

§ 3 利用物质几何尺寸变化的湿度计

一、概述

翻开湿度测量科学的历史,就会发现早在几百年前人们就已利用天然物质由于湿度变化会引起膨胀和收缩的特性制成各种各样的湿度计,所用的物质包括木头、棉线、鲸鱼骨头、青蛙皮、印度草、毛发、丝绸、肠衣、象牙、直到山羊胡须等,五花八门,可谓琳琅满目。其中毛发和肠衣至今仍广泛使用。毛发湿度计虽然准确度较低,但与当代的各种湿度计相比,它具有结构简单、使用方便、造价低廉的优点。从湿度计量的现状与要求来看,即使在科学技术高度发达的今天,毛发、肠衣之类湿度传感器仍将继续为人们沿用。这一方面说明了它们的使用价值,此外,也反映了湿度测量技术落后的另一面。本节着重介绍毛发湿度计的理论和应用。

1783 年 De Saussure 首先(或者是最早几个人中的一个)制

成了毛发湿度计。不久之后, J. Baptiste 使用了肠衣。后来, 盖·吕萨克 (Gay Lussac) 等人对毛发做了大量的实验研究, 掌握了毛发的特性, 并对其物理、化学过程进行了探讨。十九世纪末, И.Б.Среневский 建立了比较完善的毛发理论。但他的理论, 对毛发的工作机理仍然未能作出圆满的解释, 在某些方面还存在分歧^[1]。

毛发和肠衣的测湿原理是利用人们熟知的一种现象, 即很多物质在湿度发生变化时其长度随之变化。古代人们就懂得利用这种性质来拖动巨石, 竖立柱桩。当相对湿度从 0 变到 100% 时, 通常人类毛发长度的变化为其总长度的 2.5 %。这一变化可以通过机械放大用指针指示出来, 或通过机械——电量的转换, 输出表征湿度水平的电信号, 用以进行湿度的测量和控制。

毛发湿度计虽然有上述优点, 但也存在滞后和精度不高等固有的缺点。尽管在之后近二百年的使用过程中人们不断地致力于研究和改进, 却始终未能取得重要的突破。此外, 毛发在增湿和降湿过程的响应曲线不同, 形成一个滞后环。如果使用和保管不当, 毛发的滞后效应会进一步加剧, 可能产生严重的误差。毛发湿度计测量精度在 $\pm 5\%$ RH 左右。一般来说, 采用单根毛发的湿度表比用毛发束做成的湿度计的精度和灵敏度都要好得多。

实践和理论都证明, 天然毛发的长度随湿度的变化是非线性的。图 2.3.1 是 Gay Lussac 和 Regnault 等人通过精确实验得到的曲线。一般称为盖·吕萨克曲线。该曲线所反映的毛发长度变化特性与现代的实验结果相符^[2,3,4]。毛发长度变化有两个特点, 一个是在低湿时, 长度的变化率高, 在 30 % RH 时, 其变化量已达到最大变化量的一半。另一个特点是在高湿时, 湿度变化 10 %, 毛发的伸长大大低于比较干燥时的伸长率。实验证明, 湿度在 90 % 以上时, 毛发湿度计是不可靠的。而湿度在 10 % 以下时, 其灵敏度也大大降低, 见图 2.3.2。

应当指出, 虽然毛发的长度亦随温度而变化(其变化特性与湿

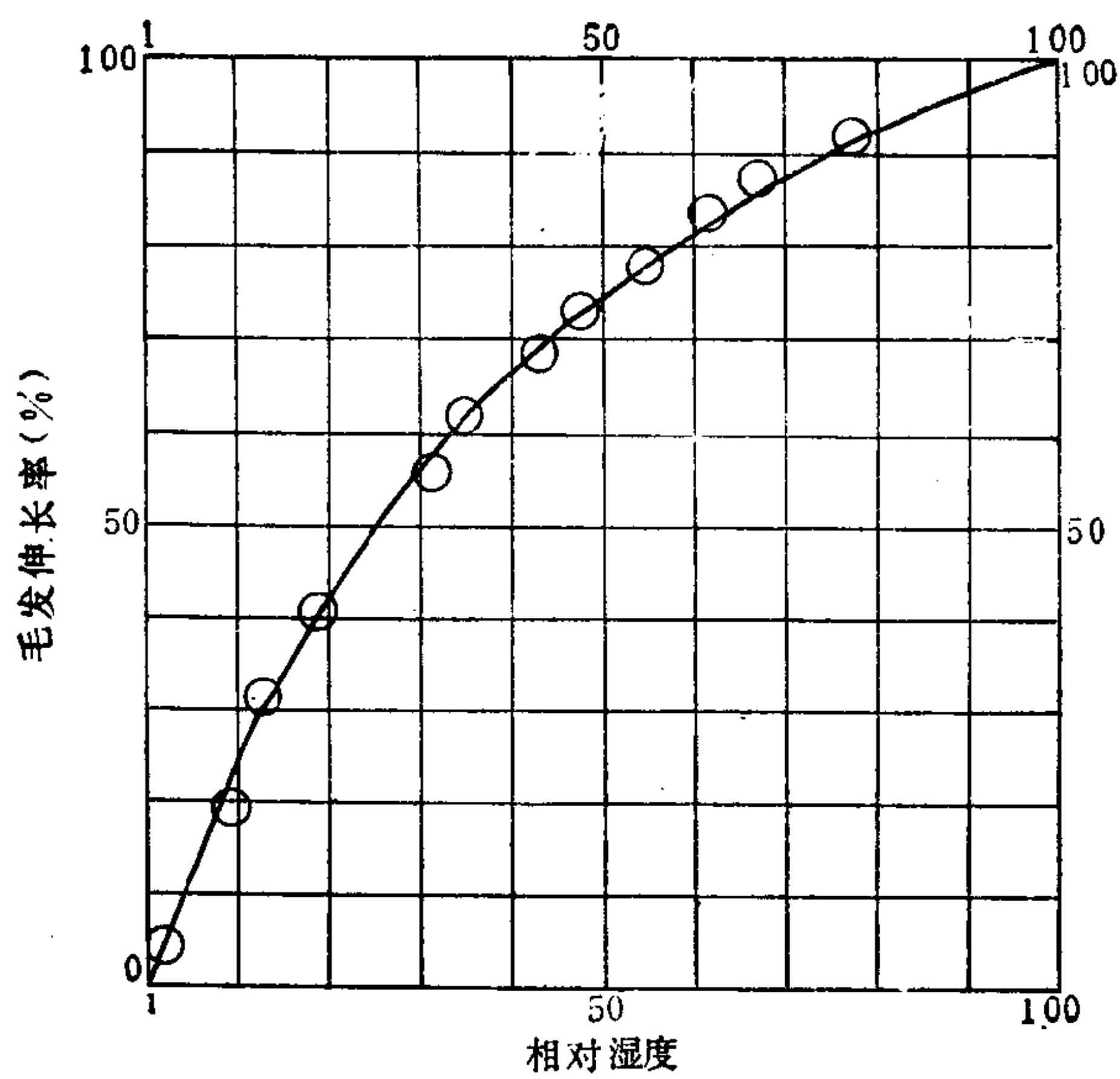


图2.3.1 毛发伸长与相对湿度的关系曲线

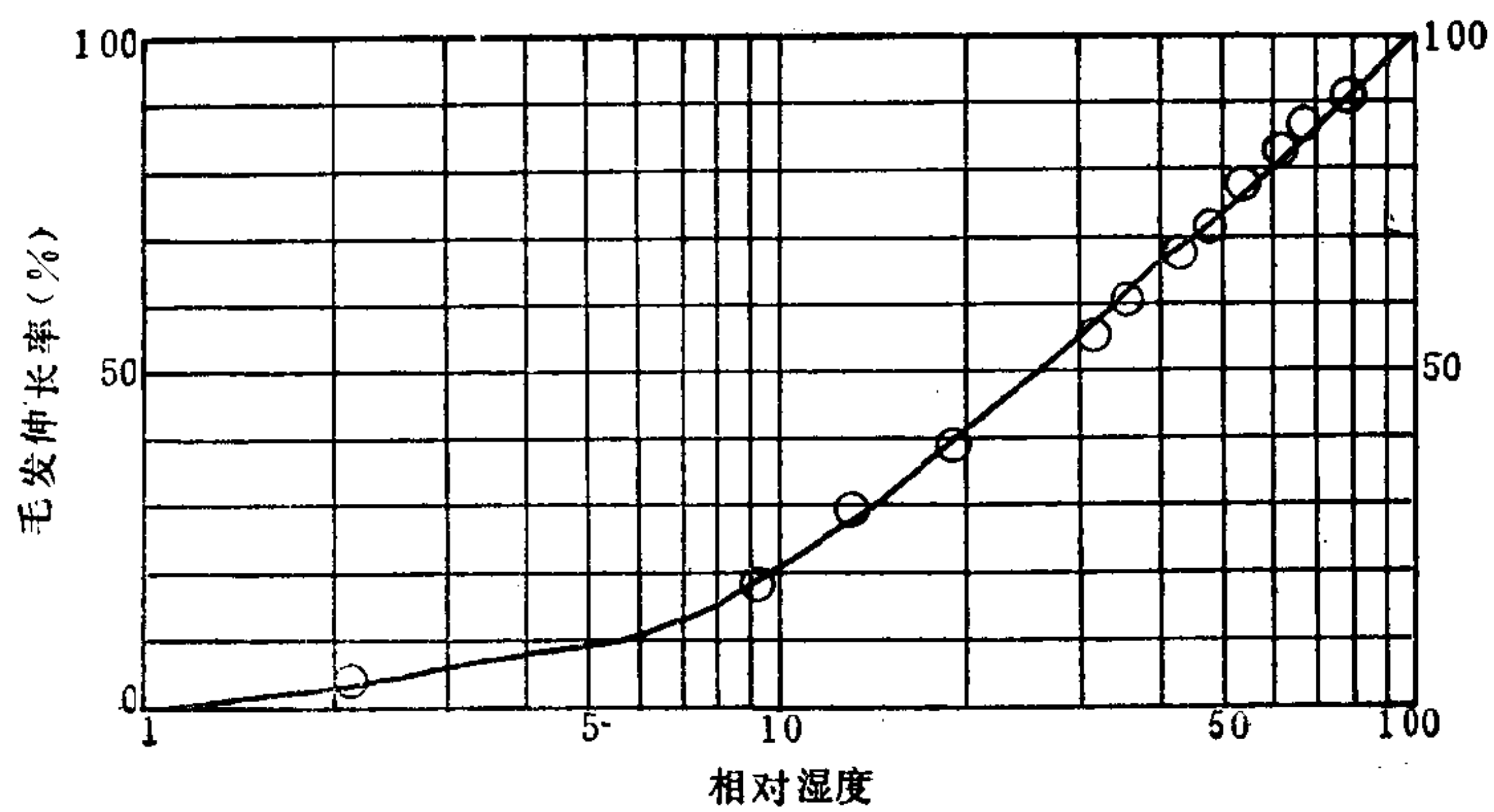


图2.3.2 湿度低于10%时毛发的响应曲线

度相关),但在温度不太低时,其热膨胀系数小,这是毛发可以在相当宽的温度范围使用的原因之一。这个问题下面还要详细讨论。

从五十年代起,有些人开始研究用人造纤维代替毛发制造湿度计,研究对象主要是一系列尼龙材料。Abbott 用 600 mg^{-1} 的尼龙66丝进行了实验,发现其最大伸长率比毛发大50%。^{*}Gustafson 在1965年发表的文章中,推荐用尼龙6丝或薄膜,这种材料的最大伸长率可达6%。最近,Leivers 的实验报告认为尼龙6在中等湿度范围内有可取之处。

二、Срезневский 和 Gregory 的毛发理论

毛发和肠衣都是由蛋白质组成,并存在着微孔结构。这两种感湿元件的工作机理目前存在微孔感湿和蛋白质感湿两种学说。关于微孔结构感湿原理比较直观和容易了解,而对蛋白质感湿原理就不那么直观,其工作机理亦了解得不够透彻。1882年 Срезневский 首先从理论上阐明了毛发的工作原理^[5]。其后 Gregory 对其理论的某些方面进行了补充和发展。然而,总的来说,到目前为止还没有一种理论得以对毛发和肠衣的感湿特性作出圆满的解释。

显微照片表明,毛发表面有许多微孔。这些微孔或充满色素或充满空气和水,或两者兼而有之。不言而喻,那些充满空气或水的微孔对毛发的吸湿特性起着主要作用。Срезневский 的理论结构模型如图2.3.3所示。未经处理的毛发表面覆盖着一层油脂,因此必须去掉这层油脂才能使微孔与外界环境相通,并使孔壁对水具有润湿性。这就是为什么毛发湿度计使用的毛发一定要进行脱脂处理的缘故。

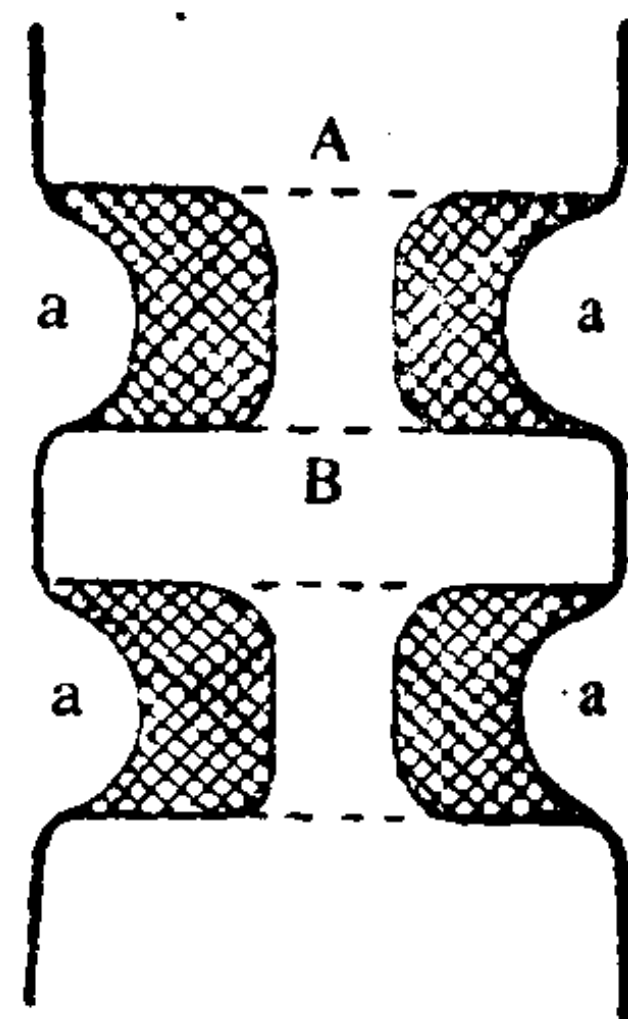


图2.3.3 吸附水汽的人发理论结构模型

按照 Срезневский 的微孔结构理论, 当空气中的水汽未达到饱和状态时, 微孔吸附空气中的水汽并使之凝结。由于表面张力的作用, 孔中的水形成一个弯月面。当空气中的水汽达到饱和时, 微孔中水的弯月面就变成平面, 即曲率半径趋于无穷大。汤姆逊的研究证明, 液体表面上的饱和水汽压随液面的曲率而变。而任何引起曲率改变的因素, 例如空气湿度的变化, 都将引起微孔弹性壁的形变。假设毛发组织遵守胡克定律, 那末由此出发就可以找到毛发的长度变化与周围空气相对湿度之间的函数关系。据此, 汤姆逊证明当液体表面上的水汽达到饱和状态时, 相对湿度的自然对数与液面的曲率半径服从如下关系式,

$$\ln \frac{e_1}{e_0} = \alpha \sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (2.3.1)$$

式中 e_1 为凹面上的饱和水汽压力, e_0 是平面上的饱和水汽压力, σ 是水的表面张力系数, R_1 和 R_2 是凹面的曲率半径, α 是比例系数。

根据拉普拉斯的公式, 式(2.3.1)中的 $\sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$ 项正是凹面下的内压力与平面下的内压力相比较时的减少量。假定毛发长度的变化与所受的应力成比例, 则有

$$P = M \frac{\Delta l}{l} \quad (2.3.2)$$

式中 $P = \sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$, M 是毛发的收缩系数, l 为微孔中水表面的曲率半径为无穷大时的毛发长度, Δl 是在应力作用下长度的减少量。根据式(2.3.1)作适当的变换, 则得

$$\ln \frac{e_1}{e_0} = c \Delta l \quad (2.3.3)$$

式中的 $c = \frac{\alpha M}{l}$ 。

这样, 如果空气中的水汽压力低于饱和压力时, 则一部分水从

微孔中蒸发,孔中的弯月面就呈凹形,同时弯月面的曲率将和相对湿度的自然对数成比例。因为脱脂后的人发微孔被水浸润(见图2.3.3),于是弯月面a弯曲时孔的横截面AB距离就会缩小,因而毛发的长度随之缩短。

Gregory 提出的毛发理论结构模型如图2.3.4所示。按照这一理论模型,两个平行的弹性板之间只能容纳很少的水。如果 d 为两个板壁之间的距离,则弯月面的曲率半径为 $d/2$, 如图2.3.5所示。 σ 为水的表面张力单数, P_i 为弯月面下水的内压力。那末由力

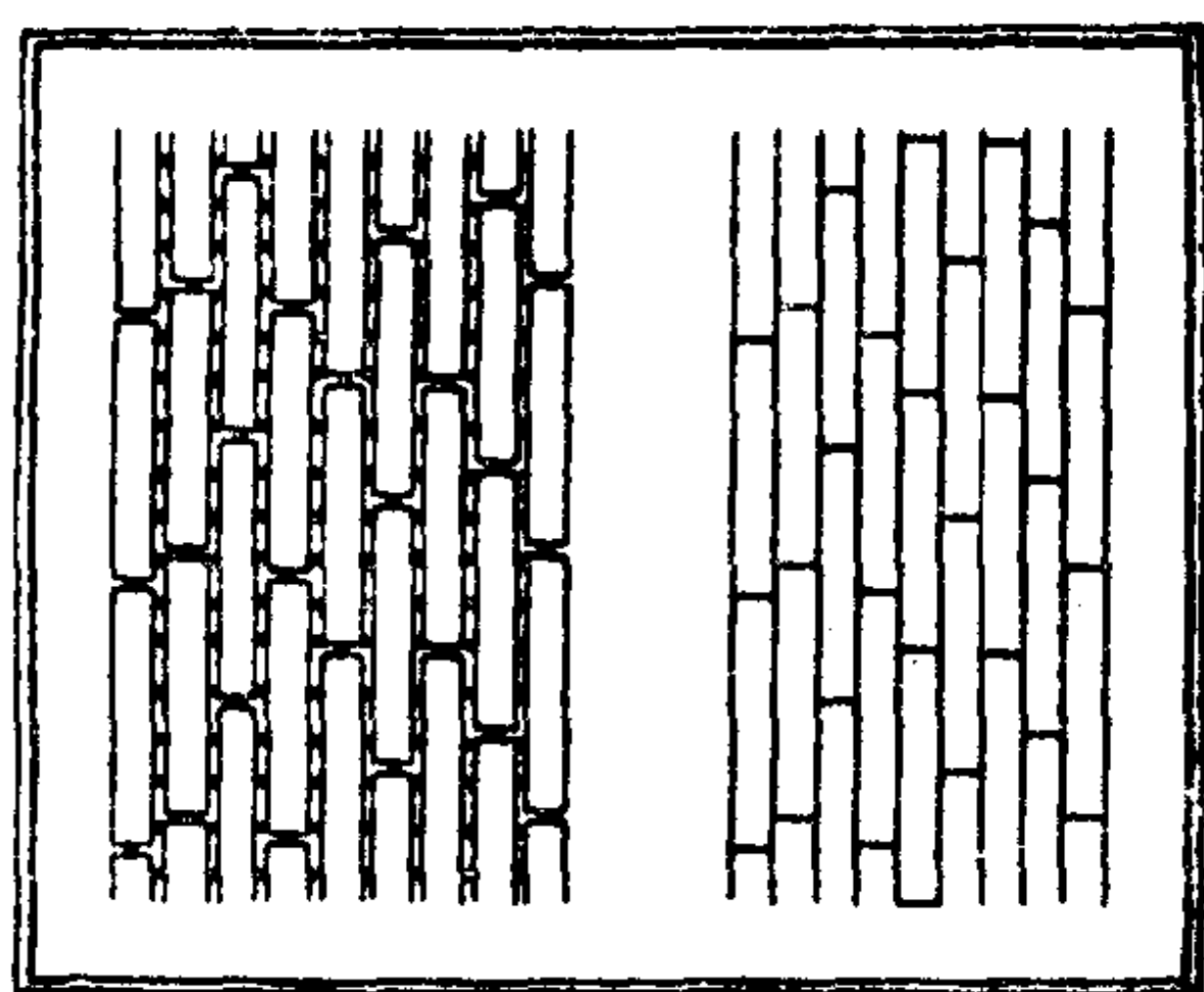


图2.3.4 人发的理论结构模型



图2.3.5 人发微孔的理论模型

平衡原理有

$$P_1 - P_i = \sigma \left(\frac{2}{d} - \frac{1}{r_1} \right) \quad (2.3.4)$$

式中 r_1 和 $d/2$ 表示弯月面的曲率半径, P_1 是由空气和水汽共同产生的外压力。如果 $r_1 \gg d/2$, 则式(2.3.4)可以写成

$$P_i = P_1 - \frac{2\sigma}{d} \quad (2.3.5)$$

在所讨论的情况下 d 非常小, P_i 的计算值为负值。这说明弯月面内的液体处于拉紧状态。

如果我们进一步假设弹性板壁的位置相对固定,同时将它插入水中,并假定在液面的上方只有水汽存在,如图2.3.6所示。 e_w

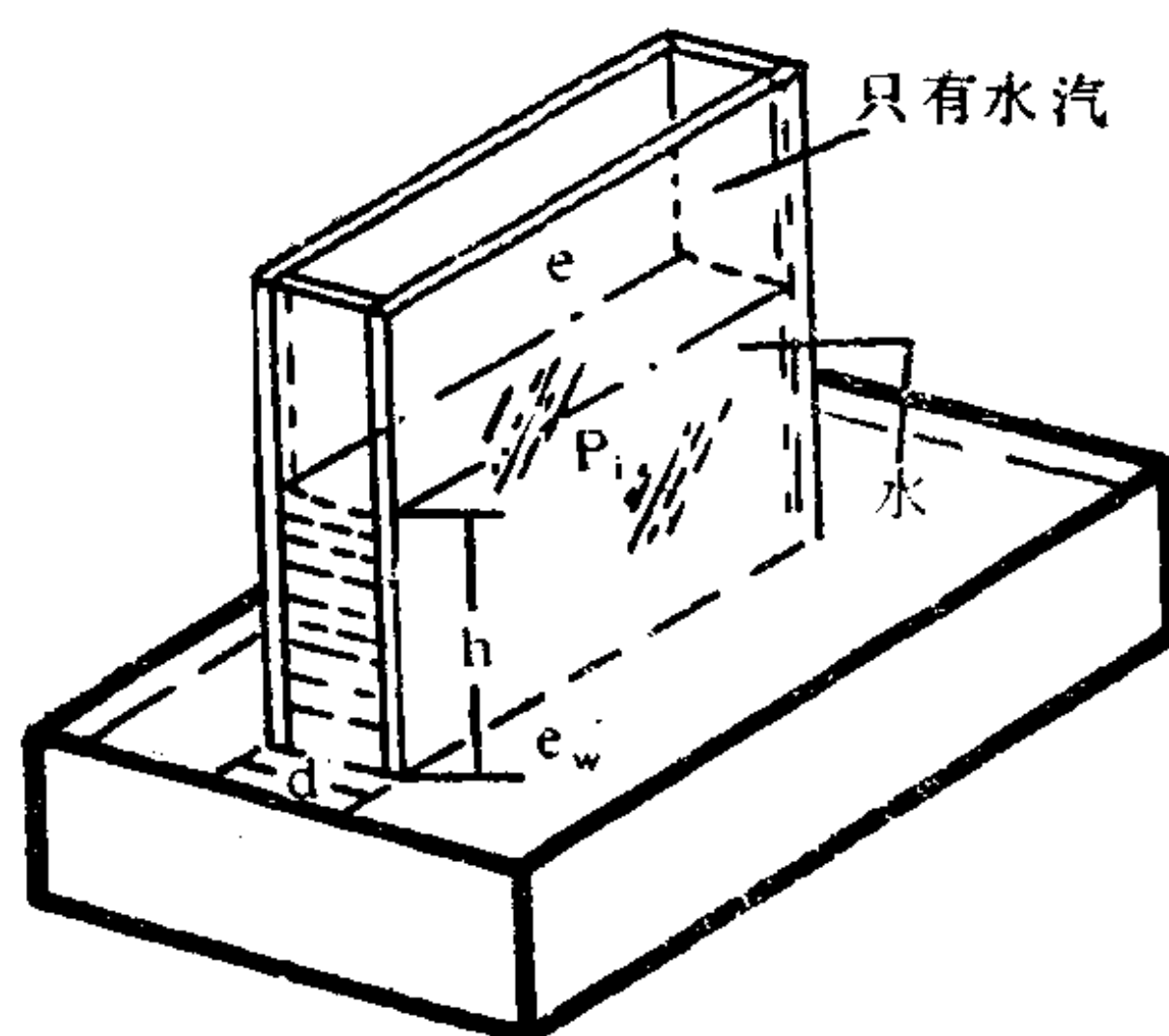


图2.3.6 水的表面张力与其邻近气体相对湿度的关系

为靠近水面的水汽压, e' 是弯月面处的水汽压, 弯月面高 h , d 为人发的孔径, 相当于平行板壁之间的距离, 弯月面的曲率半径为 $d/2$ 和 ∞ 。当 d 减小时, 水的表面张力将沿垂直于板壁表面的方向作用于两个平行弹性板上。此外, 通过一系列推导得

$$\begin{aligned} P_i &= e_w - \frac{\rho R T}{M_v} \ln \frac{e_w}{e'} \\ &= e_w - \frac{\rho R T}{M_v} \ln \frac{100}{U} \end{aligned} \quad (2.3.6)$$

式中 e' 为邻近毛发表面大气中水汽分压, e_w 是在同一温度下水平面上的饱和水气压, ρ 、 M_v 、 T 分别为水的密度、分子量及体系的绝对温度。当空气比较干燥时, 分压 e' 减小, 作用力使平板相互靠近, 从而引起板壁发生形变。这就是干燥时毛发收缩的原因。式 (2.3.5) 和 (2.3.6) 可用来验证该理论的正确性。

如果从理论出发, 可以用一组互相平行的弹性槽来代替人发。槽内有水, 见图 2.3.7。然后就可以研究周围湿度变化时毛发表现的特性。

若以 x_1 表示相应于饱和时每单位长度的变化, 那末

$$P_i/x_1 = E = \text{毛发弹性组织的杨格系数}$$

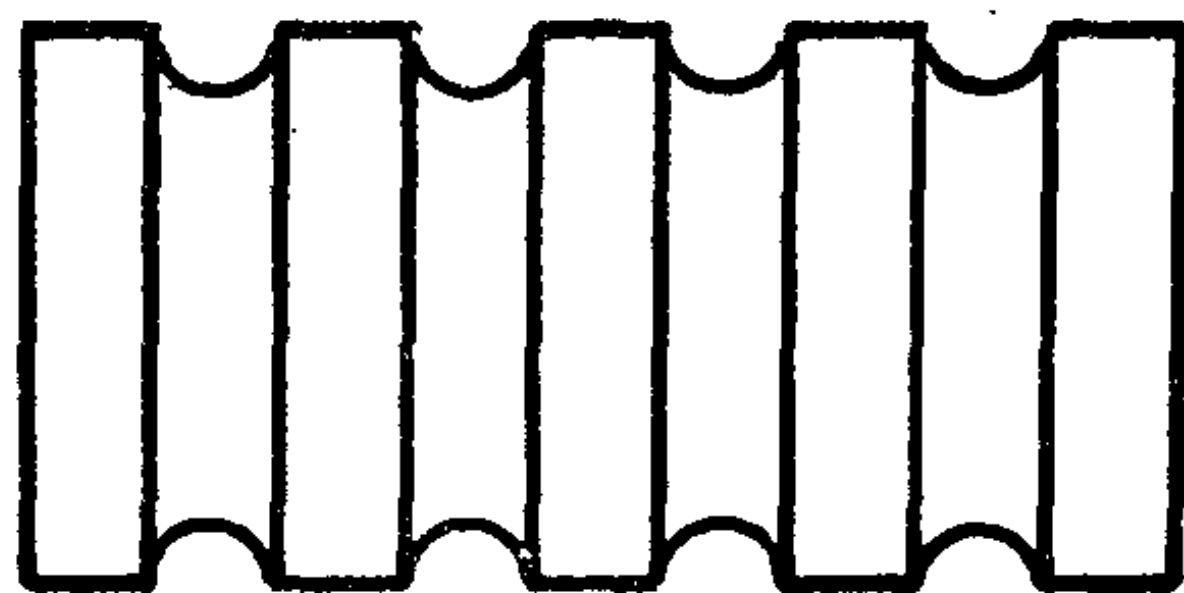


图2.3.7 人发结构的理论模型

或

$$x_1 = \frac{P_i}{E} = \frac{\rho RT}{EM_v} \ln \frac{100}{U} \quad (2.3.7)$$

上式为式(2.3.6)省略了 e_w 一项的结果。该式表明,毛发的收缩与 $\ln U$ 成线性关系。这个结论在 20—100% 的相对湿度范围内得到证实,如图 2.3.2 曲线所示。