几个问题	181
第四章 钻井法	183
第一节 概述	183
第二节 钻井设备	184
第三节 井筒钻进	202
第四节 洗井及净化	210
第五节 永久支护	226
第六节 劳动组织与技术经济指标	234
第七节 钻进参数	236
第八节 钻井法施工设计计算	241

第九节	钻井法有待解决的几个问题	245
第五章	沉井法	248
第一节	概述	248
第二节	沉井的结构	252
第三节	沉井下沉前的准备工作	254
第四节	减少侧面摩阻力的方法	257
第五节	水下掘进	262
第六节	井壁施工	269
第七节	封底与固井	272
第八节	防偏、测斜与纠偏	275
第九节	沉井施工设计	281
第十节	沉井法存在的问题与展望	285
第六章	实测技术	286
第一节	概述	286
第二节	传感器和仪表	287
第三节	传感器的试验和标定	308
第四节	传感器的布置、埋设和观测	310
附 图	氨的 i - $\lg P$ 图	313
附表 1	氨的热力性能	314
附表 2	高斯函数 $G(X)$	315
附表 3	$x=0\sim 12.0$ 的零阶与一阶的贝塞尔函数值	316

总 论

一

煤是我国能源的主要组成部分，又是工业生产的原料。国民经济的发展要求生产更多的煤炭，为此必须加快新矿区开发和新井建设，高速度发展煤炭工业。我国有丰富的煤炭资源，储量居于世界前列，煤田分布遍及全国各地，为发展煤炭工业提供了良好的资源条件。

煤田赋存的地质条件差别很大，有些是很复杂的。随着生产的发展，当地质条件较好的煤田已大量的开发不能满足需要时，人们就不得不在地质及水文地质条件复杂、煤炭资源丰富的矿区进行新井建设。一般说在这种条件下用普通凿井法将遇到很大困难，甚至是不可能的。必须采取与普通凿井法有明显区别的技术措施和方法进行施工。这就要使用特殊凿井。

特殊凿井（也称“井巷特殊施工法”）是在那些松散不稳定的含水层；或稳定的但涌水量很大的裂隙岩层或破碎带中，预先采用某种特殊的技术措施或其他科学方法，改善施工客观条件，而后进行施工；或者用机械破岩方法钻进井筒。这些施工方法统称为井巷特殊施工法。简称“特殊凿井”。

我国在新矿区开发中愈来愈多的遇到复杂地层。特别是要穿过厚度不等的表土层，给新井建设带来了很大困难。譬如华东的两淮矿区（淮南矿区、淮北矿区的简称），兖州矿区等表土层厚从几十米到500米左右不等，中间含有多层流砂，涌水量大。华北的开滦矿区表土层从几十米到570米左右，含有流砂和砾石层，而且基岩裂隙中涌水达 $60\sim 300\text{米}^3/\text{时}$ 。邯邢矿区表土层厚约290米，基岩裂隙涌水也很大。东北地区的沈南煤田表土层厚在100米以上。华中的平顶山矿区表土层从十几米到200米不等，含有多层流砂和砾石层（砾石层最厚达20米）。焦作矿区岩石裂隙涌水经常在 $100\sim 200\text{米}^3/\text{时}$ 。这些矿区煤炭储量丰富，是我国新井建设的重点矿区，由于表土层厚，地质条件复杂，必须大量使用特殊凿井。另外鹤岗矿区、沈北煤田，新汶矿区，徐州等地区也大量使用过特殊凿井。实践证明，在不稳定的表土层中，用特殊凿井法施工，可以大大改善施工条件，使井下作业地面化，提高劳动效率，加快建井速度，同时特殊凿井技术也将促进建井工程的机械化和自动化。

建井技术现代化，关键是科学技术现代化，因此培养和训练具有特殊凿井专门知识的科技人员；建立相应的科研机构和施工队伍，都具有非常重要意义。要大力开展科学研究，总结先进经验，引进先进技术，努力培养又红又专的技术人员，为煤炭工业的现代化作出贡献。

二

特殊凿井法在最近一百余年得到很快的发展。十八世纪末和十九世纪初由于资本主义开始发展，钢铁和化学工业发展很快，对煤炭的需要量迅速增长，促进了建井技术的

发展。

煤田赋存于复杂的地质条件，是特殊凿井发展的客观原因。和我国相似，西欧国家煤田上部多覆盖着深厚的表土层。例如：西德鲁尔煤田上部表土层厚达500~800米。比利时卡坪平煤田的上部有500~600米厚的表土层，而且在其下部常出现一层厚5~15米，水压高达60公斤/厘米²的流砂层。荷兰和法国中部及北部煤田也基本如此。苏联莫斯科煤田上覆盖有流砂层，西顿巴斯矿区，札波罗兹矿区表土层都很厚。波兰煤田表土层厚达400多米，水压30~35公斤/厘米²。英国也有部分煤田为表土层所覆盖，其基岩裂隙发达涌水也大。

表土层中建井产生巨大困难的根源是水。砂层遇水则易流动，使井帮很不稳定。最初在表土层中建井，常使用的有板桩法和沉井法，这种方法容易发生涌砂冒泥等事故。为解决这个问题1839年法国特雷色（Tracy）工程师将沉井上部封闭起来，向井内充压缩空气，以抵抗地下水的流入，掘进工作在压气中进行。从而发明了压气沉井法。这个方法在当时被认为是先进而可靠的方法，并先后在英国、德国、比利时、荷兰、俄国等应用。而且从建井工程引伸到建桥墩的工程中去。它的主要缺点是人员在压气中工作损害健康，这是压气沉井不常使用的基本原因之一。

随着沉井下沉深度的增加，下沉阻力增加很大。单用加大下沉力（增加沉井重、加载、千斤顶加载等）的办法已感费事且效果不大。科学工作者便开始着眼于减少下沉阻力。1944年日本使用淹没式沉井，用水柱压力抵抗地下水流入，井壁外侧设有气龛，其内安有喷嘴喷射压缩空气来减少侧面阻力。匈牙利（1952年）和西德（1956年）在沉井井壁和井帮间充填泥浆来减小侧面阻力和维护井帮的稳定，成功的使用了泥浆淹水沉井。由于井筒内是淹水的，故破土和出土在水下进行。这促进了各种水中破土和提升机械（包括水力机械）在建井中的应用和发展。

1958年8月我国把震动技术应用于沉井，用震动机产生的强大震动力加大沉井下沉力。由于震动使井壁周围地层局部液化，减小了侧面阻力。沉井下沉速度增快。

1868年英国在泰晤士河使用掩护筒法掘进一条直径2.15米，长416米的隧道。以后这种方法相继在一些国家使用。

上述方法都有一个共同的特点：就是设法使支护移动并超前于掘进工作面。

十九世纪末，由于科学技术的发展，以及对复杂地层施工经验的积累和研究，特殊凿井也向另一个方向发展。即在凿井之前，应用科学上和技术上的成果，将不利于施工的地质条件改变为适合于施工的条件，然后再进行凿井工作。这个方向导致注浆法、冻结法、降低水位法、热熔法和帷幕法的相继出现。

1885年铁琴斯（Tietjens）成功的使用地面预注浆法。从此注浆法就广泛为各国应用。本世纪五十年代以前，注浆材料以粘土、水泥为主。五十年代初美国首先发明了可控制凝聚时间的有机化学浆液AM-9。之后日本制造的日东-SS和我国研制的MG-646都是以丙稀酰胺为主剂的有机化学浆液。目前某些国家正在研制可控凝聚时间的发泡膨胀的浆液材料，并已取得进展。

在制冷技术已为生产所应用的基础上，1880年德国人彼茨舒（F.H.poetsch）提出人工冻结法原理，并于1883年将这个原理首先用于人工冻结法凿井。近百年来，冻结法已经在各种地层中开凿过许多井筒。为比利时、荷兰等西欧国家和东欧一些国家及加拿大所广泛使用。本世纪二十年代比利时在沼泽地带使用冻结法，其深度达638米。五十年代以来

冻结法应用范围更加广泛。加拿大在开发萨斯喀切温钾矿时，建成了一个冻结深度达915米的井筒。近来英国也建成一个冻结深度达930米的井筒，这是至今最深的冻结深度。

1850年德国开始用冲击钻钻井。当时由于机械制造工业水平所限，钻井法发展不快。1871年德国工程师霍尼曼开始研制扩孔钻机，至1894年取得了专利权。到本世纪三十年代霍尼曼钻机已在欧洲钻了约30个井筒，深度为80~512米，直径2~7.65米。1938年苏联开始使用钻井法，至六十年代的二十几年中先后研制了УЗТМ型扩孔钻机；УКБ型取芯钻机；РТБ型涡轮钻机；ТП型潜入式钻机和ПД型掘进机组等。钻井法适用于各种地层条件，它的主要问题是直径钻井的经济指标不够理想，设备重，功率也大。美国1910年引进钻井法，到五十年代由于地下核试验的需要，大大的促进了钻井法的使用和钻井技术的发展。

其它的特殊凿井方法，如降低水位法，热熔法、爆破压固法等由于使用范围的局限性，而在煤矿建井中应用较少。应当指出：人工降低水位法在基础工程及地下铁道工程中还经常使用，在其它一些工程中也常作为辅助措施。

科学研究成果应用于煤矿建设，大大促进了特殊凿井的发展。相邻学科和技术的发展也促进了特殊凿井技术的进一步提高。这种提高常常是带有飞跃性的。化学工业的发展使注浆法带有突破性的进展；机械制造业和硬质合金材料的发展，对钻井法的发展有重大作用；精密仪器，量测技术、计算技术的发展给特殊凿井理论的研究提供了重要手段。

解放前，我国特殊凿井基本上是空白。新中国的成立，为特殊凿井的发展开辟了广阔的前途。

1953年以来，为适应我国国民经济发展，开始大规模开发新矿区和扩建老矿区。在浅表土中使用板桩法和沉井法建设矿井，而在深厚表土及基岩中相继使用冻结法、注浆法。

板桩法适用于厚度为十几米的表土层，施工较简单，但可靠性差，逐步为沉井法所代替。先后在徐州和淮北地区使用非淹没式沉井，但容易发生涌砂冒泥和偏斜等事故，一般用在20~30米左右的表土层中。1958年8月开始，由徐州基建局第二建井公司，第三建井公司，北京煤炭科学院、北京矿业学院、合肥工业大学等有关单位共同协作，将建桥的震动管柱法引进到矿井建设中来，首创震动沉井法。淮北矿区用这个方法建成一些井筒。以后在华东地区试验泥浆淹水沉井取得很大进展，1978年下沉深度突破百米。1979年下沉深度达180米。

1956年掩护筒法在阜新海州露天矿的疏水巷道中试验成功。以后又在沈北煤田试用过斜井掩护筒法。掩护筒在煤矿建井中应用不多，在地下铁道工程和城市排水工程中应用广泛。

1956年开滦矿区林西矿风井首先使用冻结法凿井，以后在开滦矿区普遍使用。并在1958年先后由唐山矿风井和荆各庄矿主井创造冻结法凿井月成井85.65米；86.69米和135.12米的世界纪录。由于冻结法施工安全可靠而迅速被推广到邢台、淮北和淮南、山东、辽宁和平顶山等地区 and 矿区，并对无盐水冻结进行了工业性试验。1963年开始使用二级压缩制冷。1964年开始对冻结壁和井壁进行压力和温度的综合实测。同年开始应用双层井壁结构，以提高井壁质量。1964年北京矿业学院研究生用模拟的方法对冻结温度场进行了研究。北京煤炭科学院对钻冻结孔设备、测斜仪器的研制都取得进展。七十年代以来淮南煤炭学院将有限元法应用到研究冻结温度场问题并取得进展。1978年鲍店矿北风井创冻

结法凿井月成井167.54米的全国纪录。1979年进行了液氮冻结的初步试验。目前对冻结壁的形成及冻结温度场的研究；冻胀力的实测和分析；井壁材料及结构形式的探讨；以及深井冻结的一系列问题都在研究中，它必将推动冻结技术的进一步发展。

峰峰和焦作两矿区基岩涌水量很大，在五十年代就广泛使用注浆法。当时所用的浆液基本上是不能控制凝聚时间的水泥浆和水泥砂浆。1964年北京煤炭科学院研制成功可控凝聚时间的有机化学浆液MG-646，并成功的进行了工程使用。以水泥为主的单液注浆工艺向双液注浆发展，并研制了专用注浆泵和测试仪表。开滦矿区井筒基岩掘进之前几乎都用预注浆堵水，然后再施工。

1969年元旦，我国第一次进行钻井工业性试验。同年六月完成一个井筒的钻井工作。同时对极硬岩石的钻井也取得成功。

1973年帷幕法首先在鹤岗矿务局应用成功。以后在山东等地得到应用。阜新矿业学院对帷幕法设备和工艺的研究作了许多工作。

应当指出：我国特殊凿井技术发展是不平衡的，有些技术水平还很落后，有待于进一步发展。

三

选择特殊凿井法施工首先是依据工程对象（井筒、巷道、峒室）所处的地质和水文地质情况，以及工程本身的技术特征和质量要求；国家的技术政策和规范；施工队伍的技术情况等综合考虑。这样才能把客观的必要性和主观的可能性结合起来，正确的选择特殊凿井法。

在特定的地质条件下选择特殊凿井法应考虑：技术上是否先进可行；施工的安全可靠；经济的合理性以及技术条件和设备供应状况等因素。

常常在同一个地区，甚至在同一个井筒就选择了一种以上的特殊凿井法综合施工。例如：表土段采用冻结法，而下部基岩采用注浆法。每一个特殊凿井法都有一定的适用范围，盲目的将一种方法用到任意条件，将造成技术上的不合理和经济上严重浪费。

特殊凿井随着井深的增加，在理论上和施工工艺方面都提出了新的课题。例如：壁（井壁、冻结壁、注浆壁等）的外载，应力和应变；钻孔或钻井的偏斜；钻进参数的确定；以及井壁材料，结构形式和施工方法等等，都有待于通过理论分析、模拟试验和现场观测等综合研究解决。

特殊凿井不仅适用于煤矿开凿立井，而且适用在复杂地质条件下开凿斜井、马头门、平巷、峒室等。在其它矿山工程、地下铁道工程、隧道、桥梁基础和建筑物基础、海港工程、水工工程、民防工程和国防军事工程中广泛应用。

综上所述，学习本课程之前应具有工程地质与水文地质；材料力学；结构力学；建井工程结构；井巷工程等课程的知识。还需有热工学和传热学方面的一些知识，否则对本课程的学习会有一定的困难。

第一章 冻结法

第一节 概 述

冻结法凿井是在井筒开凿之前，用人工制冷的方法，将井筒周围的岩层冻结成封闭的圆筒——冻结壁。以抗抵地压，隔绝地下水和井筒的联系，然后在冻结壁的保护下进行掘砌工作的一种特殊凿井法。如图1-1。

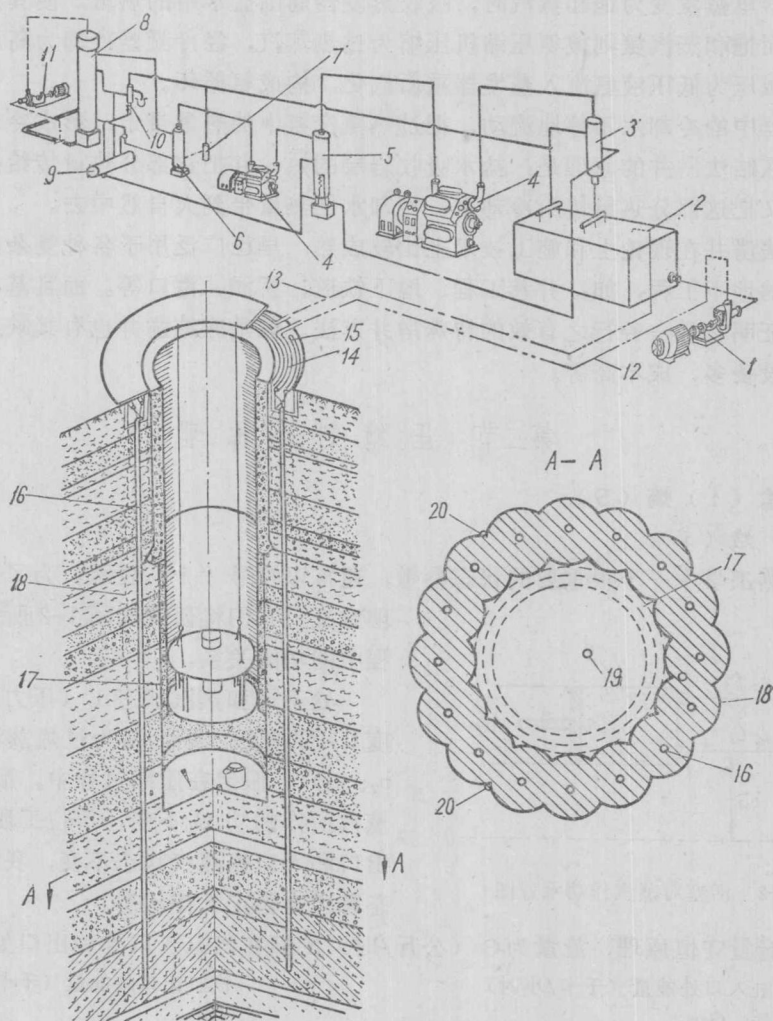


图 1-1 冻结法凿井示意图

1—盐水泵；2—蒸发器；3—氨液分离器；4—氨压缩机；5—中间冷却器；6—油氨分离器；7—集油器；8—冷凝器；9—贮氨器；10—空气分离器；11—冷却水泵；12—去路盐水干管；13—回路盐水干管；14—配液圈；15—集液圈；16—冻结器（内有供液管）；17—井壁；18—冻结壁；19—水文观察孔；20—测温孔

为了形成冻结壁，首先在井筒周围打一定数量的冻结孔，孔内安装冻结器，冻结器由带有底锥的冻结管和底部开口的供液管所组成。冷冻站制出的低温盐水（ -30°C 左右）经去路盐水干管、配液圈到供液管底部，沿冻结管和供液管之间的环形空间上升到集液圈、回路盐水干管至冷冻站的盐水箱，形成盐水循环。低温盐水在冻结管中沿环形空间流动时，吸收其周围岩层的热量，使周围岩层冻结，逐渐扩展连成封闭的冻结圆筒（冻结壁）。随着盐水循环的进行，冻结壁厚度逐渐增大，直到达到设计厚度和强度为止。此间叫积极冻结期。而把掘砌期间称为消极冻结期。由于消极冻结期间只需维护冻结壁不再扩展，也叫维护冻结期。

冻结凿井包括：打钻、冻结、井筒掘砌三大内容。

制冷是利用液氨汽化时吸热的原理来完成的。在制冷系统中，用氨作为制冷工质，液氨在蒸发器里蒸发变为饱和蒸汽时，吸收蒸发器周围盐水中的热量，使其温度降低成为低温盐水。而饱和蒸汽氨则被氨压缩机压缩为过热蒸汽，经冷凝器冷却为高压饱和液氨。再经节流阀减压为低压液氨流入蒸发器重新汽化，构成氨循环。

冷凝器中的冷却水不停地流动，把过热蒸汽氨中的热量带走，形成冷却水循环。

人工冻结法凿井的原理是：盐水吸收岩层的热，并把这部分热量传给氨，经压缩机做功后，氨又把这部分热量传给冷却水，冷却水把热量带到大自然中去。

冻结法凿井在理论上和施工技术上比较成熟，早已广泛用于各种复杂的地质和水文地质情况下的地下工程，如：井巷工程、地下铁道、桥涵、港口等。而且基本上不受深度限制，实践证明它是一种行之有效的特殊凿井方法。但是冻结凿井也有其缺点，例如：准备时间长，设备多，成本高等。

第二节 压缩制冷原理

一、焓（ i ）熵（ S ）

（一）焓（ i ）

焓是热力学中一个很重要的状态参数，通常以符号“ i ”表示。为了正确理解焓的物理意义，我们将研究如图1-2所示的压缩蒸汽过程中的功能关系。

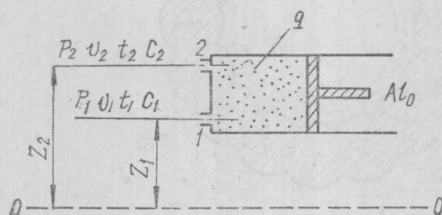


图 1-2 活塞对蒸汽做功示意图

处于饱和蒸汽状态 1（压力 P_1 、比容 v_1 、温度 t_1 ）的氨被压缩而变为过热蒸汽状态 2（ P_2 、 v_2 、 t_2 ）。假定在压缩过程中，活塞对单位重量蒸汽所作的功 Al_0 不变，单位工质热损耗 q 不变，出口和入口氨蒸汽状态不变，我们将这种工作状态称之为稳定工作状态。

根据能量守恒原理，流量为 G （公斤/时）的氨在汽缸入口处和出口处的能量有：

汽缸入口处能量（千卡/小时）

内能 Gu_1

动能 $A \frac{G}{2g} C_1^2$

位能 AGZ_1

压能（流动功） AGP_1v_1

汽缸出口处能量（千卡/小时）

Gu_2

$A \frac{G}{2g} C_2^2$

AGZ_2

AGP_2v_2

活塞对蒸汽做功 GAJ_0 。

汽缸的散热量

Gq

式中 G —— 氨的流量 (公斤/小时)；

u_1 、 u_2 —— 入口处和出口处单位氨的内能 (千卡/公斤)；

A —— 热功当量 $A = \frac{1}{427}$ (千卡/公斤·米)；

g —— 重力加速度；

C_1 、 C_2 —— 入口处和出口处的流速；

Z_1 、 Z_2 —— 入口处和出口处相对标准面的高度；

P_1 、 P_2 —— 入口处和出口处的压力；

v_1 、 v_2 —— 入口处和出口处氨气的比容；

l_0 —— 活塞对单位重量氨所作的理论功；

q —— 单位重量氨的热损耗。

因过程是稳定的，在任何时刻，汽缸输入和输出能量必相等：

$$G(u_1 + A \frac{C_1^2}{2g} + AZ_1 + AP_1 v_1 + Al_0) = G(u_2 + A \frac{C_2^2}{2g} + AZ_2 + AP_2 v_2 + q) \quad (1-1)$$

移项得：

$$q = (u_1 + AP_1 v_1) - (u_2 + AP_2 v_2) + \frac{A}{2g} (C_1^2 - C_2^2) + A(Z_1 - Z_2) + Al_0 \quad (1-2)$$

(千卡/公斤)

上式称为开口体系的稳定流方程。实际上，当 $Z_1 = Z_2$ ； $C_1 = C_2$ ，忽略汽缸散热量时 ($q \rightarrow 0$) 则：

$$Al_0 = (u_2 + AP_2 v_2) - (u_1 + AP_1 v_1) \quad (1-3)$$

$$\text{令：} \quad i_1 = u_1 + AP_1 v_1 \quad i_2 = u_2 + AP_2 v_2 \quad (1-4)$$

$$\text{则：} \quad Al_0 = i_2 - i_1 = \Delta i \quad (\text{千卡/公斤}) \quad (1-5)$$

(1-4) 式中之 $i = u + APv = C_{vm} \Delta t + ART$ 称作焓， Δi 是焓差。活塞压缩单位重量氨所作的理论功叫单位理论功 Al_0 ，它等于进出口的焓差。焓是一个能量，是比内能和比压能的和。 C_{vm} 是定容平均比热， R 是气体常数， T 是绝对温度，因此，焓是温度的单函数，即某状态下的焓值只与该点的温度有关，两点的焓差只与两点温差有关，而与两点间的过程无关，因而焓是一个状态参数。

焓可以用于任何稳定流开口体系。

在换热器 (冷凝器、蒸发器) 中，显然 $Al_0 = 0$ 、 $Z_1 = Z_2$ 、 $C_1 = C_2$ ，则稳定流方程可变为：

$$q_K = i_1 - i_2 = \Delta i \quad (\text{千卡/公斤}) \quad (1-6)$$

(1-6) 式表明，氨汽在冷却过程中每单位重量的氨向冷却水传递的热量等于冷凝器进出口处氨的焓差。在冷凝器中， q_K 叫单位冷凝热量。在蒸发器中叫单位制冷量。

节流过程前后，因过程为绝热的 $q = 0$ 、无机械功 $Al_0 = 0$ 、假如略去节流前后的动能损失，即 $C_1 = C_2$ ，则稳定流方程将变为 $\Delta i = 0$ 或 $i_1 = i_2$ ，这表示，节流过程可近似看做等焓过程。

综上所述, 焓有着极其广泛的用途。

(二) 熵 (S)

熵是热力学中又一个重要参数, 通常以 “S” 表示。熵是在研究卡诺循环热效率中发

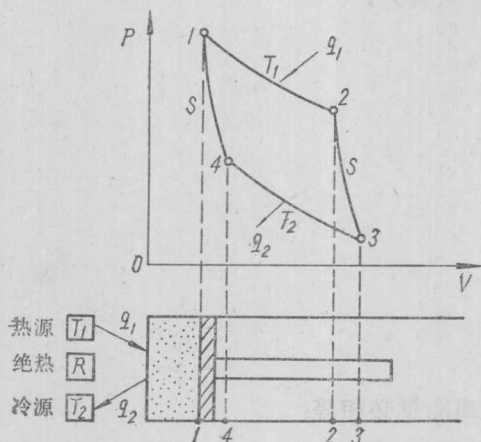


图 1-3 卡诺循环

发现的。卡诺循环 (图 1-3) 是由两个等温过程 1-2 和 3-4, 两个绝热 (等熵) 过程 2-3 和 4-1 所组成的理想循环。

汽缸内有一定量汽体, T_1 是定温热源 (也叫无限大热源), 接触汽缸后, 给汽缸热量 q_1 , 活塞从位置 1 等温膨胀到 2 热源 T_1 离去; R 是绝热体, 马上接触汽缸, 活塞从位置 2 绝热膨胀到 3; T_2 是定温冷源, 接触汽缸后从汽缸中吸取热量 q_2 , 活塞从位置 3 等温收缩到 4, 冷源 T_2 离去; R 绝热体马上接触汽缸, 活塞从位置 4 绝热收缩到 1。过程 1-2-3-4 构成了理想的卡诺循环, 其热机效率:

$$\eta = \frac{q_1 - q_2}{q_1} = \left(1 - \frac{q_2}{q_1}\right) 100\% = \left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right) 100\% \quad (1-7)$$

(1-7) 式表示, 热机效率 η 仅与 T_1 、 T_2 有关而与工质无关。欲提高热机效率 η , 必须提高 T_1 降低 T_2 。卡诺循环的热效率不等于百分之百, 当 $T_1 = T_2$ 时, 无热功转换。上式又可写作:

$$\frac{q_2}{q_1} = \frac{T_2}{T_1} \text{ 或 } \frac{q_2}{T_2} = \frac{q_1}{T_1}$$

若吸热为正, 则放热为负, 所以 dq_1 和 dq_2 相差一个负号, 故上式可写作:

$$\frac{q_1}{T_1} + \frac{q_2}{T_2} = 0 \text{ 或 } \sum \frac{q}{T} = 0 \quad (1-8)$$

对于任意一个可逆循环, 我们可以将之分为无穷多个小的卡诺循环, 对于整个循环可认为是:

$$\sum \frac{dq}{T} = 0 \text{ 或 } \oint \frac{dq}{T} = 0 \quad (1-9)$$

在卡诺循环热效率的计算中, 发现了 dq/T 的存在, 于是令:

$$dS = \frac{dq}{T} \quad (1-10)$$

式中 dS 称为微熵, S 是熵, 如图 1-4 所示, dS 为过程 1-2 中的 A-B 两点的微熵, dq 是 A-B 微段工质吸收的热量, T 是当时工质的温度, 1-2 两点熵差等于:

$$S_2 - S_1 = \int_1^2 \frac{dq}{T} = \int_{T_1 V_1}^{T_2 V_2} \frac{C_V dT + A P dV}{T}$$

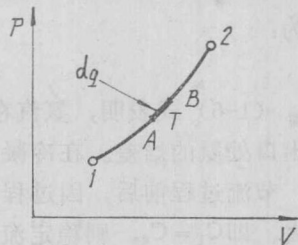


图 1-4 熵的定义

$$= C_{vm} \ln \frac{T_2}{T_1} + AR \ln \frac{V_2}{V_1} \quad (\text{千卡/公斤} \cdot \text{度}) \quad (1-11)$$

式中 C_{vm} ——定容平均比热。

由上式可知熵是一个状态参数，熵差只与两点状态有关，而与中间过程无关，在计算中一般不计算某点熵的绝对值，而计算其两点的熵差，为作图方便，一般把压力 $P = 1.0333$ 公斤/厘米²，温度 $T = 273^\circ\text{K}$ 时的熵作为起始熵 $S_0 = 0$ 。

熵的单位是千卡/公斤·度，与比热的单位相同，但其意义却不同，因为比热的定义是工质吸收的热量 dq 被温度差 dT 除，而微熵差则是被当时的工质温度 T 除。因此，熵没有简单的物理意义，只能理解为一个新的状态参数。吸热过程熵增加，放热过程熵减少，绝热过程则等熵。

(三) 氨的压-焓图 (常称 i - $\lg P$ 图)

图1-5中 (a) i - $\lg P$ 全图示意；(b) i - $\lg P$ 实用计算示意图。纵坐标不用 P 的目的只是为了缩短图的纵向长度。横坐标是焓值。图中曲线表示各状态参数之间的函数关系：

$$P = (X, t, v, S, i)$$

除 P 、 i 外，每个参数由一组曲线表示。

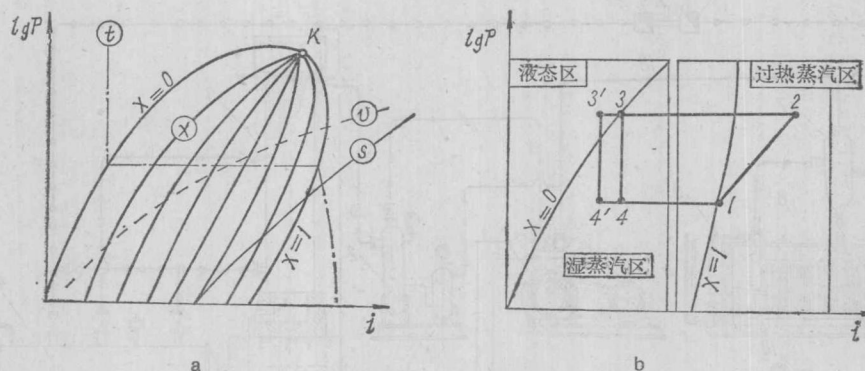


图 1-5 氨的压-焓 (i - $\lg P$) 示意图

a— i - $\lg P$ 全图示意；b— i - $\lg P$ 实用计算示意图

等干度线 X : X 线是通过临界点 K 的一组实线 (—)，所谓干度是：一公斤湿蒸汽中饱和蒸汽的含量，例： $X = 0.3$ ，则表示一公斤湿蒸汽中饱和蒸汽有 0.3 公斤。图中左边 $X = 0$ (饱和液体) 线和右边 $X = 1$ (饱和蒸汽) 线把全图分为三个区域，即液态区、湿蒸汽区 (也叫过渡区) 和过热蒸汽区。

等温线 t : t 线用点划线表示 (·—·—·)，在液态区和 i 坐标垂直，在湿蒸汽区和 i 坐标平行，在过热蒸汽区与 i 坐标斜交。

等容线 v : v 线用间断线表示 (——)，在液态区，氨之比重不随压力、温度而变化，在湿蒸汽区和过热蒸汽区，都向右上方倾斜。

等熵线 S : S 线用细实线表示 (——)，在湿蒸汽区及过热蒸汽区都以很大的斜率向右上方倾斜。

在全图中， K 称为临界点 (极点)，从图上可知，随着压力增高湿蒸汽区在缩小，当

压力增至某一定值时，饱和液体线和饱和蒸汽线将交于一点K。此时饱和液体和饱和蒸汽有着相等的压力，温度和比容。这种状态称之为临界状态。氨的临界压力 $P_{Kr} = 115.2$ 绝对大气压，临界温度 $t_{Kr} = 132.4^{\circ}\text{C}$ ，临界比容 $v_{Kr} = 0.00413$ 米³/公斤。

二、一级压缩制冷

(一) 一级压缩制冷理论循环

整个制冷过程可分为三个循环系统：即氨循环系统、盐水循环系统和冷却水循环系统（图1-6）。氨（制冷剂）循环系统：气体氨在压缩机1中，被压缩到8~12个大气压，其温度升高到80~120℃。高温高压的气体氨经管路进入油脂分离器2，除去从压缩机1中带来的润滑油再进入冷凝器3。并与16~20℃的冷却水进行热交换，使气体氨冷却到20~25℃，气体氨变为液体氨（多余的液氨放入贮氨器贮存，不足时由贮氨器补充）。液氨经关闭阀5再通过调节阀6压力降低至1.55大气压左右。温度相应的降低到蒸发温度（-25~-30℃），液氨经氨液分离器7，将调节阀6处所蒸发的氨气分离，而液氨依自重流入蒸发器8中进行蒸发，吸收周围盐水的热量，使盐水降温。蒸发后的氨沿管路再进入氨液分离器7进行分离，使未蒸发的液氨再流入蒸发器8。而气体氨则经管路18重新被压缩机1压缩。这样连续进行，完成氨的循环。

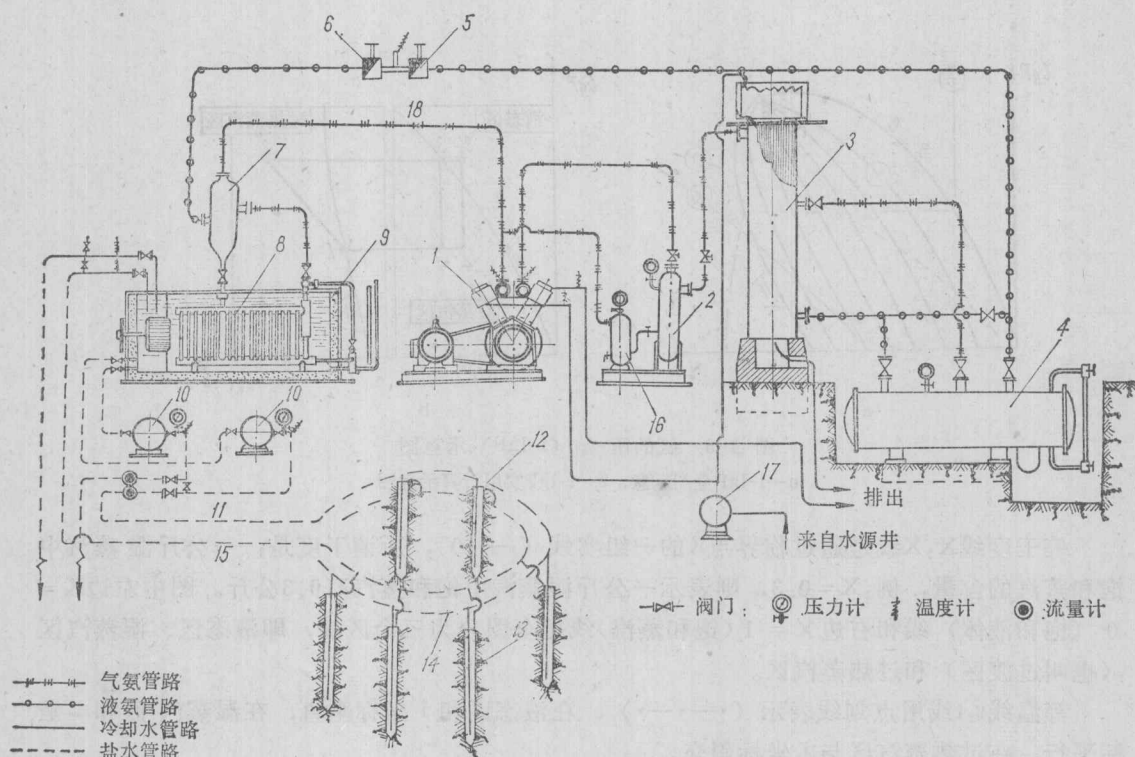


图 1-6 一级压缩制冷三大循环示意图

- 1—氨压缩机；2—油脂分离器；3—冷凝器；4—贮氨器；5—关闭阀；6—调节阀；7—氨液分离器；
 8—蒸发器；9—盐水箱；10—盐水泵；11—供液干管；12—配液圈；13—冻结器；14—集液圈；
 15—回液干管；16—集油器；17—冷却水泵；18—低压氨管路

氨循环制冷过程实际上是卡诺逆循环的热功转换过程。为研究方便，把循环系统列成

简图（图1-7）。

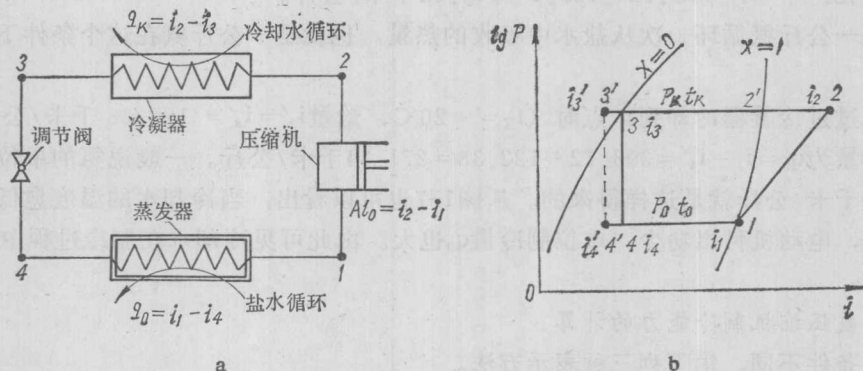


图 1-7 一级压缩制冷示意图

a—系统图；b— i - $\lg P$ 图

图1-7的条件是：氨的汽化压力 $P_0 = 1.55$ 大气压，汽化温度 $t_0 = -25^\circ\text{C}$ ，则其焓量 $i_1 = 393.72$ 千卡/公斤。冷凝温度 $t_K = +25^\circ\text{C}$ ，冷凝压力 $P_K = 10.23$ 大气压。则其热功变化过程为：

1→2是绝热压缩过程，也就是等熵过程。

压力： $P_0 \rightarrow P_K$ ，1.55→10.23大气压；

温度： $t_0 \rightarrow t$ ， $-25 \rightarrow +115^\circ\text{C}$ ；

焓量： $i_1 \rightarrow i_2$ ，293.72→462千卡/公斤；

焓量变化： $A_{l_0} = i_2 - i_1 = 462 - 293.72 = 168.28$ 千卡/公斤。

这里的焓量变化168.28千卡/公斤即为压缩机压缩一公斤氨所作的理论功。

2→3是等压冷却过程。自2'点开始氨逐渐液化，到3点则全部液化为液态氨。

压力： $P_K = 10.23$ 大气压；

温度： $t \rightarrow t_K$ ， $+115 \rightarrow +25^\circ\text{C}$ ；

焓量： $i_2 \rightarrow i_3$ ，462→128.1千卡/公斤；

焓量变化： $i_2 - i_3 = 462 - 128.1 = 333.9$ 千卡/公斤。

从2→3焓量的变化是一公斤氨冷凝中所放出的热量。焓量变化333.9千卡/公斤的热量是一公斤氨从盐水和压缩机做功所得热量的总和。这些热量均被冷却水所吸收。

3→4是在调节阀处的绝热降压过程，也就是等熵过程。

压力： $P_K \rightarrow P_0$ ，10.23→1.55大气压；

温度： $t_K \rightarrow t_0$ ， $+25 \rightarrow -25^\circ\text{C}$ ；

焓量： $i_3 = i_4 = 128.1$ 千卡/公斤。

因为没有热交换，焓量为常数。这一过程中温度的下降，是由液态氨蒸发了一小部分时吸收液氨自身的热量，而使温度下降。

4→1是等压等温蒸发过程，这个过程中，压力不变、温度不变，氨蒸发时吸收盐水的热量进行制冷。而氨则由液体蒸发而转变为气体。

压力： $P_0 = 1.55$ 大气压；

温度： $t_0 = -25^\circ\text{C}$ ；