



中国机械工程学会无损检测分会 PT培训讲义

本讲义由学会常务委员 晏荣明 编写
(仅供参考)

中国机械工程学会无损检测分会 深圳市无损检测人员培训中心

电话：021-65550277

电话：13538291001

邮箱：chsndt2008@163.com

邮箱：yanrongming@126.com

第二章 渗透检测基础

Chapter 2 Foundations for PT

内 容 **Contents**

- 毛细现象 **Capillarity**
- 吸附现象
- 表面活性
- 乳化现象 **Emulsion**
- 光致发光
- 对比度和可见度 **Contrast & Visibility**

毛细现象

- 分子论
- 表面张力
- 润湿
- 毛细现象

分子论

- 思路:

液体分子间作用力——表面张力——弯曲
液面附加压强——毛细管现象

- 自然界的三种物质形态
气态、液态和固态

分子论

不同的物质介质相接触，出现界面：

液—气界面：跟气体接触的液体薄层称为表面层。

固—气界面

液—液界面

液—固界面：跟固体接触的液体薄层称附着层。

表面张力

- 体积一定的几何形体中，球体的表面积最小。
- 液膜也有自动收缩的现象。这些都说明液体表面有收缩到最小面积的趋势。这是液体表面最基本的特性。
- 把这种存在于液体表面，使液体表面收缩的力称为液体的表面张力，它是液体的基本性质之一。
- 表面张力一般用表面张力系数 α 表示：任一单位长度上的收缩表面的力，方向总与液面相切指向液面缩小。以牛顿/米（N/m）为单位。

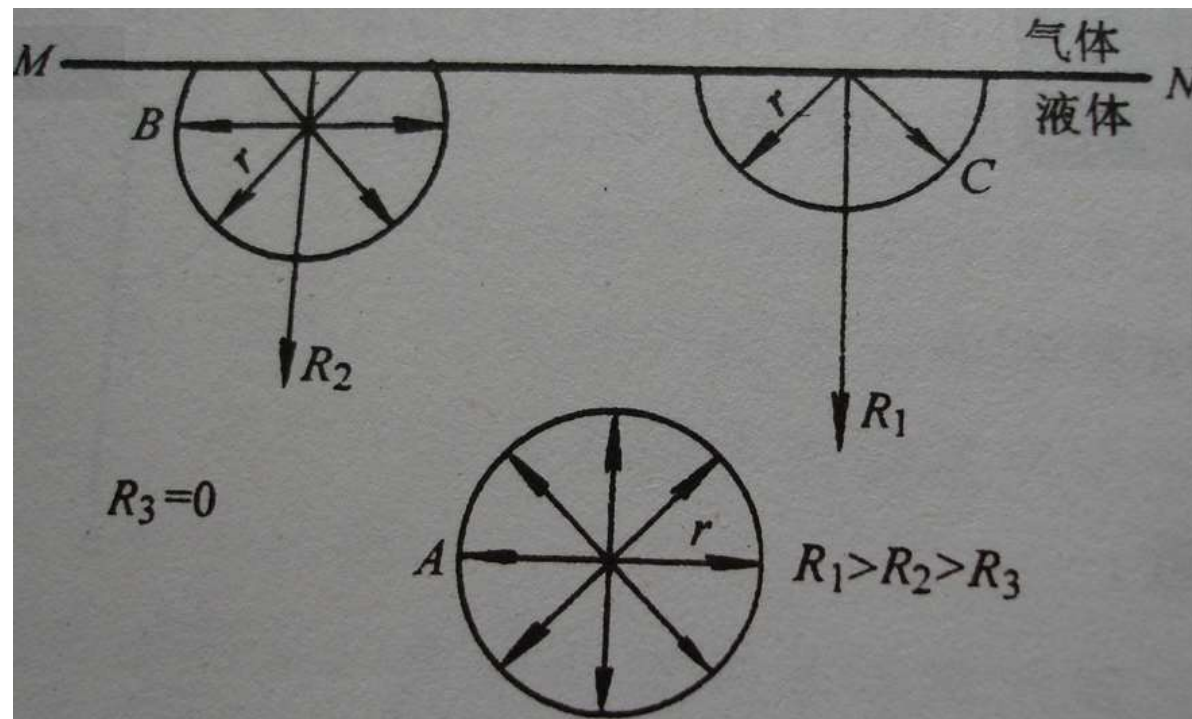
水 $\alpha=72.3 \times 10^{-3}$ 、松节油 $\alpha=28.8 \times 10^{-3}$

表面张力

- 一定成分的液体，在一定的温度下有一定的表面张力系数 α 值。
- 不同的液体， α 值是不同的。
- 一般液体的 α 值随温度上升而下降；少数金属熔融液体（铜、镉）的表面张力系数随温度上升而增高。
- 容易挥发的液体，表面张力系数更小，含有杂质的 α 值也小。

表面张力

- 液体表面层分子和内部分子互相作用



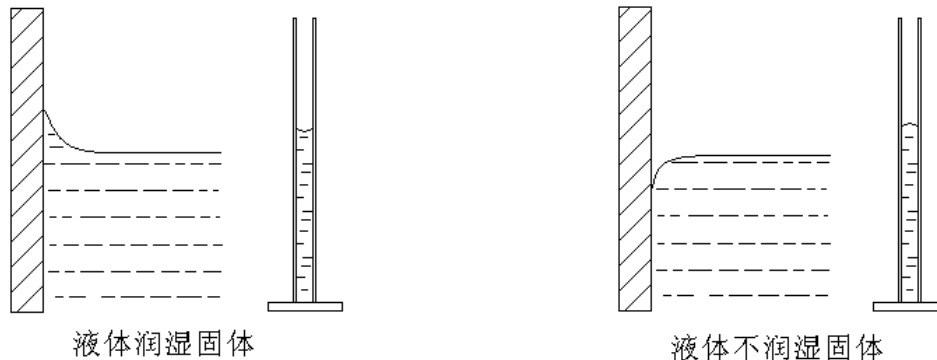
表面张力

- 每一个到液体表面的距离小于分子作用半径 r 的分子，都受到一个指向液体内部的力的作用，处于液体表面的分子，分布比较稀疏，表面分子间存在互相吸引的力，使得液体表面能够实现自行收缩。这就是液体表面张力产生的机理。
- 液体分子间的互相作用力是表面张力产生的根本原因。

润湿

- 润湿现象

表面上的一种流体被另一种流体所取代的过程就是润湿。如固体表面上的气体被液体取代的过程。



- 润湿——凹面，不润湿——凸面。
- 容器的内径越小，这种现象越显著。

润湿

- 一般就把能增强水或水溶液取代固体表面空气的物质称为润湿剂

润湿

- 润湿方程

当液滴停留在固体平面上时，三种界面张力相平衡：

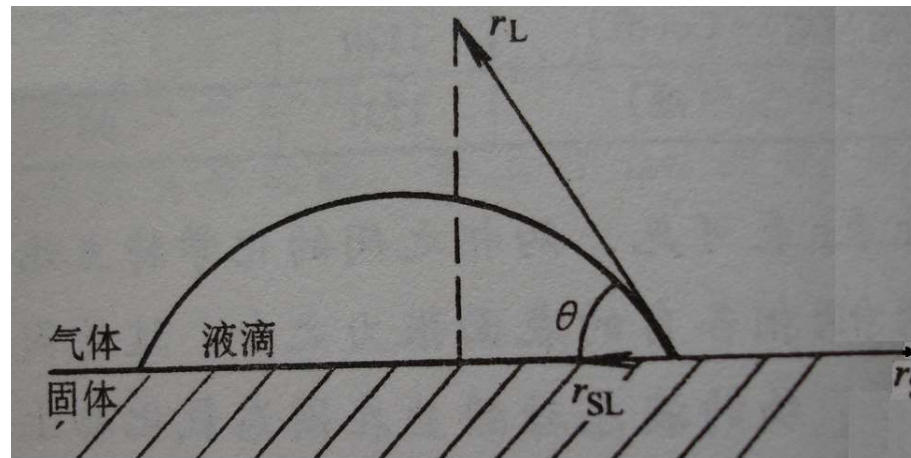


图2-3 接触角

$$\gamma_S - \gamma_{SL} = \gamma_L \cdot \cos\theta$$

$$\cos\theta = \frac{\gamma_S - \gamma_{SL}}{\gamma_L}$$

润湿

- 接触角 θ :

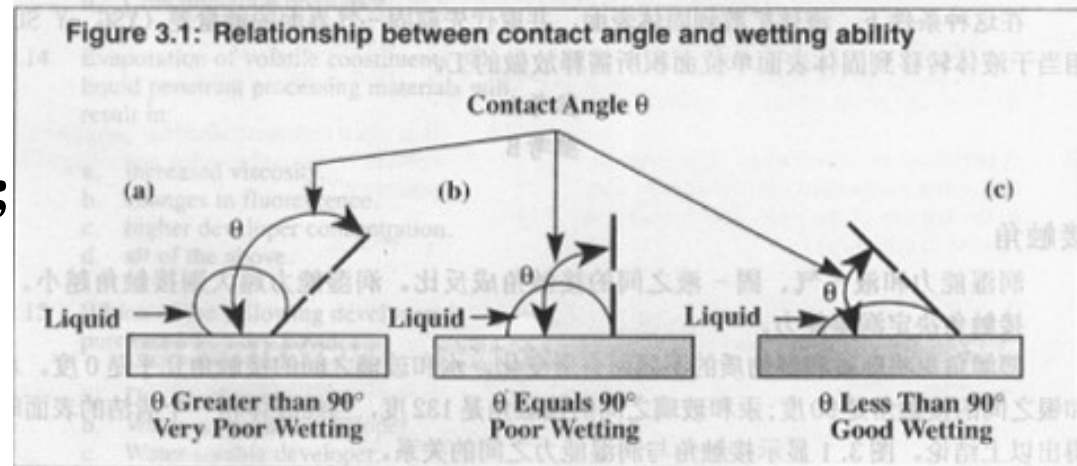
包含液体的气—液界面切线与液—固界面间的夹角。

- 润湿分级:

$\theta=0$: 完全润湿;

$\theta < \theta < 90$: 润湿;

$\theta > 90$: 不润湿



润湿

水—碳素钢 $\theta=51.7^\circ$ 、

水—铜 $\theta=25.3^\circ$

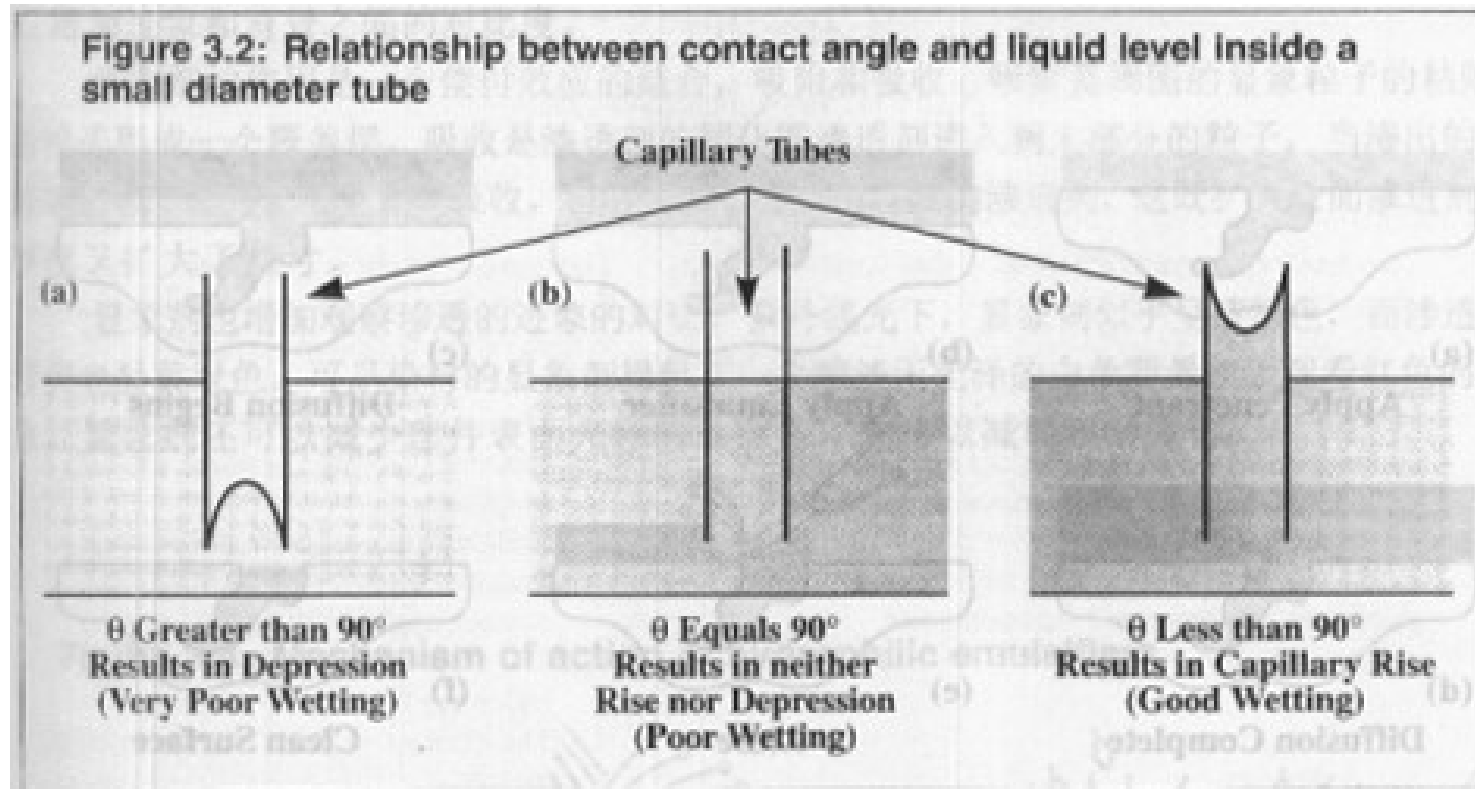
松节油—碳素钢 $\theta=4^\circ$ 、

松节油—铜 $\theta=1.0^\circ$

润湿

- 表面活性剂：加入液体后，使表面张力变小，接触角变小，润湿性能提高。
- 润湿性能：综合反映了液体的表面张力和接触角两种物理性能指标。

润湿



毛细现象——毛细管内液面高度

- 定义：将细管插入液体中，因表面张力和附着力的作用，管内液体可能凹面上升（润湿）或凸面下降（不润湿）

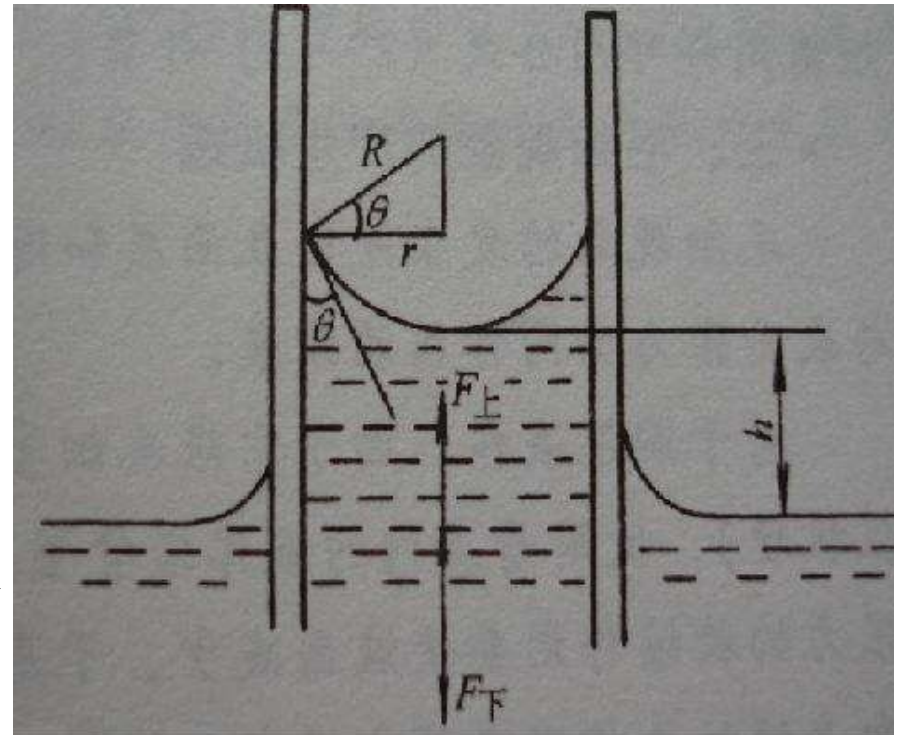
$$h = \frac{2\alpha \cos \theta}{r\rho g}$$

h : 液面上升高度, m

α : 液体表面张力系数, N/m

ρ : 液体密度, kg/m³

r : 毛细管内径, m, θ : 接触角



毛细现象——两平行板内液面高度

$$h = \frac{\alpha \cos \theta}{r \rho g}$$

式中：

h ：液面上升高度，m

α ：液体表面张力系数，N/m

ρ ：液体密度， kg/m^3

r ：两平行板间距的一半，m

θ ：接触角，

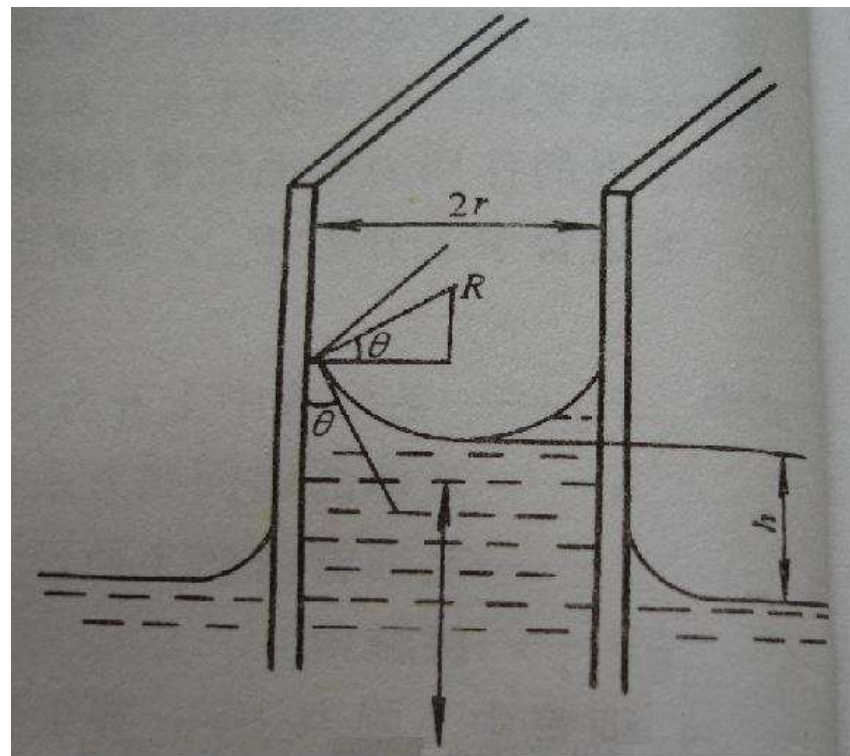
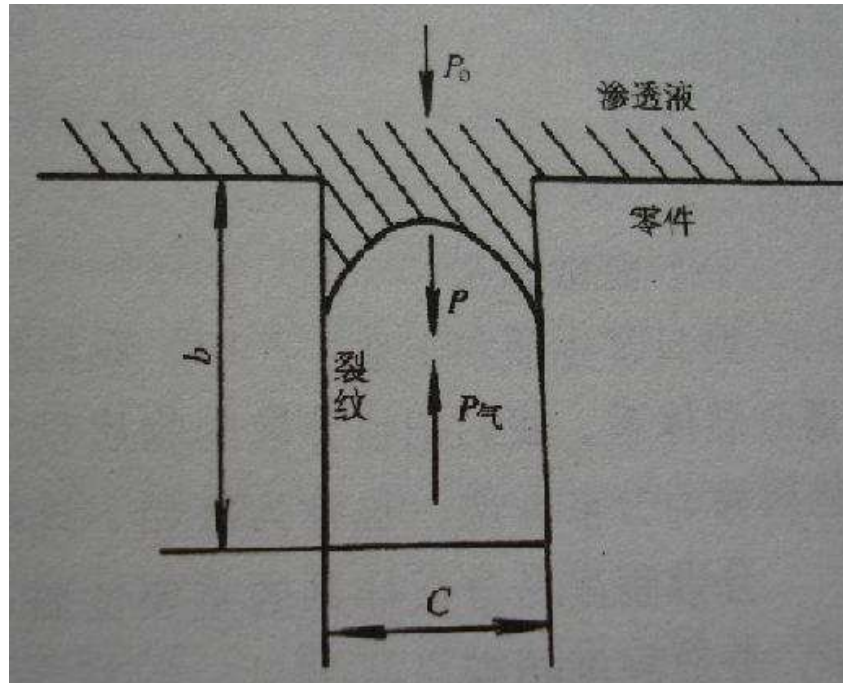


图2-6 两平行板间的毛细现象

毛细现象——两平行板内液面高度

- 平衡： $P + P_0 = P_{\text{气}}$



毛细现象——缺陷内液面高度

- 液面高度:

$$h = \frac{b}{1 + p_0 c / (2\alpha \cos \theta)}$$

h : 渗透剂渗入深度, m α : 液体表面张力系数, N/m

b : 缺陷深度, m , c : 缺陷宽度, m

θ : 接触角, 度, p_0 : 大气压强。

- 要使渗透液完全占有裂纹空间, 就必须将裂纹内气体完全排除 (采取一定的措施)。

毛细现象

- 渗透过程——渗透液对受检表面开口缺陷的渗透作用，实质上是液体的毛细作用。例如，渗透液对表面点状缺陷（如气孔、砂眼等）的渗透，就类似于渗透液在毛细管内的毛细作用；渗透液对表面条状缺陷（如裂纹、夹渣和分层等）的渗透，就类似于渗透液在间距很小的两平行板间的毛细作用。
- 显像过程——渗透液从缺陷中回渗到显像剂中形成缺陷显示痕迹，也是由于毛细作用。

毛细现象

- 显像剂通常有两个基本功能：
 - 吸附足量的从缺陷中回渗到工件表面的渗透剂；
 - 通过毛细作用将渗透剂在工件表面横向扩展，放大缺陷显示提供一个可观察的背景。

吸附现象

- 吸附：物质自一相内部富集于界面的现象即为吸附现象。
- 固体吸附：当固体和液体或气体接触时，凡能把液体或气体中的某些成分聚集到固体表面上来的现象。
- 吸附剂：能起吸附作用的固体，例如显象剂粉末、活性炭、硅胶、分子筛等；
- 吸附质：被吸附在固体表面上的液体或气体，例如显象过程中，显象剂粉末吸附缺陷中回渗的渗透液。

吸附现象

- 吸附量：衡量吸附剂的吸附能力，是指单位质量的吸附剂所吸附的吸附质质量，吸附量数值越大，吸附剂吸附能力越强。
- 固体被用作吸附剂，是因为固体吸附剂有很大的表面积和很大的比表面。

吸附现象

- 吸附现象不仅发生在固体表面，还可发生在液体表面（液—液界面和液—气界面）。
- 在溶液吸附中（溶液是吸附剂），作为吸附剂使用最广的是能降低表面张力和界面张力的表面活性剂。
- 表面活性剂吸附在水表面上（液—气界面）上，能降低水表面的表面张力；表面活性剂吸附在油—水界面上，能降低油—水界面的界面张力。

吸附现象

渗透探伤中的吸附现象

- 显象过程——显象剂粉末吸附从缺陷中回渗的渗透液，从而形成缺陷显示。此吸附现象属于固体表面（固—液界面）的吸附，显象剂粉末是吸附剂，回渗的渗透液是吸附质。显象剂粉末越细，比表面越大，吸附量越多，缺陷显示越清晰。
- 自乳化渗透法或后乳化渗透法——表面活性剂被当作乳化剂使用，吸附在渗透液—水界面，降低了界面张力，使零件表面多余的渗透液得以顺利乳化清洗。

表面活性剂

- 表面活性：凡能使溶剂的表面张力降低的性质。
- 表面活性剂：是这样一种物质，它在加入量很少时，能大大将低溶剂（一般为水）表面张力或液-液界面张力，改变体系界面状态，产生润湿、乳化、起泡及加溶等一系列作用，从而达到实际使用的要求。

表面活性物质：曲线**1**和**2**

表面活性剂：曲线**1**

非表面活性物质：曲线**3**

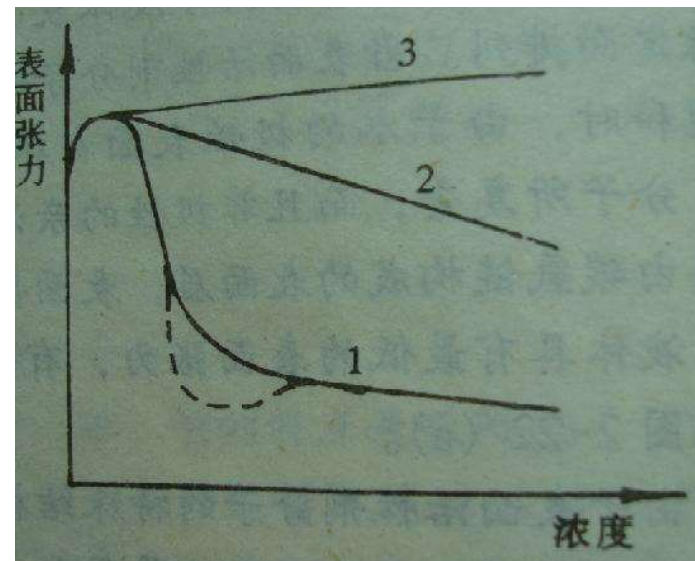


图2-9 表面张力与浓度的关系

表面活性剂

- 表面活性剂的种类

离子型和非离子型，渗透检测常用非离子型。

- 表面活性剂的分子结构

一般总是由非极性的亲油疏水的碳氢链部分和极性的亲水疏油的基团共同组成的，而且这两部分分处两端，形成不对称的结构。因此，表面活性剂分子是一种两亲分子，具有既亲水又亲油的两亲性质。这种两亲分子能吸附在油水界面上，降低油水界面的界面张力；能吸附在水溶液表面上，降低水溶液的表面张力。

表面活性剂

- 表面活性剂的亲水性

非离子型表面活性剂的亲水性，可用亲水基的分子量大小来表示，称为亲憎平衡值，**H.L.B**值：

$$\text{H.L.B} = \frac{\text{亲水基部分的分子量}}{\text{表面活性剂的分子量}} \times \frac{100}{5}$$

H.L.B值越高，亲水性越强。

乳化现象

- 乳化现象：两种本来不相溶解、混合的液体（油水），在表面活性剂作用下，混合到一起，形成乳状液体。
- 乳化剂：具有乳化作用的物质。

乳化现象

- 应用：渗透探伤时，使用后乳化型渗透液，去除零件表面多余的渗透液时，一般使用水包油型乳化剂进行乳化清洗。此时，渗透液是乳化的对象，由于乳化的目的是要将零件表面多余的渗透液清洗掉，故乳化剂还应有良好的洗涤作用。H.L.B值11-15范围内的乳化剂，既具有乳化作用，又有洗涤作用，是比较理想的去除剂。

光致发光

- 光致发光

原来在白光下不发光的物质，在紫外线等外辐射源的作用下，能够发光的现象。

- 光致发光物质：

磷光物质：去除外界光源仍发光

荧光物质：去除外界光源不发光

光致发光

- 可见光与紫外线：
可见光波长：400—760nm；
紫外线波长：4-400nm
- 紫外线与黑光：国际照明组织分类：波长：
UV-A：315—340nm——长波紫外线，用于探伤；
UV-B：280—315nm——中波紫外线，
UV-C：100—280nm——短波紫外线，用于杀菌。

光致发光

- 黑光灯：使用滤波片后波长：320—390nm，
峰值波长：365nm。
- 渗透检测所用荧光染料，波长510—550nm，
呈黄绿色，人眼最敏感。
- 渗透检测用光
着色探伤时，观察时使用白光可由白炽灯、日光灯
或日光等得到。
荧光探伤时，使用紫外线，利用荧光液受紫外线照
射而激发产生荧光这一现象。

对比度和可见度

Contrast & Visibility

- 对比度：显示与本底间亮度与颜色之差。
可用二者发光量之比——对比率表示
 - 黑色显示与白色背景：9: 1
 - 红色显示与白色背景：6: 1
 - 荧光显示与无光背景：300: 1
- 可见度：显示被肉眼看见的清晰度。与对比度、照明、视力有关