

## 超亲水材料的接触角测量

超亲水材料对水的润湿性非常好，水滴在这种材料表面上极易铺展，接触角数值很小，称为极低接触角。

在很多应用领域会涉及到极低接触角的测量。比如液晶屏和太阳能电池板的清洗工序。清洗后有机污染物去除的越彻底，材料表面越清洁则接触角数值越小。工艺上往往要求水滴的接触角小于 $10^\circ$  甚至更低。

利用传统的侧视法接触角测量仪时，如果接触角低于  $15^\circ$ ，测量难度将随着接触角角度的减小而急剧升高，准确性和可靠性下降。当接触角低于约  $5^\circ$  时，几乎很难再得到有意义的结果。这是因为当接触角下降到这一范围时，液滴的侧面图像严重受到侧面光照和样品反光的影响，采用传统侧视成像的方式很难再获得准确的液滴边缘轮廓，这会直接影响接触角的拟合计算。

$$y = 716.0 - 0.000 \cdot x \quad \text{TA} = 0.0 \text{ [deg]}$$



图一 极低接触角的侧面图像

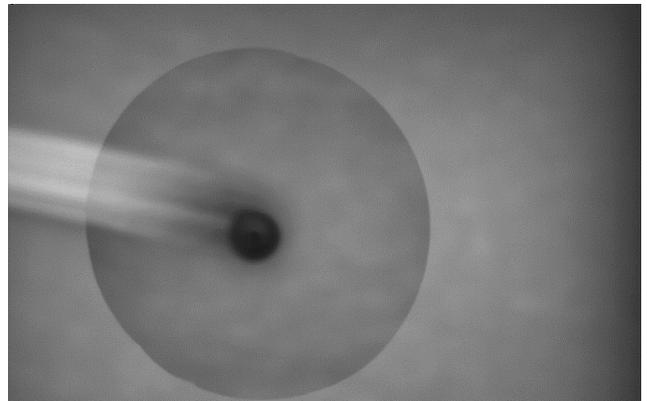
解决极低接触角的测量问题，采用俯视成像方式是一种非常可靠的测量方法。俯视测量法是通过从液滴正上方观测在固体表面上的液滴形状来获得液滴接触角的测量方法。

下图是使用侧视法和俯视法对同一液滴同时拍照得到的照片。显然在接触角  $5^\circ$  左右时侧视法的照片液滴轮廓已经模糊，软件无法自动准确的计算出液滴的边界，而俯视法液滴的三相接触线轮廓清晰可见。

$$y = 716.0 - 0.000 \cdot x \quad \text{TA} = 0.0 \text{ [deg]}$$

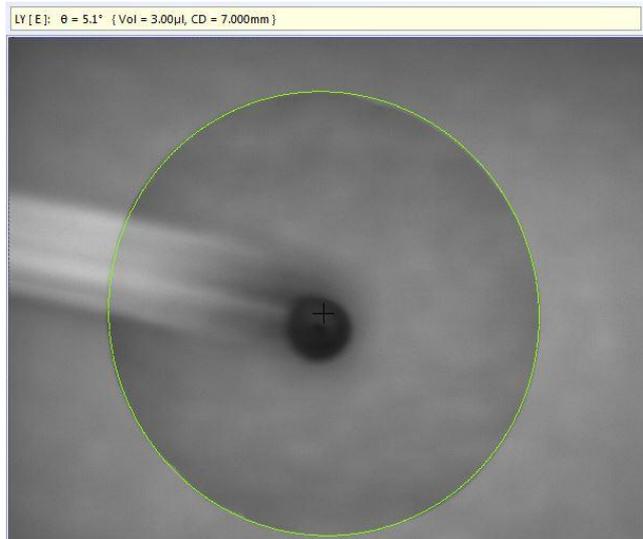


图二 侧视法液滴的照片



俯视法液滴的照片

俯视法接触角测量仪测量范围广,尤其是接触角值极小时依然能够得到准确可靠的测量结果。在此类应用中俯视法和传统侧视法相比,有着明显的优势,是测量超亲水材料接触角的最佳选择。



图三 接触角值 5.1° (液滴体积 3μl, 三相接触线直径 7mm)

#### 附：俯视法测量接触角的原理

俯视法接触角测量技术是基于对 Laplace-Young 模型的深刻理解和准确的运用。早在 19 世纪初 Young 和 Laplace 先后发表了二篇有关表面张力现象和本质的文章,把表面张力与表面二侧的压力差和表面的曲率半径联系起来:

$$\Delta p = \gamma \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$

方程中  $\Delta p$  为表面两侧压力差

$\gamma$  为表面张力

$R_1$  和  $R_2$  为液滴表面正交方向的曲率半径

但是这个看似简单的方程在一般情况下无法求解,直到 1882 年 Bashforth 和 Adams 把中心轴对称前提引入 Laplace-Young 方程推导出了描述处于表面张力和重力平衡时的液滴轮廓的积分方程式:

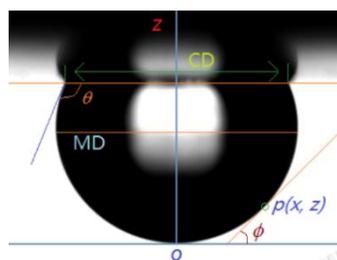
$$2 + \beta \left( \frac{z}{b} \right) = \frac{1}{R/b} + \frac{\sin \phi}{x/b}$$

其中:  $\beta = \frac{b^2 \cdot \Delta \rho \cdot g}{\gamma} = \frac{b^2}{\alpha^2}$

$$\alpha = \sqrt{\frac{\gamma}{\Delta \rho \cdot g}}$$

$\beta$  又称为形状因子

$\alpha$  又称为毛细管常数



方程中  $b$  为液滴底端  $O$  处的曲率半径,可以根据液滴体积和  $CD$  值两个边界条件确定

$R$  为座滴轮廓上一点  $P(x, z)$  在纸平面上的主曲率半径

$\phi$  为轮廓线上点  $P(x, z)$  处的切线与  $x$  轴的夹角

$\Delta \rho$  为液滴相与周围相之间的密度差

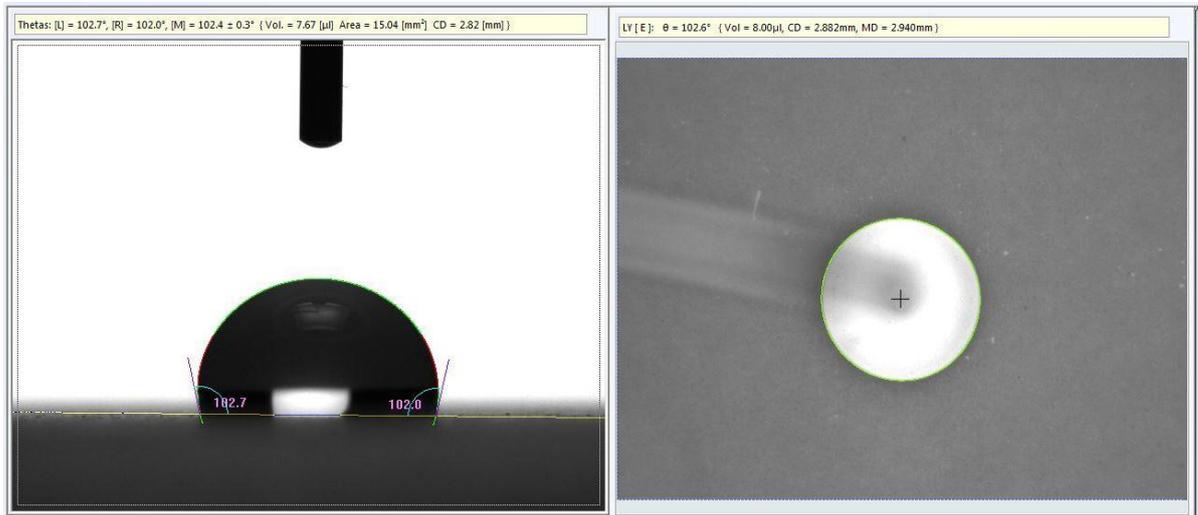
$g$  为重力加速度

$\gamma$  为表面/界面张力

受益于二十世纪末计算机速度的大幅提高和高分辨率数码相机的出现,使得我们对图像数据求解上述方程成为了可能。

简单地说,在已知液体表面张力和密度的前提下,如果我们能够控制液滴的体积并且精确的测量液滴和材料表面三相接触线的形状尺寸,我们就可以利用 Laplace-Young 模型计算出液滴的三维轮廓,从而准确的得到接触角数值。

下图为使用侧视法和俯视法对同一液滴同时测量接触角得到的结果。



侧视法测量接触角 102.4°

俯视法测量接触角 102.6°

注意:根据接触角不同计算模型的特点,一般来说在材料表面均一性较好的情况下,侧视法测量接触角在 0~180° 范围内都可以使用,并且在 130° 以上时侧视法测量结果更为可靠;俯视法测量接触角在 0~180° 范围内都可以使用,并且在 10° 以下时俯视法测量结果更为可靠。