

飞机结冰及其防护

Aircraft Icing and Its Protection

朱春玲 朱程香 著



科学出版社

飞机结冰及其防护

朱春玲 朱程香 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

飞机结冰直接影响飞行安全,是航空领域重点关心的问题。飞机结冰及其防护技术涉及空气动力学、热力学、多相流、机械设计等多个学科,也是关系到飞行安全和适航认证等方面的关键技术。它主要研究飞机结冰气象条件、成冰机理、冰形预测等方面的基本原理和方法,同时还要研究基于热力学、动力学等原理的飞机结冰防护方法和装置。本书以固定翼飞机的结冰预测与防护技术为主要内容,系统地介绍了飞机结冰相关的内容,同时针对旋翼飞行器防除冰问题的相关内容给出了简略的介绍。本书内容紧密结合国内外技术发展的现状,同时也融入了作者近期的研究成果。

本书对流体力学、飞行器设计、飞行器环境工程等专业的大学高年级学生、研究生、教师和科研人员具有参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

飞机结冰及其防护/朱春玲,朱程香著. —北京:科学出版社,2016.2

ISBN 978-7-03-047441-4

I.①飞… II.①朱… ②朱… III.①飞机-防冰系统-研究 IV. ①V244.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016) 第 043394 号

责任编辑:惠 雪 曾佳佳/责任校对:郑金红

责任印制:张 倩/封面设计:许 瑞

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

文林印务有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016年2月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2016年2月第一次印刷 印张:12 1/2

字数:250 000

定价:79.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

自航空开始发展至今,飞机结冰就始终是人们关心的问题。飞机结冰主要有三种基本形式:霜冰、明冰和混合冰。飞机积冰会引起升力下降,重量、阻力和失速速度增加。另外,机翼舵面等外部活动表面上积聚的冰将影响飞机的控制。飞机的动力推进装置,例如,螺旋桨叶片或直升机旋翼上有积冰,必然造成发动机推进效率下降,随之需要更大的功率来维持飞行高度。结冰对飞机的整体影响包括气动效率、发动机功率、合理的控制表面操作、刹车制动、起落架操作、外部视觉、正常的飞行仪表读数等;天线结冰有可能导致信号被屏蔽或天线被损坏,失去无线电通信能力。飞机表面冰脱落后也有可能造成飞机外部的一些关键表面因冰冲击而损坏,发动机吞噬冰后会带来发动机故障,甚至更严重的危害。早期的飞机经常由于机翼、尾翼和螺旋桨结冰而迫降。对于停滞在地面的飞机表面结冰,如果没有造成其他故障损坏,清除积冰后飞机仍可以继续飞行。时至今日,一系列飞机防冰/除冰等结冰防护措施逐渐发展起来,例如,液体除冰、热气和电加温结冰防护系统、充气式膨胀管除冰、电脉冲除冰、微波除冰、压电除冰等机械式除冰技术。近年来,随着飞机气动性能持续提高,特别期望发动机与螺旋桨获得更高的燃油效率,迫切需要对现代飞机结冰防护系统进行优化设计。因此,为了提高与完善结冰防护系统性能,需要研究和发展除冰/防冰系统设计和分析程序。这些系统的设计和成功认证依赖于大量充足的文档资料,包含其特点与限制条件。

从事飞机结冰防护问题的研究人员应清醒地认识到:大气结冰和结冰防护系统相关问题是一个非常复杂的技术领域,还有很多没有解决的问题和令人困惑的现象,需要工业部门、科研机构和政府开展持续的研究。

本书汇集了国内外近期可用的研究与试验结果,并融入了作者带领的团队十余年在该领域的研究成果。纳入的这些最近技术上的发展,需要用过去的和最近的方法以及本领域经验进行检验。特别是在一些计算分析方法中,需进行简化假设,进行不完全模拟,验证试验通常不很充分,或结果吻合得不很好。因此,为了抵消设计、分析和试验中的不确定因素,必须使用工程上可接受的方法找出偏保守的结果。这个思想在未来的研究工作和飞机适航认证过程中尤其重要。我们也期望随着航空技术的发展,将来根据持续的研究成果,不断地更新本书,以帮助读者跟踪本领域的新技术,掌握新方法。

结冰防护系统设计需依赖于结冰特性知识。因此本书首先介绍了在已知的大气结冰条件下的结冰类型,相关的气象条件描述方法及其影响因素。大部分数据来

源于美国国家航空咨询委员会 (NACA) 利用商用飞机、军用飞机和结冰研究用飞机进行真实飞行时, 对结冰条件所采集到的数据进行统计分析得到的结冰报告, 也包含其他国家的一些统计数据。

本书由国家重点基础研究计划 (973 计划)(No.2015CB755800) 资助完成。

作 者

2015 年 10 月

目 录

第 1 章 飞机结冰概述	1
1.1 大气中云层的类型	1
1.1.1 层云	2
1.1.2 积云	2
1.2 云形成的要素	3
1.2.1 大气中的水蒸气	3
1.2.2 大气中水蒸气的分布	7
1.2.3 大气中水蒸气的相态变化	8
1.2.4 大气冷却	9
1.2.5 凝结核	14
1.3 云的物理性质及其表述方法	15
1.3.1 云高和云厚	15
1.3.2 水滴的物态	16
1.3.3 云层温度	16
1.3.4 云的含水量和水滴浓度	17
1.3.5 水滴尺寸	17
1.4 云的特性变化规律	18
1.4.1 过冷云特性随高度变化	18
1.4.2 过冷云特性随季节变化	19
1.4.3 过冷云特性随地理位置变化	19
1.4.4 云中液态水含量 LWC	20
1.4.5 云中液滴尺寸分布 MVD	20
1.4.6 云层中的其他水滴形态	21
1.5 过冷水滴和飞机结冰	23
1.5.1 过冷水滴	23
1.5.2 飞机结冰的原因	24
1.5.3 飞机结冰的主要形式	24
参考文献	25

第 2 章 飞机表面水滴撞击特性预测方法	27
2.1 部件表面的结冰区及结冰量	27
2.1.1 部件表面的水滴撞击特性	27
2.1.2 水滴溢流区及冰冻结系数	32
2.2 气流中水滴运动的微分方程	33
2.3 绕简单几何体流动时的水滴轨迹	40
2.3.1 绕正圆柱体流动的水滴运动轨迹	40
2.3.2 绕旋转椭球体运动的水滴轨迹计算	42
2.4 机翼翼型的水滴撞击特性计算	46
2.4.1 水滴轨迹计算	46
2.4.2 图解法求水滴撞击特性	50
参考文献	56
第 3 章 飞机结冰防护表面的热流分析计算	58
3.1 结冰表面传热	58
3.2 对流换热比热流及对流换热系数	59
3.2.1 圆柱-平板法求解表面对流换热系数	59
3.2.2 边界层积分法求解表面对流换热系数	61
3.3 表面水蒸发/冰升华散热热流	69
3.3.1 求解传质系数	70
3.3.2 求解绝对湿度	71
3.4 其他热流	73
3.4.1 边界层摩擦加热比热流	73
3.4.2 加热收集到的水所需比热流	73
3.4.3 表面上水冻结时的放热比热流	73
3.5 结冰表面温度	74
3.5.1 防冰所需比热流	74
3.5.2 结冰表面温度	74
3.6 经典的机翼表面结冰二维数学模型	75
3.6.1 各项热流的计算	76
3.6.2 Messinger 模型的求解	77
3.7 机翼表面结冰冰形模拟	79
3.7.1 机翼表面结冰增长模拟	79
3.7.2 计算结果验证	80
参考文献	86

第 4 章 飞机结冰防护方法	88
4.1 液体结冰防护系统	88
4.1.1 防冰液需用量	89
4.1.2 防冰液的分配方法	91
4.2 机械结冰防护系统	93
4.2.1 膨胀管除冰系统	94
4.2.2 电脉冲除冰系统	95
4.3 热结冰防护系统	97
4.3.1 热气防冰系统	101
4.3.2 电热结冰防护系统	103
4.4 其他结冰防护技术	108
4.4.1 超疏水表面涂层结冰防护技术	109
4.4.2 微波结冰防护技术	109
4.4.3 超声波结冰防护技术	110
4.5 典型飞机结冰防护系统实例	111
4.5.1 美国波音 737 飞机的防冰系统	111
4.5.2 美国波音 707 飞机的防冰系统	114
4.5.3 空客 A330 飞机的防冰系统	119
参考文献	121
第 5 章 热气防冰系统设计与性能分析	123
5.1 热气防冰系统结构参数	123
5.1.1 笛形管结构参数	124
5.1.2 防冰腔结构参数	125
5.2 笛形管设计方法	126
5.2.1 笛形管设计流程	126
5.2.2 笛形管内空气流动参数计算	127
5.3 防冰腔的结构参数研究	134
5.3.1 几何模型	134
5.3.2 笛形管中心坐标 (x, y) 对表面温度分布的影响	136
5.3.3 射流孔角度 θ 对表面温度分布的影响	136
5.4 热气防冰系统性能分析	137
5.4.1 外部热问题计算	137
5.4.2 内部热问题计算	137
5.4.3 耦合计算表面温度	138

5.4.4 蒙皮表面温度计算举例	140
参考文献	142
第 6 章 结冰防护系统试验	144
6.1 试验目的及内容	144
6.2 试验方法	144
6.2.1 地面试验	145
6.2.2 高空飞行试验	148
6.3 主要参数测量方法	152
6.3.1 表面温度测量	152
6.3.2 液态水含量 (LWC) 测量	154
6.3.3 水滴直径 (MVD) 测量	158
6.4 结冰探测器	159
参考文献	161
第 7 章 飞机结冰适航验证方法	163
7.1 概述	163
7.2 世界各国的适航条例	164
7.3 飞机防/除冰适航性技术要求	165
7.4 飞机结冰适航审定程序	167
7.5 典型需防冰部件的结冰合格审定过程	169
7.5.1 机翼、垂直水平安定面的典型飞行中结冰审定过程	179
7.5.2 发动机进气系统的典型飞行中结冰审定过程	182
7.5.3 风挡的典型飞行中结冰审定过程	183
7.5.4 大气数据系统探头和传感器的典型飞行中结冰审定过程	183
7.5.5 天线、油箱、整流罩、立管、撑架和其他突出物典型飞行中结冰审定过程	184
7.6 典型需结冰防护部件的结冰合格审定的符合性方法	184
参考文献	185
附录	187

第1章 飞机结冰概述

1.1 大气中云层的类型

云层中含有低于冰点温度的液态水滴,这叫做过冷云层条件^[1],飞机在飞行过程中遭遇这种云层时,就有可能发生表面结冰现象。飞机表面结冰的主要描述特征是表面结冰覆盖范围和结冰形状,这对于结冰造成的气动性能影响和结冰防护系统设计都是至关重要的。而这两个关键特征主要受三类因素的综合影响,它们分别是:飞机外形结构参数、飞行状态参数和过冷云层参数。飞机表面外形结构特征和飞行状态参数都会直接影响气流场的分布,当然也会影响过冷云层中水滴的运动轨迹;过冷云层中液态水含量、液滴尺寸和结冰条件所具有的水平范围等又对表面结冰范围和冰形造成直接影响。在飞机飞行高度范围内,随着飞机飞离地面后高度升高,空中液滴尺寸逐渐减小,空气的洁净度和液滴的纯度不断提高,遇到过冷条件的可能性增加。当温度低至 0°C 以下时,可观察到的具有过冷条件的云层是普遍存在的。云层中含有的过冷液滴是不稳定的,可很快地从液态转变为固态,以冰晶、冰核或混合状态存在^[2-16]。图 1.1 反映了云层分布特征和飞机在不同云层结冰的一般规律。

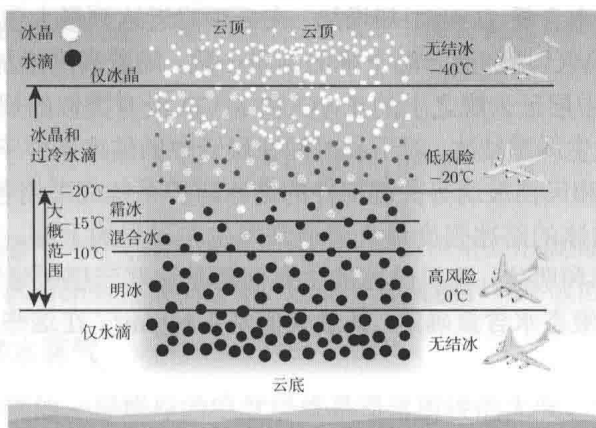


图 1.1 飞机在云层中结冰的一般规律

在讨论飞机结冰问题时,云层的类型一般可分为两类:层云(分层发展类型云)和积云(垂直发展类型云)。当关心地面停机时飞机表面结冰或结霜的问题时,需要

研究雾的影响。雾和云的不同仅在于雾发生在地球表面而云发生在地表之上的空中。结冰可分为霜冰和明冰两种主要形式,但很多情况下它们又会共存,表现出混合冰的形式。这些都将在以后的章节中详细介绍。

1.1.1 层云

飞机穿越低于 3km 的层云中常发生结冰。不同海拔上的云形成广泛的覆盖范围,层云的性能是相对比较稳定的。一般分布在近 2km 的厚度范围内^[17]。

6km 以上的高层云主要由冰晶组成,冰晶对机身结冰影响很小,但若堆积在发动机进气道,会带来较严重的不良影响,因此,在研究发动机结冰时应予以考虑。这类云有卷云 (Ci)、卷积云 (Cc) 和卷层云 (Cs),可根据它们的亮度、洁白透明度等外观的不同进行区分。

位于海拔为 2~6km 的中层云中会同时含有固态和液态水,因而对结冰环境比较重要。这些云可能非常稀薄,但可蔓延至数千平方千米的大片区域。这类云有高积云 (Ac) 和高层云 (As),这些云的颜色为灰色到略带蓝色的暗颜色,但不会是白色。

2km 以下通常为低层云,其液态水含量和水平范围对结冰环境十分重要。低层云的覆盖区域没有中层云那么广泛,然而,云层中的液态水含量较高。这类云有层积云 (Sc)、层云 (St) 和雨层云 (Ns),通过带有较深斑纹的白色到灰色外观进行分类。雨层云通常由于物质的沉降而分散分布,具有非均匀云底,这些云中很少有或者没有电解质或冰雹。

一种特定层云的特性随海拔的变化见图 1.2。在低层云内,大气温度随海拔增加而递减,但液态水含量 (LWC) 却增加,在云顶附近达到最大值。这与根据绝热上升理论预测的 LWC 增加而云温下降的结果一致。随着高度增加,液滴直径 (在静态下) 亦增加。中层云云底之上的 LWC 和 MVD 没有类似的规律。因此在高层云和高积云中会发生严重结冰。对于长时间在层云中的结冰条件下飞行的飞机,机翼、尾翼、螺旋桨和风挡玻璃等关键部件的结冰防护系统应采用各自的设计标准。轻度结冰到中度结冰的结冰强度最大值通常发生在云层的上部。飞机在层云中飞行时观察到了霜冰和明冰,飞机结冰的主要问题是这些云层所延伸的水平范围很大。层云的特性由液态水含量确定,其最大值是 1.1 g/m^3 。在这些云中结的冰通常是霜冰。

1.1.2 积云

积云中人们最熟知的是积雨云,积雨云可能引起下雨和 (或) 多种形式固态降水,并出现打雷和闪电。它有个经典的名字叫“雷暴云砧”。

积云没有层云那样覆盖的水平范围广泛,其特点是快速发展和大 LWC,短时

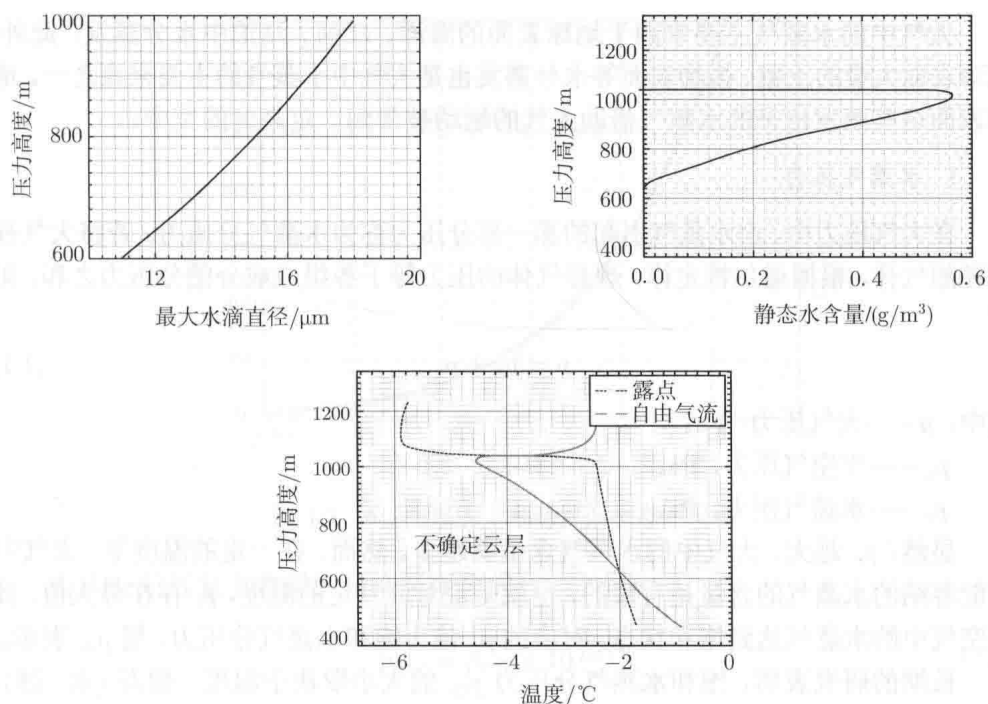


图 1.2 一种典型无气旋状态云的性质

间液态水含量可高达 $2.5 \text{ g}/\text{m}^3$ ^[17], 甚至更大; 积云垂直发展的空间较大。积云中的结冰情况是多变的, 取决于单个云团的发展程度。结冰强度可能从小型过冷积云中的轻度结冰, 到浓积云或积雨云中的中度或严重结冰。尽管结冰可能发生在已形成的积云结冰线上的任何一个区域, 但在上升气流中最为强烈。积云中结的冰通常是明冰或混合冰。

1.2 云形成的要素

大气中的水蒸气、大气的冷却和大气中的凝结核是云形成的三个要素, 天空中云层的状态对飞机结冰有直接的影响, 因此有必要理解云形成的过程。

1.2.1 大气中的水蒸气

地球表面环绕的一层厚厚的空气层就是通常所说的大气。大气是由干空气和水蒸气组成的混合气体, 尽管干空气由氮、氧、二氧化碳、惰性气体等多种气体组成, 但大气的各种成分中只有水蒸气会在大气条件下发生相态变化。

按照海拔可以将大气分成若干层, 一般而言, 11km 以下为对流层, 水蒸气主要分布在 6km 以下的对流层内, 其容量约占大气总容量的 4%。

大气中的水蒸气主要来源于地球表面的海洋、江河、湖泊中水分蒸发,此外,地球表面大量的土壤、植物表面等水分蒸发也是大气中水蒸气的主要来源之一。地球表面这些蒸发出来的水蒸气借助大气的运动被带到一定高度的空中。

1. 水蒸气压力

在大气压力中,由水蒸气引起的那一部分压力称为水蒸气分压力。若将大气视为理想气体,根据道尔顿定律,理想气体的压力等于各组成成分的分压力之和,则有

$$p = p_a + p_e \quad (1.1)$$

式中: p ——大气压力, Pa;

p_a ——干空气压力, Pa;

p_e ——水蒸气压力, Pa。

显然, p_e 越大,大气中的水蒸气含量就越多。然而,在一定的温度下,大气中所能容纳的水蒸气的含量是有限的,也就是说对应一定的温度, p_e 存在最大值,此时空气中的水蒸气达到饱和状态,对应的 p_e 值为饱和水蒸气分压力,用 p_{es} 表示。

长期的研究表明,饱和水蒸气分压力 p_{es} 的大小取决于温度、相态(水、冰),当然蒸发面的形状(凹面、平面、凸面)对其也有一定的影响。

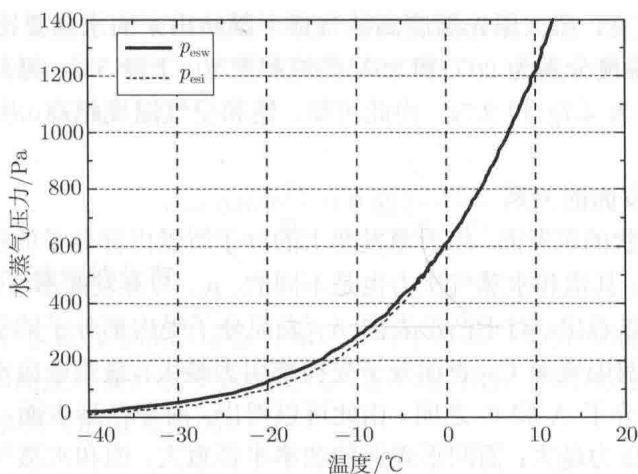
1) p_{es} 与温度和相态的关系

从分子运动的观点来看,所谓饱和水蒸气,实际上是指在单位时间内从蒸发面逸出的水分子数和返回的水分子数相等时的水蒸气压力。当温度增加时,水分子的平均动能增加,运动加剧,单位时间内从蒸发面内跑出来的水分子数增多,此时只有当蒸发面上的水蒸气分子密度增加、压力增大时才能使回到蒸发面的水分子数与从蒸发面逸出的水分子数达到平衡。因此,随着温度升高,饱和水蒸气分压力必然增大,当然,随着温度下降,水分子运动减缓,饱和水蒸气压力减小。

蒸发面的相态对饱和水蒸气压力也有较大的影响。例如,对于冰面,由于水分子从冰面跑出来比较困难,因此其表面的饱和水蒸气压力要比同样温度下水面的值低。同样对于溶液而言,由于溶液中的溶质对水分子的吸引力比纯水的大,因此水分子逸出溶液表面也难一些,又由于溶质分子在溶液表面占据了一定的面积,使得蒸发面积减小,即使在相同温度、蒸发面积下,溶液表面的饱和水蒸气压力要比单纯水面的小。溶液的浓度越高,相应的表面饱和水蒸气压力越小,其表面就越容易发生水蒸气凝结,这一特性在云的形成中是十分重要的。

p_{es} 与温度 t 和蒸发面相态的关系如图 1.3 所示,图中实线表示水面上的饱和水蒸气压力,虚线表示冰面上的饱和水蒸气压力。

不同的文献对饱和水蒸气压力有不同的表示,但大多采用经验公式,本书介绍两组经验公式供读者参考。

图 1.3 p_{es} 与温度 t 和蒸发面相态的关系

首先介绍气象上常用的马格努斯公式:

$$p_{esw} = p_{es0} \times 10^{\frac{7.45t}{235+t}} \quad (1.2)$$

$$p_{esi} = p_{es0} \times 10^{\frac{9.5t}{265+t}} \quad (1.3)$$

而实际测量的精确的饱和水蒸气压力列于附录附表 1 中, 与之相接近的有一组经验公式为

$$p_{esw} = \frac{10^{33.5905 + 0.00248T - \frac{3142.31}{T}}}{T^{8.2}} \quad (1.4)$$

$$p_{esi} = 10^{12.5381 - \frac{2663.91}{T}} \quad (1.5)$$

上述公式中各符号表示的意义如下:

p_{esw} ——水表面的饱和水蒸气压力, Pa;

p_{esi} ——冰表面的饱和水蒸气压力, Pa;

p_{es0} ——大气温度为 0°C 时的水面 (冰面) 饱和水蒸气压力, Pa;

t ——大气温度, $^\circ\text{C}$;

T ——大气温度, K; $T = 273.15 + t$ 。

在现代用计算机进行的精确计算中建议采用式 (1.4) 和式 (1.5)。

空气的饱和状态是一个动态平衡的过程, 是不稳定的, 当温度升高时, 原先处于饱和状态的空气会变成不饱和状态, 重新出现蒸发现象; 反之, 当温度降低时, 原先不饱和的空气可以达到饱和状态, 此时对应的温度称为露点温度, 而原先处于饱和状态的空气在温度下降时会出现过饱和状态, 一部分水蒸气会迅速凝结为水滴。大气中云的形成与空气的这一特性有关。如果将两种具有不同温度的饱和空气

降低同样多的温度, 那么原先温度高的气体中凝结出来的水滴要比温度低的气体多, 例如, 若将温度分别为 20°C 和 10°C 的饱和空气, 下降 5°C , 每立方米饱和空气凝结的水量分别为 4.7g 和 2.7g , 由此可知, 饱和空气温度越高, 所形成的云的密度也越高。

2) p_{es} 与蒸发面的关系

对于不同形状的蒸发面, 由于蒸发面上的分子所受内部分子的吸引力不同, 即使在同一温度下, 其饱和水蒸气压力也是不同的。 p_{es} 与蒸发面形状的关系如图 1.4 所示, 从图中可以看出: 对于凸形表面 A, 表面分子受内部分子的引力最小, 最容易逸出水面; 而凹形表面 C, 表面分子受内部引力最大, 最难逸出水面; B 形表面的分子受力情况介于 A 和 C 之间, 由此可以得出: 对于凸形表面, 其曲率半径愈大, 饱和水蒸气压力越大; 而凹形表面的曲率半径愈大, 饱和水蒸气压力越小。

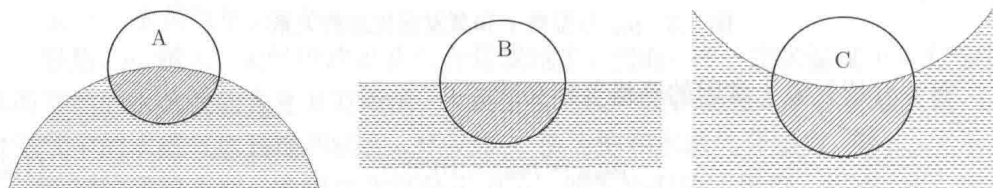


图 1.4 p_{es} 与蒸发面的关系

相对湿度是指空气中的实际水蒸气与同温度下饱和水蒸气压力之比, 它反映了空气中的水蒸气含量达到饱和状态的程度, 一般用下式表示:

$$\varphi = \frac{p_e}{p_{\text{es}}} \times 100\% \quad (1.6)$$

式中: φ ——相对湿度, %。

显然, 若 $\varphi < 100\%$, 则 $p_e < p_{\text{es}}$, 表示空气中的水蒸气未达到饱和状态; 若 $\varphi = 100\%$, 则 $p_e = p_{\text{es}}$, 表示空气中的水蒸气正好达到饱和状态; 若 $\varphi > 100\%$, 则 $p_e > p_{\text{es}}$, 表示空气中的水蒸气已达到过饱和状态。

2. 含湿量

含湿量是指一定容积的湿空气中水蒸气质量与干空气质量之比, 用下式表示:

$$d = \frac{m_e}{m_a} = \frac{p_e V_e}{R_e T_e} \times \frac{R_a T_a}{p_a V_a} = \frac{R_a}{R_e} \frac{p_e}{p_a}$$

式中: d ——含湿量;

m_a 、 m_e ——分别表示干空气和水蒸气的质量, kg;

p_a 、 p_e ——分别表示干空气和水蒸气的压力, Pa, $p_a = p - p_e$;

V_a 、 V_e ——分别表示干空气和水蒸气的体积, m^3 , $V_a = V_e$;

T_a 、 T_e ——分别表示干空气和水蒸气的热力学温度, K, $T_a = T_e$;
 R_a 、 R_e ——分别表示干空气和水蒸气的气体常数, J/(kg·K), 其中: $R_a = 287.053$ J/(kg·K), $R_e = 461$ J/(kg·K)。

那么,

$$d = 0.622 \frac{p_e}{p_a} = 0.622 \frac{p_e}{p - p_e} \tag{1.7}$$

1.2.2 大气中水蒸气的分布

分析大气中水蒸气形成的过程可知, 大气中水蒸气的分布随地区、季节、昼夜、气象参数和高度等条件的变化而变化, 是不均匀的, 下面从垂直和水平两个方向分析大气中水蒸气的分布情况。

1. 大气中水蒸气的垂直分布

大气中的水蒸气主要来源于地表各含水物质的蒸发, 并由气流的运动带入空中, 因此, 不难想象随着高度的上升, 大气中水蒸气的压力会下降。表 1.1 是某地区观测记录的水蒸气量在一年中的两个典型月份随高度变化的情况。由表中数据可以发现: 随着高度上升, 大气中水蒸气的含量迅速下降, 有些观点粗略地认为 6km 以上的空气就是干空气, 但实际飞行时空空仍有可能遇到过冷水滴。

表 1.1 水蒸气参数随高度分布的平均值变化表^[1]

参数		0	1km	2km	3km	4km	5km	6km	7km	8km
p_e/Pa	1 月	390	300	200	120	70	30	20	10	10
	7 月	1750	1080	700	410	270	160	80	40	10
	年均	860	540	370	240	150	80	40	20	10
$d/(\text{g/kg 干空气})$	1 月	2.1	1.9	1.7	0.9	0.5	0.3	0.2	0.2	0.2
	7 月	9.9	7.9	5.6	3.9	2.7	1.7	1.0	0.6	0.4
	年均	5.0	4.0	2.8	2.0	1.3	0.8	0.5	0.3	0.2
$\varphi/\%$	1 月	87	84	78	72	66	61	59	55	51
	7 月	72	72	64	63	58	59	47	43	41
	年均	78	77	71	64	59	55	52	49	47

2. 大气中水蒸气的水平分布

大气中水蒸气的含量受温度的影响较大, 随着地球表面纬度的不同, 例如赤道地区到两极的温度分布有很大的变化, 因此, 赤道地区的水蒸气压力为 2400~2700Pa, 而两极地区只有 230~270Pa, 中纬度区域的平均水蒸气压力可参考表 1.2。

同时, 不同的季节、地表植被、水域等的分布情况也对该区域上空的水蒸气分布有比较大的影响, 造成同一纬度的不同地区水蒸气分布情况的差异, 例如, 沿海地区的年均相对湿度约 80%, 而沙漠地区可能小至 5%~10%。在冬季, 亚洲大陆的

东北部接近寒带，气温很低，相应的饱和水蒸气压力很小，而相对湿度反而比沿海地区大。

表 1.2 中纬度区域的平均水蒸气压力分布参考表^[1]

参数	5°	15°	25°	35°	45°	55°	65°
T/K	298.5	298.4	294.9	288.3	287.7	274.2	266
p_e/Pa	2530	2290	1840	1290	930	650	410
$\varphi/\%$	79	75	71	70	74	78	82

1.2.3 大气中水蒸气的相态变化

众所周知，当物质的温度低于其临界温度值时，会发生由气态变为液态甚至固态的变化。水蒸气的临界温度为 374°C ，比通常的大气温度都高，而大气温度有时会降至水的凝固温度 0°C 以下，所以，大气中的水蒸气在自然条件下就可以由一种状态转变为另一种状态，并且可以同时以两个甚至三个相态存在。当然，这种两相或三相共存是有条件的，图 1.5 就表示了这一条件。

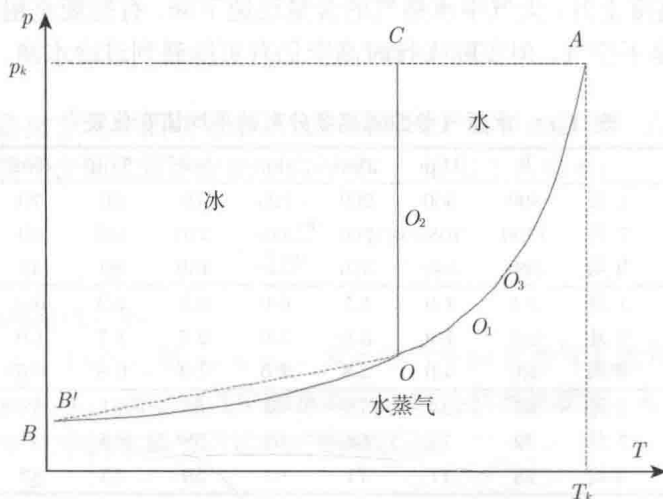


图 1.5 水的三相共存条件

从图中可以看出：“O”点是三相平衡点，该点对应的温度为 273K ，水蒸气压力为 611Pa 。在“OA”线上各点所对应的温度和水蒸气压力条件下，水与水蒸气可以同时共存，同样，“OC”线是水与冰共存的压力和温度对应的关系线，在这条线的左右状态，当压力保持不变而温度增加时，冰可以融化成水，所以“OC”线又叫做融解线。图中的“OB”线是过冷水与水蒸气共存时的状态线，而“OB'”线是冰、过冷水和水蒸气共存时对应的状态分界线，在这条线上，可以出现三相共存的