

建築热物理理论基础

A. B. 雷柯夫

建筑热物理理論基础

A. B. 雷柯夫 著

任兴季 張志清 譯

科 学 出 版 社

1965

A. B. Лыков
ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СТРОИТЕЛЬНОЙ
ТЕПЛОФИЗИКИ

Издательство Академии Наук БССР

Минск 1961

內 容 簡 介

本书以不可逆过程热力学为基础,简要阐述了热交换和质交换的现代理论,并系统地讨论了毛细多孔体中的热迁移和质迁移现象。利用质迁移的热力学方法,详细地分析了建筑材料的热物理特性。

除介绍了分析法和实验方法而外,还阐明了迁移理论在研究隔离结构和建筑材料生产工艺过程中之热交换和质交换方面的应用。

书末附录内列有常用建筑材料的热-质迁移系数数据和求解热-质迁移问题需用的图、表。

本书可供建筑热物理领域研究工作者、研究生、工程师以及建筑工程院校师生参考。

建筑热物理理论基础

A. B. 雷柯夫 著

任兴季 張志清 譯

*

科学出版社出版

北京朝阳门内大街117号

北京市书刊出版业营业许可证出字第061号

商务印书馆上海印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1965年3月第一版

开本: 850×1168 1/32

1965年3月第一次印刷

印张: 15 15/16

精装: 0001—2,400

插页: 5

平装: 0001—1,900

字数: 423,000

统一书号: 15031·160

本社书号: 3045·15-1

定价: [科七] 精装本 3.20 元
平装本 2.70 元

目 录

前言	1
第一章 湿气体的热力学	3
§ 1 湿气体的基本参数	3
§ 2 湿空气图	11
§ 3 物质的热迁移与质迁移势	13
§ 4 翁薩日理論	15
§ 5 相变热	20
第二章 运动的液体和气体混合物的迁移方程式	23
§ 1 向量分析的基本知識	23
§ 2 单相介质中的迁移微分方程式	29
§ 3 二元气体混合物的热迁移与质迁移方程式	36
§ 4 热交换問題中的区域条件	43
§ 5 质交换問題中的边界条件	50
第三章 相似理論基础	55
§ 1 变换倍数	57
§ 2 热交换与质交换現象相似的本质	63
§ 3 热迁移与质迁移的相似准則	67
§ 4 整理实验数据的方法	74
第四章 固体和周圍介质間的热交换与质交换	77
§ 1 受迫对流时的热交换	77
§ 2 自由对流时的热交换	98
§ 3 质交换与热交换	107
§ 4 輻射换热	122
§ 5 定常导热	132
§ 6 固体中的不定常导热	139
第五章 毛細多孔体的基本性质	159
§ 1 毛細多孔体与所吸收水分間連結方式的分类	161
§ 2 毛細多孔体的湿热平衡状态	166

§ 3 毛細多孔体的主要結構特性·····	173
§ 4 毛細多孔体中气相物质迁移的基本分子运动規律·····	186
第六章 毛細多孔体中的热迁移与质迁移·····	197
§ 1 热迁移和质迁移微分方程式·····	197
§ 2 质迁移热力学参数·····	206
§ 3 水分迁移的基本定律·····	213
§ 4 质迁移和热迁移微分方程組和单值性条件·····	220
§ 5 毛細多孔体的热物理特性·····	227
§ 6 热交换和质交换的相似准則·····	251
§ 7 某些热迁移和质迁移問題的分析解·····	254
第七章 隔离結構中的热交换与质交换·····	266
§ 1 均质隔离結構中的热迁移与质迁移·····	266
§ 2 多层隔离結構中的热迁移与质迁移·····	275
§ 3 介质温度周期性变化时隔离結構中的热交换·····	284
§ 4 有空气过滤时的热交换·····	295
第八章 某些工艺过程中的热交换与质交换·····	299
§ 1 干燥过程中的热交换与质交换·····	299
§ 2 焙燒过程中的热交换与质交换·····	316
§ 3 在过热蒸汽中的热交换与质交换·····	322
第九章 实验研究方法·····	330
§ 1 确定热迁移系数的方法·····	330
§ 2 确定质迁移势和定温质容量的实验方法·····	355
§ 3 确定质迁移系数的方法·····	361
§ 4 干燥和焙燒过程中热迁移和质迁移的实验研究方法·····	381
第十章 数值解法和模拟实验方法·····	388
§ 1 网格法的基本关系式·····	389
§ 2 常系数不定常导热問題的求解·····	401
§ 3 变系数不定常导热問題·····	408
§ 4 不定常热-质迁移問題的求解·····	412
§ 5 流体动力模拟·····	418
§ 6 薄膜模拟·····	425
§ 7 电模拟·····	429
附录·····	439
参考文献·····	502

前 言

建筑热物理学是建筑技术理論中的一个最重要的領域，它是分散体系的分子物理学、热力学和热迁移与质迁移理論等諸門科学知識的綜合体。近代技术物理中的这些部門，無論是在理論方面，或是在實驗方面，都进行了相当深入的研究，并广泛应用于建立复杂設備和各种各样工业技术装置的新技术中。但是在建筑热工学中，当計算隔离結構时和拟制生产建筑材料与結構的各种工艺过程的最有利工况时，科学的近代热物理知識却利用的不多。热工計算公式和工艺过程热工况的选择方法在相当大的程度上以陈旧的关系为依据，这些关系只是粗略近似地反映所发生現象的物理本质；而且还常常以偶然的實驗規律为依据，而这些規律只适用于个别情况。相似理論的方法(綜合变量的方法)几乎沒有得到应用，然而它的必要性和有效性在建筑热工学中是巨大的。因而，在热物理領域中的現代知識与生产建筑材料及建立热工方面合理的隔离結構时工业用热的实践二者之間出現显著的脱节。

这本专著主要旨在簡明而系統地闡述构成建筑热物理学的各門基本科学知識。

本书的前四章内容将簡明地闡述湿空气的热力学、不可逆过程热力学的基础以及热交换与质交换理論。相似理論的方法专辟一章(第三章)介紹，因为它在建筑热工学中具有特殊的意义。本书的其余部份涉及到分散介质和毛細多孔物体中的热迁移和质迁移現象。在研究分散介质中迁移現象的分子动力基本規律的同时，也致力于在关于水分与毛細多孔物体相互結合方式的近代学說的基础上，討論湿材料中质量迁移的热力学。

得到了毛細多孔物体中存在相变时热迁移和质迁移的微分方程組，它們描写在任意温度範圍內水分和热量的克分子-分子迁移。在上述諸規律的基础上研究了在建筑隔离結構中热量、水分

与不凝結气体迁移的計算方法。指出了評价隔离結構热穩定性的現行方法是不正确的。研究了建筑材料在干燥和焙燒过程中热交换和质交换的基本規律。热迁移和质迁移的实驗研究方法，以及数值計算法和模拟实驗方法作为单独的两章放在本书的最后。全部的輔助資料(特解、表格和計算关系式)列于附录中。

必需再次強調，本书的主要任务并不在于拟制热工計算系統和方案公式，而是在于闡述适用于建筑热工学的热物理領域中最起碼的近代知識，和詳細分析建筑材料及隔离結構中相互联系的热迁移和质迁移現象。此外，对于确定建筑材料热物理特性的技术与方法也給予了很大注意，因为沒有可靠的热量与质量迁移系数的实驗数据，就不可能在热工計算的实踐中利用那些已被确立的理論关系式。

本书在毛細多孔物体中迁移現象的理論方面引进了一系列新的成果，因此本书也具有某种普遍的热物理学上的价值。

作者意識到，正如对任何新的科学学科(在这里是建筑热物理学)作系統闡述的初步尝试一样，本书有一系列的缺点，因此对于讀者的旨在改进这本书的所有建議，作者謹先致謝。

如果这一著作能够帮助大学生們更深入地研究建筑热工学基础，帮助生产技術人員在建筑材料的生产中找到最有利的热工况，并且帮助設計工作者創立滿足現代民用建筑与工业建筑要求的更合理的隔离結構，那么作者将认为自己的目的是达到了。

第一章

湿气体的热力学

§ 1 湿气体的基本参数

干气体和水蒸汽的混合物称为湿气体。大气中永远包含一定量的蒸汽，故而大气乃是空气和蒸汽的混合物。

认为湿气体的性态符合理想混合气体的一切定律，对于工程计算是足够准确的。组成混合气体的每种气体，其中也包括蒸汽，占有和混合气体相同的容积 V ，具有混合气体的温度 T ，和分压力 p_i ：

$$p_i = \frac{M_i R}{\mu_i V} T = \frac{\nu_i}{V} RT = n_i k T, \quad (1.1)$$

式中 M_i 和 μ_i ——分别为第 i 种气体的重量¹⁾(公斤)和分子量(公斤/摩尔)； ν_i 和 n_i ——第 i 种气体单位容积的摩尔数($\nu_i = M_i/\mu_i$)和分子数； k ——玻耳兹曼常数，它等于通用气体常数 R ²⁾ 和一个摩尔容积气体中的分子数 N 的比值($k = R/N$)。

组成混合气体的各个气体的分压力的总合等于混合气体的总压力(道尔顿定律)：

$$p = p_1 + p_2 + p_3 + \dots + p_i = \sum p_i. \quad (1.2)$$

气体的重量 M_i 和混合气体容积 V 的比值称为混合气体中该气体的容积浓度 ρ_i ($\rho_i = M_i/V$)。容积浓度的总和等于混合气体的

¹⁾ 按原文应译为质量，但实际上式(1.1)中 M_i 系气体的重量——译者注。

²⁾ 通用气体常数的值取决于压力和容积的度量单位。如果压力以公斤/米²计，则 $R = 0.848$ 公斤·米/°K·摩尔；如果压力以毫米汞柱计，则 $R = 0.06237$ 毫米汞柱·米³/°K·摩尔；在绝对单位制中 $R = 8.315 \times 10^7$ 尔格/°K·摩尔。

重度 $\gamma_{\text{cm}}^{1)}$:

$$\gamma_{\text{cm}} = \rho = \sum_i \rho_i = \frac{1}{V} \sum_i M_i = \frac{M}{V} = \frac{1}{v}, \quad (1.3)$$

式中 v ——混合气体的比容。

第 i 种气体的模尔容积浓度

$$\omega_i = \frac{v_i}{V} = \frac{M_i}{\mu_i V} = \frac{\rho_i}{\mu_i}. \quad (1.4)$$

通常也应用第 i 种气体的相对重量 (相对浓度) 或相对分子量:

$$\rho_{i0} = \frac{\rho_i}{\rho}; \quad n_{i0} = \frac{n_i}{n}; \quad \omega_{i0} = \frac{\omega_i}{\omega}; \quad (1.5)$$

式中 n ——混合气体单位容积中的分子数,

$$n = \sum_i n_i; \quad (1.6)$$

ω ——混合气体模尔浓度的总和,

$$\omega = \sum_i \omega_i = \frac{v}{V} = \frac{M}{\mu V} = \frac{\rho}{\mu}; \quad (1.7)$$

μ ——混合气体分子量的总和,

$$\mu = \sum_i \mu_i n_{i0}. \quad (1.8)$$

从式(1.2)和式(1.5)可以得到

$$\sum_i p_{i0} = \sum_i \rho_{i0} = \sum_i n_{i0} = \sum_i \omega_{i0} = 1, \quad (1.9)$$

式中 p_{i0} ——相对分压力, $p_{i0} = p_i/p$. 这时,按照式(1.1)可以得到

$$n_{i0} = v_{i0} = p_{i0}. \quad (1.10)$$

湿空气可以初步近似地认为是水蒸汽和折算均质气体——干空气的二元混合物, 而干空气的总分子量 $\mu_{\text{B}} = 29$. 这时大气压力 p 等于干空气压力 p_{B} 和水蒸汽压力 $p_{\text{H}_2\text{O}}$ 之和 ($p = p_{\text{B}} + p_{\text{H}_2\text{O}}$). 在最一般的条件下, 湿空气中除水蒸汽而外, 还包含有极细小的水滴 (雾)

¹⁾ 按式(1.3)知 γ_{cm} 是混合气体的重度, 然而原文混淆写成密度, 又原文中符号 ρ 和 γ 是混淆的, 译者在文字叙述中一一进行了修改, 而公式和符号未作更动——译者注。

甚至冰晶。但是对这种情形只有气象学者才感兴趣，在这里不进行分析研究。

由于气体和过热蒸汽组成的混合气体称为未饱和湿气体，而由于气体和饱和蒸汽组成的混合气体称为饱和湿气体。

在同温同压下未饱和气体中的水蒸汽浓度 ρ_n 和饱和气体中的水蒸汽浓度 ρ_H 的比值称为气体湿度 φ ：

$$\varphi = \frac{\rho_n}{\rho_H}. \quad (1.11)$$

由此可以看出，饱和湿气体的湿度最大，它等于1 ($\varphi_H=1$)。

如果利用状态方程式(1.1)，我们便得到下述气体湿度的表达式：

$$\varphi = \frac{p_n}{p_H}, \quad (1.12)$$

式中 p_n 和 p_H ——分别代表在混合气体温度下，未饱和蒸汽和饱和蒸汽的分压力。饱和水蒸汽的压力只是温度的函数： $p_H=f(t)$ ，它可以按表1.1来确定。

图1.1以图线给出了水的饱和蒸汽压力和温度的关系 $p_H=f(t)$ 。曲线将图划分为两个区域：下面是蒸汽区，而上面是固态或液态物质区。固态和液态的分界线是由冰的熔点和压力间的关

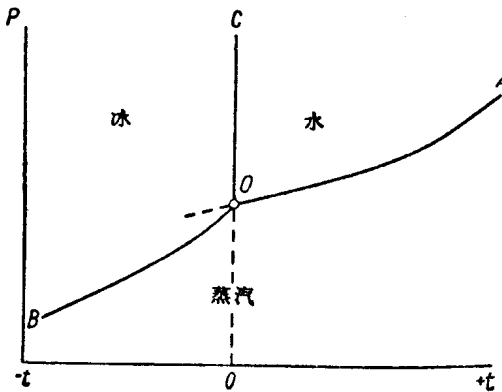


图 1.1. 物质饱和蒸汽压力和温度的关系

表 1.1. 蒸汽压力 p_H (毫米汞柱) 和对应温度 t ($^{\circ}\text{C}$) 之间的关系

t	p_H	t	p_H	t	p_H	t	p_H
-20	0.772	11	9.84	42	61.50	73	265.7
-19	0.850	12	10.52	43	64.80	74	277.2
-18	0.935	13	11.23	44	68.26	75	289.1
-17	1.027	14	11.99	45	71.88	76	301.4
-16	1.128	15	12.79	46	75.65	77	314.1
-15	1.238	16	13.63	47	79.60	78	327.3
-14	1.357	17	14.53	48	83.71	79	341.0
-12	1.627	19	16.48	50	92.51	81	369.7
-11	1.780	20	17.54	51	97.20	82	384.9
-10	1.946	21	18.65	52	102.1	83	400.6
-9	2.125	22	19.83	53	107.2	84	416.8
-8	2.321	23	21.07	54	112.5	85	433.6
-7	2.532	24	22.38	55	118.0	86	450.9
-6	2.761	25	23.76	56	123.8	87	468.7
-5	3.008	26	25.21	57	129.8	88	487.1
-4	3.276	27	26.74	58	136.1	89	506.1
-3	3.566	28	28.35	59	142.6	90	525.8
-2	3.879	29	30.04	60	149.4	91	546.1
-1	4.216	30	31.82	61	156.4	92	567.0
0	4.579	31	33.70	62	163.8	93	588.6
1	4.93	32	35.66	63	171.4	94	610.9
2	5.29	33	37.73	64	179.3	95	633.9
3	5.69	34	39.90	65	187.5	96	657.6
4	6.10	35	42.18	66	196.1	97	682.1
5	6.54	36	44.56	67	205.0	98	707.3
6	7.01	37	47.07	68	214.2	99	733.2
7	7.51	38	49.69	69	223.7	100	760.0
8	8.05	39	52.44	70	233.7	—	—
9	8.61	40	55.32	71	243.9	—	—
10	9.21	41	58.34	72	254.6	—	—

系 $t_{\text{max}} = f(p)$ 来确定 (曲线 OC)。虚线表示对于过冷液体的饱和蒸汽压力之变化。曲线 $p_H = f(t)$ 相应于物质的饱和状态 (两相共存)。只有在三相点才同时存在物质的三相。水的三相点对应于温度等于 0.0098°C 和蒸汽分压力等于 4.58 毫米汞柱。

在紧贴着沸腾水的表面上,水蒸汽排除了干气体(空气),并占有全部容积.这时干气体的分压力等于零,而饱和蒸汽的压力等于总压力,在这一压力下产生沸腾过程.在加热和冷却过程中,湿气体的湿度和温度是变化的,因而它的初始容积也是变化的.所以一般都以湿气体中的干气体部分的重量作为基本量,而这一数量常用来作为比例系数.

混合气体中每单位干气体重量所含的蒸汽重量称为含湿量,即

$$d = \frac{\rho_n}{\rho_r} = \frac{M_n}{M_r}. \quad (1.13)$$

含湿量或湿度都是无因次量,它可以用蒸汽的相对浓度来确定($\rho_{n.o} = \rho_n / \rho$),或者用蒸汽和气体分压力的比值来确定:

$$d = \frac{\rho_{n.o}}{1 + \rho_{n.o}} = \frac{\mu_n p_n}{\mu_r p_r}. \quad (1.14)$$

在给定的大气压力下($p = \text{定数}$),湿空气(空气和水蒸汽的混合物)的含湿量只是分压力的函数:

$$d = \frac{18}{29} \frac{p_n}{p_r} = 0.622 \frac{p_n}{p - p_n}. \quad (1.15)$$

从式(1.15),我们可以得到水蒸汽分压力的表达式

$$p_{n.o} = \frac{p_n}{p} = \frac{d}{0.622 + d}. \quad (1.16)$$

湿空气的重度可以用含湿量来表示:

$$\gamma_{cm} = \rho = \rho_n + \rho_r = \rho_r (1 + d). \quad (1.17)$$

相对于气体($d=0$)的气体浓度等于它的重度($\gamma_{cm} = \rho_r$).气体的重度与压力成正比,而与温度成反比.这一关系对于混合气体中的干空气成分也是正确的.这时可以表示为

$$\rho_r = \gamma \frac{p_r}{p} \frac{273}{T}, \quad (1.18)$$

式中 γ ——在标准状态下,即温度为 0°C , 压力为 760 毫米汞柱条件下,干空气的重度(对于空气, $\gamma = 1.293$ 公斤/米³). 将式

(1.18)代入式(1.17),并利用式(1.14),将得到

$$\gamma_{\text{ex}} = \gamma \frac{273}{T} \left[1 - \left(1 - \frac{\mu_n}{\mu_r} \right) \frac{p_n}{p} \right]. \quad (1.19)$$

从式(1.19)可以看出,如果 $\mu_n < \mu_r$,那末在压力和温度恒定的条件下,湿气体的重度随着分压力的增加而线性减小.因为蒸汽的分子量小于干气体的分子量,所以湿气体较干气体为轻,对于湿空气就存在这种情况($\mu_n = 18, \mu_r = 29$).如果 $\mu_n > \mu_r$,则情况恰好相反:气体和蒸汽的混合气较干气体为重,而混合气的重度随着分压力的增加而减小.在上述两种情况下混合气的重度都随着温度的上升而减小.

按照热力学第一定律,由于物体或体系和外界交换了功 dW 和热 dQ ,物体或体系的內能就有了 dE 的变化:

$$dQ = dE + dW = dE + pdV. \quad (1.20)$$

必须指出, dQ 和 dW 不是全微分,它們和 dE 不一样,而內能仅是状态的函数.

在定压($p = \text{定数}$)条件下,式(1.20)可以表示为

$$dQ_p = d(E + pV) = dH, \quad (1.21)$$

式中 $H = E + pV$ 称为体系的焓(热含).

如果体系是絕热的($dQ_p = 0$),那末在定压($p = \text{定数}$)条件下,焓不发生变化($H = \text{定数}$).焓的相对值可以准确地决定,至于焓的初始值則是任意选定的.一般认为 0°C 时饱和水的焓等于零.

如果体系和外界之間进行物质交换,这种体系称为开口体系.对于开口体系,代替式(1.20),得到下列关系:

$$dQ = dE + pdV - hdM, \quad (1.22)$$

式中 h ——体系比焓的平均值($h = H/M$); M ——体系的总重量.

如果考虑单位重量体系的內能和容积(比內能和比容),那末热力学第一定律的表达式对于开口体系和閉口体系是一样的:

$$dq = de + pdv, \quad (1.23)$$

式中 e ——比內能($e = E/M$); dq ——换热量($dq = dQ/M$).

加热物体使其温度升高一度所需的热量称为物体的热容量.

應該区分真实热容量(給定温度下的热容量)

$$C = \frac{dQ}{dT} \quad (1.24)$$

和从 t_1 到 t_2 温度范围内的平均热容量

$$\bar{C} = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} C dt. \quad (1.25)$$

如果热容量随温度变化不大,則平均热容量等于真实热容量.

体系单位重量的热容量称为比热 c . 必須区分定容比热(定容过程中的比热)

$$c_v = \frac{dq_v}{dT} = \left(\frac{de}{dT} \right)_v \quad (1.26)$$

和定压比热(定压过程中的比热)

$$c_p = \frac{dq_p}{dT} = \left(\frac{dh}{dT} \right)_p. \quad (1.27)$$

可以看出, 焓在定压过程中的作用和内能在定容过程中的作用相同. 一个摩尔气体的比热称为摩尔比热 $C_v = c_v \mu$. 因为大多数的热物理过程是在定压下进行的, 所以常常应用定压比热. 因此, 在后文中如不加以注明, 所用比热就是定压比热(角碼 p 省去).

湿气体的焓等于混合气体組成成分的焓之总和:

$$h = \sum_i h_i \rho_{i0}, \quad (1.28)$$

式中 h_i ——第 i 种气体单位重量的焓.

对于理想气体, 我們得到

$$h_i = h_{ir} + \int_{T_0}^T c_{pi} dT, \quad (1.29)$$

式中 h_{ir} ——在温度 T_0 时, 第 i 种气体的焓值.

湿气体的比热 c_{cm} 和含湿量一样, 是以单位重量干气体为准则而計算的(大卡/每公斤干气体·度):

$$c_{cm} = c_r + c_m d, \quad (1.30)$$

式中 c_r ——干气体的平均比热(空气在温度从 0 到 100°C 范围内

$c_r = 0.24$ 大卡/公斤·度); c_n ——蒸汽的平均比热 (对于水蒸汽, $c_n = 0.47$ 大卡/公斤·度).

温度为 t 时, 水的焓 $h_{ж}$ 等于 $c_{ж}t$, 而饱和和蒸汽的焓为

$$h_{н.н} = h_{ж} + r = c_{ж}t + r, \quad (1.31)$$

式中 r ——汽化潜热, 大卡/公斤.

液体的汽化潜热取决于温度, 水的汽化潜热可以按照给定的温度从表 1.2 中查得, 或者按下列近似公式计算:

$$r = 595 - 0.55t, \quad (1.32)$$

表 1.2. 汽化潜热 r (大卡/公斤) 和温度 t ($^{\circ}\text{C}$) 的关系

t	r	t	r	t	r
0	595.0	35	576.2	70	556.8
5	592.3	40	573.5	75	554.0
10	589.3	45	570.7	80	551.2
15	587.0	50	568.0	85	548.2
20	584.0	55	565.2	90	545.3
25	581.6	60	562.5	95	542.4
30	578.9	65	559.7	100	539.4

所以, 饱和水蒸汽单位重量的焓等于

$$h_{н.н} = 595 + 0.45t, \quad (1.33)$$

Л. К. 拉姆津 (Рамзин) 给出了更好的近似公式

$$h_{н.н} = 595 + 0.47t, \quad (1.34)$$

温度为 t 时, 湿气体中过热蒸汽单位重量的焓,

$$h_n = h_{н.н} + c_n(t - t_n), \quad (1.35)$$

式中 t_n ——饱和温度或者露点, $^{\circ}\text{C}$.

在含湿量不变的条件下 ($d = \text{定数}$), 用降低温度的方法, 使未饱和和气体降低到某一温度而变为饱和和气体 ($\varphi = 1$), 这一温度称为饱和温度或者露点.

过热水蒸汽单位重量的焓近似地表示为

$$h_n = 595 + 0.47t_n + 0.47(t - t_n) = 595 + 0.47t, \quad (1.36)$$

比较式 (1.33) 和式 (1.36), 可以得出结论, 过热 (不饱和) 蒸汽和饱

(1.38) 的 $I=f(d)$ 曲线, 这是考虑到了比热随温度的变化, 而从表中选取干气体和蒸汽的比热值, 所以等温线近似地为一曲线, 它和横坐标之间的倾角随着温度上升而增大。

在图中(参看附录)绘制了空气的等湿度线 $\varphi = \text{定数}$, 这些等湿度线在温度为 99.4°C 时发生急剧的转折, 因为相应这一温度的饱和压力等于大气压力 745 毫米汞柱。因为混合气的重度取决于温度, 所以等湿度线稍离垂直线而向左偏离。曲线 $\varphi=1$ 将图划分为两部分: 上面部分是由于空气和未饱和蒸汽组成的湿空气, 下面部分的蒸汽是饱和的, 而且部分凝结成液体。

在没有液体汽化和蒸汽凝结的条件下, 在 $I-d$ 图上加热和冷却过程都由直线 $d = \text{定数}$ 代表, 即在湿空气中的蒸汽含量保持不变。

在定压绝热过程中, 汽化是伴随着湿空气的焓 I 的增加而沿着等温线 $t_m = \text{定数}$ 进行的, t_m ——空气的绝热饱和温度¹⁾。

$$I = I_m - c_{\text{ж}} t_m (d_m - d), \quad (1.39)$$

在湿空气图上可以按下述方法来绘制这条等温线。在绝热饱和条件下 ($\varphi=1$), 空气的含湿量最大并等于 d_H ($d_H = d_m$), 而液体和空气的温度等于 t_m 。先经过相应于温度 t_m 的 B 点做一辅助线 $I_m = \text{定数}$ (定焓过程) (参看图 1.3), 然后沿纵坐标 ($d=0$) 自 C 点向下截取等于 $c_{\text{ж}} t_m d_m$ 的线段, 得到 C' 点, 连结 C' 和 B , 则 $C'B$ 直线就是等温线 $t_m = \text{定数}$ 。

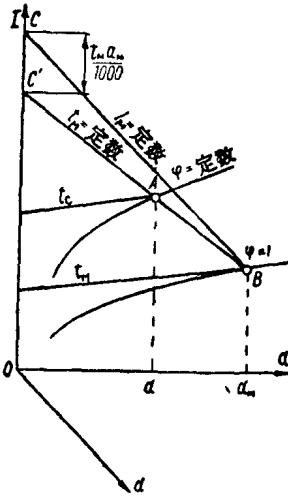


图 1.3. 在 $I-d$ 图中绘制等温线 $t_m = \text{定数}$ 的方法

在 $I-d$ 图上(参看附录), 和等焓线 $I = \text{定数}$ 一起, 用虚线给出了诸等

温线 $t_m = \text{定数}$, 它们和等焓线之间稍有倾斜。在图的下方, 在直角

¹⁾ 在干燥技术中, t_m 称为湿球温度, 它近似地等于定压绝热过程的汽化温度。