

高等学校教学用书

雅 氏 工 程 热 力 学

下 册

A·C·雅斯特烈姆斯基著

沈 维 道 译



中国工业出版社

本书是高等工业学校“工程热力学”课程的教科书。

原书共分三編，第一編根据热力学的两个定律阐述了一般原理，另以特別章节敘述了气体的热力学和內燃机的循环。

第二編是实际气体的热力学，在这一編中研究了水蒸汽热力学的一般問題，对于一些最重要的状态方程式进行了分析，并以很多篇幅研究了蒸汽动力循环。

第三編簡要敘述了化学热力学的基本原理。

譯本分上下两册出版。本书是下册，它包括原书的第二編和第三編。

А. С. ЯСТРЖЕМБСКИЙ
ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕРМОДИНАМИКА
ГОСЭНЕРГОИЗДАТ
МОСКВА—1953

* * *

雅氏工程热力学

下 册

沈 維 道 譯

(根据水利电力出版社紙型重印)

*

水利电力部办公厅图书編輯部編輯 (北京阜外月坛南營房)

中国工业出版社出版 (北京修羅閣路丙10号)

(北京市书刊出版事业許可証出字第110号)

中国工业出版社第二印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 • 各地新华书店經售

*

开本 $850 \times 1168 \frac{1}{2}$ • 印張 $8 \frac{7}{8}$ • 插頁1 • 字數253,000

1957年8月北京第一版

1961年5月北京新一版 • 1961年11月北京第二次印刷

印數2,531—4,330 • 定价(10)1.60元

*

統一书号: 15165 • 19(水电-10)

下 册 目 录

第 二 編

导言	285
第 九 章 基本的定义和公式、水蒸汽的 p v 圖	292
9-1 基本定义	292
9-2 水蒸汽的 p v 圖	295
9-3 三相点	297
9-4 液体的加热过程，汽化过程和蒸汽的过热过程	300
9-5 干饱和蒸汽	308
9-6 湿饱和水蒸汽	313
9-7 克拉貝隆-克勞修斯方程式	315
9-8 过热蒸汽	316
9-9 过热蒸汽状态方程式	318
9-10 过热蒸汽的比热	322
9-11 过热蒸汽的比容，热量，內能，焓和熵	327
9-12 水蒸汽表	332
9-13 水蒸汽的 T s 圖	338
9-14 水蒸汽的 i s 圖	340
第 十 章 水蒸汽状态变化的一些基本过程	344
10-1 圖解計算法	344
10-2 解析計算法	349
10-3 絕热过程的近似計算法	353
10-4 水蒸汽的流动	360
10-5 水蒸汽的节流过程	367
第 十 一 章 蒸汽动力裝置的循环	371
11-1 导言	371
11-2 卡諾循环	379

72.59
620
2:2

11-3 蒸汽动力装置的基本循环	381
11-4 蒸汽的参数对循环热效率的影响	383
11-5 蒸汽动力装置循环的热力学上的完善程度。循环的相对热效率	384
11-6 当蒸汽进行不可逆的绝热膨胀时蒸汽动力装置的循环	400
11-7 蒸汽的再热循环	405
11-8 热化的热力学基础	412
11-9 蒸汽动力装置的回热循环	417
11-10 高参数水蒸汽的一般意义	425
11-11 两汽循环	429

第三编

导言	441
----------	-----

第十二章 热力学第一定律应用于化学反应	444
---------------------------	-----

12-1 系统的分类	444
12-2 化学反应的分类	445
12-3 热力学第一定律的基本方程式应用于化学反应	447
12-4 化学反应的最大热量	449
12-5 盖斯定律	452
12-6 反应热与浓度的关系	458

第十三章 热力学第二定律应用于化学过程	463
---------------------------	-----

13-1 一般原理	463
13-2 自由能	484
13-3 热力学的定压位	468
13-4 最大功	487
最大功的方程式	470

章 热力学第二定律应用于化学反应、化学系统的平衡	471
--------------------------------	-----

1 导言、基本的定义	471
14-2 化学平衡	473
14-3 分解、分解度	484
14-4 化学亲和、平衡常数与反应最大功之间的关系。化学亲和力的度量	438
14-5 温度对化学亲和力的影响	495



14-6 定压汽化过程	504
第十五章 热定理。平衡常数的确定	509
15-1 热定理	509
15-2 热定理对气体反应的应用	517
15-3 在气体反应的平衡常数方程式中, 积分常数的计算	519
15-4 平衡常数方程式的另一个形式	522
15-5 某些反应的特征	530
第十六章 温度对反应速度的影响	542
16-1 反应速度与温度的关系	542
16-2 确定化学反应的速度常数与温度之间的关系方程式	543
参考文献	549
附 录:	
III 过热水蒸汽的平均比热(从饱和温度起计算) 大卡/公斤度	551
IV 水和过热水蒸汽	553
V 饱和水蒸汽(依温度排列)	562
饱和水蒸汽(依压力排列)	563
VI 水银饱和蒸汽	565
VII 水银蒸汽 t_s 图	566
水蒸汽 t_s 图(另附)	



2K501/25

第 二 編

导 言

在本教科書的第一編中曾經研究过热力学的一些基本定律和理想气体的一些定律，以及在研究过程和循环时这些定律的应用。

理想气体的这些定律不能在所有的条件下推广到实际气体上去，尤其不能推广到液体的饱和蒸汽和过热蒸汽上去。当压力增大以及当温度降低，这相应于当气体的密度增大时，实际气体与理想气体諸定律之間的偏差就增大。在这些情况下，就不能忽略分子的容积以及分子之間相互的作用力。

这时实际气体与理想气体定律之間的偏差表现于：在定温下，这些气体的 pV 乘积不是定数，这些气体的膨胀系数 α 是变数，在某些情况下，这系数与理想气体的膨胀系数頗有差别，理想气体的膨胀系数等于 0.00366（例如，在 100 绝对大气压时，氫的膨胀系数等于 0.00355，而在 1000 大气压时，等于 0.00218），以及在标准状态时，实际气体的摩尔容积不等于 22.4 公尺³。

实际气体与理想气体定律的差别也表现在，这些气体的内能乃是任意两个独立参数的函数，而理想气体的内能则只是温度的函数。

从理想气体諸定律得出，比热 c_p 、 c_v 以及这些比热之間的差值乃是常数，而实际气体的这些比热以及这些比热之間的差值乃是一些变数，这些变数随气体的初态和气体的一些参数而定。

对于实际气体，系数 $k = \frac{c_p}{c_v}$ 也是变量。

在第六章中（热力学的微分方程式），曾經导出实际气体各个热力学的量，各个参数之間的普遍关系，这些关系乃是用解析方法确定这些气体一般性質的出发点，特别是在确定水蒸汽性質的时候。

在 § 1.4 中曾經研究过实际气体的某些状态方程式，这些方程式

中包含对分子的容积以及分子間相互作用力的修正項，并且介紹过 M.П. 烏卡諾維奇教授的方程式，这个方程式是根据实际气体合理的理論推导而得出的。这些方程式的分析可以确定实际气体基本的和一般的性質，并且可以确定物質集态变化的条件。

与物質运动学說的建立和發展有密切关系的实际气体理論的發展，在許多方面应归功于俄国学者們的著作和研究。物質运动学說的基本原理是由 M. B. 罗蒙諾索夫在十八世紀的 40 年代所提出，罗蒙諾索夫乃是这个学說的首創人之一。有了这个学說就可以建立热力性質的正确观点。

在实际气体一般理論的發展上，俄国学者們的研究和工作作出了巨大的貢獻。

H.H. 皮罗哥夫教授在物質运动学說这一方面作了深入的研究。皮罗哥夫多年研究的結果，叙述在一系列的論文中，这些論文發表在十九世紀的 80 年代和 90 年代^①。皮罗哥夫主要的研究工作，發展了并且确定了物質运动学說，这在确定所研究的問題的历史方面具有非常重要的意义。

在 1860 年，Д.И. 門德列也夫首先确定，所有各种物質都具有一定的临界温度。这个發現具有巨大的意义，它乃是实际气体一般理論的基础。

門德列也夫对气体压縮性的問題以及对比热一般理論的問題也作了研究^②。

在对物質临界状态的研究中，应当指出莫斯科大学 A.Γ. 斯托列多夫教授(1839—1896)的著作，他給出了研究临界状态的光学方法；基輔大学教授 M.П. 阿温納利烏斯(1835—1895 年)的著作，他拟定了确定临界温度的方法，在各种物質临界温度的測定上他也进行了很多实验研究，同时也应当指出，扎伊昂甫斯基，帕甫列夫斯基，納傑日勛，斯特拉烏斯以及其他学者，他們与阿温納利烏斯教授共同工作，并且是他的学派的一些承繼者。

① 俄国物理化学学会会刊。

② Д.И. 門德列也夫：論气体的压縮性，俄国化学学会会刊，1872。

納傑日勒(1882年)拟定了确定临界温度独创的实验方法。他所发明的仪器的作用原理是基于在临界温度时液体的密度和蒸汽的密度相同的这一事实。

斯特拉烏斯在 1880 年发现了确定混合液体临界温度的定律，并且导出了公式，这个公式规定了混合液体的临界温度与组成混合液体的那些液体的临界温度之间，以及与混合液体的成分之间的关系^①。

水蒸汽理論的建立和发展还归功于很多学者的实验和理論的研究。

应当指出賴伍奥在水蒸汽性質方面的实验和理論的研究工作，这些工作的最初一些結果發表在 1840 年。

在十九世紀末，建立了水蒸汽物理量之間的一般关系，并且确定了这些物理量的数值，一直到 20 绝对大气压为止。在这一段时期內，建立了饱和蒸汽的压力和温度之間的关系，以及压力和比容之間的关系。此外，在 20 绝对大气压以下的範圍內，由实验测得了液体热，汽化潜热，和蒸汽总热的数值。

从上一世紀的 90 年代开始，在蒸汽动力裝置中，过热蒸汽的应用开始迅速地被推广起来，而大約从这一世紀的 20 年代起，开始了高压蒸汽的应用(如果不去注意在这以前对这一种蒸汽所进行的个别試驗性的应用)。高参数蒸汽的应用以及在这一段时期內蒸汽动力裝置的非常迅速的发展，促使蒸汽工作的新的热力循环的建立，并在研究蒸汽的物理性質和确定蒸汽参数的这一方面，促进了很多理論和实验的研究工作。关于編制水蒸汽表，在这一段时期內进行了特別紧张的工作，因为一些老的蒸汽表都是根据賴伍奥的实验研究的数据編制的，所包括压力的范围在 20 绝对大气压以下，已經不能保証蒸汽技术計算上的应用。在 1904 年，莫理耳編制了水蒸汽的 *is*-綫圖，在計算过程和循环时，这个綫圖具有巨大的意义。在这一段时期內也进行了最初的一些嘗試，在这一些嘗試中，不仅根据了一些实验的数据和一些經驗公式，而且也应用了規定各个量和热力学函数之間一般的解析

① O. 斯特拉烏斯：論某些混合物的临界温度，俄国化学学会会刊，1880。

关系的热力学定律和方程式以編制水蒸汽表。

从这一世紀的20年代起，开始广泛地实施这样的蒸汽工作循环，这些循环不但提高了裝置一般的經濟性，而且改善了裝置某些运行的特性。

在应用高参数蒸汽的許多大功率的蒸汽动力裝置中，已經开始应用蒸汽的再热循环，回热循环，利用作过功的蒸汽的热量的循环(供热循环)，以及后来的兩汽循环，在兩汽循环中，最初在生产上实现的，是水銀和水的兩汽循环。

在确定水蒸汽性質这一範圍內的研究在这一段时期內，仍然停留于实验性的研究，但是这些研究的发展，在各个实验室中具有各种不同的方向。

在現時，科学研究的基本任务乃是，第一：建立水蒸汽合理的理論，这个理論包括在广泛的参数变化範圍內水蒸汽的物理性質，这广泛的参数变化范围是从隣近饱和状态的状态到具有比临界参数更高的参数的状态，第二：在这一理論的基础上拟定准确的水蒸汽状态方程式。

这些任务的正确解决，只有在广泛进行实验研究的基础上才有可能。具有很大意义的水蒸汽合理理論的建立，可以解决編制准确的計算出来的水蒸汽表和綫圖这一个任务。俄国的学者們是提出这个偉大任务的先驅者。在这一範圍內，最初的一些工作中之一，乃是烏卡諾維奇教授和諾維科夫的研究工作^①。

这些問題历史上更为詳細的說明，在本教科書的許多章节中被給出，这些章节包括§9-8, §9-9, §9-10, §9-12, §11-1等。在二十世紀初期，俄国学者对于建立水蒸汽理論和理論的体系，以及建立蒸汽机和汽輪机的热力学理論的一些工作中特別应当指出的是格利聶魏茨基，拉德婁格，勃拉恩德特，密尔察洛夫等人的著作。

在A. A. 拉德婁格教授許多著作中，直接关于水蒸汽的热力学性質，并且具有極为重要的意义的，可以指出下列这一些：

^① M. П. 烏卡諾維奇教授和И. И. 諾維科夫：实际气体的热力学性質的研究，苏联科学院出版，1940。

1. 水蒸汽的公式, 表和綫圖。这一著作出版了好几次(第三版在1931年), 在其中给出了水蒸汽的状态分析的理論, 簡述了在这一时期最新的实验研究和水蒸汽表。在这一部可靠的著作的附录中, 对于所研究的问题, 给出了詳細的文献目录。

2. 热力发动机最新的发展趨勢(1923年出版)。在这一著作中, 对20年代以前的热力发动机发展的途徑和提高它們經濟性的方法给出了叙述和分析。在第一章中, 叙述了蒸汽机的热力學的基本理論; 在第二章中, 研究了現代的热力发动机的型式以及导出在热力发动机中热的利用的分析; 在第三章中, 研究了在热力发动机中提高热能利用的方法。从确定蒸汽动力裝置的热力學理論的发展这一观点看来, 最后这一章表现出最有兴趣, 在这一章中叙述了应用高参数蒸汽, 水的回热加热, 兩汽循环, 以及热能和电能的联合生产等的結果。

在 A.A. 勃拉恩德特教授和 Н.И. 密尔察洛夫教授的著作中, 我們指出下列这一些:

在教科書“热力學基础”中, 这教科書出版过三次(第一版在1893年, 最后一版在1918年), 勃拉恩德特教授以对所研究現象的物理本质深入的分析, 给出了水蒸汽系統化的理論。

属于勃拉恩德特教授的著作的还有“俄国的蒸汽机和蒸汽原动机的历史論述”, 这書在1892年出版。

应当指出, 关于蒸汽机历史上最早的一些叙述之一是霍京斯基的著作“蒸汽机, 蒸汽輪船和蒸汽机車的历史”, 聖彼得堡, 1853年。

Н. И. 密尔察洛夫教授在关于热力學的教科書中(1927年出版), 对水蒸汽的一般理論有过詳細的叙述, 同时論述了有关这方面实验和理論的研究。

最近几十年內, 在建立实际气体的理論, 拟定实际气体的状态方程式和确定計算实际气体的一些物理量的方法的这些方面的工作中, 特別值得注意的是(以前已經指出过)烏卡諾維奇教授和諾維科夫的一些研究工作。这个理論的建立使烏卡諾維奇教授得以編制水蒸汽表。

与水蒸汽理論发展的同时, 建立了蒸汽机的热力學理論, 这个理論最初的一些原理是在1824年由卡諾所提出。在上一个世紀的50年

代建立了郎肯和克勞修斯的蒸汽动力裝置的理想循環。

蒸汽机和汽輪機理論上的發展，以及它們的熱計算的確定，應歸功於俄國學者們許多著作和研究，首先是格利聶魏茨基，拉德捷格等人的著作。格利聶魏茨基教授在內燃機理論部分的研究具有非常巨大的意義，根據這些研究，他給出了內燃機的熱計算，此外，格利聶魏茨基教授的功績乃是建立了蒸汽機工作過程和它的物理本質的理論的基本原理。格利聶魏茨基教授的教程“蒸汽機——工作過程的理論”，直到現在還不曾失去它的意義，它仍然是蒸汽機理論方面的基本著作。格利聶魏茨基教授在熱動力裝置的理論部分有過很多的研究，其中也包括對熱動力裝置的工作深入的技术經濟上的分析。

在二十世紀的最初幾十年中，關於蒸汽鍋爐的理論、計算、構造和鍋爐運行的實驗研究的基本工作，有葛符利連科，格利聶魏茨基，基爾施，舒霍夫，拉姆金，以及很多其他俄國學者的著作。

A. П. 葛符利連科教授的“蒸汽鍋爐”教程，一直到20年代為止，是論述鍋爐的理論、計算、構造、運行和試驗的一部嚴整而詳細的教程。格利聶魏茨基教授給出了蒸汽鍋爐的圖解計算法；基爾施教授對蒸汽鍋爐的工作過程和確定鍋爐的理論和計算的研究，作了許多實驗的和理論的研究工作。舒霍夫和拉姆金建立了新穎的鍋爐的構造。舒霍夫式的鍋爐在工業上具有廣泛的應用。拉姆金式的鍋爐乃是蘇聯第一種大功率的單流式鍋爐。Г. Ф. 克諾爾教授明確地建立并發展了爐內過程的理論。

蘇聯的一些科學研究機關（蘇聯科學院動力研究所，全蘇熱工研究所，中央鍋爐汽機研究所，莫洛托夫動力學院等），在水蒸汽理論的發展，水蒸汽物理性質的研究，特別是在高參數時，準確的蒸汽表的編制方面，以及在蒸汽動力裝置理論的發展方面的研究，具有非常巨大的意義。

這些研究機關各自建立了它們自己的學派和專家們的一些巨大的團體，這些專家在所研究的科學部門中進行着深入的研究，這些研究對於我們社會主義有計劃的動力事業具有非常巨大的意義，而這一動力事業正以史無前例的速度在發展着。

我們的动力工程的发展循着建立大型电力站的途径前进。特别是，联合生产电能和热能的中心热电站得到了广泛的发展。

为了实现这个宏大的动力事业的建设工程，建立了一些巨大的汽轮机制造工厂，在这些工厂中，制造着最现代化的、大功率和高速的汽轮机，这些由祖国设计并制造的汽轮机是以高参数蒸汽来工作的，有了这些汽轮机便可能去建设在苏联的装置中前所未有的巨大的动力站。

卫国战争以后动力事业的发展由苏联关于1946—1950年的恢复和发展国民经济的五年计划的指示所规定。在这个指示中写道：“在电站中运用最新的技术——应用高压和高温的蒸汽，最新式的联合生产电和热的汽轮机以及最新式的锅炉。……”（第I章，§10）

在现今，已广泛地应用着压力为100绝对大气压和温度为500°C的蒸汽。把压力提高到170绝对大气压和把温度提高到550°C的这一任务已经获得解决。

苏联动力工程今后的发展，由十九次党代表大会关于1951—1955年苏联发展的五年计划的指示所规定。

在这些指示中写道（关于动力工程）：

第I章§2——“在1955年，与1950年相比，最主要种类的工业产品的生产量的增加，大致规定如下：

电力	80%
汽轮机	2.3倍
蒸汽锅炉	2.7倍

第I章§6——“在五年内，电力站的总容量将大约增加一倍，而水电站的总容量将大约增加二倍，在火电站方面，首先保证扩大现有的一些企业”。

“保证建设热电中心站和供热管路网，以实现对城市和对工业企业的广泛的供热”。

由第十九次党代表大会所规定的，苏联的动力工程今后非常高度的发展，在学者，生产者和苏维埃的社会人士的面前提出了伟大的任务，这些任务的解决将会促进在我们的国家内的共产主义建设，提高

我們國家的力量和防衛的能力。這些任務的解決乃是社會主義，蘇維埃的技術和科學的偉大的新勝利。

第九章

一、基本的定義和公式、水蒸汽的加溫

9-1 基本定義

在這一節中，介紹一些關於蒸汽和汽化過程一般的定義和名詞。

蒸汽 臨界溫度比較高的，並且接近飽和狀態的實際氣體叫做蒸汽。

對於臨界溫度低的一些實際氣體，一直到飽和狀態為止，通常都保持着氣體這一名稱。

汽化 液體轉變成蒸汽的過程叫做汽化。

蒸發 蒸發是指一種汽化，這種汽化只在液體的表面上以及在任何溫度下發生。蒸發的強度隨液體的性質和溫度而定。蒸發現象是由於位置在液體表面附近的一些個別的具有高速度的，也就是它們的動能較其他分子的動能為大的液體分子，克服了鄰近分子強大的構成了表面張力的作用力，從液體飛入週圍的空間。蒸發的強度隨溫度的升高而增大，因為這時分子的速度和動能都增大，而分子間的相互作用力則減小。在蒸發時，液體的溫度降低。這個現象是由於，當液體蒸發時，從液體中飛出的一些分子具有較大的速度，因此，留在液體中的分子運動的平均速度就減小。如果液體上面的空間沒有限制的話，那末液體可以完全蒸發完。

沸騰 當向液體傳入熱量時，液體的溫度升高，同時蒸發的強度增大。在某一個完全一定的溫度，汽化開始在液體的全部質量中發生，這溫度隨液體的性質和作用在其上的壓力而定，這時，蒸汽的汽泡開始在容器的壁面上和液體的內部形成。這種現象叫做液體的沸

騰。这时所得到的蒸汽具有在其中进行沸騰过程的介質的压力。

凝結 当从蒸汽中放出热量时所实现的蒸汽轉变为液体的过程叫做凝結过程，凝結过程乃是汽化的逆过程。这个过程，与汽化一样，如果压力一定时它是在一定温度下發生的，在蒸汽动力裝置中，蒸汽凝結时所形成的液体叫做凝結液。

对物質集态变化的研究指明，这些变化是在原有相的温度和所轉变成的相的温度之間存在着某些温度差的情况下發生的。例如，在液体的表面上，在分开这两种相的边界的附近，所形成的蒸汽的温度比沸騰中的液体的温度平均要低 $0.3-0.5^{\circ}\text{C}$ 。在凝結时則存在着相反的现象，与凝結中的蒸汽相比，凝結液具有較低的温度。

此外，为了發生汽化，必須存在有某些蒸汽形成的核心，这些核心可以是空气泡，塵粒，帶电的粒子，表面上粗糙不平的地方等。

如果沒有这一类汽化核心，那末从液体轉变为蒸汽將在剎那間劇烈地發生。这时，在轉变成蒸汽以前，液体常常处于过热的状态。在一些个别的实验中，在某些一定的条件下，曾經做到將純粹的水加热到比汽化温度高出許多的温度。

昇华 物体从固体状态直接轉变成蒸汽的过程叫做昇华（參看 §9-3）。

凝固 与昇华过程相反的，即，从蒸汽直接轉变为固体状态的过程叫做凝固。

飽和蒸汽 液体在有限的空間中蒸發时，同时發生着与蒸發相反的过程，即，液化过程。蒸汽的凝結是这样引起的，在蒸汽空間中沿着各个方向运动着的分子，其中某些分子撞击在液体的表面上，这样，又落入液体的分子的作用范围之内，这些分子就又返回到了液体中。随着蒸發的进行以及随着液体上面的空間被蒸汽所充滿，蒸發的强度減小而与蒸發相反的凝結过程的强度增大，凝結过程就是分子从蒸汽空間又回返到液体之中。到了某一时候，在体系中达到动的平衡。在这一状态中，从液体中飞出的分子的数目將等于从蒸汽空間回返到液体中分子的数目。

因此，在蒸汽空間中的这一种平衡状态下，將存在着可能的最多

数目的分子。在这一状态时，蒸汽具有最大的密度，并且被叫做饱和蒸汽。因此，饱和蒸汽是指与液体处于平衡状态中的蒸汽，这种蒸汽是从该液体形成的。饱和蒸汽所具有的温度是其压力的函数，这压力等于介质的压力，而沸腾过程是在这介质中发生的，这乃是蒸汽的基本性质。在一定的温度下，当饱和蒸汽的容积增大时，就发生某些量的液体转变成成为蒸汽，而在一定的温度下，当容积减小时——蒸汽转变成成为液体，但无论在第一种情况，或是在第二种情况，蒸汽的压力保持不变。

干饱和蒸汽 当全部的液体蒸发完时，得到干饱和蒸汽。干饱和蒸汽的容积和温度乃是压力的函数。因此，干饱和蒸汽的状态由一个参数决定，例如，压力，或是温度。

湿饱和蒸汽 当液体尚未完全蒸发时，得到湿饱和蒸汽。湿饱和蒸汽乃是蒸汽和沸腾水的一些最微小水滴的混合物，这些水滴均匀地分佈在全部蒸汽中，并且处于悬浮状态。蒸汽在湿蒸汽中的重量成分叫做干度，并以 x 表示，而液体的重量成分则以 y 表示，叫做湿度。很明显

$$y = 1 - x.$$

对于干饱和蒸汽， $x = 1$ ，而对于水， $x = 0$ 。在汽化过程中蒸汽的干度从零逐渐增大至 1。

这样，湿蒸汽的状态由两个参数决定，例如，压力(或者温度)和干度。

过热蒸汽 在定压下向干蒸汽传入热量时，蒸汽的温度将升高。在这一种过程中所得到的蒸汽叫做过热蒸汽。这样，过热蒸汽是指这样的蒸汽，它的温度高于同样压力下饱和蒸汽的温度。与饱和蒸汽不同，饱和蒸汽的温度只是压力的函数，而过热蒸汽所具有的温度，则随压力和容积而定。过热蒸汽的温度和同一压力下的干饱和蒸汽的温度的差叫做过热度。

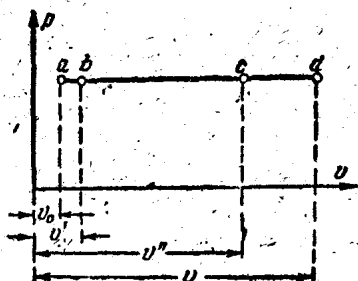
因为过热蒸汽的比容大于相同压力下饱和蒸汽的比容，所以在单位容积内，过热蒸汽所包含的分子数目就少于饱和蒸汽所包含分子的数目。因此，过热蒸汽是不饱和的，并且比相应的饱和蒸汽具有较小

根据过热蒸汽本身的物理特性，过热蒸汽的过热度愈高，它就愈接近气体。如同气体一样，过热蒸汽的状态，由任何两个独立参数（例如压力和温度）确定。

9-2 水蒸汽的 $p-v$ 图

从在一定压力下过热蒸汽的形成过程的研究(参看§9-1)得出,这个过程包括三个不同的连续实现的物理过程,即:将液体加热至沸腾温度,在一定的温度下汽化以及将蒸汽过热,这是当蒸汽的温度升高时发生的。这个过程在 $p-v$ 座标上的图解为线 ad (图 9-1), 线 qd 中的线段 ab 相应于液体的加热, bc ——汽化, 以及 cd ——蒸汽的过热。以 v_0 和 v' 相应表示 1 公斤水在 0°C 时以及在沸腾温度时的容积, 而以 v_s , v'' 和 v 表示湿蒸汽, 干蒸汽和过热蒸汽的容积。如果汽化过程是在较高压力下实施的话, 那末水在 0°C 时的容积 v_0 并不显著地减小(实际上可以当做不变), 水在沸腾温度时的容积 v' 增大, 而干饱和蒸汽的容积 v'' 则减小。因此, 当压力增大时, 容积的差 $v' - v_0$ (线段 ab) 将增大, 而容积差 $v'' - v'$ (线段 bc) 则将减小。这样, 当压力增大时, a 点和 b 点将逐渐分开, 而 b 点和 c 点则将逐渐接近(图 9-2)。将不同压力的定压线上一一些同一类的点连结起来, 得到线 $aa'a''$, $bb'b''$, 和 $cc'c''$, 这些线中的每一条都具有一定的意义。

綫 $aa'a''\dots\dots$ 表示 0°C 水的比容和压力的关系。这一条綫差不多



9-1-

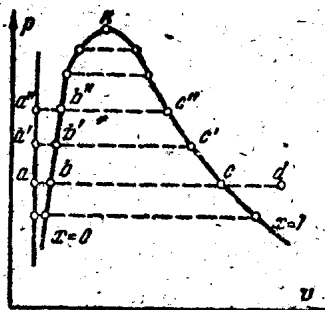


图 9-2

是与縱座标軸平行，它对縱座标軸的傾斜是不显著的。

綫 $bb'b''$... 表示出在沸騰温度时比容和压力的关系。这一条綫叫做低界限曲綫，在 $p-v$ 座标系統上这一曲綫分开了水的区域和飽和蒸汽的区域。如所見到，低界限曲綫乃是連結这些各别的点而成，这些点相应于在各种压力下沸騰温度时的水。

綫 $cc'c''$... 表示干蒸汽比容和压力的关系，这一条綫叫做高界限曲綫，它分开了飽和蒸汽的区域和过热蒸汽的区域。如所見到，高界限綫乃是連結这些各别的点而成，这些点相应于各种压力下的干飽和蒸汽。

当压力增大时，相应的容积差 $v''-v'$ 减小，兩条界限曲綫就逐漸接近。对于每一种物質，在某一个完全一定的压力时，这两条界限綫就在 k 点会合，这 k 点叫做临界点。

k 点同时属于低界限曲綫和高界限曲綫，这些曲綫就是沸騰温度时的液体綫和干飽和蒸汽綫，这 k 点相应于物質的某一个極限的临界状态，在这一状态时，液体和蒸汽之間沒有差別。物質在这一状态时的参数叫做临界参数，并以 p_k, v_k 和 T_k 表示。对于每一种物質，这些参数具有一定的数值。对于水， $p_k=225.65$ 公斤/公分²， $t_k=374.15^\circ\text{C}$ ； $v_k=0.0031$ 公尺³/公斤。在临界温度时，液体和蒸汽具有相同的密度；因此，消失了分开物質的这两种相的弯液面。确定物質的临界参数的实验方法之一是以这一現象为根据。

根据上述得出，临界温度乃是飽和蒸汽的最高温度。在临界温度以上时只可能存在过热蒸汽和气体。

关于物質的临界状态学說的发展，在許多方面应归功于斯托列多夫，阿温納利烏斯，納傑日勤等人的工作。特别是，阿温納利烏斯提出根据在汽化过程中使分子相互分离的内部功的方程式以确定物質的临界温度，在临界状态时，这内部功变为零。斯托列多夫給出了光学方法以确定临界参数，这方法获得了广泛的应用。納傑日勤研究出一种确定临界参数的独创的方法，这方法是根据这样的原則，即，在临界状态时，液体的比重与蒸汽的比重之間消失了差別。这个方法由他在实验时应用，以确定某些物質的临界参数。