

# 第七章 纤维的热学、光学和电学性质

## 第一节 纤维的热学性质

### 一、比热

#### 1. 比热的概念

单位质量的纤维，温度升高(或降低)1℃所需要吸收(或放出)的热量，叫纤维的比热。

#### 2. 常见纺织纤维的比热

表 7-1 常见干燥纺织纤维的比热表(测定温度为 20℃) 单位: J/g·℃

| 纤维种类 | 比热值       | 纤维种类    | 比热值       | 纤维种类    | 比热值  |
|------|-----------|---------|-----------|---------|------|
| 棉    | 1.21~1.34 | 粘胶纤维    | 1.26~1.36 | 羽绒      |      |
| 羊毛   | 1.36      | 锦纶 6    | 1.84      | 芳香聚酰胺纤维 | 1.21 |
| 桑蚕丝  | 1.38~1.39 | 锦纶 66   | 2.05      | 醋酯纤维    | 1.46 |
| 亚麻   | 1.34      | 涤纶      | 1.34      | 玻璃纤维    | 0.67 |
| 大麻   | 1.35      | 腈纶      | 1.51      | 石棉      | 1.05 |
| 黄麻   | 1.36      | 丙纶(50℃) | 1.80      | 木棉      |      |

#### 3. 影响纺织纤维比热的主要因素

##### (1) 水分的影响

$$C = C_0 + \frac{W}{1+W}(C_w - C_0)$$

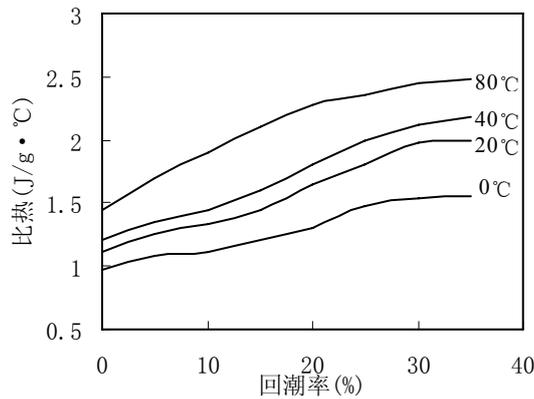


图 7-1 羊毛纤维比热与回潮率三和温度的关系

##### (2) 温度的影响

一般认为，温度较高时，具有一定回潮率纤维的比热增大。

##### (3) 纤维结构的影响

在 220℃ 附近，出现第二次熔前结晶，比热稍有下降。而后者为缓慢上升曲线，无再结晶的现象。

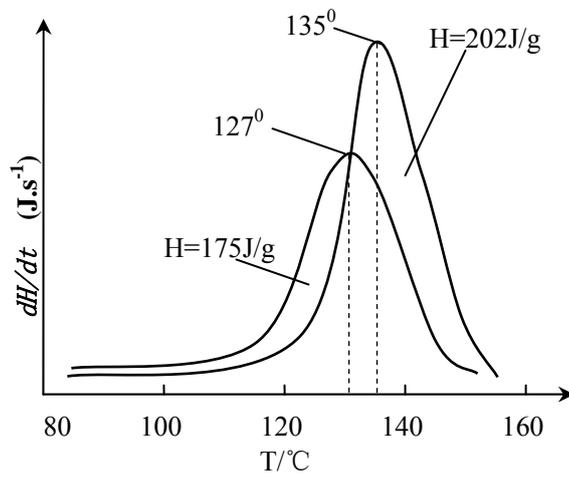


图 7-2 不同取向聚乙烯纤维的 DSC 图谱

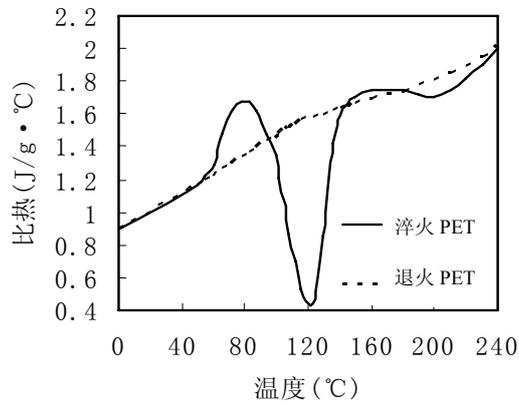


图 7-3 两种涤纶丝的比热随温度的变化规律

#### 4. 比热对纤维加工和使用的影响

## 二、导热系数

### 1. 导热的概念与导热系数

导热主要通过热传导、对流和热辐射三种方式来实现。单纤维的热传递性是极困难的，一般采用纤维集合体的方式。

$$Q = \lambda \frac{dT}{dx} \cdot t \cdot s \quad (7-3)$$

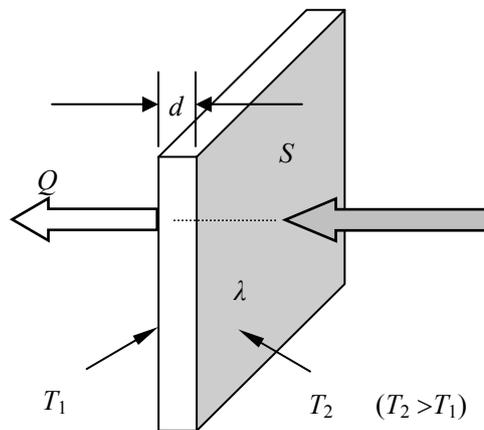


图 7-4 热传递示意图

表 7-2 常见纺织纤维的导热系数

| 纤维制品  | $\lambda$ (W/m $\cdot$ °C) | $\lambda_{//}$ | $\lambda_{\perp}$ |
|-------|----------------------------|----------------|-------------------|
| 棉纤维   | 0.071~0.073                | 1.1259         | 0.1598            |
| 羊毛纤维  | 0.052~0.055                | 0.4789         | 0.1610            |
| 蚕丝纤维  | 0.05~0.055                 | 0.8302         | 0.1557            |
| 粘胶纤维  | 0.055~0.071                | 0.7180         | 0.1934            |
| 醋酯纤维  | 0.05                       |                |                   |
| 羽绒    | 0.024                      |                |                   |
| 木棉    | 0.32                       |                |                   |
| 麻     |                            | 1.6624         | 0.2062            |
| 涤纶    | 0.084                      | 0.9745         | 0.1921            |
| 腈纶    | 0.051                      | 0.7427         | 0.2175            |
| 锦纶    | 0.244~0.337                | 0.5934         | 0.2701            |
| 丙纶    | 0.221~0.302                |                |                   |
| 氯纶    | 0.042                      |                |                   |
| 静止干空气 | 0.026                      | —              | —                 |
| 纯水    | 0.697                      | —              | —                 |

## 2. 影响纤维导热系数的因素

- (1) 纤维的结晶与取向
- (2) 纤维集合体密度

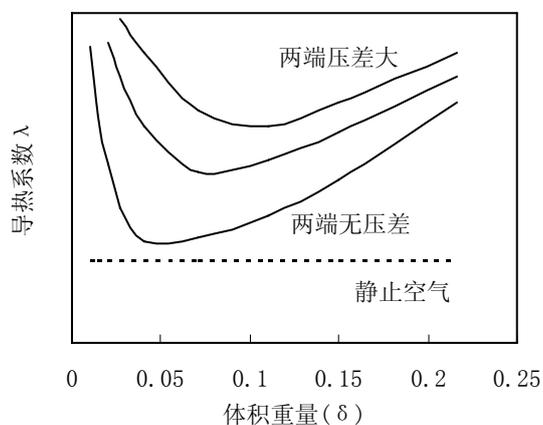


图 7-5 纤维层体积重量和导热系数间的关系

- (3) 纤维排列方向

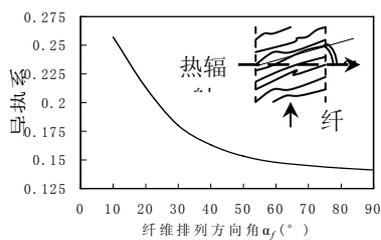


图 7-6 纤维排列方向角  $\alpha_f$  与导热系数的关系

(4) 纤维细度和中空度

(5) 环境温湿度

表 7-3 温度与纤维导热系数间的关系

| 纤维 | 导热系数 $\lambda$ (W/m $\cdot$ °C) |       |       |
|----|---------------------------------|-------|-------|
|    | 0°C                             | 30°C  | 100°C |
| 棉  | 0.058                           | 0.063 | 0.069 |
| 羊毛 | 0.035                           | 0.049 | 0.058 |
| 亚麻 | 0.046                           | 0.053 | 0.062 |
| 蚕丝 | 0.046                           | 0.052 | 0.059 |

3. 导热系数对加工和使用的影响

### 三、热作用时的纤维性状

1. 两种转变和三种力学状态

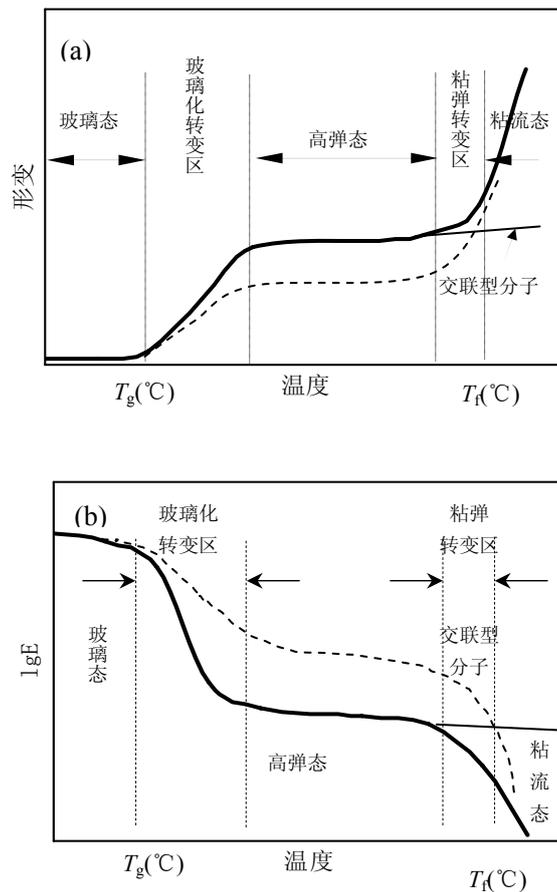


图 7-7 非晶态材料的热机械性质

2. 三态及转变的分子运动机理

(1) 玻璃态

(2) 玻璃化转变区

(3) 高弹态

(4) 粘弹转变区

(5) 粘流态

### 3. 常见纺织纤维的三态转变温度

#### 4. 热定形与变形

(1) 热定形及其机理

表 7-4 常见纺织纤维的热学性能

| 纤维    | 玻璃化温度 $T_g$ (°C) | 软化点 $T_m$ (°C)    | 熔点 $T_f$ (°C) | 分解点 $T_d$ (°C) | 熨烫温度(°C) |
|-------|------------------|-------------------|---------------|----------------|----------|
| 棉     | 230              | —                 | —             | 150            | 200      |
| 羊毛    | 60 或 80          | —                 | 63.1          | 135            | 180      |
| 蚕丝    | —                | —                 | —             | 150            | 160      |
| 麻     | —                | —                 | —             | 253            | 100      |
| 粘胶    |                  |                   |               | 260~300        | 110      |
| 醋酯    | 186              | 195~205           | 290~300       | —              | 110      |
| 锦纶 6  | 47, 65           | 180               | 215           | —              | 125~145  |
| 锦纶 66 | 82               | 225               | 253           | 300            | 120~140  |
| 涤纶    | 80, 67, 90       | 235~240           | 256           | —              | 160      |
| 腈纶    | 90               | 190~240           | —             | 280~300        | 130~140  |
| 维纶    | 85               | 干: 220~230 水: 110 | —             | —              | 干: 150   |
| 丙纶    | -35              | 145~150           | 163~175       | —              | 100~120  |
| 氯纶    | 82               | 90~100            | 200           | —              | 30~40    |

(2) 热定形效果的持久性

(3) 热定形的方法

(4) 影响热定形效果的主要因素

表 7-5 几种纤维织物的常用热定形温度

| 纤维品种  | 热定形温度(°C) |         |         |
|-------|-----------|---------|---------|
|       | 热水定形      | 蒸汽定形    | 干热定形    |
| 涤纶    | 120~130   | 120~130 | 190~210 |
| 羊毛    | 90~100    | 100~120 | 130~150 |
| 锦纶 66 | 100~120   | 110~120 | 170~190 |
| 腈纶    | 125~135   | 130~140 |         |
| 丙纶    | 100~120   | 120~130 | 130~140 |

(5) 热变形加工

## 四、纤维的耐热性和热稳定性

### 1. 耐热性

表 7-6 常见纺织纤维受热后的剩余强度(%)

| 纤维   | 在 20℃ | 在 100℃  | 在 100℃  | 在 130℃  | 在 130℃  |
|------|-------|---------|---------|---------|---------|
|      | 未加热   | 经过 20 天 | 经过 80 天 | 经过 20 天 | 经过 80 天 |
| 棉    | 100   | 92      | 68      | 38      | 10      |
| 亚麻   | 100   | 70      | 41      | 24      | 12      |
| 苧麻   | 100   | 62      | 26      | 12      | 6       |
| 蚕丝   | 100   | 73      | 39      | —       | —       |
| 粘胶   | 100   | 90      | 62      | 44      | 32      |
| 锦纶   | 100   | 82      | 43      | 21      | 13      |
| 涤纶   | 100   | 100     | 96      | 95      | 75      |
| 腈纶   | 100   | 100     | 100     | 91      | 55      |
| 玻璃纤维 | 100   | 100     | 100     | 100     | 100     |

## 2. 热稳定性

### (1) 质量与组成的稳定性

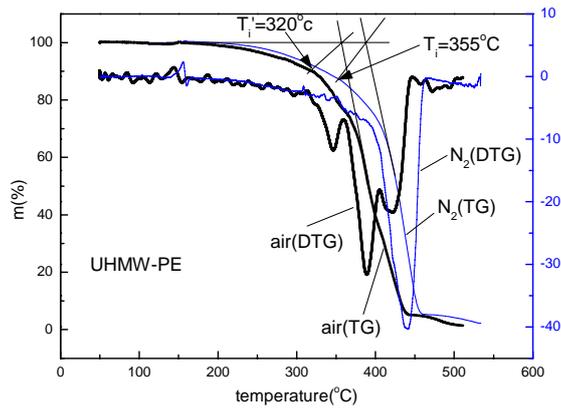


图 7-9 高强高模聚乙烯的热重曲线

### (2) 结构的稳定性

表 7-7 Kevlar®纤维的聚集态结构变化数据

| 纤维样品           | 结晶度(%) | 双折射值  |
|----------------|--------|-------|
| Kevlar129-未处理  | 67.8   | 0.736 |
| Kevlar129-200℃ | 67.6   | 0.734 |
| Kevlar129-300℃ | 67.3   | 0.731 |
| Kevlar129-400℃ | 67.2   | 0.729 |

### (3) 形态的稳定性

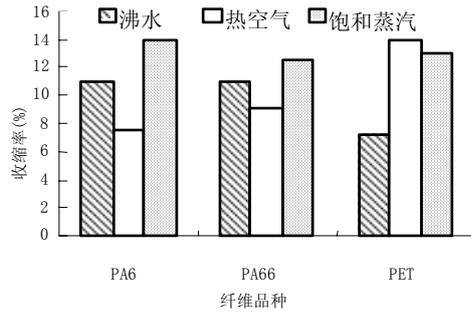


图 7-10 合成纤维的热收缩率

## 五、纤维的燃烧性能

表 7-8 主要纺织纤维的燃烧性比较

| 纤维    | T <sub>I</sub> (°C) | T <sub>B</sub> (°C) | LOI(%) |
|-------|---------------------|---------------------|--------|
| 棉     | 400                 | 860                 | 20.1   |
| 粘胶    | 420                 | 850                 | 19.7   |
| 醋酯    | 475                 | 960                 | 18.6   |
| 三醋酯   | 540                 | 885                 | 18.4   |
| 羊毛    | 600                 | 941                 | 25.2   |
| 锦纶 6  | 530                 | 875                 | 20.1   |
| 锦纶 66 | 532                 | —                   |        |
| 涤纶    | 450                 | 697                 | 20.6   |
| 腈纶    | 560                 | 855                 | 18.2   |
| 丙纶    | 570                 | 839                 | 18.6   |
| 阻燃棉   | 370                 | 710                 | 26~30  |
| Nomex | 430                 |                     | 27~30  |
| kynol | 430; 576            | 2500                | 29~30  |
| 杜勒特   |                     |                     | 35~38  |

### 1. 极限氧指数

$$LOI = \frac{V_{O_2}}{V_{O_2} + V_{N_2}} \times 100\%$$

表 7-9 LOI 对纤维燃烧性能的分类

| 分类 | LOI(%) | 燃烧状态             | 纤维品种                                   |
|----|--------|------------------|--|
| 不燃 | ≥35    | 常态环境及火源作用后短时间不燃烧 | 多数金属纤维、碳纤维、石棉、硼纤维、玻璃纤维及 PBO、PBI、PPS 纤维 |
| 难燃 | 26~34  | 接触火焰燃烧, 离火自熄     | 芳纶、氟纶、氯纶、改性腈纶、改性涤纶、改性丙纶等               |
| 可燃 | 20~26  | 可点燃, 能续燃, 但燃烧速度慢 | 涤纶、锦纶、维纶、羊毛、蚕丝、醋酯纤维等                   |
| 易燃 | ≤20    | 易点燃, 燃烧速度快       | 丙纶、腈纶、棉、麻、粘胶纤维等                        |

2. 点燃温度和燃烧时间。

3. 燃烧温度

4. 纤维难燃的途径及形式

## 第二节 纤维的光学性质

### 一、光在纤维中的反射与折射现象

当光线照射在纤维上，在纤维（介质 2）与空气或液体（介质 1）的界面处将发生反射与折射现象。

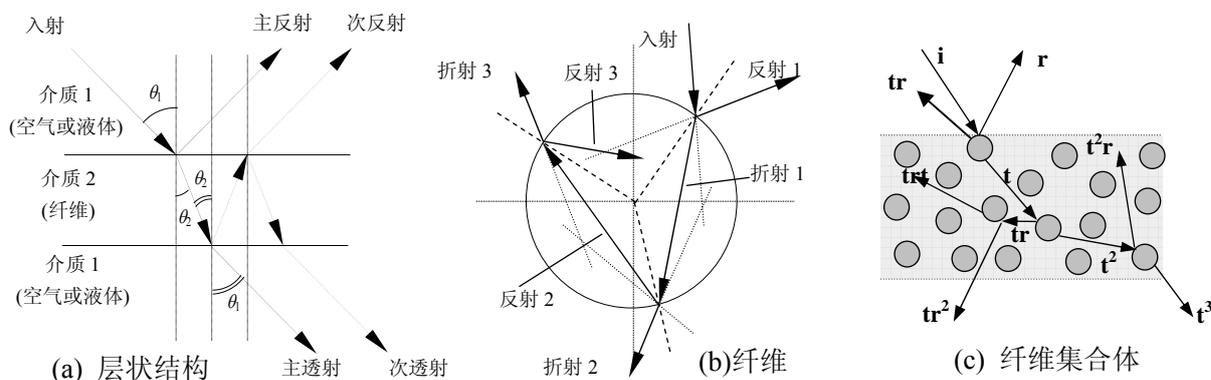


图 7-11 层状结构纤维多层反射和折射对光泽影响的示意图

### 二、光泽

#### 1. 纤维层状结构对光泽的影响

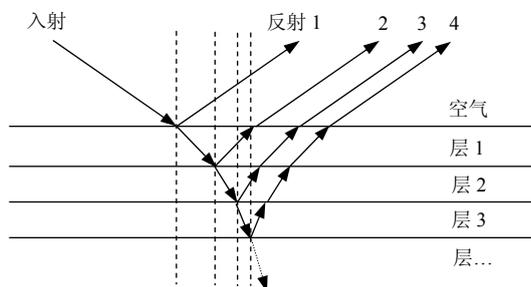


图 7-12 层状结构纤维多层反射与折射示意图

#### 2. 纤维纵向形态对光泽的影响

#### 3. 纤维横截面形状对光泽的影响

### 三、光的双折射

#### 1. 双折射现象

$$\Delta n = n_{\max} - n_{\min}$$

$n_{\parallel}$ 和  $n_{\perp}$ 分别为光波振动方向平行于纤维轴的平面偏振光传播时的折射率  $n_{\parallel}$ 和垂直于纤维轴的平面偏振光传播时的折射率  $n_{\perp}$ 。其物理过程为，可由图 7-13 表示，当一束平面偏振光  $E$  以电矢量振动方向与纤维轴夹角  $\theta$  入射纤维后，可被分解为两组相互正交的平面偏振光。

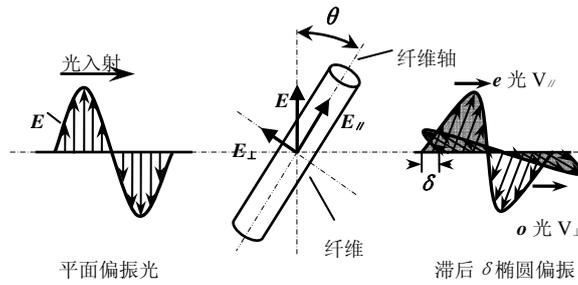


图 7-13 纤维内平面偏振光的分解与双折射现象

2. 常见纺织纤维的双折射率

3. 双折射率与纤维内部结构的关系

表 7-10 常见纤维的折射率、双折射和纤维密度 (温度  $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$ , 相对湿度  $65\% \pm 2\%$ )

| 纤维    | 密度( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ) | $n_{\parallel}$ | $n_{\perp}$ | $n_{\parallel} - n_{\perp}$ |
|-------|-------------------------------------|-----------------|-------------|-----------------------------|
| 丙纶    | 0.91                                | 1.523           | 1.491       | 0.032                       |
| 乙纶    | 0.95                                | 1.552           | 1.507       | 0.045                       |
| 锦纶 6  | 1.14~1.15                           | 1.568           | 1.515       | 0.053                       |
| 锦纶 66 | 1.14~1.15                           | 1.570~1.580     | 1.520~1.530 | 0.040~0.060                 |
| 腈纶    | 1.14~1.19                           | 1.510~1.516     | 1.510~1.516 | 0.000~0.005                 |
| 维纶    | 1.26~1.30                           | 1.547           | 1.522       | 0.025                       |
| 羊毛    | 1.30~1.32                           | 1.553~1.556     | 1.542~1.547 | 0.009~0.012                 |
| 三醋酸   | 1.30                                | 1.474           | 1.479       | -0.005                      |
| 蚕丝    | 1.00~1.36                           | 1.578~1.585     | 1.537~1.538 | 0.040~0.047                 |
| 涤纶    | 1.38~1.39                           | 1.725           | 1.537       | 0.188                       |
| 氯纶    | 1.37~1.40                           | 1.500~1.510     | 1.500~1.505 | 0.000~0.005                 |
| 苧麻    | 1.54~1.55                           | 1.595~1.599     | 1.527~1.540 | 0.057~0.058                 |
| 粘胶    | 1.52~1.53                           | 1.539~1.550     | 1.514~1.523 | 0.018~0.036                 |
| 棉     | 1.54~1.55                           | 1.573~1.581     | 1.524~1.534 | 0.041~0.051                 |
| 亚麻    | 1.54~1.55                           | 1.594           | 1.532       | 0.062                       |
| 玻璃纤维  | 2.54                                | 1.547           | 1.547       | 0.000                       |

4. 双折射率的测定

四、耐光性及光照稳定性

1. 耐光性

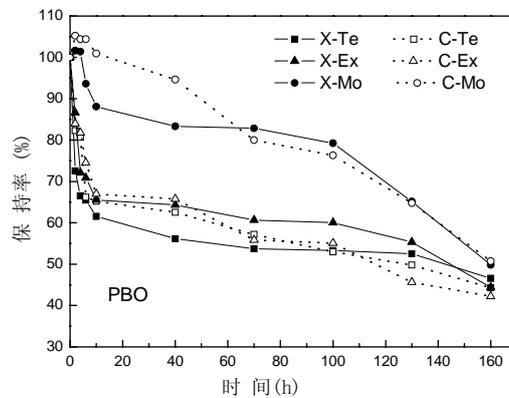


图 7-14 PBO 光照后的力学性能保持率

纤维耐光性的大致排序为：腈纶 > 羊毛 > 麻 > 棉 > 粘胶 > 涤纶 > 锦纶 > 蚕丝。

表 7-11 几种常用纤维日晒后强力损失程度

| 纤维 | 日晒时间 (h) | 强力损失 (%) |
|----|----------|----------|
| 蚕丝 | 200      | 50       |
| 棉  | 940      | 50       |
| 羊毛 | 1120     | 50       |
| 亚麻 | 1100     | 50       |
| 粘胶 | 900      | 50       |
| 腈纶 | 800      | 10~25    |
| 锦纶 | 200      | 36       |
| 涤纶 | 600      | 60       |

## 2. 光照稳定性

## 五、光致发光

纤维的光致发光是激发态分子发生跃迁而辐射出特定波长光的现象。

表 7-12 纤维荧光和磷光颜色及延续时间  $t$

| 纤维名称    | 荧光颜色 | 磷光颜色 | $t$ (秒) |
|---------|------|------|---------|
| 棉纤维     | 淡黄色  | 淡黄色  | 20      |
| 棉 (未成熟) | 淡蓝色  | 淡黄色  | 17      |
| 棉 (丝光)  | 淡红色  | 淡黄色  | 27.5    |
| 丝 (脱胶)  | 淡蓝色  | 淡黄色  | 23.5    |
| 羊毛      | 淡黄色  | 无色   | 12      |
| 黄麻      | 淡黄色  | 黄色   | 15      |
| 亚麻 (生)  | 紫褐色  | 无色   | 5.75    |
| 粘胶      | 白色带紫 | 黄色   | 10      |
| 锦纶      | 淡蓝色  | 淡黄色  | 22.5    |

## 第三节 纤维的电学性质

### 一、导电性质

#### 1. 纤维比电阻及其表达

##### (1) 体积比电阻 $\rho_v$

体积比电阻是指单位长度上所施加的电压  $U$ ，相对于单位截面上所流过的电流  $I$  之比，其值是电阻率，单位  $\Omega \cdot \text{cm}$ 。

$$\rho_v = \frac{U/L}{I/S} = R \cdot \frac{S}{L} \quad (7-11)$$

##### (2) 表面比电阻 $\rho_s$

纤维柔软细长，体积或截面积难以测量，而通常纤维导电主要发生在表面，因此采用表面比电阻  $\rho_s$  表达。 $\rho_s$  是单位长度上的电压 ( $U/L$ ) 与单位宽度上流过的电流 ( $I/H$ ) 之比，单位欧姆  $\Omega$ 。

$$\rho_s = \frac{U/L}{I/H} = R \cdot \frac{H}{L} \quad (7-12)$$

##### (3) 质量比电阻 $\rho_m$

考虑纤维材料比电阻测量的方便，引入质量比电阻  $\rho_m$  概念，即单位长度上的电压 ( $U/L$ ) 与单位线密度纤维上流过的电流 ( $I/(W/L)$ ) 之比，单位是欧姆·克 / 厘米<sup>2</sup> ( $\Omega \cdot \text{g}/\text{cm}^2$ )。

$$\rho = \frac{U/L}{I/(W/L)} = R \cdot \frac{W}{L^2} = \gamma \cdot \rho_v \quad (7-13)$$

表 7-13 纺织纤维的质量比电阻

| 纤维种类    | $\lg \rho_m$ | $n$  | $\lg K$ |
|---------|--------------|------|---------|
| 棉       | 6.8          | 11.4 | 16.6    |
| 苧麻      | 7.5          | 12.3 | 18.6    |
| 蚕丝      | 9.8          | 17.6 | 26.6    |
| 羊毛      | 8.4          | 15.8 | 26.2    |
| 粘胶      | 7.0          | 11.6 | 19.6    |
| 锦纶      | 9~12         |      |         |
| 醋酯      | 11.7         | 10.6 | 20.1    |
| 腈纶      | 8.7          |      |         |
| 腈纶 (去油) | 14           |      |         |
| 涤纶      | 8.0          |      |         |
| 涤纶 (去油) | 14           |      |         |

#### 2. 影响纤维比电阻的主要因素

##### (1) 吸湿对纤维比电阻的影响

$$\rho_m \cdot M^n = K \quad (7-14)$$

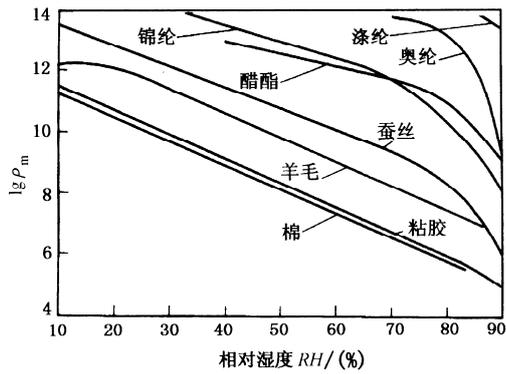


图 7-15 质量比电阻与相对湿度的关系

(2) 温度对纤维比电阻的影响

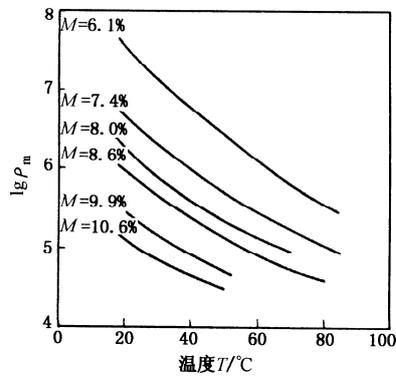


图 7-16 质量比电阻与温度间的关系

(3) 纤维附着物的影响

(4) 其他因素对纤维比电阻的影响

## 二、介电性质

### 1. 介电现象和介电常数

所谓介电现象是指绝缘体材料(也叫电介质) 在外加电场作用下, 内部分子形成电极化的现象。

$$\epsilon_r = \frac{C}{C_0} \quad (7-15)$$

### 2. 常见纺织纤维的介电常数

表 7-14 常见纺织纤维的介电常数

| 纤维        | 介电常数 $\epsilon_r$ |
|-----------|-------------------|
| 棉         | 18                |
| 羊毛        | 5.5               |
| 粘胶纤维      | 8.4               |
| 粘胶丝       | 15                |
| 醋酯短纤维     | 3.5               |
| 醋酯丝       | 4.0               |
| 锦纶短纤维     | 3.7               |
| 锦纶丝       | 4.0               |
| 涤纶短纤维, 去油 | 2.3               |
| 涤纶短纤维     | 4.2               |
| 腈纶短纤维, 去油 | 2.8               |

### 3. 影响纤维介电常数的主要因素

- (1) 纤维内部结构对介电常数的影响
- (2) 外部因素对介电常数的影响

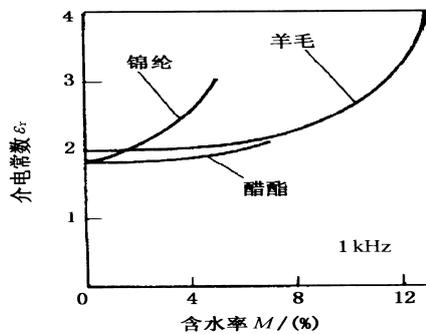


图 7-17 纤维介电常数与含水率的关系

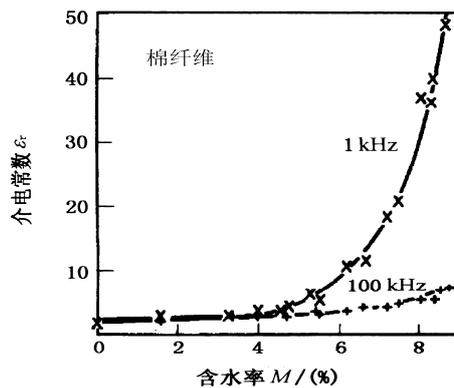


图 7-18 频率对棉纤维介电常数的影响

## 三、介电损耗

### 1. 介电损耗

在交变电场作用下, 纤维材料的极性基团以及纤维内部的水分子会发生极化, 极化分子部分地沿着电场方向定向排列, 并随着电场方向的变换不断地作扭转交变取向运动, 分子间发生碰撞、摩擦、生热, 消耗能量。这种电介质在电场作用下引起发热的能量消耗, 称为介电损耗。

$$P = 0.556 \cdot f \cdot E^2 \cdot \epsilon_r \cdot \text{tg} \delta \cdot 10^{-12} \quad (7-16)$$

## 2. 介电损耗的利用

介电损耗取决于介电常数  $\epsilon_r$  和介电损耗角正切  $\text{tg} \delta$ 。 $\epsilon_r$  和  $\text{tg} \delta$  主要由纤维的组成和结构决定，与电场频率有关。干燥纤维材料的介电常数一般为 2~5， $\text{tg} \delta$  为 0.001~0.05，而水的介电常数为 20~80， $\text{tg} \delta$  为 0.15~1.2，所以水的介电损耗因数至少比干燥纺织纤维大几十倍。

# 四、纺织纤维的静电

## 1. 静电现象

所谓静电现象是指不同纤维材料之间或纤维与其它材料之间由于接触和摩擦作用使纤维或其它材料上产生电荷积聚的现象。

表 7-15 一些织物表面比电阻与电荷半衰期的关系

|                           |                    |                    |                    |                    |                    |                    |                    |
|---------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 织物表面比电阻 $\rho_s (\Omega)$ | $2 \times 10^{10}$ | $2 \times 10^{11}$ | $2 \times 10^{12}$ | $2 \times 10^{13}$ | $2 \times 10^{14}$ | $2 \times 10^{15}$ | $2 \times 10^{16}$ |
| 电荷半衰期 $t_{1/2}(\text{S})$ | 0.01               | 0.1                | 1.0                | 10                 | 100                | 1000               | 10000              |

## 2. 纺织纤维的静电电位序列

当两个绝缘体相互摩擦后分开时，介电常数  $\epsilon_r$  大的取正电荷，小的取负电荷。

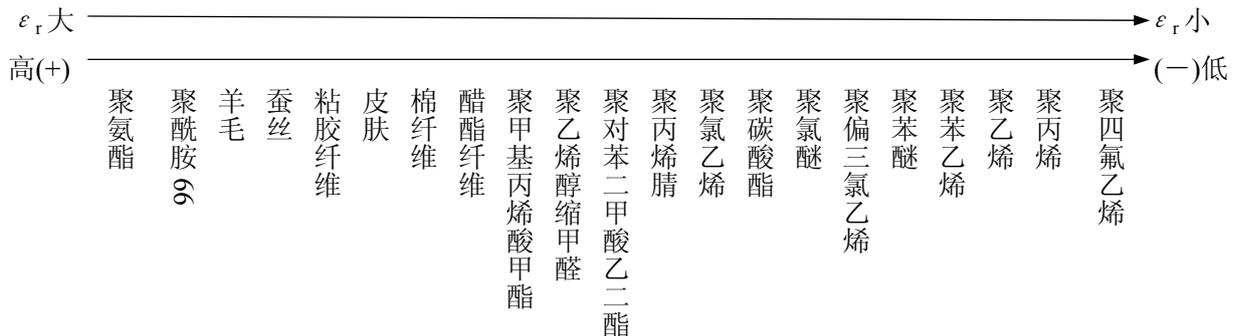


图 7-19 静电起电序列图

## 3. 消除纤维静电现象的主要措施

- (1) 适当提高空气的相对湿度
- (2) 使用抗静电剂
- (3) 采用不同纤维混纺
- (4) 增加纤维导电性或采用导电纤维
- (5) 加工机械的接地与尖端放电。

